

# TM373

# Seleção de Materiais Metálicos

Relação entre seleção e  
processamento de materiais

*Prof. Rodrigo Perito Cardoso*



Favor desligar o celular ou passá-lo para o modo silencioso

Em caso de ligação favor não atender durante a aula

# Introdução

- Não existe interesse em selecionar um material, mesmo se com propriedades ideais para uma aplicação, se não for possível produzir a peça desejada de maneira economicamente viável.
- O valor agregado pelo processamento pode ser superior ao custo da matéria prima (material)
  - Existem muitos meios de processar materiais, cada um mais adaptado a um caso
  - Importância em “casar” bem material selecionado com o processo de fabricação

# Introdução

- Por razões técnicas a escolha do processo de fabricação não é completamente livre
  - Ex. alumínio x aço ao carbono x superliga
- Existem também outras razões que não são técnicas nem econômicas -> ex. disponibilidade no prazo -> normal em situações de emergência ou disputa de mercado, tempo é importante. Outros fatores:
  - Tamanho da produção e da empresa
  - Produção própria x Produção por empresas especializadas
  - Flexibilidade x Equipamento dedicado x controle
- O tempo entre projeto e produção nem sempre permite otimização das escolhas

# Objetivo do processamento

- Três principais objetivos:
  - Formas e dimensões
  - Propriedades
  - Acabamento
- Formas e dimensões
  - Métodos envolvendo fluxo de material
    - conformação, metalurgia do pó, injeção, fundição, etc  
->falaremos depois
  - Montagem (diversos métodos de união)
    - Mecânico, químicos, metalúrgico
  - Usinagem

# Objetivo do processamento

- Montage

- Métodos mecânicos (rebites, parafusos, etc)

- Necessidades de juntas desmontáveis
- Facilidade de montagem
- Impossibilidade de solda (baixa soldabilidade)

- Métodos metalúrgicos (soldagem, brasagem)

- União permanente (a técnica escolhida depende da finalidade)
- Problemas de tolerâncias dimensionais apertadas

- Métodos químicos (adesivos, colas)

- Desafios da garantir integridade e qualidade das juntas (ex. preparação e limpeza das superfícies)

# Objetivo do processamento

- Usinagem
  - Envolve elevado custo em termos de energia e mão de obra, desperdício de material e custo de equipamentos
  - Apresenta elevada flexibilidade e conveniência -> garantindo um papel importante na engenharia
  - Sempre que possível busca-se reduzir ou eliminar a usinagem
  - Alia boa produtividade com qualidade
  - Normalmente aplicada para protótipos e peça únicas (Praticamente imbatível)

# Objetivo do processamento

- Propriedades

- Para metais as propriedades podem ser alteradas pelo processo de fabricação

- Controle de propriedades na fabricação traz melhores resultados na aplicação

- Ex. controle da solidificação -> inoculação, molde, sol. Direcional...

- Ex. Laminados -> solidificação do lingote-> laminação a quente-> laminação a frio -> recozimento...

# Objetivo do processamento

- Acabamento

- Tolerâncias, qualidade da superfície, proteção da superfície, aparência
- Tolerância e rugosidade -> definidos por normas
  - Essenciais para o bom funcionamento do projeto, em especial para peças moveis e em contato
- Proteção superficial e aparência são mais difíceis de ser quantificados
  - Se a exigência for somente aparência a escolha torna-se puramente qualitativa -> provavelmente envolverá uma pesquisa de mercado

# Bases para seleção de processos

- Antes de escolher um processo é necessário saber:
  1. Quantas peças serão necessárias
  2. Tamanho e peso da peça
  3. Complexidade geométrica
  4. Tolerâncias dimensionais
  5. Acabamento superficial desejado

# Bases para seleção de processos

- Efeito do número de peças
  - Maior número de peças -> redução de custos
    - Métodos de produção e equipamento mais sofisticados
    - Maior necessidade de controle da qualidade -> deve ser compensado pelo ganho de escala
    - Custo de um lote:

$$P = T + xN$$

Ferramenta -> pode variar muito

$$P = T + N \left( M + F + \frac{L}{R} \right)$$

M -> Material

F -> acabamento

L -> mão de obra

R -> taxa de produção

# Bases para seleção de processos

- Efeito do número de peças
  - Equipamentos mais eficientes reduzem  $x$  -> normalmente acompanhado de aumento de  $T$
  - Lote crítico:

$$P = T + N \left( M + F + \frac{L}{R} \right)$$

$$N_C = \frac{T_2 - T_1}{(F_1 - F_2) + L \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)}$$

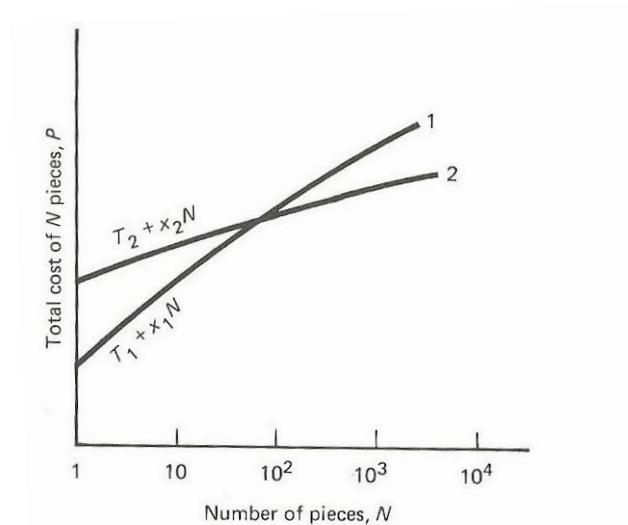


Figure 13.2 Effect of production quantity on manufacturing costs.

# Bases para seleção de processos

- Custo unitário 
$$\frac{P}{N} = \frac{T}{N} + \left( M + F + \frac{L}{R} \right)$$
- Diluição do custo do ferramental:

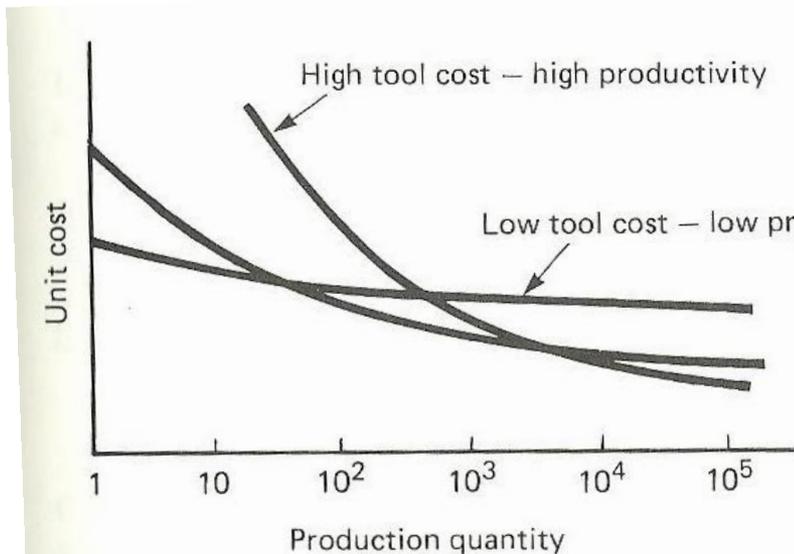


Figure 13.3 Effect of production quantity on unit cost for different processes.

# Bases para seleção de processos

- Efeito do tamanho e peso
  - Cada processo tem suas limitações
    - Limites para moldes fechados
      - Forjamento (prensa), injeção (força de fechamento de molde), metalurgia do pó (prensa e custo da matéria prima)
    - Limite de fornecimento de metal líquido
      - Grandes peças (~25 ton.) fundidas em molde de areia
    - Limite mínimo de tamanho
      - Forjamentos ~100g, fundição de precisão ~1g



# Bases para seleção de processos

- Complexidade geométrica -> qualitativo
  - Secção de pequena espessura, rebaixos, partes ocas aumentam a complexidade
- Tolerâncias -> depende do processo
  - Proposta ISO (empírica – x em mm)
    - Nível 1  $Tolerancia(\mu m) = 0.45x^{1/3} + 0.001x$
    - Outros níveis multiplica por  $10^{1/5}$  (uma ordem de grandeza cada 5 níveis)
  - Ex. peça de 40mm nível 1 -> tolerância de 1,58 $\mu$ m  
melhor processo de fundição atinge nível 11 -> 158 $\mu$ m

# Bases para seleção de processos

TABLE 13.1

| Process   | Dimensional tolerances<br>ISO Tolerance System              |                             | Draft allowance                                  | Machine finish<br>allowance mm             | Surface smoothness |       |
|---|---|-----------------------------|--|--|--------------------|-------|
|   | IT  |                             |  |  | $\mu\text{m}$      | rms   |
| Conventional Closed Die Forging                                 | 15–18   | (From + 0.5mm<br>– 0.25 mm) | 5°   | From 1 mm                                  | < 3.2              |       |
| Precise Form Forging<br>(Impact machining)                      | 11–15   |                             | Can be zero                                      | None on forged faces                       | 1–1.5              |       |
| Fine Blanking   | 6–9   |                             | Zero   | None                                       | 0.3–1.5            |       |
| Green and Dry Sand Castings                                     | Al, Mg  | 13–15                       | 1–3°   | NonFe Iron Steel                           | 2.5–25             |       |
|   | Cu  | 15–16                       |  | 0–150                                      | 1.5                | 2.5 3 |
|   | Grey Iron   | 14–16                       |  | 150–300                                    | 1.5                | 3 5   |
|   | Malleable   | 13–16                       |  | 300–500                                    | 2.5                | 4 6   |
|   | Steel   | 16–18                       |  | 500–1.5m                                   | 3–6                | 5 6   |
| Full Mould and Fluid Sand Process<br>CO <sub>2</sub> and Furane | Steel, often  | 16 but 18 attainable        | 0–0.5°   | 0.8–6                                      | 2.5–25             |       |
| Shell Mould<br>(Croning Process)                                | Intermediate between green sand and shell<br>mould castings |                             | 0–3°   | Approximately 50% of green<br>sand process | 2.5–5              |       |
| Gravity Die Casting<br>(Permanent Mould)                        | 12–14   |                             | 0.1° attainable 0.25–3° usual                    | Often none required                        | 1–4                |       |
|   | parting line error  | 0.25–0.5mm                  |  |  |                    |       |
|   | Al  | 12–14                       | 0.1° attainable but high die wear<br>expensive   | 0–100 mm 0.8                               | 2.5–6.5            |       |
|   | Iron  | 12–15                       | 0.2–3° usual<br>5° preferred in recesses         | over 100 mm 1.5                            |                    |       |
| High Pressure Die Casting                                       | Zn  | 11–13                       | ~ 2°   | 0.25–0.80                                  | 1–2                |       |
|   | Al  | 11–14                       |  |  |                    |       |
|   | Fe  | 11–14                       |  |  |                    |       |
|   | +0.05 mm parting line error                                 |                             |  |  |                    |       |
| Investment Casting<br>(Lost Wax Process)                        | 11–14   | usual                       | Usually zero                                     | 0.80 machining                             | 1–3                |       |
|   | 10  | attainable                  | 0.5–1° required for<br>exceptionally long cores. | 0.35 grinding                              |                    |       |
| Hot Extrusion   | 12  |                             | Straightness approx. 0.3 mm/m                    | Usually zero                               | 1–1.25             |       |
| Cold Extrusion  | 9   |                             |  |  | 0.5–0.075          |       |
| Impact Extrusion  | Length 6  |                             | Zero   |  | 0.25–1.7           |       |
|   | Diameter 5  |                             |  |  |                    |       |
| Sheet Metal Work Cutting  | 11–12   |                             | Zero   | Zero                                       | —                  |       |
| Powder Sintering  | 8–11  | (sintered and coined)       | Can be zero                                      | Can be zero                                | ≠ 1                |       |

# Fundição de ligas metálicas

- Principais vantagens:
  - Produz peças de praticamente todas as formas
  - Variedade de técnicas possibilita cobrir uma grande diversidade de aplicações
- Pode envolver deste ferramental barato para pequenas produções até linhas automatizadas para grandes produções
- Escolha do molde envolve: custo, fidelidade de reprodução e propriedades térmicas

# Fundição de ligas metálicas

- Custo:
  - Possibilidade de reutilização do molde
    - Moldes de areia são usados somente uma vez
    - Ligas de níquel resistente ao calor podem ser usadas muitas vezes
    - Moldes para injeção são caros -> precisam durar

# Fundição de ligas metálicas

- Fidelidade de reprodução:
  - Reproduzir tolerâncias e acabamento superficial
  - Melhores resultado na injeção e piores em molde de areia
- Propriedades térmicas:
  - As propriedades mecânicas da peça dependerá fortemente da taxa de solidificação -> fortemente dependente do molde
  - Molde metálico -> maior taxa de resfriamento -> pode ser reduzida com recobrimento refratários das paredes externas no molde
  - Cerâmica e areia são menos eficientes -> possibilidade de utilização de insertos metálicos

# Fundição de ligas metálicas

- Propriedades dos fundidos
  - Normalmente as propriedades dos materiais fundidos são inferiores aos materiais trabalhados (impurezas e microestrutura grosseira)
  - Causas : arrasto de ar e óxidos + rechupe
    - » Solidificação direcional e massalote reduz os problemas
  - Microestrutura grosseira: resfriamentos lento
    - » Introdução de insertos em moldes de areis reduz o problema

Apesar de existir a possibilidade de produzir peças por fundição com propriedades equivalentes aos materiais trabalhados elas são principalmente aplicadas para:

- Formas complexas
- Tempo de desenvolvimento curto
- Custo



# Materiais trabalhados

- São materiais trabalhados: Pré-formas, extrudados, laminados (chapas, placas, tiras, barras), trefilados ...  
-> apresentam formas simples e normalmente assimétricas (salvo pré-formas)
- Principais razões para usar materiais trabalhados:
  - Boas propriedades mecânicas, com uniformidade e confiabilidade (Microestrutura de fundição x laminados)
  - Forma conveniente para produção de outras peças (panela de uma chapa x fundição)



# Materiais trabalhados

- Materiais trabalhados são produzidos aplicando fortes deformações em lingotes fundidos -> modificando fortemente a microestrutura
  - Reduz problemas de solidificação (porosidade, segregação e estrutura grosseira)
  - Causa anisotropia cristalográfica (pode ser desejada-> estampagem profunda e transformadores) e microestrutural (indesejada -> perda de tenacidade e ductilidade na direção normal)
  - Evitar sempre que possível esforços de tração normal ao alinhamento de inclusões -> ex. Laminar fios de rosca
  - Propriedades mecânicas podem ser controladas -> trabalho a frio (dobra-se facilmente a resistência de metais dúcteis), controle do tamanho de grão

# Fabricação a partir do pó

- União dos pós é obtida a temperatura inferior à temperatura de fusão do constituinte principal da peça ([Vídeo](#))
- Aplicado para metais, cerâmicos, compósitos
- Possibilidade de produção de peças de geometria simples ou complexa -> acabadas ou semiacabadas
- Usada quando:
  - Tem vantagens técnicas ou é a única técnica possível
  - Produção em larga escala (razão econômica)

# Fabricação a partir do pó

- Campos de aplicação

1. Peças de materiais que não podem ser feitas por outras técnicas -> Metais refratários, Compósitos (metal duro), carbonetos, nitretos, boretos
2. Peças de materiais imiscíveis no estado líquido (busca de combinação de propriedades)->W-Cu, W-Ag (contatos), Cu-C (escovas), Cu-Pb (mancais)
3. Necessidade de porosidade controlada -> filtros, buchas autolubrificantes
4. Ligas com composição e propriedades uniformes e com grande controle de composição -> materiais magnéticos, junção metal vidro, produção de padrões de composição (segregação reduzida)
5. Produção de peças acabadas ou com pouco trabalho posterior

# Fabricação a partir do pó

- Os pós
  - O modo de fabricação do pó determina sua forma e o estado de sua superfície (presença de óxidos)
  - Principais processos-> atomização (líquida ou gás), redução de óxidos, dissociação de compostos
- Consolidação
  - Buscar controlar a mistura de pós para obter maior densidade (menor encolhimento) -> empacotamento de pós para compactação (compactação, injeção,...)
  - Sinterização (com ou sem fase líquida)

# Fabricação a partir do pó

- Compactação a quente
  - Compactação e sinterização simultânea -> importante redução de porosidade (boas propriedades mecânicas)-> forma da matriz (sem encolhimento)
  - Dificuldades técnicas -> controle de atmosfera (oxidação), material de matriz, ...
- Propriedades mecânicas
  - Determinada primeiramente pela densidade (poros)
  - Forma de poros -> importante para tenacidade (sinterização com fase líquida)
  - Facilidade de ajustar limite de escoamento com elementos de liga
  - Melhores propriedades obtidas no forjamento de pré-formas sinterizadas (possibilidade de eliminar porosidade)
  - Resistência a fadiga -> depende da porosidade e do limite de escoamento -> para o caso do forjamento a resistência à fadiga pode ser superior aos materiais trabalhados (forma e qtd de inclusões)

# Métodos de união

- Principais grupos de união:
  - Mecânica (parafusos, rebites, clips)
  - Metalúrgica (solda, brasagem)
  - Químico (colas, adesivos)
- Um critério importante da escolha do processo é a necessidade ou não de desmontagem (parafusos, brasagem com estanho )

# Métodos de união

- União por parafusos
  - Garantir força entre as partes (pinçamento) -> advindo da deformação elástica do parafuso
  - Aço ao carbono é o mais aplicado até 300°C (muitas vezes revestido para evitar corrosão)
  - Quando elevadas resistências são necessárias aços ligados ou outras ligas podem ser utilizadas (atenção à tenacidade -> concentradores de tensão)
  - Para resistência a corrosão -> aço inoxidável e ligas de cobre (latão)
    - Atenção aos materiais dissimilares (ex. Al e Cu) -> corrosão
  - Para redução de peso -> resistência/densidade

# Métodos de união

- União por rebites
  - Rebites a quente -> força vem da contração térmica
    - Praticamente substituído pela soldagem
  - Rebites a frio -> trabalho a frio aumenta a resistência
    - Comum em ligas de alumínio



# Métodos de união

- Soldagem

- Promover união pelas ligação atômica das partes
  - Ex. solda por pressão, fricção, fusão
- O processo mais comum é a solda por fusão por arco
  - Este processo depende da composição da liga, do estado metalúrgico anterior a solda, do processo de soldagem empregado, do tamanho/forma da peça, do ambiente, ....
- Principal defeitos são trincas por hidrogênio
- Em aços o teor de carbono tem a maior influência no processo -> dificulta soldagem se maior que 0,2% -> Maior probabilidade de trinca. Para ligas:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Para  $C_{eq}$  superior a 0,4 o processo de soldagem tornasse delicado

# Métodos de união

- Soldagem

- Ligas de alumínio, problemas:

- Filme de óxidos
      - Porosidade
    - Amolecimento da região da solda
    - Trincas de solidificação
- Uso de gases protetores e material de adição de elevada pureza
- Ligas trabalhadas a frio e envelhecidas
- Modificar composição do material de adição (intervalo de solidificação)

- Ligas de cobre, titânio, níquel também podem ser soldadas

- Verificar as precauções em cada caso
  - O processo pode ser simples (soldagem a arco manual) ou complicado exigindo mão de obra (eng. de Soldagem) e equipamentos especializados
  - Para aplicações envolvendo riscos importantes a inspeção da solda é fundamental

# Métodos de união

- Brasagem

- O material de adição é fundido e as partes a serem unidas não. Principais ligas de adição:
  - Ligas de baixo ponto de fusão 250 °C (Pb-Sn)-> 38-55MPa
  - Ligas de maior ponto de fusão 850 °C (Cu-40Zn)-> ~300MPa
- Quanto mais fina a camada de material de adição mais resistente a junção
- Dificuldades de aplicação em ligas com alta afinidade com oxigênio -> filme óxido impede a ligação metálica (Al, Aço inoxidável)

# Métodos de união

- Brasagem (Ligas)

TABLE 13.2. Typical BS Soft solders

| Grade  | Nominal composition (%) |         |     | Melting range (°C) |          | Uses  |
|--------|-------------------------|---------|-----|--------------------|----------|---|
|        | Sn                      | Sb      | Pb  | Solidus            | Liquidus |   |
| BS 219 |                         |         |     |                    |          |   |
| K      | 60                      | 0.5 max | bal | 183                | 188      | Tinman's eutectic solder electrical                           |
| F      | 50                      | 0.5 max | bal | 183                | 212      | General bit and blowpipe soldering—2–5% resin in cored solder |
| B      | 50                      | 2.5–3.0 | bal | 185                | 204      | as F  |
| H      | 30                      | 0.3 max | bal | 183                | 244      | Wiping lead cable and pipe joints and for dipping baths       |

TABLE 13.3. Typical BS Brazing Alloys

| Grade                      | Nominal composition (%) |    |    |    |       | Melting range (°C) |          | Remarks                                     |
|----------------------------|-------------------------|----|----|----|-------|--------------------|----------|---|
|                            | Ag                      | Cu | Zn | Sn | Other | Solidus            | Liquidus |   |
| BS 1845                    |                         |    |    |    |       |                    |          |   |
| Brazing brasses            |                         |    |    |    |       |                    |          |   |
| C23                        | —                       | 60 | 40 | —  |       | 885                | 890      | For brazing and 'bronze welding'            |
| C25                        | —                       | 60 | 39 | 1  |       | 880                | 890      |   |
| C28                        | —                       | 50 | 40 | —  | Ni 10 | —                  | —        |   |
| Engineering silver solders |                         |    |    |    |       |                    |          |   |
| AG 4                       | 61                      | 28 | 10 | —  | —     | 690                | 735      | Use borax as flux                           |
| AG 5                       | 43                      | 37 | 20 | —  | —     | 700                | 775      | Use borax as flux                           |
| AG 3                       | 38                      | 20 | 22 | —  | Cd 20 | 605                | 650      | Use fluoride base flux                      |
| Special brazing alloys     |                         |    |    |    |       |                    |          |   |
| CP 3                       | —                       | 93 | —  | —  | P 7   | 705                | 800      | No flux necessary on copper-based materials |
| CP 1                       | 15                      | 80 | —  | —  | P 5   | 645                | 700      |   |
| Silver—copper eutectic     | 72                      | 28 | —  | —  | —     |                    | 780      |   |

Cobre

Aços, ferros fundidos, cobre

# Métodos de união



- Adesivos

- Necessidade de preparação de superfícies
- Requisitos da adesivo:
  - Deve molhar a superfície
  - Teve ter resistência suficiente
  - Teve poder deformar para acomodar deformações e concentradores de tenção
- Grande interesse da industria aeronáutica (peso e aerodinâmica)
- Realidade em ônibus ([vídeo](#))

# É importante lembrar

- Importância do processo de fabricação na seleção de materiais
- Qualitativamente classificar diversos processos quando à:
  - Versatilidade, controle, produtividade, tamanho de lote .....
- Entender o principio e importância da metalurgia do pó