

# Índice

MOTIVAÇÃO E OBJECTIVO.....	1
1. FABRICO DE PARAFUSOS, PERNOS OU REBITES .....	2
1.1 ESTAMPAGEM A FRIO .....	2
1.2 VANTAGENS DA ESTAMPAGEM A FRIO .....	7
1.3 PROCESSO DE ESTAMPAGEM.....	9
1.3.1 <i>Grau de recalçado ou Grau de conformação</i> .....	11
1.3.2 <i>Razão de recalçado</i> .....	12
1.3.3 <i>Extrusão fechada e aberta (livre)</i> .....	14
1.3.4 <i>Como se calcula uma % de redução?</i> .....	15
1.3.5 <i>Extrusão para Trás</i> .....	15
1.3.6 <i>Tipos de máquinas de estampar</i> .....	17
1.3.6.1 <i>Estampagem com Uma Matriz, Um golpe (Single-Stroke)</i> .....	17
1.3.6.2 <i>Estampagem com Uma matriz, Dois Golpes (Single-Die, Double-Stroke)</i> .....	18
1.3.6.3 <i>Estampagem com duas matrizes, Três Golpes (Two Die, Three Blow)</i> .....	18
1.3.6.4 <i>Estampagem em máquinas Progressivas ou Multi-estações</i> .....	19
1.3.6.4.1 - <i>Dimensões na Progressão da Estampagem:</i> .....	21
1.3.6.5 <i>“Boltmakers”</i> .....	22
1.3.6.6 <i>Sistemas de Transfer</i> .....	23
1.3.7 <i>Processo de fabrico</i> .....	24
2. CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES ENTRE A CABEÇA E A DIÂMETRO DA CANA.....	26
2.1 METODOLOGIA DE CONTROLO DA QUALIDADE DA ESTAMPAGEM.....	26
2.2 DISCUSSÃO E PROCEDIMENTOS DA COMUNIDADE CIENTÍFICA .....	30
2.3. TRATAMENTO TÉRMICO PARA MINIMIZAR/ALIVIAR A CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES.....	32
3. DEFORMAÇÃO PLÁSTICA (ENCRUAMENTO).....	33
4. TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	40
4.1 TRATAMENTOS TÉRMICOS DE MATERIAIS FERROSOS .....	45
4.1.1 <i>Recozimento</i> .....	48
4.1.2 <i>Normalização</i> .....	49
4.1.3 <i>Têmpera</i> .....	49
4.1.4 <i>Revenido</i> .....	49
4.1.1.1 <i>Recozimento pleno</i> .....	54
4.1.1.2 <i>Recozimento subcrítico</i> .....	55
4.1.1.3 <i>Esferoidização</i> .....	56
4.1.2.1 <i>Normalização</i> .....	59
4.2 NORMALIZAÇÃO VERSUS RECOZIMENTO .....	60
5. CASO PRÁTICO.....	61
5.1 ESTUDO DE CASOS REAIS .....	61
5.1.1 <i>CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS</i> .....	66
5.1.2 <i>MACROGRAFIA</i> .....	67
5.3 FRAGILIZAÇÃO POR HIDROGÉNIO .....	70
5.3.1 <i>Processos que podem causar a hidrogenização nos parafusos</i> .....	71
5.3.2 <i>Tratamento superficial a utilizar nos parafusos 10.9 ou 12.9, para aplicações em ambiente corrosivo</i> .....	71
6. APLICAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS NA OPTIMIZAÇÃO DE PEÇAS ESTAMPADAS A FRIO .....	72
6.1 <i>CONDIÇÕES FRONTEIRA</i> .....	72
6.2. <i>TESTES DE CONVERGÊNCIA</i> .....	73
6.3. <i>SIMULAÇÃO USANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS</i> .....	73
7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS / CONCLUSÕES.....	78
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

## **Motivação e objectivo**

Esta dissertação, com o título “Tensões Resultantes da Estampagem a Frio entre a Cabeça e a Cana do parafuso, perno ou rebite”, foi desenvolvida para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica e aborda uma temática que é parte integrante da empresa Pecol II, Componentes Industriais, Lda. Desenvolvi esta matéria devido à minha função na empresa, uma vez que realizo funções que exigem um elevado conhecimento técnico, tendo também em conta a variante comercial. Este foi um problema recorrente e este trabalho ajudou-me a identificar as causas e propor soluções.

O objectivo deste trabalho consiste em identificar as tensões internas e alterações estruturais derivadas do processo de estampagem provocadas pela deformação a frio entre a cabeça e cana do parafuso ou perno. Analisar metodologias e possíveis soluções para minimizar a concentração de tensões.

## 1. Fabrico de parafusos, pernos ou rebites

Para o fabrico de elementos de ligação como parafusos, pernos ou rebites é usual a utilização dos processos de estampagem.

### 1.1 Estampagem a frio

Considera-se estampagem a frio sem adição de calor, isto é, todo o processo é realizado à temperatura ambiente. Há algumas excepções, isto é, quando se trata de estampagem com aço inoxidável, em que o material é aquecido antes de estampar. A estampagem a frio é um processo de estampagem a alta velocidade, onde o arame metálico entra na máquina, é cortado na medida correcta para a formação da peça, e depois é transportado com ajuda de *transfers* por sucessivas estações (matriz / punção). Ao longo deste processo o material sofre deformações plásticas, cortes e perfurações.

Os equipamentos de estampagem a frio são tipicamente prensas horizontais, que puxam, cortam e comprimem o arame até se conseguir a forma pretendida. Abaixo apresenta-se uma figura que representa esquematicamente o arame metálico, as matrizes e punções. Esta figura caracteriza a estampagem pelo processo de uma matriz, um golpe.

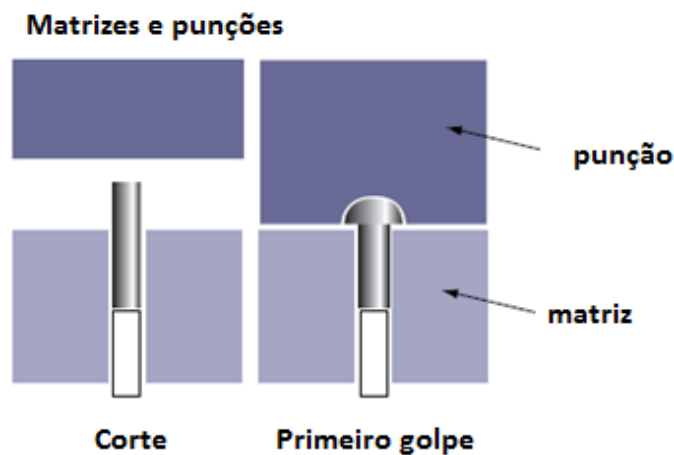
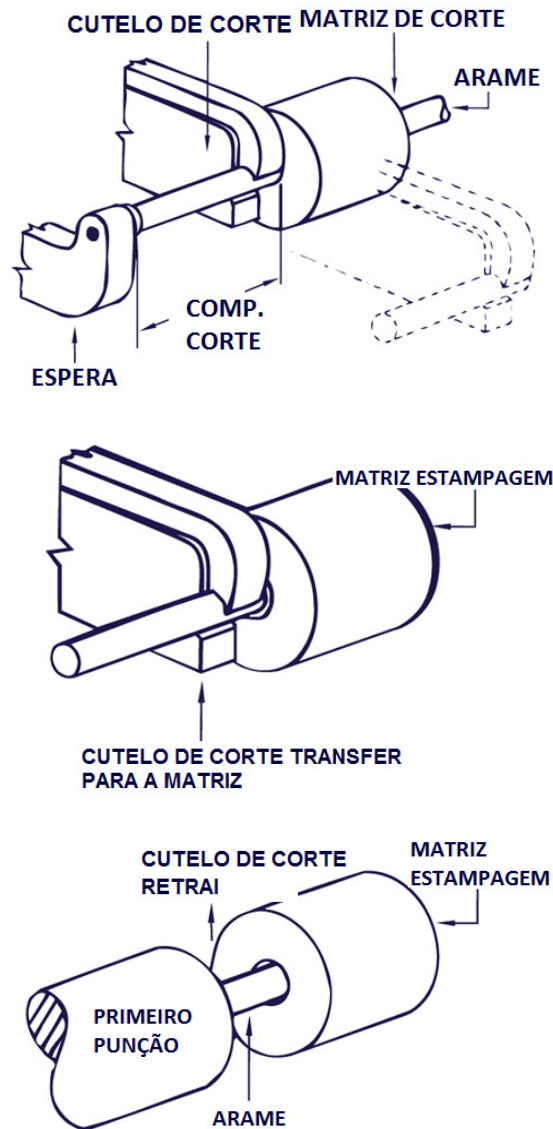


Fig. 1.1.a – Esquema da Matriz e punção para uma máquina de uma matriz, um golpe, para obter parafusos ou pernos muito simples; (Fonte: ACUMENT GLOBAL TECHNOLOGIES – Cold Forming Specials).

A figura seguinte representa esquematicamente as primeiras etapas que ocorrem na máquina de estampar, que são: o corte do material e inserção do mesmo na matriz através de um mecanismo de *transfer*.



**Fig. 1.1.b – Sequência típica de corte do material a partir de rolos de arame;** (Fonte: Introduction to Cold Forming - Carpenter Technology Corporation).

A força deve exceder o limite elástico do metal (limite de elasticidade) para causar deformação plástica, adaptando-se à forma da ferramenta. O material não é deformado para lá do seu limite plástico (excepto quando é cortado ou perfurado).

A matéria-prima pode ser fornecida pelas siderurgias ou trefilarias.



**Fig. 1.1.c – Arame em Fio máquina em rolos armazenados; (Fonte: José Manuel, Formação em Estampagem e Roscagem, Pecol II, 2008).**



**Fig. 1.1.d – Arame em Fio trefilado; (Fonte: José Manuel, Formação em Estampagem e Roscagem, Pecol II, 2008).**

Depois de recepção do arame, ele é submetido a dois processos: decapagem e a fosfatação. O arame fornecido pelas siderurgias depois de ser laminado contém óxido de ferro, a qual deve ser totalmente eliminada para garantir

superfícies lisas e durabilidade da ferramenta durante o processo de estampagem. O processo de decapagem é muito importante e realiza-se de acordo com a sequência que seguidamente se descreve:

Submetem-se os rolos de arame numa solução de ácido sulfúrico com uma concentração de 6% (pode considerar-se útil até 2%), ficando submergidos nesta concentração a uma temperatura entre os 75°C e os 90°C, durante cerca de 40 minutos. Pode também ser utilizadas soluções de ácido clorídrico...

Antes de se realizar a trefilagem, os rolos de arame são fosfatados para que o material adquira uma textura com cavidades que permitam reter o lubrificante, que se deve aplicar para ter maiores velocidades de trefilagem. A textura é totalmente definida pela reacção química do fosfato com o ferro. O banho de fosfatação pode ir dos 5 aos 15 minutos. A figura seguinte representa um exemplo típico de uma linha de decapagem química e fosfatação.



**Fig. 1.1.e - Linha de decapagem e fosfatação; (Fonte: José Manuel, Formação em Estampagem e Roscagem, Pecol II, 2008).**

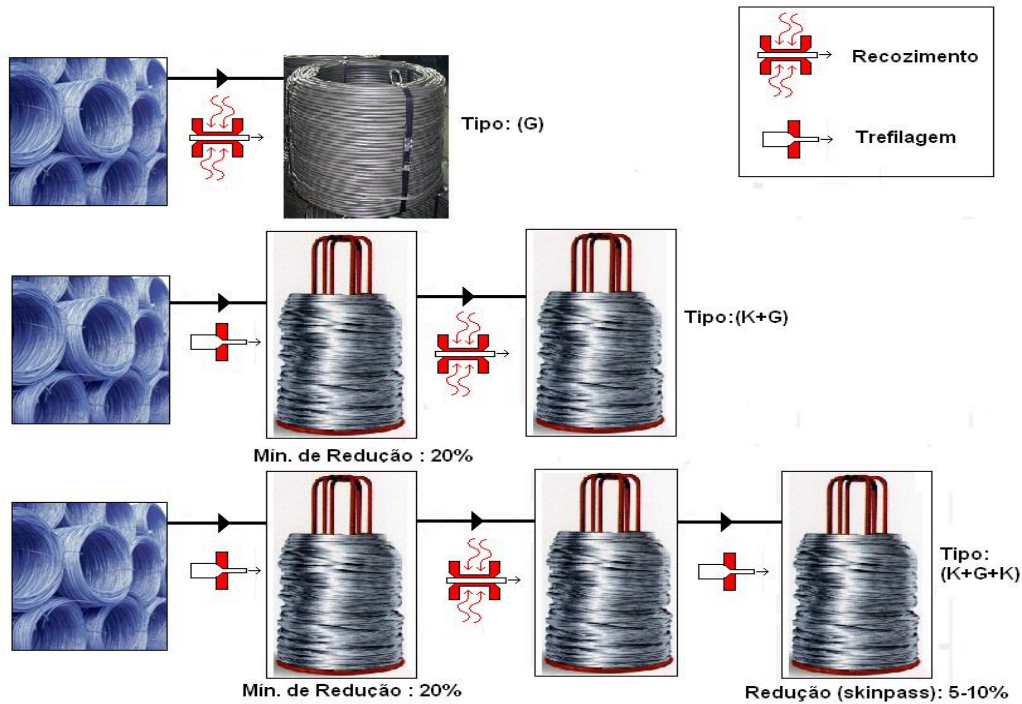
Depois de decapado e fosfatado o material deve ser armazenado em local próprio, protegido do exterior, para uma maior qualidade e durabilidade da fosfatação.

No processo de estampagem podemos encontrar o arame de aço nas seguintes estados:

- **Bruto**
- **Recozido Globular (G)**
- **Trefilado + Recozido Globular (K+G)**
- **Trefilado + Recozido Globular + Trefilado (K+G+K)**

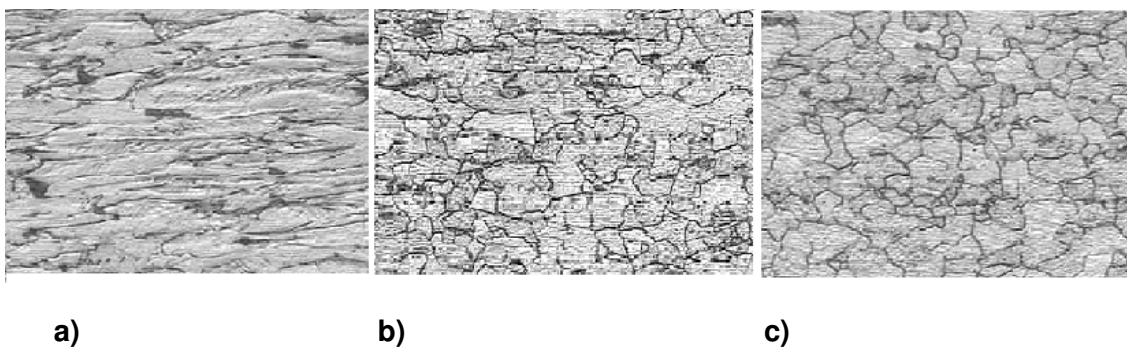
Tipicamente o fio de arame de aço produzido pelas siderurgias (fio máquina) tem um diâmetro mínimo de 5,5 mm.

No esquema da figura seguinte estão representados os vários estados do arame:



**Fig. 1.1.f – Esquema dos diferentes tipos de fio de arame de aço; (Fonte: José Manuel, Formação em Estampagem e Roscagem, Pecol II, 2008).**

Na figura seguinte apresenta-se a microestrutura típica de cada um dos aços usados regularmente em estampagem.



**Fig. 1.1.g – Microestrutura típica dos arames de aço usado em estampagem a frio; (Fonte: José Manuel, Formação em Estampagem e Roscagem, Pecol II, 2008).**

a) Trefilado

b) Recozimento de abrandamento ou sub-crítico

### c) Recozimento Globular

#### 1.2 Vantagens da estampagem a frio

As vantagens da Estampagem a frio, quando comparadas com peças torneadas, podem resumir-se a:

- Maior velocidade de fabrico;
- Possibilidade de fabricar a peça de modo a eliminar ou reduzir segundas operações;
- Consistência e precisão dimensional;
- Melhor qualidade superficial;
- Menor custo do material e eliminação ou redução de sucata;
- Melhoria das propriedades mecânicas, maior resistência.



**Fig. 1.2.a – Peça torneada (esquerda) e peça estampada a frio (direita); (Fonte: ACUMENT GLOBAL TECHNOLOGIES – Cold Forming Specials).**

Na figura acima pode-se visualizar em detalhe a secção de um perno torneado (esquerda) e a secção de componentes formados por estampagem a frio (direita). Pode-se comprovar que na peça torneada o grão é interrompido

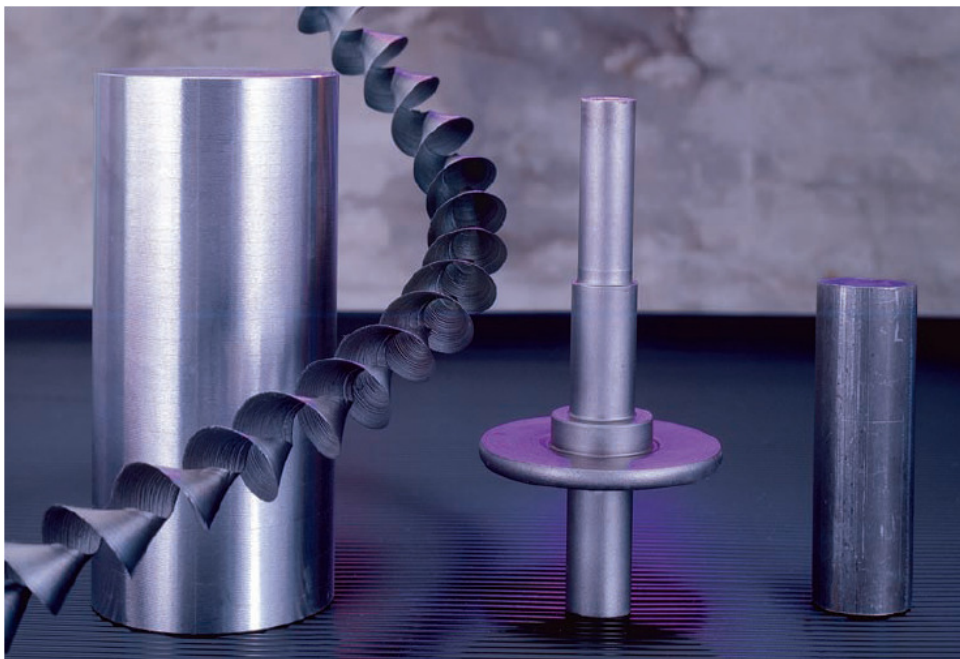
devido ao arranque do material ao passo que na secção da peça estampada o material flui em torno dos cantos críticos, aumentando a resistência, comparativamente com as peças torneadas.

O processo de conformação a frio faz com que a matéria-prima sofra encruamento por deformação e se molde com a forma desejada, existindo um fluxo ininterrupto de grãos que segue o contorno da peça. Proporciona maior resistência à fadiga, especialmente na zona crítica de tensão nos cantos.

Embora essas características de resistência elevada possam eliminar a necessidade de tratamento térmico, a dureza excessiva dos componentes formados a frio podem ser alterada com estes tratamentos, com as vantagens de melhoria de ductilidade e de resistência à fadiga.

As prensas de estampagem a frio podem produzir cerca de 300 peças por minuto. Os parafusos produzidos por mecanização, simples ou múltiplo-fuso, normalmente têm médias inferiores a 50 peças por minuto.

A conformação a frio pode reduzir a sucata em 80% ou até mais em alguns casos. Quando o parafuso é produzido por torneamento apenas se remove material, e isso requer stock de barras de material com o maior diâmetro da peça final, resultando num claro desperdício de material.



**Fig. 1.2.b – Material necessário para a produção da peça (centro) pelo processo de Torneamento (esquerda) e pelo processo de Estampagem (direita); (Fonte: ACUMENT GLOBAL TECHNOLOGIES – Cold Forming Specials).**

Para obter a mesma peça (indicada ao centro) o material necessário para estampagem a frio (à direita) é menor que para o perno torneado (à esquerda).

Perno estampado: 148 gramas/peça.  
 Perno torneado: 1360 gramas/peça.  
 Poupança de material: 1212 gramas/peça.

### 1.3 Processo de Estampagem

No processo de estampagem da cabeça dos parafusos o material é deformado na face da matriz, tendo em atenção o grau de recalco (s) da peça. O recalco é um processo de conformação livre, onde um corte bruto de material, é reduzido por compressão entre duas faces paralelas, geralmente planas, como se pode verificar no esquema da figura seguinte.

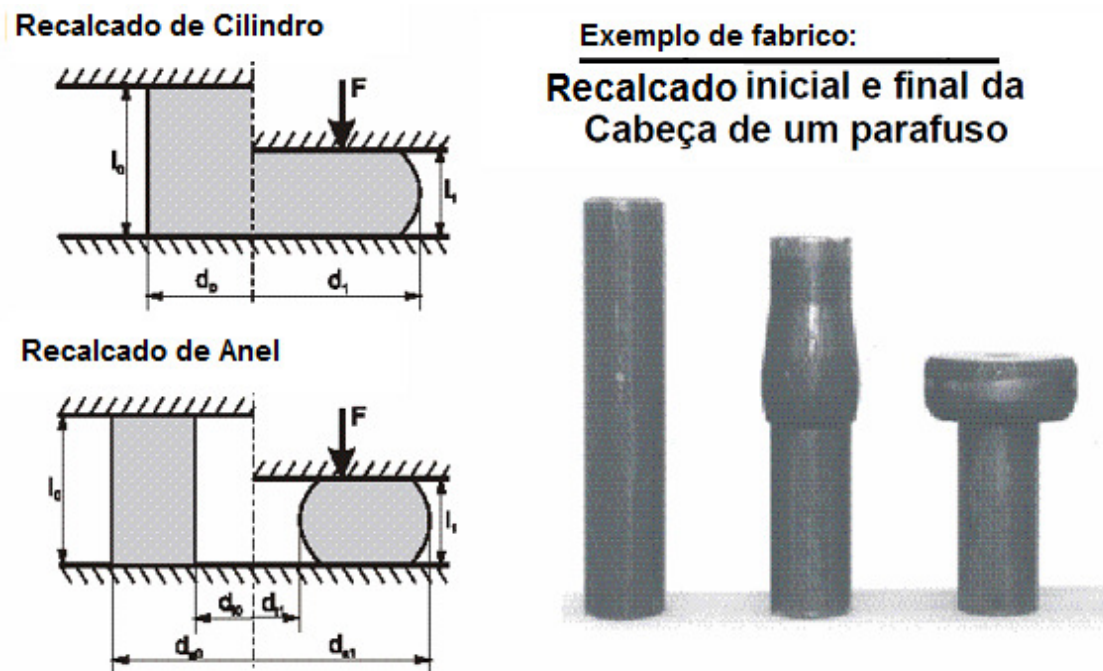


Fig. 1.3.a – Recalco- Modelo experimental e exemplo de peça; (Fonte: PMR 2202 – Introdução a Manufatura Mecânica – G. F. Batalha, 8/10/2003).

O recalco é um processo fundamental da conformação a frio e forjamento. Além disso, é bastante importante para o estudo teórico dos processos de conformação e para o ensaio de materiais. Pode ser classificado como:

- Recalco a frio: peças pequenas, força reduzida, alta precisão, bom acabamento;

- Recalcado a quente: peças grandes e complexas, redução de forças através do aquecimento, mau acabamento superficial, necessidade de re-trabalho.

O coeficiente de atrito  $\mu$  depende de:

- Lubrificante, da rugosidade e acabamento superficial
- Par peça / ferramenta
- Temperatura

$\mu = 0,05 \dots 0,15$  no recalcado a frio

$\mu = 0,25 \dots 0,5$  no recalcado a quente

A figura seguinte mostra o estado de tensões com e sem atrito no recalcado:

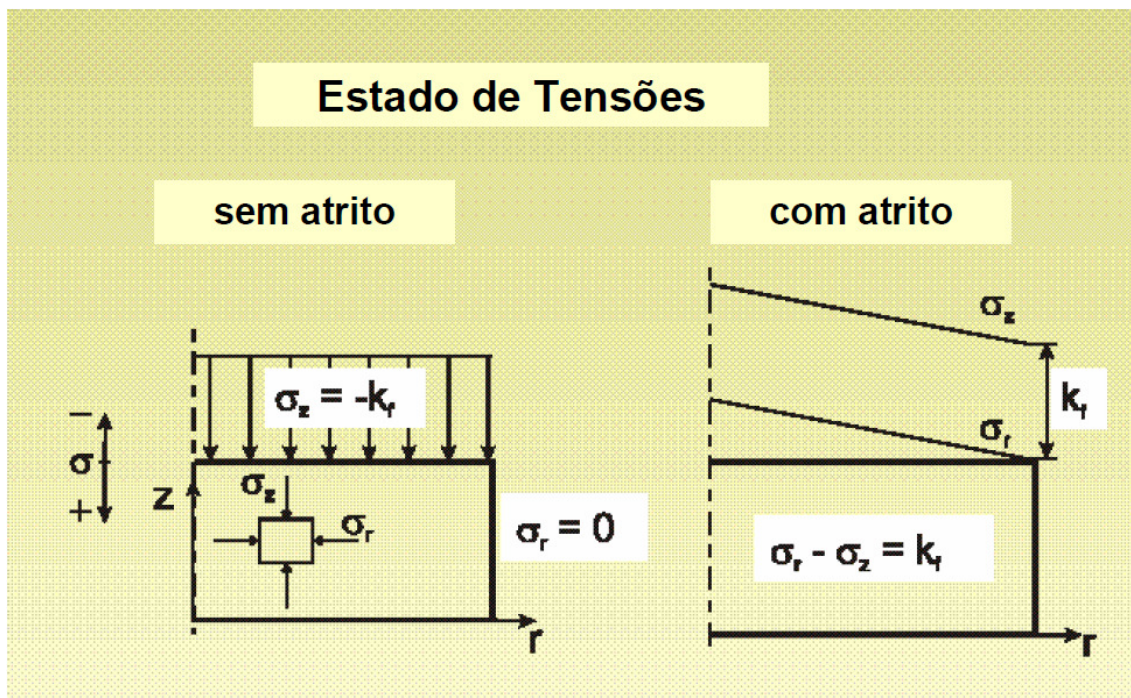


Fig. 1.3.b – Estado de tensões no recalcado com e sem atrito; (Fonte: PMR 2202 – Introdução a Manufatura Mecânica – G. F. Batalha, 8/10/2003).

### 1.3.1 Grau de recalçado ou Grau de conformação

O grau de recalçado pode ser quantificado pela equação (1):

$$\varphi = \ln (l_1/l_0) = \ln (A_0/A_1), \quad (1)$$

No esquema da figura abaixo estão representados respectivamente o  $l_0$  e o  $l_1$ .

O grau de deformação máximo indica o limite de conformação do material da peça. Quando ele é ultrapassado surgem fissuras na periferia da peça, assim:

$|\varphi_{\text{máx}}| = 1,6$  no recalçado a frio de aços.

$|\varphi_{\text{máx}}| > 1,6$  no recalçado a quente, ( sem encruamento).

De seguida está representado esquematicamente o processo de recalçado duplo (pré-recalçado e recalçado final).

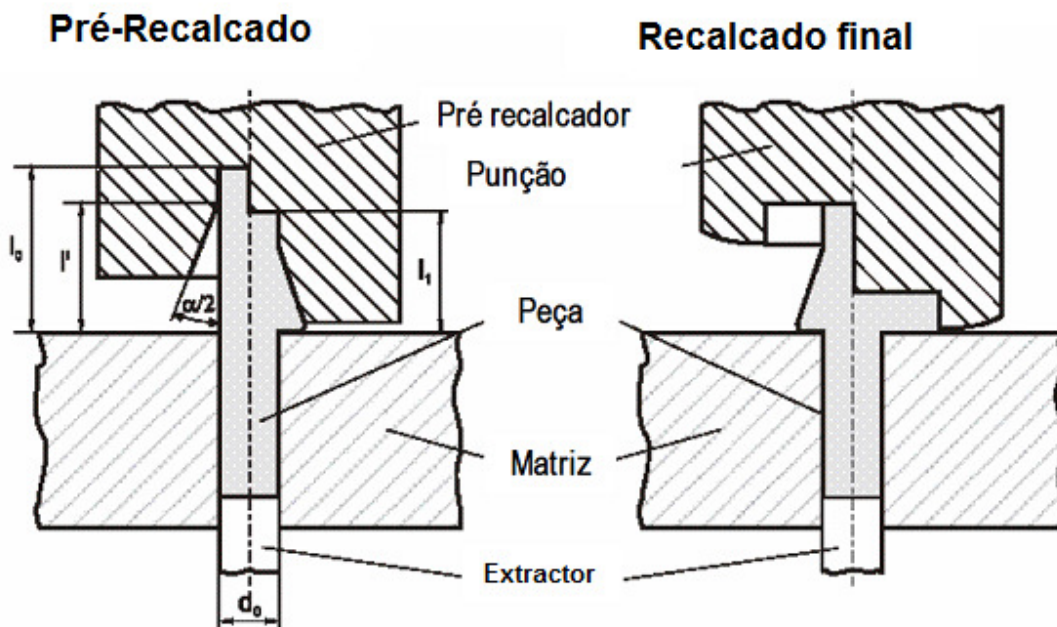


Fig. 1.3.1.a – Processo de recalçado duplo (pré-recalçado e recalçado final); (Fonte: PMR 2202 – Introdução a Manufatura Mecânica – G. F. Batalha, 8/10/2003).

### 1.3.2 Razão de recalcado

A equação (2) traduz a razão de recalcado

$$s = l_0 / d_0, \quad (2)$$

s: depende da geometria, da superfície e do paralelismo do punção de compressão, da peça, do estado do material bom como do lubrificante. No recalcado a frio os valores de recalcado são:

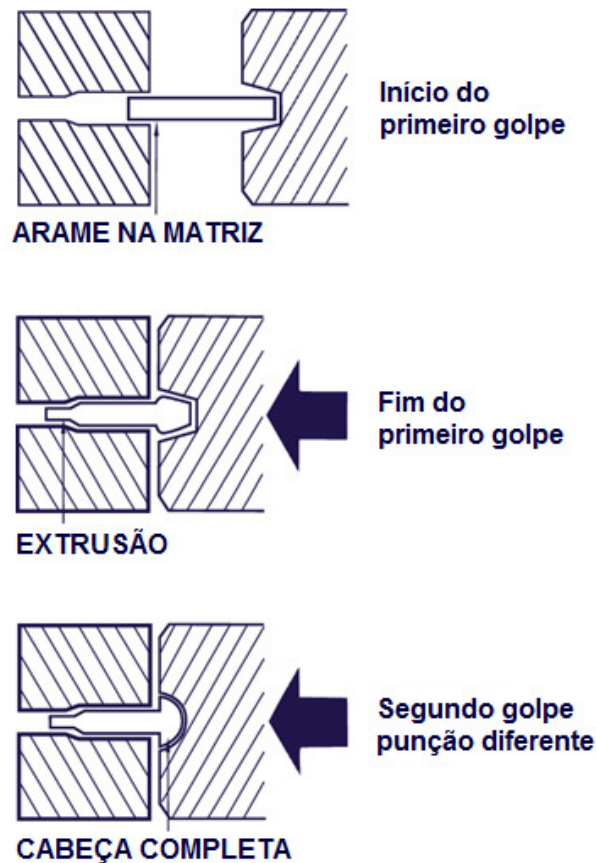
$s \leq 2,3$                       processo de compressão simples (1 Golpe)

$s \leq 4,5$                       processo de compressão duplo ( 2 Golpes)

$s > 4,5$  até 20              processo de compressão múltiplo.

Para uma razão de recalcado muito alta, pode ocorrer flambagem da peça. Em processos de recalcado duplo e múltiplo a peça é guiada por um pré-recalador onde é simultaneamente reduzida até ao comprimento da peça recalcada.

A estampagem pode ser fechada ou aberta (livre) conforme a forma que se queira obter. Abaixo processo simples de estampagem a frio usando apenas uma matriz e dois golpes.



**Fig. 1.3.2.a – Método típico de fabrico de rebites (fasteners): uma matriz, dois golpes; (Fonte: Introduction to Cold Forming - Carpenter Technology Corporation).**

A figura acima esquematiza o processo típico. Uma matriz e dois golpes, que é o mais comum para produzir rebites e parafusos com cabeças simples. O primeiro golpe combina a pré-cabeça (pré-recalcado) com a redução livre ou aberta do arame na matriz. O segundo golpe finaliza a forma da cabeça da peça.

De seguida representam-se os vários métodos de formação de cabeças:

1. Cabeça formada no punção
2. Cabeça formada na matriz
3. Cabeça formada no punção e na matriz
4. Cabeça formada entre o punção e a matriz (*free upset*).

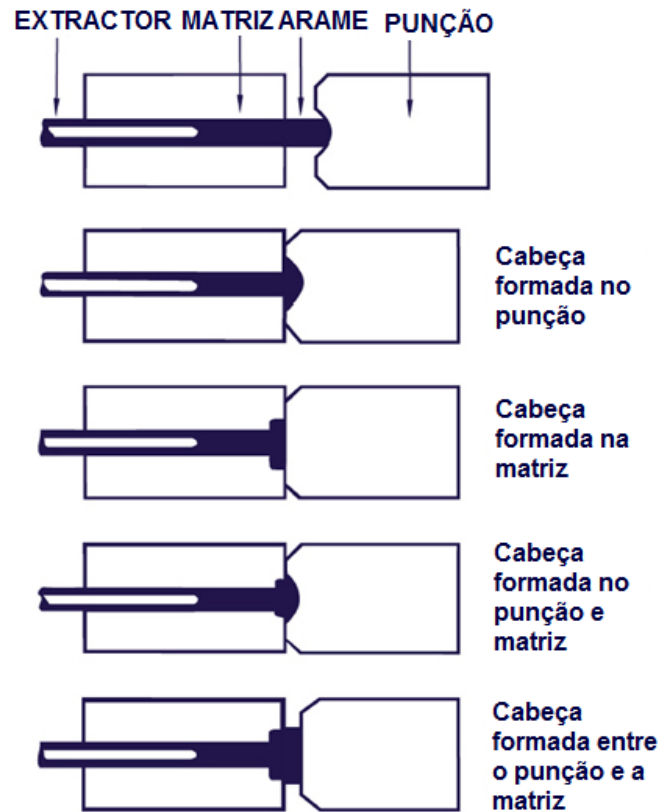


Fig. 1.3.2.b – A formação da cabeça é realizada usando um dos quatro métodos; (Fonte: Introduction to Cold Forming - Carpenter Technology Corporation).

### 1.3.3 Extrusão fechada e aberta (livre)

Nas figuras seguintes apresenta-se a sequência de deformação plástica para reduzir o diâmetro, dependendo da percentagem de redução pode ser extrusão fechada e aberta.

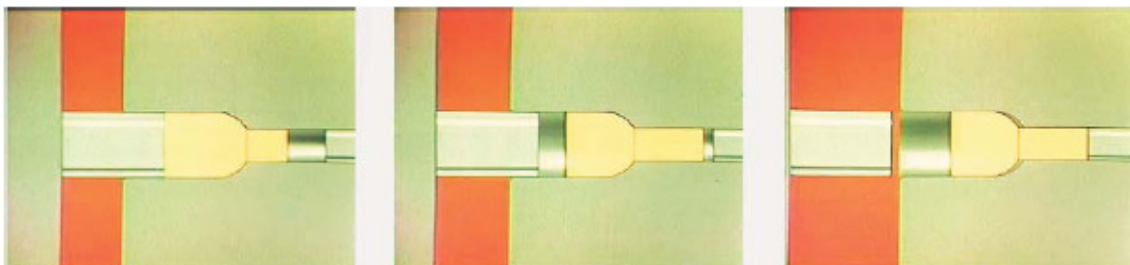


Fig. 1.3.3.a – Método para reduzir o diâmetro, por extrusão fechada; (Fonte: José Manuel, Formação em Estampagem e Roscagem, Pecol II, 2008).

### Extrusão Aberta

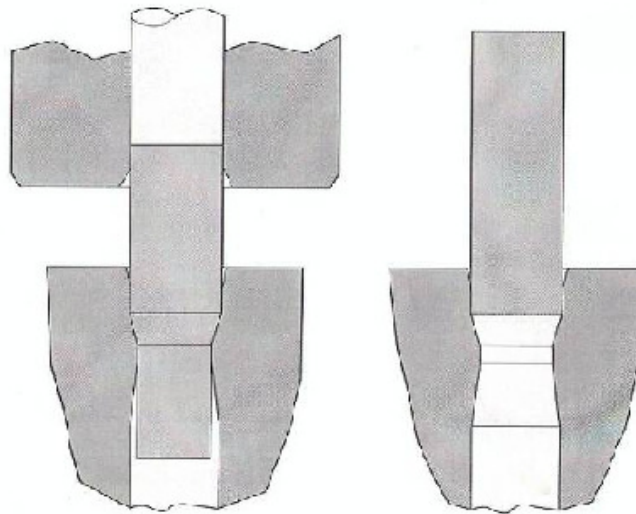


Fig. 1.3.3.b – Método para reduzir o diâmetro por extrusão aberta; (Fonte: José Manuel, Formação em Estampagem e Roscagem, Pecol II, 2008).

#### 1.3.4 Como se calcula uma % de redução?



$$\frac{\text{Área } D - \text{Área } d}{\text{Área } D} \times 100 = \% R.A.$$

$$A = \pi r^2$$

Os valores típicos de redução de área são:

- Extrusão Fechada: 70 – 75 %
- Extrusão Aberta: 30 – 35 %

#### 1.3.5 Extrusão para Trás

A seguir representa-se esquematicamente o método que consiste em fazer o material fluir para trás, através da pressão de um punção, com o intuito de obter furos.

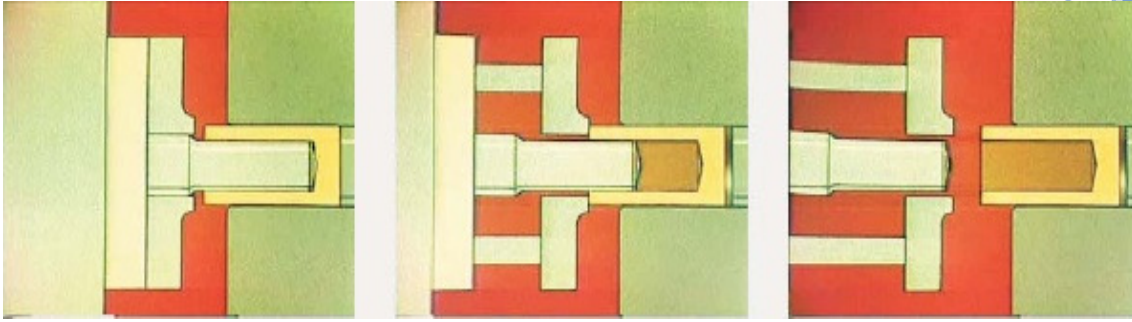


Fig. 1.3.5.a – Esquema de fabrico através de extrusão para trás; (Fonte: José Manuel, Formação em Estampagem e Roscagem, Pecol II, 2008).

- Os limites de redução são:
  - Mínima: 20 – 25 %
  - Máxima: 70 – 75 %

$$\frac{\text{Área } d \text{ int}}{\text{Área } D \text{ ext}} = \% \text{ R.A.}$$

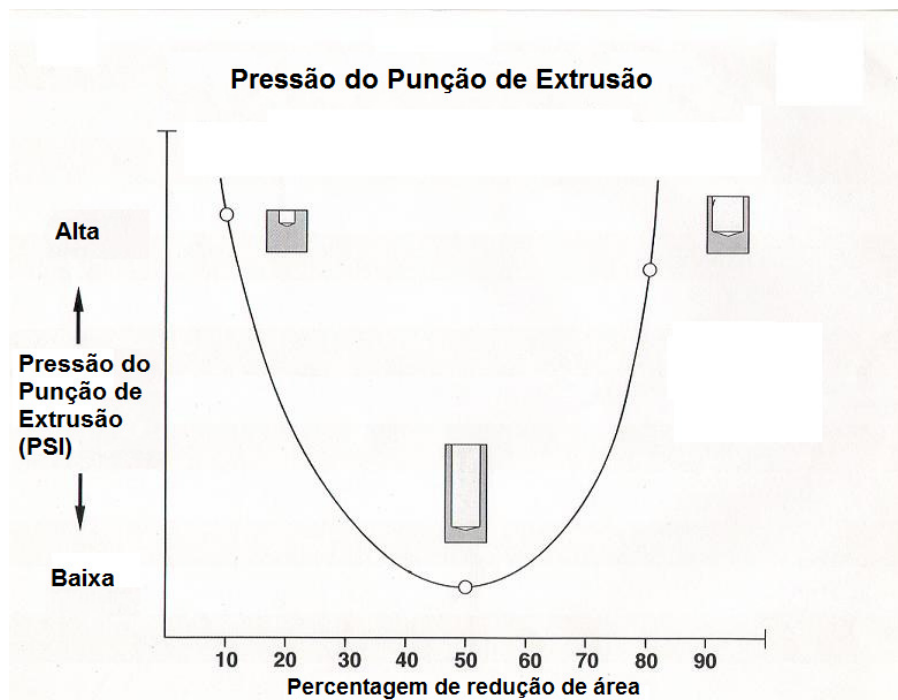


Fig. 1.3.5.b – Gráfico que demonstra como varia a pressão de extrusão em função da % da redução; (Fonte: José Manuel, Formação em Estampagem e Roscagem, Pecol II, 2008).

Da análise do gráfico percebe-se que quanto mais próximo dos 50% for a percentagem de redução, maior é a durabilidade da ferramenta.

### 1.3.6 Tipos de máquinas de estampar

As máquinas de estampar podem agrupar-se em vários grupos conforme a sua concepção e modo de funcionamento.

- 1 Matriz, 1 Golpe
- 1 Matriz, 2 Golpes
- 2 Matrizes, 2 Golpes
- 2 Matrizes, 3 Golpes
- 2 Matrizes, 4 Golpes
- 4 Matrizes (4 estações)
- 5 Matrizes (5 estações)
- 6 Matrizes (6 estações)
- 7 Matrizes (7 estações)

As máquinas podem ter muitas variações de acordo com o tipo de peças que se pretendem produzir. As principais diferenças são as seguintes:

- Mínimo e máximo diâmetro de corte
- Mínimo e máximo comprimento de fabrico
- Tonelagem (força)
- Tipo de *transfer*
- Tipologia (nº matrizes e nº punções)

#### 1.3.6.1 Estampagem com Uma Matriz, Um golpe (*Single-Stroke*)

Máquina com apenas uma matriz, um punção e é usada para fazer peças simples de 1 só golpe. Normalmente, para este tipo de peças, a razão de recalco (s) é menor ou igual a 2,3!

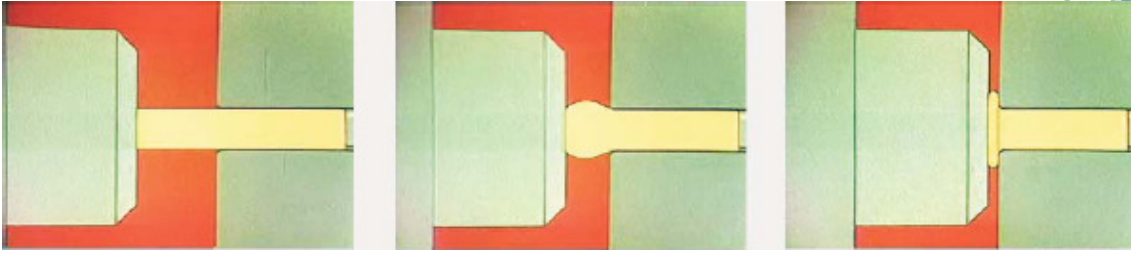


Fig. 1.3.6.1.a – Sequência de estampagem segundo o processo com uma matriz e um golpe; (Fonte: José Manuel, Formação em Estampagem e Roscagem, Pecol II, 2008).

### 1.3.6.2 Estampagem com Uma matriz, Dois Golpes (*Single-Die, Double-Stroke*)

Geralmente considerada a mais versátil e extensamente usada. Inclui uma matriz, dois punções, e produz a maioria dos parafusos simples. Algumas destas máquinas são projectadas também para produção de rebites tubulares.



Fig. 1.3.6.2.a - Exemplo de uma peça fabricada numa Matriz e dois Golpes; (Fonte: ACUMENT GLOBAL TECHNOLOGIES – Cold Forming Specials).

### 1.3.6.3 Estampagem com duas matrizes, Três Golpes (*Two Die, Three Blow*)

Inclui duas matrizes e três punções, e o design assemelha-se às máquinas de dois golpes. Tem como vantagem expulsar ou virar na primeira matriz, com dois golpes para formar a cabeça (pré-cabeça e forma final) ou formar a cabeça e cortar, aplicando-se tipicamente quando se trata de parafusos de cabeça *sextavada*. O esquema sequencial do fabrico de parafusos é indicado na figura seguinte:

## Processo Duas Matrizes, Três Golpes

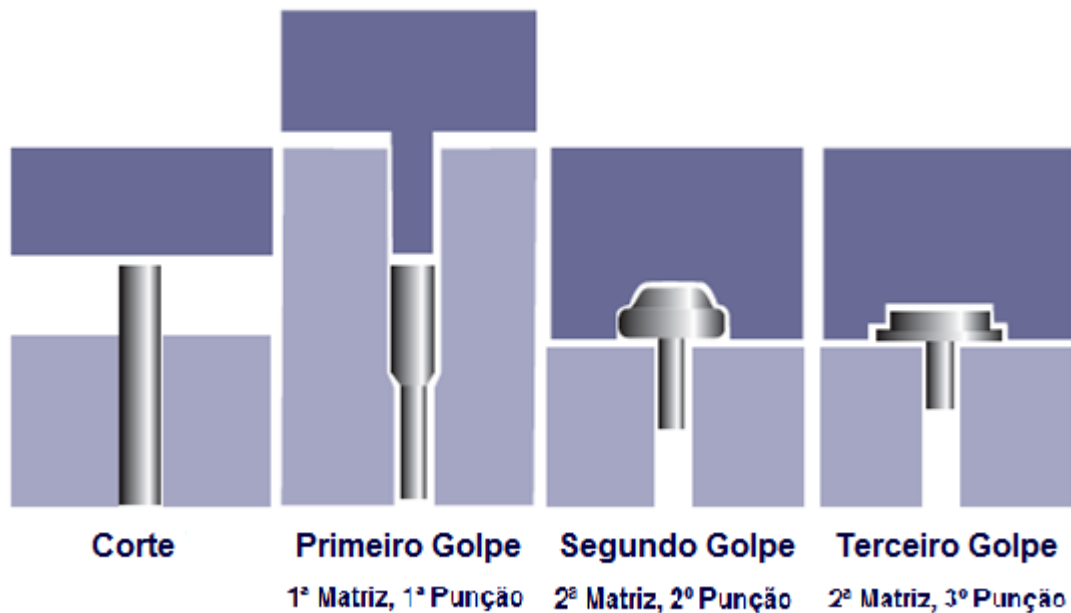


Fig. 1.3.6.3.a – Sequência de fabrico para peça produzida em 2 matrizes – 3 Golpes; (Fonte: ACUMENT GLOBAL TECHNOLOGIES – Cold Forming Specials).

### 1.3.6.4 Estampagem em máquinas Progressivas ou Multi-estações

Máquinas que podem ir até 7 estações ou 7 sequências de conformação, a maioria têm duas a cinco matrizes com igual número de punções. Um mecanismo de *transfer* move as peças desde o corte até às sucessivas matrizes. O material é sujeito a múltiplos golpes e/ou rotação, combinados com extracções, perfurações e cortes, fazendo destas máquinas ideais para a produção contínua de peças.

Nas figuras seguintes visualizam-se uma máquina de 5 estações e um exemplo da sequência de estampagem de uma peça para uma máquina deste tipo.

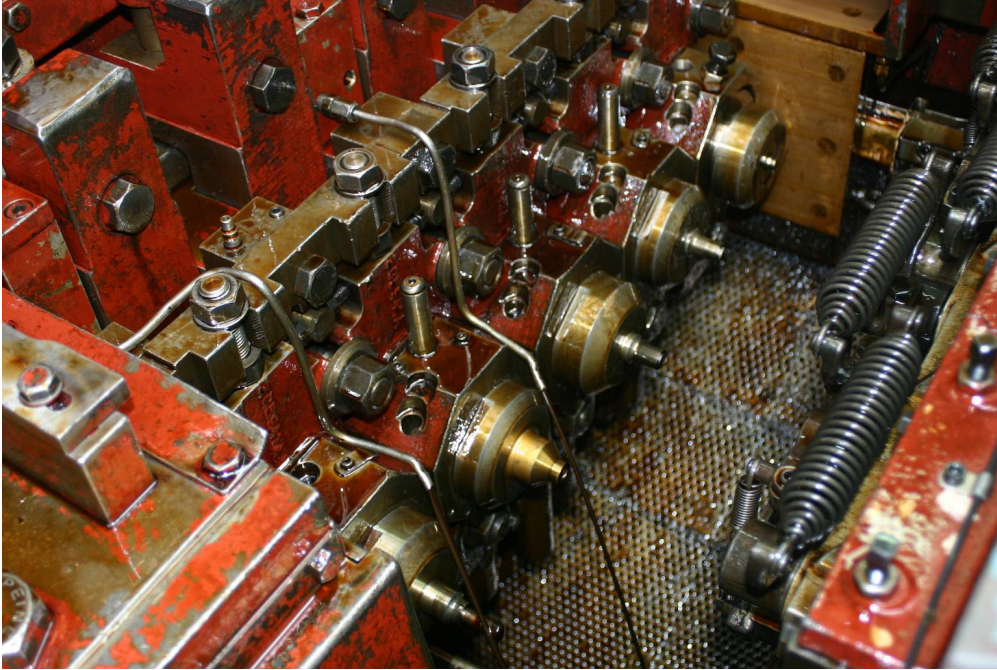


Fig. 1.3.6.4.a – Vista de máquina de 5 estações; (Fonte: José Manuel, Formação em Estampagem e Roscagem, Pecol II, 2008).

### Processo de Conformação com Matrizes múltiplas

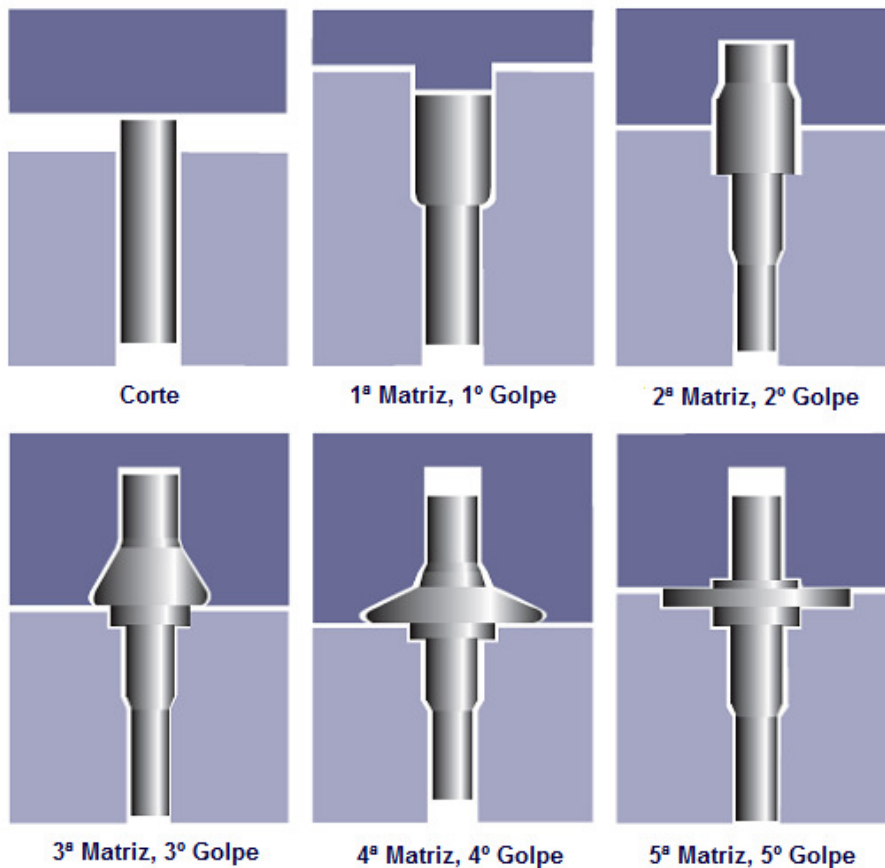


Fig. 1.3.6.4.b – Sequência de estampagem de uma peça fabricada em 5 estações; (Fonte: ACUMENT GLOBAL TECHNOLOGIES – Cold Forming Specials).



**Fig. 1.3.6.4.c – Exemplo de uma peça fabricada em 5 estações; (Fonte: ACUMENT GLOBAL TECHNOLOGIES – Cold Forming Specials).**

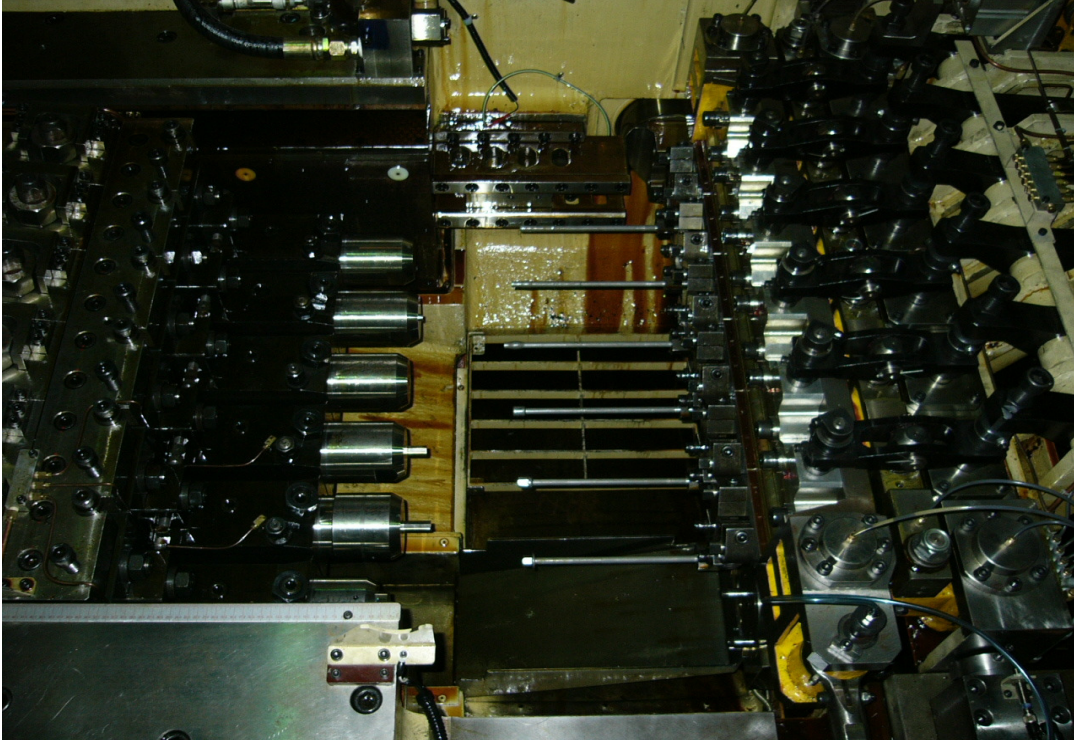
#### 1.3.6.4.1 - Dimensões na Progressão da Estampagem:

De seguida é apresentada uma tabela com as principais dimensões da peça referida anteriormente no corte e na última estação:

Dimensões (mm)	Corte	Peça terminada
Comprimento	62,55	98,06
Diâmetro	18,28	Maior → 46,91 Menor → 9,488

**Tab. 1 – Principais dimensões no corte e na última estação.**

Abaixo figura/fotografia de uma máquina mostrando a sua área de estampagem, onde se visualiza claramente os punções (móveis) do lado esquerdo, as matrizes do lado direito (fixas), onde estão inseridas as peças de cada estação. O mecanismo de *transfer* está colocado por cima das matrizes.



**Fig. 1.3.6.4.d – Exemplo de máquina de 6 estações; (Fonte: José Manuel, Formação em Estampagem e Roscagem, Pecol II, 2008).**

### **1.3.6.5 “Boltmakers”**

Estas máquinas combinam estampagem, ponteio e roscado, sendo também por isso designadas máquinas combinadas. Este tipo de máquinas é útil porque elimina a necessidade de transportes entre as várias máquinas/operações, bem como as operações de lavagem intermédias.

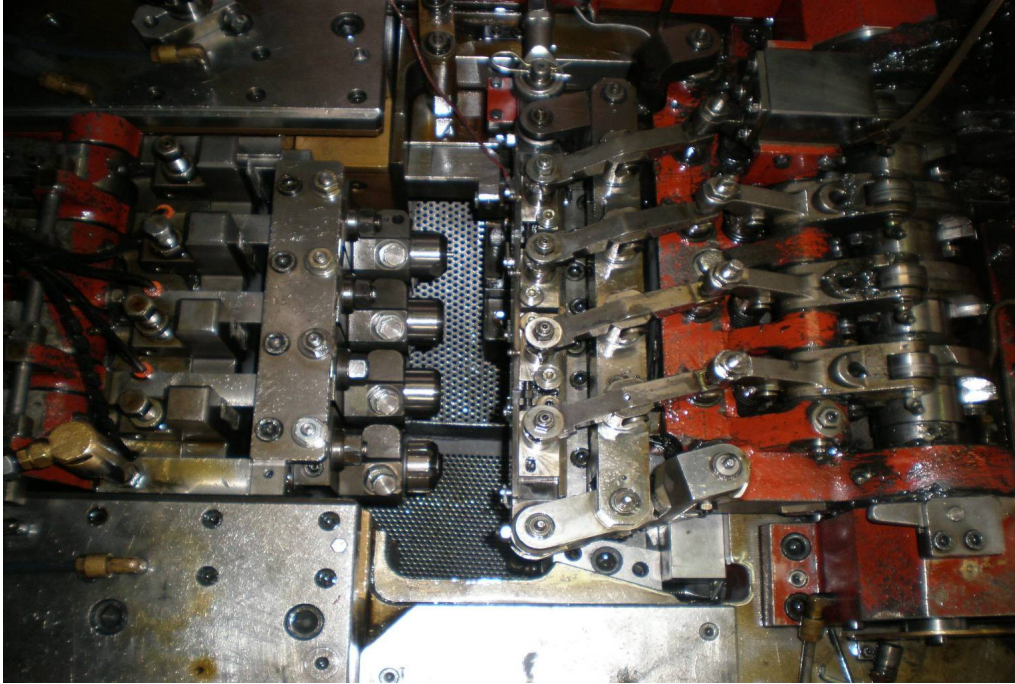


Fig. 1.3.6.5.a – Vista da secção dos punções, matrizes e *transfer* de uma máquina de 4 estações; (Fonte: José Manuel, Formação em Estampagem e Roscagem, Pocol II, 2008).

### 1.3.6.6 Sistemas de *Transfer*

Os sistemas de *transfer* permitem a transferência entre as várias estações para moldar o material para a forma desejada. Há três tipos, que podem ser visualizados na figura 1.3.6.6.a):

- Em linha recta (*Straight Across*), lado esquerdo da figura. Este é o sistema maioritariamente utilizado nas máquinas Boltmakers.
- Universal e para produção de porcas, centro da figura. O *transfer* permite a rotação de  $180^{\circ}$  das peças entre as estações de conformação. Com a adição de unidades especiais, as peças podem também ser transferidas em linha recta;
- (*Pick Move place*), lado direito da figura. É um sistema que, ao retirar a peça da matriz a afasta ligeiramente da mesma. O *transfer* volta para a face da matriz após a chegada na estação de entrega.

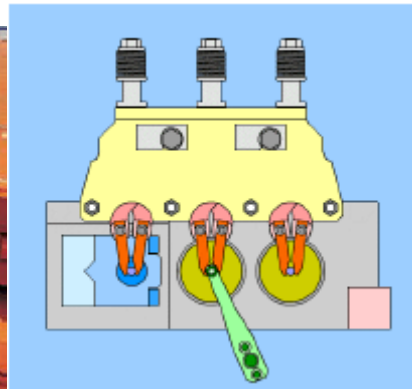
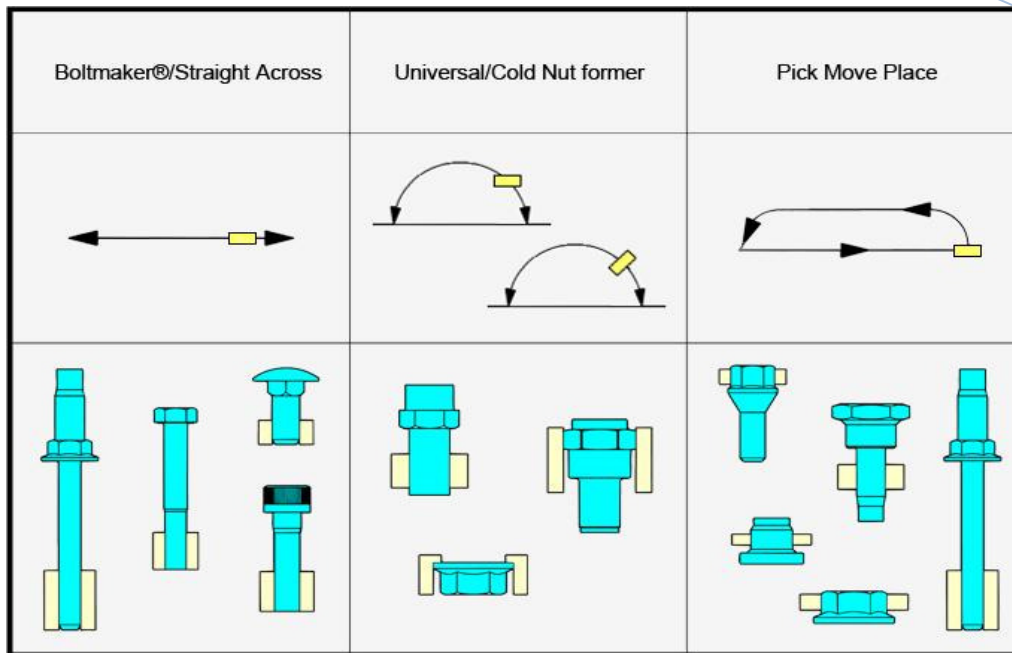


Fig. 1.3.6.6.a – Esquema representativo dos vários tipos de *transfer*; (Fonte: José Manuel, Formação em Estampagem e Roscagem, Pecol II, 2008).

### 1.3.7 Processo de fabrico

Para o fabrico de um elemento de fixação, parafuso ou rebite, é usual fazer-se um desenho técnico equivalente ao da figura seguinte:



## 2. Concentração de tensões entre a cabeça e a diâmetro da cana

Nas operações de estampagem a frio um dos maiores problemas é a interface entre a cabeça e a cana do parafuso.

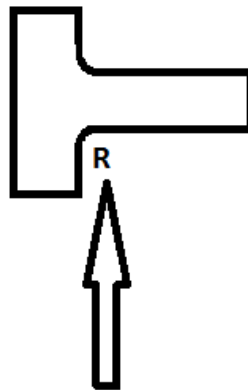


Fig. 2.a – Esquema representativo do raio de estampagem entre a cabeça e a cana do parafuso ou rebite.

### 2.1 Metodologia de Controlo da qualidade da Estampagem

Segundo Mickey T. Oldham [1], Engineering Manager da Speciality Screw Corp. não há nenhuma fórmula para calcular o raio mínimo entre a cabeça do parafuso e o diâmetro da cana. Esta opinião é também partilhada por Joe Greenslade [2], IFI Director of Engineering Technology.

Da informação experimental obtida de Mickey T. Oldham [1], resulta que um raio inferior a 0,25 mm é susceptível de ruptura. Todas as vezes que fazem o setup de uma máquina para a produção de novas peças que têm cabeça, faz-se um teste chamado *teste da cunha*. A cunha dobrará a cabeça aproximadamente 20 graus para testar o risco de falha. Este ensaio assegura duas coisas:

- O raio entre a cabeça e o diâmetro da cana é suficiente;
- A coroa ou pré-cabeça está centrada em relação à cana do parafuso ou perno.

Se a cabeça tem uma espessura fina o que é importante é que haja um grande raio caso contrário o risco de ruptura é muito elevado.

O método *teste da cunha* utilizado descreve dois procedimentos, para determinar a ductilidade dos rebites e peças semelhantes, na zona onde há mudança de secção, ou seja entre a cana e a cabeça. As peças que passam este teste podem ser consideradas como capazes de suportar as cargas durante a montagem e também suportar a fractura frágil na zona entre a cana e a cabeça.

Estes dois testes baseiam-se na Norma GM4473P - RIVET DUCTILITY TEST da General Motors Engineering Standards.

Equipamento exigido:

- 1) Suporte rígido
- 2) Martelo, usado unicamente para o método A
- 3) Gancho de aperto (Vise-grip wrench) de 254 mm, para o método B.

A escolha do teste para comprovar a ductilidade das peças é baseada na configuração, geometria das mesmas.

O teste A é para ser usado em todos os rebites em que o diâmetro da cabeça e o comprimento da cana permite a realização do ângulo de dobragem de 15°. Geralmente, rebites que têm um comprimento de cana igual ou maior que o seu diâmetro e o diâmetro da cabeça 1,25 vezes o diâmetro da cana podem ser testados com este método.

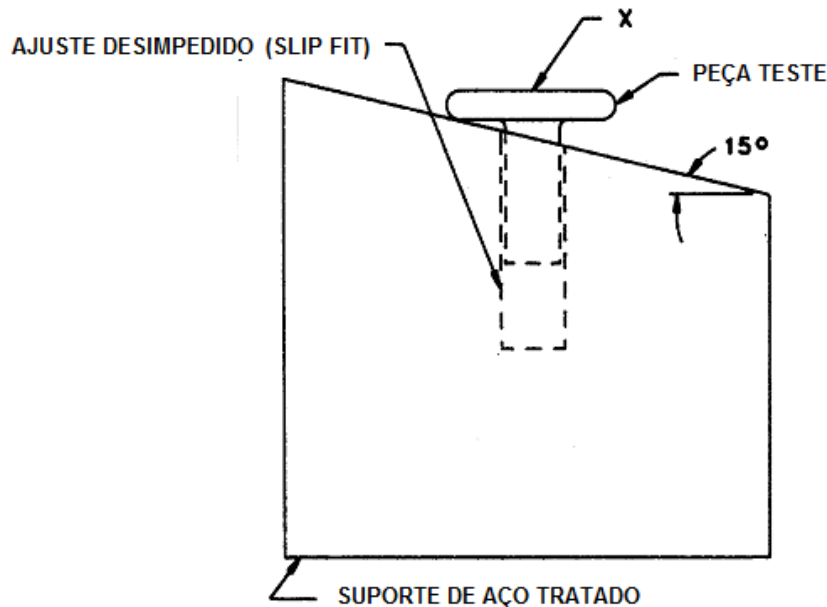


Fig. 2.1.a – Esquema representativo do procedimento para detecção de falha entre a cabeça e a cana (teste A); (Fonte: GENERAL MOTORS ENGINEERING)

**STANDARDS, Materials and Processes - Procedures, RIVET DUCTILITY TEST, GM4473P, July 1998).**

Procedimento teste A:

- 1) Coloque a peça como demonstra a figura anterior;
- 2) Aplique um impacto na peça na direcção "X" com um martelo até a parte de projecção da peça tomar o ângulo da face do dispositivo (15°);
- 3) Remover a peça da base do teste e analisar a evidência da fractura. A divisão provocada pela tracção superficial na peça pelo ângulo de deformação é admissível. A separação parcial ou total da secção em curvatura com a cana é considerada como falha. Este teste é realizado regularmente na Pecol II.

O método B está descrito na figura seguinte:

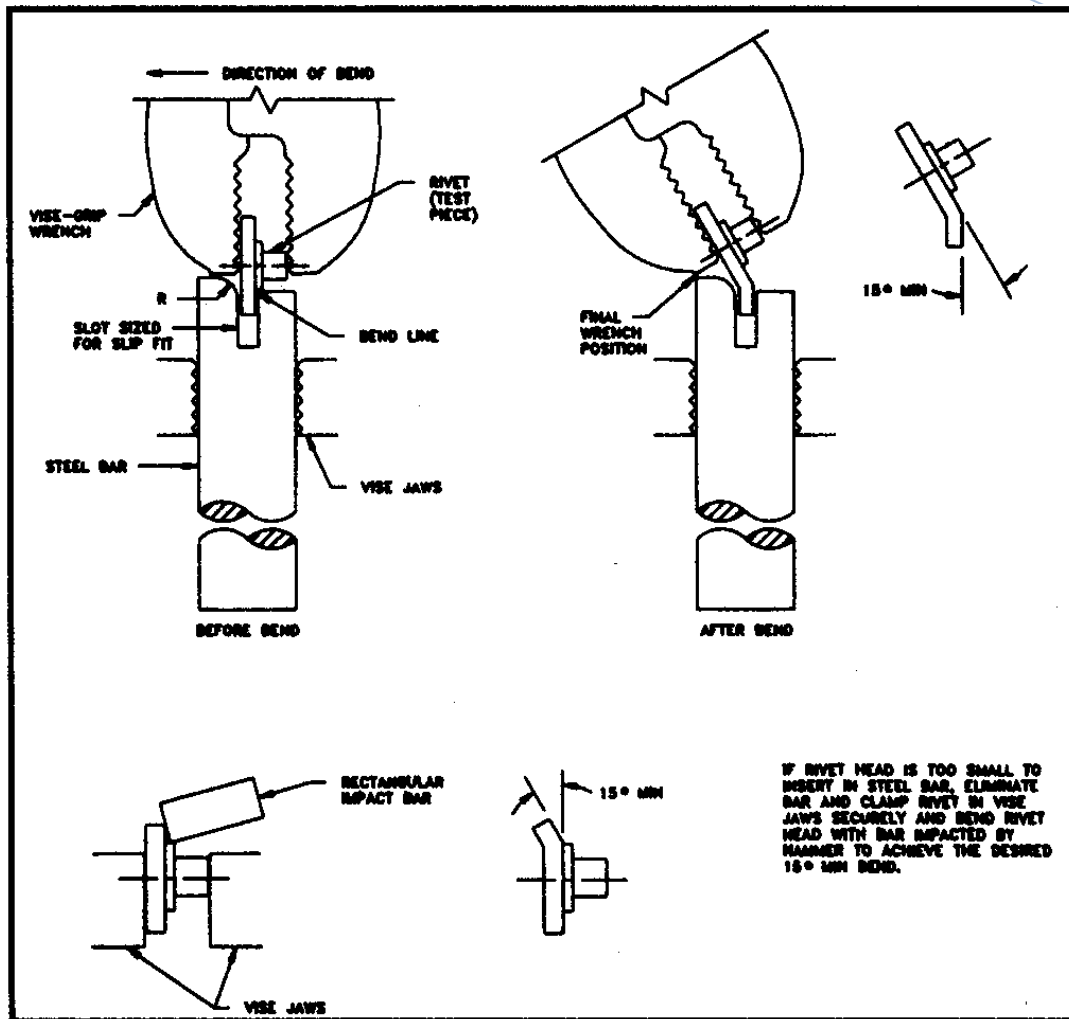


Fig. 2.1.b – Esquema representativo do procedimento para detecção de falha entre a cabeça e a cana (teste B); (Fonte: GENERAL MOTORS ENGINEERING STANDARDS, Materials and Processes - Procedures, RIVET DUCTILITY TEST, GM4473P, July 1998).

Procedimento teste B:

- 1) Coloque o rebite na ranhura do suporte como mostra e se descreve na figura anterior.
- 2) A cabeça deve estar centrada, ou seja, a cana do rebite deve estar adjacente no suporte de aço, de acordo com o indicado na figura 4.b.
- 3) Prenda com o gancho de aperto o rebite, ilustrado na figura 4.b, e proceda à dobragem segundo a seta indicada na mesma.
- 4) Proceda à dobragem até à posição final do gancho, resultando numa dobra maior ou igual que o requisito mínimo de 15 graus.

- 5) Remova o rebite (peça de teste) e proceda à medição para certificação do ângulo de dobra adequado.
- 6) Examine a área de dobragem para verificar a evidência de fractura frágil. A divisão de tracção superficial da superfície da peça no raio deformado é admissível. A separação parcial ou total da cabeça e cana é considerada como falha.

## 2.2 Discussão e Procedimentos da Comunidade Científica

Para Mike Rindfuss [3], Manager of New product Development, National Machinery, o cliente final das peças é responsável pela definição do material, configuração da peça, ou seja é responsável pela definição do raio entre a cabeça e o diâmetro da cana do parafuso, o tratamento térmico, as exigências de carga na peça, e todos os testes mecânicos que verifiquem a sua função em serviço. Obviamente, qualquer um destes factores pode mudar, em função do que será aceitável para o raio ou concentração de tensões.

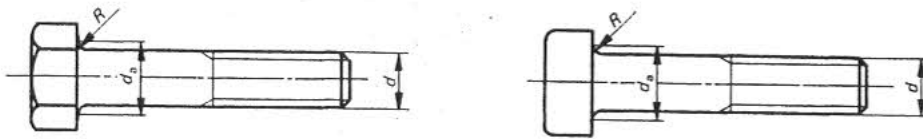
Para Joe Greenslade [2], não está parametrizado um raio entre a cabeça e a cana, este raio foi determinado há muitos anos, e é o que aparece nos parafusos standards. Quando se está a projectar uma peça especial o Engenheiro de Projecto deve consultar os parafusos standards que se assemelham em termos de dimensões e adoptar esse raio associado. É seguro que, quanto maior for o raio nesse ponto, maior será a resistência da peça nesse ponto.

## General purpose bolts and screws – Metric series – Radii under the head

### 1 SCOPE AND FIELD OF APPLICATION

This International Standard specifies the sizes of the radii under the head of metric series general purpose bolts and screws.

### 2 DIMENSIONS



Dimensions in millimetres

Thread diameter $d$	Radius $R$ min. finished and semi-finished products	Transition diameter $d_a$ max.		Thread diameter $d$	Radius $R$ min. finished and semi-finished products	Transition diameter $d_a$ max.	
		finished products	semi-finished and regular products			finished products	semi-finished and regular products
1,6	0,1	2	—	39	1	42,4	45,4
2	0,1	2,6	—	42	1,2	45,6	48,6
2,2	0,1	2,8	—	45	1,2	48,6	52,6
2,5	0,1	3,1	—	48	1,6	52,6	56,6
3	0,1	3,6	—	52	1,6	56,6	62,6
3,5	0,1	4,1	—	56	2	63	67
4	0,2	4,7	—	60	2	67	71
4,5	0,2	5,2	—	64	2	71	75
5	0,2	5,7	6,0	68	2	75	79
6	0,25	6,8	7,2	72	2	79	83
7	0,25	7,8	8,2	76	2	83	87
8	0,4	9,2	10,2	80	2	87	92
10	0,4	11,2	12,2	85	2	92	97
12	0,6	14,2	15,2	90	2,5	97	102
14	0,6	16,2	17,2	95	2,5	102	108
16	0,6	18,2	19,2	100	2,5	108	113
18	0,6	20,2	21,2	105	2,5	113	118
20	0,8	22,4	24,4	110	2,5	118	123
22	0,8	24,4	26,4	115	2,5	123	128
24	0,8	26,4	28,4	120	2,5	128	133
27	1	30,4	32,4	125	2,5	133	138
30	1	33,4	35,4	130	2,5	138	145
33	1	36,4	38,4	140	2,5	148	156
36	1	39,4	42,4	150	2,5	159	166

The transition diameter  $d_a$  is the diameter of the circle formed at the junction of the radius  $R$  and the bearing surface of the head.

**Fig. 2.2.a – Raio entre a cabeça e cana de parafusos de acordo com a norma ISO 885; ( Fonte: ISO 885 – 1976 General purpose bolts and screws - Metric series - Radii under the head).**

De acordo com as diversas normas da Indústria de Autoação, entre as quais a GMW25 DECEMBER 2003 e SAE J1199 VER. MAR2001, nos parafusos sem

tratamento térmico, ou seja classe 4.8, 5.8 e 6.8, quando é solicitado um raio admissível entre a cabeça e cana muito reduzido, deve-se efectuar um alívio de tensões através de tratamento térmico de Recozimento de alívio de tensões ou tratamento térmico de Normalização, de forma a assegurar a solidez entre a cabeça e a cana.

### 2.3. Tratamento térmico para minimizar/aliviar a concentração de tensões

Para Frank Badía [4], Director Técnico e de Qualidade da Empresa de Tratamientos Térmicos Badía, S.A. em Barcelona, há duas formas para solucionar a concentração de tensões entre a cana e a cabeça, que aparecem na fase de estampagem.

- A primeira técnica consiste em efectuar um recozimento de alívio de tensões, numa temperatura entre 680°C e 720°C com permanência cerca de 3 horas. Posteriormente, os parafusos ou pernos são arrefecidos num forno até aos 300°C. A essa temperatura saem do forno para que arrefeçam a temperatura ambiente. Esta solução elimina as tensões mas segundo ele não regenera a rede cristalina, a qual pode ter algum desmembramento.
- A segunda técnica baseia-se em efectuar um tratamento térmico de Normalização. Os parafusos têm que alcançar uma temperatura entre 860°C e 900°C (dependendo do material utilizado) e permanecer a esta temperatura durante 30 minutos. Posteriormente devem-se arrefecer com ar forçado (turbo ventilador) até à temperatura ambiente. Este é o melhor método, já que se eliminam todas as tensões residuais e se efectua a recristalização do material. Este método utiliza-se para parafusos com uma grande redução entre a cabeça e a cana. No entanto, como este método é mais caro que o recozimento de alívio de tensões, o seu uso se aplica apenas em situações muito específicas (cerca de 20% dos casos).

### 3. Deformação Plástica (Encruamento)

O aumento da resistência mecânica pode ser conseguido através de tratamentos térmicos ou de deformação plástica. Nas figuras seguintes apresenta-se o diagrama tensão vs deformação típico de um aço, visualiza-se que com a deformação plástica primária há um aumento na resistência.

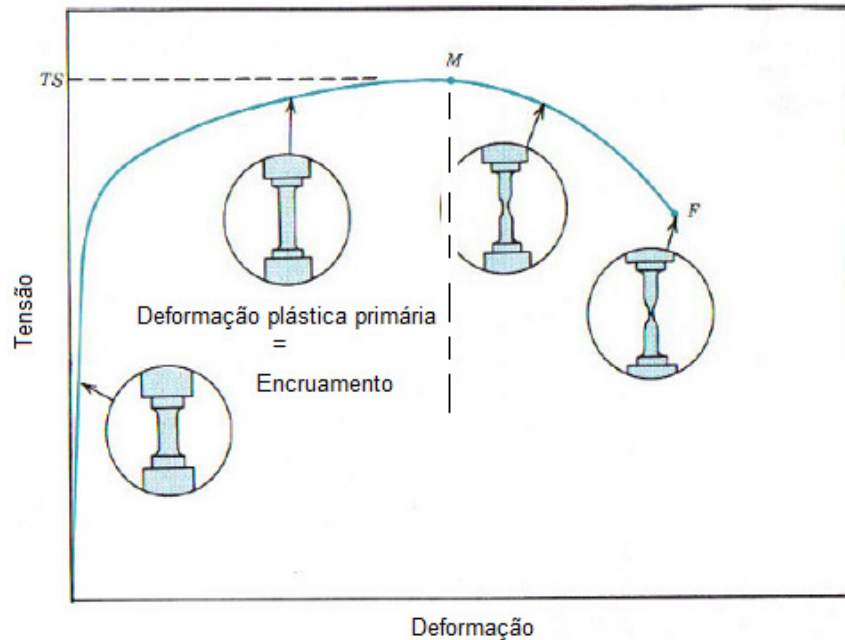


Fig. 3.a - Aumento da resistência do material com a deformação plástica; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).

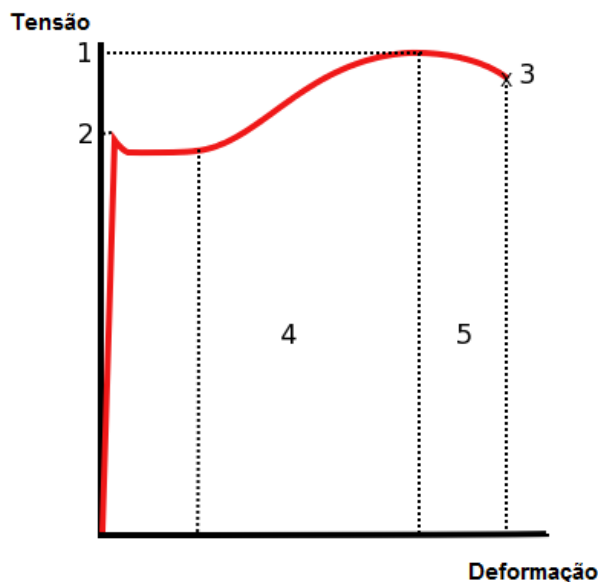


Fig. 3.b - Diagrama tensão - deformação obtido através de um ensaio de tração; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).

1. Tensão Máxima de Tracção
2. Tensão de Cedência
3. Tensão de Ruptura
4. Região de Encruamento
5. Região de "Estricção".

Durante o processo de deformação mecânica, não só as dimensões do material são alteradas, mas também a microestrutura resultante do material deformado. Embora, a maior parte de energia despendida nos processos de conformação a frio seja perdida na forma de calor e apenas 2 a 10% dessa energia é armazenada na forma de defeitos cristalinos, esses defeitos causam um aumento da dureza significativa no material metálico. A esse fenómeno de aumento de dureza e resistência mecânica com o processo de deformação plástica ou mecânica é dado o nome de encruamento.

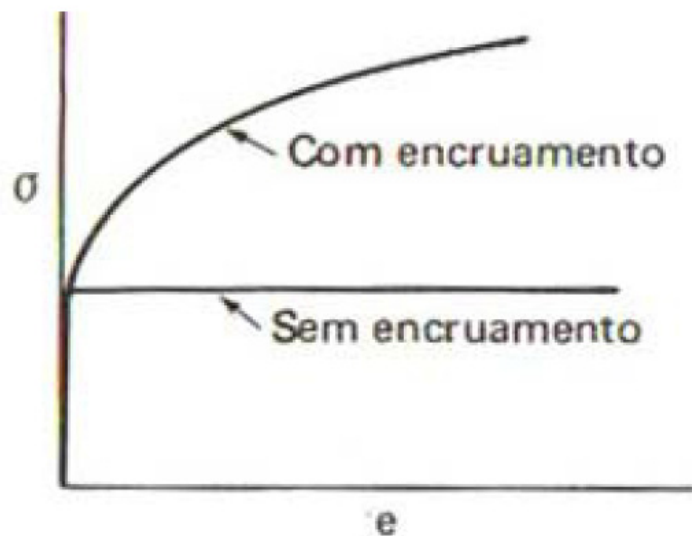
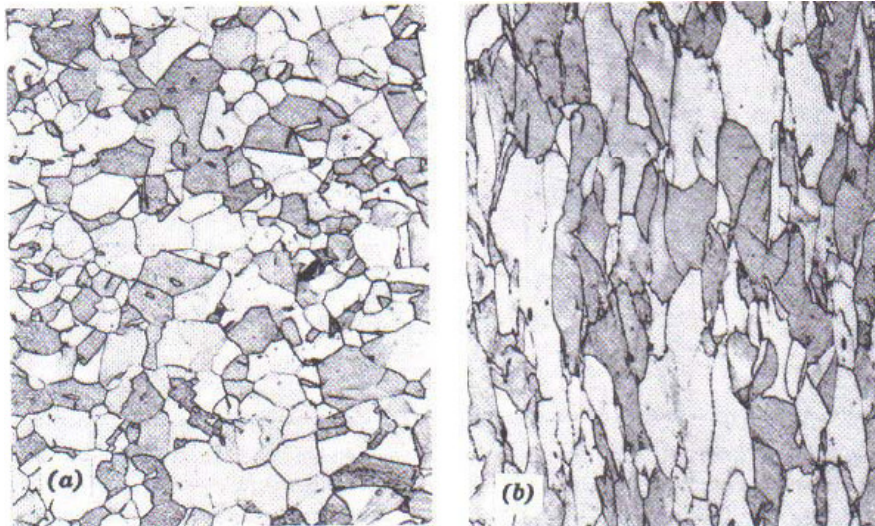


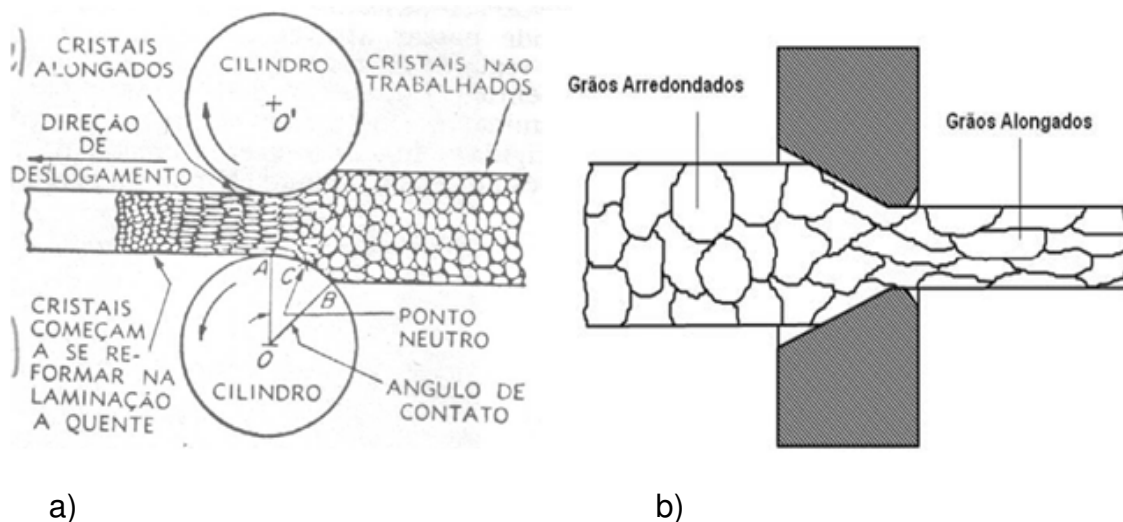
Fig. 3.c – Curvas tensão deformação de sólido real com encruamento e sólido elasto-plástico ideal; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).



**Fig. 3.d – Microestrutura de um material aço a) antes da deformação plástica; b) após encruamento; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).**

A deformação plástica ocorrida durante o encruamento provoca o alongamento dos grãos, diminuindo a ductilidade do material e aumentando a sua dureza.

Na figura seguinte apresenta-se um esquema da deformação plástica durante o processo típico no arame de aço.



**Fig. 3.e – Processamento mecânico de laminação (a) e trefilagem de material policristalino; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).**

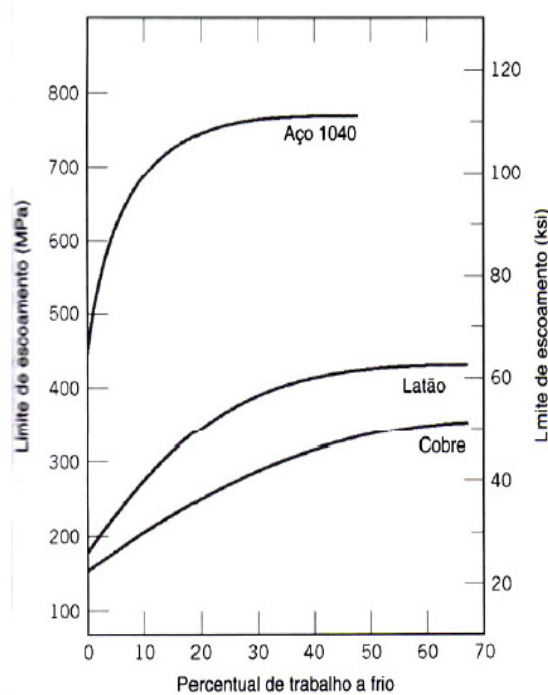
Assim, como também já foi referido anteriormente o encruamento significa o aumento da dureza e da resistência mecânica de um material dúctil à medida que o mesmo é submetido a deformação plástica abaixo da sua temperatura de recristalização, isto é, trabalho a frio (TF).

A redução na ductilidade pode ser determinada pela equação seguinte:

$$\%TF = \left( \frac{A_0 - A_d}{A_0} \right) \times 100$$

Onde,  $A_0$  e  $A_d$  significam área original da secção recta e área após deformação plástica, respectivamente.

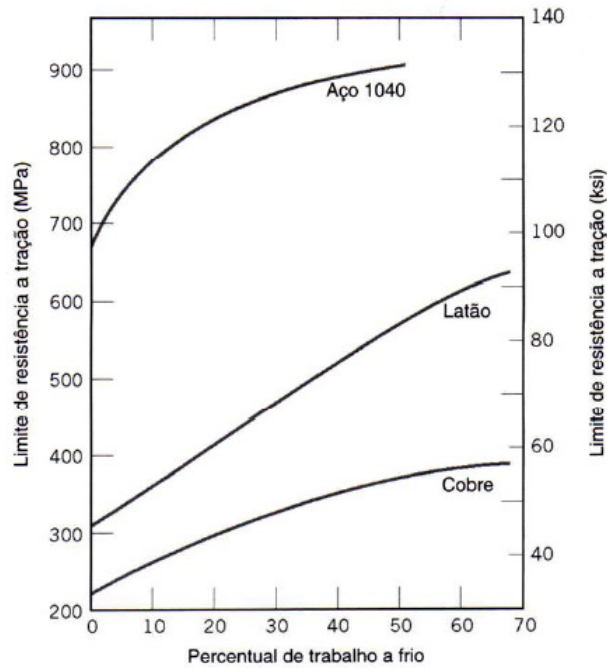
A figura seguinte mostra os efeitos do encruamento (deformação plástica) na Tensão de Cedência de alguns materiais.



**Fig. 3.f – Influência do grau de encruamento (deformação plástica) na Tensão de Cedência de alguns materiais; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).**

Por exemplo, para o aço 1040 e para uma percentagem de trabalho a frio de 20%, a Tensão de Cedência aumenta de 450 MPa para 750 MPa.

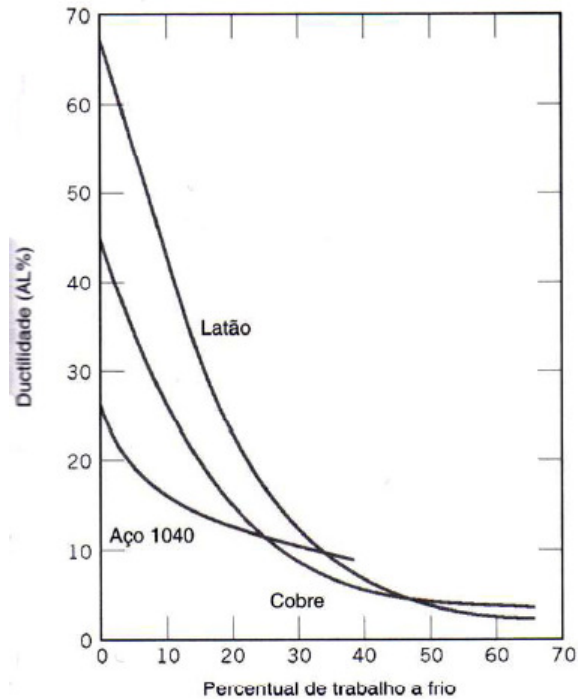
De seguida é apresentado um gráfico que mostra a influência do grau de encruamento na Tensão de ruptura de alguns materiais.



**Fig. 3.g – Influência do grau de encruamento (deformação plástica) na Tensão de Ruptura de alguns materiais; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).**

Por exemplo, para o mesmo aço 1040 e uma mesma percentagem de trabalho a frio de 20%, a Tensão de Ruptura aumenta de cerca de 675 MPa para 850 MPa.

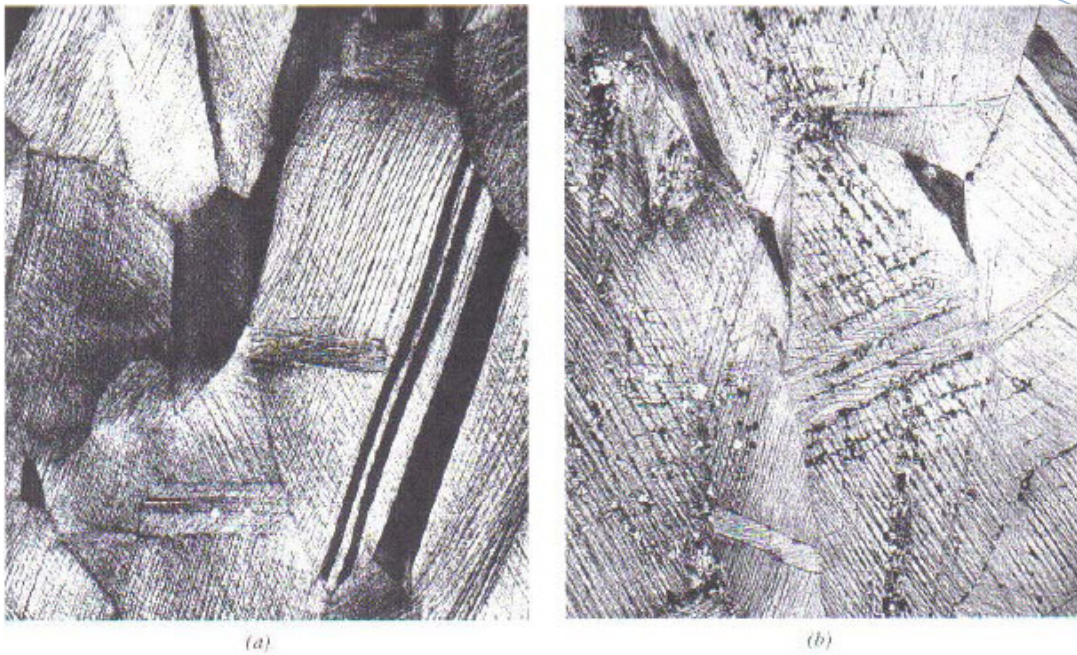
No gráfico seguinte faz-se a análise entre a percentagem de trabalho a frio e a evolução da ductilidade:



**Fig. 3.h – Influência do grau de encruamento (deformação plástica) na Ductilidade de alguns materiais; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).**

Para uma liga de latão a sua ductilidade alterna de cerca de 65% para cerca de 25%, depois de uma percentagem de trabalho a frio de 20%.

A seguir exemplo de uma liga de latão submetida a deformação a frio (a) e estágio inicial de recristalização.



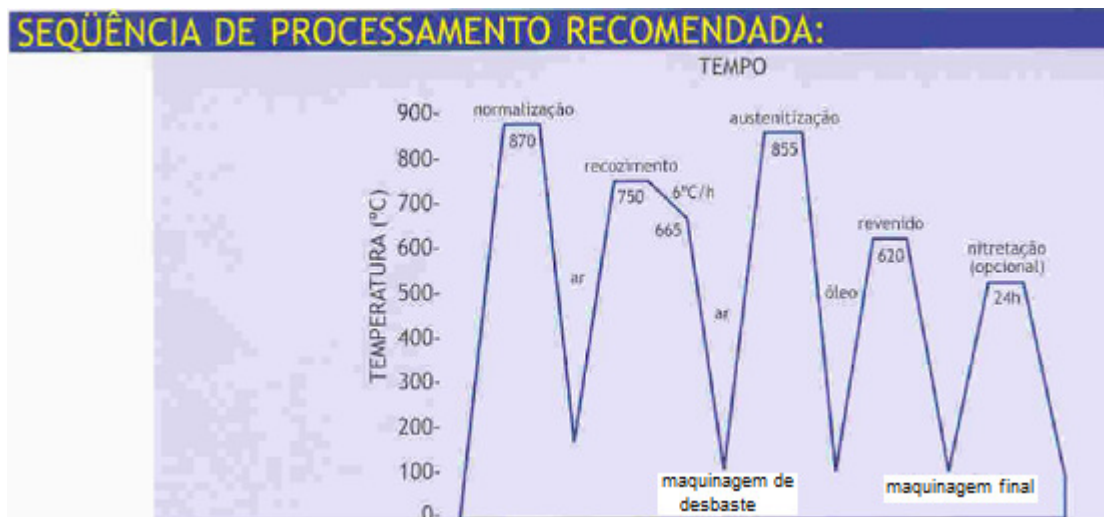
**Fig. 3.i – Micrografia obtida em microscópio metalográfico de um latão:**

- a) Estado original;**
- b) Deformado a frio.**

**(Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).**

#### 4. Tratamentos Térmicos

As propriedades mecânicas, bem como o desempenho em serviço, de um metal e em especial das ligas dependem da sua composição química, da estrutura cristalina, do histórico de processamento e dos tratamentos térmicos realizados. De forma simplificada os tratamentos térmicos em material metálico (metal ou liga) podem ser descritos por ciclos de aquecimento e de arrefecimento controlados que causam modificações na microestrutura do mesmo. Essas modificações têm por consequência alterações das propriedades mecânicas e no comportamento em serviço. A figura abaixo ilustra ciclos de aquecimento e arrefecimento correspondentes a tratamentos térmicos.



**Fig. 4.a – Representação esquemática de ciclos de tratamentos térmicos para um tipo de aço (4140); (Fonte: Izabel Machado, Introdução à Manufatura Mecânica – PMR 2202 – Tratamentos térmicos e de Superfície).**

A figura seguinte ilustra o efeito de diferentes tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas de um aço AISI 1040. Observa-se que para um único aço, isto é, com a mesma composição química, podem ser obtidas propriedades mecânicas muito diferentes.

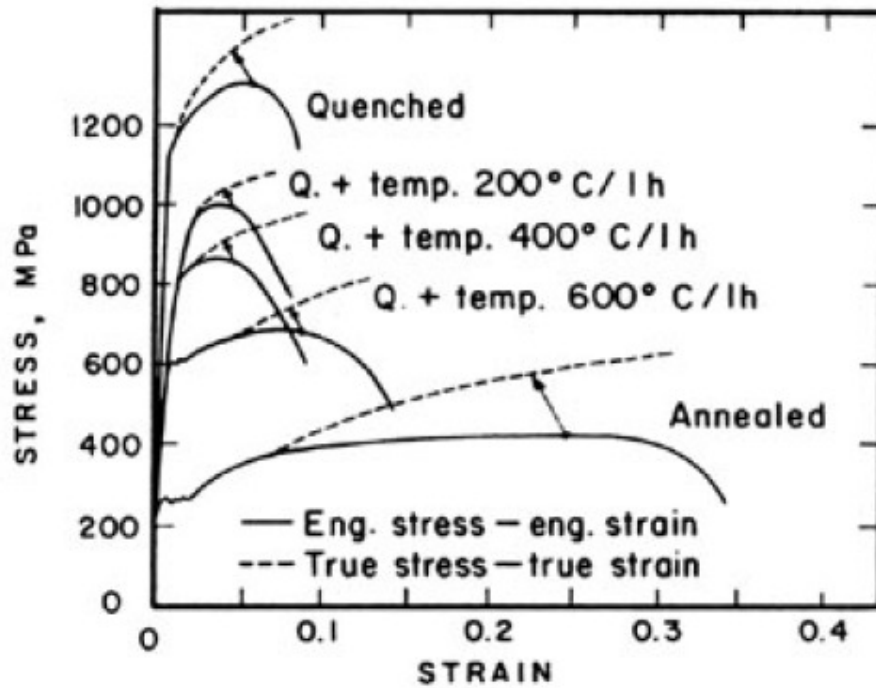






Fig. 4.b – Aço 1040 submetido a diferentes tratamentos térmicos: Quenched (têmpera), tempered (revenido), annealed (recozimento); (Fonte: Izabel Machado, Introdução à Manufatura Mecânica – PMR 2202 – Tratamentos térmicos e de Superfície).

A figura próxima mostra as alterações na microestrutura e nas propriedades mecânicas de um aço submetido a diferentes tratamentos térmicos.

<p><b>Aço 1045</b>  <math>\text{Fe-(0,43-0,50)\%C-(0,60-0,90)\%Mn-(0,040m\acute{a}x)\%P-(0,040m\acute{a}x)\%S}</math></p>	<p><b>Aço 4140</b>  <math>\text{Fe-(0,38-0,43)\%C-(0,75-1,00)\%Mn-(0,035m\acute{a}x)\%P-(0,040m\acute{a}x)\%S-(0,20-0,35)\%Si-(0,80-1,10)\%Cr-(0,15-0,25)\%Mo.}</math></p>
<p>Normalizado  Dureza: 15 HRC</p>  <p>300X</p>	<p>Normalizado  Dureza: 30 HRC</p>  <p>300X</p>
<p>Temperado  Dureza: 55HRC</p>  <p>300X</p>	<p>Temperado  Dureza: 59 HRC</p>  <p>500X</p>

**Fig. 4.c – Diferentes microestruturas resultantes de tratamentos térmicos de têmpera e de normalização; (Fonte: Izabel Machado, Introdução à Manufatura Mecânica – PMR 2202 – Tratamentos térmicos e de Superfície).**

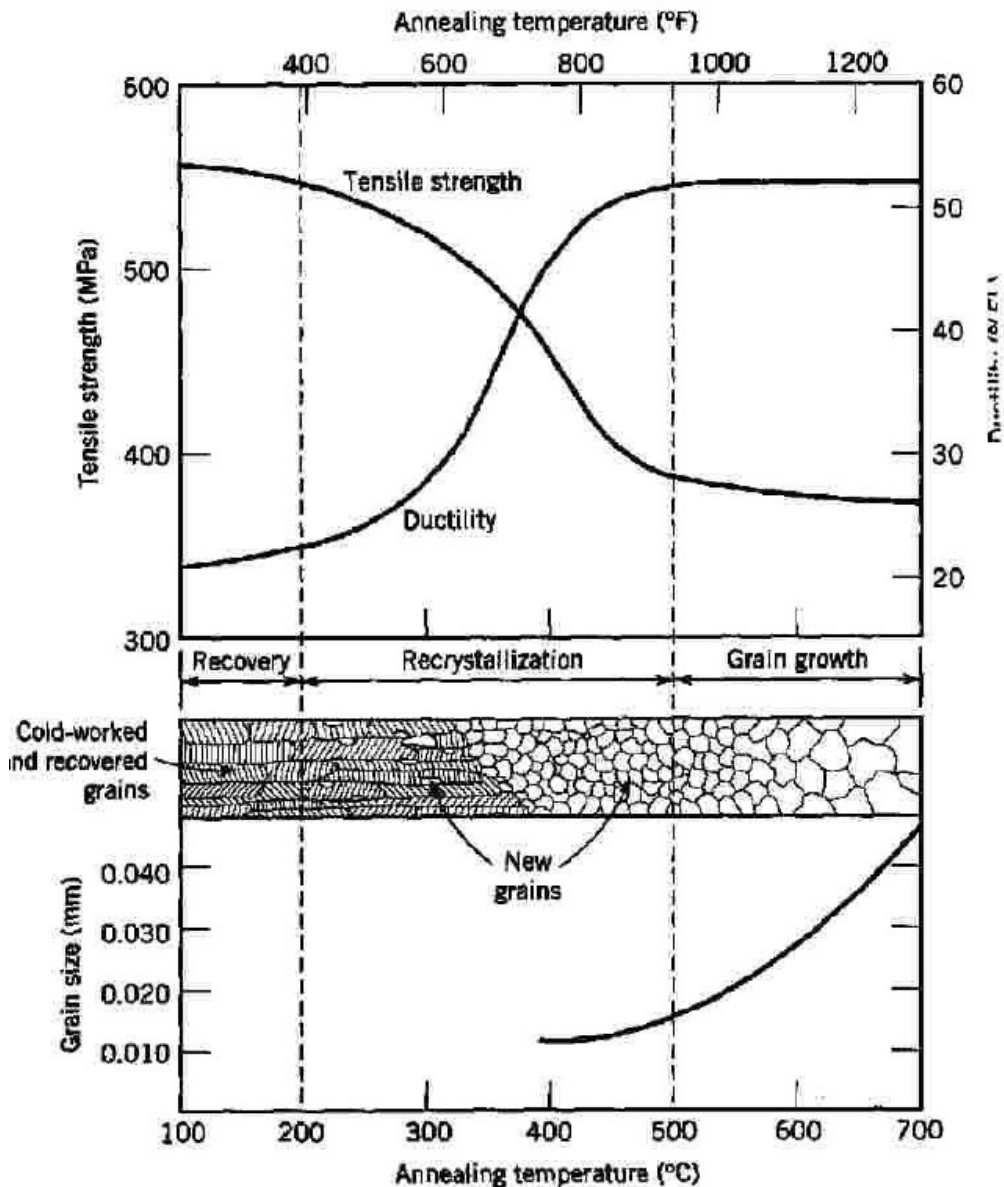
Os factores que determinam os tipos de tratamentos térmicos são: temperatura, taxas de aquecimento e arrefecimento, tempo de permanência numa determinada temperatura. A escolha adequada desses elementos está directamente relacionada com a estrutura das ligas. Esquemáticamente, a estrutura das ligas e os tratamentos térmicos relacionados com essas ligas são apresentadas a seguir:

Metal puro + Elemento de Liga = Liga

Ligas Ferrosas Aços Ferros fundidos <b>Têmpera, recozimento, normalização, revenido</b>	Ligas Não-ferrosas e Aços Inoxidáveis  <b>Solubilização, envelhecimento e recozimento</b>
--	--

**Tab. 2- Estrutura das ligas e os tratamentos térmicos relacionados; (Fonte: Izabel Machado, Introdução à Manufatura Mecânica – PMR 2202 – Tratamentos térmicos e de Superfície).**

A eliminação e o rearranjo de defeitos cristalinos são processos termicamente activados, isto é, são favorecidos em temperaturas mais elevadas onde a difusão dos átomos é maior. Portanto, se for conveniente eliminar ou diminuir o encruamento de uma material deformado a frio pode ser realizado um tratamento térmico. Durante esse tratamento térmico ocorrem mudanças micro estruturais e diminuição de dureza. Esse tratamento térmico é conhecido como recozimento. O recozimento consiste em colocar o material numa temperatura acima da temperatura de recristalização por períodos de tempo que vão de minutos a poucas horas. O esquema da **figura 4.d** ilustra o que ocorre durante o tratamento térmico de recozimento.



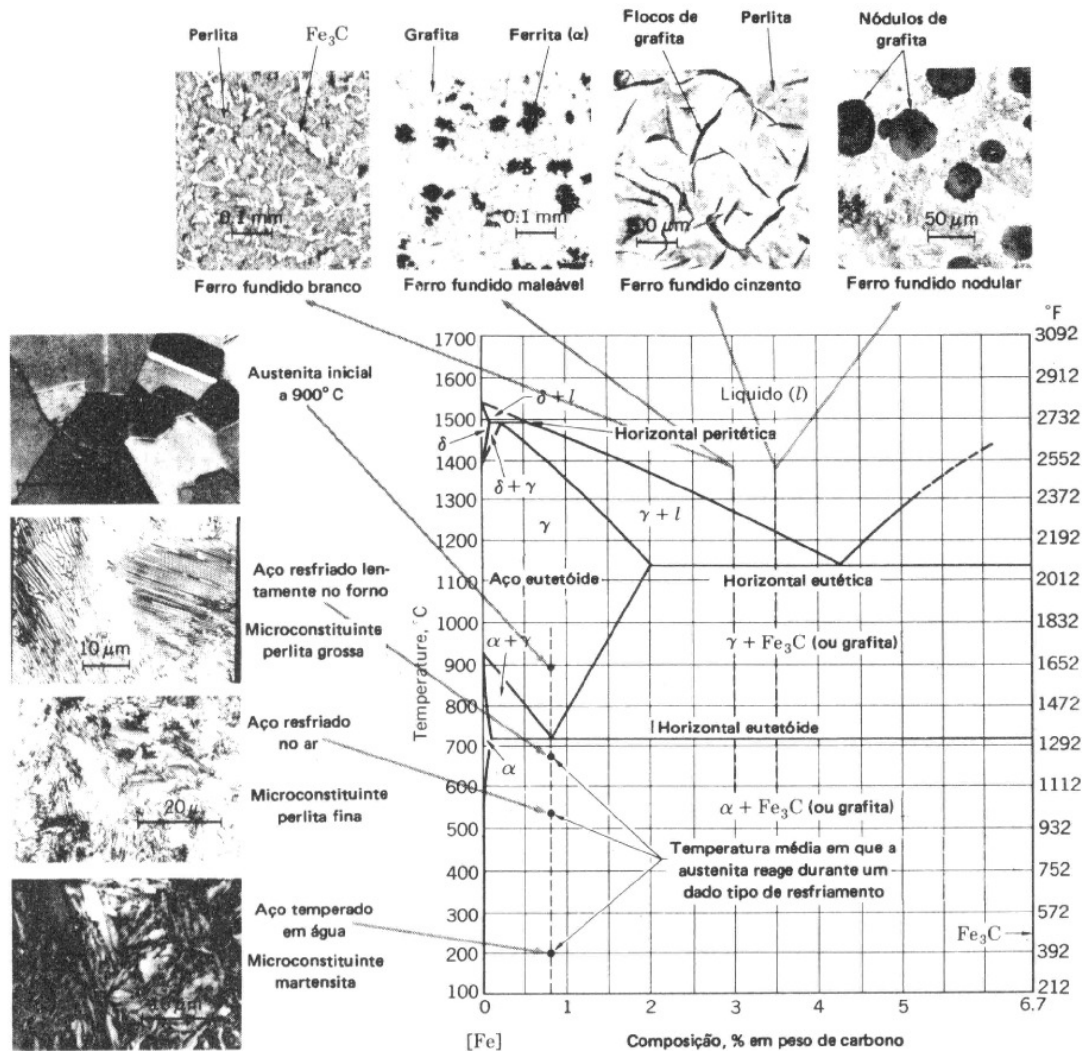
**Fig. 4.d – Influência da temperatura do tratamento térmico num latão. Recovery (recuperação) = rearranjo e eliminação de defeitos cristalinos sem alteração da microestrutura, mas com restauração parcial das propriedades do material, Recrystallization (recristalização) = ocorrem eliminação de defeitos cristalinos pela migração de contornos de grão e grain growth (crescimento de grão); (Fonte: Izabel Machado, Introdução à Manufatura Mecânica – PMR 2202 – Tratamentos térmicos e de Superfície).**

A temperatura de recristalização, citada anteriormente, caracteriza-se por ser a temperatura na qual é necessária uma hora para que o processo de recristalização se inicie e termine num metal ou liga. As temperaturas típicas de recristalização para metais e ligas estão entre  $1/3$  e  $1/2$  do ponto de fusão dos mesmos. É importante ressaltar que essa temperatura de recristalização depende de vários factores tais como: pureza da liga (a recristalização ocorre

mais rapidamente em metais puros do que em ligas), grau de deformação (energia armazenada na forma de defeitos cristalinos).

#### 4.1 Tratamentos Térmicos de Materiais Ferrosos

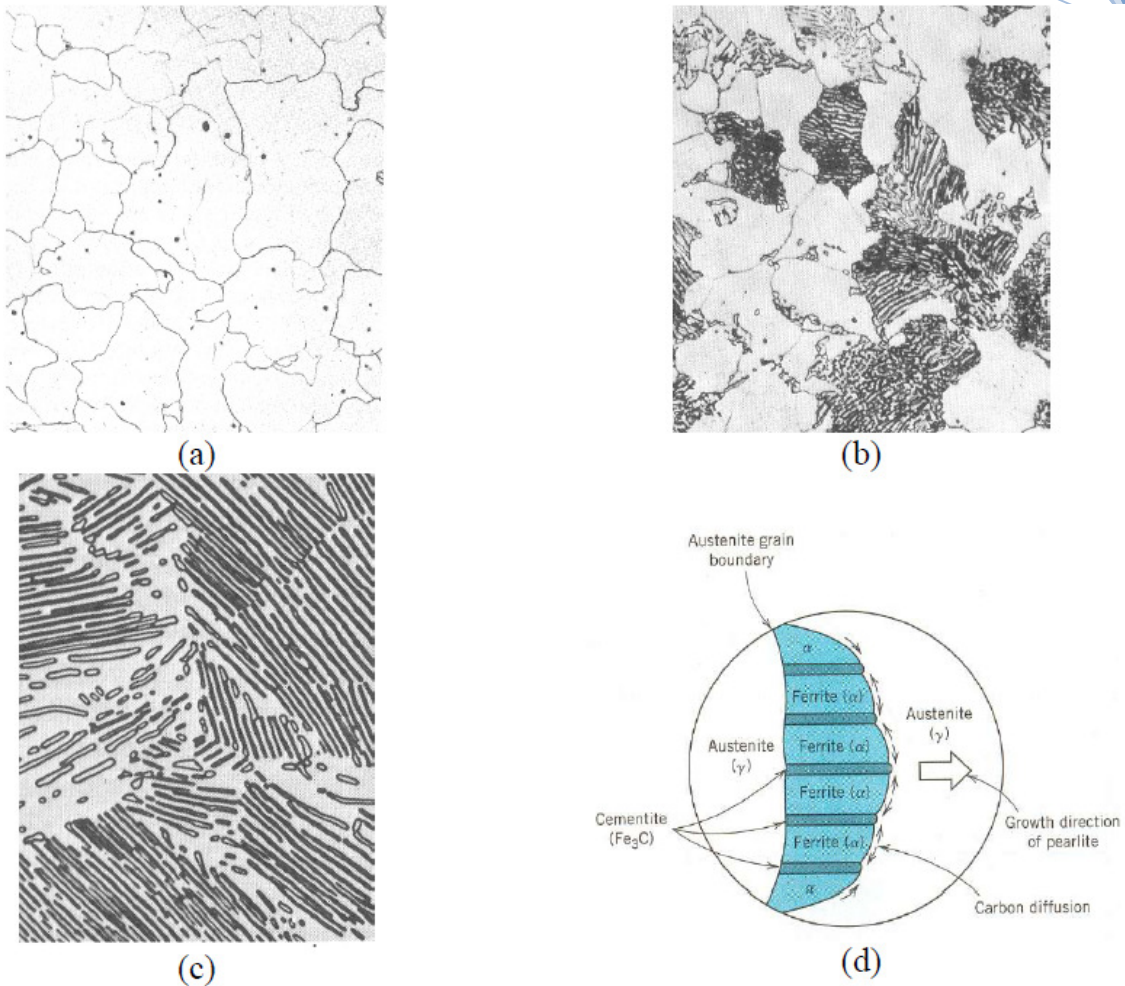
As ligas ferrosas são materiais compostos à base de ferro, estas ligas são os aços e os ferros fundidos. Tantos os aços como os ferros fundidos têm como composição base o ferro e carbono. Definem-se aços como sendo ligas compostas por ferro e teores de carbono até 2% em peso. Já os ferros fundidos, possuem teores acima de 2% em peso de carbono. Usualmente os teores de carbono são sempre inferiores a 2% nos aços e superiores a 2% nos ferros fundidos. A **fig. 4.1.a** mostra um diagrama Fe-C, com algumas microestruturas características.



**Fig. 4.1.a** – Diagrama Fe-C, com algumas microestruturas representativas de aços e ferros fundidos; (Fonte: Izabel Machado, Introdução à Manufatura Mecânica – PMR 2202 – Tratamentos térmicos e de Superfície).

Existem vários tipos de aço, os quais passo a enumerar:

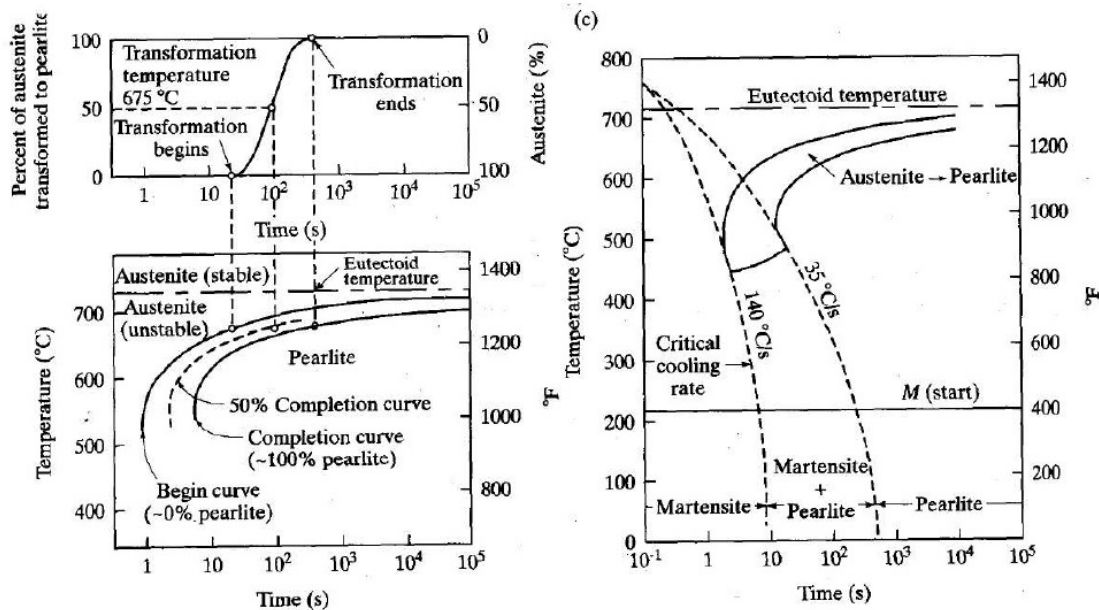
- 1) Aço carbono, não possuem elementos de liga, além do carbono.
- 2) Aço baixa liga, possuem elementos de liga para melhorar a temperabilidade ou propriedades mecânicas.
- 3) Aços ferramenta, são os aços que possuem elevados teores de elementos de liga principalmente formadores de carbonetos e nitretos.
- 4) Aços inoxidáveis, apresentam elevados teores de elementos de liga, a sua principal propriedade é a resistência à corrosão. O principal elemento de liga dos aços inoxidáveis é o cromo e a resistência à corrosão é promovida pela formação de óxidos de cromo na superfície do metal. A figura **4.1.b** mostra as microestruturas características de aços para construção mecânica (aços carbono e baixa liga). As regiões escuras da figura **4.1.b** correspondem a um composto chamado perlite e as regiões claras correspondem a uma fase chamada ferrite. A ferrite tem estrutura cristalina CCC e tem baixa solubilidade do carbono. Já a perlite, é composta de 2 fases (ferrite e cementite). A cementite é um carboneto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), o qual é uma fase dura e frágil. A ferrite e a cementite na perlite estão dispostas em forma de lamelas, como mostra de forma detalhada a figura **4.1.b** (c) e esquematicamente a figura **4.1.b** (d).



**Fig. 4.1.b – Microestruturas características de aços para construção mecânica. (a) Aço doce, (b) aço 1020, (c) aço 1080 (eutectóide) e (d) ilustração esquemática de reacção eutectóide, formação da perlite; (Fonte: Izabel Machado, Introdução à Manufatura Mecânica – PMR 2202 – Tratamentos térmicos e de Superfície).**

A primeira diferenciação que se faz dos aços neste texto é pela composição química. Os elementos de liga, bem como a quantidade de elementos de liga adicionada, vão depender da aplicação do aço, isto é, do requisito mais importante a ser levado em linha de conta no projecto. Este requisito pode ser mecânico, económico ou ligado ao ambiente (aços inoxidáveis). A outra diferenciação que deve ser feita, quando se pensa em aços, é em relação ao tratamento térmico realizado. Uma fase também muito importante que se forma nos aços é a martensite, ilustrada na **figura 4.c** (têmpera). Esta fase resulta da transformação da austenite, que não é estável na temperatura ambiente, durante o arrefecimento rápido dos aços. A maioria dos tratamentos térmicos realizados nos aços parte da existência de austenite. A austenite é uma fase CFC, que está presente nos aços carbono acima de 723 °C (eutectóide). Numa análise bastante simplificada descreve-se que o arrefecimento lento a partir da austenite resulta em ferrite e perlite (diagrama de equilíbrio apresentado na **figura 4.1.a**) e o arrefecimento rápido a partir austenite resulta em martensite.

Algumas formas de tratamentos térmicos, que podem ser realizados nos aços, são apresentadas em curvas de arrefecimento contínuo e tempo-temperatura-transformação (TTT) apresentadas na **figura 4.1.c**.



**Fig. 4.1.c – Curvas de tempo - temperatura - transformação (TTT) e de arrefecimento contínuo; (Fonte: Izabel Machado, Introdução à Manufatura Mecânica – PMR 2202 – Tratamentos térmicos e de Superfície).**

Os tratamentos térmicos mais comuns realizados nos aços são: o Recozimento, a Normalização, a Têmpera e o Revenido.

#### 4.1.1 Recozimento

Os tratamentos térmicos de recozimento podem materializar a diminuição do encruamento e causar uma diminuição de dureza do material metálico. No caso específico dos aços o recozimento também se caracteriza por um arrefecimento lento (algumas horas, dependendo do tamanho da peça) a partir de uma temperatura onde exista 100% austenite, temperatura esta que depende da composição do aço. O produto dessa reacção é a formação de ferrite e de perlite. Existe também uma outra forma de tratamento térmico de recozimento, que na verdade é a chamada esferoidização da perlite, este tratamento consiste em tratar termicamente o aço numa temperatura à volta da temperatura eutectóide (723°C) por várias horas.

A tensão de resistência de um material recozido ( $\text{kgf/mm}^2$ ) pode ser calculada de maneira aproximada pela seguinte relação:

$$\text{Tensão de resistência} = \frac{28,1\% \text{ ferrite} + 84,4\% \text{ perlite}}{100}$$

#### 4.1.2 Normalização

O tratamento térmico de normalização é realizado de forma semelhante ao recozimento. A normalização caracteriza-se por um arrefecimento do aço feito ao ar livre a partir de uma temperatura onde exista 100% de austenite, esta temperatura depende da composição do aço. O produto desta reacção é a formação de ferrite e de perlite, cujas percentagens dependem da composição do aço.

#### 4.1.3 Têmpera

A têmpera, ao contrário do recozimento e da normalização, tem como objectivo a formação de uma fase chamada martensite, que é dura e frágil. A têmpera caracteriza-se por um arrefecimento rápido (alguns segundos) a partir de uma temperatura onde exista 100% de austenite, esta temperatura claro está depende da composição do aço. A têmpera é habitualmente realizada utilizando água, salmoura ou óleo e também depende da composição do aço.

#### 4.1.4 Revenido

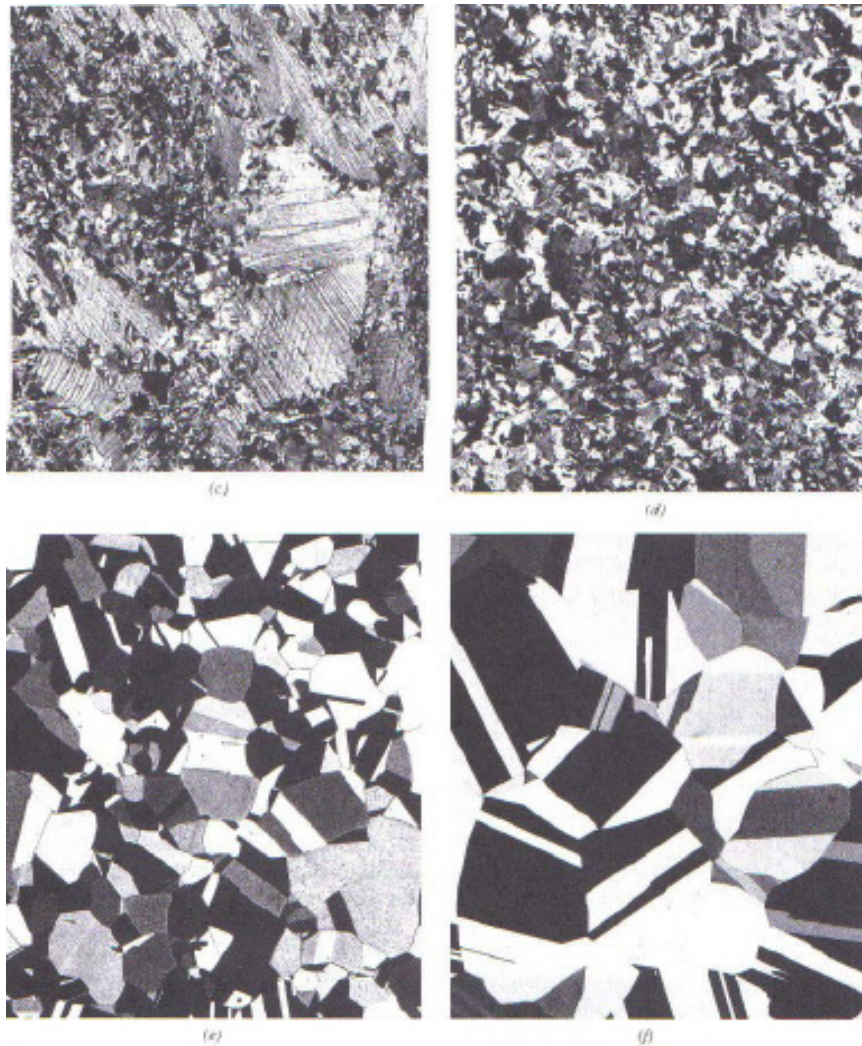
O revenido é um tratamento térmico realizado logo após a têmpera. Este tratamento causa alívio de tensões na peça temperada, que tem por consequência uma diminuição de resistência mecânica e também um aumento na ductilidade e na tenacidade. As temperaturas nas quais são realizados os revenidos estão sempre abaixo da temperatura crítica (temperatura onde se inicia a formação de austenite). No entanto, existem algumas faixas de temperatura “proibidas” em função da fragilização de alguns tipos de aços. Estas temperaturas estão em torno dos 300°C e 550°C.

A tabela 3 apresenta as durezas de aços recozidos, normalizados e temperados.

Aço % Carbono	Dureza Brinell Aço recozido	Dureza Brinell Aço normalizado	Dureza Brinell Aço temperado
0,01	90	90	90
0,20	115	120	229
0,40	145	165	429
0,60	190	220	555
0,80	220	260	682
1,00	195	295	Acima de 682 + formação de fissuras
1,20	200	315	Acima de 682 + formação de fissuras
1,40	215	300	Acima de 682 + formação de fissuras

**Tab. 3 – Durezas de aços recozidos, normalizados e temperados; (Fonte: Izabel Machado, Introdução à Manufatura Mecânica – PMR 2202 – Tratamentos térmicos e de Superfície).**

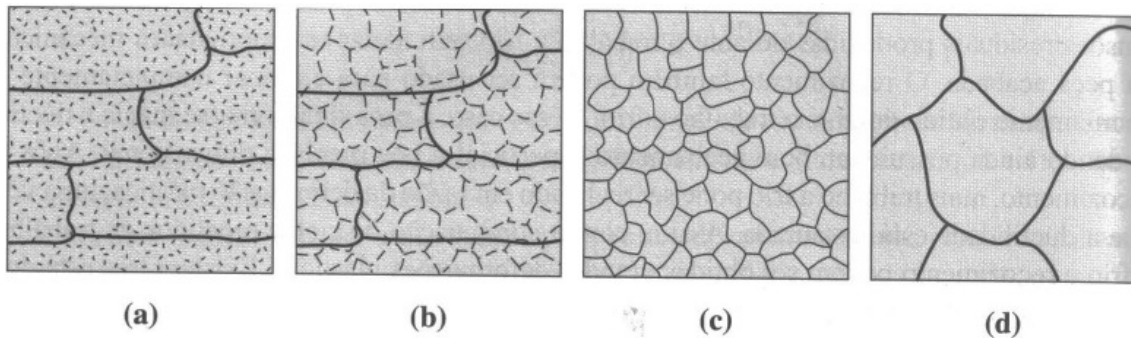
Na figura seguinte mostram-se as diferentes microestruturas de recozimento para uma liga de latão.



**Fig. 4.1.1.a – Recristalização parcial (c), recristalização completa (d), crescimento de grão após 15 min em 580°C (e), crescimento de grão após 10 min em 700°C (f); (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).**

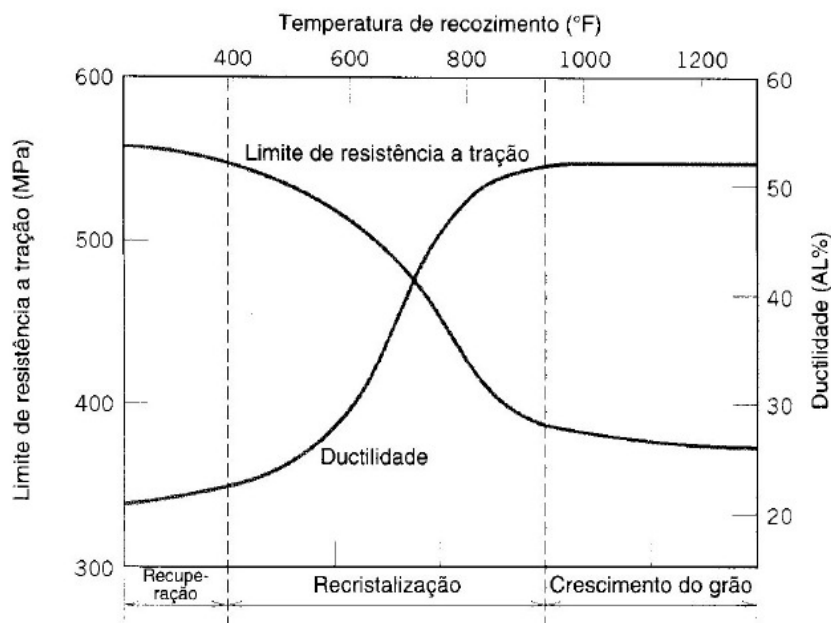
- Recozimento de Recuperação: alívio de uma parte da energia de deformação interna de um metal previamente deformado a frio, geralmente através de tratamento térmico (temperaturas baixas).
- Recozimento de Recristalização: formação de um novo conjunto de grãos livres de deformação no interior de um grão previamente deformado a frio, geralmente através de tratamento térmico (temperaturas intermédias).
- Recozimento de Crescimento de grão: aumento do tamanho médio de grão de um material policristalino. Para a maioria dos materiais ocorre em temperaturas mais elevadas de tratamento térmico.

A figura abaixo mostra como a influência da temperatura de recozimento interfere na microestrutura de materiais encruados:



**Fig. 4.1.1.b – Material encruado (a), após recuperação (b), após recristalização (c), e após crescimento de grão (d); (Fonte: ENG 1016 - Prof. Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).**

A diferença entre o crescimento do grão na recristalização (c) e aquele que acontece na etapa posterior, como crescimento do grão recristalizado (d) é que, no primeiro os novos grãos enucleados crescem de forma contínua e uniforme, até que toda a estrutura deformada esteja recristalizada. No segundo, existe difusão atômica no grão adjacente menor (menos estável termodinamicamente) pelo contorno do grão, provocando o movimento do próprio contorno e resultando no crescimento exagerado do grão maior.



**Fig. 4.1.1.c – Efeito do recozimento nas propriedades mecânicas de uma liga de latão após encruamento; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).**

No trabalho a frio, com o encruamento do material, as tensões não são aliviadas durante o processamento do material, para tal são realizados posteriormente tratamentos térmicos de recozimento subcríticos (recuperação e recristalização estáticas) com o objectivo de melhorar a ductilidade do material.

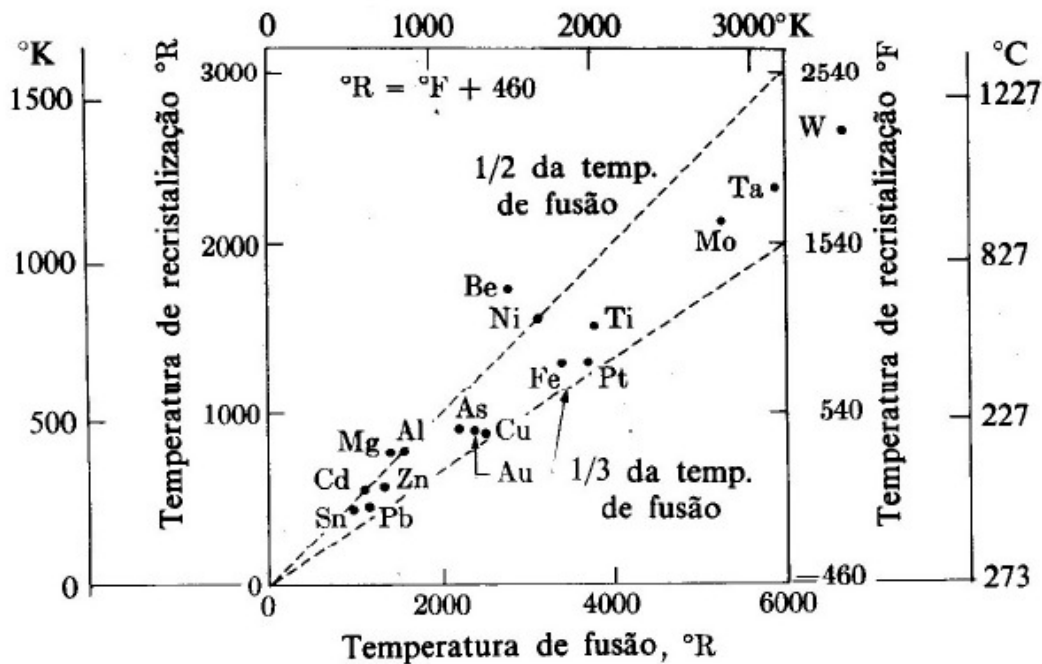


Fig. 4.1.1.d – Temperatura de recristalização versus temperatura de fusão de diferentes materiais; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).

O termo recozimento refere-se a um tratamento térmico no qual o material é exposto a uma temperatura elevada durante um período de tempo prolongado e arrefecido de forma lenta. Tal tratamento visa reduzir a dureza excessiva do material, eliminando as tensões residuais, aumentar a trabalhabilidade, facilitando o trabalho a frio ou atingindo microestruturas ou propriedades desejadas. Os recozimentos dividem-se em 3 tipos:

- Recozimento pleno ou supercrítico;
- Recozimento subcrítico;
- Esferoidização ou recozimento intercrítico.

#### 4.1.1.1 Recozimento pleno

É usado em aços de baixo e médio carbono, que serão submetidos a processos de trabalhabilidade e/ou conformação mecânica. A liga é austenizada (mudança de fase cristalina para CFC) em temperaturas indicadas em função da %C, até que seja alcançada uma condição de equilíbrio. Então a liga é mantida dentro do forno (transformação isotérmica) e arrefecida de forma lenta (transformação contínua), geralmente dentro do próprio forno, em processo ciclo de arrefecimento que exige várias horas. Os produtos microestruturais são grosseiros (perlite ou perlite + cementite pró-eutetóide ou ferrite pró-eutectóide).

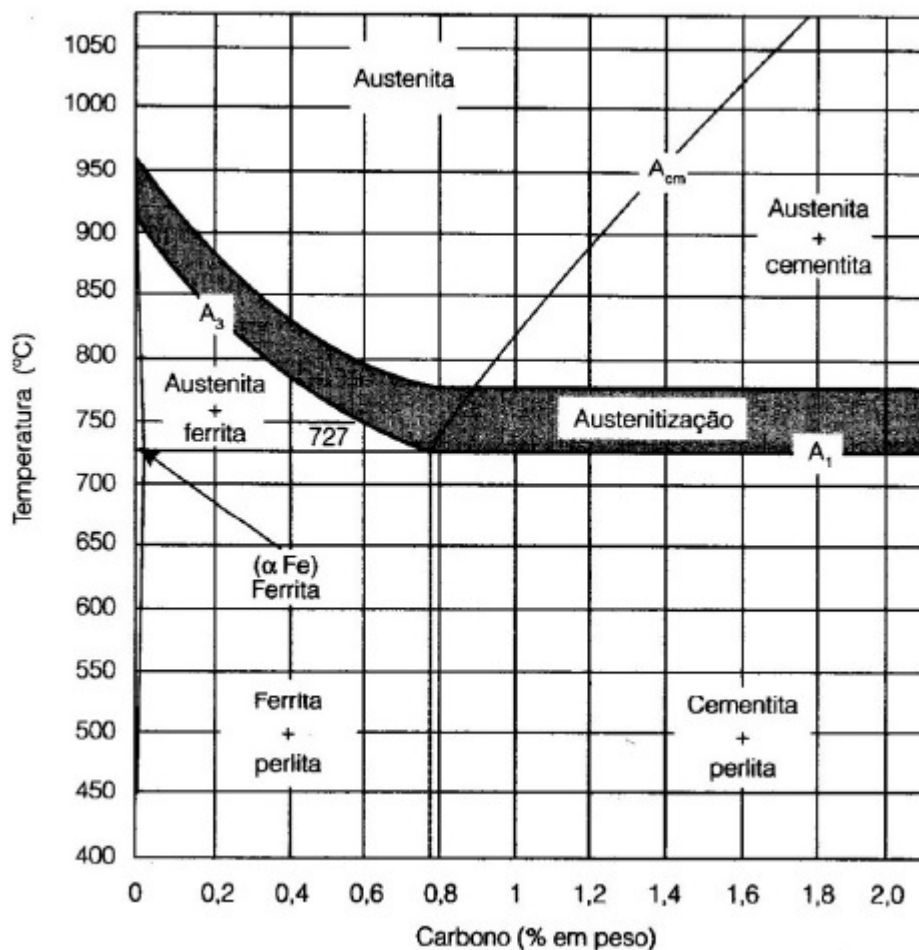
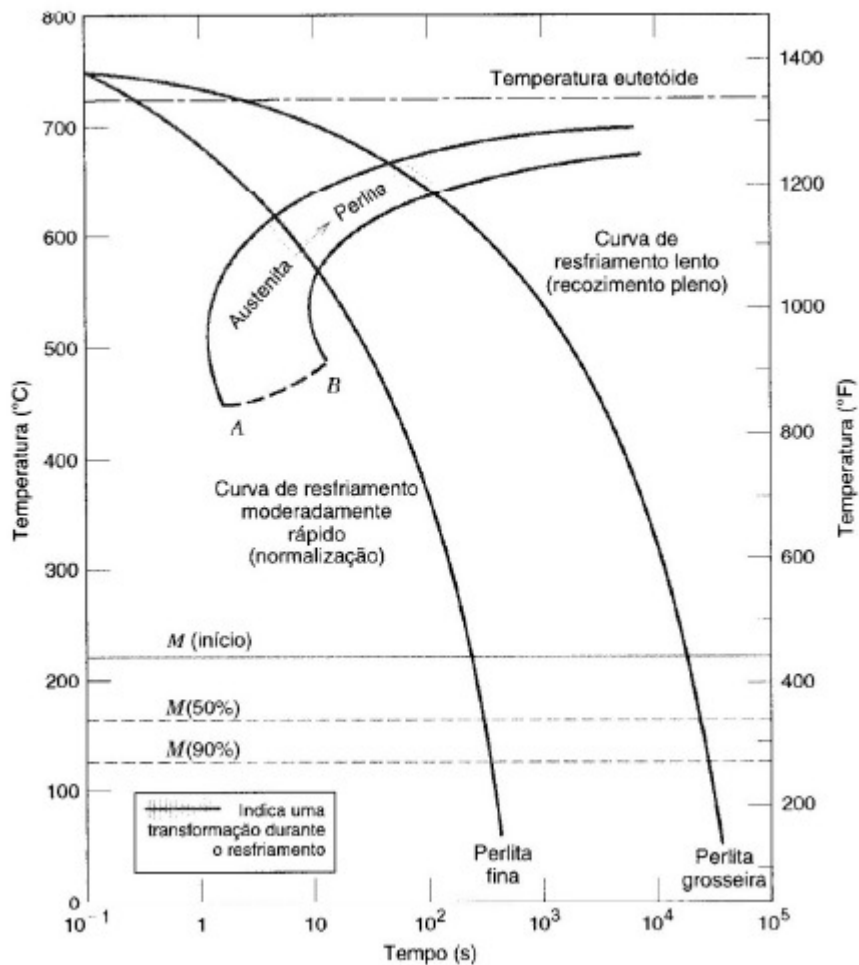


Fig. 4.1.1.1.a – Diagrama ferro - carbono com a região de temperatura indicada para a austenização necessária para o recozimento; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).



**Fig. 4.1.1.1.b – Diagrama TTT (Temperatura, tempo, transformação) com a indicação da formação de perlite durante arrefecimentos moderadamente rápidos e lentos; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).**

#### 4.1.1.2 Recozimento subcrítico

O Recozimento subcrítico é aquele em que o aquecimento se dá abaixo de  $A_1$ , fig. 6.1.3.a) e adoptado para recuperar a ductilidade do aço deformado a frio (encruado). Normalmente, o aquecimento dos aços para este tratamento ocorre entre 600°C e 680°C, seguindo-se de arrefecimento ao ar. As principais transformações que ocorrem neste tratamento são a recuperação e a recristalização das fases encruadas. Neste caso, não há lógica em se adoptar curvas TTT ou CCT (*continuous cooling transformation*) para a previsão das microestruturas resultantes do arrefecimento.

### 4.1.1.3 Esferoidização

Este tipo de Recozimento ocorre em aços carbono que, ao serem aquecidos acima de  $A_1$ , fig. 6.1.1.3.a), começam a formar austenite (homogénea ou heterogénea). Esta, por sua vez, em função do tempo e temperatura, pode ocorrer de maneira total ou parcial (entre  $A_1$  e  $A_3$ ). Ao serem arrefecidos abaixo de  $A_1$  a austenite dará origem a uma estrutura de ferrite e carbonetos esferoidizados (cementite globular) ou ferrite e perlite, dependendo das condições de arrefecimento e da estrutura anterior ao arrefecimento. A austenite homogénea tende a formar perlite enquanto a austenite heterogénea tende a formar carbonetos esferoidizados. A esferoidização também é conhecida como recozimento intercrítico em função das possibilidades de se obter uma estrutura de carbonetos esferoidizados em matriz ferrítica após austenização total ou parcial: manutenção por tempo prolongado (entre 15 e 25 h) à temperatura abaixo de  $A_1$ , arrefecer lentamente ao passar por acima de  $A_1$  ou ciclar acima e abaixo de  $A_1$ .

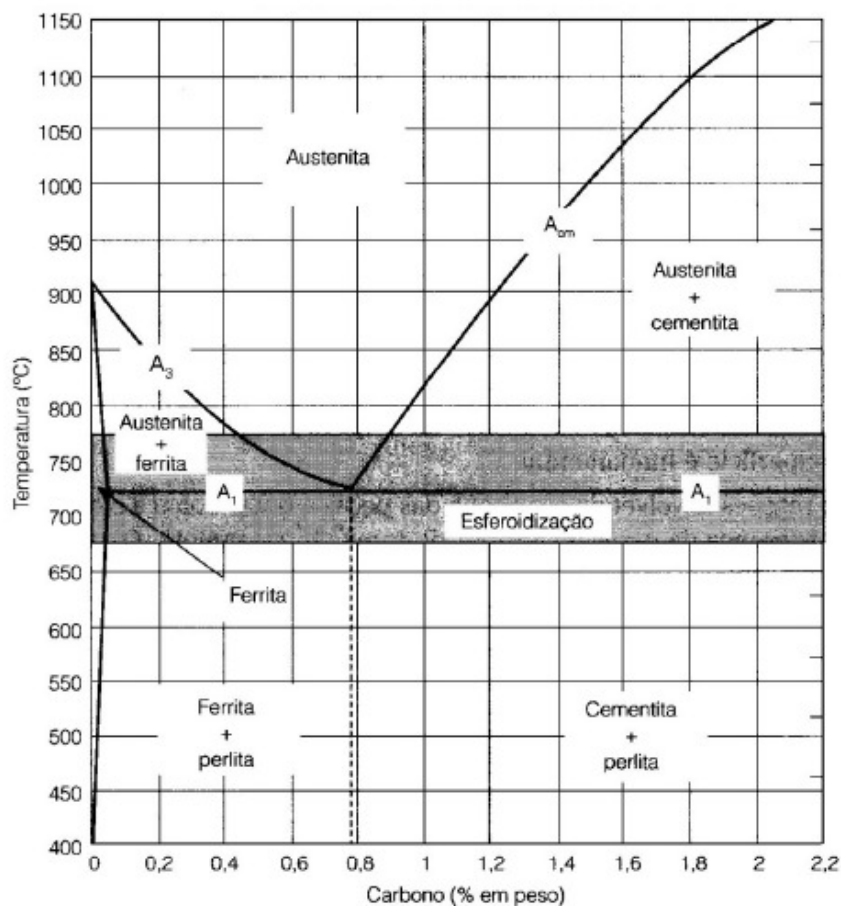
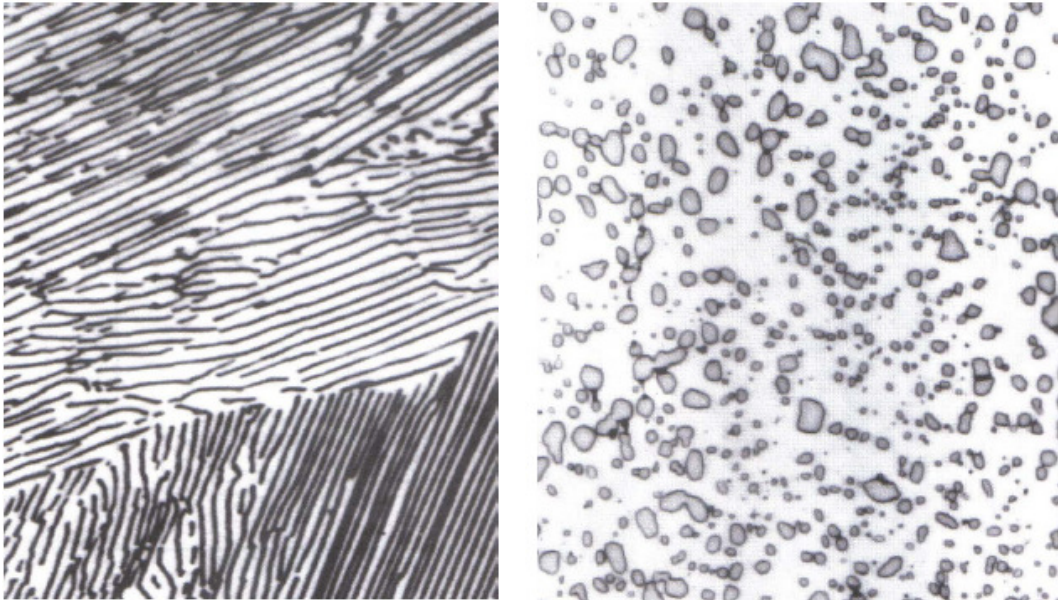


Fig. 4.1.1.3.a – Diagrama de Ferro – Carbono com a região de temperatura recomendada para a esferoidização de aços carbono; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).



**Fig. 4.1.1.3.b – Microestrutura típica dos aços após recozimento;**

**a) Perlite**

**b) Esferoidite (cementita globulizada).**

**(Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).**

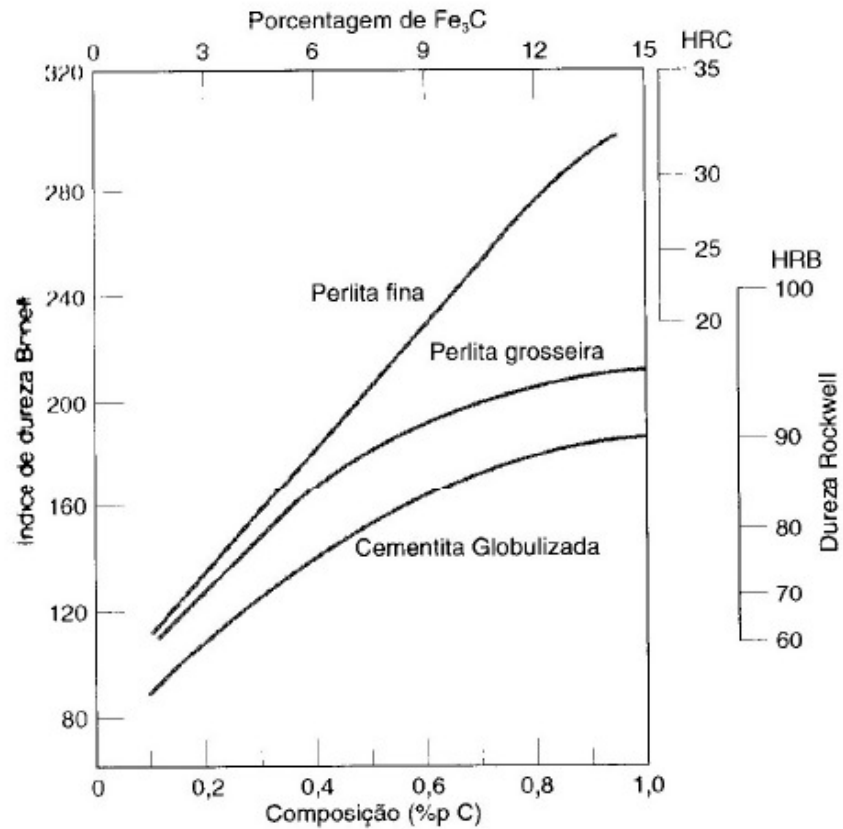


Fig. 4.1.1.3.c – Evolução das durezas da perlite e esferoidite em aços comuns em função do teor de carbono; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).

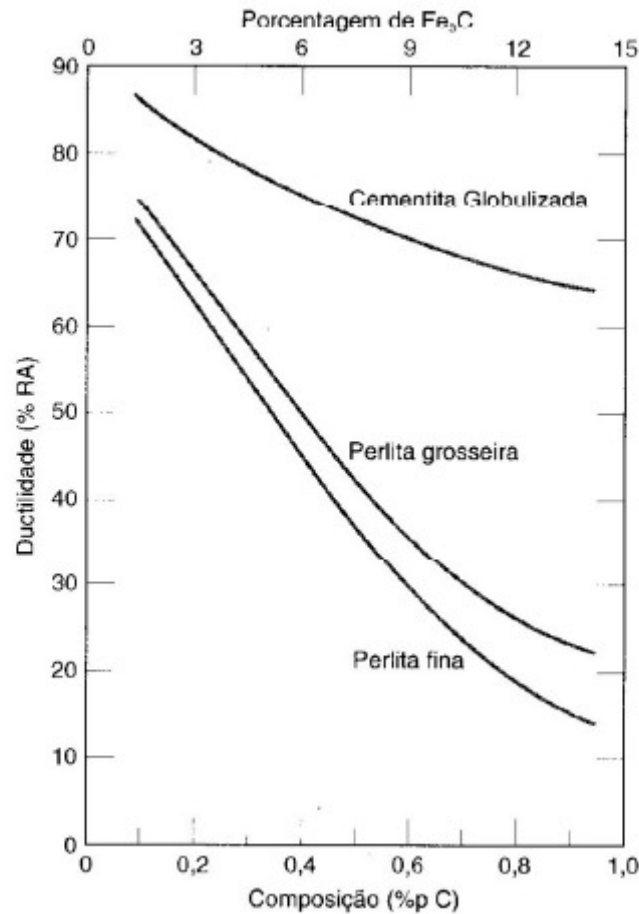


Fig. 4.1.1.3.d – Evolução da ductilidade da perlite e esferoidite em aços comuns em função do teor de carbono; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).

#### 4.1.2.1 Normalização

O Recozimento de normalização consiste na austenização completa do aço, seguida de arrefecimento em ar parado ou agitado, indicada para:

- Refinamento do tamanho do grão e homogeneização da estrutura visando melhor resposta do material na têmpera e revenido posterior;
- Melhoria da trabalhabilidade;
- Refinamento de estruturas brutas obtidas por fusão (peças fundidas);

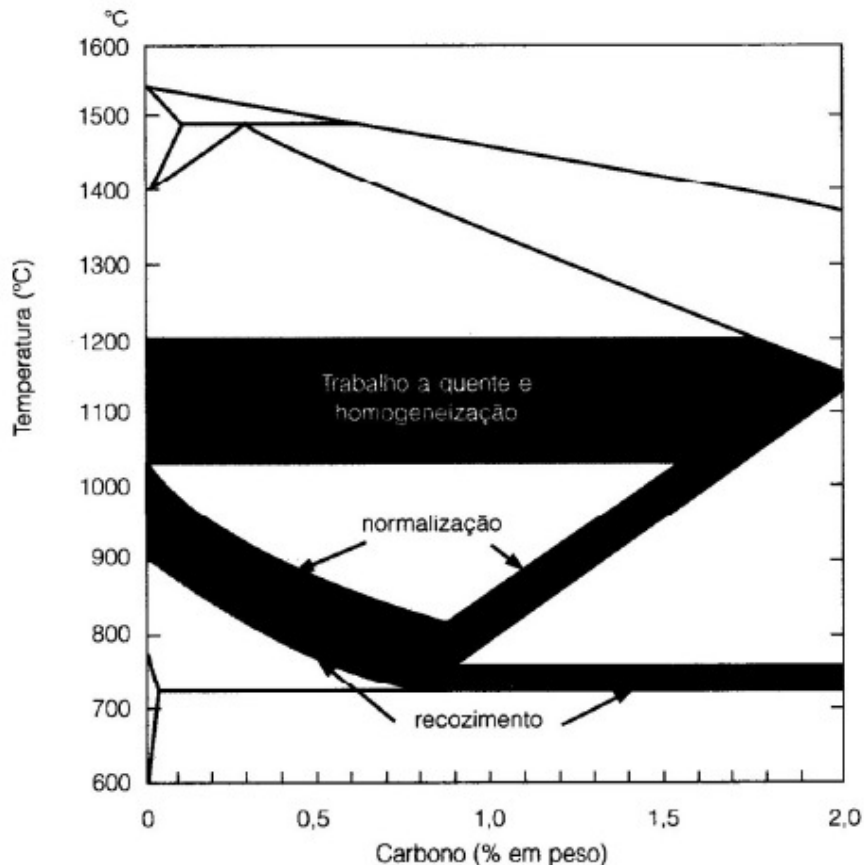


Fig. 4.1.2.1.a – Diagrama Ferro – Carbono com as regiões da temperatura de austenização para a normalização e o recozimento; (Fonte: ENG 1016 - Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio).

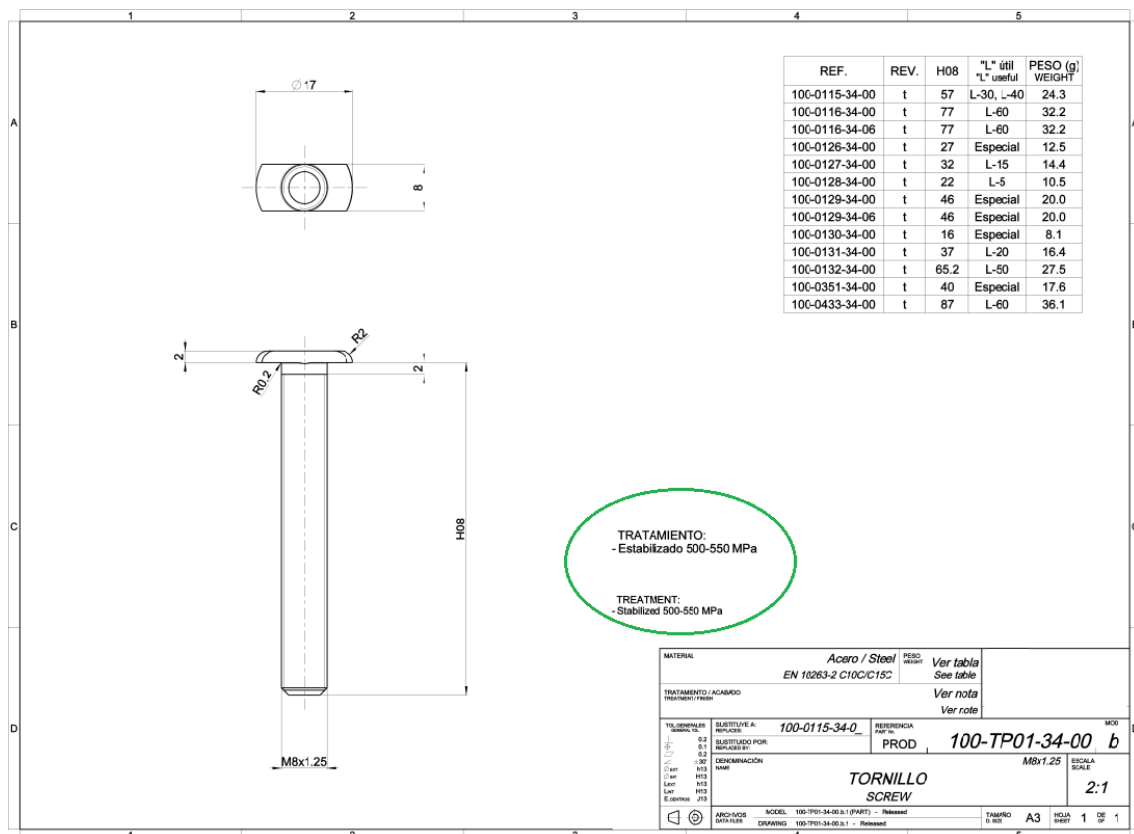
## 4.2 Normalização versus recozimento

- Aços hipoeutetóides: menor quantidade de ferrite e perlite mais fina na normalização. Para  $C \leq 0,2\%$  não se observam diferenças significativas nas propriedades mecânicas. Depois disto, aumento da dureza e resistência mecânica com diminuição da ductilidade, embora energia ao impacto não seja levemente afectada;
- Aços hipereutetóides: distribuição mais uniforme de carbonetos, cementite na austenite durante a normalização (acima de  $A_3$ ) e menor precipitação de cementite no contorno de grão austenítico. Daí, se obter a diminuição de dureza e resistência mecânica com aumento de ductilidade. Diminuição da resistência à energia e impacto com o aumento do teor de carbono.

## 5. Caso prático

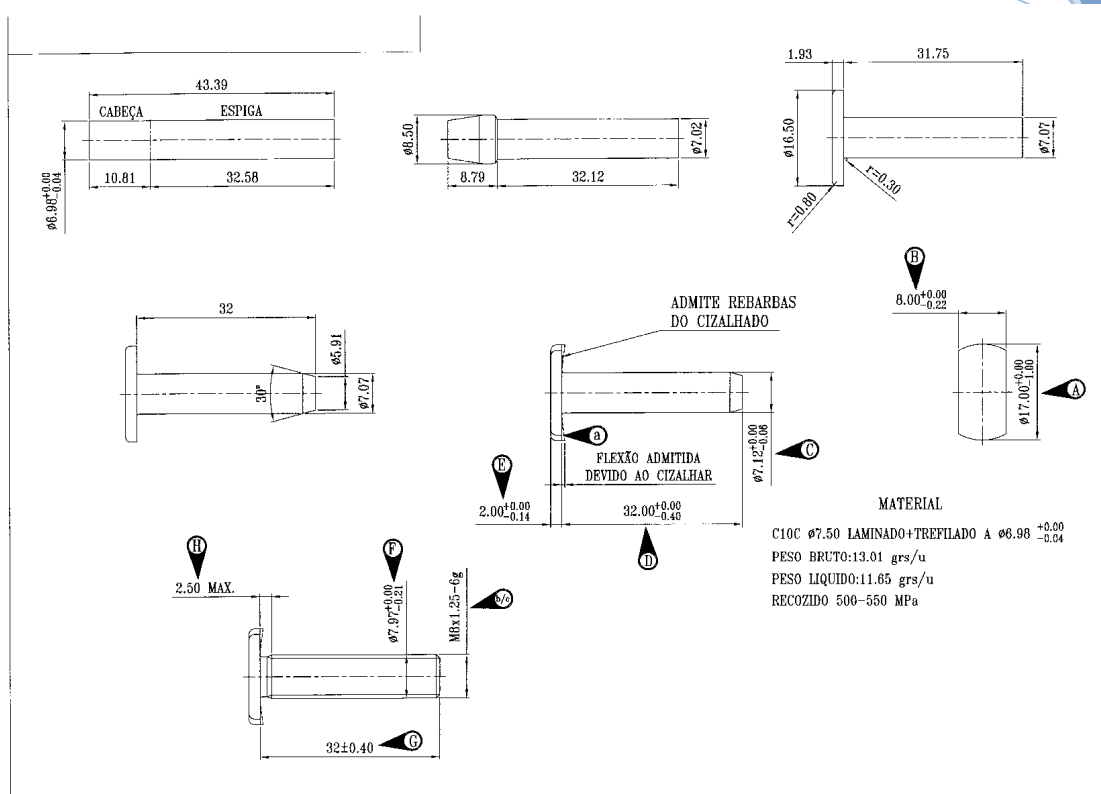
### 5.1 Estudo de casos reais

Um parafuso para a Indústria de Automação, actualmente em fabrico na Pecol II, ilustra muito bem todo o problema e a temática deste trabalho, e que está indicado na figura seguinte. Convém notar que o próprio cliente já pede um tratamento de Estabilizado 500-550 MPa, ou seja, já está sensibilizado para este problema:



**Fig. 5.1.a - Plano de um cliente do Ramo Automóvel, onde se pode ver a solução proposta para diminuir a probabilidade de falha entre a cana e a cabeça do parafuso; (Fonte: Departamento Técnico e Comercial, Pecol II, Componentes Industriais, Lda.)**

Para este parafuso o método de fabrico está descrito na figura seguinte, onde estão visíveis as etapas de uma das fases do processo de fabrico, a estampagem, aparecendo também na figura em baixo a fase de roscado. Este processo de estampagem é feito em 4 golpes numa máquina "Boltmaker". A roscagem é feita à parte pela dificuldade de alimentação.



**Fig. 5.1.b – Ficha técnica de um parafuso que retrata esta temática, produzido na Pecol II; (Fonte: Departamento Técnico, Pecol II, Componentes Industriais, Lda.)**

No caso dos parafusos apresentado aplica-se a metodologia do Recozimento alívio de tensões. De seguida são apresentados os dois Certificados de Tratamento Térmico pois foram tratados na Pecol II, para esta mesma peça dois diferentes materiais.



### Certificado de Tratamento Térmico

Pecol II - Componentes Industriais, Lda.

Página 1 de 1

3.1 de Acordo com EN10204:2004

Artigo

Cliente	ADA FASTENERS, S.L.		
Telefone	+34 937 714 313	Fax	+34 937 713 718
Processo Solic.	Recozimento recristalização 625°C/120min		
	000411895705	Lote	0209407901
Descrição	PF CAB CIL 2 FACES RECOZIDO SAG MSX32		
Ordem de Fabrico	Ordem de Fabrico 2009/94079		
Ficha Trat. Term.	Ficha Tratamento Termico (FTT) 2009/1994		
Nº Peças	32,000	Peso Unt.	11,65
Norma	C17C	Peso Total	372,80
Matéria Prima	FM F7514/C17C/C18QAL D=09,00		
Lote Matéria Prima	T0900G8070645		

Caraterística	Unidade	Nº Amostras	Nº Leituras	Tol. Mínima	Tol. Máxima	Tot. Leitur.	Min.	Máx.	Média
Tracção	Nmm2	3	1	500,00	550,00	3,0	515,00	536,00	526,33



## Certificado de Tratamento Térmico

Página 1 de 1

Pecol II - Componentes Industriais, Lda.

3.1 de Acordo com EN10204:2004

Artigo

Cliente	ADA FASTENERS, S.L.		
Telefone	+34 937 714 313	Fax	+34 937 713 718
Processo Solic.	Recozimento recristalização 505°C/100min		
	000411895705	Lote	0310036801
Descrição	PF CAB CIL 2 FACES RECOZIDO SAG M8X32		
Ordem de Fabrico	Ordem de Fabrico 2010/100368		
Ficha Trat. Term.	Ficha Tratamento Termico (FTT) 2010/975		
Nº Peças	15,000	Peso Unit.	11,65
Norma		Peso Total	184,50
Matéria Prima	FM C10C D=8,00MM		
Lote Matéria Prima	T080000467168		

Caraterística	Unidade	Nº Amostras	Nº Leituras	Tol. Mínima	Tol. Máxima	Tot. Leitur.	Min.	Máx.	Média
Dureza (HRB)	HRB	5	1	80,00	85,00	5,0	84,00	85,00	84,80
Tracção	Nmm2	3	1	500,00	550,00	3,0	529,00	536,00	531,33

**Fig. 5.1.c – Certificados do Tratamento Térmico para o parafuso apresentado; (Fonte: Departamento Tratamentos Térmicos, Pecol II, Componentes Industriais, Lda.)**

A seguir é retratado um outro caso em que este problema foi solucionado. Abaixo plano do cliente do parafuso onde se verificou este tipo de problema e um estudo feito por um laboratório creditado chamado Servimetal, que nos foi facultado pelo cliente. Com base neste relatório foi possível a resolução do problema.





**Fig. 5.1.d – Imagens / fotos de parafusos danificados na região entre a cana e a cabeça do parafuso; (Fonte: Servimetal, Análises Químicas – Físicos – Metalográficos – Investigación – Asesoramiento Metalúrgico, Cliente: FLEXNGATE ESPAÑA, S.A., 8/06/2007).**

De acordo com a sua composição química, o material utilizado corresponde a um aço C35e segundo a EN 10083-1 (1996).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
0,362	0,068	0,717	0,014	0,015	0,112	0,0044	< 0,001	0,032

Na figura seguinte observa-se a sua microestrutura (micrografia) correspondente a microestrutura martensítica revenida formada por uma textura fina e compacta, totalmente transformada, sem ferrite.

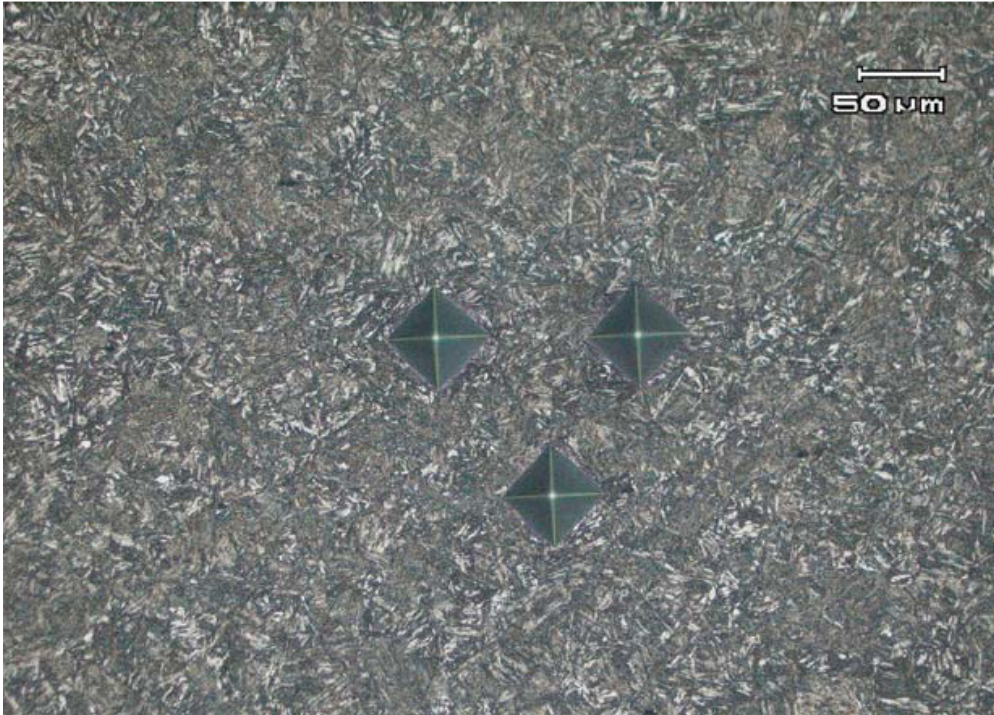


Fig. 5.1.e – Micrografia do aço usado com exemplo; (Fonte: Servimetal, Análises Químicas – Físicos – Metalográficos – Investigación – Asesoramiento Metalúrgico, Cliente: FLEXNGATE ESPAÑA, S.A., 8/06/2007).

### 5.1.1 Características mecânicas

Para a caracterização mecânica usou-se ensaios de dureza com as seguintes características:

$$\text{Condições} \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ Kg} \\ 30 \text{ segundos} \\ \text{Vickers} \end{array} \right.$$



**Fig. 5.1.1.a – Micrografia do aço com as marcas do penetrador Vickers; (Fonte: Servimetal, Análises Químicas – Físicas – Metalográficas – Investigación – Asesoramiento Metalúrgico, Cliente: FLEXNGATE ESPAÑA, S.A., 8/06/2007).**

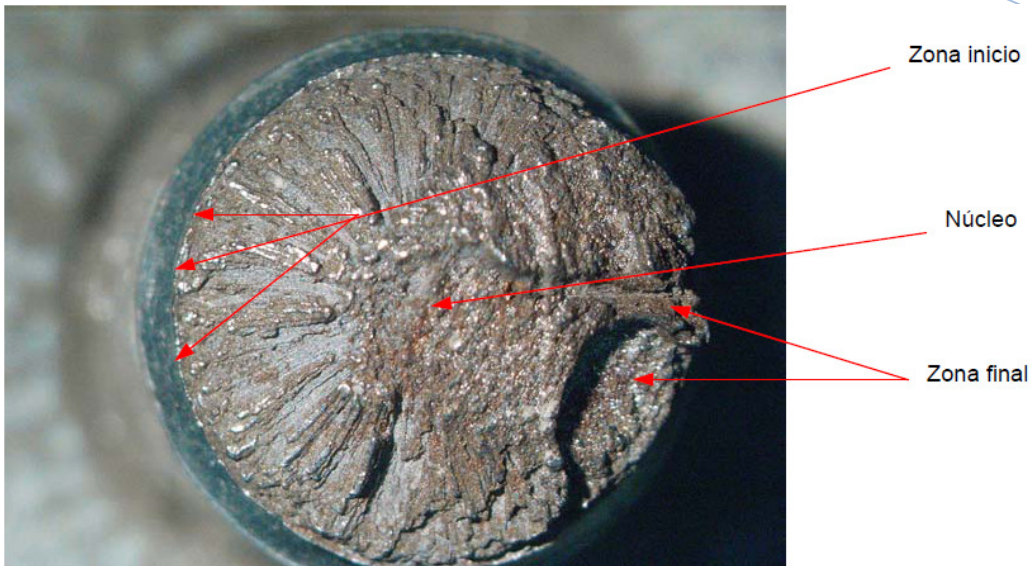
Os resultados obtidos foram:

HV	HRc	N/mm <sup>2</sup>
401	40,8	1290

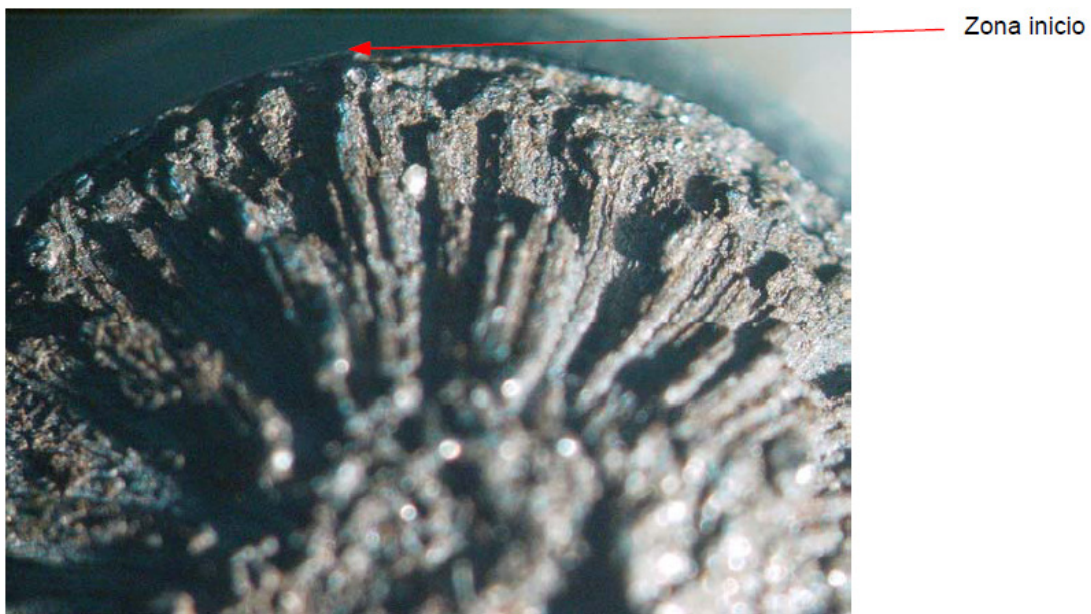
**Tab.4 - Resultados obtidos com o penetrador Vickers e os valores equivalentes em termos de Dureza HRC e Resistência à tracção.**

### 5.1.2 Macrografia

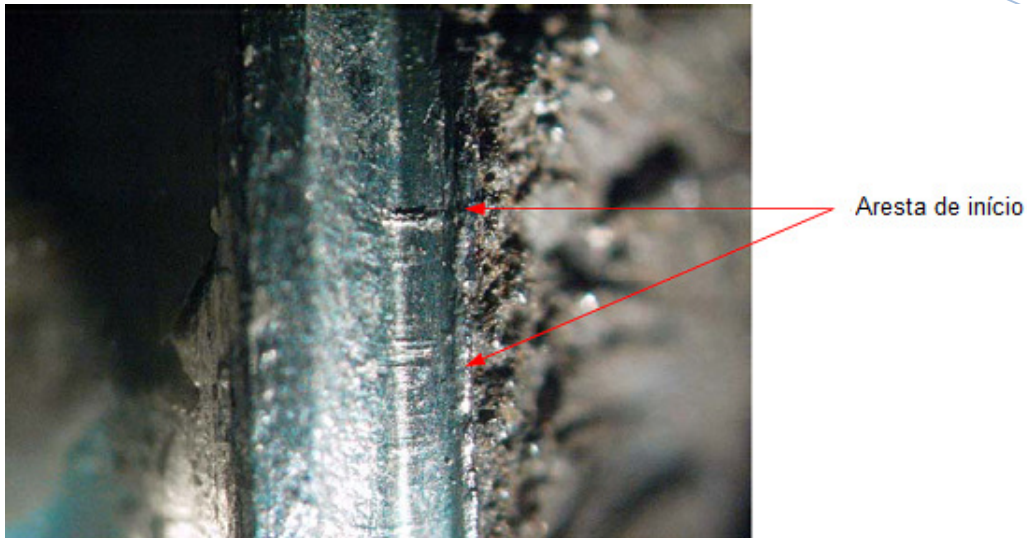
Nas fotomicrografias seguintes observam-se as características da fractura.



**Fig. 5.1.2.a – Macrografia da fractura (ampliação de 6 vezes); (Fonte: Servimetal, Análises Químicas – Físicos – Metalográficos – Investigación – Asesoramiento Metalúrgico, Cliente: FLEXNGATE ESPAÑA, S.A., 8/06/2007).**



**Fig. 5.1.2.b – Macrografia da fractura (ampliação de 12 vezes); (Fonte: Servimetal, Análises Químicas – Físicos – Metalográficos – Investigación – Asesoramiento Metalúrgico, Cliente: FLEXNGATE ESPAÑA, S.A., 8/06/2007).**



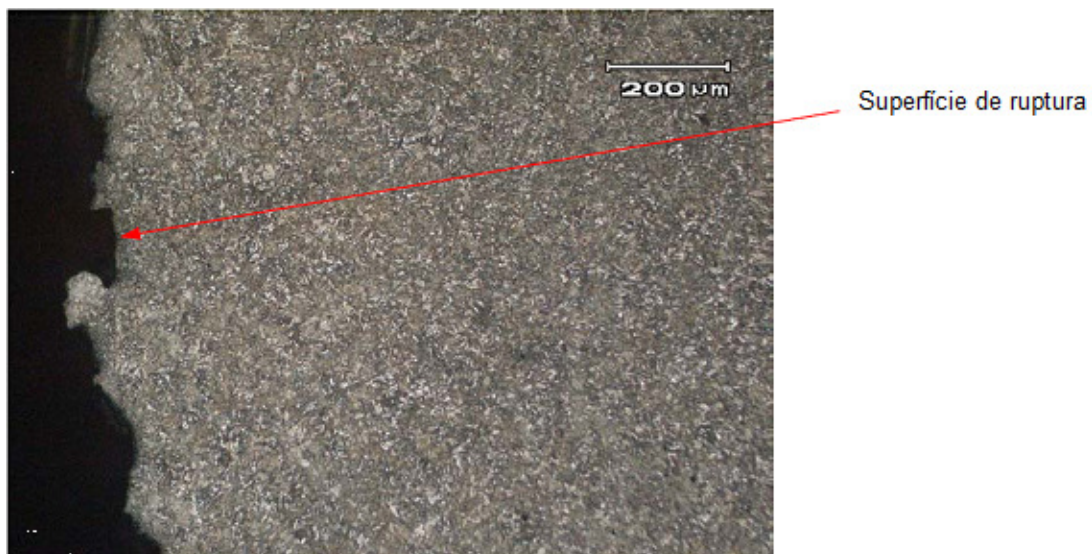
**Fig. 5.1.2.c – Macrografia da fractura (ampliação de 12 vezes); (Fonte: Servimetal, Análises Químicas – Físicos – Metalográficos – Investigación – Asesoramiento Metalúrgico, Cliente: FLEXNGATE ESPAÑA, S.A., 8/06/2007).**

A ruptura produz-se num só ciclo, (não aparecem marcas de fadiga). Na fotomacrografia nº 1, podem visualizar-se as marcas de tensão-fragilidade que a produzem.

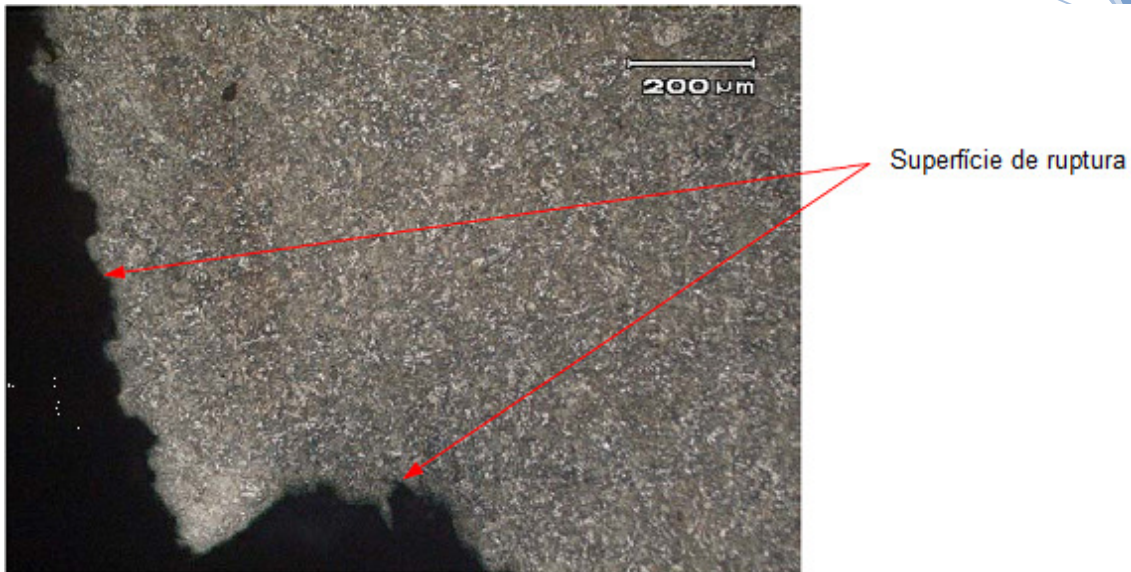
No núcleo observamos a zona de inferior concentração e a ruptura final na área de cisalhamento (shear lips).

Na fig. 5.1.2.b, mostra-se a área de início e na fig. 5.1.2.c, a aresta dessa zona.

A superfície de ruptura mostra desgarramento intergranular (Fig. 5.1.2.d e fig. 5.1.2.e).



**Fig. 5.1.2.d – Micrografia da fractura; (Fonte: Servimetal, Análises Químicas – Físicos – Metalográficos – Investigación – Asesoramiento Metalúrgico, Cliente: FLEXNGATE ESPAÑA, S.A., 8/06/2007).**



**Fig. 5.1.2.e – Micrografia da fractura; (Fonte: Servimetal, Análises Químicos – Físicos – Metalográficos – Investigación – Asesoriamiento Metalúrgico, Cliente: FLEXNGATE ESPAÑA, S.A., 8/06/2007).**

O início é adequadamente homogêneo, não se apreciando problemas de corrosão superficial, mas pelas suas características mecânicas e a característica do acabamento podem incrementar a fragilidade que se verifica.

Como consequência da evidência obtida das análises e ensaios realizados, estima-se que a ruptura do parafuso encontra-se directamente relacionada com a fragilidade residual introduzida pelo tratamento, aumentada, possivelmente com o acabamento (zincado).

As microdurezas contrastadas no núcleo e a sua resistência relacionada, superam em muito os requerimentos da classe 10.9 s/EN ISO 898-1 (2000) de 950 a 1200 N/mm<sup>2</sup>. Considerando também, a qualidade do aço usado no fabrico, estas durezas encontram-se muito fora de especificação, proporcionando uma desnecessária fragilidade, incrementada com a possível hidrogenização que pode ocorrer com este tipo de acabamento e que a durezas de 40HRc é muito mais perigosa.

### 5.3 Fragilização por hidrogénio

A fragilização por hidrogénio é associada a parafusos com dureza superior a 30 HRC e produzidos em aço carbono ou aço liga. O seu efeito pode causar diminuição de ductilidade, rupturas, ainda que aplicados sob tensões abaixo de suas resistências de cedência.

A absorção do hidrogénio livre do banho electrolítico, ou de qualquer outra fonte, pode provocar a fragilidade do material. Isso ocorre porque o hidrogénio atómico que migrou para os contornos dos grãos (ponto de maior concentração de tensão) gera uma pré-tensão no parafuso que, ao apertado, excede sua capacidade de carga, ocorrendo, em pouco tempo, sua fractura.

### **5.3.1 Processos que podem causar a hidrogenização nos parafusos**

A decapagem ácida e a electro-deposição de zinco estão entre os tratamentos superficiais mais comuns que causam a hidrogenização.

### **5.3.2 Tratamento superficial a utilizar nos parafusos 10.9 ou 12.9, para aplicações em ambiente corrosivo**

Algumas das alternativas para se evitar a fragilização por hidrogénio em parafusos de alta resistência é fazer-se uso de um processo de tratamento superficial que não ocorra por banho electrolítico e não possua processo de limpeza por decapagem ácida. Como é o caso dos organo-metálico, por exemplo: Zintek, Geomet, Dacromet ou Delta Protpekt.

A medida correctora para resolver este problema é aplicar um revenido adequado, posterior à têmpera, com o intuito de centrar a dureza e resistência que recomenda a classe requerida.

Uma outra possibilidade seria efectuar um Normalizado antes da têmpera e revenido: Este tratamento tem por objectivo deixar o material em estado normal, ou seja, ausência de tensões internas e com uma distribuição uniforme do carbono.

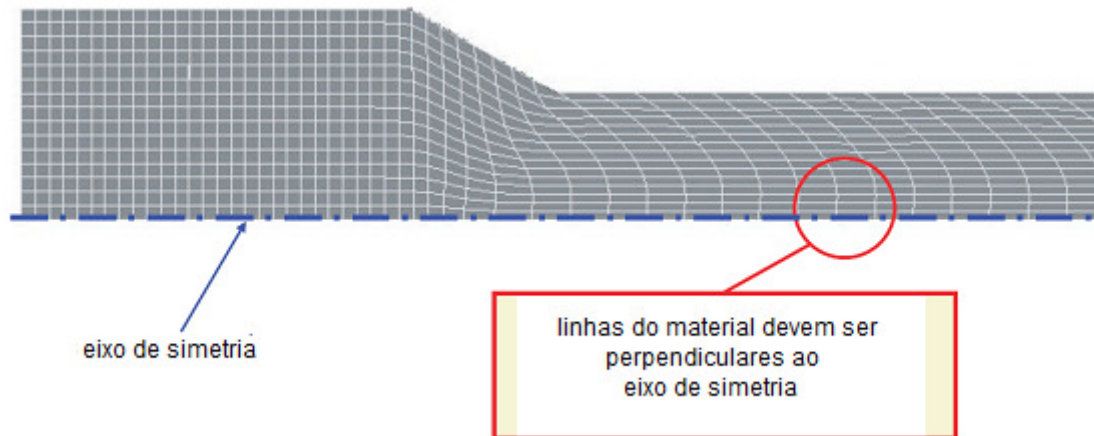
## 6. Aplicação de elementos finitos na optimização de peças estampadas a frio

De seguida é apresentado um problema de formação de um cavaco num rebite 6x11,5 e a solução baseada na análise de elementos finitos.

Este exemplo foi apresentado na “ 4<sup>th</sup> ICFG Workshop on Process Simulation; Shanghai/China 22-25 May 2004”.

### 6.1 Condições fronteira

A validação dos resultados triviais está relacionada com o cumprimento das condições fronteira. Após o cálculo de elementos finitos, os nós dos elementos finitos com deslocamentos ou velocidades estabelecidos a zero devem permanecer em suas respectivas posições iniciais. Isso também é válido para nós em contacto com corpos rígidos: eles não estão autorizados a penetrar nesses corpos. Superfícies sobre as quais não são definidas nenhuma tracção são locais em que as tensões normais e de cisalhamento devem desaparecer, sendo que esta condição não é realmente simples de verificar. Se tensões nodais ou elementares são emitidas, é verificado que a condição tensão zero não é necessariamente satisfeita para nós da superfície de tracção livre e elementos. A forma mais exacta para verificar essa condição é ver o centro de tensões dos elementos (estes são os locais mais precisos de tensão dos elementos) a partir do interior da peça para os elementos de superfície. Extrapolando essas tensões para a superfície deve render valores zero. Outra verificação útil é feita nos eixos de simetria. Primeiro de tudo, as tensões de cisalhamento ao longo do eixo de simetria ou plano devem desaparecer. Em segundo lugar, as linhas de material devem ser perpendiculares ao eixo de simetria. Na Figura 6.1.a) apresenta-se a malha deformada durante a simulação de extrusão. Do lado não extrudido, a malha não deformada é perpendicular ao eixo de simetria. Assim, deve também permanecer a malha perpendicular ao eixo de simetria no lado extrudido. Este teste é extremamente útil para validar modelos simétricos.



**Fig. 6.1.a – Malha deformada durante a extrusão.**

## 6.2. Testes de convergência

A convergência das variáveis investigadas para um valor constante, alterando vários parâmetros numéricos é um procedimento essencial na simulação de elementos finitos. Os parâmetros que devem ser controlados são o tamanho da malha e topologia, parâmetros de contacto, parâmetros de articulação, tamanho do incremento (passo de tempo), limites de convergência, parâmetros de resolução, parâmetros do modelo de atrito, e modelos de apresentação de geometria para matrizes e ferramentas. Entre estes numerosos parâmetros, obviamente, os mais importantes são o tamanho da malha e topologia, os limites de convergência, e intervalos de tempo. No entanto, alguns dos outros parâmetros podem ser também críticos. Um dos parâmetros numéricos mais perigosos, nem mesmo conhecido por alguns analistas experientes está escondido no modelo de atrito.

## 6.3. Simulação usando o Método de Elementos Finitos

O software usado foi o MSC.SuperForm 2004, sobre a malha pode-se dizer que a sua qualidade foi definida pelos "testes de convergência", a média do elemento comprimento para a simulação da estampagem do parafuso é de 0,2 mm. O processo foi modelado usando aproximadamente 2.000 elementos e todas as etapas foram consideradas axissimétricas. As ferramentas foram definidas como rígidas e o parafuso como um material elasto-plástico. A curva de fluxo utilizada para o parafuso foi retirada do banco de dados do programa, sendo adoptada a curva do aço QSt. 36-3. O modelo isotrópico foi definido para representar o encruamento do material. A malha representando a geometria do parafuso foi elaborada com elementos quadrangulares bi-lineares. O atrito entre a matriz e o parafuso foi descrito pelo modelo de Coulomb: "A Força

devido ao atrito é proporcional à carga de compressão e é independente da velocidade de deslizamento.” Este valor foi retirado do banco de dados do programa, sendo utilizado o valor  $\mu_a = 0,7$ . A simulação foi considerada isotérmica.

**Problema:** Anel em forma de chip pode ser retirado do produto.

De seguida foto descritiva do problema:

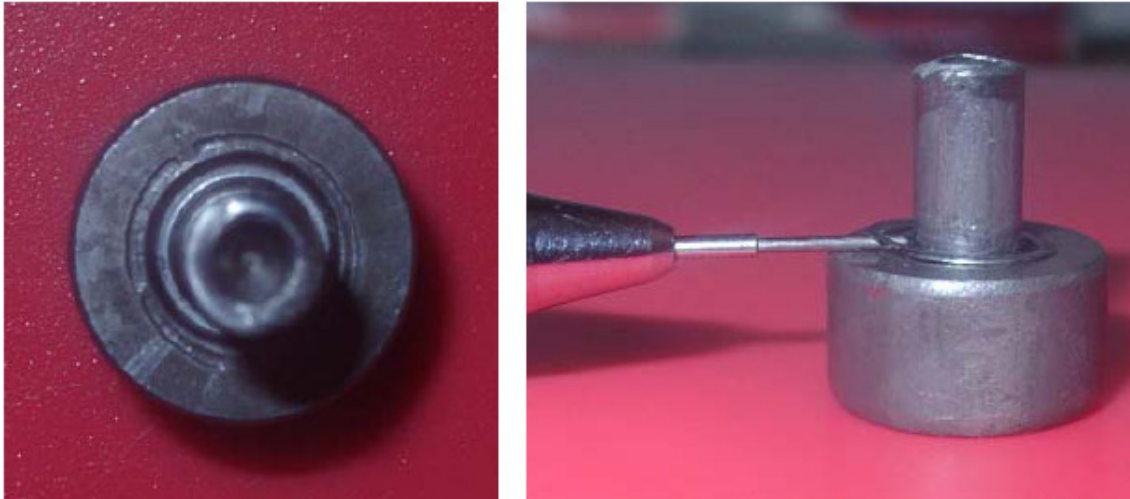


Fig. 6.3.a – Foto do rebite exemplificando o problema; (Fonte: Finite Element Modeling Applications in Fastener Production, Norm Fasteners Co. Izmir/Turkey, 4<sup>th</sup> ICFG Workshop on Process Simulation, Shanghai/China 22-25 May 2004).

Na estampagem a frio de este rebite foi usado o seguinte processo de fabrico inicial, de acordo com a figura subsequente:

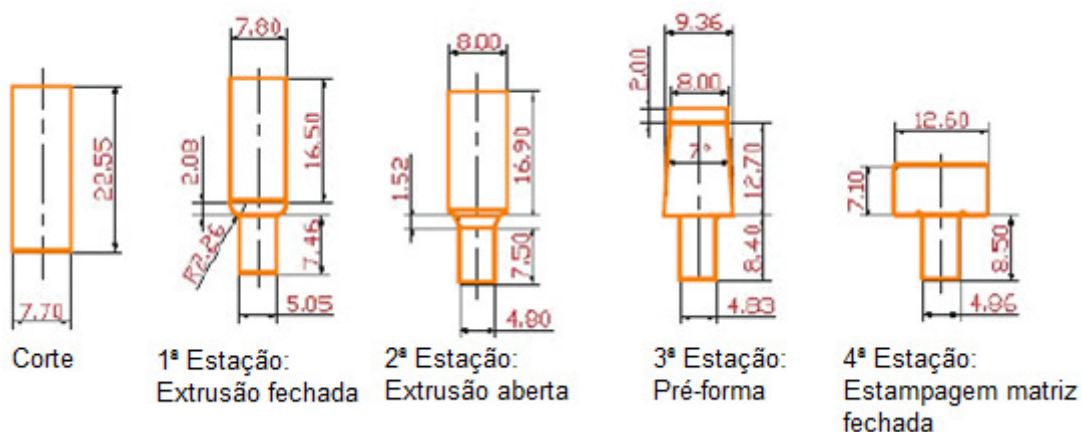
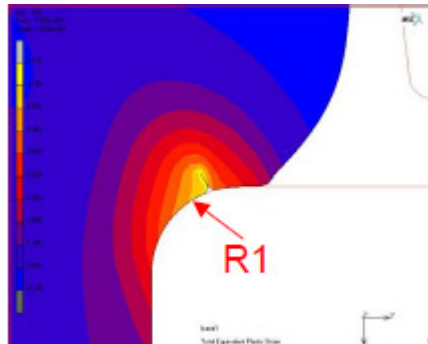


Fig. 6.3.b – Processo de fabrico inicial para a produção do rebite; (Fonte: Finite Element Modeling Applications in Fastener Production, Norm Fasteners Co. Izmir/Turkey, 4<sup>th</sup> ICFG Workshop on Process Simulation, Shanghai/China 22-25 May 2004).

A análise de Elementos Finitos mostra a razão: baixo raio da matriz na terceira estação:



**Fig. 6.3.c – Tensões mostradas pelo Método de Elementos Finitos na zona de raio 1 mm em que é perceptível a fissura; (Fonte: Finite Element Modeling Applications in Fastener Production, Norm Fasteners Co. Izmir/Turkey, 4<sup>th</sup> ICFG Workshop on Process Simulation, Shangai/China 22-25 May 2004).**

A solução foi incrementar o raio da terceira matriz para 2 mm e deixou de existir a formação do anel.



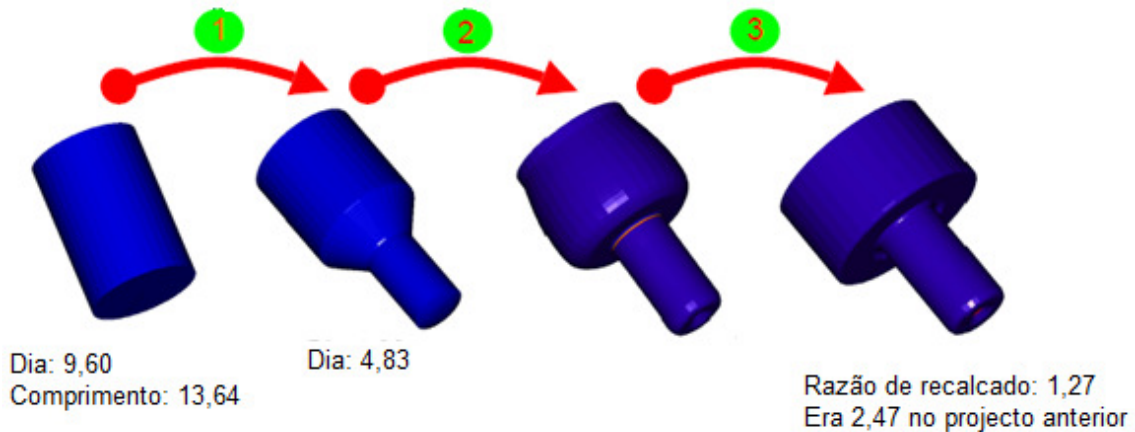
**Fig. 6.3.d – Aumento do raio da matriz para 2mm; (Fonte: Finite Element Modeling Applications in Fastener Production, Norm Fasteners Co. Izmir/Turkey, 4<sup>th</sup> ICFG Workshop on Process Simulation, Shangai/China 22-25 May 2004).**

Para eliminar as falhas do projecto anterior, tais como:

- Razão de recalco elevado;
- Probabilidade de formação de um anel;

- Probabilidade de ocorrência de fissuras intra-granulares na peça (Chevron cracking);
- Distribuição desequilibrada da força entre as estações.

Decidiu-se fazer o processo de estampagem a frio com um diâmetro de entrada mais largo, como se pode verificar em baixo pelo novo processo de fabrico:



**Fig. 6.3.e – Esquema representativo do novo processo de fabrico; (Fonte: Finite Element Modeling Applications in Fastener Production, Norm Fasteners Co. Izmir/Turkey, 4<sup>th</sup> ICFG Workshop on Process Simulation, Shanghai/China 22-25 May 2004).**

A deformação relativa ( $\epsilon$ ) é:

$$\epsilon = \ln \frac{A_0}{A_1}$$

$A_0$  = secção transversal antes da conformação

e

$A_1$  = secção transversal depois da conformação.

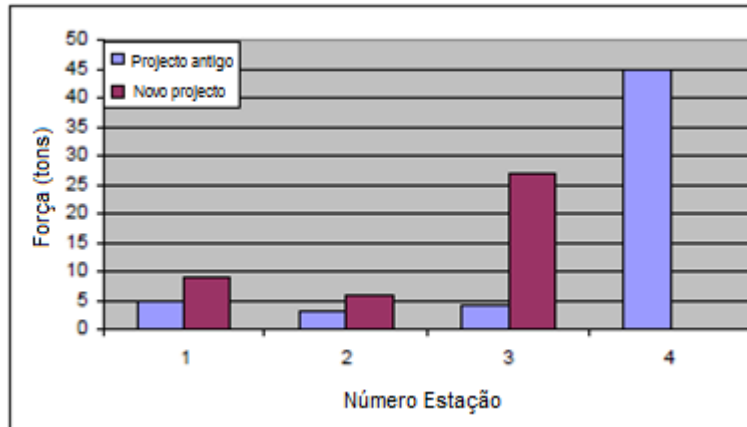
Obtendo-se o valor seguinte:

$$\epsilon = \ln \frac{A_0}{A_1} = \ln \frac{72,38}{18,40} = 1,37$$

Com este novo processo atingiram-se novas condições:

- As forças, bem como as tensões nas matrizes foram consideravelmente reduzidas;

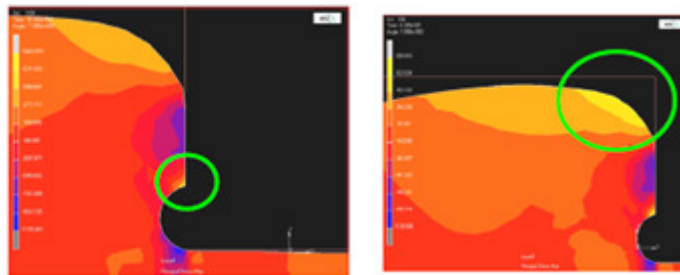
- Foram obtidas mais tensões de compressão residuais;
- Tensões principais durante o processo no produto mais baixas.



**Fig. 6.3.f – Gráfico representativo da diferença de força na matriz com os dois diferentes processos; (Fonte: Finite Element Modeling Applications in Fastener Production, Norm Fasteners Co. Izmir/Turkey, 4<sup>th</sup> ICFG Workshop on Process Simulation, Shangai/China 22-25 May 2004).**

As tensões principais máximas forma reduzidas de:

- 1040 para 640 MPa;
- 650 para 580 MPa.



**Fig. 6.3.g – Tensões Principais máximas resultantes através do Método de Elementos Finitos; (Fonte: Finite Element Modeling Applications in Fastener Production, Norm Fasteners Co. Izmir/Turkey, 4<sup>th</sup> ICFG Workshop on Process Simulation, Shangai/China 22-25 May 2004).**

## 7. Discussão dos resultados / Conclusões

Nesta secção da Tese de Mestrado encontram-se as conclusões que foram possíveis retirar no decurso da elaboração deste estudo.

- No primeiro caso apresentado, exige-se um raio entre a cana e a cabeça do parafuso de 0,2 mm, o projecto do cliente assim o exige! Como foi referido por Mickey T. Oldham [1], para raios inferiores a 0,25 mm há grande possibilidade de ruptura nessa zona. Além disso, há outro factor que vem complicar ainda mais as contas e aumentar o risco de ruptura: é a espessura da cabeça que é muito baixa. O cliente como já está precavido para este problema refere, no próprio plano, um tratamento térmico de “Estabilizado 500 – 550 MPa”. A solução adoptada pela Pecol II, foi a de efectuar um tratamento térmico de Recozimento Alívio de Tensões. Como esta peça continua em produção e até ao momento não foi dado a conhecer nenhum problema em relação a este ponto, acreditamos que o tratamento térmico realizado diminui consideravelmente o risco de ruptura, assumindo-se assim como válida esta solução.
- No segundo caso apresentado, onde mais uma vez o cliente é que é responsável pela elaboração do projecto do parafuso, este que tem como função a cravação numa chapa. É evidente que não pode existir um grande raio entre a cana e a cabeça do parafuso, pois iria impossibilitar a cravação. Este projecto está praticamente na recta final, mas até estar solucionado, foi necessário bastante tempo. Num primeira fase projectou-se este parafuso para uma máquina de Uma Matriz, dois Golpes seguindo-se assim até ao final. Um dos problemas que sempre existiu quando da realização da estampagem foi o aparecimento de fissuras transversais na cabeça. Como a cabeça tem um grande diâmetro e espessura baixa, depois da estampagem da pré-forma da cabeça no 1º Golpe e passagem ao 2º Golpe surgiam as ditas fissuras na finalização da forma da cabeça do parafuso. Estas fissuras eram resultado de deformação excessiva e, na altura, teria sido conveniente ter mudado todo o processo de fabrico, ou seja, mudar para uma máquina de 4 estações.

Após a análise do relatório da Servimetal, foram colocados novos parâmetros para o tratamento térmico, aumentaram-se também as horas de desidrogenização e o problema foi solucionado.

- No terceiro e último caso apresentado, foi usado o Método dos Elementos Finitos. Através deste método foi possível quantificar o que traduz o aumento do raio, ainda que seja no processo produtivo, na estampagem da peça.

O problema que existia com o primeiro processo produtivo e usando quatro estações deixou de existir, aumentando o raio da terceira matriz de 1 mm para 2 mm. Com esta alteração e com o processo produtivo radicalmente alterado, passando-se a utilizar somente 3 estações, foram melhorados vários aspectos. Nas matrizes, em termos de forças e tensões, houve uma clara melhoria; foram também obtidas mais tensões de compressão residuais e as tensões principais, durante o processo no produto, diminuíram consideravelmente.

Em suma, penso que a realização deste trabalho foi de elevada importância. Com a pesquisa executada, leitura realizada e contactos efectuados foi-me permitido identificar mais detalhadamente o problema, perceber a razão da sua existência e principalmente chegar às soluções para a resolução do mesmo.

O trabalho praticado ao longo deste ano é de grande importância na minha realização profissional e será também seguramente no futuro.

## 8. Referências Bibliográficas

- [1] ACUMENT GLOBAL TECHNOLOGIES – Cold Forming Specials.
- [2] José Manuel, Formação em Estampagem e Roscagem, Pecol II, 2008.
- [3] PMR 2202 – Introdução a Manufatura Mecânica – Prof. Dr. G. F. Batalha, 8/10/2003.
- [4] Introduction to Cold Forming - Carpenter Technology Corporation.
- [5] Finite Element Modeling Applications in Fastener Production, Norm Fasteners Co. Izmir/Turkey, 4<sup>th</sup> ICFG Workshop on Process Simulation, Shanghai/China 22-25 May 2004.
- [6] Servimetal, Análises Químicas – Físicas – Metalográficas – Investigación – Asesoramiento Metalúrgico, Cliente: FLEXNGATE ESPAÑA, S.A., 8/06/2007.
- [7] Departamento Técnico e Comercial, Pecol II, Componentes Industriais, Lda.
- [8] ENG 1016 - Prof. Marcos Pereira / aula 7, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC Rio.
- [9] GENERAL MOTORS ENGINEERING STANDARDS, Materials and Processes - Procedures, RIVET DUCTILITY TEST, GM4473P, July 1998.
- [10] ISO 885 – 1976 General purpose bolts and screws - Metric series - Radii under the head.
- [11] Profa. Izabel Machado, Introdução à Manufatura Mecânica – PMR 2202 – Tratamentos térmicos e de Superfície.
- [12] <http://www.parchsaz.com/English/the%20advantage%20of%20cold%20forming.htm>, consulta realizada no dia 25 de Março de 2010.
- [13] <http://www.koyasfasteners.com/infrastructure.htm>, consulta realizada no dia 15 de Março de 2010.
- [14] Surface vehicle Standard SAE J1199, Mechanical and Material Requirements or Metric Externally Threaded Steel Fasteners, REV. MAR2001.
- [15] GMW25, Mechanical Properties and Material Requirements for Externally Threaded Fasteners, December 2003.
- [16] J.A. Schey, Introduction to Manufacturing Processes. McGraw-Hill, New York (1987).

- [17] BOLT SCIENCE LIMITED, 15 Isleworth Drive, Chorley, Lancashire, England PR7 2PU, Email: [info@boltscience.com](mailto:info@boltscience.com), [www.boltscience.com](http://www.boltscience.com).
- [18] Mickey T. Oldham, Engineering Manager Speciality Screw Corp. 2801 Huffman Blvd. Rockford, IL 61103 USA, [MTO@specialtyscrew.com](mailto:MTO@specialtyscrew.com);
- [19] Joe Greenslade, IFI Director of Engineering Technology, Main Office: 216-241-1482, Direct: 817-995-4685, [jgreenslade@indast.org](mailto:jgreenslade@indast.org), [www.indfast.org](http://www.indfast.org);
- [20] Mike Rindfuss, Manager of New Product Development National Machinery, [mrindfuss@nationalmachinery.com](mailto:mrindfuss@nationalmachinery.com), [www.nationalmachinery.com](http://www.nationalmachinery.com);
- [21] Frank Badía, Director Técnico e de Qualidade da empresa de Tratamentos Térmicos Badía, SA., Barcelona;