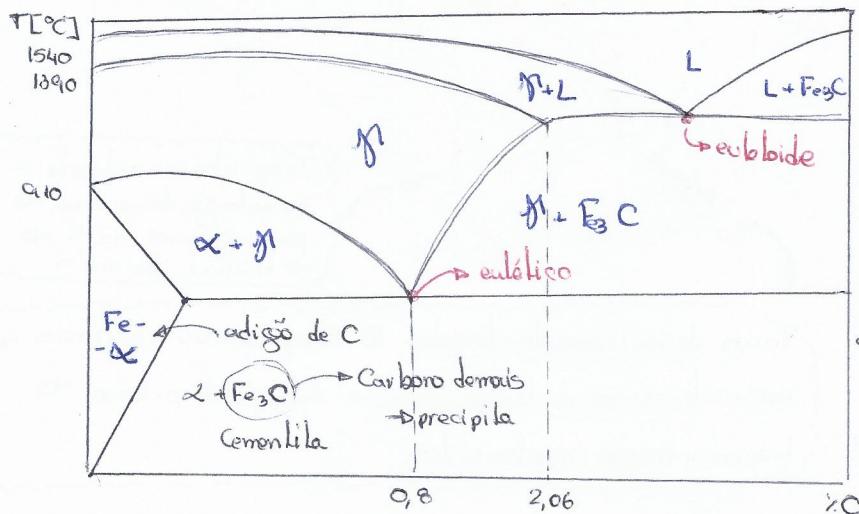


# Tratamentos Térmicos

## Processos:

- Recocimento (annealing) : amolecimento, homogeneização, recuperação
- Normalização (<sup>normalização</sup> quenched): resfriamento ao ar
- Têmpera (quench): endurecimento pelo formação de martensita
- Martempera (martempering): evitar trincas e esporâmenos
- Austempera (austempering): produção de estrutura bainítica
- Austenita Relida (austenita residual): tratamento de eliminação
- Têmpera Superficial: modificações das condições iniciais

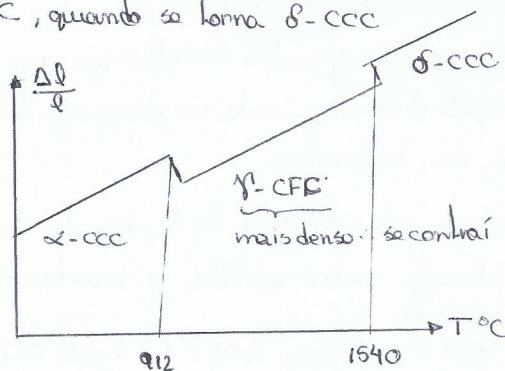
## Diagrama Aço Fe-C:



Obs: eutálito: um sólido formando dois sólidos  
eutólide: um líquido formando dois sólidos

→ Material CCC tem mais resistência à deformação que o CFC (perde mais carbono mas deforma menos).

→ Além 912°C o ferro é do tipo  $\alpha$ -ccc, a partir daí se torna  $\gamma$ -CFC até 1540°C, quando se torna  $\delta$ -ccc



→ No arranjo CCC há mais espaços vazios. Mas a probabilidade dos espaços CFC serem preenchidos é maior, pois, está mais concentrado e há menos espaços.

→ Ferro com alto teor de carbono é chamado guage.

→ Transformação martensítica não depende do tempo mas a reação eutálica depende.

## Lembrete:

### → Ferrita ( $\alpha$ ):

- estável a temperatura ambiente
- estrutura cúbica de corvo centrado (ccc)
- dissolve baixos teores de carbono

### → Austenita ( $\gamma$ ):

- ferro puro - estável a partir de 910 a 912°C
- ligado com carbono consegue se tornar a 723°C
- estrutura cúbica de face centrada (cfc)
- capacidade de absorver grandes teores de C

### → Martensita:

- forma-se de austenita quando esta é resfriada suficientemente rápida
- teor de carbono é herdado da austenita
- formação não envolve difusão, pode ser descripta como uma deformação do reticulado
- alta dureza; frágil se não for tratado

}  $\approx 700^\circ\text{C} \Rightarrow$   
estereoidização

- revenimento causa a formação de carbonetos e aumenta a tenacidade

### → Bainita:

- austenita resfria de forma rápida fazendo com que os carbonetos entrem nas agulhas de ferrita
- alta dureza e baixa tenacidade
- formada a temperaturas acima das quais se formam a martensita

### → Perlita:

- austenita é resfriada de forma lenta que acaba por formar a ferrita e a cemita que crescem a encravar e se ramificarem
- dureza média a alta
- ledeburita:  $\text{Fe}_3\text{C} + \text{Austenita}$  (ilhas de perlita)

Recocimento: refere-se aos tratamentos térmicos em que ocorre o aquecimento e a manutenção de uma temperatura seguida de um resfriamento lento com ferro desligado

→ objetiva remover tensões (resultante dos processos de fundição e conformação mecânica), diminuir a dureza para melhorar a ductilidade e equalizar a composição do ferro ao redor.

• Recozimento pleno: o aço é aquecido até a austenização completa seguido de resfriamento lento com ferro desligado  $\Rightarrow$  forma perlitas grosseiras

• Recozimento subcritico: aplicado a temperaturas menores que a mínima de austenitização (não forma austenito)  $\Rightarrow$  objetiva aliviar lensões, recuperar a ductilidade do aço, ajustar o tamanho dos grãos e gerar coalescimento.

• Recozimento intercrítico: a estrutura resultante poderá conter perlita grossa e esteroidizada.

Esteroidização: objetivo melhorar a conformabilidade a frio das aços médios e alto carbono

• aços esteroidizados por operações de aquecimento e resfriamento produzem estruturas globulares

### Coalescimento

• Tratamento utilizado para obter a máxima ductilidade nos aços

• consiste em aquecimento subcritico seguido por longo tempo no forno, para a aglomeragem das partículas estéricas.

• similar ao recocimento e a esteroidização, a diferença é tempo prolongado para que a coesão da perlita coalesce.

• resultado: coalescimento da perlita + revenimento da martensita

### Normalização:

• aço geralmente aquecido até a austenitização completa da estrutura, seguido de resfriamento ao ar

• taxas de resfriamento maiores que recocimento, produzindo estrutura mais refinada (perlita fina)

### Etapas do recocimento...

#### • Recuperação:

• estrutura de grão não se altera.

• prop. mecânicas e físicas são parcialmente restaurados

• baixas temperaturas  $\Rightarrow$  movimentação + eliminação de lacunas

• altas temperaturas  $\Rightarrow$  rearranjo + aniquilação de dissoluções

#### • Recristalização

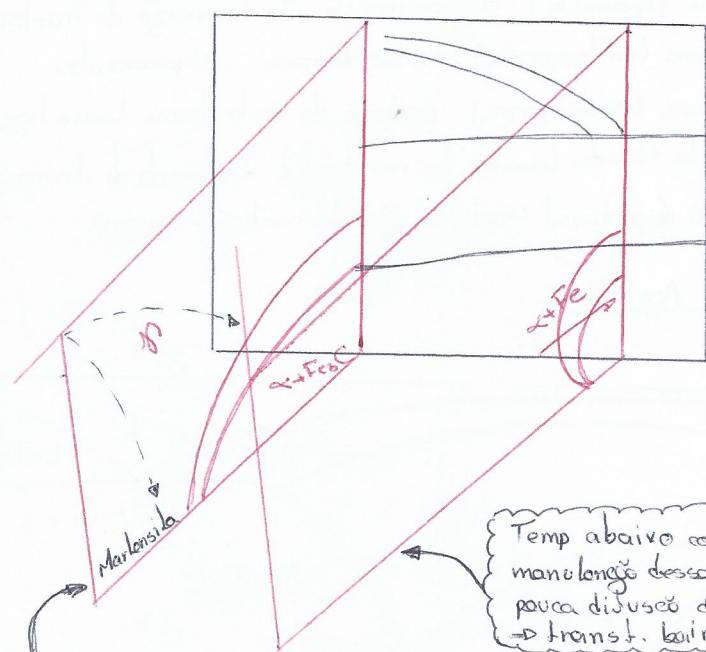
• substituição da estrutura trabalhada a frio por novas estruturas de deformação

• efeitos de overvamento são eliminados

• crescimento de grãos

• alongamento de tamanho de grão

### Diagrama Tempo - Temperatura - Transformação



Temp abaixo coloeta e manutenção dessa temp  $\Rightarrow$  pouca difusão do C  $\Rightarrow$  Transt. bainítica

Fazendo de resfriamento elevados  $\odot$  Temperaturas próximas a ambiente  $\Rightarrow$  não há tempo para a difusão do carbono  $\Rightarrow$  Transformação martensítica.

Tempera: processo de resfriamento contínuo para obter alta dureza e resistência

Austempera: processo de tratamento isotermaico para obter alta tenacidade e resistência à fadiga

Obs: ...

Bainita superior: prosença de placas longas de ferrita, paralelas a carbonetos alongados ( $Fe_3C$ )

Bainita inferior: possui grandes semelhanças com a martensita, a principal diferença está na prosença de carbonetos em forma de bastonetes.

Revenido: formada pela difusão de C, insonda de lensões residuais e dureza entre perlita e martensita.

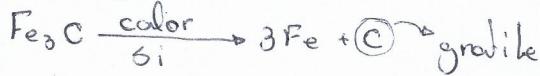
Ferro Fundido:  $\alpha + Fe_3C$  com  $2,06\% \leq C < 4,03\%$ .

• quando solidifica formando carboneto é chamado de Ferro branco. O ferro branco é duro e frágil, com excelente resistência ao desgaste  $\Rightarrow$  metá estéril

• o tratamento térmico do ferro branco a  $800^{\circ}C$ - $900^{\circ}C$ , (grafia aparece em roselas e é mais durela) gera o

Ferro maleável

» quando solidifica formando grafite é chamado de ferro cincento, que é mais dúctil que o ferro branco. A formação de grafite no lugar de Fe<sub>3</sub>C se deve a porcentagem de silício no material



» o ferro dúctil é processado a partir do ferro cincento

» o grafite pode ser prejudicial para o material devido a facilidade da propagação de trincas ao longo das veias de grafite.

» o ferro fundido modular tem como a origem do grafite, bem a adição de ferraz nanas que, causa a formação de nódulos na solidificação,  $\Rightarrow$  ferro dúctil  $\oplus$  ferro maleável

solidificação

origem do grafite

Obs:

Augs  $\approx \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$  com no máximo 24% C

Têmpera Superficial: témpera realizada apenas na superfície que adquire propriedades e características da estrutura martensítica.

» alta dureza e resistência ao desgaste é dúctilidade e tenacidade no núcleo da peça.

» não exige fornos de aquecimento e é aplicada em peças de grandes dimensões

» é rápido, podendo ser aplicada em linhas de fabricação de baixo custo

» não produz descarbonetização e oxidação nos augos

» os processos mais comuns são: por chama, por laser, por indução, por feixe eletrônico.

» Têmpera por chama: superfície é aquecida acima da temperatura de austenização por meio de chama oxi-acetilênica. Depois resfria-se por jato d'água e se faz o revenido para aliviar tensões. Como resultado obtém-se uma superfície dura e resistente com núcleo dúctil e tenaz (formado por ferrita e perlita).

• Recomenda-se a utilização deste processo em peças de grandes dimensões ou quando se quer tratar apenas pequenas áreas de uma peça.

» Têmpera por Indução: o calor é gerado por indução electromagnética, utilizando-se bobinas de indução

A peça é colocada no interior de uma bobina submetida à passagem de corrente alternada. O campo energiza a peça, provocando seu aquecimento. Restriamente pode ser ao ar, água, ou óleo e sempre seguido por um revenido.

» a taxa de profundidade pode ser controlada pela forma da bobina, distância bobina-peça, frequência elétrica, tempo de aquecimento

$$\text{» quantidade de calor gerado: } Q = 0,239 \cdot i^2 \cdot R \cdot L \quad (\text{A}^2 \cdot \Omega \cdot \text{s})$$

$$\text{» profundidade da têmpera: } p = 5020 \cdot (P/A, f)^{1/2}$$

Cementação:  $\rightarrow$  meio carbonelante

combina o arôdo de carbono com a ação química, resultando na variação da composição e na estrutura da superfície.  $\rightarrow$  envolve difusão atômica

$$\text{» Segundo Lei de Fick: } \frac{\partial C}{\partial t} - D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 0, \text{ com} \\ D = D_0 \left( e^{-\frac{Q}{RT}} \right) \text{ energia de ativação} = \text{coef. de difusão}$$

» A concentração final pode ser dada por:

$$C_x = C_s - (C_s - C_0) \cdot \text{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

Fórmula de Erro de Gauß

» os tipos de cementação são sólido, líquido e gásoso

Nitrelação: utiliza a difusão de N. O material é mantido em atmosfera rica em nitrogênio (amônia para nitrelação gásosa e sais para a nitrelação líquida).

» vantagem: baixas temperaturas empregadas.

» a camada nitrelada apresenta alta dureza  $\Rightarrow$  aumento na resistência ao desgaste e à abrasão, resistência à fadiga (promove tensões residuais na superfície e na zona de fundida do material), resistência à corrosão

• tensões residuais de compressão

Boreação: utiliza a difusão do boro. O material é mantido em uma atmosfera rica em sólido boro

→ Boro reage com o Ferro formando o boreto de ferro ( $Fe_2B$ ) de extrema dureza que penetra na superfície do material como agulhas.

Endurecimento por precipitação / envelhecimento: o material altera sua resistência com o tempo na medida que a liga fica abaixo da temperatura "solvus"

→ deve haver duas fases na temperatura ambiente para que haja endurecimento por precipitação. Ao se aquecer a liga, a segunda fase é solubilizada surgindo uma estrutura monofásica que difunde na matriz da primeira fase. O resfriamento brusco cria uma solução sólida supersaturada  
→ a liga é aquecida a uma temperatura acima do  $T_{solvus}$  para provocar a precipitação da segunda fase

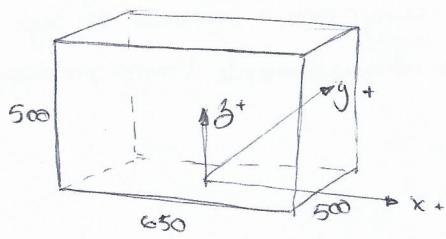
desvantagens se movem com maior dificuldade

→ o envelhecimento pode ocorrer na temperatura ambiente

→ a resistência mecânica passa por um pico e decresce (envelhecimento)

# Controle Numérico Computadorizado:

Volume de Trabalho:



Estrutura da programação:

PROGRAMA: conjunto de blocos

↳ BLOCO: conjunto de palavras

↳ sinlaxe: no do bloco palavra palavra...  
 ↳ palavra: endereço: G, X, Y, Z, ...  
 ↳ valor numérico

Exemplo:

N10 → número do bloco  
 G90 → rotacão  
 6400 → fuso horário  
 M3 → coordenadas absolutas

N20 G0 X20 Y20 Z2 {aproxima da posição  
 posição de inicio de inicio  
 avanço rápido}

N30 G1 Z-5 F1000 {avanço da profundidade  
 interpolação linear}

N40 X80 Y65 {avanço (linearmente) até essas posições}

N50 G0 Z2 {retrai a ferramenta}

N60 G0 X-20 Y100 Z100 (M30) {sim de programa e retorno ao inicio}

Exemplo:

N10 G90 S2000 M3

N20 G00 X45 Y60 Z2 {posição inicial}

N30 G1 Z-5 F500 {centro da circunferência}

N40 G2 X20 Y35 {I=AC(45) J=AC(35)}  
 ponto final x y  
 interpolação circular no sentido horário

N50 G0 Z2 {retrair sentido anti-horário = D} G3

N60 M30 {fim do programa}

Caso: é possível definir o raio com o comando que substitui o centro da circunferência.

Escolha do plano de operação

G17	→ plano xy
G18	→ plano xz
G19	→ plano yz

## Processo e equipamentos: Laminagem de Metais

- Laminagem é o processo de redução de espessura através da seção transversal de uma chapéu longa a aplicação de forças compressivas através de conjuntos de bobinas cilíndricos.
- Os tipos de laminagem são "shape rolling", "ring rolling" e "thread rolling".
- A laminagem pode ser feita a frio (temperatura ambiente ou a quente (temperaturas elevadas). Trabalhar a material a frio significa que o material sofre escavamento (cria resistência a deformação) e a quente o material se deforma continuamente.
- O processo depende do diâmetro das bobinas, da redução por passo, da velocidade, lubrificação e temperatura. Espessamento, dobramento e aplanação são importantes variáveis se se considerar para controlar a precisão dimensional dos materiais laminados.
- Fundição e laminagem combinada em materiais somente são praticas comuns devido as vantagens económicas.
- Laminadoras industriais são grandes instalações em que praticamente todas as atividades são feitas: fundição de metal e laminagem até a preparação do produto final. As mini laminadoras são muito menores e utilizam peças de metal fundidas por arco elétrico em fornos.
- A diferença entre chapas (espessura de mais de 6mm) e telhas (espessura com menos de 6mm) está na espessura.
- Análise quantitativa:

Uma chapa de metal com espessura  $h_0$  entra na laminadora para sair com espessura  $h_f$ . A velocidade dos cilindros rotantes é denotada por  $V_f$ . A chapa tem sua velocidade aumentada conforme avança na laminadora, sendo sua velocidade máxima (que ocorre sua saída) denotada por  $V_f$ . Há um avanço deslizante do cilindro sobre a chapa de distância  $L$ .

$$\text{Avanço} = \frac{V_f - V_s}{V_r}$$

$$\xi = \ln \left( \frac{h_0}{h_f} \right)$$

A diferença entre as espessuras pode ser dada por:

$$h_0 - h_f = \mu^2 \cdot R \quad , \quad \mu = \text{coeficiente de atrito} \quad e \quad R = \text{raio}$$

R é o raio.

Os cilindros aplicam uma certa força de compressão na chapa, que pode ser definida como:

$$F = L \cdot w \cdot \sigma_{\text{média}} \quad , \quad \sigma_{\text{média}} = \frac{\sigma_{\text{máx. def.}} + \sigma_{\text{def.}}}{2} \quad , \quad w = \text{largura da chapa.}$$

$$\Rightarrow \sigma_{\text{def.}} = \frac{k \cdot \xi}{1+n}$$

A potência requerida por cada cilindro pode ser definida como:

$$P = \frac{2\pi F L N}{60000}$$

ou

$$P = \frac{2\pi F L N}{33000}$$

,  $N$ : frequência de rotação do cilindro.

$\approx 1 \text{ kW}$

$\approx 1 \text{ hp}$

$1 \text{ W} = 745,7 \text{ hp}$

Obs.:  $L$  pode ser deduzido a partir da geometria como:

$$L = \sqrt{R(h_0 - h_f)}$$

O torque pode ser dado por  $T = 0,5 F L$  (cada lado)

Processo e equipamentos: forjamento de metais

- Forjamento denota o conjunto de processos (aplicados a metais) em que a peça é deformada por forças compressivas através de matrizes. Este processo é capaz de produzir peças com grande resistência, dureza, precisão dimensional e confiabilidade em processos.

- O processo de forjamento pode ser realizado em temperatura ambiente, temperaturas médias ou altas temperaturas.

- O comportamento do material da peça durante a deformação, o atrito, a transição de calor devem ser considerados. A escolha do material da matriz, do lubrificante, das

temperaturas de trabalho, da velocidade de forjamento e do equipamento são também relevantes.

- Vários defeitos podem surgir caso o processo não seja planejado ou controlado adequadamente (como propagas de trincas)

- Tipos de forjamento:**

- 1) Matriz Aberta: matriz é conformada entre matrizes planas ou com formas simples que normalmente não se tociam  $\Rightarrow$  é usado para fabricar peças grandes, com formas simples e em pequena quantidade.

- 2) Matriz Fechada: o material é conformado entre duas matrizes de matriz que possuem gravadas em baixo relevo, impressões com o formato que se deseja fornecer a peça.

- Equipamentos mais comuns:**

- 1) Martelos de Forjar: deformam o metal através de rápidos golpes de impacto na superfície

- 2) Prensas: que deformam o material submetendo-o a uma compressão contínua, com velocidades relativamente baixas

- As etapas convencionais do forjamento são o corte do material, aquecimento, pré-conformação mediante operações de forjamento livre, forjamento em matriz e rebarbagagem.

- Hoje em dia as operações de forjamento são totalmente automatizadas usando robôs e controle computadorizado.

- O enrolamento é um tipo de forjamento relativo no qual uma haste sólida ou um tubo é reduzido de diâmetro por um movimento radial em alternância de um conjunto de duas ou quatro matrizes  $\Rightarrow$  ideal para produzir comprimentos curtos ou longos de tubos e barras de perfis internos e externos variados.

- Análise quantitativa:

A força de forjamento pode ser dada por:  $\xi = \ln \left( \frac{h_0}{h_f} \right)$

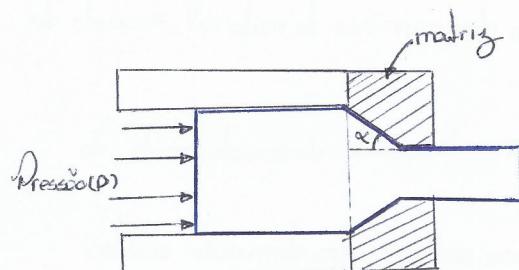
$$F = \sigma_{\text{def.}} \pi r^2 \left( 1 + \frac{2.4f}{3h} \right) \quad , \quad r = \text{raio instantâneo} \quad , \quad h = \text{altura instantânea}$$

$\sigma = \text{lensão de fluxo} (\sigma = k \cdot E^n)$ ,  $k$  = coeficiente de atrito

Obs: considerar o volume constante para definir o raio.

### Processos e Equipamentos: extrusão e trefilagem

- A extrusão consiste em um processo de empurrar um barro através de uma matriz para reduzir sua seção transversal ou para produzir seções transversais rasas ou sólidas. Esse processo é normalmente realizado em altas temperaturas para reduzir a força de extrusão e melhorar a ductilidade do material. Já o processo de trefilagem consiste em perfurar o material através de uma matriz e normalmente é realizado a temperatura ambiente.
- Na extrusão deve-se atentar ao design da matriz, a taxa de extrusão, lubrificação e temperatura do barro e velocidade de extrusão.
- Extrusão a frio significa barato extrusão a temperatura ambiente quanto uma combinação do processo de formação e extrusão. Esse tipo de extrusão é capaz de produzir estruturas com diversas formas, boas propriedades mecânicas e dimensionais, além de ser econômico.
- A seção transversal da maioria dos produtos trefiados é redonda, mas outras formas também podem ser trefiadas.
- Treifar produtos trefiados tubulares para reduzir o diâmetro ou a espessura normalmente necessita a utilização de um mandril interno.
- Produtos trefiados de alta qualidade e com bom acabamento na superfície dependem do design da matriz, da redução da seção transversal por passo, da seleção do material da matriz e do lubrificante.
- Análise Quantitativa:



### Extrusão à quente:

$$P = \sigma \left( 1 + \frac{\lg \alpha}{\alpha} \right) (R^4 \cos \alpha - 1), \quad \sigma = \text{lensão no barro}, \quad \alpha = \text{coeficiente de atrito}, \quad R = \text{taxa de extrusão}$$

A força pode ser obtida pelo produto da pressão com a área do barro:

$$F = \pi r^2 P = A_0 k \ln \left( \frac{A_0}{A_f} \right), \quad A_0 = \text{área inicial}$$

do barro,  $A_f = \text{área final do barro}, \quad k = \text{constante de extrusão (determinada experimentalmente)}.$

### Extrusão à frio:

$$\epsilon = \ln \left( \frac{A_0}{A_f} \right)$$

$$F = 1100 \cdot A_0 \cdot \sigma_{\text{média}} \cdot \epsilon_{\text{real}}$$

### Trefilagem:

em condições ideais a força de trefilagem pode ser dada por:

$$F = \sigma_{\text{média}} A_f \cdot \ln \left( \frac{A_0}{A_f} \right), \quad \sigma_{\text{média}} = \text{lensão média no material.}$$

Como em condições reais existe o atrito, mas trabalho deve ser feito para superá-lo. A força cresce com o aumento do atrito. Além disso a deformação não é uniforme do material levando a uma utilização extra de energia. Portanto a melhor fórmula para se estimar a força é:

$$F = \sigma_{\text{média}} A_f \cdot \left[ \left( 1 + \frac{\alpha}{k} \right) \ln \left( \frac{A_0}{A_f} \right) + \frac{2}{3} \alpha \right]$$

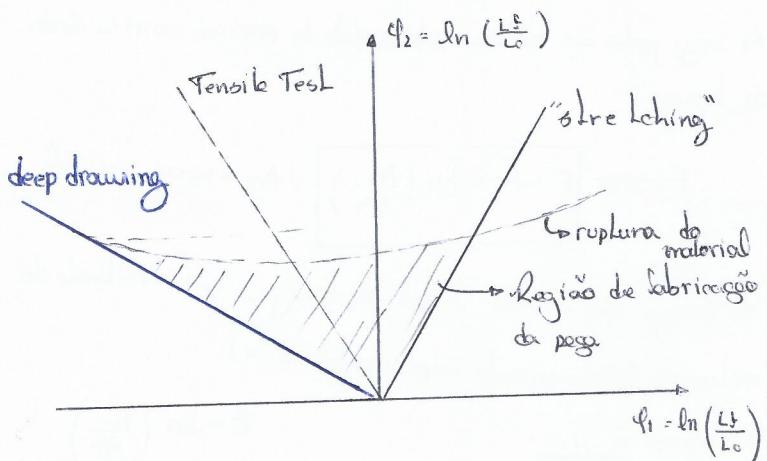
### Processo e equipamento: conformação de chapas metálicas

• A conformação de chapas metálicas é usada em malha de altas proporções entre área da superfície e espessura. Esse processo de previne a redução da espessura da chapa.

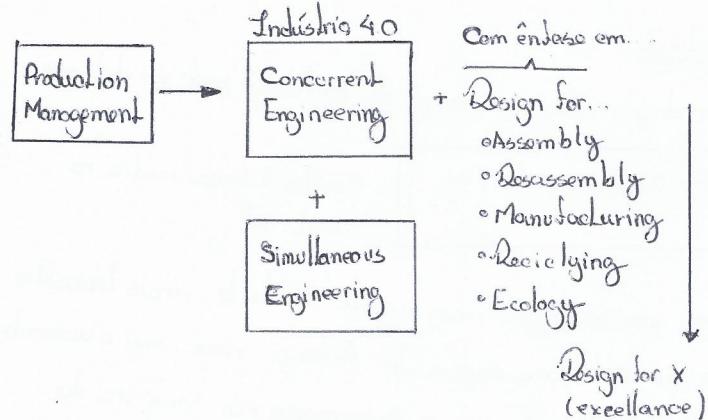
• As forças e energias requeridas nesse processo são fornecidas para a chapa por ferramentas e molhadores com bolas de borracha ou poliuretano ou por meios elétricos, gases, químicos, magnéticos ou elétricos.

• Estampagem profunda: a relação da deformação entre dois pontos distintos da peça é linear.

• chapas muito finas sofrem com enrugamento na dobragem normal então é necessário a utilização de um "blank holder". Se o "blank holder" apontar demais a chapa então ela sofre um estiramento e sua espessura diminui (não deve ocorrer nesse tipo de processo).



### Estágios de produção:



• Concurrent Engineering: baseia-se na paralelização de tarefas. As fases de engenharia de projeto, manufatura, entre outros estão interligados.

• Simultaneous Engineering: desenvolvimento sistemático de um produto, considerando todos os aspectos de sua vida, desde sua concepção até o descarte.

• Design for Manufacturing and Assembly → Minimize product costs

DfM → simplificação da manufatura do produto

+  
DFA → simplificação na montagem do produto

Utilização: o produto é desmontado e montado novamente dando ênfase a tempos e custos de manuseio e junção de componentes.

### Princípios:

Quanto menor pega melhor

- projetar para um número mínimo de pegas
- projetar componentes para serem multifuncionais
- utilizar uma montagem unidirecional
- facilitar o alinhamento e inserção de todos os componentes
- eliminar parafusos, viscos, rebites, chichões de fios
- padronizar materiais, acabamentos e componentes
- automação (quando possível) !

Pega monolítica: produto pode ser feito com uma única pega.

### Produto de qualidade:

Um produto de alta qualidade tem as seguintes características:

- satisfaça as expectativas e as necessidades do consumidor
- tem confiabilidade
- tem boa durabilidade
- é fácil de instalar e fazer manutenção; melhorias futuras são fáceis de fazer e são baratas

Kaizen: melhorias contínuas (never-ending improvement)

### Design for Assembly (DFA):

- preocupa-se somente em reduzir os custos do processo de montagem
- minimizar o número de operações de montagem
- partes individuais tendem a ser mais complexas no design

### Design for Manufacturing (DFM):

- preocupa-se somente em reduzir o custo total de manufatura
- diminuir a complexidade das operações de manufatura

### Simplificações:

- ambos procuram diminuir uso de material e custo de trabalho
- ambos diminuem o tempo de desenvolvimento do produto
- DFA e DFM utilizam padrões para diminuir custos