

## CIÊNCIA DOS MATERIAIS

Permite a compreensão dos diversos materiais que existem, facilitando a sua correta utilização para o fabrico de elementos. Por exemplo, se estivermos a estudar o melhor material para uma certa prótese, temos de ter em conta a compatibilidade desse mesmo material e do meio onde a prótese vai ser inserida.

## CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS

**Material de Engenharia:** materiais que se utilizam no fabrico de produtos técnicos.

Comprova-se a importância dos materiais através do nome das diferentes eras, que se baseou nos materiais mais utilizados na época: **Era de Pedra, Era de Bronze, de Ferro, de Polímeros** (materiais poliméricos: plásticos), **de Betão e Aço, de Silício** e para chegar finalmente à **Era da Informação** (enorme desenvolvimento nesta área).

Podemos classificar os materiais em diversas categorias sendo as mais usadas:

### CLASSES DE MATERIAIS

Em função das propriedades dos materiais (Cerâmicos e vidros, Polímeros e Compósitos)

#### 1. Materiais metálicos: facilidade de processamento

- Materiais inorgânicos
- Bons condutores elétricos e térmicos (os eletrões têm maior mobilidade)
- Resistentes e dúcteis
- Suscetíveis à corrosão
- Cristalinos (condições de equilíbrio)
- No geral são mais densos e mais pesados
- Indústria aeronáutica

**2. Materiais cerâmicos e vidros:**  $\text{SiO}_2$ - $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{CaO}$ , bons isoladores térmicos

- Materiais inorgânicos à base de óxidos, nitretos e carbonetos
- Isolantes térmicos e elétricos
- Extremamente frágeis
- Resistentes a altas temperaturas
- Quimicamente inertes (não reagem quimicamente)
- Amorfo, Semi Cristalino ou Cristalino

**3. Materiais poliméricos:** materiais orgânicos (petróleo, feito de carbono) e inorgânicos

Os compósitos mais usados são os de polímeros pois são mais fáceis de processar.

- Materiais orgânicos, constituídos por cadeias longas de moléculas
- Baixa densidade
- Isolantes térmicos e elétricos (os eletrões não se movem, têm baixa mobilidade)
- Baixa resistência, elevada ductilidade
- Decompõem-se a temperaturas relativamente baixas (baixo ponto de fusão)
- Amorfo ou Semi-Cristalino

**4. Compósitos:** mistura de dois ou mais tipos de materiais pertencentes a classes diferentes, que preservam as suas propriedades iniciais. Podem ter matriz metálica, polimérica ou cerâmica. Em geral, não ocorre dissolução de nenhum material, o que faz com que possam ser fisicamente identificados através das interfaces que os separam. Têm elevadas dureza e resistência a altas temperaturas, sendo, no entanto, frágeis. Podem ser cristalinos, amorfo ou mistos.

#### 5. Semicondutores

Nem todos os materiais pertencentes à mesma família desempenham a mesma função porque, apesar de terem as mesmas propriedades, podem ter muitas outras características diferentes (tais como o ponto de fusão).

## FUNCIONAL

Em função das suas funções e aplicações (Biomateriais, Aeronáutica, Automóvel, Ótica, Magnéticos, ...)

- Na **área automóvel** e **aeronáutica** são utilizados materiais menos densos com o objetivo de reduzir o peso dos veículos, para reduzir as emissões de gases poluentes. Quanto mais pesado, mais emissões de gases e maior é o uso de combustível.
- Uma das vantagens dos **materiais metálicos** é o seu fácil processamento. Usamos normalmente ligas e não metais puros que são constituídas por um metal base (solvente) ao qual são adicionados outros elementos metálicos ou não metálicos (soluto), que acabam por reagir entre si, formando outros compostos, perdendo a sua identidade base (ao contrário dos compósitos). As ligas de alumínio são muito usadas nas indústrias aeronáutica e automóvel porque, mesmo sendo de metal, têm uma densidade relativamente baixa, mas mantêm relativamente as mesmas propriedades que os outros metais, o que as torna mais leves e, consequentemente, mais caras.
- Os **polímeros** muito usados para embalagens de alimentos, pois servem como “estanque”.
- **Compósitos:**

O **betão armado** é um compósito cuja matriz que está em maior quantidade é o betão (cimento) e tem varões de aço que são o seu reforço, aumentando a resistência.

As **ferramentas de corte** podem ser feitas de Carboneto de Einstenio (cerâmico), presente em maior quantidade, e com Cobalto. Sendo inicialmente um cerâmico, tem uma dureza muita elevada, mas é extremamente frágil; graças ao material metálico, que tem a vantagem de se deformar facilmente, ganha a capacidade de se deformar e resistência.

## VÁRIOS MATERIAIS PARA O MESMO OBJETO

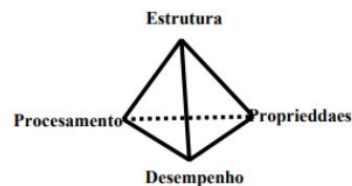
**Embalagens de refrigerantes:** podemos utilizar o plástico porque é menos frágil, mais leve e barato, no entanto, não se degrada e não é completamente impermeável a longo prazo. Podemos, então, optar pelo

vidro, que conserva melhor certas substâncias, pois não deixa fugir tanto gás, por exemplo.

**Lâmpada:** temos uma parte transparente de cerâmica (vidro; transparente e resistente a altas temperaturas), uma parte interna metálica (funciona por efeito de Joules), e uma parte polimérica (revestimento dos fios elétricos; bom isolador; maleável, ao contrário dos cerâmicos).

**Prótese de anca:** a haste femoral é metálica (feita, por exemplo, por aço inoxidável, titânio, ou ligas de titânio) e a cabeça por cerâmica (alta resistência ao desgaste e à fricção).

## TETRAEDRO DOS MATERIAIS



### A. PROCESSAMENTO E PROPRIEDADES

Corresponde às tecnologias de fabrico e à sua síntese. O mesmo material tem propriedades diferentes dependendo da forma como é processado:

- Através de diferentes processamentos, o mesmo material pode adotar estruturas diferentes, a diferentes níveis, levando ao desenvolvimento de diferentes propriedades, modificando a sua função.

Para **alterar as propriedades de um dado material**, podemos alterar a sua composição química, formando ligas por exemplo, ou então processá-los de modo diferente (com um tratamento térmico diferente, por exemplo).

Por exemplo, se pegarmos num fio de aço, o aquecermos e depois deixarmos arrefecer a velocidades diferentes, estes terão propriedades diferentes.

- 1 – Arrefeceu no forno (mais lento) – tem menor dureza
- 2 – Arrefeceu ao ar livre – tem dureza média

3 – Arrefeceu dentro de água (mais rápido) - tem maior dureza

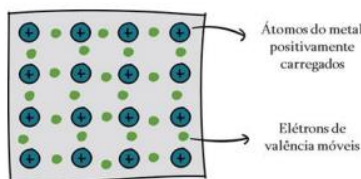
## B. ESTRUTURA

É a forma como os átomos, iões e moléculas que constituem o material estão organizados

### Escala Sub-Atômica (< 0.2nm)

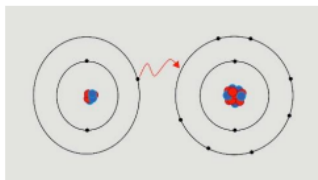
#### Ligações Químicas

**1. Materiais metálicos - ligação metálica:** cada átomo partilha os seus eletrões com todos os outros havendo um "mar de eletrões".

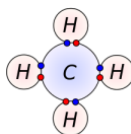


**2. Materiais cerâmicos - ligação iônica:** há cedência de eletrões onde um ganha e outro perde.

Os cerâmicos também podem apresentar ligações iónico-covalentes.



**3. Materiais poliméricos - ligação covalente:** ligações muito fortes. Cada elétron é partilhado por apenas dois átomos - ligação biunívoca.



### Escala Atômica (0.2 a 10 nm)

#### Organização Atômica

Referente às partículas que constituem os materiais:

- 1. Materiais metálicos:** átomos
- 2. Materiais cerâmicos e vidros:** iões
- 3. Materiais poliméricos:** moléculas

Referente à organização destas partículas:

• **Materiais cristalinos:** as partículas estão distribuídas de forma regular e periódica no espaço, obtendo uma estrutura cristalina



• **Materiais não cristalinos ou amorfos:** as partículas estão distribuídas de uma forma aleatória.



Por exemplo:

• A **Grafite (amorfo)** e o **Diamante (cristalino)** são constituídos pelo mesmo elemento, o carbono, mas têm propriedades muito diferentes devido à sua estrutura. O primeiro é constituído por placas que se unem entre si por ligações secundárias, tornando-se menos duro do que o segundo e partindo mais facilmente.

### Escala Microscópica (1 a 1000 µm)

#### Microestrutura

Referente aos cristais de um material:

- **Materiais monocristalinos:** constituídos por um cristal.
- **Materiais policristalinos:** constituídos por vários cristais ligados uns aos outros. São mais resistentes a temperaturas mais baixas graças às zonas onde estes se reúnem (zona desordenada). Assim, quantos mais cristais tiverem, mais resistente é o material.

Os nanomateriais são materiais em que os blocos de construção têm dimensões da ordem do nanómetro e a sua resistência é muito grande pois são constituídos por imensos cristais (policristalinos).

Os metais e cerâmicos são normalmente policristalinos. Eis algumas exceções:

- **Wafers de silício:** usados na indústria eletrónica, são muito pequenos, muito finos e constituídos por apenas um cristal. Se fosse constituído por vários cristais, a sua continuidade elétrica descia drasticamente devido à existência da zona desordenada que separa os cristais.
- **Superligas de níquel:** usados nos vares das turbinas dos aviões a jato; têm dimensões muito reduzidas e são constituídas apenas por um cristal. São submetidas a temperaturas muito elevadas e as zonas desordenadas

iriam degradar as propriedades do material muito mais rapidamente.

### Escala Macroscópica (> 1 mm)

#### **Propriedades**

- **Propriedades mecânicas** (medidas em função da tensão e não da força, pois qualquer material resiste a uma certa força caso tenha uma secção de área de suporte suficiente): ductilidade, resistência, combustez, dureza, rigidez, elasticidade
- **Propriedades físicas:** densidade, térmica, elétrica e magnética
- **Propriedades químicas:** oxidação, corrosão, toxicidade e combustão
- **Propriedades elétricas**
- **Propriedades óticas:** opacos, translúcidos, transparente
- **Propriedades térmicas**
- **Processamento:** maquinação, moldagem, tratamento térmico

**Módulo de elasticidade/ elástico/ de Young:** mede a rigidez de um certo material, ou seja, a capacidade que tem para suportar uma tensão sem deformar.

O módulo de Young não depende da microestrutura.

- Maior domínio elástico → maior rigidez → maior módulo
- Menor domínio elástico → menor rigidez → menor módulo

Quando sujeito a uma certa tensão, inicialmente, o material deforma elasticamente, mas, se retirarmos a tensão, volta à sua posição inicial porque está no seu domínio elástico - temos uma deformação elástica. Chegando a um certo ponto, quando o material não consegue voltar à sua posição inicial, entra em deformação plástica.

#### **1. Materiais metálicos**

• **Temperatura de fusão:** intermédia, mas, em alguns casos, elevada. As ligas solidificam num intervalo de temperatura, isto é, iniciam a solidificação a uma certa temperatura e terminam noutra.

• **Densidade:** globalmente mais densos ( $1-30 \text{ g/cm}^3$ )

• **Coeficiente de expansão:** elevada

• **Módulo de elasticidade/elástico/de Young:** intermédio

• **Resistência mecânica:** a maioria dos metais não tem resistência mecânica. Nas ligas, costumamos aumentar este fator para suportar esforços ao adicionar elementos com certos comportamentos plásticos.

• **Capacidade térmica e elétrica:** mais elevada

• **Condutividade elétrica:** Elevada ( $10^2 - 10^8 \text{ ohm m}$ )

• **Tenacidade à fratura:** elevada (20-200 MP)

#### **2. Materiais cerâmicos**

• **Temperatura de fusão:** muito elevada

• **Densidade:** intermédia ( $1.5-8 \text{ g/cm}^3$ ) (maior porosidade)

• **Módulo de elasticidade:** em regra, mais elevado que os metais; são os mais rígidos, mais duros.

• **Tenacidade à fratura:** Baixa (0.1-6 MP)

• **Condutividade elétrica:** Baixa ( $10^{-19} - 10^{-10} \text{ ohm m}$ )

#### **3. Materiais poliméricos**

• **Temperatura de fusão:** baixa

• **Densidade:** são os menos densos ( $0.5-3 \text{ g/cm}^3$ )

• **Modulo de elasticidade:** baixo

A deformação plástica nos polímeros é praticamente nula (quase só elástica)

• **Condutividade térmica e elétrica:** baixa

• **Tenacidade à fratura:** Baixa (0.3-5 MP)

• **Condutividade elétrica:** Baixa ( $10^{-17} - 10^{-10} \text{ ohm m}$ )

#### **4. Materiais compósitos**

Dependendo do solvente e do soluto têm propriedades diferentes.

• **Densidade:** são os menos densos ( $0.2-3 \text{ g/cm}^3$ )

• **Tenacidade à fratura:** Média (0.3-100 MP)

## SELEÇÃO DE MATERIAIS

### A. REQUISITOS DE SERVIÇO

Impostos pelas condições sob as quais o produto vai ser utilizado. Por exemplo, materiais que sejam expostos a esforços, devem ter uma boa resistência mecânica; materiais que estejam sujeitos a ambientes corrosivos devem ser resistentes à corrosão (como os cerâmicos).

### B. CUSTO

De facto, em materiais de consumo generalizado, o custo é muito importante. Neste parâmetro, os materiais poliméricos estão em vantagem não só graças à própria matéria-prima, mas também graças ao processo de síntese.

- Antigamente, as **próteses de ancas** eram feitas de aço inoxidável (inox), ligas de ferro, cromo (que tem uma grande resistência à corrosão), níquel (mais caro) e outros elementos, mas muito pouco carbono. Foi escolhido pelas suas propriedades, por bem se adequar à sua função, mas tem, mesmo assim, um ou dois problemas. De facto, o inox é muito denso quando comparado com a massa óssea, o que pode ser desagradável para a pessoa e para além disso, ao fim de muitos anos há libertação de iões devendo por isso ser substituído, caso contrário pode causar problemas graves. Mais recentemente, começou-se a fazer próteses de titânio, mais caro, mas que dura também mais tempo do que o inox. Em França, foi decidido, que para pessoas de 70 e mais anos, as próteses deviam ser de aço inoxidável e isto porque o tempo de vida que lhes resta a viver já é menor e pelo facto de já não haver tanto risco de rejeição. Por outro lado, para pessoas com 50 anos ou mais, já usamos titânio.

### C. REQUISITOS DE FABRICO

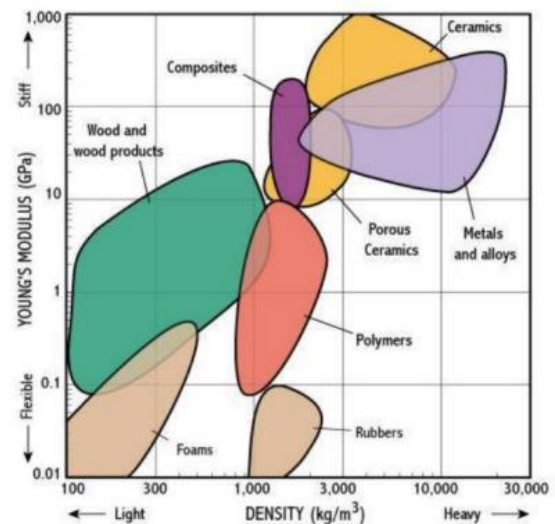
Impostos pelos processos de fabrico que vão permitir obter o produto desejado. Por exemplo, materiais que têm componentes ou peças fabricadas através de outros processos de deformação plástica têm de ser dúcteis, de modo a ser facilmente dobradas. Obter peças de titânio

a partir de processos de fusão é muito complicado, e por isso podemos optar por outro processo (se for possível).

### D. PROPRIEDADE RELATIVA

A escolha de materiais não se faz com base numa propriedade absoluta, mas sim nas propriedades relativas, onde se compara relativamente certas propriedades. Isto pode levar a escolher uma certa classe de materiais em vez de outra pois diferenças que nos parecem insignificantes com propriedades absolutas podem revelar-se muito grandes com as relativas.

Podemos comparar, por exemplo, a resistência mecânica com a densidade, como mostrado neste gráfico de Ashby



## SÓLIDOS CRISTALINOS

- Têm um arranjo bem definido e ordenado das partículas
- Forças interpartículas são de igual ordem de grandeza
- Fundem a temperaturas ou intervalos de temperatura bem definidos (a temperatura de fusão dos metais está situada dentro de um certo intervalo bem definido enquanto que a dos polímeros varia)

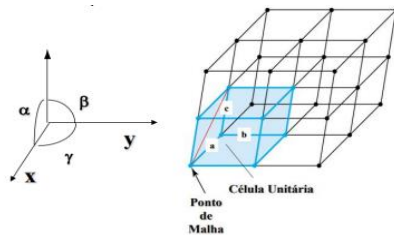
### CRISTAL

Sólido cristalino, obtido através da repetição de uma **célula unitária** nas 3 direções do espaço. A célula unitária é a estrutura unitária básica ou bloco de construção da estrutura cristalina, tendo em conta os seguintes parâmetros:

- Dimensões do sólido: obtidas através dos 3 eixos abcissas, ordenadas e cotas)
- Relações angulares entre os 3 eixos:  $\alpha, \beta, \gamma$

## ESTRUTURAS CRISTALINAS

Nas estruturas cristalinas temos uma **malha espacial**, um arranjo tridimensional de pontos no espaço – **pontos de malha** – arranjados de um modo periódico de maneira que a vizinhança de cada ponto da rede seja idêntica



**Lattice**: termo utilizado no contexto de estruturas cristalinas, no sentido que significa uma matriz tridimensional de pontos que coincidem com as posições dos átomos

## TIPOS DE MALHAS

- **Malhas simples / primitivas**: as partículas estão distribuídas somente nos vértices
- **Malhas de corpo centrado**: as partículas estão nos vértices e há uma partícula no centro
- **Malhas de face centrada**: as partículas estão nos vértices e no centro das faces
- **Malhas de bases centradas**: as partículas estão nos vértices e no centro de duas faces paralelas

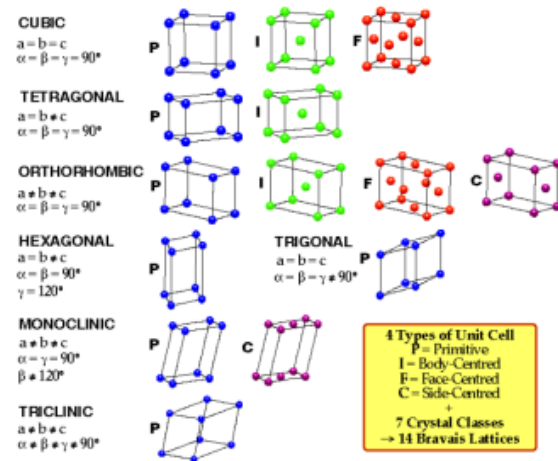
## SISTEMAS CRISTALINOS POSSÍVEIS - MALHAS DE BRAVAIS

Segundo Bravais, existem 14 formas de distribuir partículas de forma periódica no espaço:

- Não existem **malhas cúbicas de bases centradas** pois as estruturas cristalinas dos materiais metálicos, compostas por átomos, são muito simples uma vez que os átomos estabelecem ligações metálicas partilhando assim os seus eletrões e por isso tentam ficar rodeados

pelo maior número de átomos da mesma espécie possível. Um átomo só pode ser rodeado por, no máximo, 6 átomos.

- No espaço bidimensional, os átomos alinham-se pelos espaços vazios (Linha 1 = Linha 3)



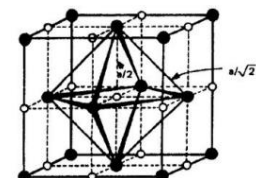
## Taxa de empilhamento

A taxa de empilhamento de uma certa estrutura cristalina é calculada fazendo a razão entre o volume ocupado pelos átomos sobre o volume da célula unitária.

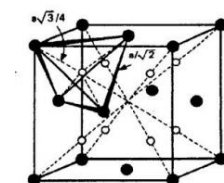
$$TE = \frac{\text{Volume átomos}}{\text{Volume célula unitária}}$$

O fator de empilhamento indica que apenas  $x\%$  da célula unitária é ocupada por átomos e o restante é **espaço intersticial**. Os interstícios podem ser ocupados por átomos ou iões diferentes daqueles que constituem a rede mãe. Temos:

- **Interstícios octaédricos** (definidos por 6 átomos)

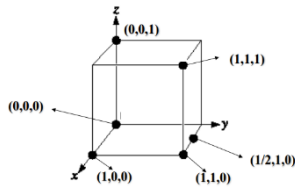


- **Interstícios tetraédricos** (definidos por 4 átomos)

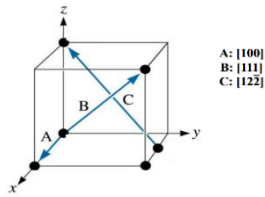


## ÍNDICE DE MILLER

Pontos de malha ( $a, b, c$ )  $\in \mathbb{Q}$



Direções  $[u \ v \ w] \in \mathbb{N}$

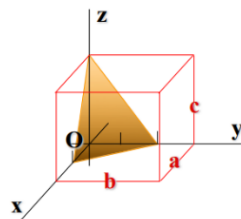


Família de direções  $\langle u \ v \ w \rangle: \langle 1 \ 0 \ 0 \rangle:$

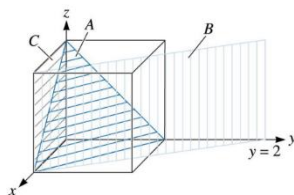
- $\langle 1 \ 0 \ 0 \rangle$
- $\langle 0 \ 1 \ 0 \rangle$
- $\langle 0 \ 0 \ 1 \rangle$

Planos  $(h \ k \ l) \in \mathbb{N}$

1. O plano corta o eixo em  $(1/2, 2/3, 1)$
2. Recíproco em  $(2, 3/2, 1)$
3. Definimos o plano como  $(4, 3, 2)$



- A:  $(1 \ 1 \ 1)$   
 B:  $(2 \ 1 \ 0)$   
 C:  $(1 \ 0 \ 0)$

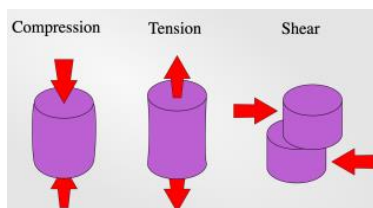


## PROPRIEDADES MECÂNICAS

Dizem respeito ao comportamento dos materiais quando sujeitos a forças externas:

- Quando uma força externa é aplicada a um material, é criada uma força de reação interna que se opõe à força aplicada.

### Exemplos de esforços

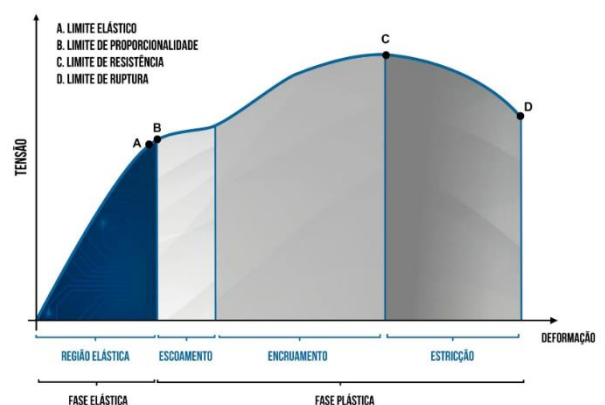
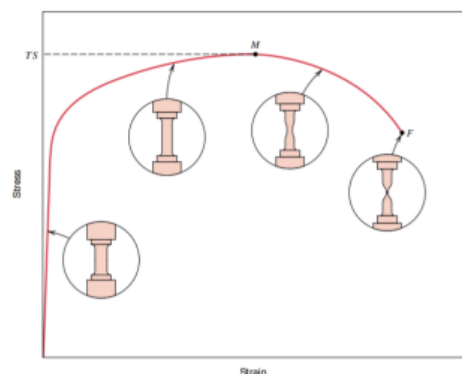


**Entalhes:** zonas de concentração de tensões

## ENSAIOS DE TRAÇÃO

- Utilizada maioritariamente nos materiais metálicos que, devido à sua alta densidade e baixa porosidade, têm uma maior resistência a forças de tração.
- Os ensaios de tração podem ser realizados em produtos acabados ou corpos de prova (provetes), utilizando normas técnicas para padronizar.

Para realização do ensaio coloca-se adequadamente o corpo de prova preso às garras, ajustando manualmente a altura da barra tracionada, de modo que as garras estejam alinhadas e que não haja nenhuma força atuando na célula de descarga. Define-se no software o método no qual será realizado o ensaio (tração), as dimensões do corpo de prova, velocidade do ensaio e de retorno, os limites de operação do equipamento, a forma de apresentação dos resultados, entre outros. O ensaio termina quando o material se rompe.



Podemos obter o **módulo de elasticidade** através da inclinação (coeficiente angular) do segmento linear no gráfico tensão deformação. **Nos materiais metálicos**, o módulo de elasticidade é considerado uma propriedade insensível com a microestrutura, visto que o seu valor é



fortemente dominado pela resistência das ligações atômicas.

**Limite de resistência:** tensão máxima que pode ser sustentada por uma estrutura sob tração. Após o escoamento, a tensão necessária para continuar o processo de deformação plástica em materiais metálicos aumenta até alcançar um valor máximo e a partir desse ponto, a tensão diminui até a fratura do material.

### DOMÍNIO ELÁSTICO

Deformação reversível, ou seja, quando a carga é retirada, o material volta às suas dimensões originais. Os átomos movem-se, mas não ocupam novas posições na rede cristalina.

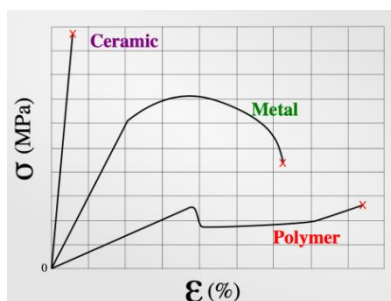
**Lei de Hooke:**  $\sigma = \epsilon E$

E: módulo de elasticidade ou de Young

### DOMÍNIO PLÁSTICO

À medida que o material continua a ser deformado além do regime elástico, a tensão deixa de ser proporcional à deformação e, portanto, a lei de Hooke não mais será obedecida, ocorrendo uma deformação permanente e não recuperável denominada deformação plástica.

Deformação permanente, ou seja, quando a carga é retirada, o material não recupera as suas dimensões originais. Os átomos deslocam-se para novas posições na rede cristalina.



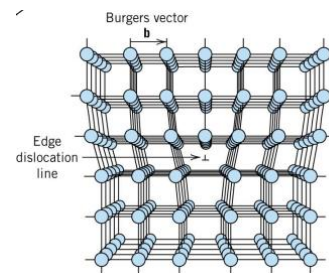
## DESLOCAÇÕES

As deslocações são defeitos lineares em que a rede tridimensional é alterada. Há dois casos extremos de deslocações.

**Vetor de Burgers (b):** representa a magnitude e a direção da distorção da rede resultante de um deslocamento em uma rede cristalina

**Deslocações em cunha ( $\top$  ou  $\perp$ ):** inserção de um semi-plano extra na rede, de modo que no local em que ela acaba exista uma imperfeição.

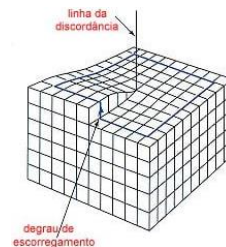
A linha extra de átomos é a **linha de deslocação**.



**Linha de deslocação  $\perp$  Vetor de Burgers**

**Deslocações em hélice**

**(b  $\parallel$  d):** ocorre quando os átomos são deslocados numa direção paralela à linha da deslocação



**Linha de deslocação  $\parallel$  Vetor de Burgers**

**Deslocações mistas:** uma junção destas duas deslocações, sendo estas as mais comuns

A presença e movimentação destes defeitos assegura a **ductilidade ao material**, ao permitir a deformação sem destruir a estrutura básica do material a tensões inferiores ao previsto.

## DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

A deformação plástica corresponde ao movimento de um grande número de deslocações. Dadas as tensões, a certa altura a deformação ocorre quase como um “deslizamento de placas”, através das deslocações.



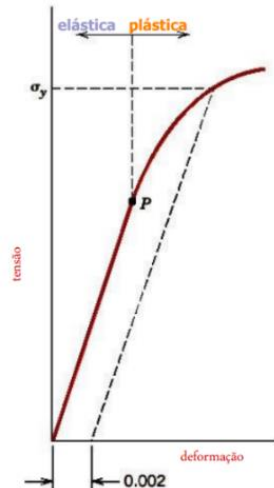
## COMO OCORRE A RUTURA DOS MATERIAIS?

**1ª Hipótese:** Rutura ao mesmo tempo de todas as ligações. A resistência mecânica seria extremamente elevada, comparada à obtida na prática (1000 x!).

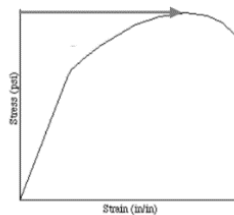
**2ª Hipótese:** Deslizamento de planos até a rutura

### Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2%

**0.2%:** valor normalizado que delimita o ponto em que um material passa do domínio elástico para o domínio plástico.



**Tensão de rutura:** ponto em que o material cede às tensões e fratura. Ponto máximo do domínio plástico.



**Tensão de cedência:** ponto em que o material passa do domínio elástico para o domínio plástico

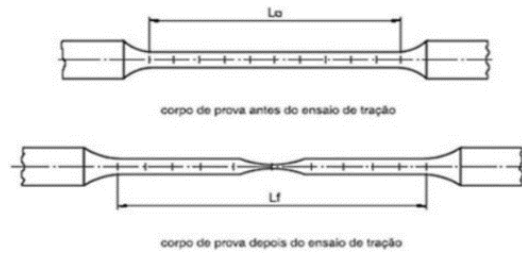
## DUCTILIDADE

Representa uma medida do grau de deformação plástica que o material suportou até a fratura. Um material que experimenta uma deformação plástica muito pequena ou mesmo nenhuma quando da sua fratura é chamado de **frágil**. A ductilidade pode ser expressa quantitativamente tanto pelo alongamento percentual como pela redução de área percentual. Pode-se obter o alongamento percentual AL% da seguinte maneira:  $A (\%) = \frac{l_f - l_i}{l_i} \times 100$

- Elevada ductilidade – grande alongamento
- Elevada fragilidade – pouco alongamento

**Estricção ou Empescoçamento:** Pode ser entendido como uma “formação de pescoço” ou “estiramento” que ocorre quando o aumento da dureza por encruamento é

menor que a tensão aplicada e o material sofre uma grande deformação.



## RESILIÊNCIA

Capacidade do material de absorver energia quando é deformado elasticamente e, após o descarregamento, recuperar essa energia.

- Elevada resiliência – elevado limite de escoamento

## TENACIDADE

Capacidade do material de absorver energia até à rutura. É uma propriedade desejável para casos de peças sujeitas a choques e impactos.

## ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Esse ensaio envolve a aplicação controlada de carga em uma amostra do material, resultando na redução do seu volume. É uma técnica amplamente utilizada para avaliar a resistência do material à compressão e sua capacidade de suportar cargas nessa direção.

A carga é aplicada de forma gradual e controlada até que a amostra seja comprimida até a falha ou até que seja atingido um determinado nível de deformação. Durante o ensaio, são registrados os dados de carga e deformação, que permitem a análise do comportamento do material sob compressão.

- Utilizada maioritariamente nos materiais cerâmicos que, devido à sua baixa densidade e alta porosidade, têm uma maior resistência a forças de compressão.

## DUREZA

Resistência do material à indentação. Podemos testar a dureza dos materiais através de ensaios, tais como:

## ENSAIO DE BRINELL

Empregado principalmente em materiais metálicos.

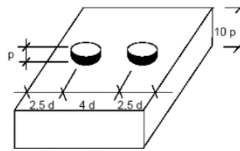
Comprime-se lentamente uma esfera de aço temperado/ carbeto de tungstênio sobre uma superfície plana, polida e limpa de um metal, por meio de uma carga, durante certo tempo, produzindo uma calota esférica.

Se a esfera for de aço temperado só consegue medir durezas até 500 HB, sob o risco de se danificar.

A recuperação elástica também gera bastante erros, já que o diâmetro da impressão não é o mesmo quando a esfera está em contato com o metal e depois de aliviada a carga.

## ENSAIO DE ROCKWELL

O valor de dureza é determinado pela diferença entre a profundidade de penetração resultante da aplicação de uma pré-carga, seguida por outra de maior intensidade. É necessário ter em atenção o seguinte:



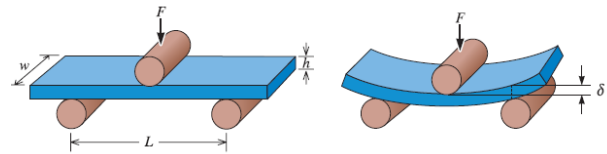
- **Distância entre incisões:** se a distância for pequena, iremos estar a medir a dureza que um material com as propriedades alteradas, devido à atuação da última incisão.
- **Distância aos bordos:** se a distância aos bordos for pequena, a amostra terá tendência a inclinar-se.
- **Espessura mínima:** 3x/4x maior do que a incisão. Se não cumprirmos este requerimento, poderemos estar a calcular a dureza do suporte, e não da amostra.

## TESTE DE FLEXIBILIDADE

### FLEXÃO EM 3 PONTOS

A configuração de ensaio no ensaio de flexão de 3 pontos conforme ISO 178 é constituído por dois apoios paralelos e um cutelo centralizado, entre os quais uma amostra padrão é deformada no range de pequenos ângulos de flexão. Por meio da medição adequada das forças de flexão e da deflexão são determinadas a tensão e a deformação das fibras marginais da amostra, de onde

os respetivos resultados de ensaio são calculados como valores característicos únicos.



$$\sigma_{\text{flex}} = \frac{3FL}{4wh^2}$$

## MECANISMOS DE ENDURECIMENTO

Todos os mecanismos de endurecimento resultam da criação de obstáculos à movimentação das deslocações ou inibindo a sua mobilidade.

Os mecanismos de endurecimento conduzem ao aumento da resistência mecânica associado, em regra, à diminuição de ductilidade.

## MATERIAIS METÁLICOS

### ESTRUTURA

A ligação atômica neste grupo de materiais é metálica. Existem mínimas restrições quanto ao número e posição dos átomos vizinhos mais próximos. Maioritariamente estrutura cristalina cúbica de faces centradas (cobre, alumínio, ouro, prata), cúbica de corpo centrado e hexagonal compacta.

### FUNDIÇÃO

#### MATERIAIS OBTIDOS

- **Ferros fundidos:** cinzento/ nodular
- **Aços**
- **Alumínio:** ligas de alumínio
- **Magnésio:** baixa densidade
- **Titânio**
- **Cobre:** latão/ bronze
- **Zinco**
- **Super-ligas:** níquel/ cobalto

## LIGAS METÁLICAS

### LIGAS FERROSAS

- **Ferros fundidos:** ferro + silício + carbono (mais quantidade do que nos aços)
- **Aço:** ferro + carbono (+ outros elementos de liga)

## LIGAS NÃO FERROSAS

- **Alumínio:** ligas de alumínio (baixa densidade)
- **Magnésio:** baixa densidade
- **Titânio:** maior custo; baixa densidade
- **Zinco**
- **Super-ligas**
  - **Níquel:** resistência a altas temperaturas / maior custo
  - **Cobre:** latão/ bronze
- **Cobalto**

## UTILIZAÇÃO EM ENG. BIOMÉDICA

É necessário ter biocompatibilidade; resistência ao desgaste, à corrosão, mecânica

- **Cobalto:** resistência mecânica graças à camada de óxido crômio
- **Aço inoxidável 304; 316L:** menos carbono e maior grau de pureza; molibdênio
- **Magnésio:** baixa resistência
- **Titânio:** baixa densidade; maior custo

Estrutura Cristalina CCC: maior resistência mecânica e menor módulo de Yang. Mais puro.

Estrutura Cristalina HC: elevado módulo de Yang (relativamente ao osso). Mais impurezas (C/ O/ N/ H) – maior tensão de ruptura e menor alongamento.

Estrutura Cristalina Mista (CCC/ HC)

## PROCESSAMENTO

**1. Confeção do modelo:** essa etapa consiste em construir um modelo com o formato aproximado da peça a ser fundida, que vai servir para a construção da moldação. As dimensões do modelo devem ter em consideração o processo de contração do metal, quando este solidificar. O modelo pode ser feito de madeira, alumínio, aço, resina plástica e até esferovite.

**2. Confeção da moldação:** A moldação é o dispositivo no qual o metal fundido é vazado para que se obtenha a peça desejada. A moldação tem uma cavidade com o formato da peça a ser fundida.

• **Moldação permanente:** pode ser utilizada em vários vazamentos. É usada para grandes produções e são mais caras (metálica)

• **Moldação não permanente:** É usada uma vez, sendo esta mais barata (cerâmica ou em areia)

**3. Confeção dos machos:** Macho é um dispositivo, feito também de areia, que tem a finalidade de formar os vazios, furos e reentrâncias da peça. Eles são colocados nas moldações antes que eles sejam fechados para receber o metal líquido.

**4. Fusão:** Etapa em que acontece a fusão do metal.

**5. Vazamento:** enchimento do molde com metal líquido.

**6. Desmoldagem:** Remoção da peça manualmente ou por processos mecânicos.

**7. Rebarbagem:** remoção dos canais de alimentação, massalotes e rebarbas que se formam na fundição

**8. Limpeza:** feita por meio de jatos de partículas abrasivas (granalhagem)

## SELEÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

- Quantidade de peças a produzir
- Projeto de fundição
- Tolerâncias requeridas
- Grau de complexidade
- Acabamento superficial
- Custo das ferramentas
- Avaliação econômica relativamente a outros processos de fabrico
- Requisitos do cliente

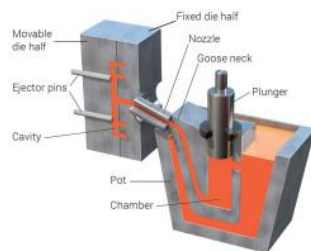
## FUNDIÇÃO EM AREIA (40%)

Processo extremamente flexível. Neste processo, a areia serve como matéria-prima para a produção de um molde. O metal líquido preenche o molde, formando peças ou componentes.

- **Vantagens:** baixo custo dos materiais e equipamentos das moldações; Fabrico de peças de grandes dimensões; Variedade de metais e ligas; Processo mais económico
- **Desvantagens:** Acabamento superficial; Baixa precisão dimensional; Espessuras mínimas de 6 mm

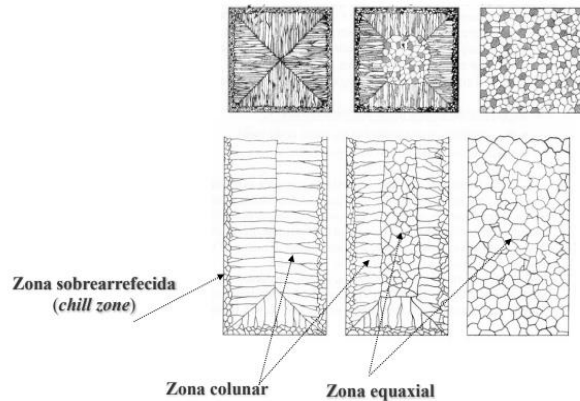
### FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO (INJETADA)

A moldação metálica é chamada **matriz/coquilha**, feita de aço de ferramenta tratado termicamente, e geralmente construída em duas partes que são fechadas hermeticamente no momento do vazamento do metal líquido. Muitas vezes a coquilha é arrefecida a água, para evitar o sobreaquecimento da coquilha, o que aumenta a sua vida útil e evita defeitos nas peças. É utilizada em moldes finos (mais complexos porque a solidificação é mais rápida).



- **Vantagens:** Excelente precisão dimensional; Excelente acabamento superficial; Possibilidade de obtenção de espessuras muito pequenas; Elevada produtividade; Eliminação de muitas operações de maquinagem; Operação de rebarbagem, em muitos casos, desnecessária
- **Desvantagens:** Elevado custo do equipamento (das coquilhas); Elevado custo das ferramentas; Limitações ao tipo de liga vazável (só são fabricadas peças com baixa ponto de fusão, para não danificar a coquilha); Limitação quer na dimensão máxima, quer na geometria das peças a obter

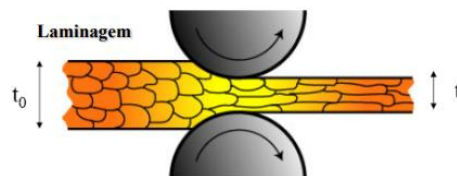
### ESTRUTURAS DE VAZAMENTO



### PROCESSAMENTO: CONFORMAÇÃO PLÁSTICA

Deformação irreversível, permanente. Há uma quebra de ligação dos átomos. Quando o material é deformado plasticamente, a estrutura interna e as propriedades dos materiais alteram-se. A resistência mecânica aumenta e a ductilidade diminui. Há mais deslocações, que são obstáculos, porque estas começam a agregar-se umas às outras e ficam imóveis e a ductilidade vai diminuir.

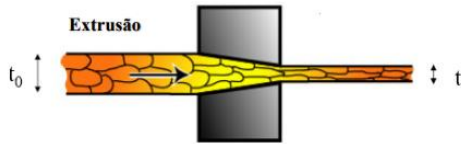
### LAMINAGEM



O material é forçado a passar entre dois cilindros, rodando em sentido oposto, com uma distância entre si menor que a espessura do material em questão. Dessa forma, tendo o corpo da peça inicial uma dimensão maior do que a distância entre as superfícies laterais dos cilindros, ele sofre uma deformação plástica na passagem entre os cilindros que resulta na redução de sua secção transversal e no aumento do seu comprimento e largura. Usa-se para a obtenção de produtos que são posteriormente fabricados.

- Aplica -se mais a aços.

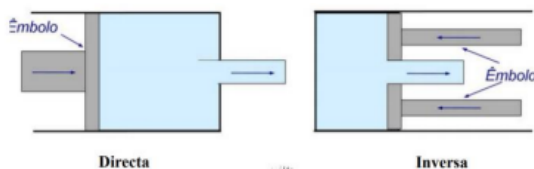
## EXTRUSÃO



O processo de extrusão é um método de fabricação que consiste em empurrar um material através de um molde com uma forma específica, a fim de produzir produtos com seções transversais uniformes.

O material é geralmente aquecido para que se torne mais maleável e, em seguida, é forçado a passar pelo molde com a ajuda de uma ou mais roscas giratórias.

Conforme o material passa pelo molde, ele é pressionado em uma forma desejada e resfriado, resultando em um produto acabado com uma seção transversal constante.



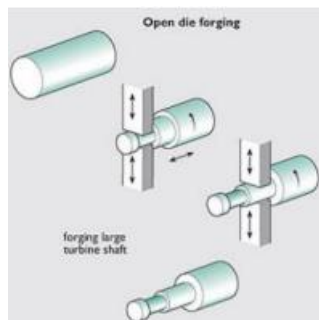
$$\text{Taxa de deformação (\%)} = \frac{t_0 - t}{t_0}$$

**Extrusão a frio (Cold Extrusion):** não tem de ser à temperatura ambiente. Estruturas CFC são mais aptas à deformação plástica do que as restantes.

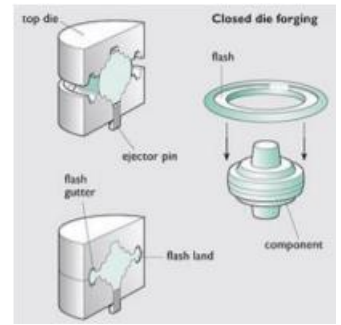
## FORJAMENTO

Operação para dar forma aos metais através do martelamento ou esforço de compressão.

**Forjamento em matriz aberta:** a quente. Operações relativamente simples de conformação por forjamento. Esse tipo de forjamento é conformado em matrizes de formatos simples ou planas que geralmente não se tocam.

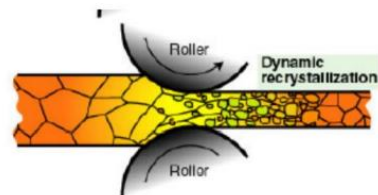


**Forjamento em matriz fechada:** o material é conformado entre duas metades da matriz, que estão gravadas em baixo-relevo ou com impressões no formato que deseja formar a peça. Permite obter peças de formatos mais complexos e com maior rigor, é aplicada a peças mais pequenas.



## DEFORMAÇÃO A QUENTE

- Eleva-se a temperatura do material, de forma a deformá-lo para lhe dar forma. A deformação e a recristalização ocorrem em simultâneo

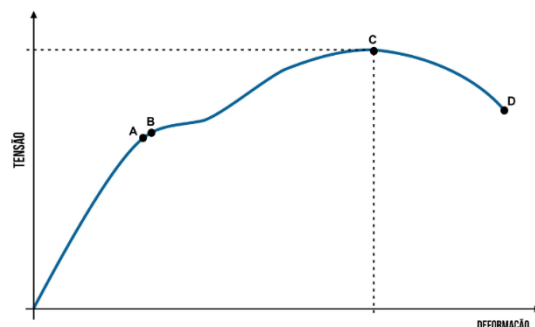


**Recristalização:** forma-se um novo conjunto de grãos menores, equiaxiais e livres de deformações. Pode-se refinar o grão de uma liga monofásica mediante deformação plástica e recristalização

**Crescimento do grão:** depois da recristalização, se o material permanecer por mais tempo em temperaturas elevadas, o grão continuará a crescer.

- Maior grão – material mais mole – menor resistência

## ENSAIO DE TRAÇÃO



## MECANISMOS DE ENDURECIMENTO

1. Em metais puros e ligas metálicas (encruamento/ tamanho de grão)
2. Em ligas metálicas

### ENDURECIMENTO POR TAMANHO DE GRÃO

- Uma maior quantidade de grãos implica grãos com menores dimensões. Desta forma, aumenta a área de fronteiras entre os grãos e, conseqüentemente, a quantidade de obstáculos, que têm menos movimentação.
- Um menor tamanho de grão leva a uma maior resistência mecânica, mantendo a mesma ductilidade.

$$N = 2^{n-1}$$

**N:** tamanho de grão ASTM

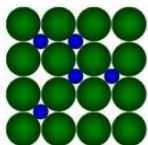
**n:** número de grãos /in<sup>2</sup> (ampliação de x100)

### ENCRUAMENTO

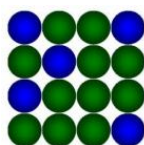
- Endurecimento por deformação plástica. A deformação plástica provoca um aumento da densidade de deslocações bem como a sua distribuição, o que faz com que se tornem obstáculos umas para as outras.

### SOLUÇÕES SÓLIDAS (FORMAÇÃO DE LIGAS)

**S. sólidas intersticiais**



**S. sólidas substitucionais**



O endurecimento por solução sólida é favorecido pela elevada solubilidade à temperatura ambiente e por elevadas diferenças de tamanho atômico entre o soluto e o solvente.

A solução sólida é intersticial quando o solvente é maior 1 ordem de grandeza do que o soluto. Geralmente, nestes casos, o solvente é Oxigênio, Nitrogênio, Carbono ou Hidrogênio.

### Parâmetros que controlam a solubilidade

#### Leis de Hume – Rothery

- **Tamanho:** maior diferença – menor solubilidade. Uma maior diferença de tamanhos causa instabilidade, que diminui a solubilidade, mas aumenta o grau de endurecimento
- **Afinidade química**
- **Valência relativa:** mesmo número de elétrons de valência
- **Estrutura cristalina igual:** condição necessária, mas não suficiente

### Grau de endurecimento depende:

- Diferença de tamanhos atômicos entre soluto e solvente
- **Concentração em soluto:** maior concentração em soluto – mais obstáculos às deslocações – maior endurecimento
- Diferença das propriedades elásticas entre soluto e solvente

## MATERIAIS CERÂMICOS

- Substâncias inorgânicas constituídas por elementos metálicos (ou semi-metálicos) e não metálicos
- Ligados quimicamente entre si por ligações iônicas e/ou covalentes
- Cristalinos, amorfos ou mistos

### PROPRIEDADES

- Elevado ponto de fusão
- Densidade média
- Elevada dureza
- Frágeis
- Isoladores térmicos e elétricos

**Cerâmicos tradicionais:** obtidos a partir de matérias primas (minerais) que ocorrem na natureza. Mistura de argila ( $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e feldspato ( $\text{K}_2\text{O}.\text{Al}_2\text{O}_3.8\text{SiO}_2$ ). Barro, porcelana e cimento.



**Cerâmicos técnicos:** obtidos a partir de compostos puros ou quase puros e são constituídos por óxidos, carbonetos e nitretos ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ). Ferramentas de corte, substituição óssea, substratos para circuitos eletrônicos, componentes para motores.

**Vidros:** substâncias inorgânicas, obtidas por fusão, cujo arrefecimento origina um produto rígido n~so cristalino. Constituídos essencialmente por silicatos, com adições de diversos óxidos ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ , ...). Construção civil, embalagem, elétrica, eletrônica, química.

## PROCESSAMENTO DE CERÂMICOS

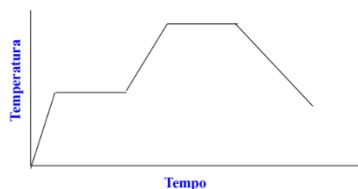
Produtos são fabricados a partir de aglomeração de pós ou partículas.

**1. Preparação das misturas:** partículas/pós + ligante + outros aditivos (misturas secas ou húmicas). A mistura é feita através de moinhos planetário, vibratório ou de desgaste)

- **Ligantes:** conferem plasticidade e resistência a verde após a conformação
- **Plastificantes:** modificam os ligantes conferindo maior fluidez
- **Lubrificantes:** reduzem o atrito as partículas e as paredes do molde

## 2. Conformação

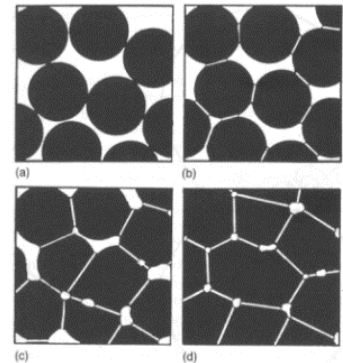
## 3. Tratamento térmico



- **Secagem:** remoção da água ( $T < 100^\circ\text{C}$ ) e de ligantes ( $200^\circ\text{C}$  a  $400^\circ\text{C}$ )
- **Sinterização:** a redução da área superficial específica é a força motora do processo, a qual produz a minimização da energia livre superficial

total. Os mecanismos responsáveis são a difusão atômica e a fluência plástica.

- a) Partículas soltas de pó
- b) Estágio inicial
- c) Estágio intermediário
- d) Estágio final

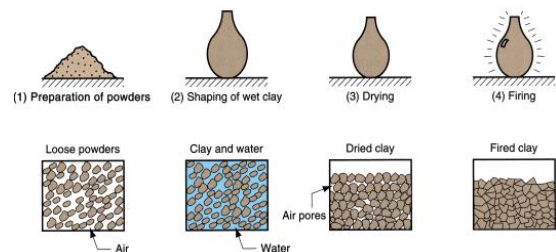


- **Sinterização no estado sólido:** ligação das partículas do material no estado sólido. Temperaturas de processamento elevadas.

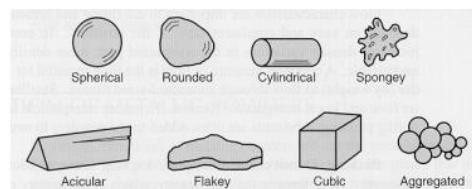
- **Sinterização com fase líquida ou vitrificação:** ligação entre as partículas resulta da fusão e solidificação de uma fase vítrea

**Hot pressing:** sinterização é acompanhada por aumento da temperatura e aumento da pressão

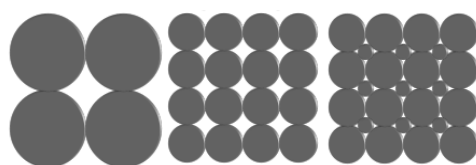
**4. Operações de acabamento:** limpar e polir a peça, por exemplo



## Morfologia dos pós



## Dimensão dos pós





## ESTRUTURA

A ligação atômica nestes materiais varia desde puramente iônica (isolantes térmicos e elétricos; baixa resistência) até totalmente covalente, muitos cerâmicos apresentam os dois tipos de ligação. O grau de característica iônica está dependente da eletronegatividade dos átomos.

**Estrutura Ax-type:** número igual de cátions e ânions. “A” denota o cátion e “x” denota o ânion (Exemplo: NaCl)

### Equação de Pauling

$$\text{Caráter Iônico} = \left[ 1 - e^{\left( \frac{-(x_A - x_B)^2}{4} \right)} \right] \times 100\%$$






$x_A$  – eletronegatividade de A

$x_B$  – eletronegatividade de B

**Composto AB:** cátion ( $A^+$ ) e ânion ( $B^-$ )

A estrutura cristalina de um cerâmico cristalino é condicionada pela neutralidade elétrica e pelo tamanho relativo do ânion e do cátion.

**Número de coordenação (NC):** número de primeiros vizinhos aos quais um determinado átomo está ligado

NC	$r_c/r_A$	Geometria	Exemplos
2	<0.155		
3	0.155-0.225		
4	0.225-0.414		ZnS (Blenda), CdS, InAs, ZnSe, GaAs
6	0.414-0.732		NaCl, MgO, CaO, NiO, FeO
8	0.732-1.0		CsBr, TiCl, TlBr, CsCl

A **estrutura mais estável** é a que apresenta o maior número de coordenação, que é dependente de  $r_c/r_A$ .

