

# ***MATERIAIS DE ENGENHARIA - (SEM 5908) -***

## ***Aula 09 – Projeto Manufatura de Materiais Cerâmicos***

**Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan**

# Processamento

Devido ao alto ponto de fusão e elevada fragilidade dos materiais cerâmicos, o processo de moldagem muitas vezes é inviável. Utiliza-se então o processo de sinterização

Preparação da Matéria Prima

- *Moagem*
- *Mistura*

Conformação

- *Colagem de barbotina*
- *Prensagem*
- *Moldagem plástica*

Sinterização

- *Queima*

# Cerâmica - formulação

Em geral produtos cerâmicos são obtidos à partir de uma composição de matérias primas cerâmicas.

Objetivos: Conferir propriedades desejadas  
Diminuir custos de processamento

## Matérias Primas

- Sílica: (quartzo, tridimita, cristobalita e vidro de sílica).
- Argilos Minerais: (caulim, argila, montimorilonita).
- Mulita:  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ .
- Alumina:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\alpha$  (Corundum).
- Carbetto de Silício: SiC (Carborundum).
- Zircônia:  $\text{ZrO}_2$ .
- Magnésia: MgO.
- Feldspato.

# Formulação de massas cerâmicas

A composição química de uma mistura de matérias primas pode ser obtida pela média ponderada do teor de cada óxido presente em cada matéria prima

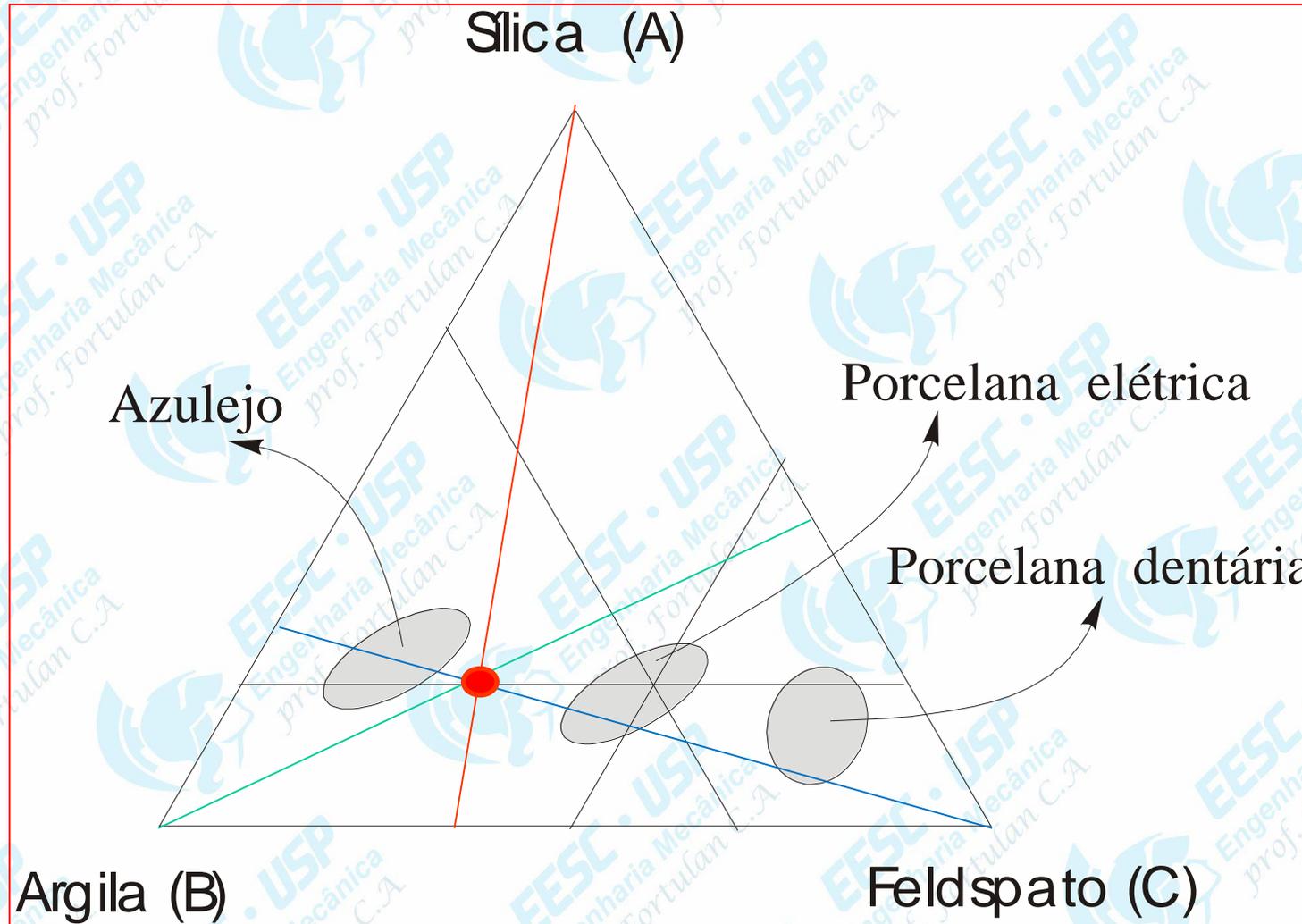
	A	B	C
%SiO <sub>2</sub>	= 99,2 x 0,2	+ 67,0 x 0,3	+ 65,0x0,5 = 72,44
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	= 0,0 x 0,2	+ 19,5 x 0,3	+ 34,5x0,5 = 23,10
% Na <sub>2</sub> O e K <sub>2</sub> O	= 0,8 x 0,2	+ 13,5 x 0,3	+ 0,5x0,5 = 4,46

A= sílica

B= feldspato

C= argila

# Diagrama triaxial



# Transformações térmicas

Estado de Equilíbrio: é o estado de menor energia livre. Qualquer sistema tende a buscar o equilíbrio.



Reações Químicas → Forma um novo composto com diferente composição.

São influenciadas pela pressão, ambiente.



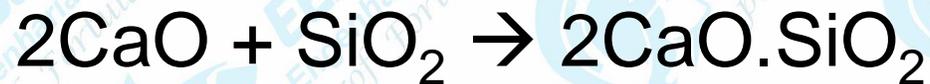
Reações Físicas → mudanças de fases, volume, forma, propriedades. São influenciadas pelo contato (liberdade de movimentos (gases), área superficial, tamanho de partículas)

# Reações químicas

- a) Sólido-Sólido →  $\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{espinélio}$   
 $2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{CaO}.\text{SiO}_2$
- b) Sólido-Líquido → formação de eutético
- c) Sólido-Gás → reação com o gás do ambiente ou dissociado
- d) Líquido-Líquido → formação de vidro
- e) Líquido-Gás → vidros com componentes voláteis

# Reações Químicas - tipos

**a) Combinação direta:** 2 ou mais substâncias reagem formando 1 componente



**b) Reações por deslocamento:**  $\text{Mg} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{MgCl}_2 + \text{H}_2$

**c) Troca mútua:**  $\text{CaSO}_4 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4$

**d) Rearranjo:** (incomum) formação de uréia a partir de cianato de amônio  
 $(\text{CN})\text{O}(\text{NH})_3 \rightarrow \text{N}_2\text{H}_4(\text{CO})$

**e) Dissociação:** qualquer material que tenha água estrutural. (caulim, argila, bauxita, carbonatos)

**Ex. 9.1.** Na queima de 5kg de caulinita,  $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ , em um forno de laboratório para produzir uma cerâmica de aluminossilicato, quanto  $\text{H}_2\text{O}$  é liberado?



# Reações Químicas – fatores que influenciam

- a) Composição: a unidade ou reatividade depende da composição (ex: impurezas);
- b) Tamanho de partículas: contato (superfície específica);
- c) Temperatura;
- d) Tempo;
- e) Pressão mecânica;
- f) Atmosfera;
- g) Pressão de vapor;
- h) Superfície;
- i) Tensão superficial: alta tensão → minimiza a região de contato;  
baixa tensão → molha o sólido

# Reações Químicas – fatores que influenciam

- j) Estrutura e propriedades cristalográficas: em reações no estado sólido as principais reações ocorrem por difusão
- k) Viscosidade
- l) Solubilidade:  $>$  solubilidade  $\rightarrow$   $>$  reação
- m) Ação seletiva: em vários materiais algumas reações são mais propensas (afinidade, composto insolúvel)
- n) Catalizadores: facilitam as reações (físico-químicas) mas não fazem parte do processo. (normalmente  $< 1\%$ )
- o) Condutividade térmica
- p) Luz
- q) Mudanças de estado: eutético
- r) Quantidade relativas dos reagentes

# Diagramas de fase

São representações gráficas no qual fases em equilíbrio estão presentes no material em várias temperaturas, composições e pressões.

**Diagramas de fases** são **Diagramas de Equilíbrio**

A **fase** é definida como a região em um sistema no qual as propriedades e composição são espacialmente uniformes.

Tipicamente um diagrama de fase mostra:

- As fases presentes no equilíbrio;
- A composição das fases presente em um determinado tempo durante o aquecimento e resfriamento;
- A fração de cada fase presente;
- A faixa de solubilidade de um elemento ou componente em outro.

# Definições e conceitos básicos

- **Componente:** espécies quimicamente reconhecidas (ex: Fe e C no aço carbono, H<sub>2</sub>O e NaCl na água salgada);
- **Fase:** porção quimicamente homogênea de uma microestrutura; região de composição uniforme e estrutura cristalina;

*Não confunda fase com grão. Uma simples fase no material pode conter muitos grãos, contudo, um simples grão consiste de uma única fase.*

*Uma fase pode conter um ou mais componentes.*

- **Sistema:** uma série de possíveis ligas, compostos e misturas;
- **Solvente:** principal componente em uma solução;
- **Soluto:** componente minoritário.

**Ex. 9.2-** Dos nomes a seguir qual(is) é/são componente(s) de uma fase?

a) Bronze, Cobre, Zinco;

b) Apenas o cobre;

c) Apenas o Zinco;

d) Ambos: cobre e zinco;

# Regras de fase

Para a condição de equilíbrio são apresentadas restrições de graus de liberdade  $F$  que um sistema pode possuir.

Regra de fase

$$F = C + 2 - P$$

J.W.Gibbs

onde:

$F$  = graus de liberdade;

$C$  = nº de componentes;

$P$  = número de fases presentes.

O número de fase  $P$  é o número de fases fisicamente distintas, em princípio, porções mecanicamente separadas do sistema.

– Difração de Raio X – método mais apropriado para identificação.

# Sistemas de um Único Componente

$$F = C + 2 - P$$

$$C=1 \Rightarrow F=2$$

Para definir completamente o sistema, ambas: pressão e temperatura devem ser especificadas.

Se duas fases estão presentes  $\Rightarrow F=1$ , pressão ou temperatura precisam ser especificadas, mas não ambas.

Exemplo:

- ✓ A água, na pressão de 1 atm água (liq) e gelo podem existir em uma única temperatura (0°C)
- ✓ No ponto tríplice, três fases coexistem, e não há graus de liberdade, ou seja ocorrem em uma única pressão e temperatura.

Uma substância de simples fase quando aquecida ou resfriada pode apresentar um número de transformações polimórficas.

**Polimorfismo:** são diferentes modificações cristalinas de uma mesma substância química

Zircônia ( $\text{ZrO}_2$ )

Sobre pressão de 1 atm

Monoclínica → tetragonal → cúbica → líquida

1170°C

2370°C

2680°C

Titanato de Bário ( $\text{BaTiO}_3$ )

romboédrico → ortorrômbico → tetragonal → cúbico

-90°C

0°C

130°C

# Sistemas Binários

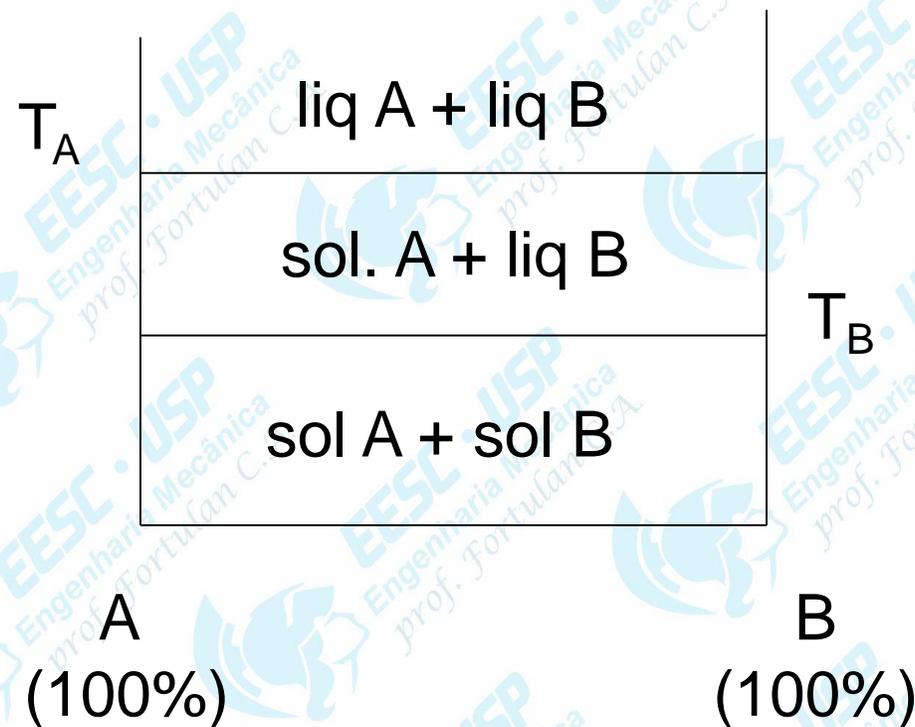
São sistemas constituídos de dois corpos e são identificados três variáveis: temperatura, pressão e composição.

- ✓ mútua solubilidade e formação de solução sólida;
- ✓ solubilidade sólida parcial sem formação de fase intermediária;
- ✓ solubilidade sólida parcial com formação de fase intermediária.

**Ex. 9.3.** At certain temperature the maximum concentration of solute atoms that dissolve in solvent to form solid solution, this condition is called:

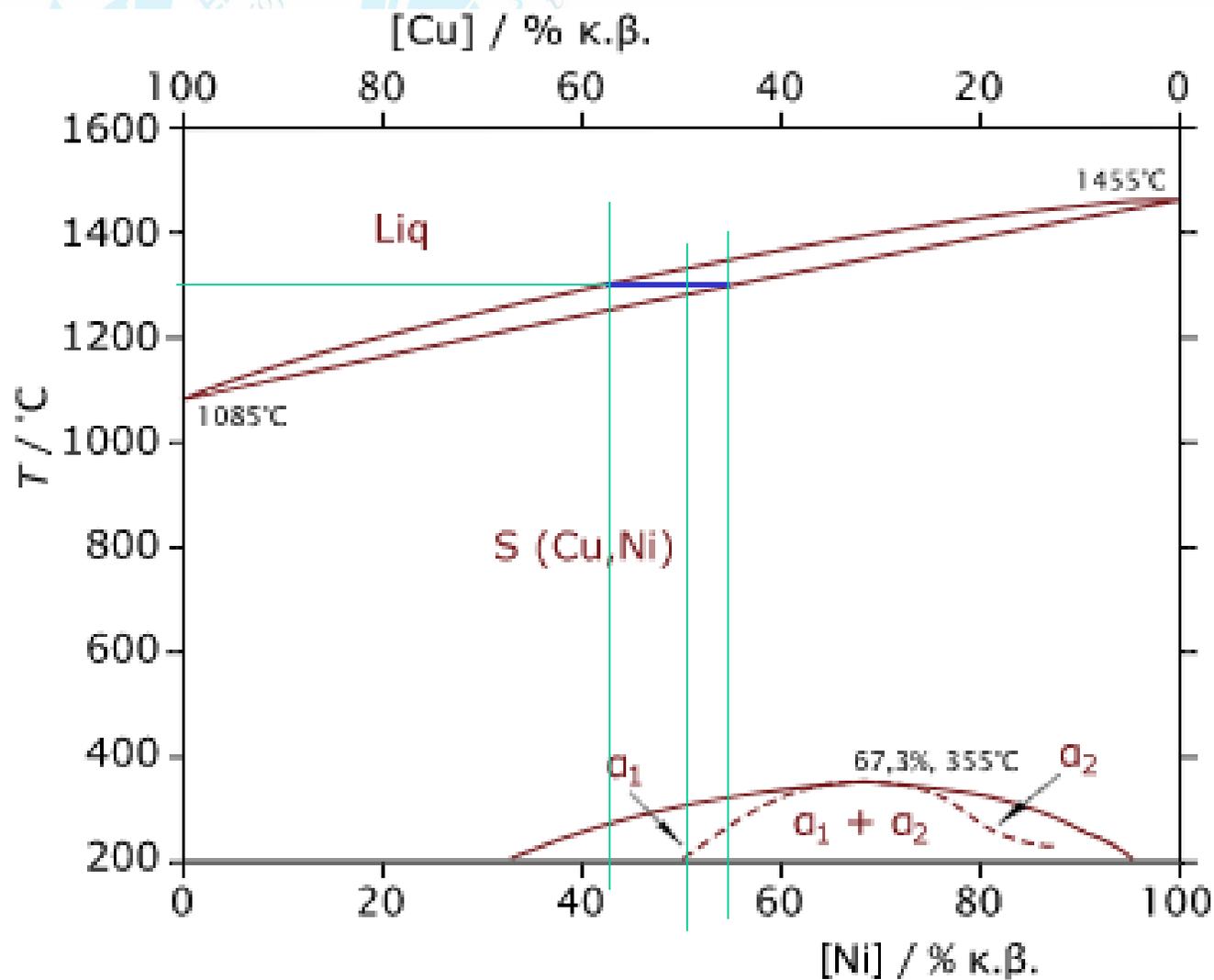
- a) Solubility;
- b) Formation of phase;
- c) Solubility limit;
- d) Formation of super saturated solution;

# Situação 01 – Componentes imiscíveis nos estados líquido e sólido

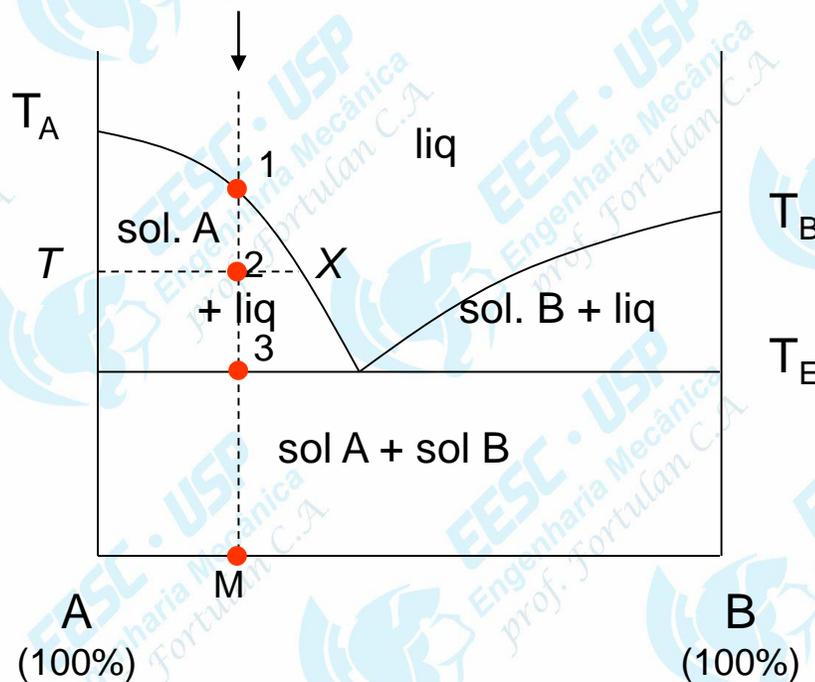


**Ex. 9.4.** A 53% Ni Cu-Ni alloy is cooled from liquid state to 1300°C. Calculate the % of liquid and solid at 1300°C.

- a) 28, 72
- b) 38, 62
- c) 35, 65
- d) 65, 35



# Situação 02 – Componentes miscíveis nos estados líquido mas imiscíveis no estado sólido



Ponto 1: cristalização de A

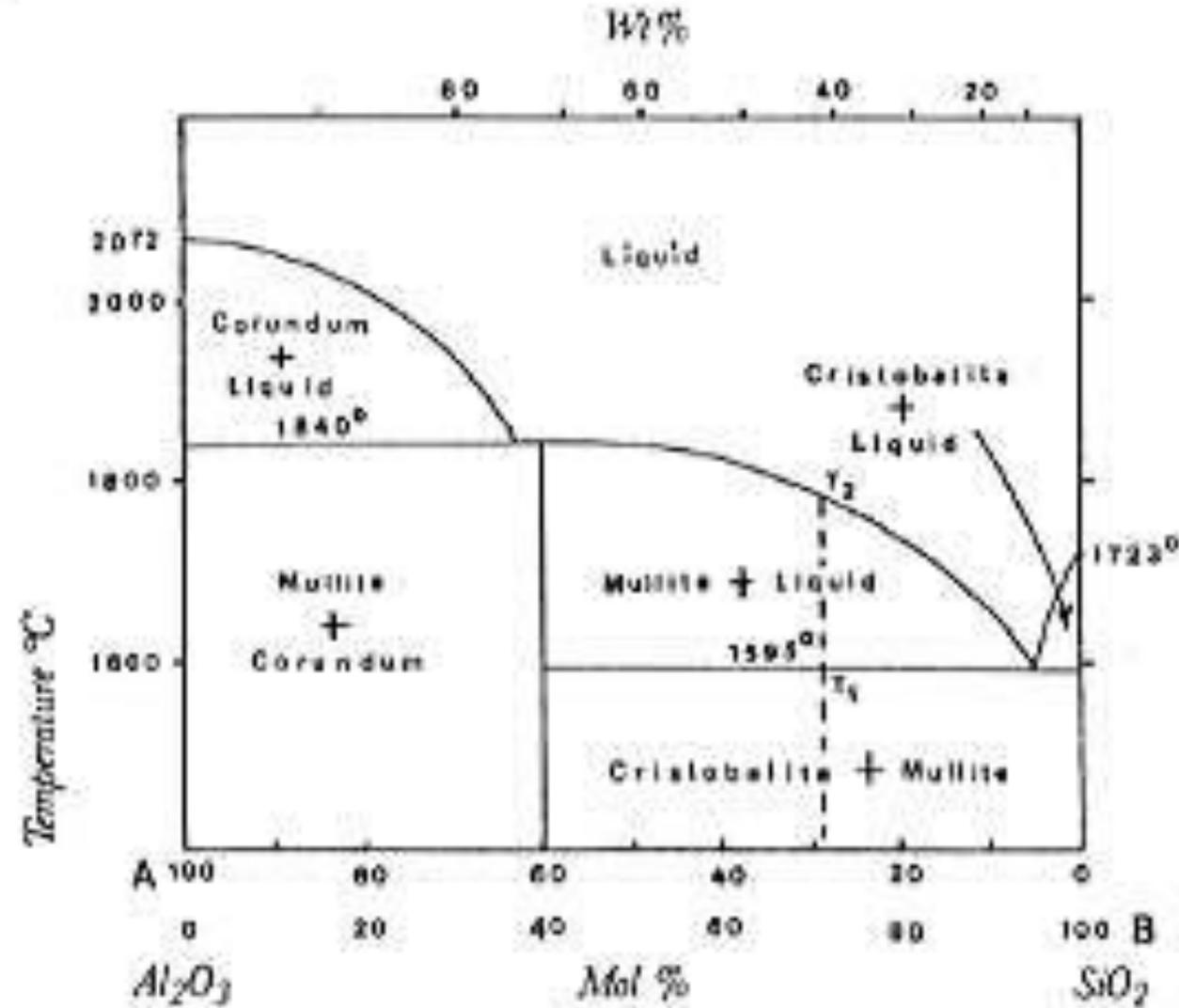
2: crist. A (liq rico em B)

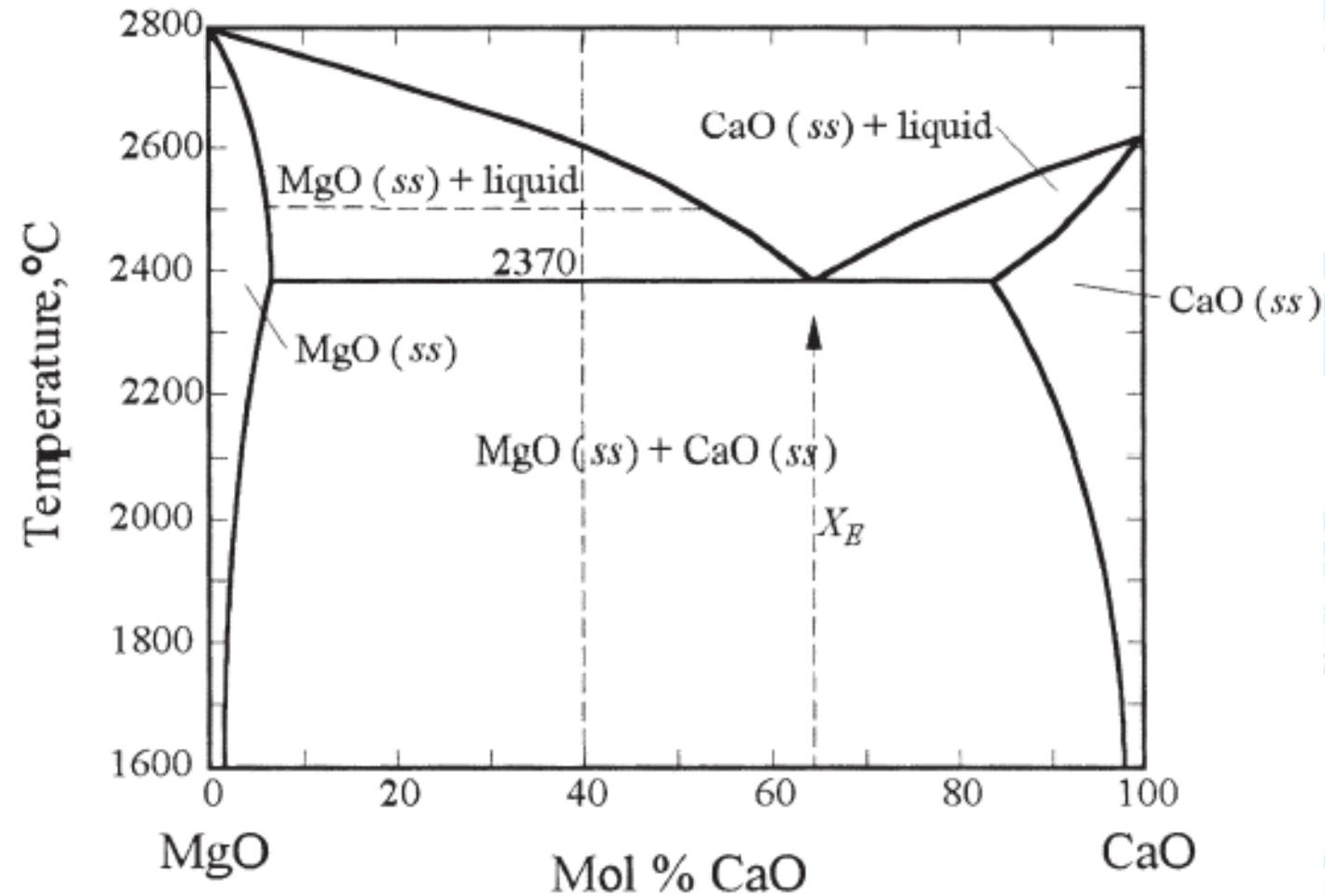
3: <T<sub>E</sub> início e fim da cristalização de B, termina a cristalização de A.

Ponto 2:

$$\% \text{ liq} = \frac{\overline{2T}}{\overline{XT}}$$

$$\% \text{ sol A} = \frac{\overline{2X}}{\overline{XT}}$$

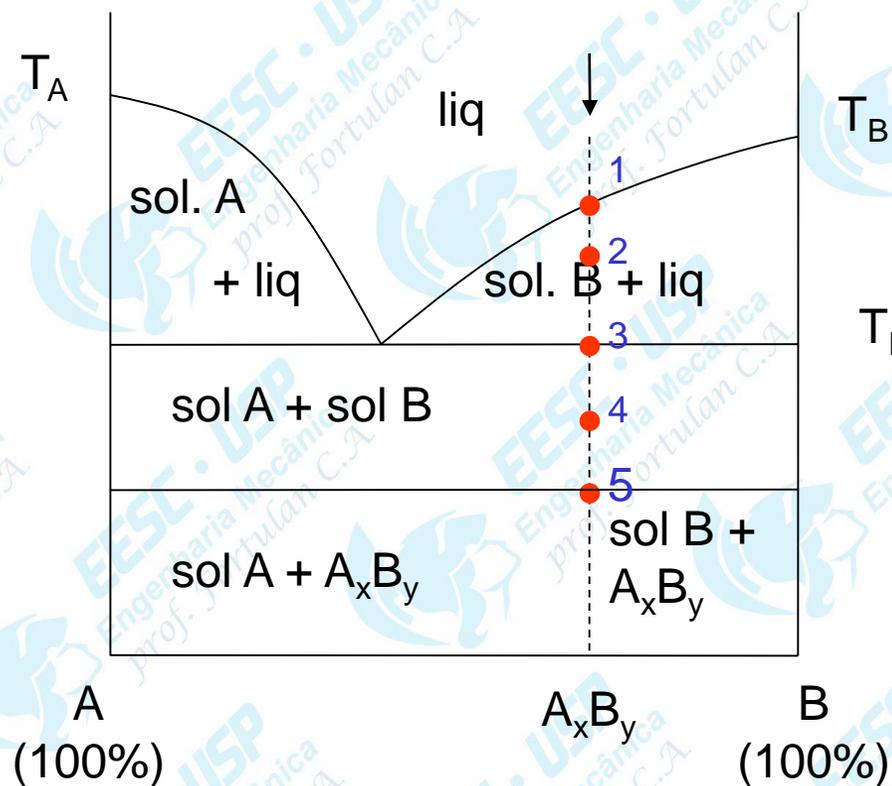




- A temperatura de eutético refere-se ao ponto de intersecção que representa a menor temperatura no qual um líquido pode existir.

## Situação 03 – Formação de Composto

a) Composto se decompõe abaixo de  $T_E$  ( $T < T_E$ )



### Caminho da cristalização

Pto 1: início da cristalização de B

Pto 2: crist. de B

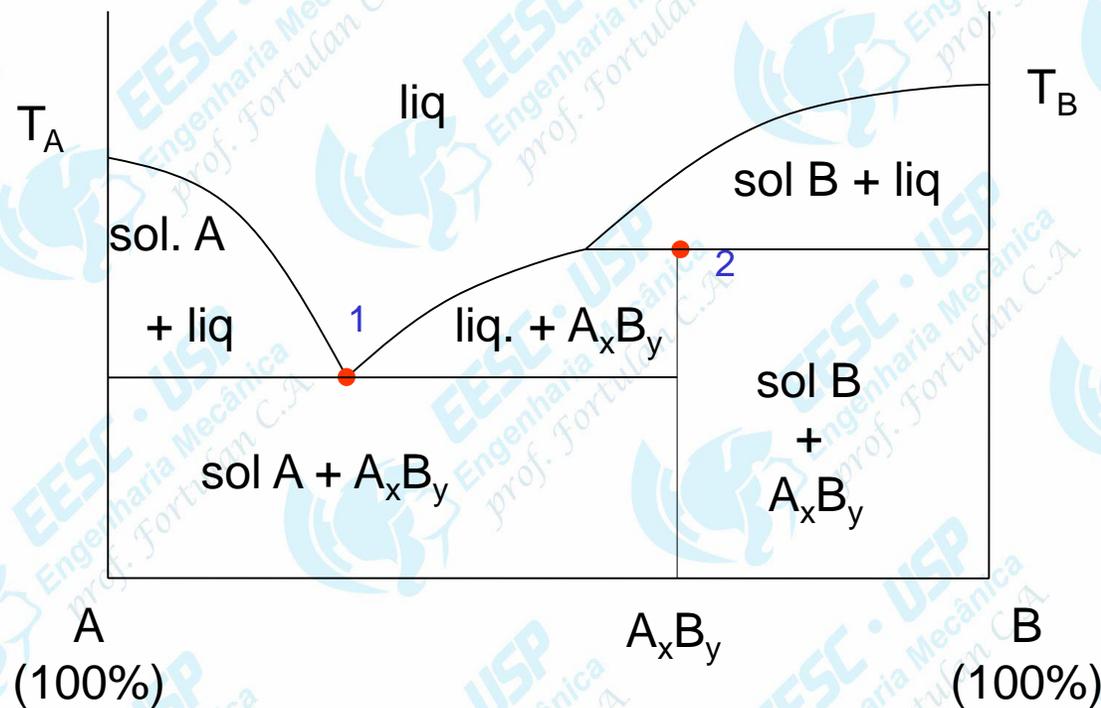
Pto 3: fim de liq., final da crist. B e início e fim da crist. A.

Pto 4: não ocorre cristalização, zona de interação de sólidos

Pto 5: reação de  $A+B$  para a formação do composto  $A_xB_y$

# Situação 04 – Formação de Composto

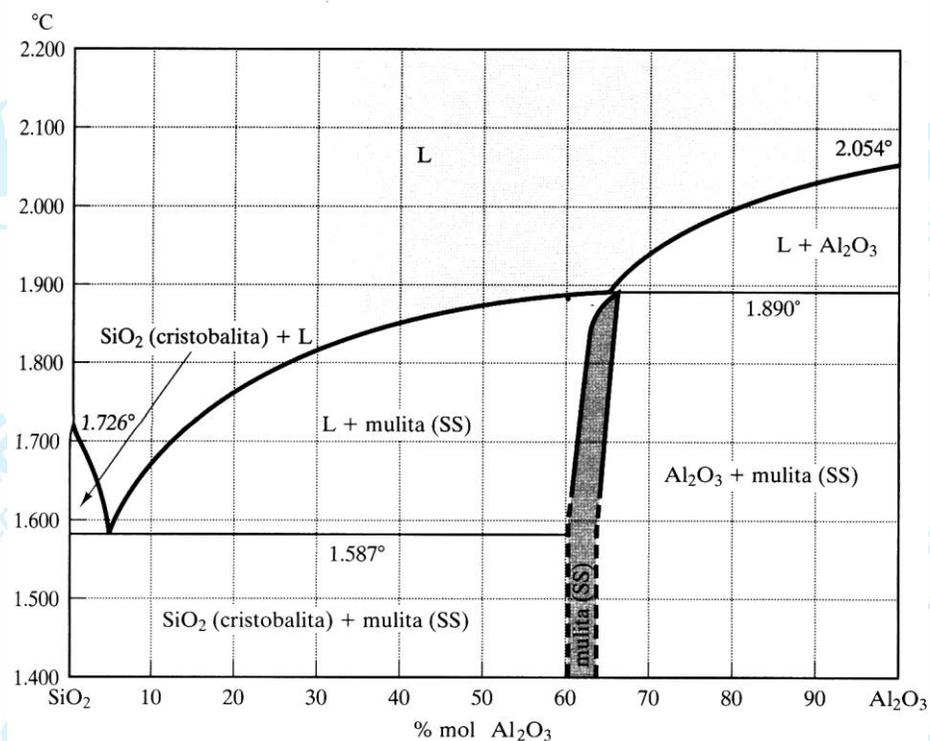
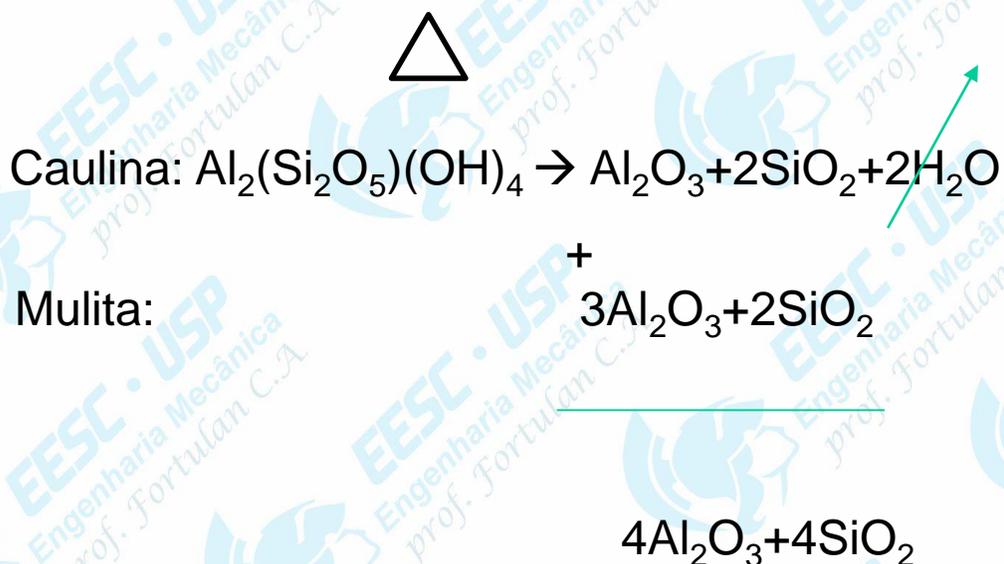
a) Composto se decompõe a ( $T > T_E$ )



Pto 1:  $Liq \rightarrow sol. + sol.$

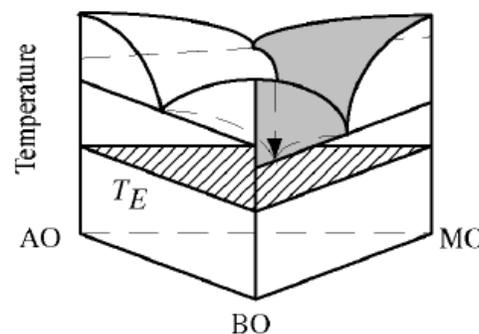
Pto 2:  $Liq \rightarrow sol. + liq$

**Ex. 9.5.** Determine as fases presentes, suas composições e suas quantidades (abaixo da temperatura eutética) para um refratário feito de frações molares iguais de caulinita ( $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ ) e mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ). Lembre-se que no aquecimento da caulinita bruta haverá a perda da água de hidratação. Ver fig. Ao lado.

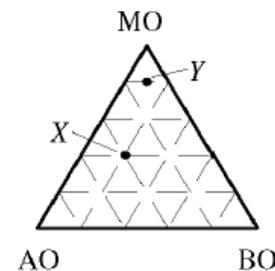


# Diagramas ternários

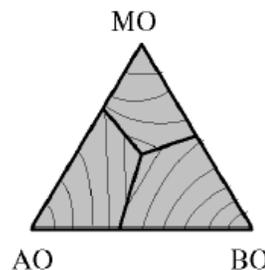
Diagramas ternários relatam as fases e as temperaturas em sistemas de três componentes, e as 4 variáveis consideradas são: temperatura, pressão e concentração de dois componentes (a concentração do terceiro é resultante das duas já fixadas).



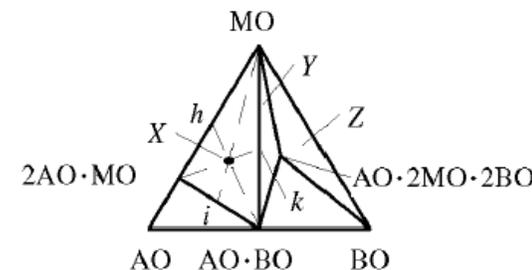
(a)



(b)



(c)



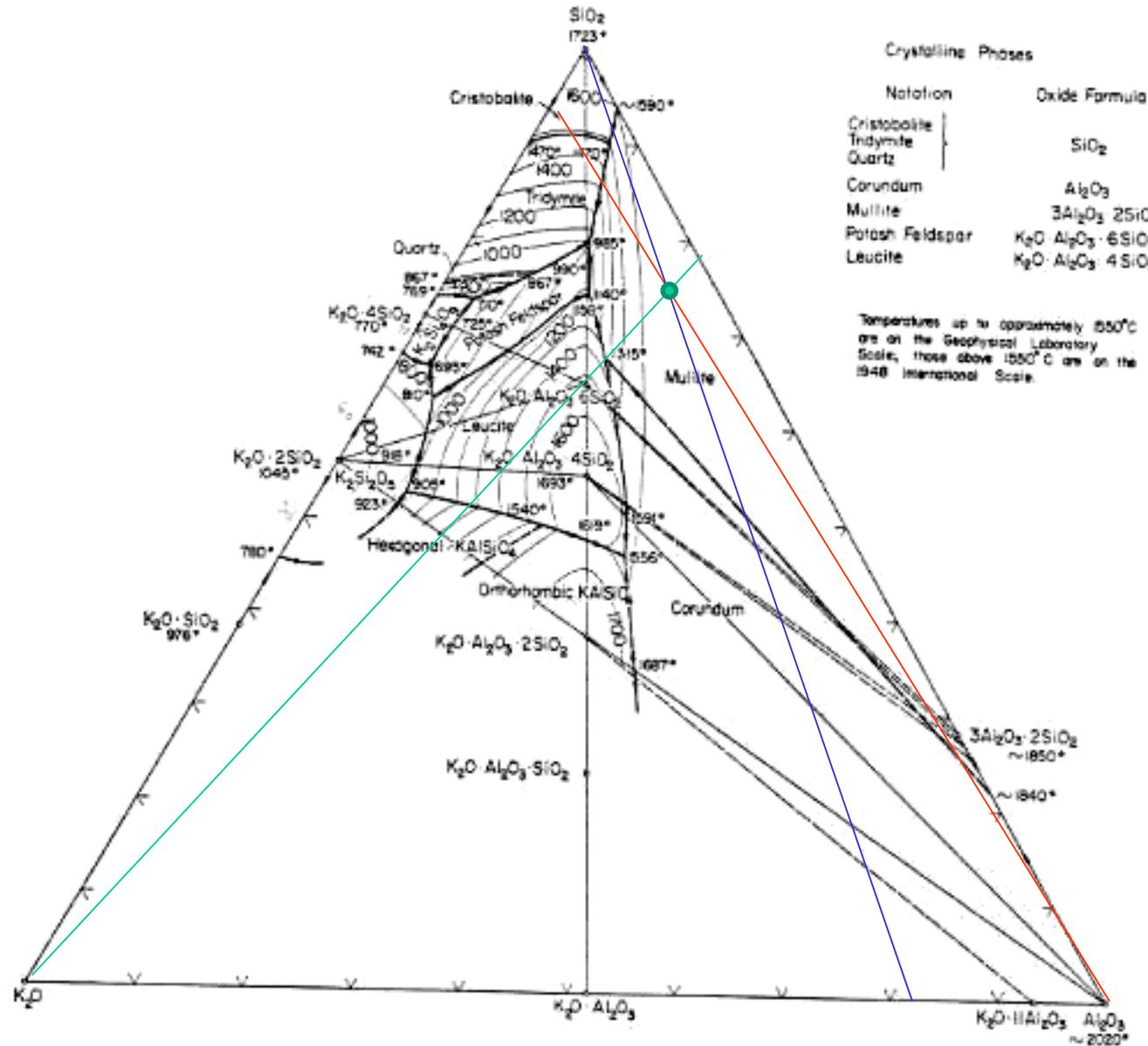
(d)

$$\text{Mol fraction MO} = \frac{X_i}{i - \text{MO}}$$

$$\text{Mol fraction of } 2\text{AO} \cdot \text{MO} = \frac{X_k}{k - 2\text{AO} \cdot \text{MO}}$$

$$\text{Mol fraction of } \text{AO} \cdot \text{BO} = \frac{X_h}{h - \text{AO} \cdot \text{BO}}$$

$K_2O-Al_2O_3-SiO_2$



# Moagem e mistura cerâmica

Moagem pode ser entendida como o processo de redução do tamanho de partículas por meio de forças mecânicas. Tem um papel importante no processamento de pós finos e quimicamente homogêneos, pois é através desse processo que se torna possível a obtenção de novos materiais com propriedades melhoradas.

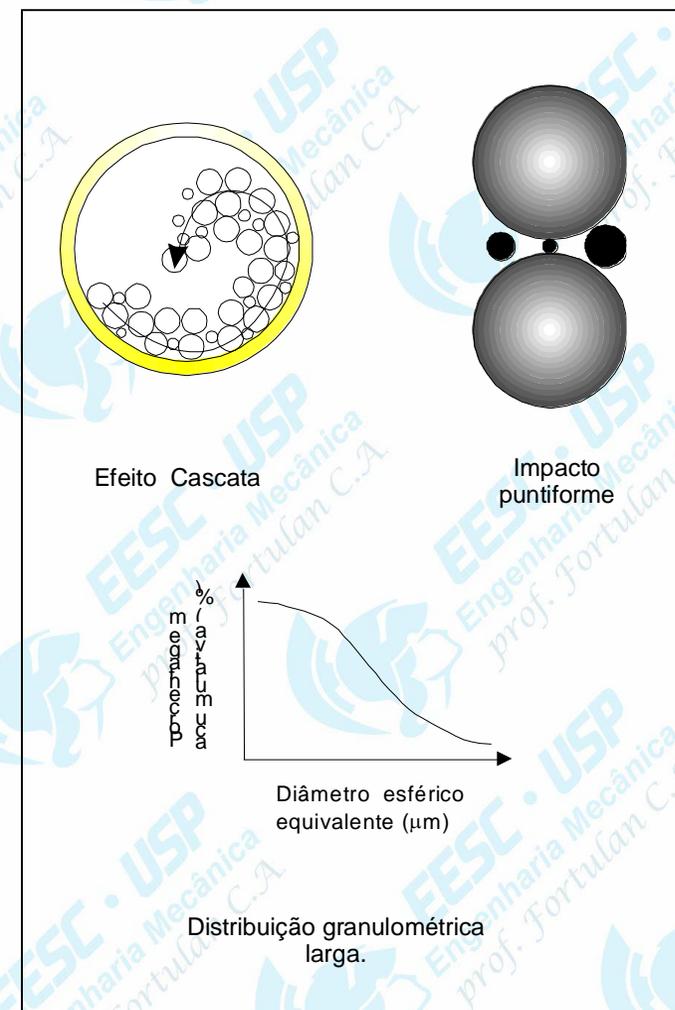
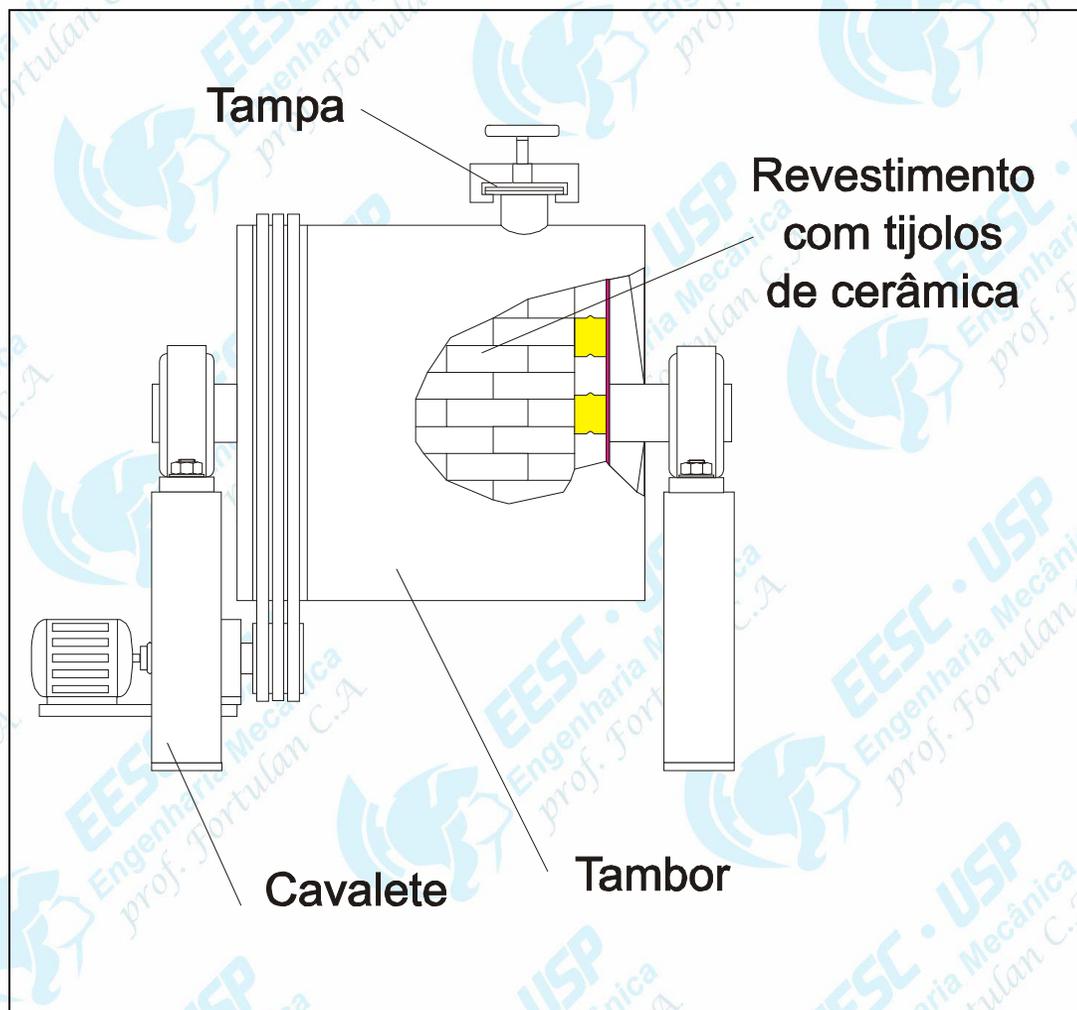
# Moagem - tipos de moinho

Dentre as técnicas mais usuais encontram-se a do moinho de bolas, o moinho vibratório, o moinho de atrito, o método de classificação a ar, o método da precipitação, o método à laser e o método à plasma

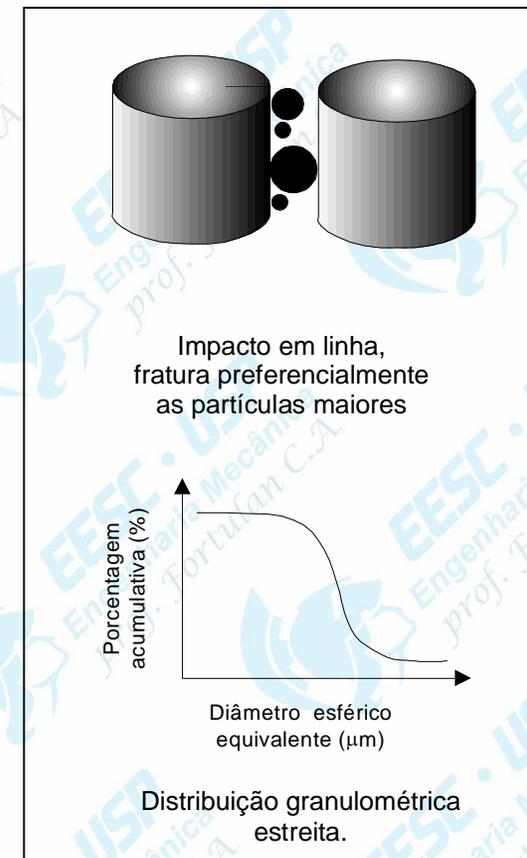
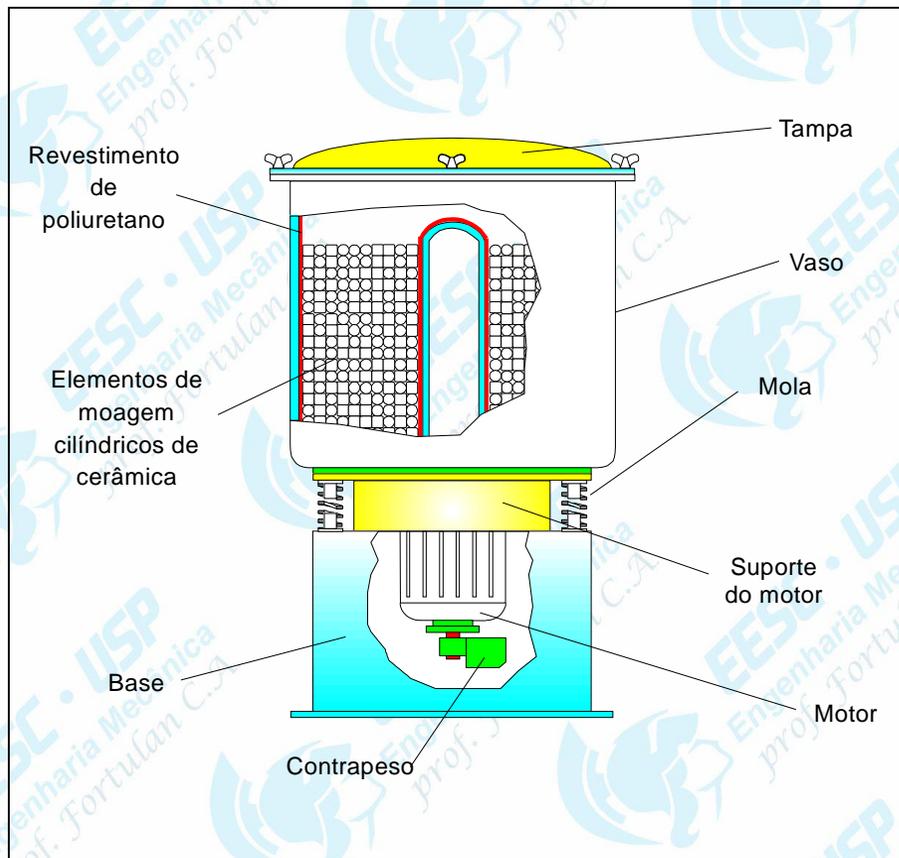
Basicamente o processo de moagem consiste dos seguintes estágios:

- a) redução do tamanho de agregados por moagem;
- b) fratura de partículas individuais, formação de defeitos e mudanças internas nas partículas durante moagens longas;
- c) reaglomeração durante períodos muito longos de moagem.

# Moinho de bolas



# Moinho vibratório



**Barbotina:** Suspensão coloidal que descreve movimento Browniano

**Colóide:** um sistema microscopicamente heterogêneo onde um componente tem dimensões entre as das moléculas e da areia

Tamanho típico: 1nm a 1 mm

Em suspensão as partículas coloidal descrevem o movimento Browniano

Quando elas se encontram umas as outras, o balaço de forças atrativas e repulsivas determinam a estabilidade das suspensões. Se forças repulsivas forem suficientes para balancear as forças atrativas e as interações de Van der Waals, a suspensão coloidal é dita como estável.

**Floculação:** agregação reversível

**Coagulação:** agregação irreversível

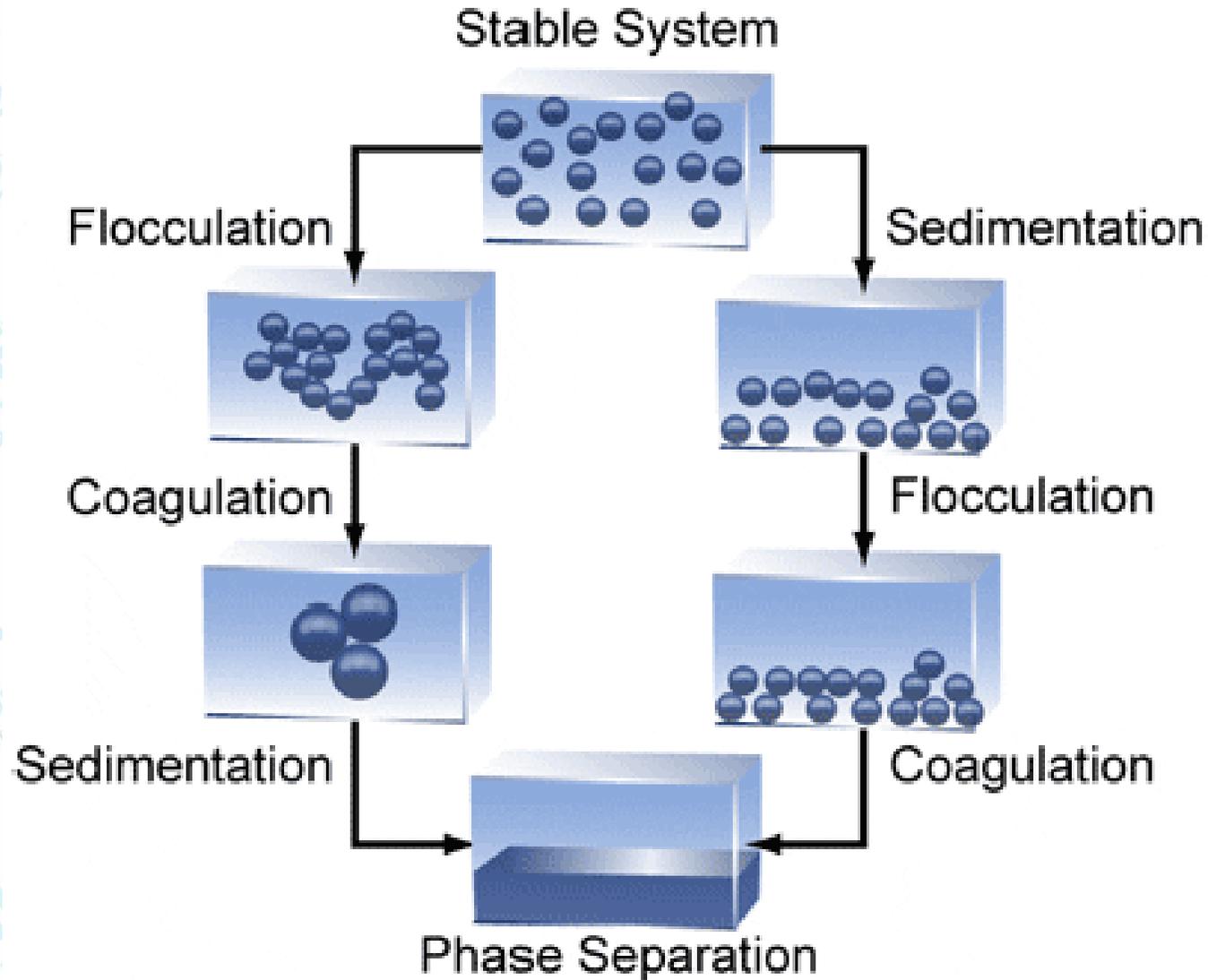
# Defloculação

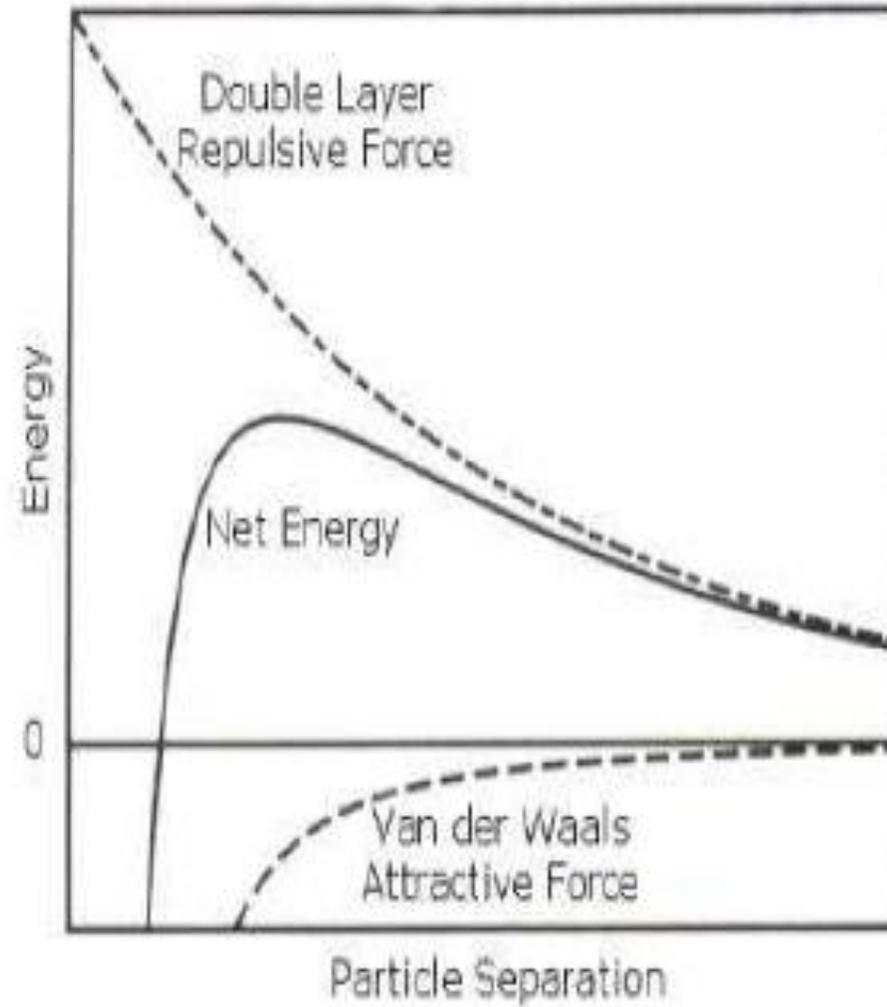
Pós em suspensão em um líquido se aglomeram espontaneamente, a menos que sejam utilizados de defloculantes que criam cargas repelentes em duplas camadas ou por impedimento físico.

O governo das suspensões é definido por três forças:

- Sedimentação: gravidade (massa e tamanho da partícula);
- Repulsão Eletrostática: carga superficial;
- Atração de Van der Waals.

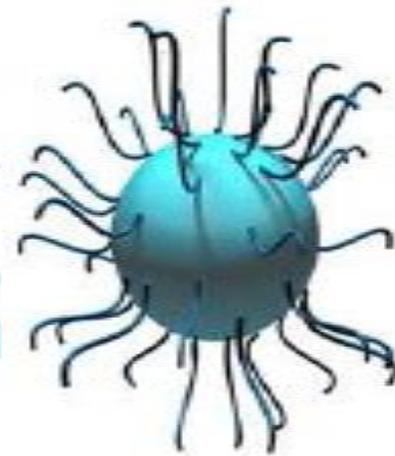
# Estabilidade dos suspensões





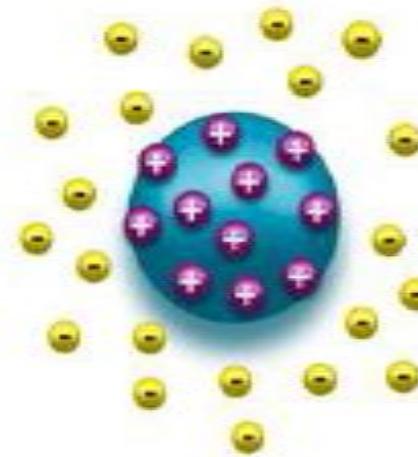
# Estabilização

**Repulsão estérica** - Envolve a adição de polímeros na superfície das partículas prevenindo o contato entre elas. Se adsorver polímero suficiente uma superfície de revestimento manterá as partículas separadas por repulsão estérica.



Steric stabilization

Estabilização de carga ou **Eletrostática** - isto é o efeito da interação de partículas devido a distribuição de espécies carregadas no sistema.



Electrostatic stabilization

# Estabilização estérica

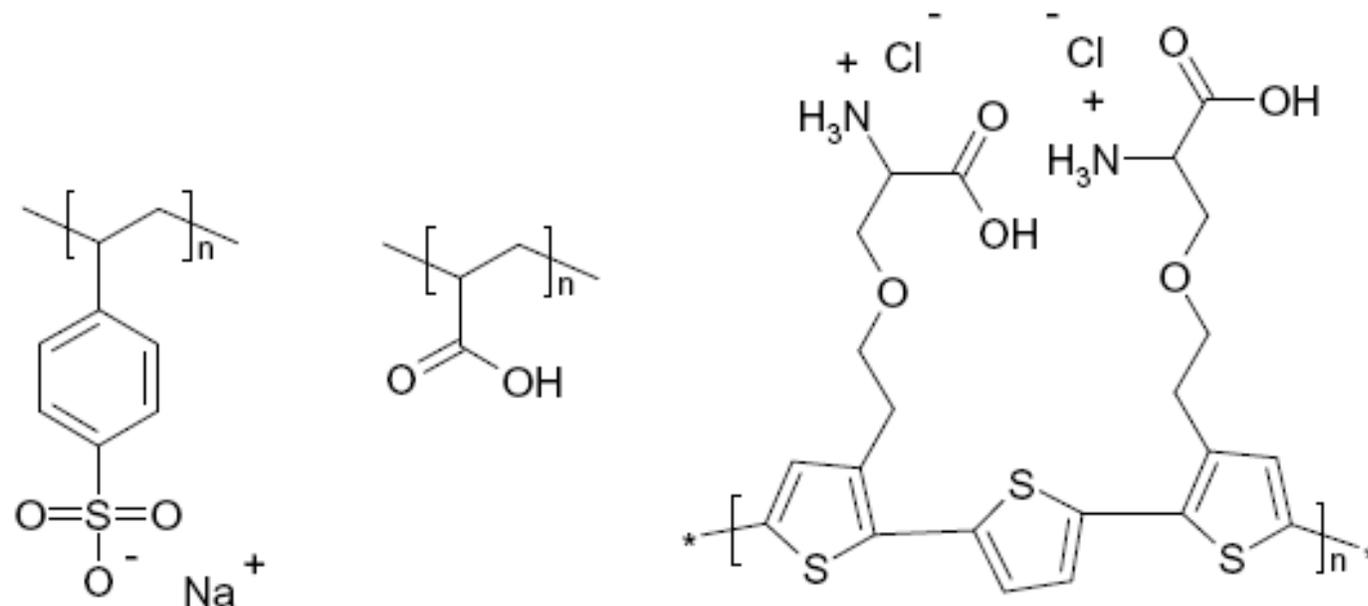
A estabilização estérica é obtida pelo anexação de longas cadeias poliméricas nas partículas coloidais. Então, quando as partículas se aproximarem uma das outras (por exemplo devido ao movimento Browniano), a interpenetração é limitada pela cadeia polimérica ocasionando em uma repulsão efetiva.

Vantagens:

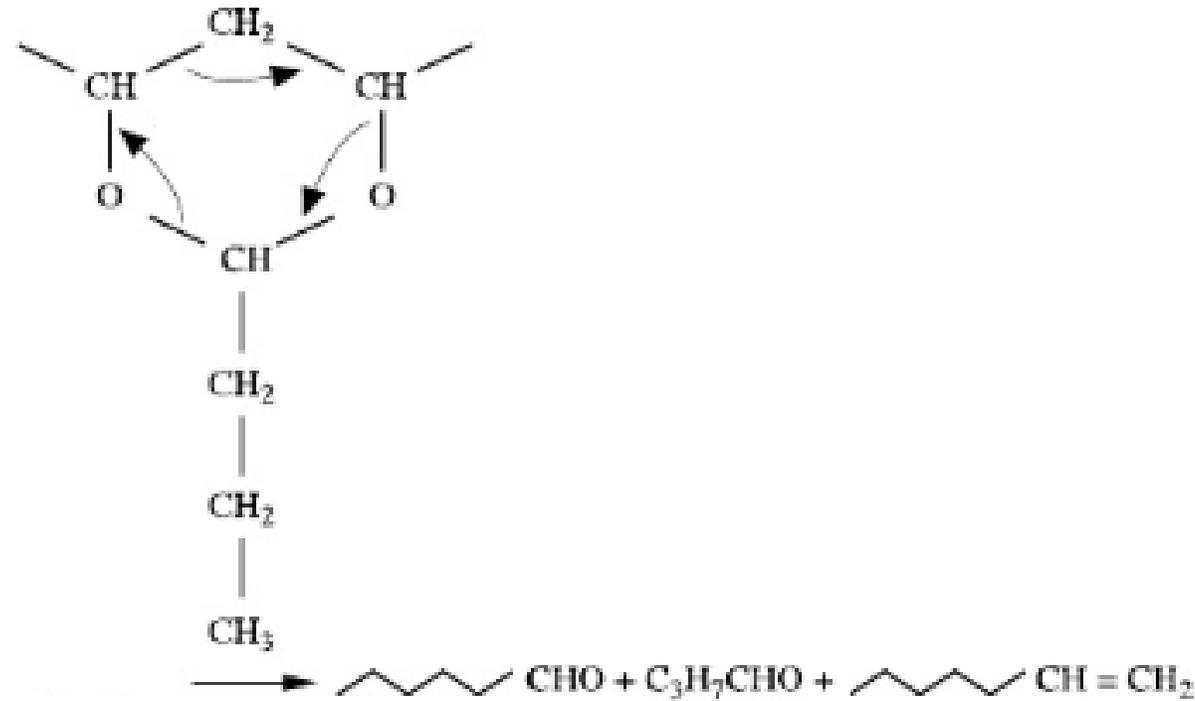
- a) A repulsão inter-partícula não depende da concentração de eletrólito;
- b) Efetivo em ambos meio aquoso e não-aquoso;
- c) Efetivo sobre uma larga faixa de concentração coloidal, contudo é mais efetiva em baixas concentrações.

# Defloculantes

Poly-eletrólitos: poliacrilato de amônio

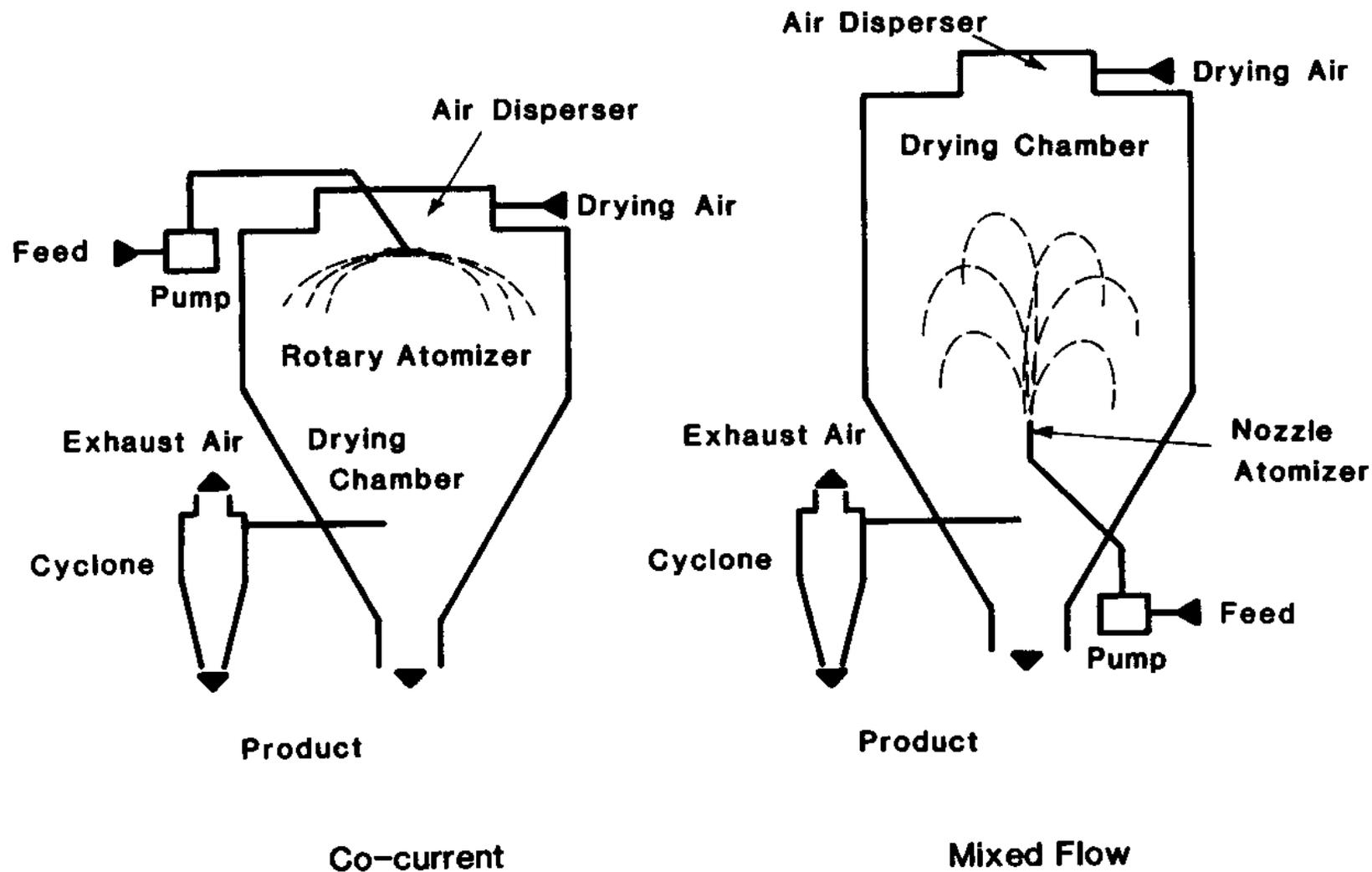


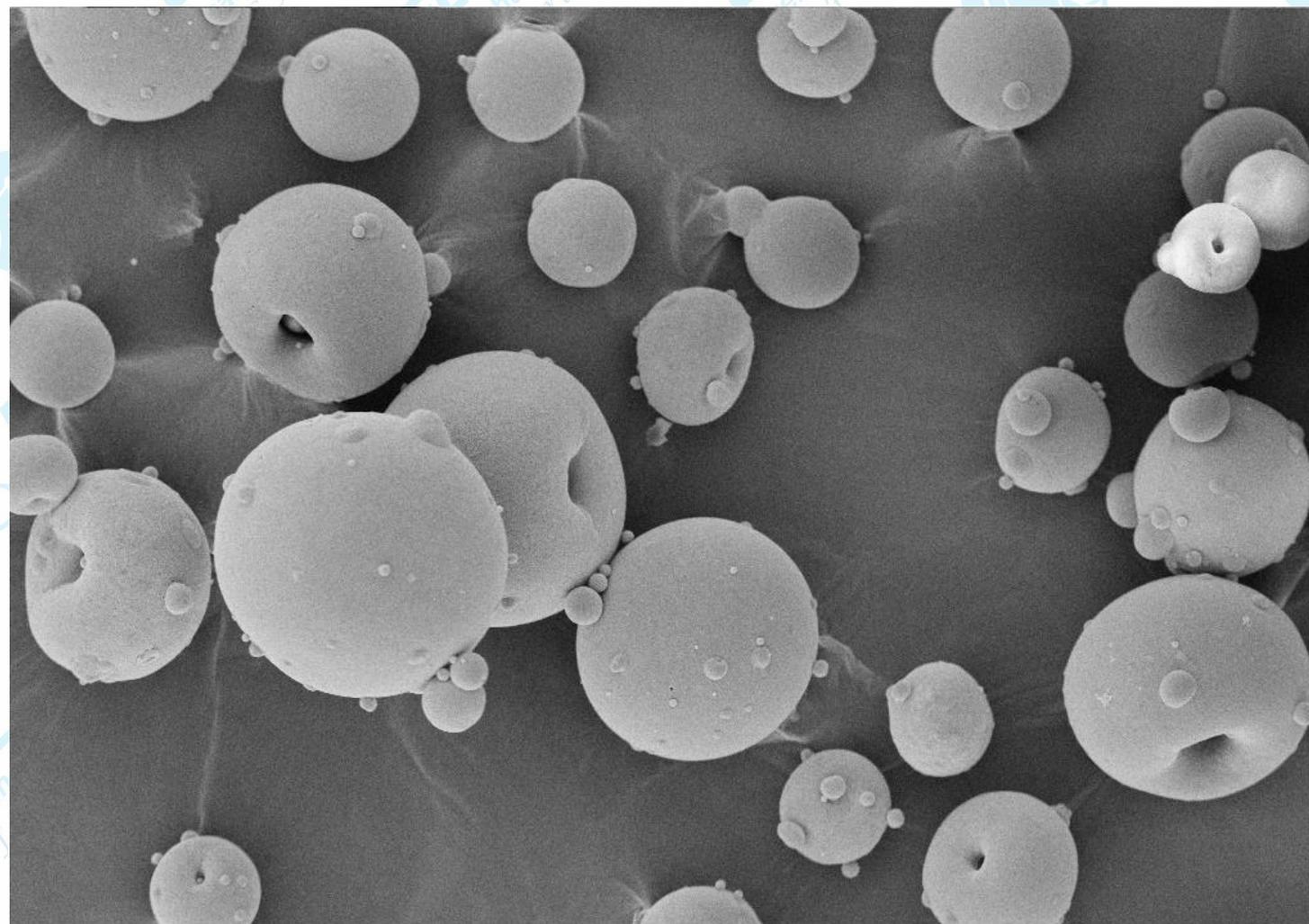
# Ligantes



**Figure 5.39.** Example of the rupture of vinyl polyvinyl butyral chains (PVB) during debinding [BAK 83]

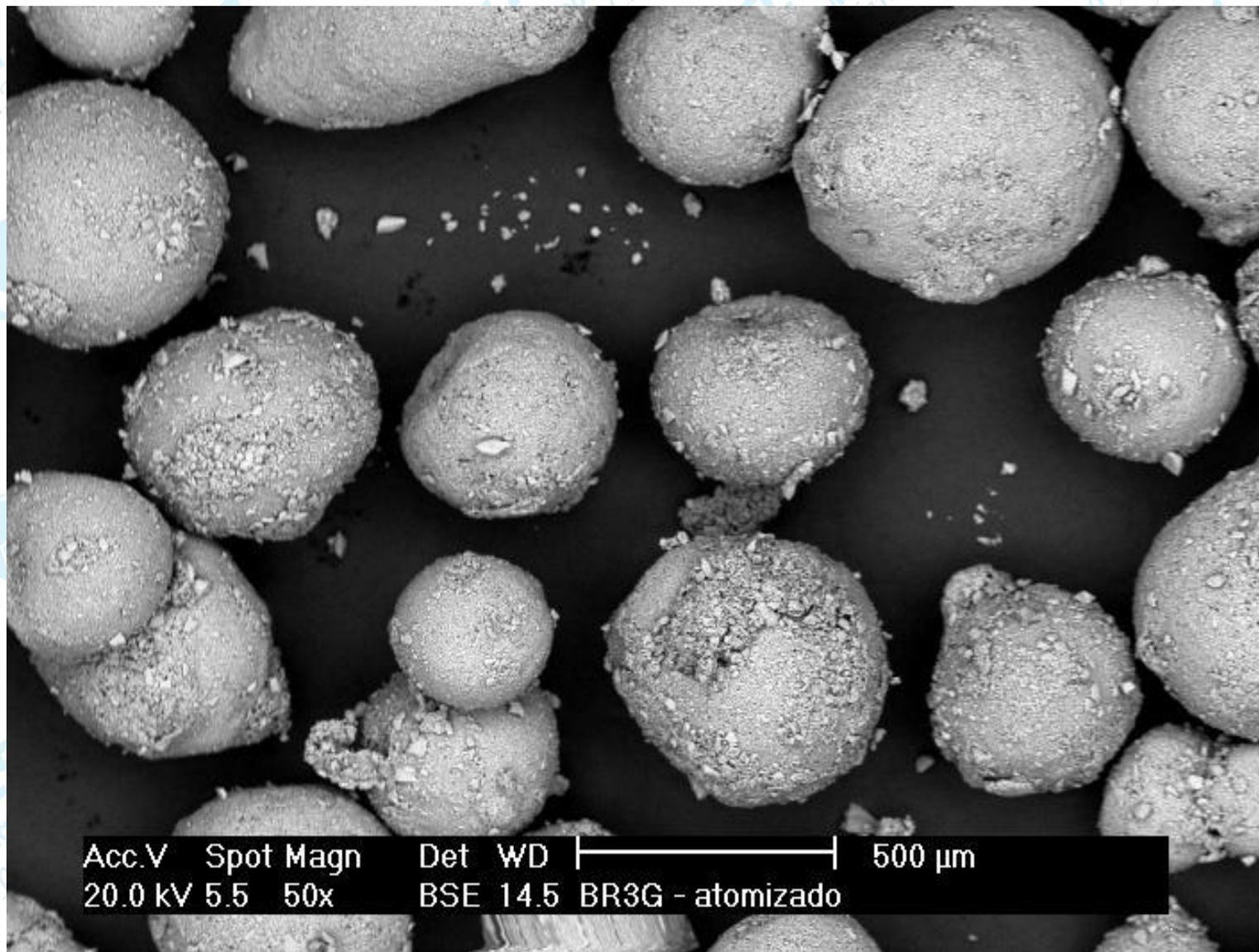
# Secagem e aglomeração



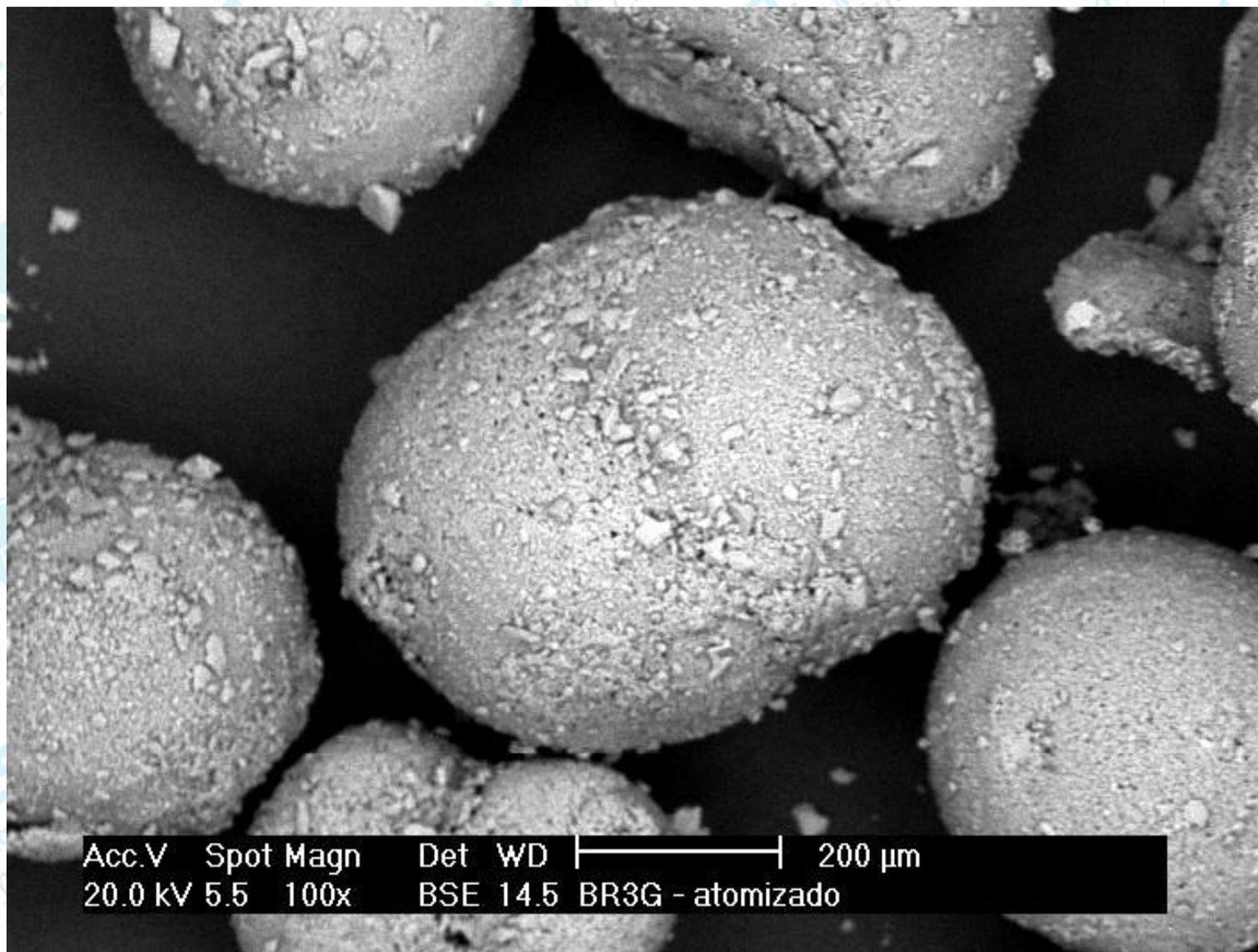


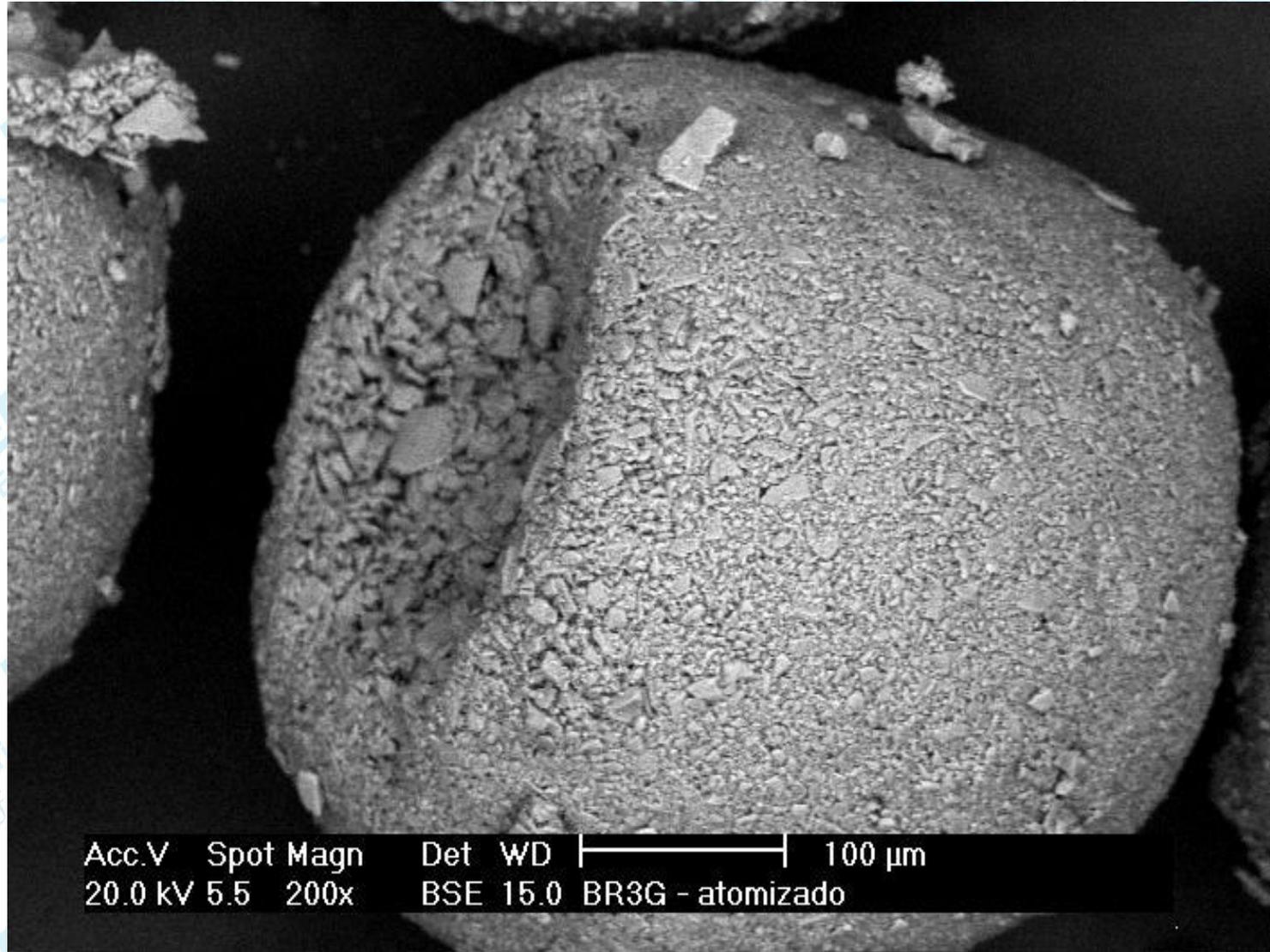
IQSC EHT=20.00 kV WD= 12 mm Mag= 350 X Detector= SE1  
30µm | Photo No.=39 26-Aug-2008

Grânulos no *Spray Drier* de pó de Alumina 0,5µm (autor)



Pó spray – Vidro BR3G





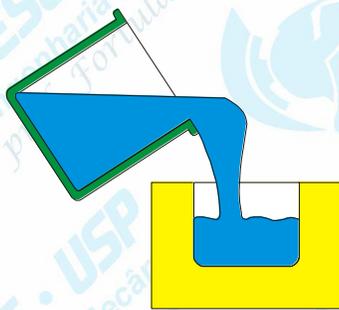
# Conformação

- ✓ conformação coloidal;
- ✓ prensagem;
- ✓ moldagem plástica.

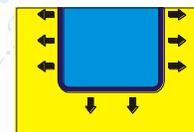
# Conformação coloidal

- ✓ colagem de barbotina
  - drain casting,
  - solid casting,
  - vacuum casting,
  - pressure casting,
  - centrifugal casting,
  - fugitive-mold casting,
  - gel casting,
  - electrophoretic deposition,...
  
- ✓ tape casting
  - doctor blade;
  - waterfall

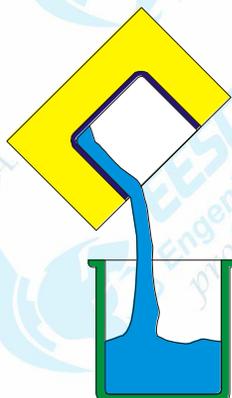
# Colagem de barbotina



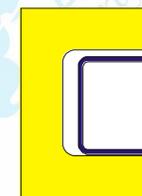
a) Preenchimento do molde com a barbotina.



b) Molde absorvendo a fase líquida, formando o compacto

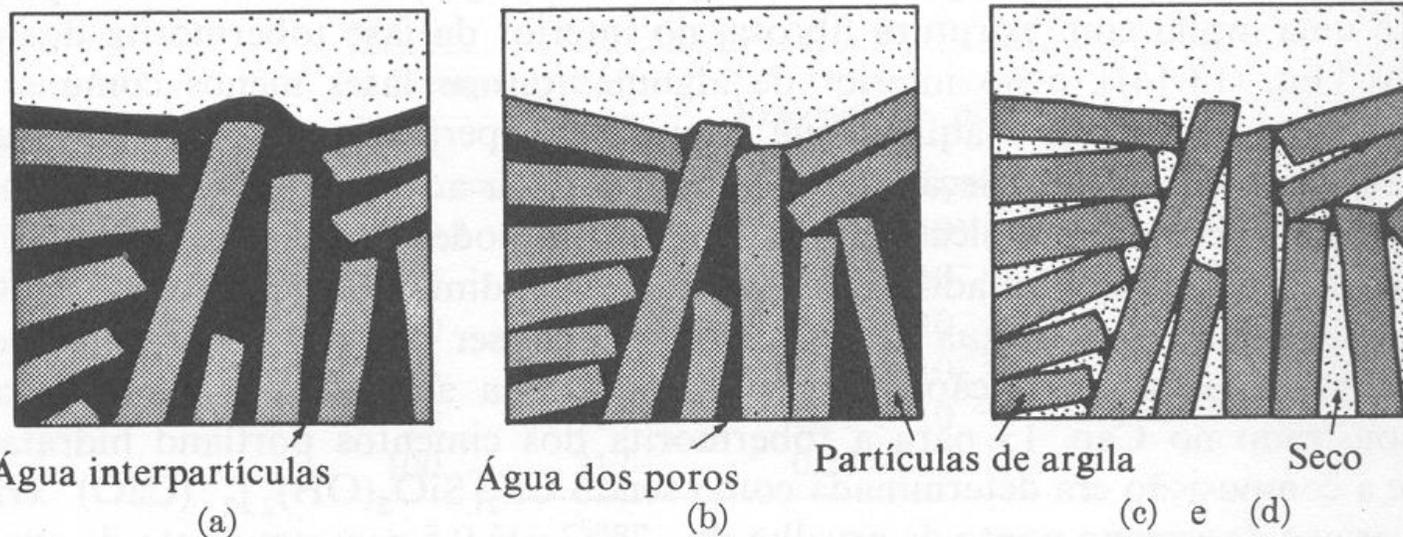


c) Drenagem do excesso de barbotina



d) Remoção da peça após secagem parcial.

# Secagem e aglomeração



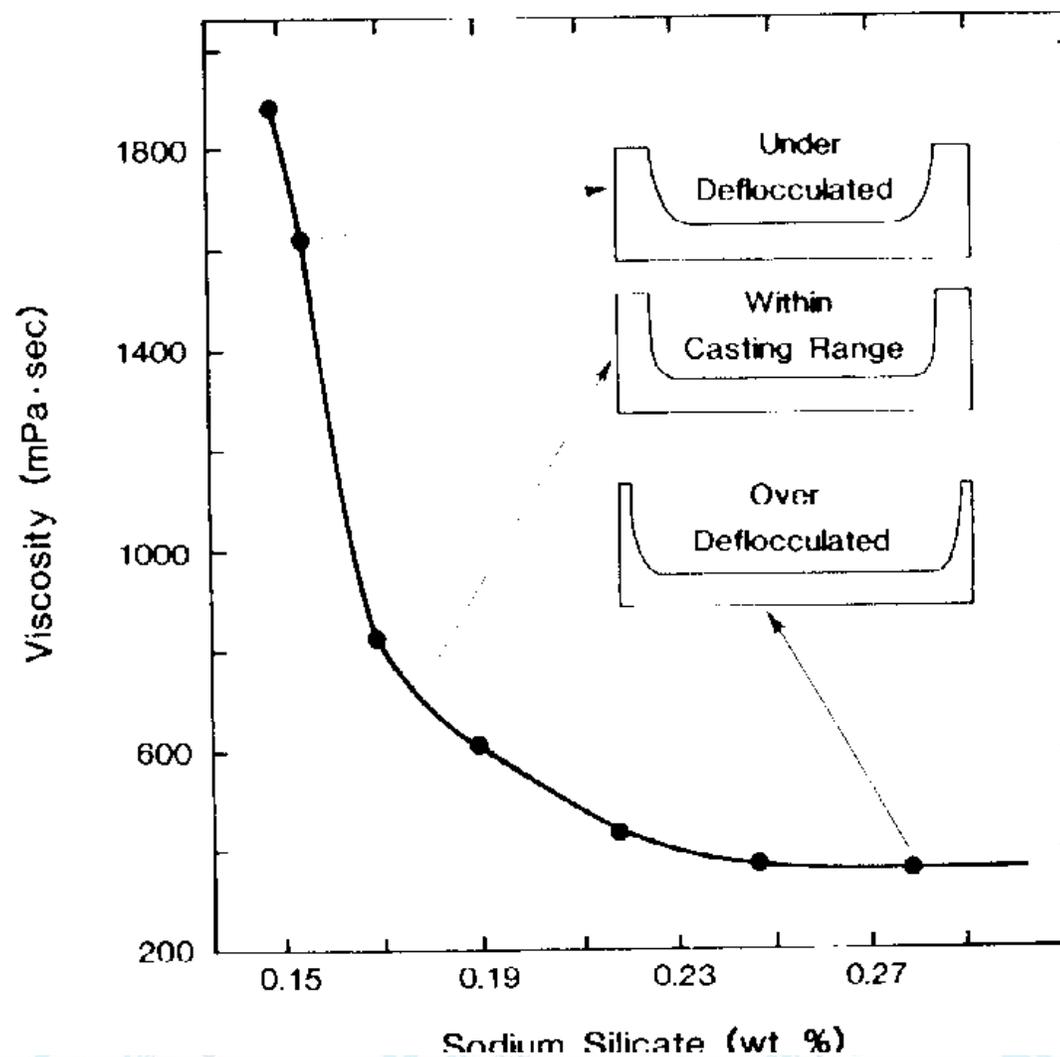
## ✓ Retração de secagem

- deformações;
- gradiente de tensões

# Colagem de barbotina



# Defloculação



Reed, 1995

**Ex. 9.6.** Comparando uma caneca de louça comum com uma fina porcelana chinesa, saltam aos olhos duas diferenças: a espessura e a porosidade das duas, ambas bem maiores na caneca. Assinale a alternativa que descreve o que se deve depreender desta observação.

(A) O tempo de colagem da porcelana chinesa é muito menor do que o da caneca, e a granulometria das partículas dispersas na barbotina é muito mais fina, levando a uma porosidade muito menor.

(B) A granulometria das partículas da caneca é muito mais fina, fazendo com que o tempo de colagem e a porosidade final sejam muito menores do que no caso da louça chinesa.

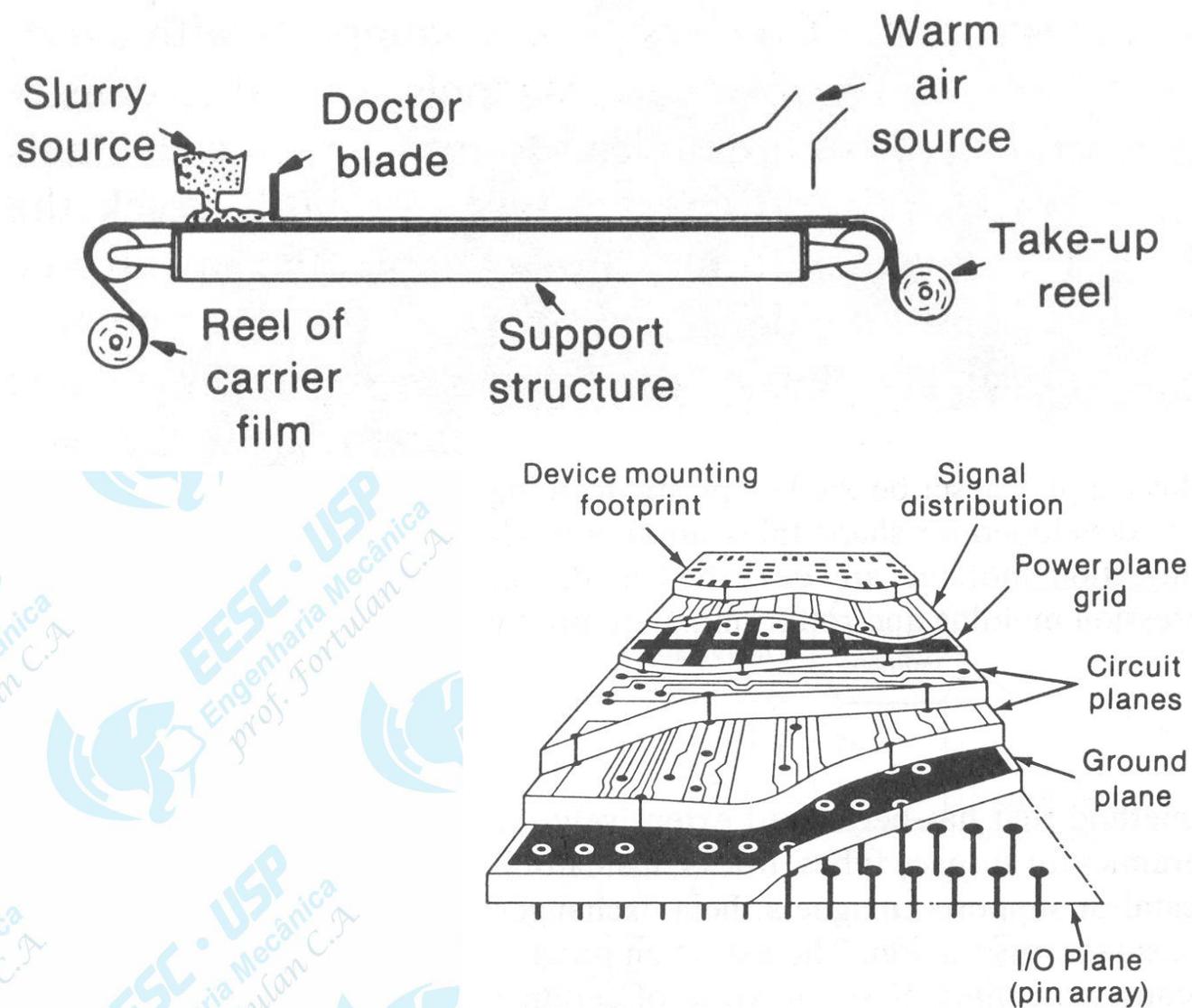
(C) A granulometria das partículas da barbotina da porcelana chinesa é muito maior, assim como o tempo de colagem, o que leva a uma porosidade muito maior do que a da caneca.

(D) A caneca precisa de um tempo de colagem muito maior (dificultando o controle da espessura) do que a porcelana devido à exigência de alta produtividade no processo de fabricação.

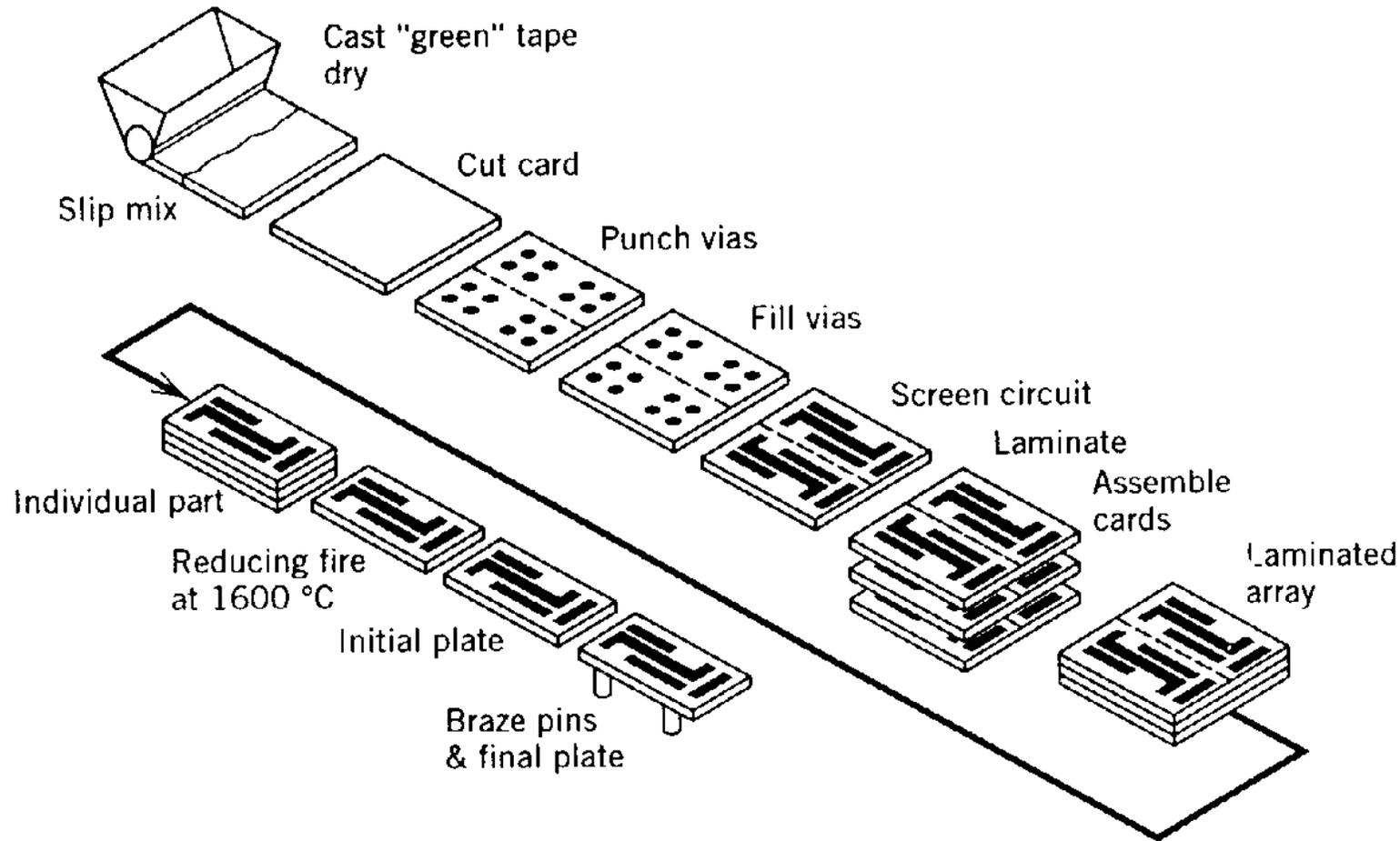
(E) A caneca tem um tempo de colagem muito menor (dificultando o controle da espessura) e a granulometria das partículas da barbotina muito mais grosseira, levando à porosidade maior observada.

CTA - Tecnologista Pleno (Materiais). 2013

# Tape casting



# Multilayers

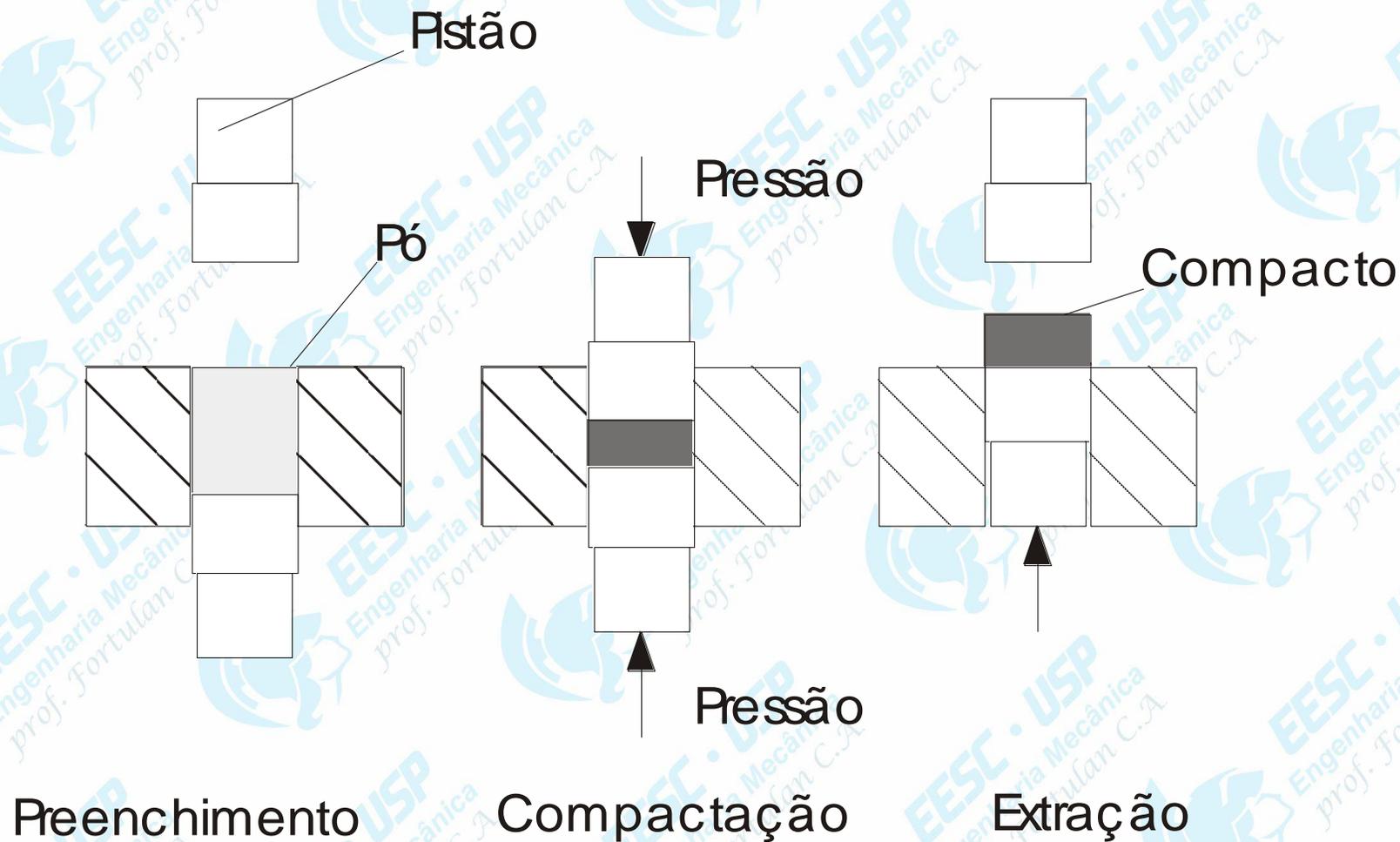


Reed, 1995

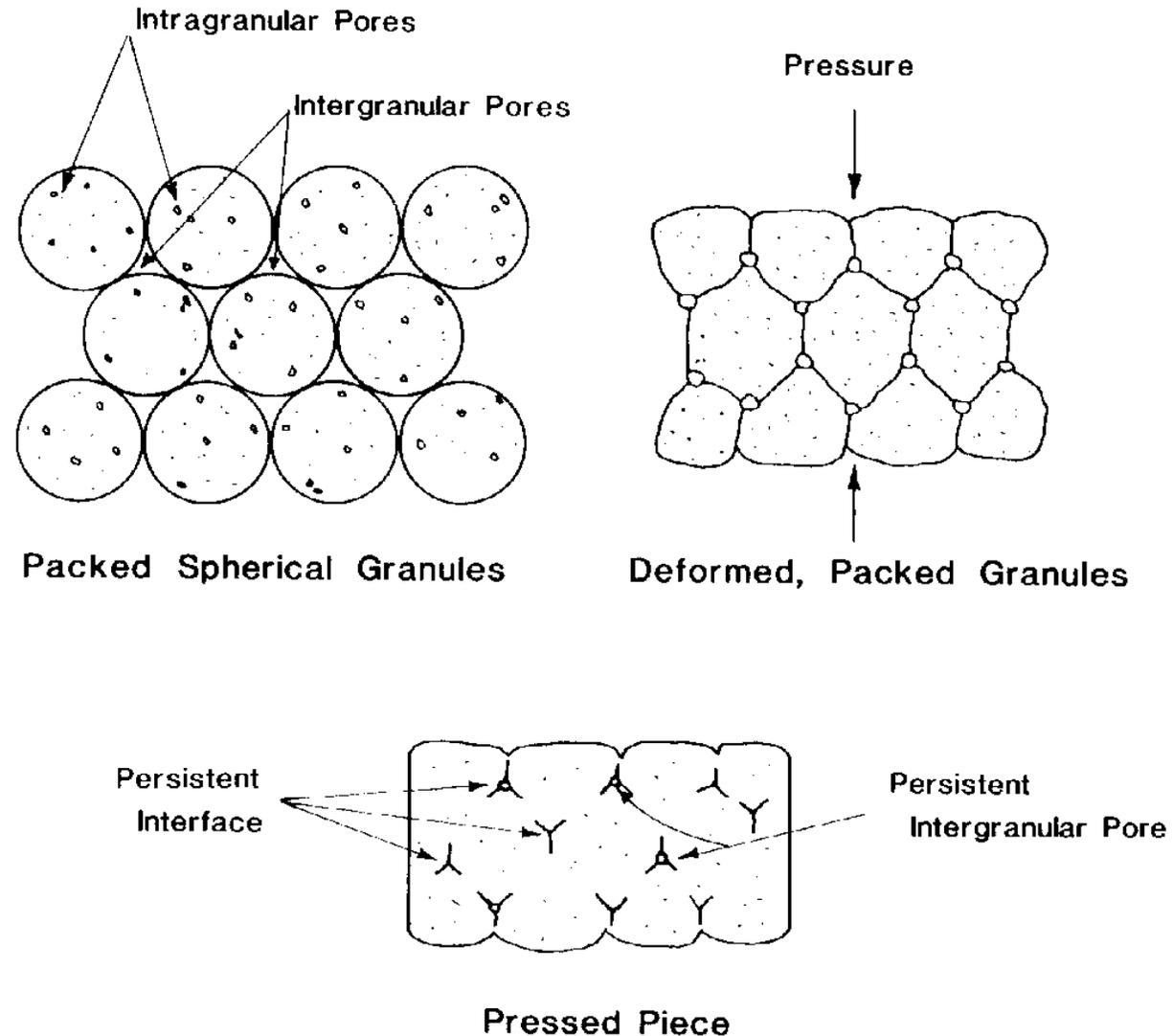
# Prensagem

- ✓ Prensagem uniaxial;
  - Dupla ação;
  - Simples ação;
  - Prensagem a quente;
- ✓ Prensagem isostática;
  - Wet bag;
  - Dry bag
- ✓ Prensagem isostática a quente

# Prensagem uniaxial

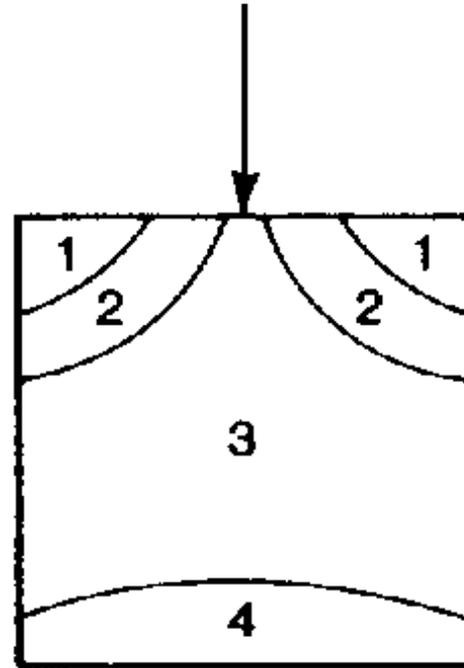


# Prensagem e porosidade: esquema

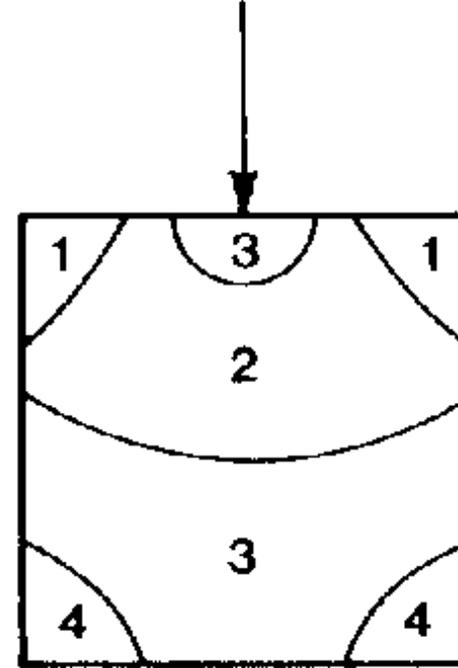


[Reed, 1995:428]

# Perfis de pressão e densidade



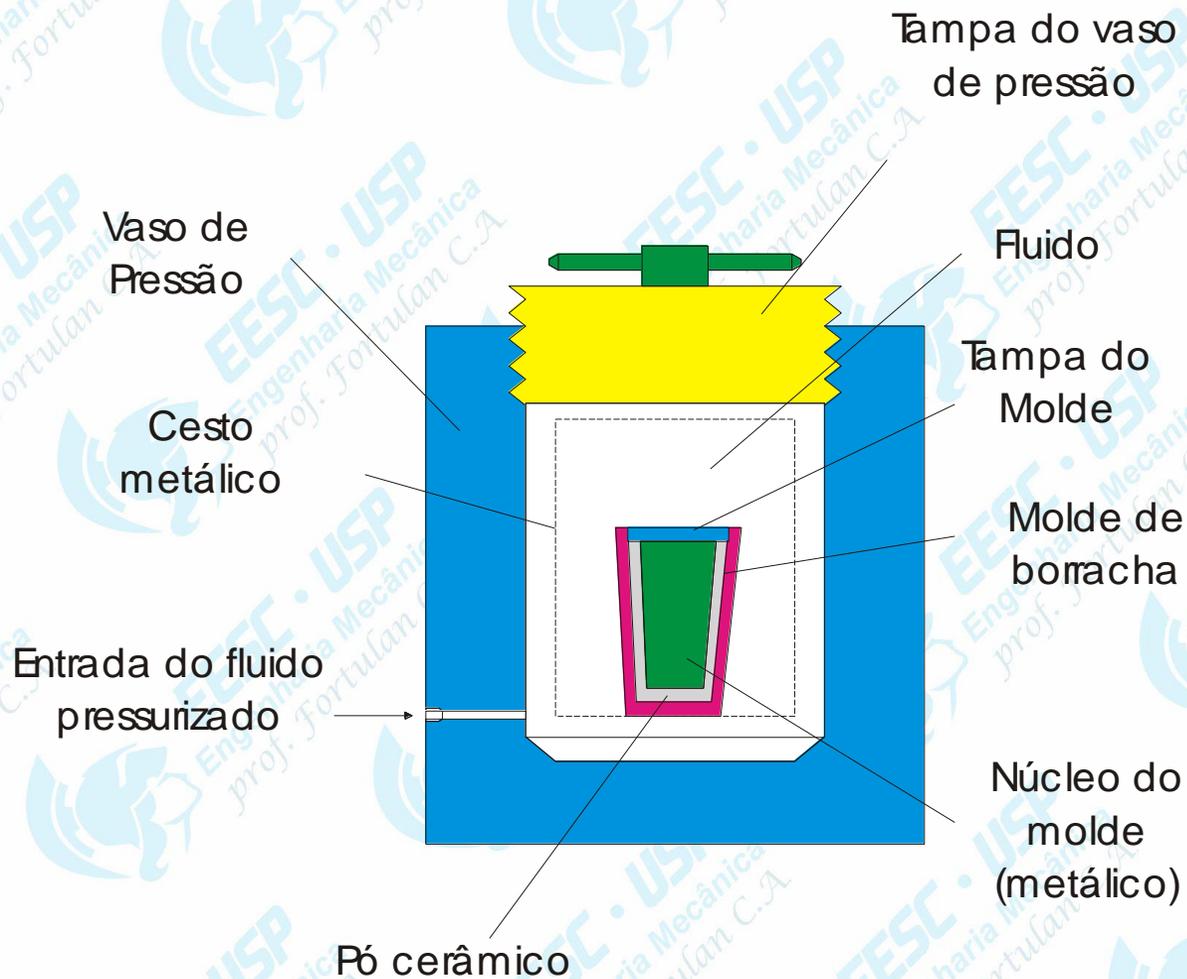
Begin Stage II



End Stage II

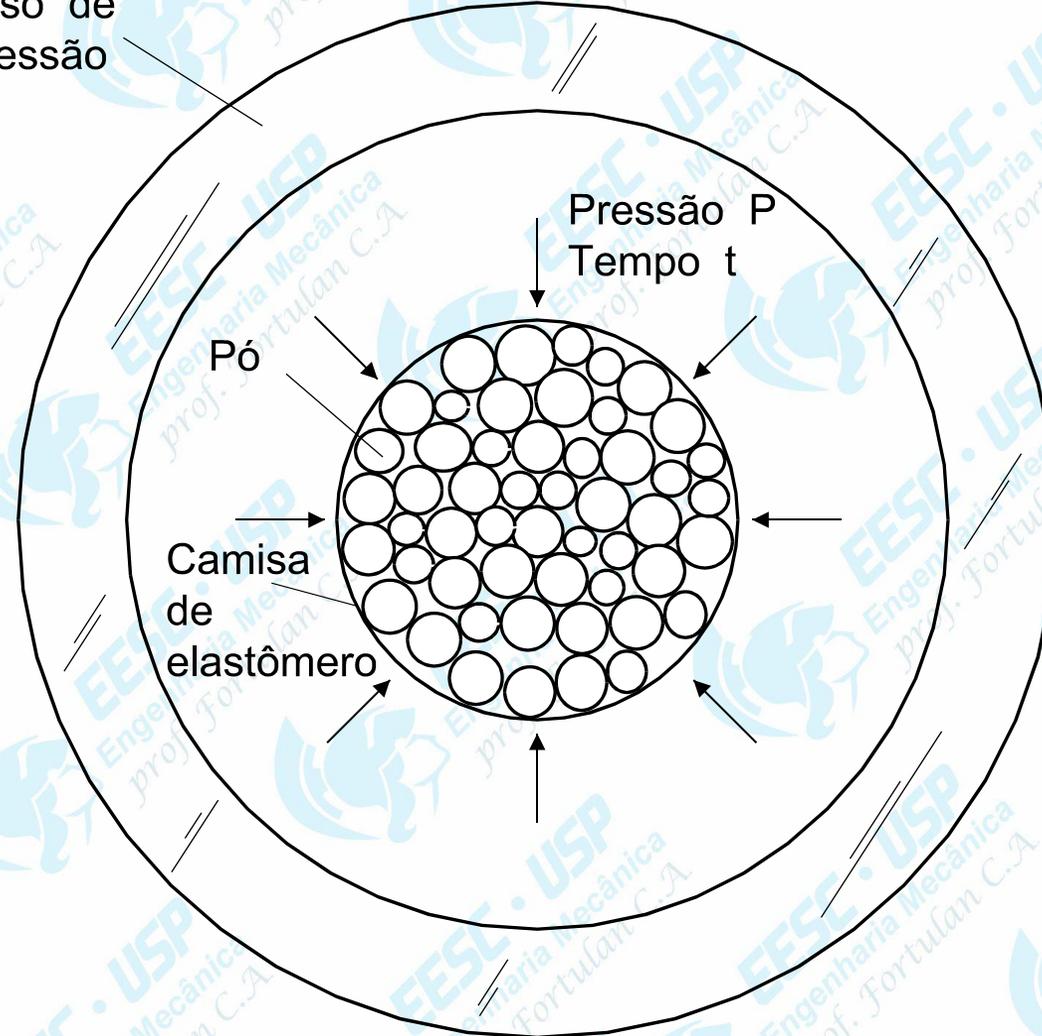
[Reed, 1995:428]

# Prensagem isostática – wet bag

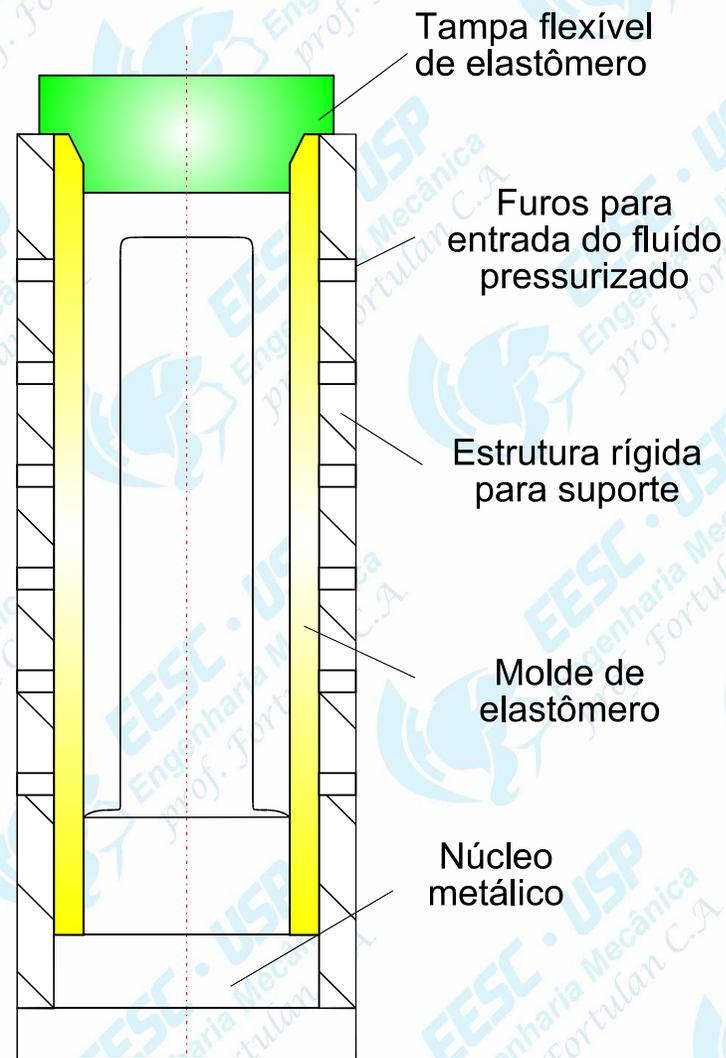


# Prensagem isostática

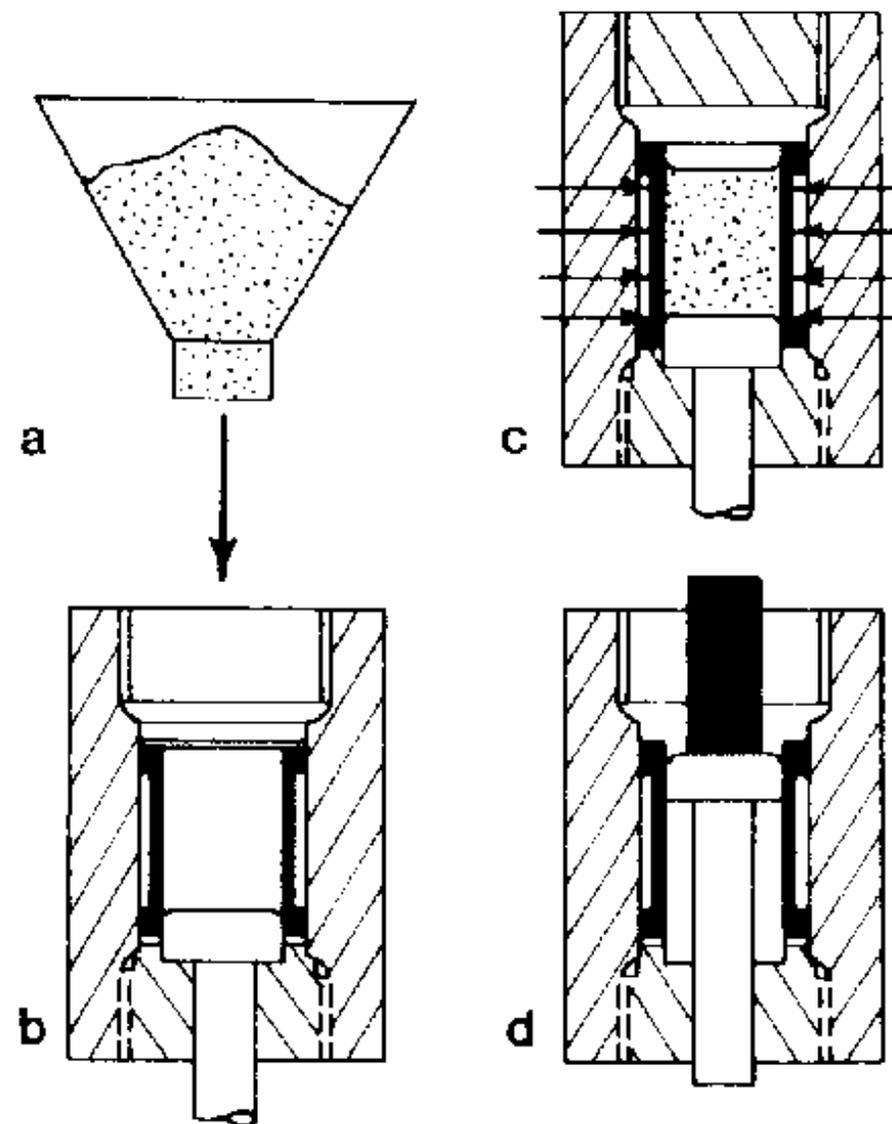
Vaso de pressão

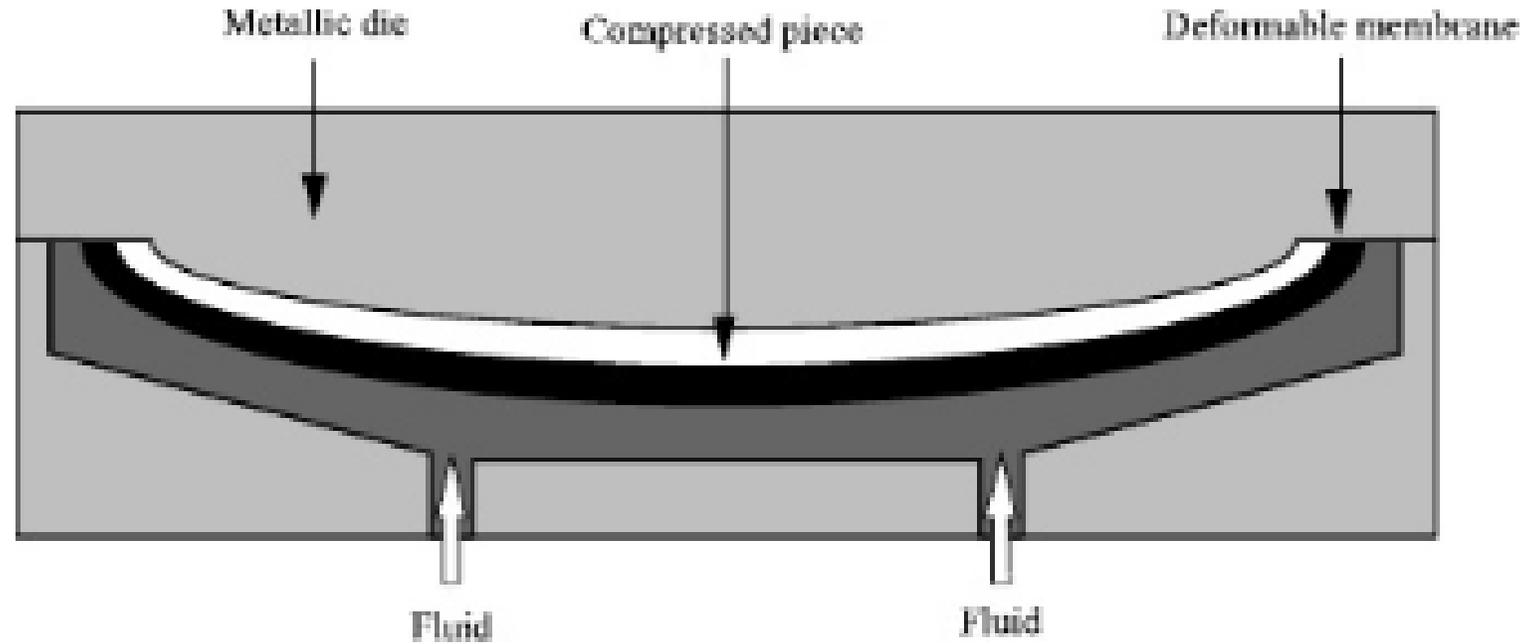


# Molde isostático de tubo

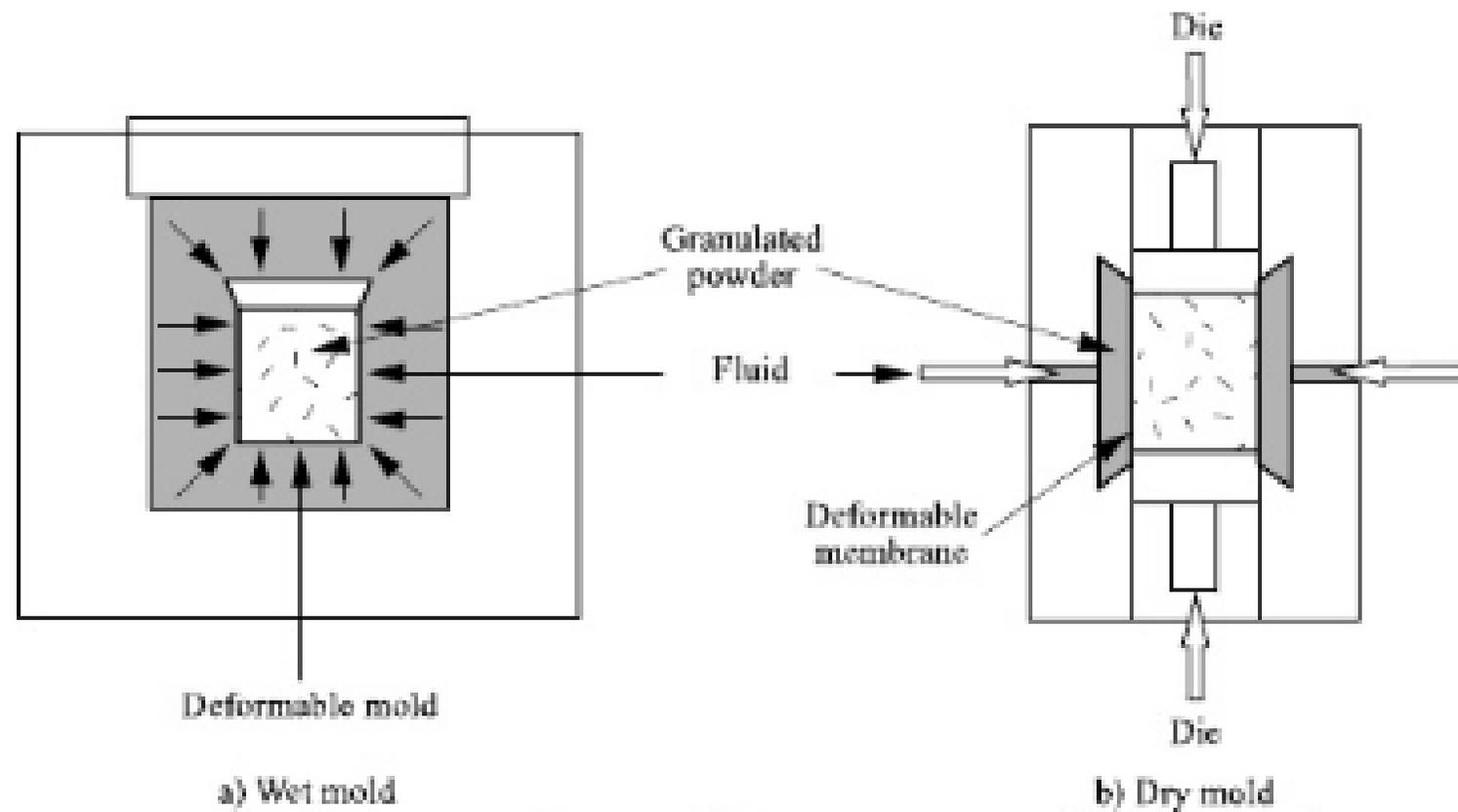


# Prensagem Isostática: *DRY BAG*





**Figure 5.29. Principle of semi-isostatic pressing**



**Figure 5.28. Principles of isostatic pressing: a) wet mold, b) dry mold**

# Moldagem plástica

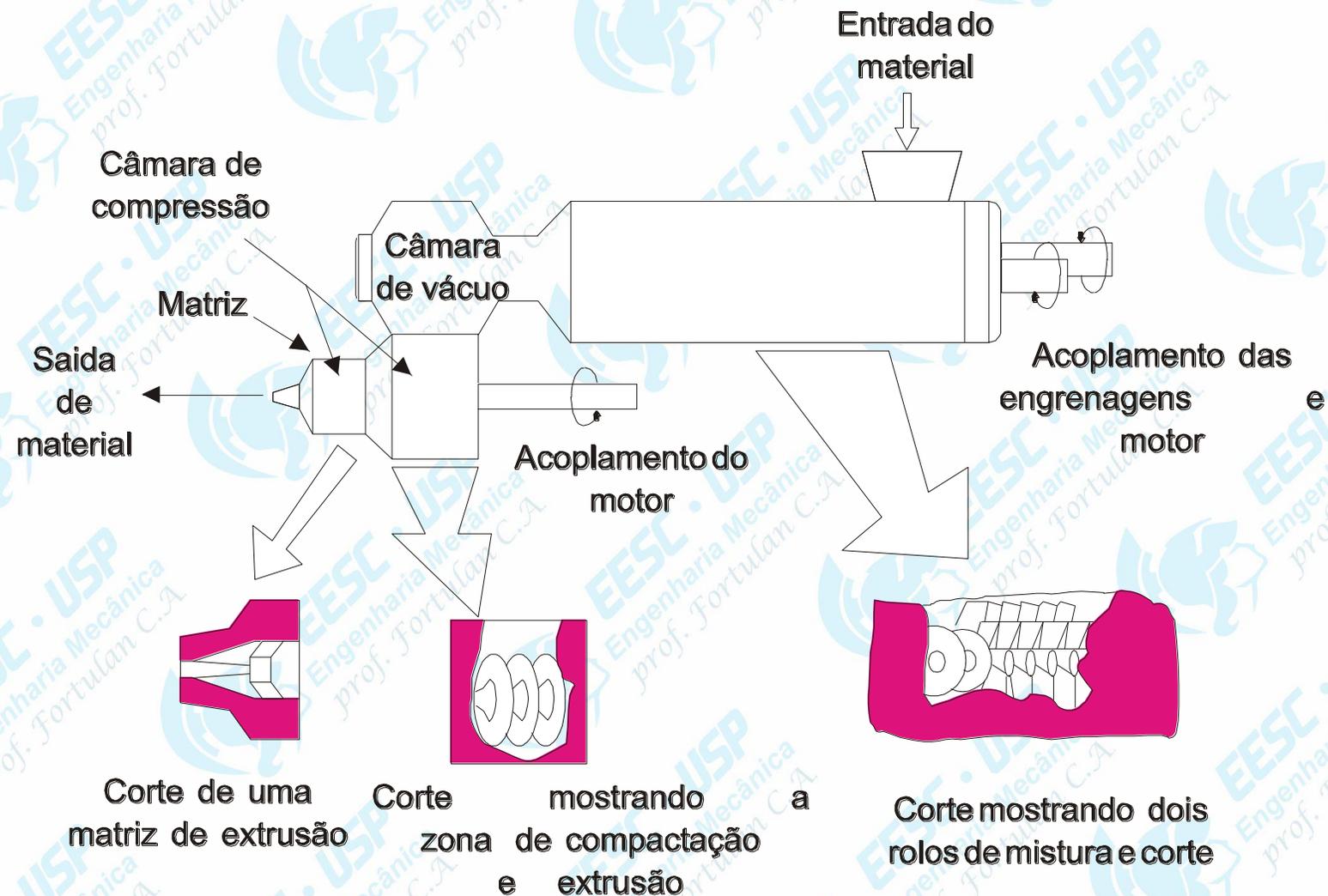
Este processo inclui a extrusão, a injeção e a compressão.

Neles é necessária uma quantidade de veículo orgânico na ordem de 25 a 50% para a obtenção de plasticidade. Em alguns casos pode-se aplicar calor simultaneamente com a pressão.

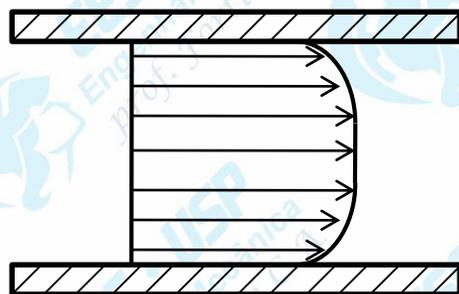
A maior dificuldade no processo de moldagem plástica é a remoção do material orgânico antes da queima.

O processo de extrusão é muito aplicado para fabricação de tijolos, tubos, tubos pirométricos, isoladores e outras formas alongadas com seção constante.

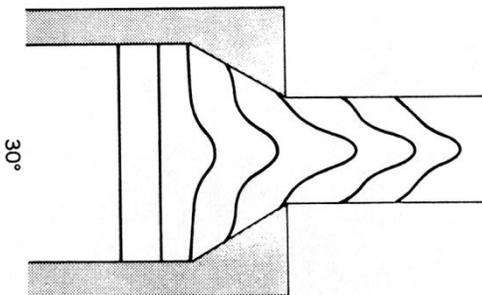
# Extrusão



# Características

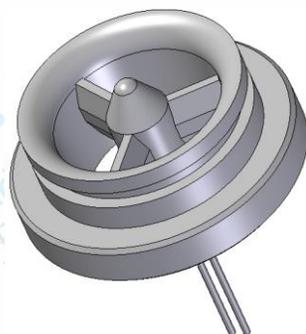


Diferencial de fluxo

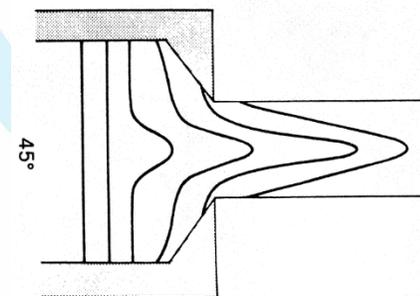


Perfil de velocidade

Recursos



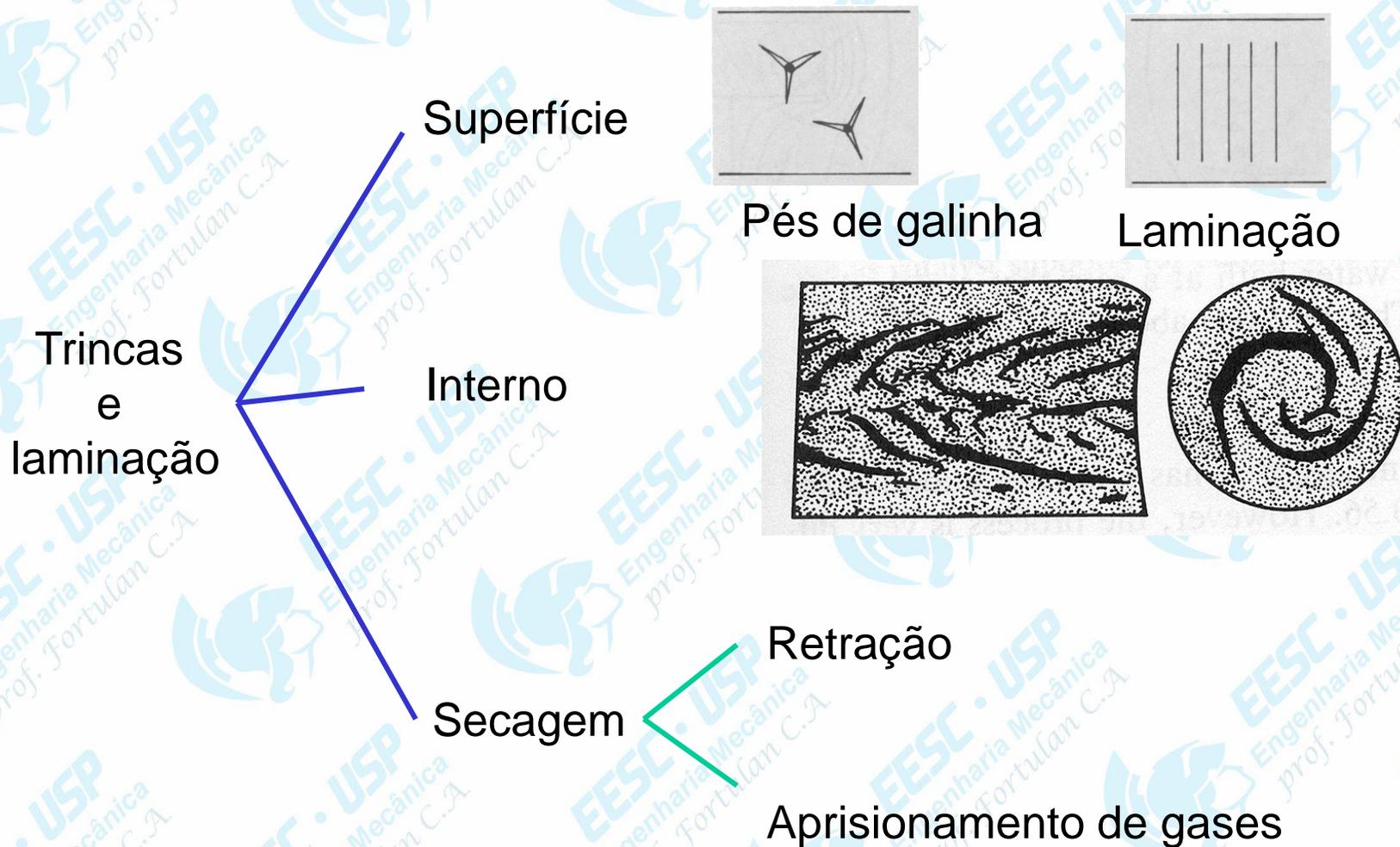
Spider - torpedo



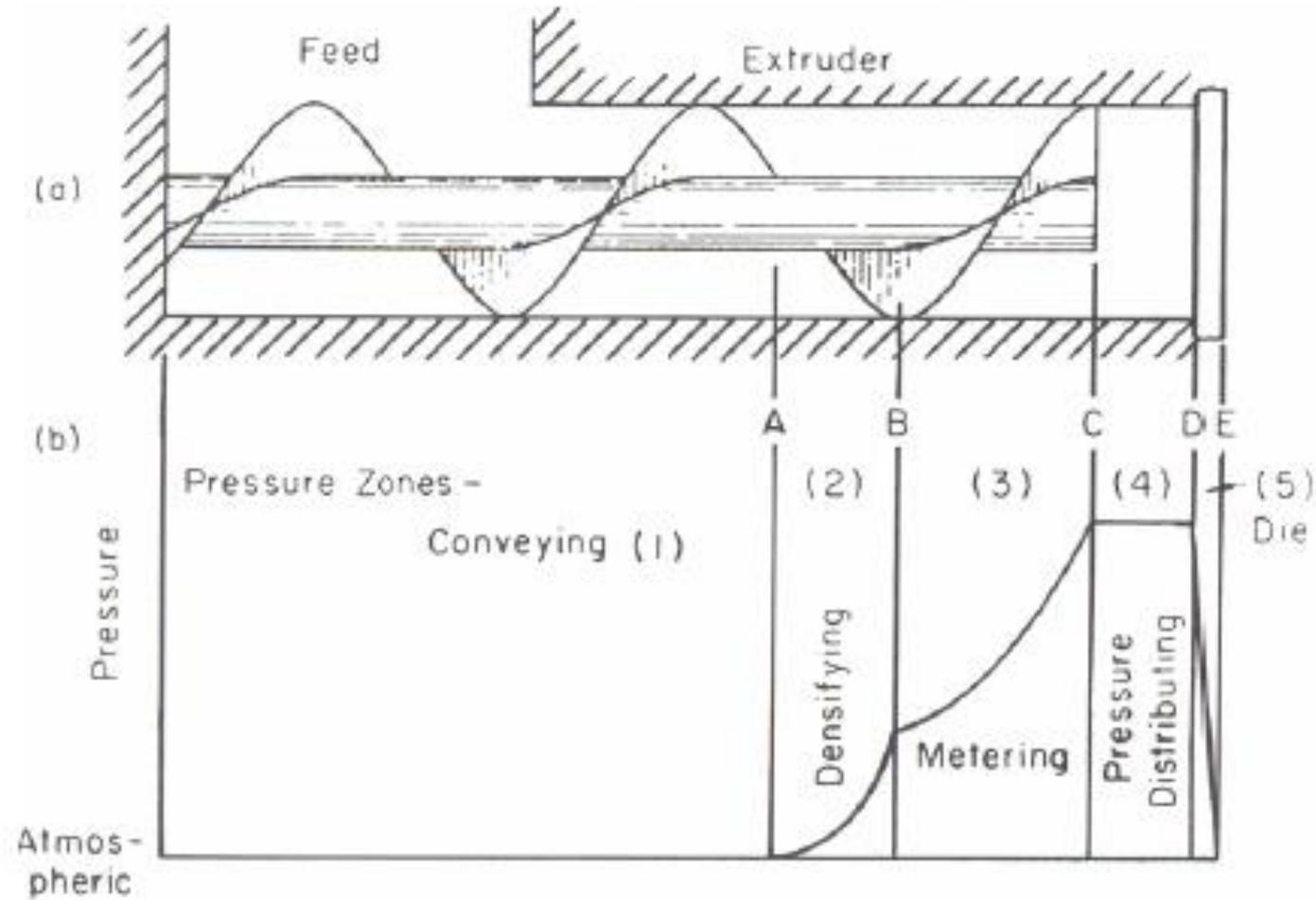
Ângulos de Matriz

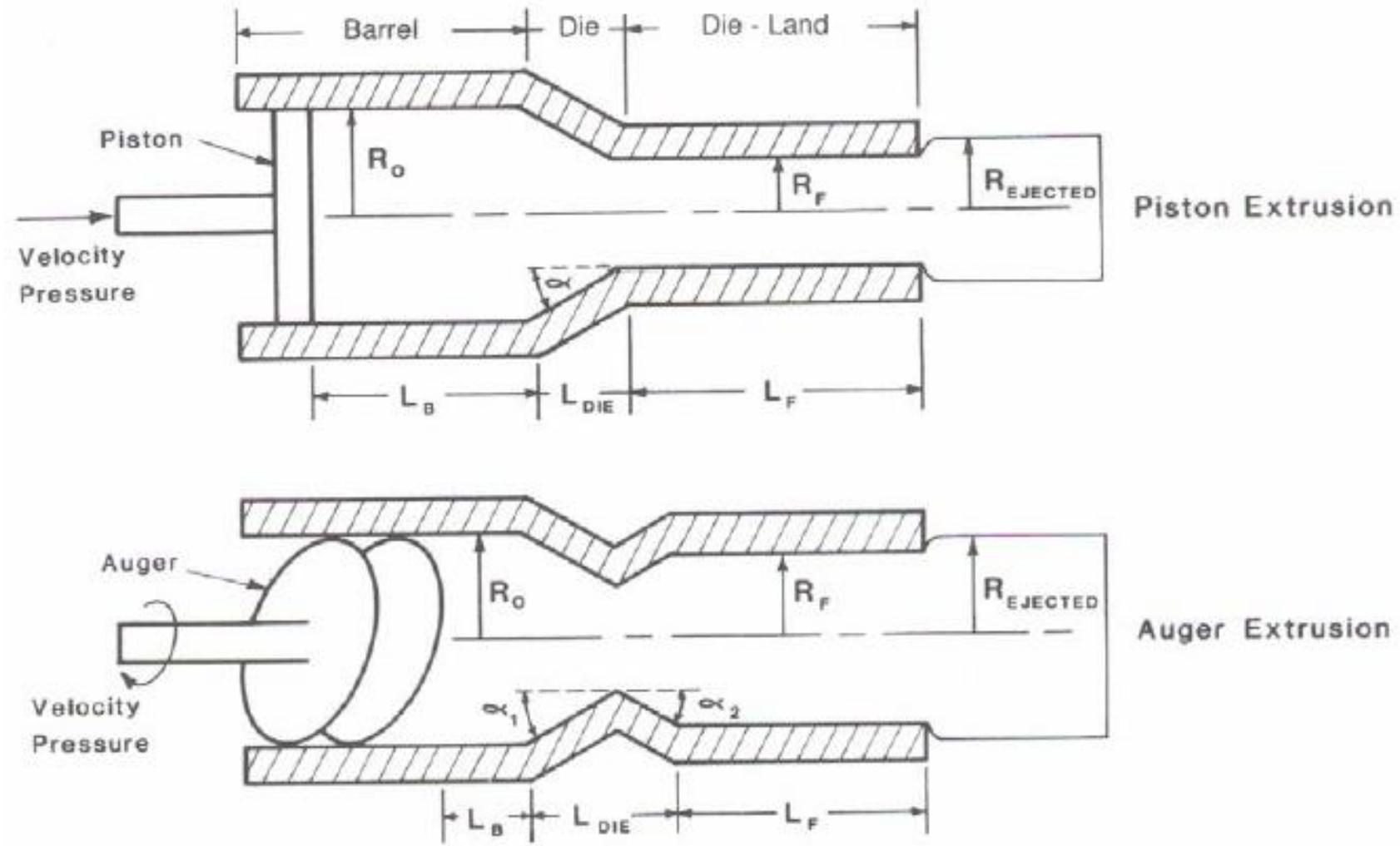
# Defeitos

Resistência e Rigidez insuficiente → rupturas e deformações

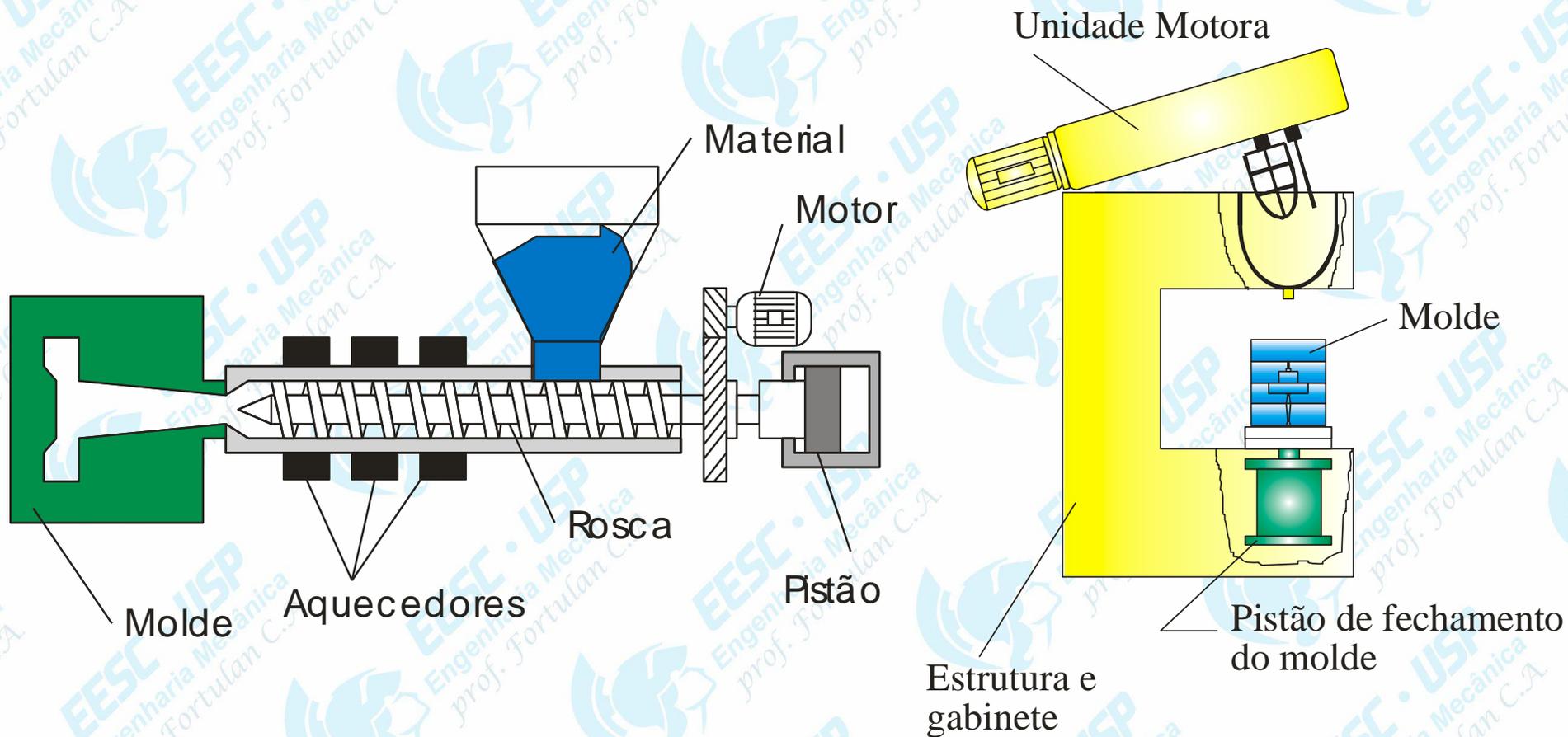


[Reed, 1995:467] [Richerson, 1992: 487]





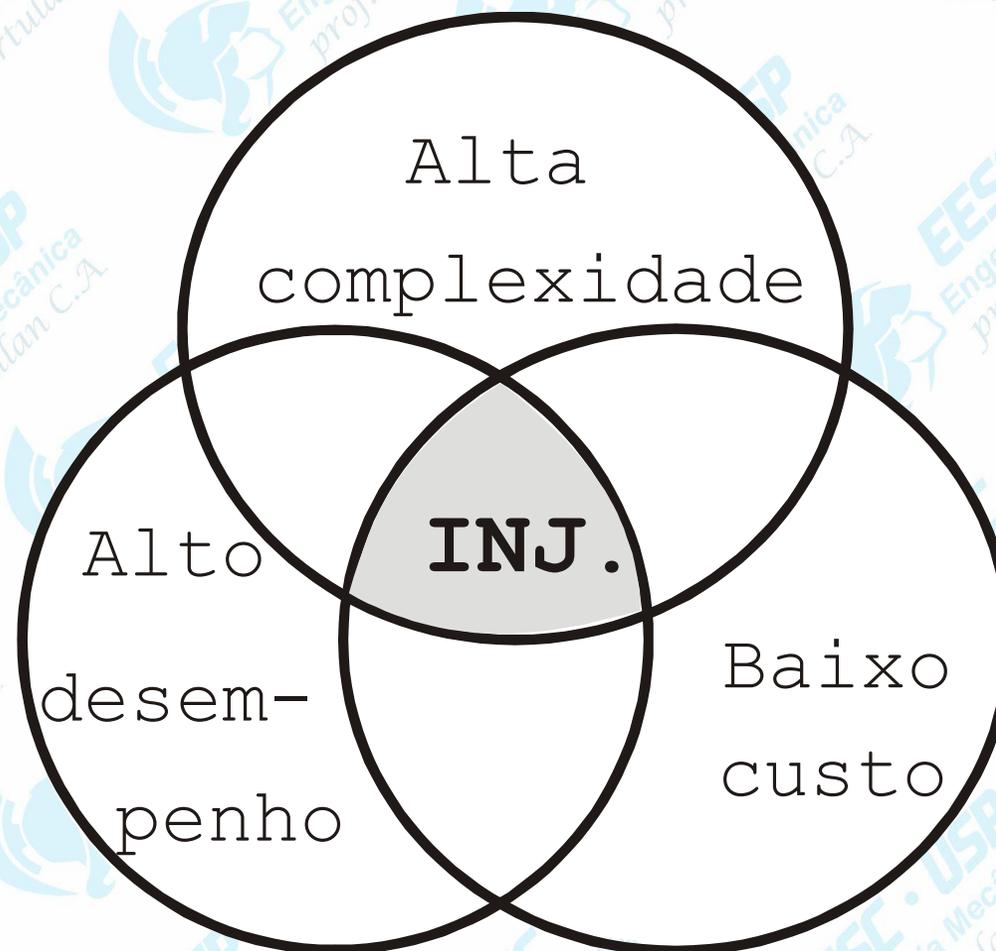
# Injeção cerâmica

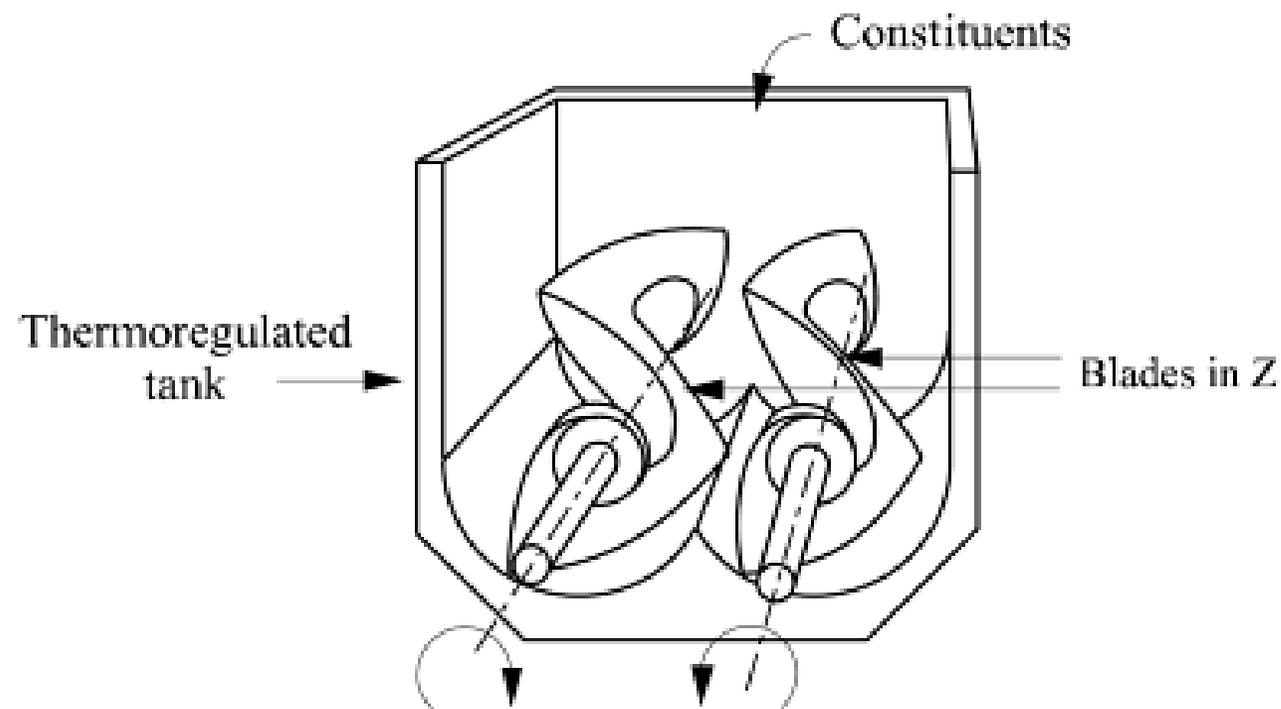


Alta pressão ~ 70MPa

Baixa pressão ~ 0,7MPa

# Injeção cerâmica - compromisso





# Usinagem a verde

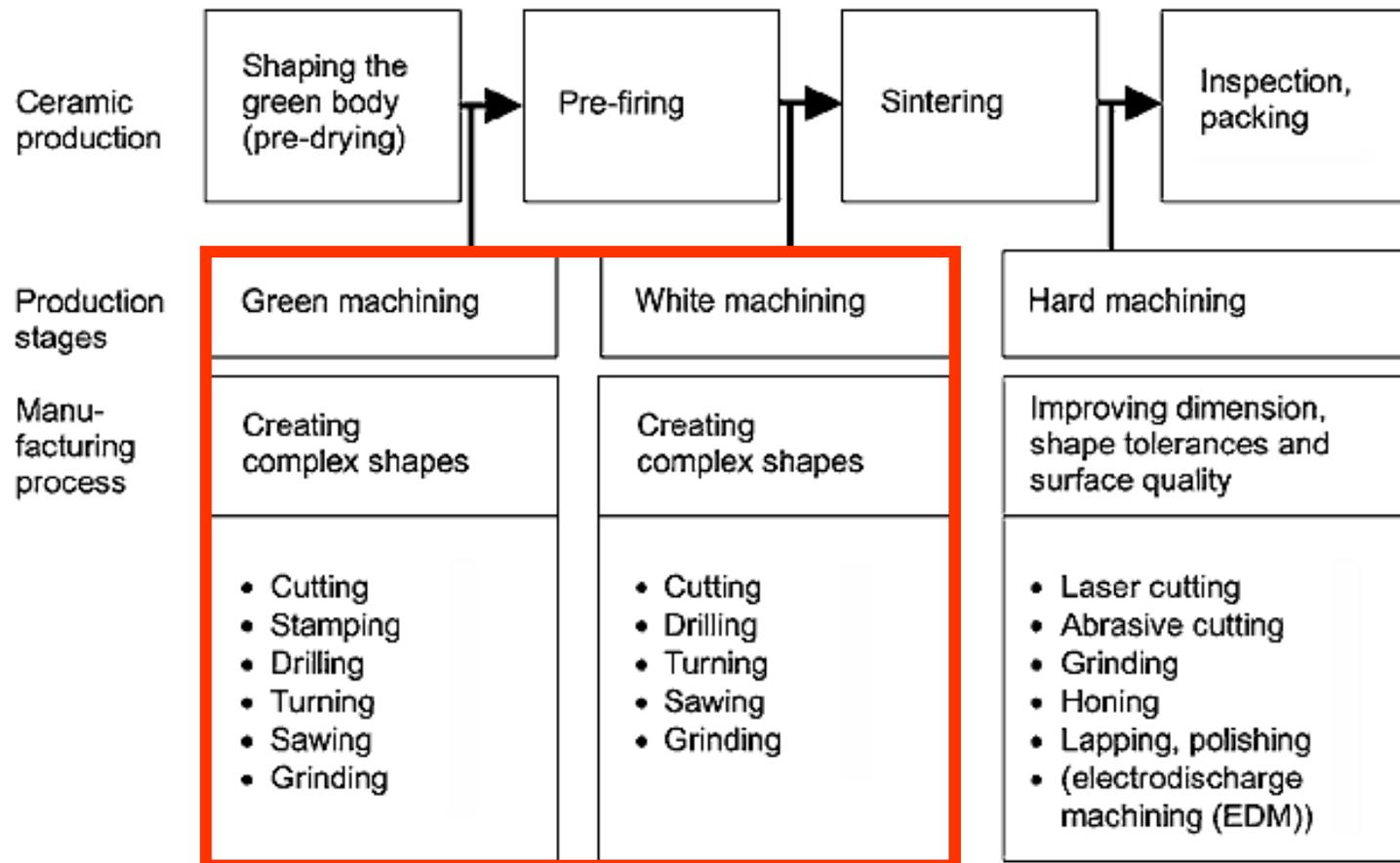
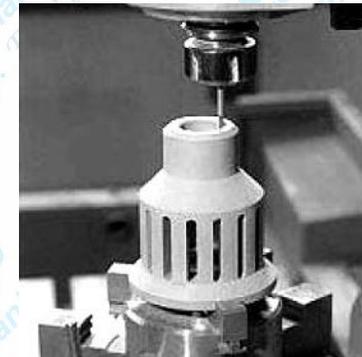


Figure 62: Classification of green, white and hard machining in the production process

# Usinagem a verde



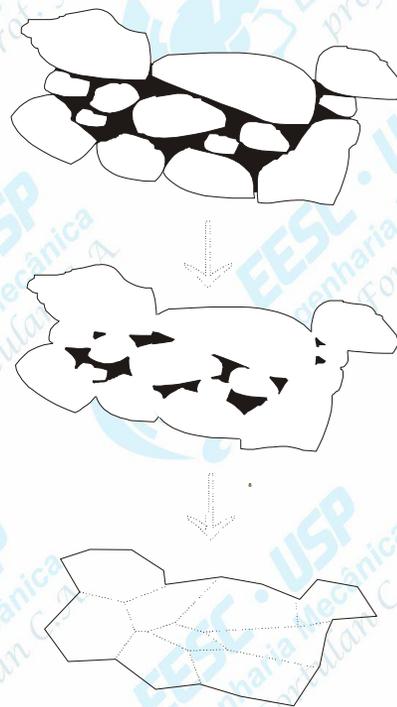
[http://www.keramverband.de/brevier\\_engl/4/1/4\\_1\\_6.htm](http://www.keramverband.de/brevier_engl/4/1/4_1_6.htm)

# Sinterização

# Sinterização (queima)



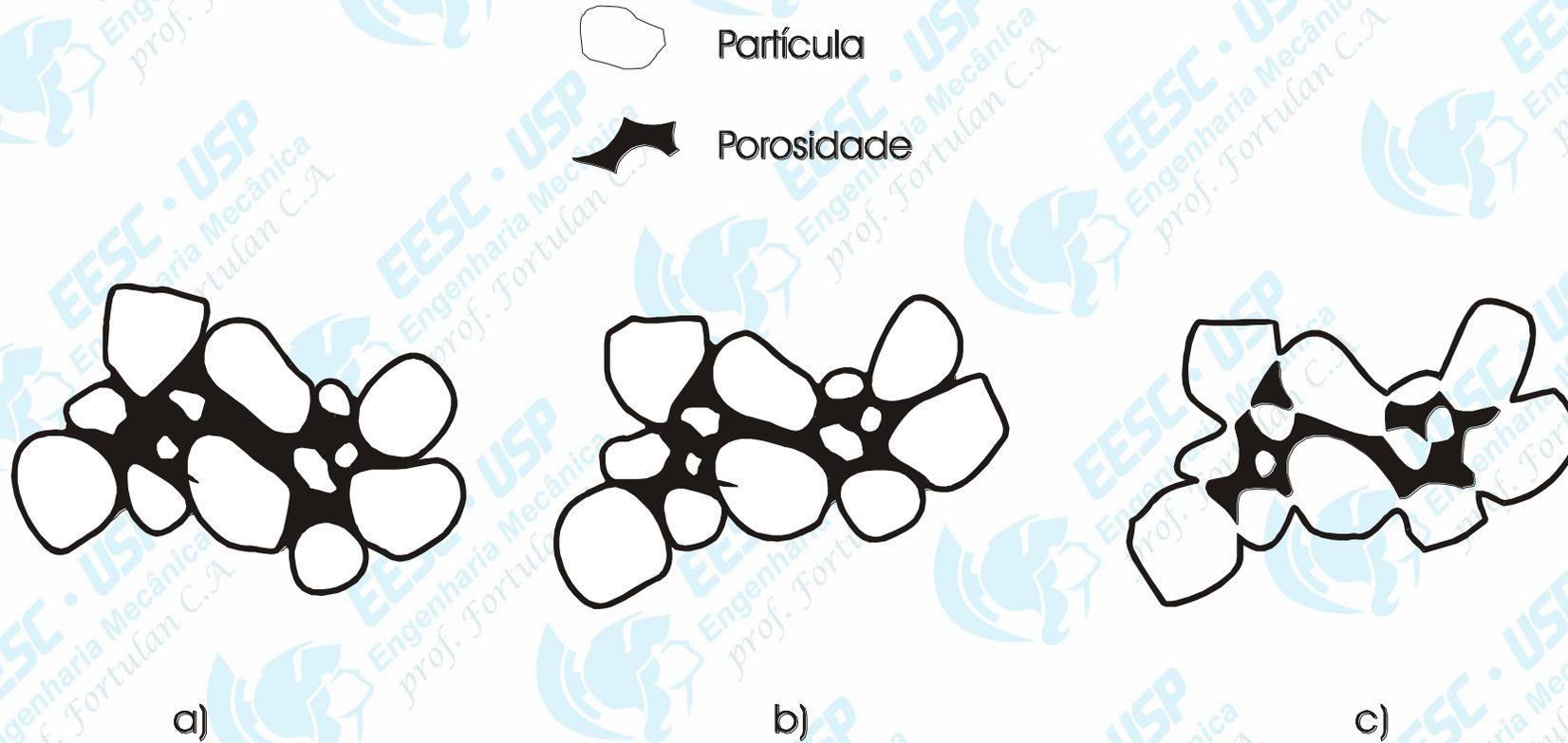
# Cerâmica - sinterização



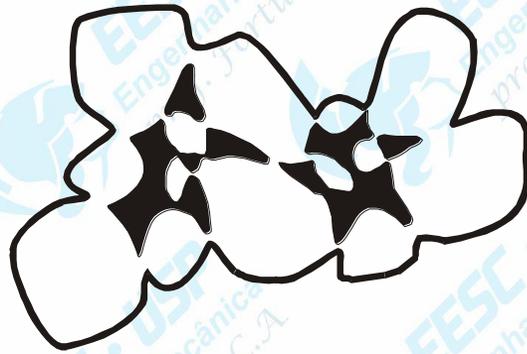
## Mecanismos

Fase-Vapor  
Estado Sólido

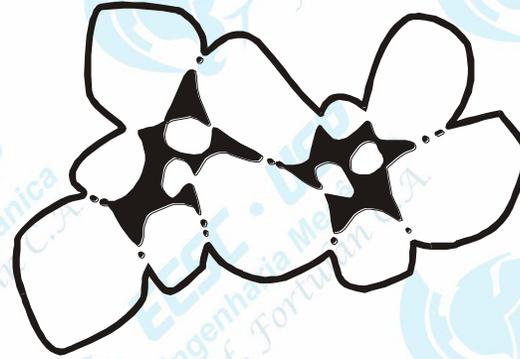
Fase-Líquida  
Líquido-Reativo



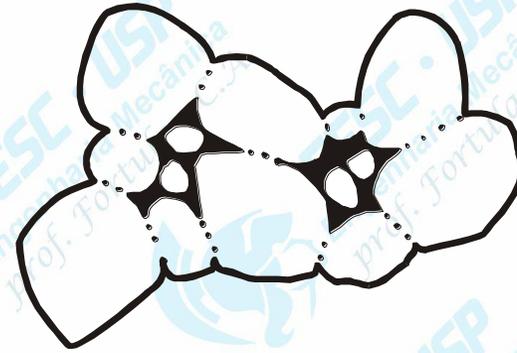
..... Contorno de grão  
○ Partícula  
▼ Porosidade



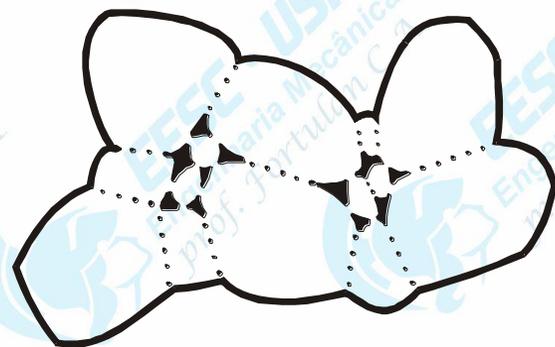
(a)



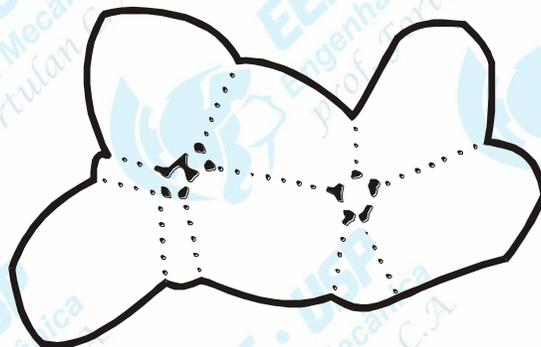
(b)



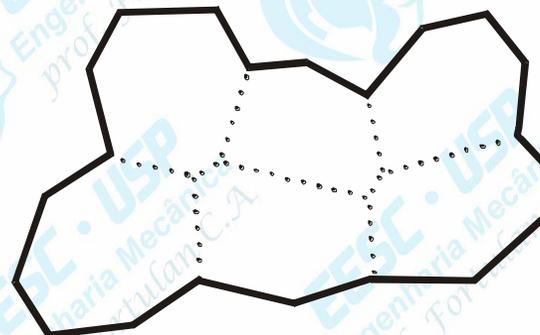
(c)



(a)

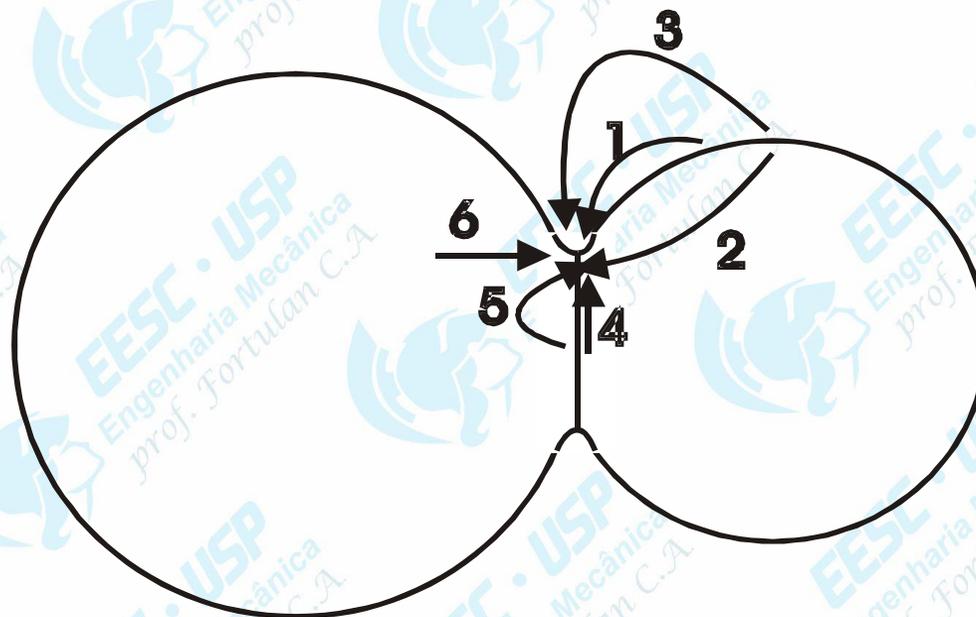


(b)



(c)

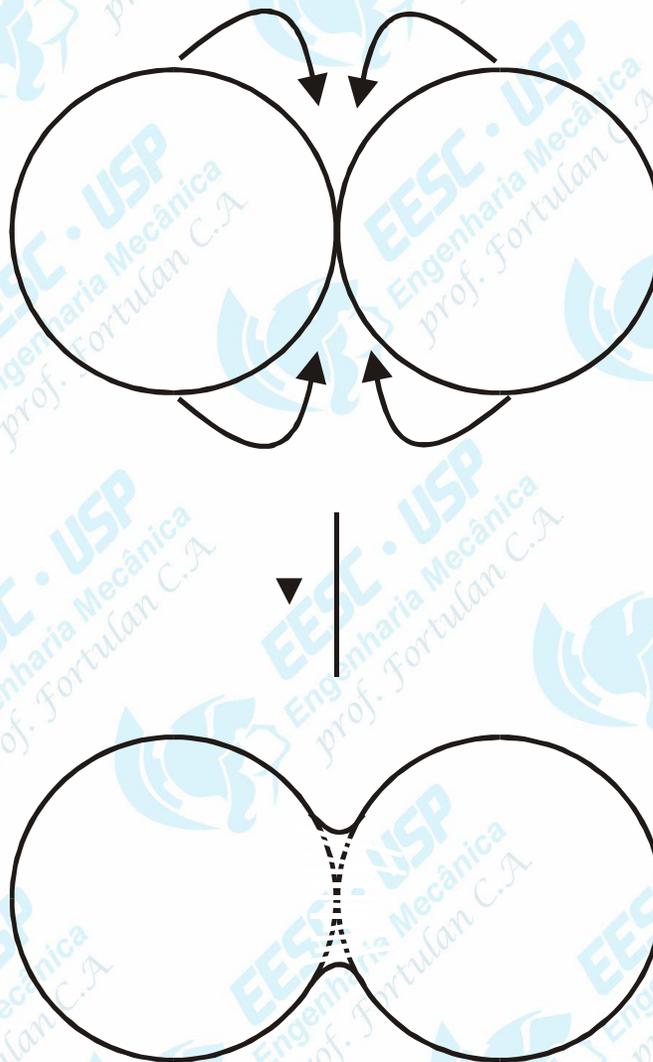
# Sinterização por fase sólida



## Caminhos

- 1 - Difusão Superficial
- 2 - Difusão na rede
- 3 - Vapor
- 4 - Difusão no contorno
- 5 - Difusão na rede
- 6 - Difusão na rede

# Sinterização por fase vapor

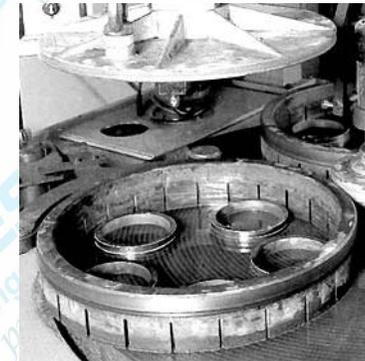


# Pós Queima

# Acabamento

Methods	Tool material	Goal
Grinding	Mechanically bonded grit, wet; diamond grinding wheel	Coarse or fine machining (e.g., profiles and bearing surfaces), Manufacture of functional surfaces while complying with the required tolerances and surface qualities.
Cutting	Mechanically bonded grit, wet; diamond cutting wheel Diamond grinding wheel	Separation of blanks
Honing	Mechanically loose grit, wet Diamond honing bar	Improving the dimensional precision and surface quality (e.g., sliding surfaces)
Lapping, polishing	Mechanically loose grit, wet Diamond lapping mixture	Improving the dimensional precision and surface quality (e.g., section preparation, sealing surfaces)
Ultrasonic lapping	Mechanically loose grit, wet; diamond lapping mixture.	Drilling, engraving
Water jet cutting	Mechanically loose grit, wet	Cutting
Sandblasting	Mechanically loose grit, dry	Removal of softer areas on the surface; surface roughing
EDM	Electric; copper, tungsten or graphite electrode	Complex shapes, almost only with SISIC
Laser processing	Thermal; CO <sub>2</sub> laser	Drilling, separating, cutting

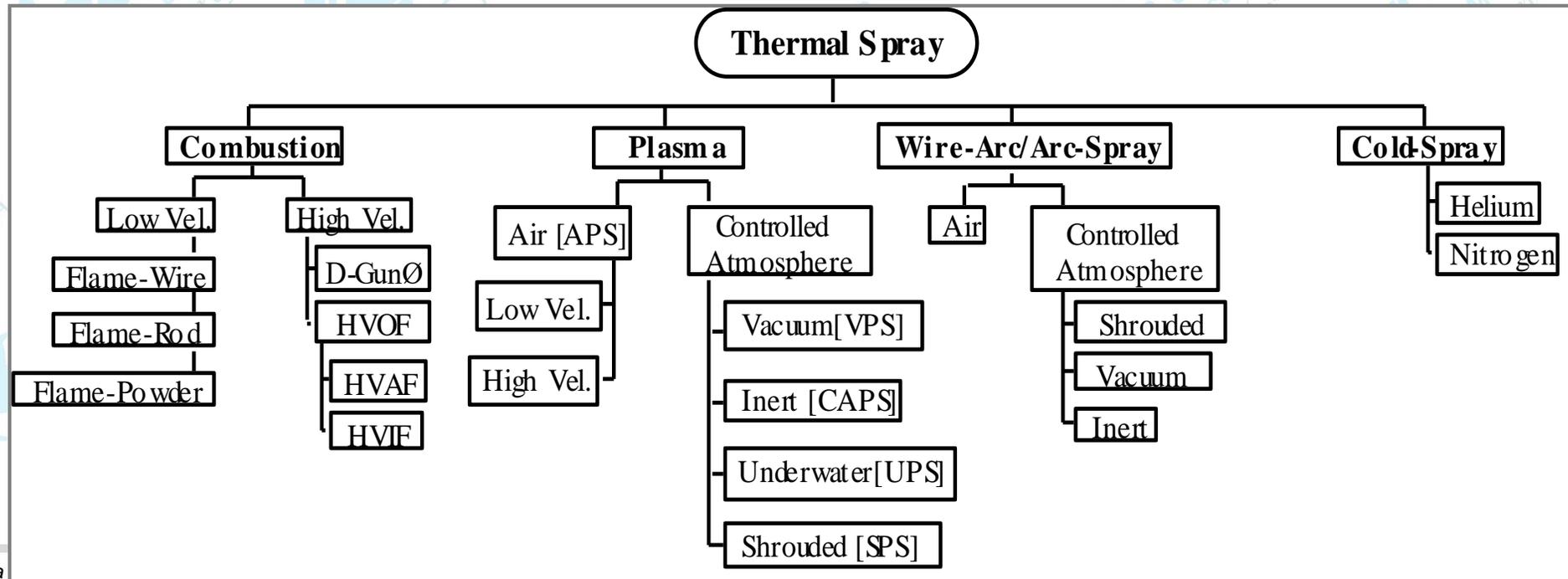
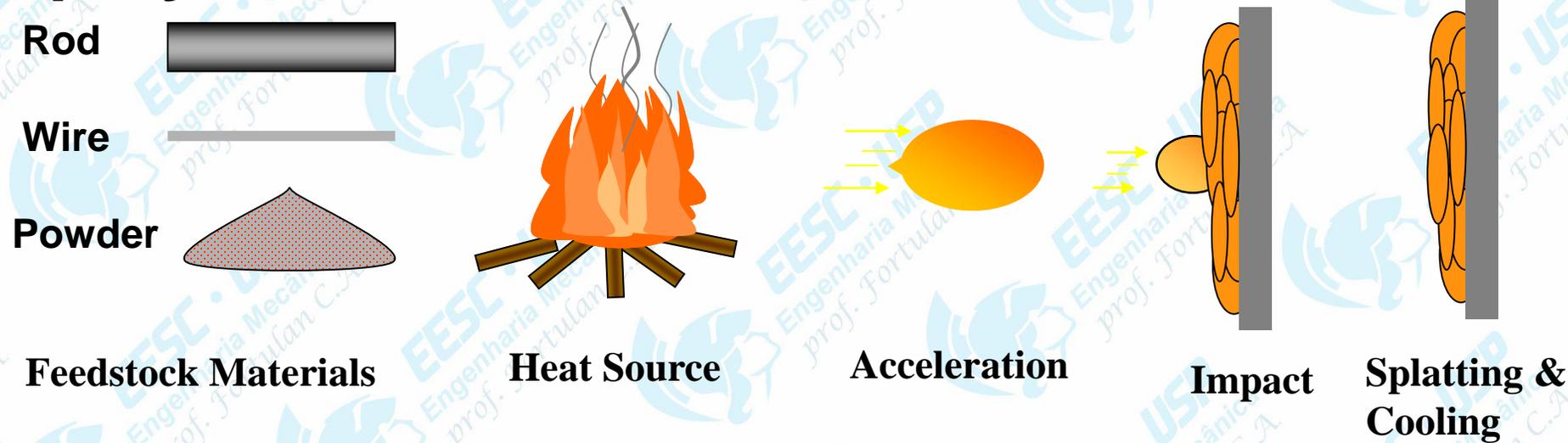
**Table 7:** Possible finishing processes.



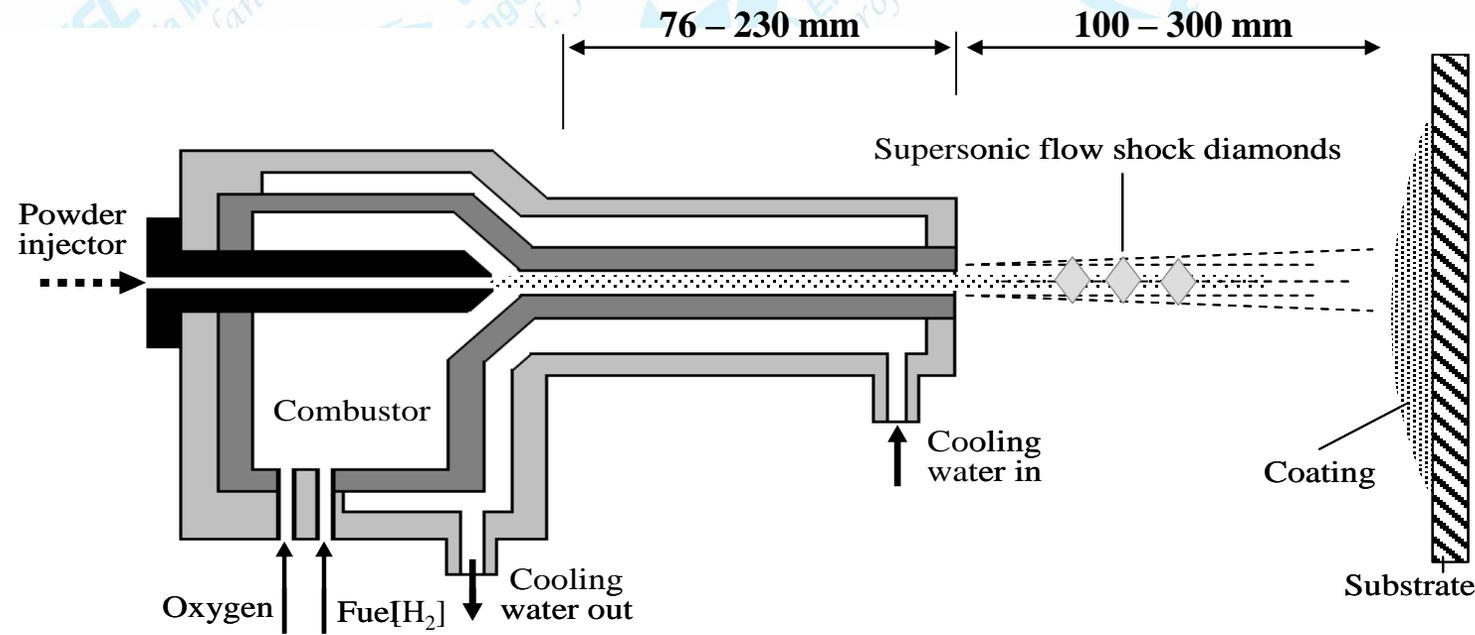
# Recobrimento

- ✓ Esmaltação;
- ✓ Thermo deposição

# Thermo spray



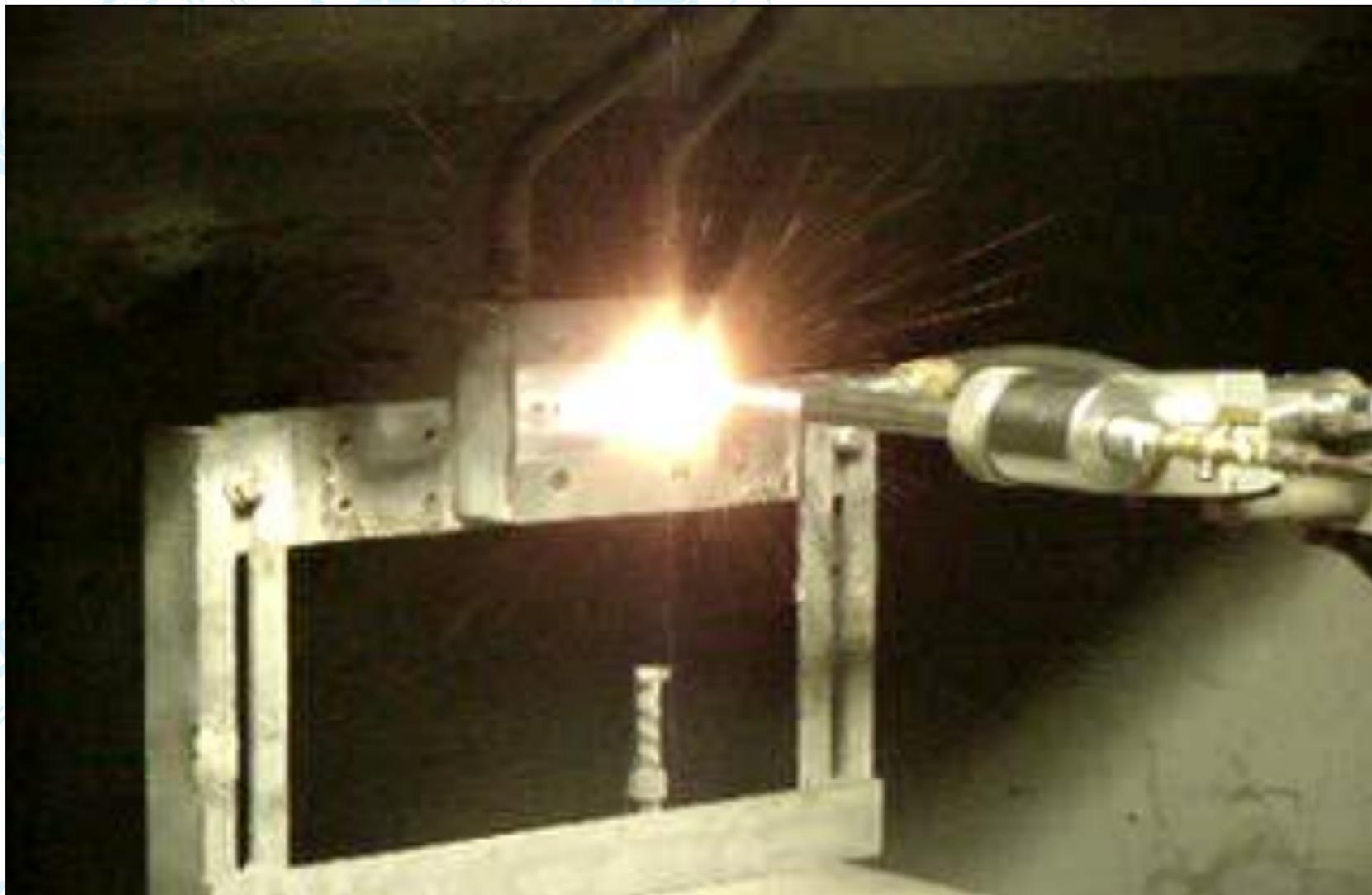
# HVOF Combustion Spray



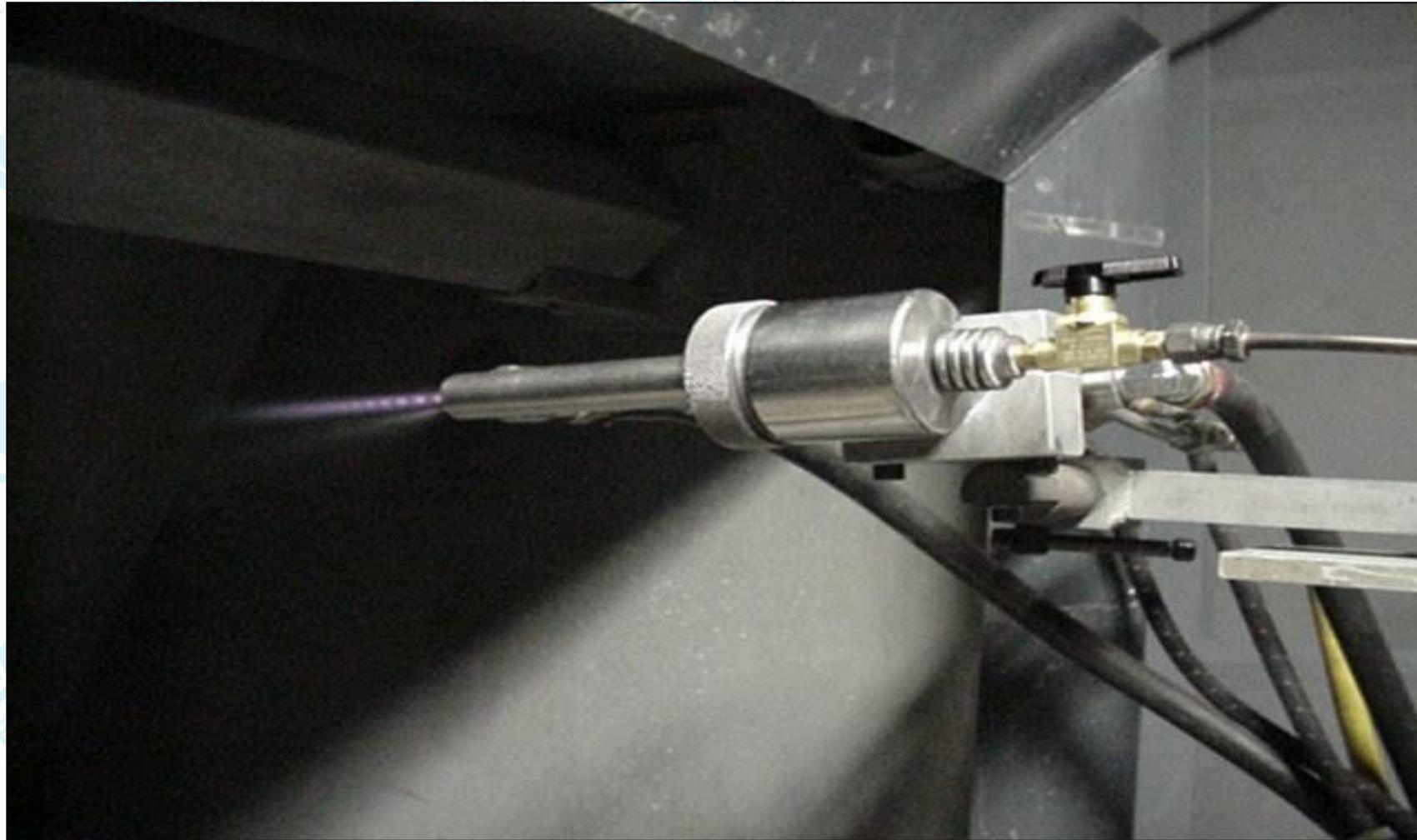
## Process Characteristics

Jet Temperature	Generally >2,500 °C
Jet Speed	Typically >1,000 m/s
Gas Flow Rate	400-1,100 slm
Particle Speed	200-1,000 m/s
Powder Feed Rate	2-50 g/min

# HVOF Spraying System... *em operação*



# High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Spraying System



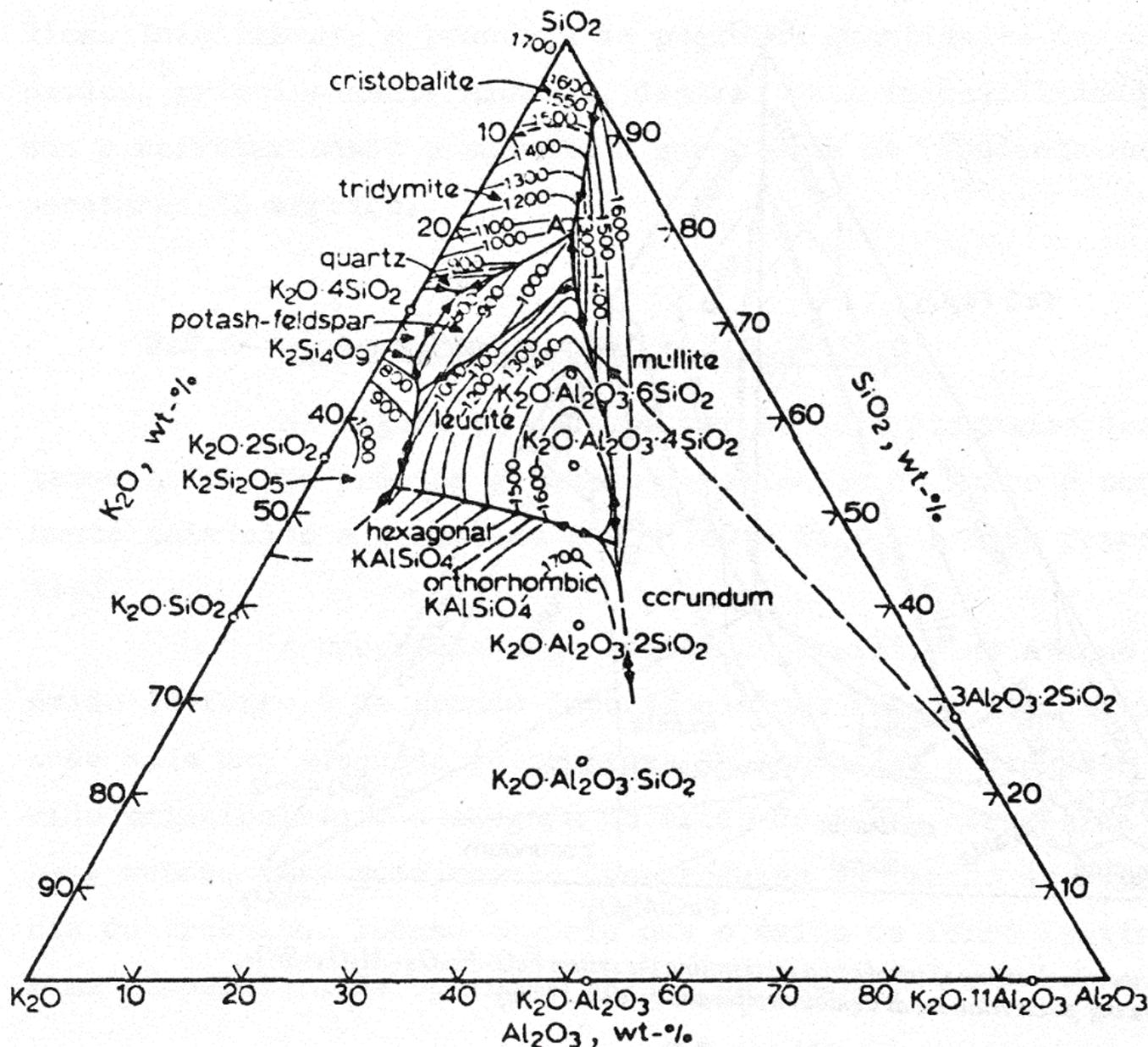
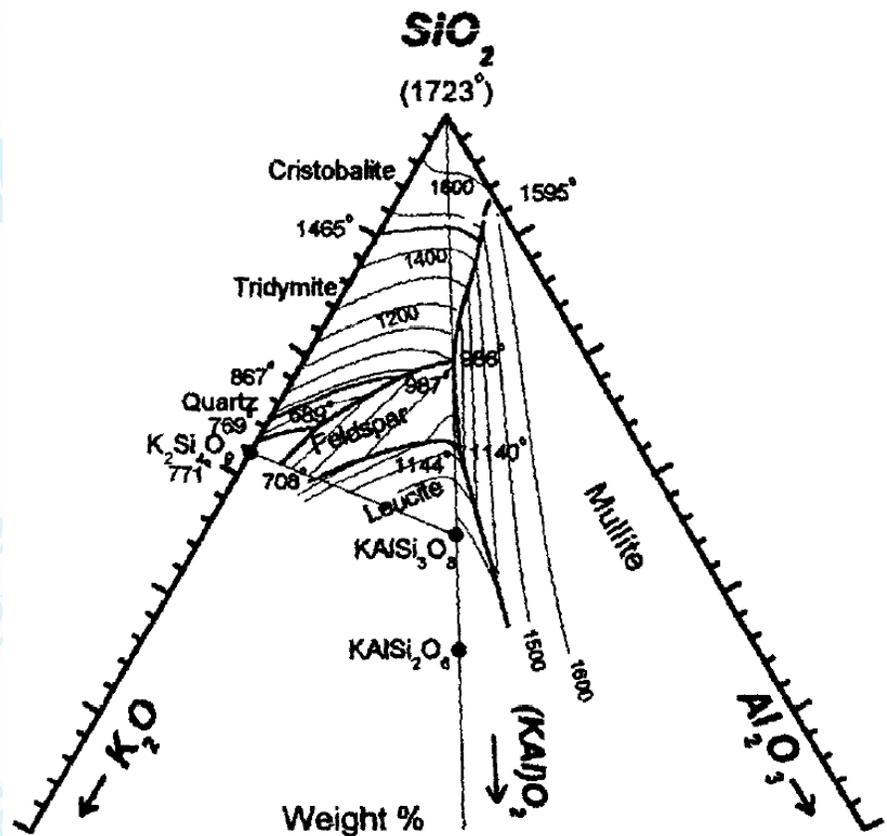
# Bibliografia

- ✓ Philippe Boch, Jean-Claude Nièpce Ceramic materials: processes, properties and applications. - 2007 - 573 p.
- ✓ Reed JS (1995) Principles of Ceramics Processing. 2nd ed. Wiley-Interscience, New York, pp 628-633
- ✓ Richerson, 1992: 487

# Prática

## Objetivo: Projeto e fabricação de um copinho de “shot” em estilo caveira

- ✓ formular uma porcelana de mesa de baixo ponto de fusão;
- ✓ processar barbotina a 30vol% de sólido defloculada;
- ✓ projetar macho de copinho de “shot”;
- ✓ fazer molde de gesso para colagem de barbotina;
- ✓ colar os copinhos;
- ✓ sinterizar e medir.



**ARGILA SÃO SIMÃO**

SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO ppm	MgO %	Na <sub>2</sub> O ppm	K <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Mn O %	PF-% 900°C
49,5	28,5	1,08	730	0,16	750	0,46	0,8	0,05	0,01	18,81
61,33	35,31	1,34	0,09	0,20	0,09	0,57	0,99	0,06	0,01	**

\*\* Multiplicar por 1,23 o total na formulação para compensar a perda ao fogo.

**FELDSPATO POTÁSSICO (Ortoclásio) K(AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)**

SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	PF-% 900°C
65,70	18,7	0,03	traços	traços	0,750	13,36	0,86

Multiplicar por 1,01 no total da formulação para compensar a perda ao fogo.

**ALUMINA CALCINADA 5S-G**

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Na <sub>2</sub> O %	CaO %	L.O.I % 110-1100°C	Um-% 110°C
99,70	0,03	0,03	0,07	0,07	0,10	0,06

**CAULIM BRANCO COLOIDAL**

Granulometria: #325 mesh

Procedência: MINASOLO

 Densidade Real: 2,60 g/cm<sup>3</sup>

 Densidade Aparente: 2,50 g/cm<sup>3</sup>

PH: 4,5-5,5

Lote: MCP-325

Data (USP) 12/93

Preço em 02/12/93: CR\$ 112,00 o Kg

Quantidade: 50Kg

Análise Química

SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %	PF-% 900°C
45,18 46,00	38,76 39,60	0,08 0,45	0,05 0,20	0,19 0,29	traços	13,60 14,00
45,59	39,18	0,27	0,13	0,24	----	14,80
53,38	45,87	0,32	0,15	0,28	----	----**

\*\* Multiplicar por 1,17 o total na formulação para compensar a perda ao fogo.

# Formulação

SiO <sub>2</sub>				K <sub>2</sub> O		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Outros	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO

Associação com similares



	massa %	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Outros
Argila São Simão									
Feldspato Potássico									
Sílica cp									
Caulim									
Alumina									

O moinho empregado será o de bolas com volume total de 1 litros

→ volume útil (barbotina) de 300ml;

→ volume de pós 30% do volume útil, ou seja 90ml;

→ massa de pós (g) =  $d_{ponderada} \cdot 90$

$$d_{\text{alumina}} = 3,99 \text{ g/cm}^3$$

$$d_{\text{sílica}} = 2,65 \text{ g/cm}^3$$

$$d_{\text{óxido de potássio}} = 2,35 \text{ g/cm}^3$$