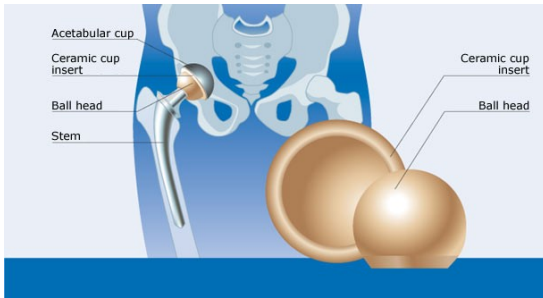
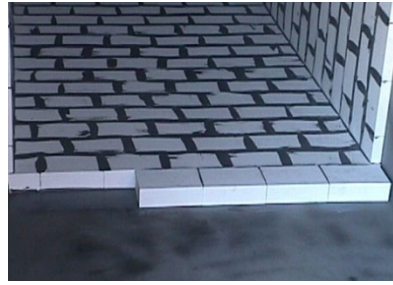


# Materiais Cerâmicos

## Tecnologia do pó

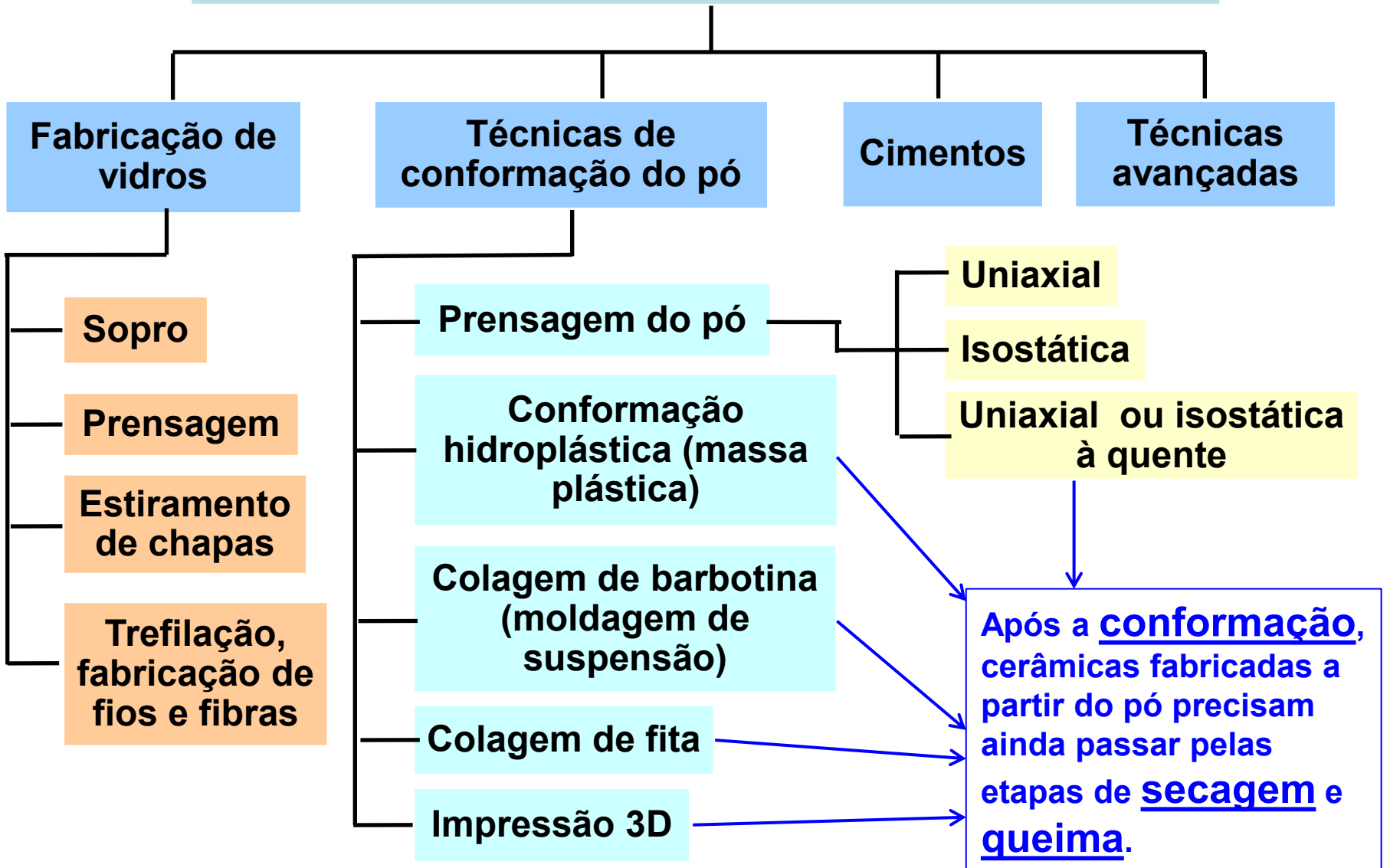


SMM0194 - Engenharia e Ciência dos Materiais 2  
Prof. Eduardo Bellini Ferreira

# **Cerâmicas podem ser classificadas com base nos processos de fabricação e produtos gerados (abaixo um exemplo muito resumido)**

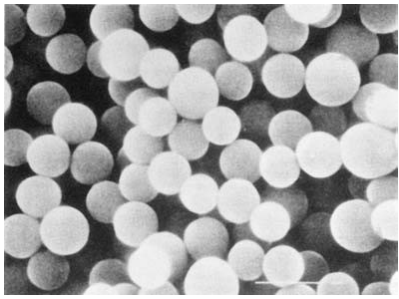
- **Fabricação de vidros**
  - Vidros & vitrocerâmicas para diferentes aplicações
- **Fabricação pela conformação do pó**
  - Produtos estruturais, louças, porcelanas, isolantes elétricos, etc.
  - Refratários
  - Abrasivos
- **Cimentos** (cimentos & concretos)
- **Processos avançados** (semicondutores, etc.)

# Técnicas de conformação cerâmica (exemplos principais)



# Técnicas de fabricação – conformação do pó

- Formulação
- Mistura, homogeneização e dispersão das matérias-primas + aditivos
- Conformação
  - Prensagem do pó
    - À quente
    - Uniaxial
    - Isostática
  - Conformação hidroplástica
  - Colagem de barbotina (suspensão aquosa)
  - Colagem de fita (tape casting)
- Secagem
- Queima (pode haver uma etapa posterior de esmaltação ou aplicação de vidro e nova queima)
- Acabamento, Retificação



Matéria-prima  
particulada

Dispersão e homogeneização das  
partículas em uma suspensão  
(com posterior eliminação de  
excesso de água ou outro líquido)

Conformação

Secagem

Queima

Produtos cerâmicos

Retífica e  
acabamento

Prensagem

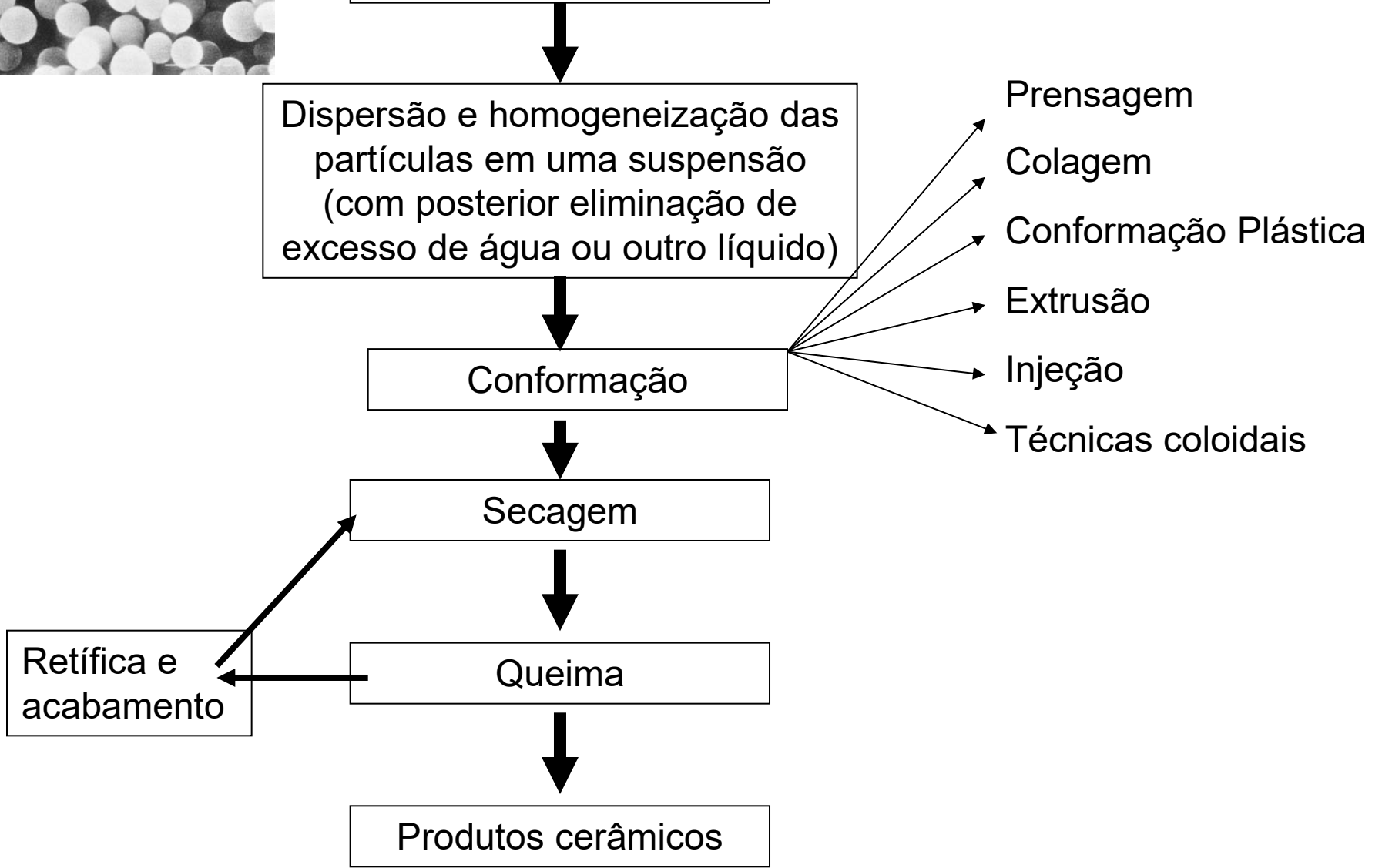
Colagem

Conformação Plástica

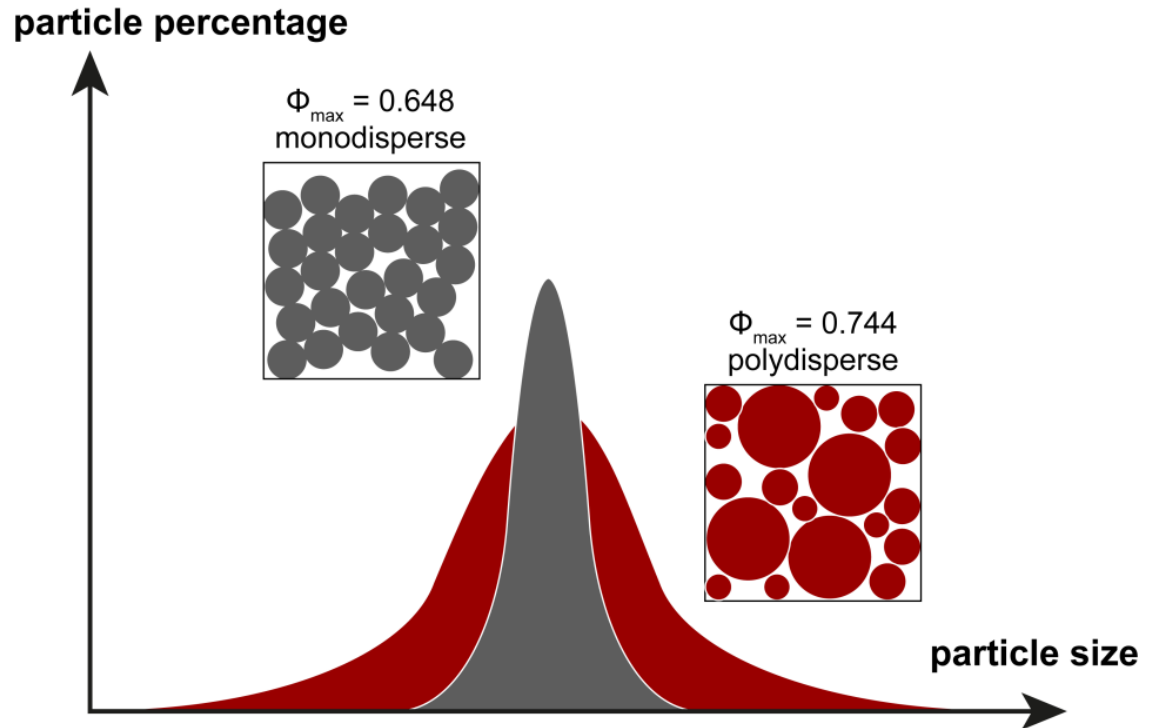
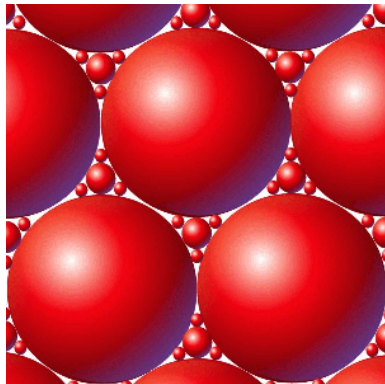
Extrusão

Injeção

Técnicas coloidais

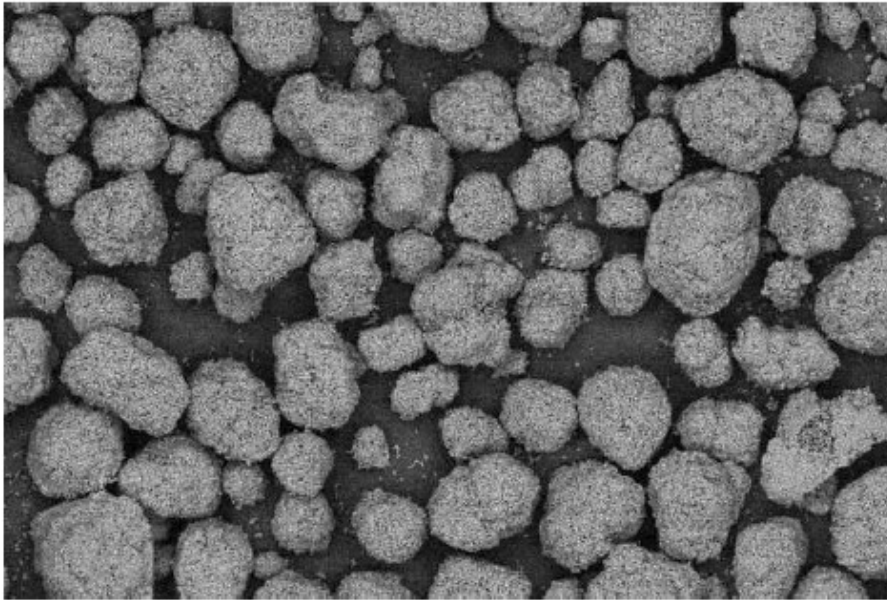


# Empacotamiento de partículas

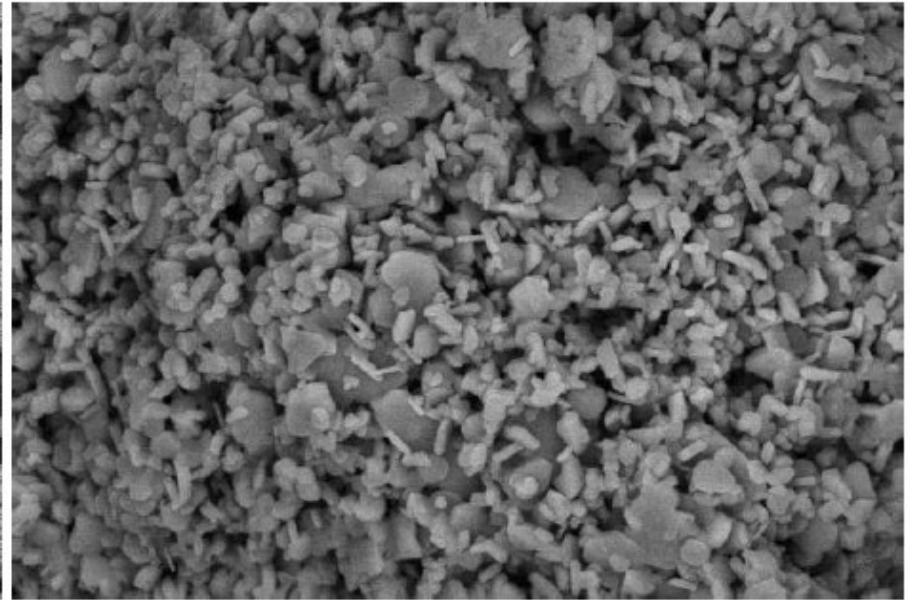




# Alumina calcinada APC Alcoa

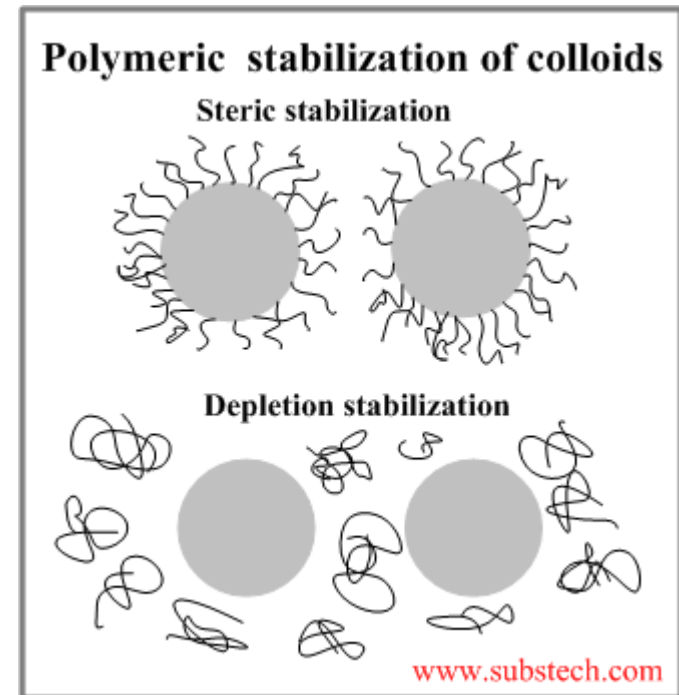
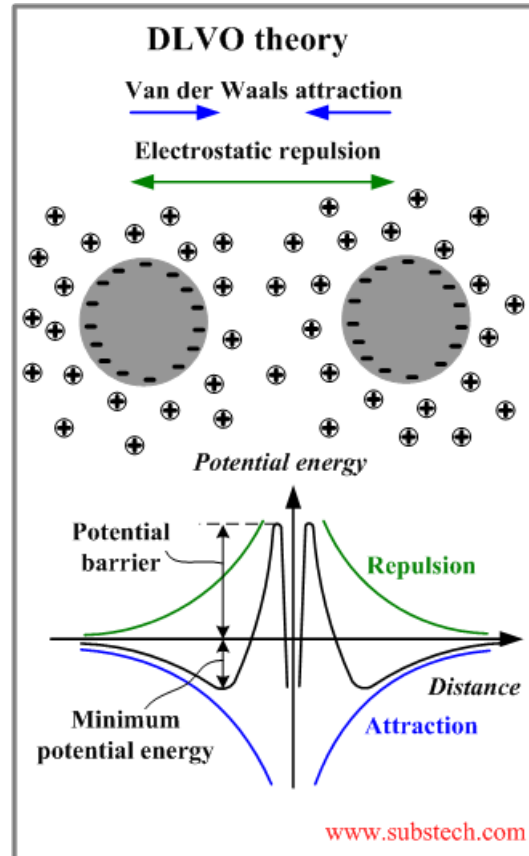
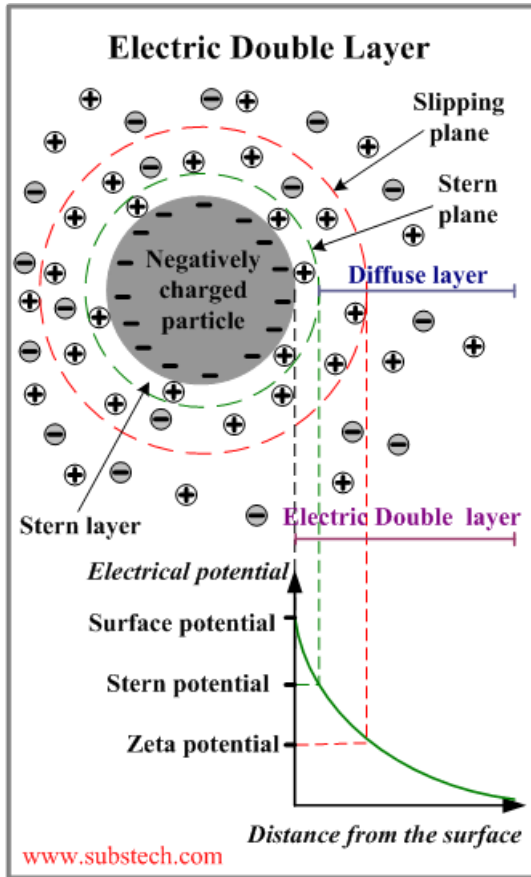


APC - MEV Ampliação de 300 X , 50  $\mu$  ─┘



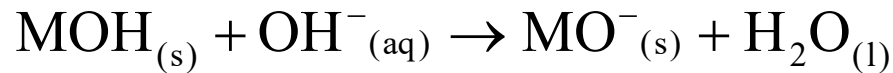
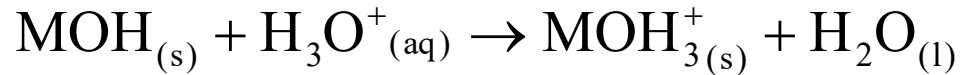
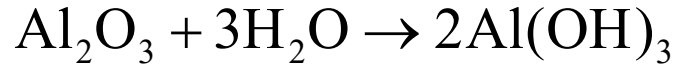
APC - MEV : -Ampliação de 3000 X , 5  $\mu$  ─┘

# Dispersão de partículas em suspensão

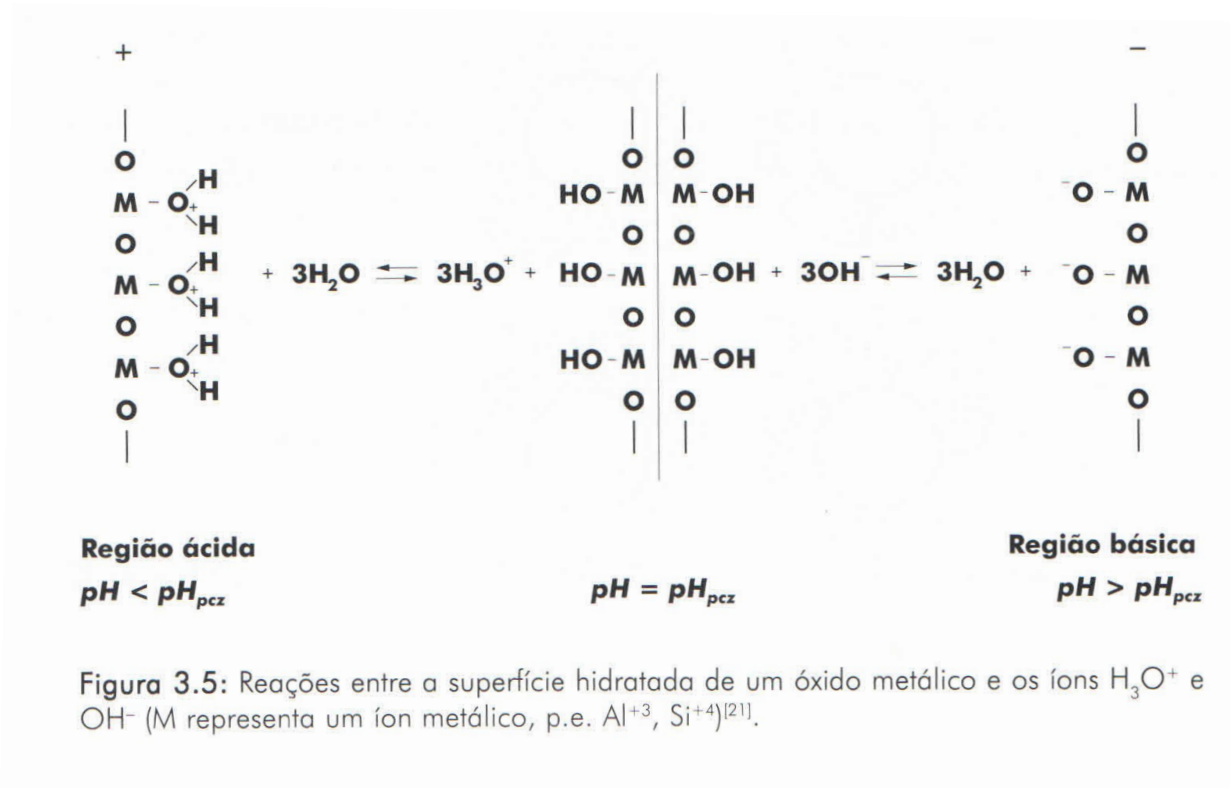




# Dispersão de partículas em suspensão



onde M é o cátion metálico



# Dispersão de partículas em suspensão

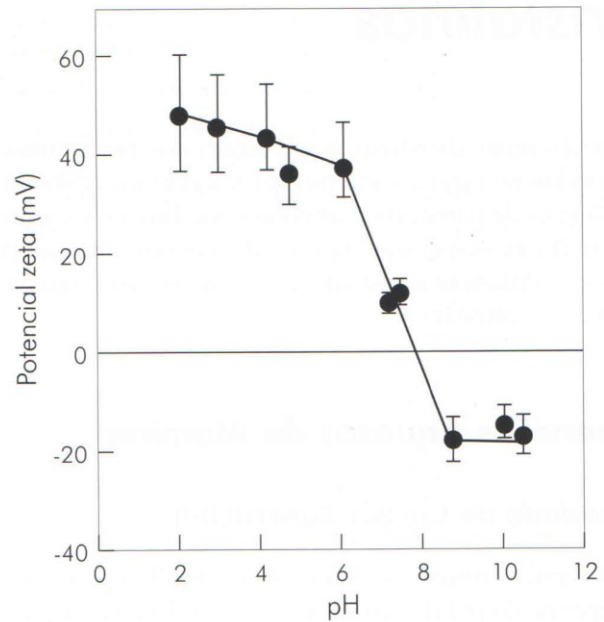


Figura 4.1: Variação do potencial zeta para suspensão de alumina em função do pH<sup>[32]</sup>.

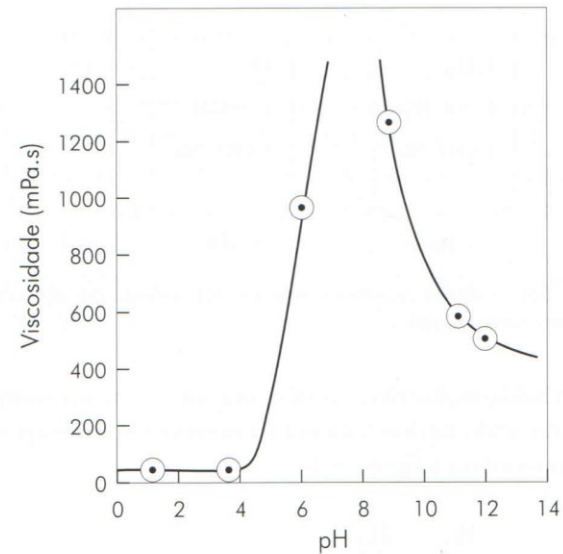


Figura 4.2: Variação da viscosidade para suspensão de alumina em função do pH<sup>[33]</sup>.

# Dispersão de partículas em suspensão

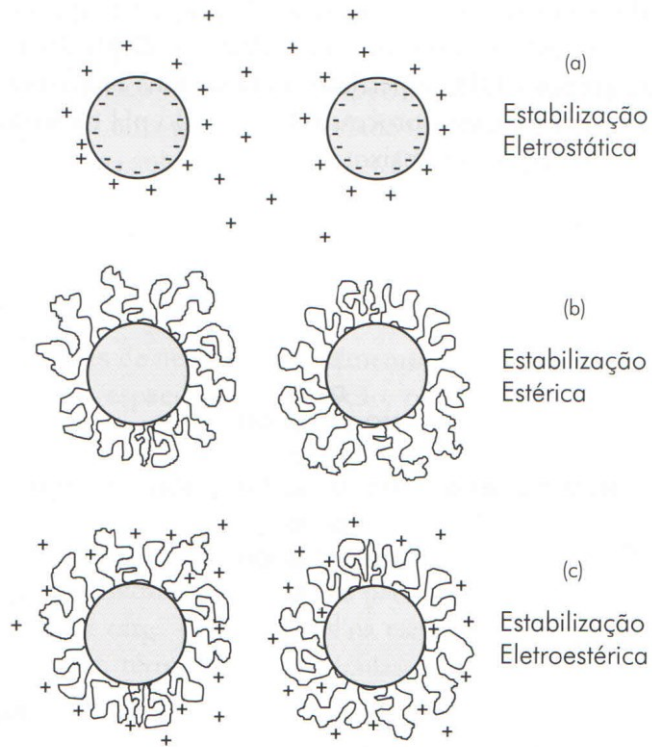


Figura 3.4: Ilustração dos mecanismos de estabilização de suspensões: (a) através de cargas nas superfícies das partículas, (b) da adsorção de polímeros e (c) da adsorção de moléculas ionizadas ou polieletrólitos<sup>[12]</sup>.

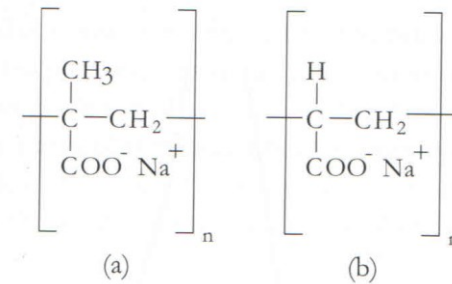


Figura 4.3: Esquema das unidades repetitivas (meros) das cadeias do (a) polimetacrilato de sódio e do (b) poliacrilato de sódio<sup>[36]</sup>.

# Spray dryer ou secador por atomização



# Conformação cerâmica

- Pós adequadamente preparados (distribuição de tamanhos, dispersos, aditivados, em aglomerados moles) para a conformação nos formatos desejados
- **Objetivo:** promover a máxima aproximação entre partículas e eliminar ao máximo espaços vazios

# Os principais métodos incluem

- Prensagem do pó semi-seco
- Mistura do pó com água e/ou polímeros orgânicos produzindo uma massa plástica, conformada por prensagem, deformação, extrusão ou injeção (conformação plástica)
- Vertimento de uma suspensão concentrada ou barbotina em molde poroso (colagem e “tape casting”)

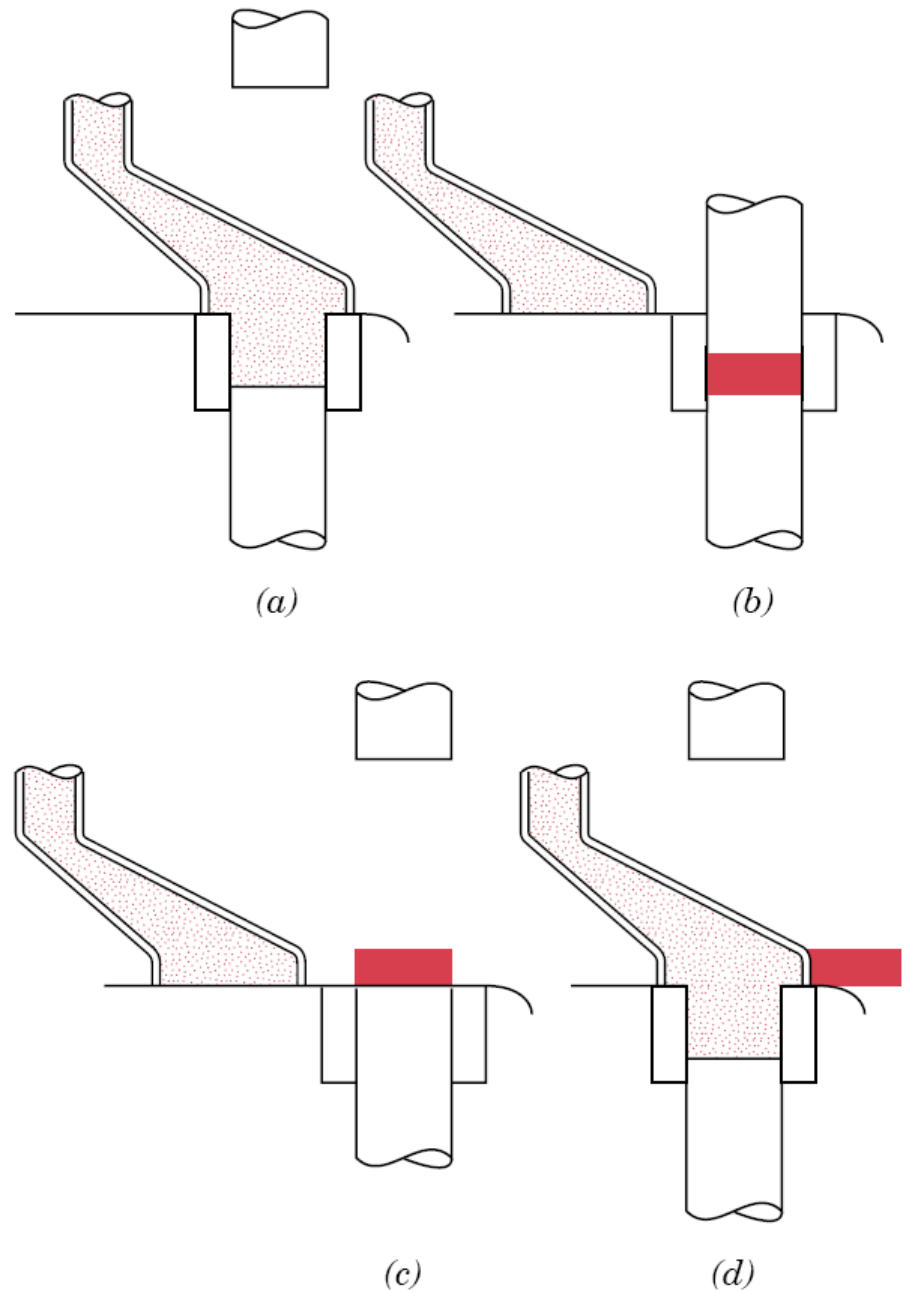


# Podemos relacionar os processos de conformação à consistência da massa

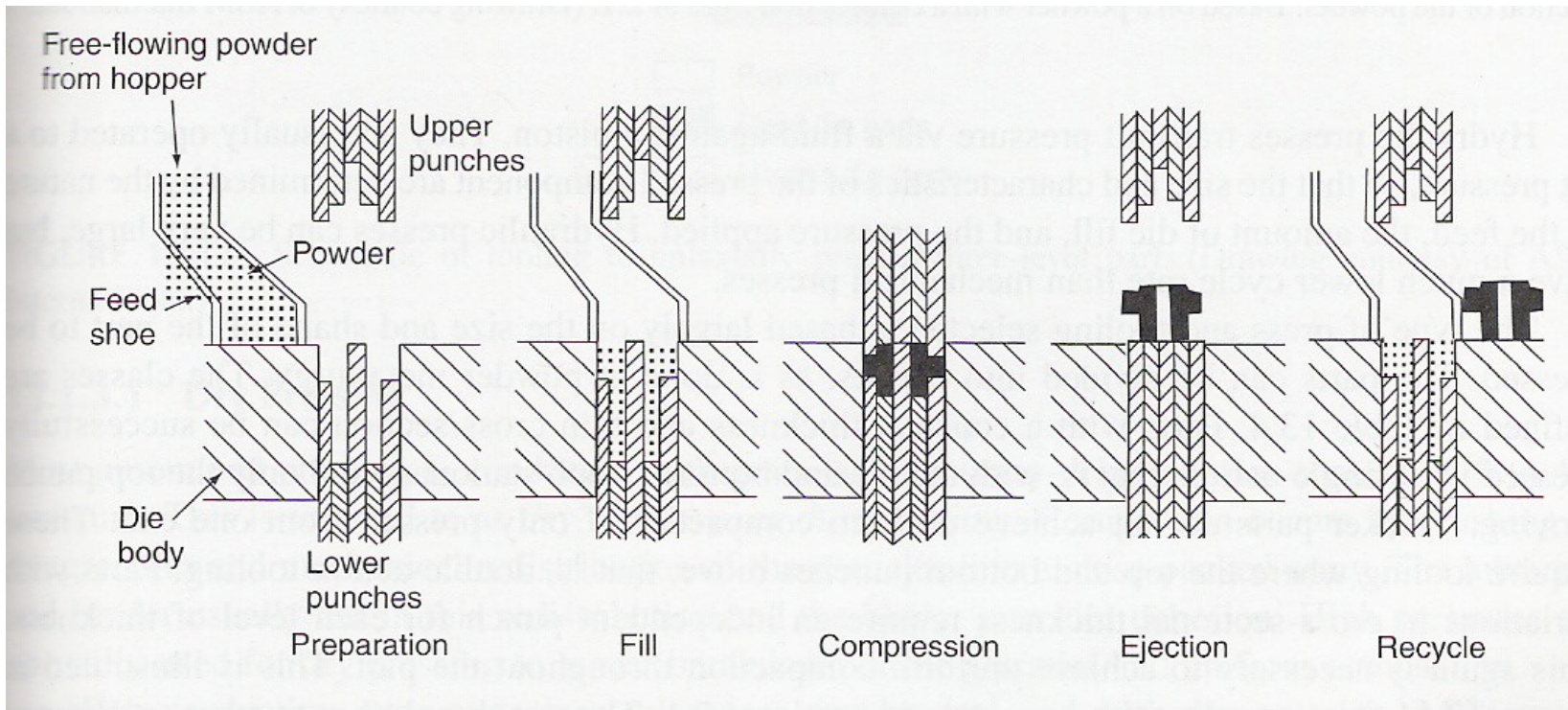
Processo	Pressão utilizada	% água
Via suspensão em meio líquido	Zero ou hidrostática	20-25%
Massa plástica	Baixa	25-30
Extrusão	Média	15-20
Prensagem à seco	Alta	5-10
Prensagem do pó	Muito alta	1-2
Prensagem isostática	Muito alta	0-17

# Técnicas de fabricação – conformação do pó

## Prensagem

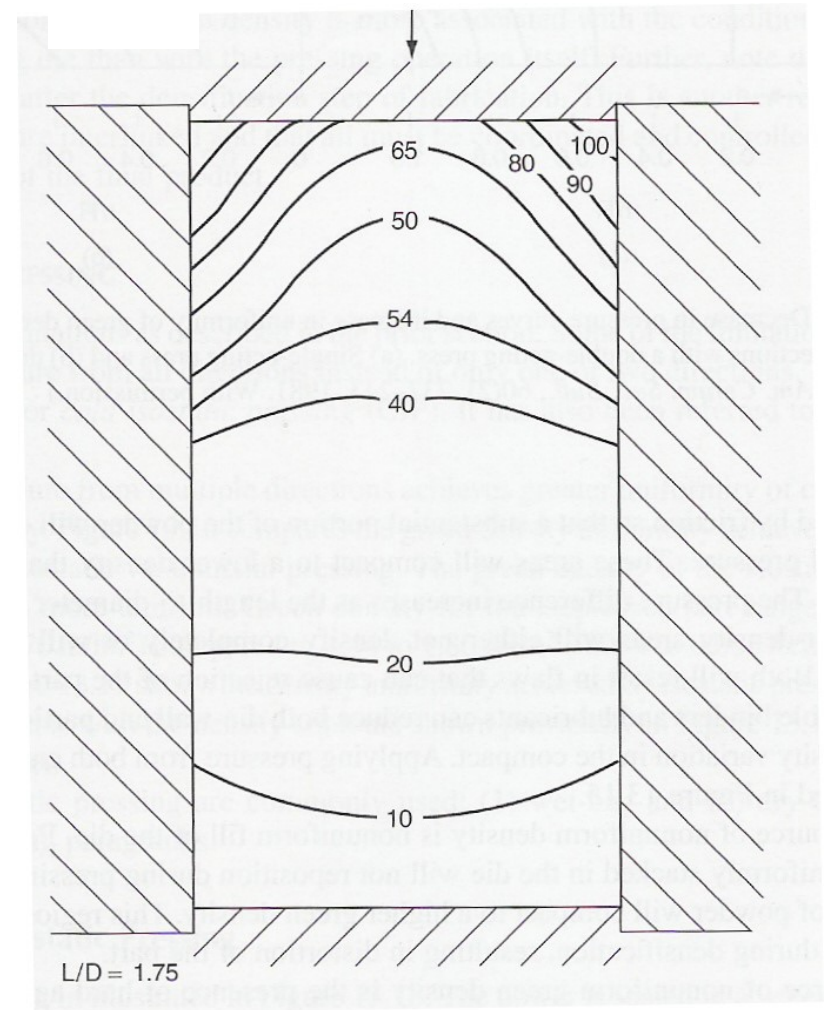
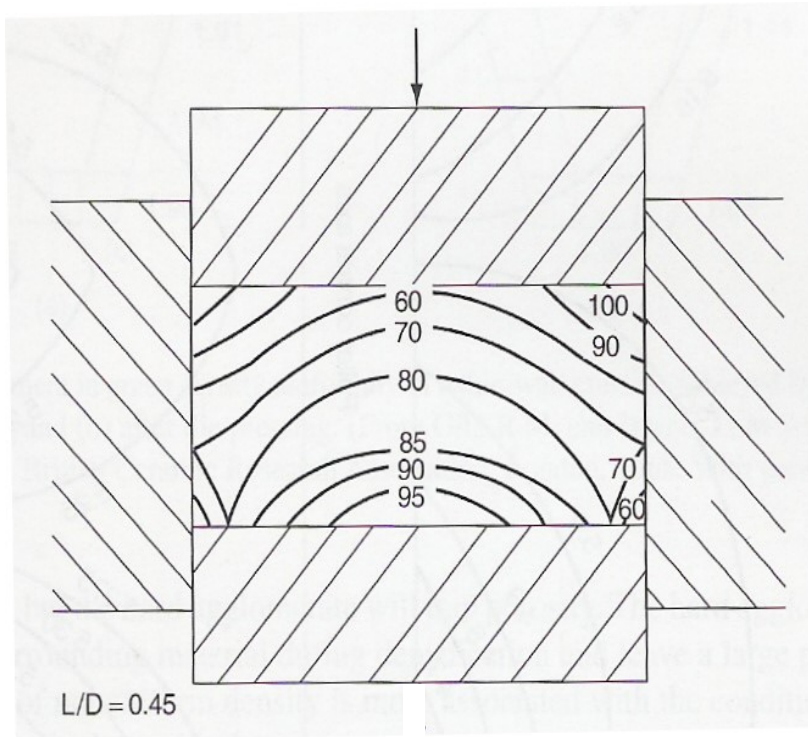


# Prensagem uniaxial

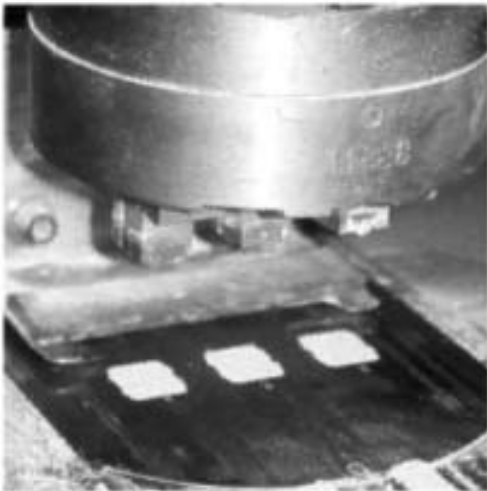


6-100/min!!

# Prensagem uniaxial – efeito da espessura

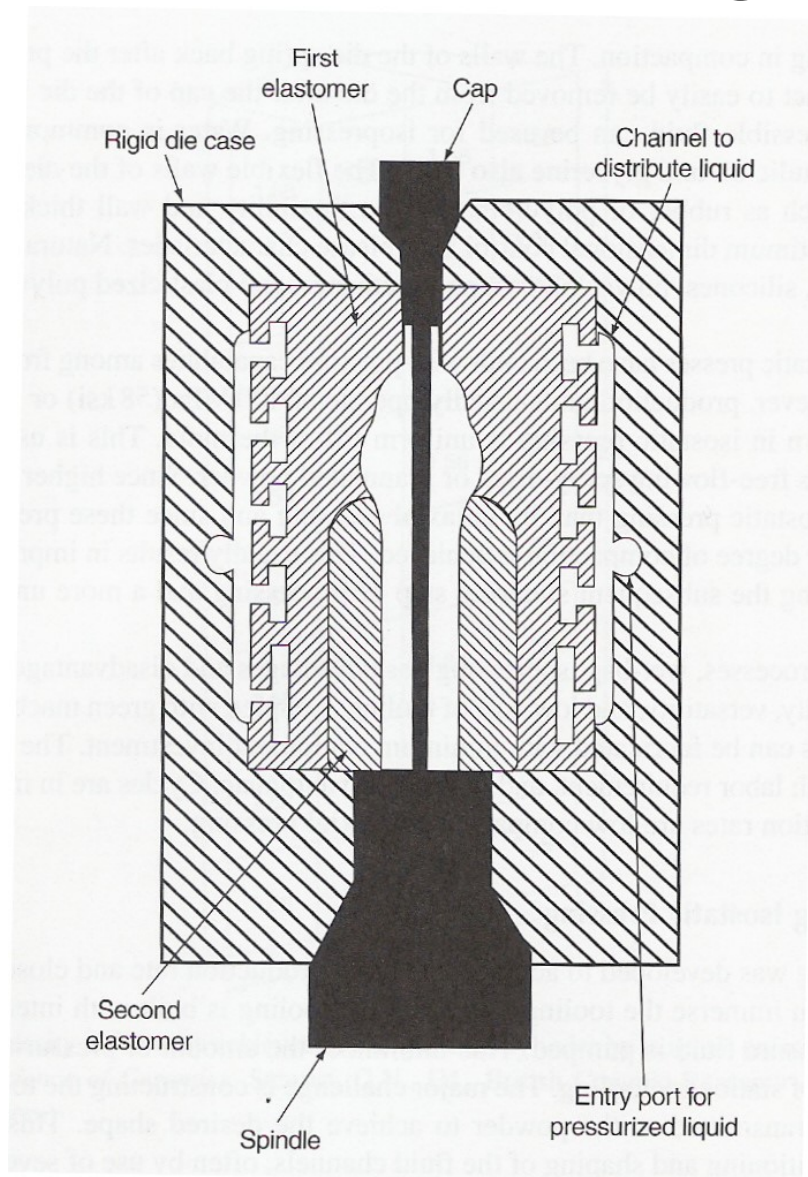


# Prensagem uniaxial



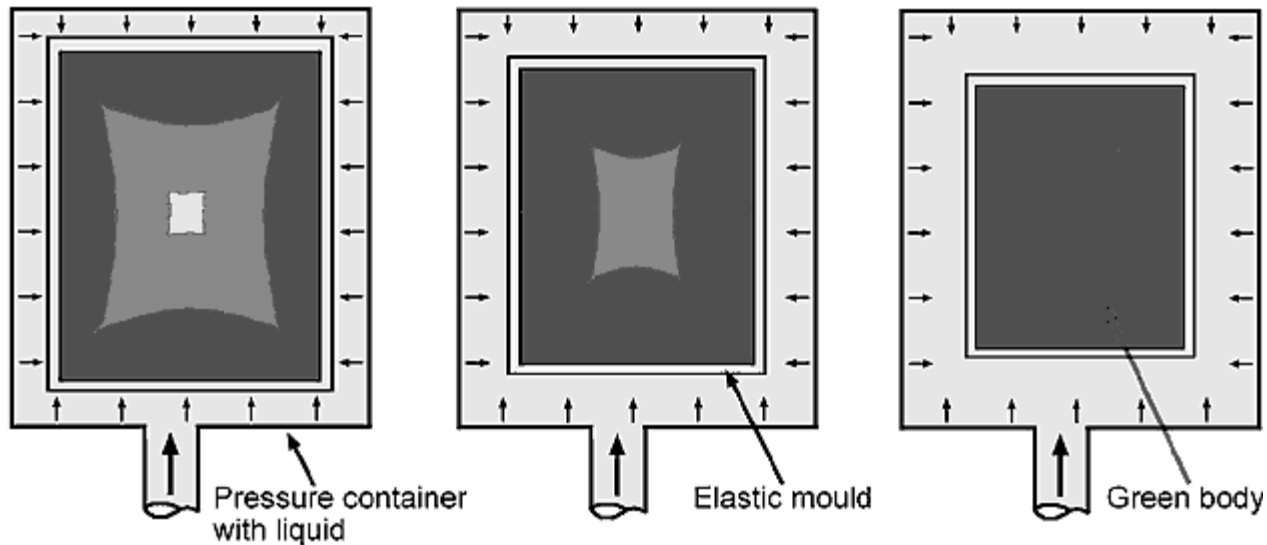
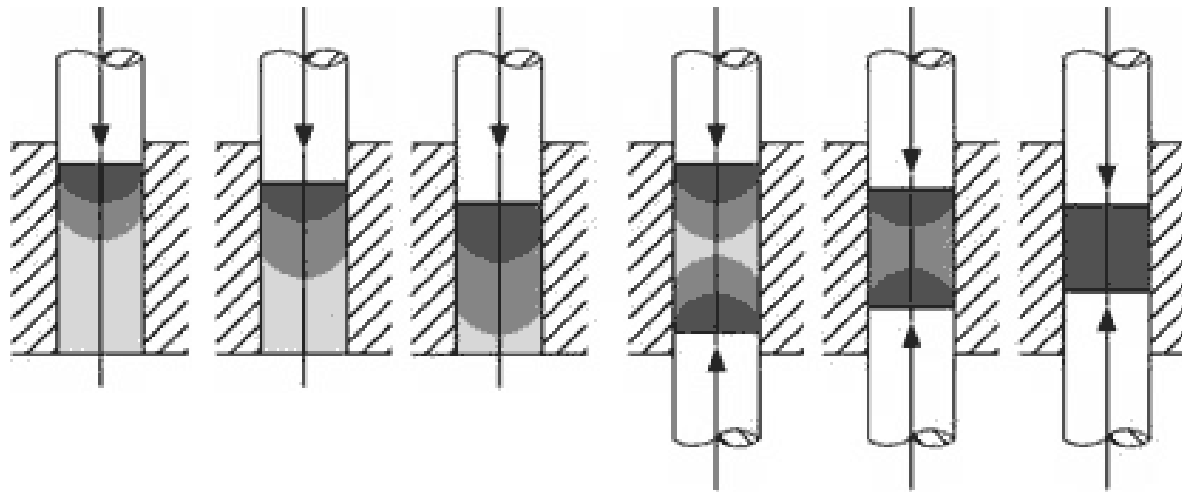


# Prensagem isostática

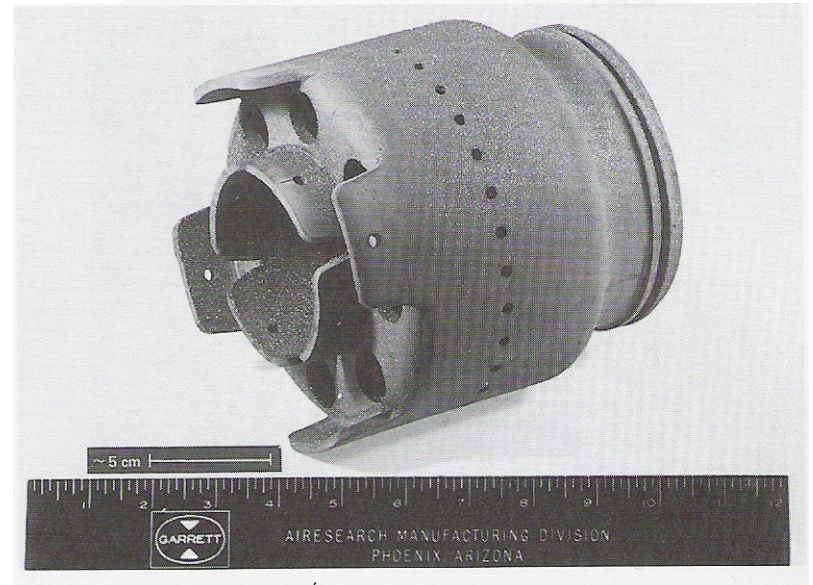
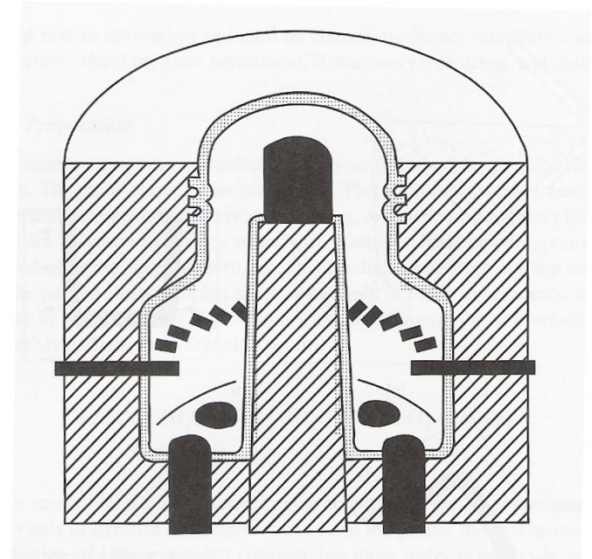
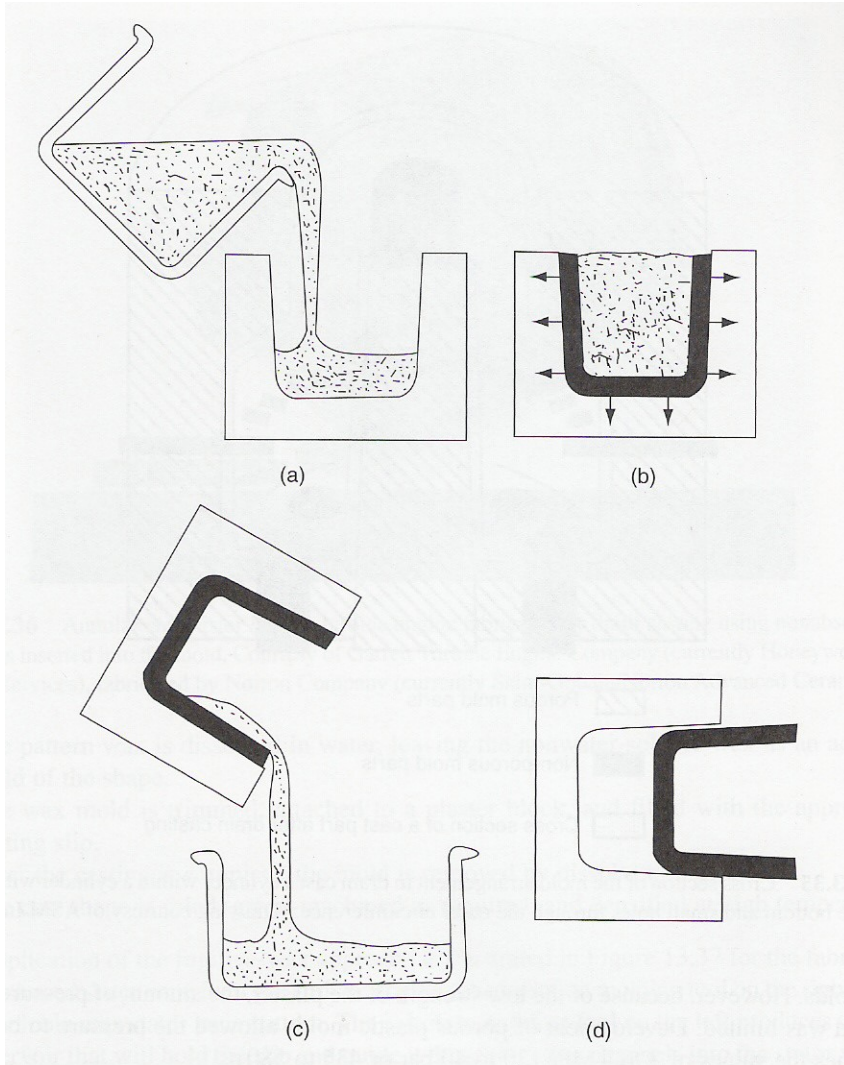




# Prensagem cerâmica uniaxial vs. uniaxial em dois sentidos vs. isostática

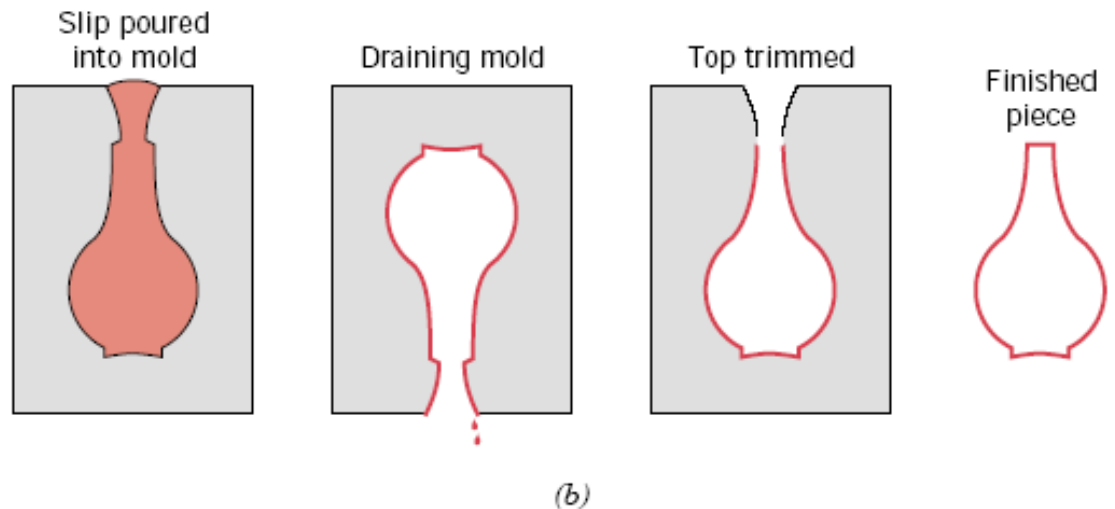
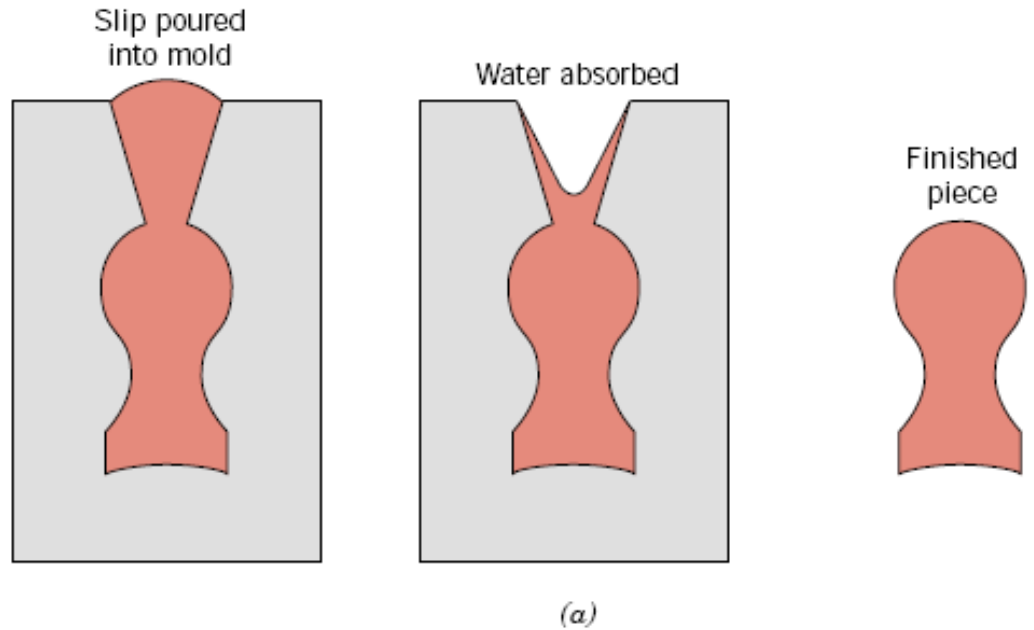


# Colagem de barbotina

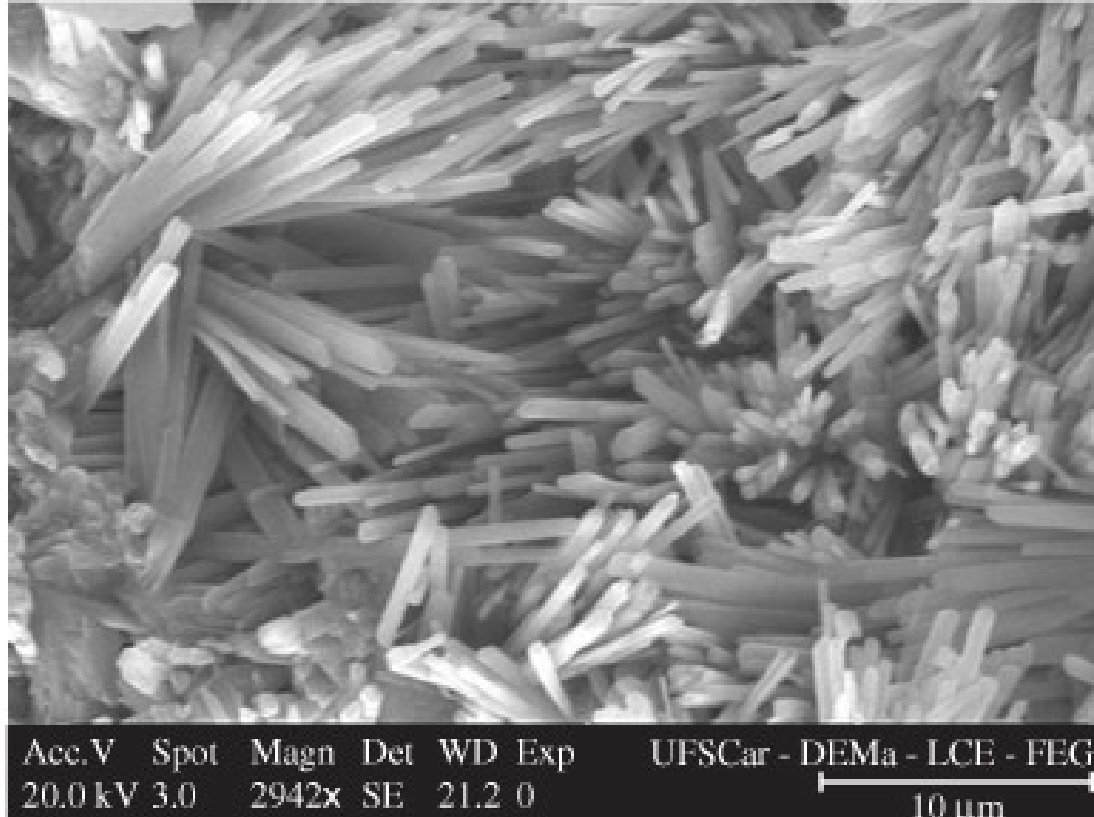


# Técnicas de fabricação – conformação do pó

## Colagem de barbotina



# Técnicas de fabricação – colagem de barbotina



Microestrutura do gesso após a hidratação.

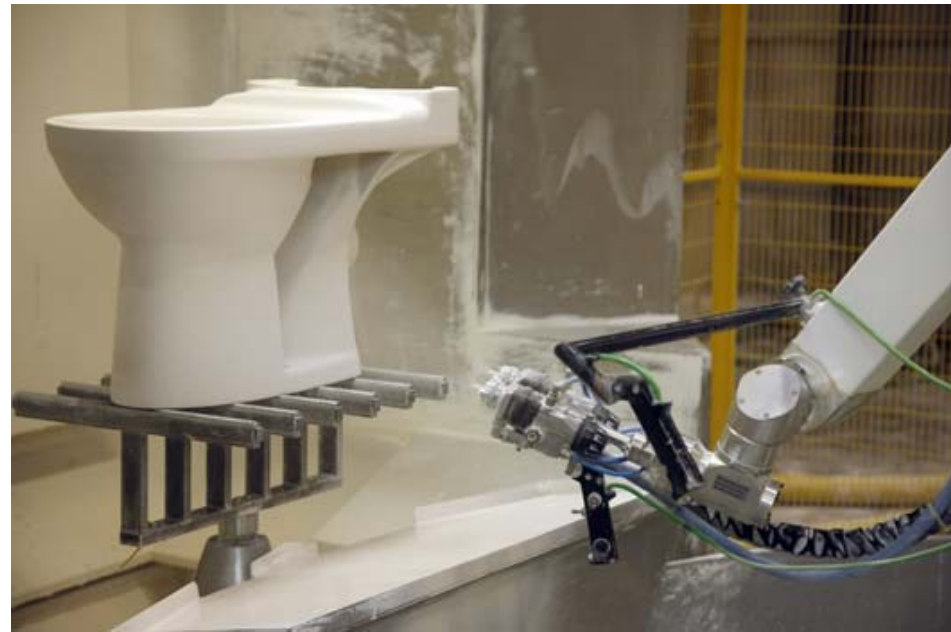
sulfato de cálcio hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) → hemidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ )  
calcinação



# Técnicas de fabricação – colagem de barbotina

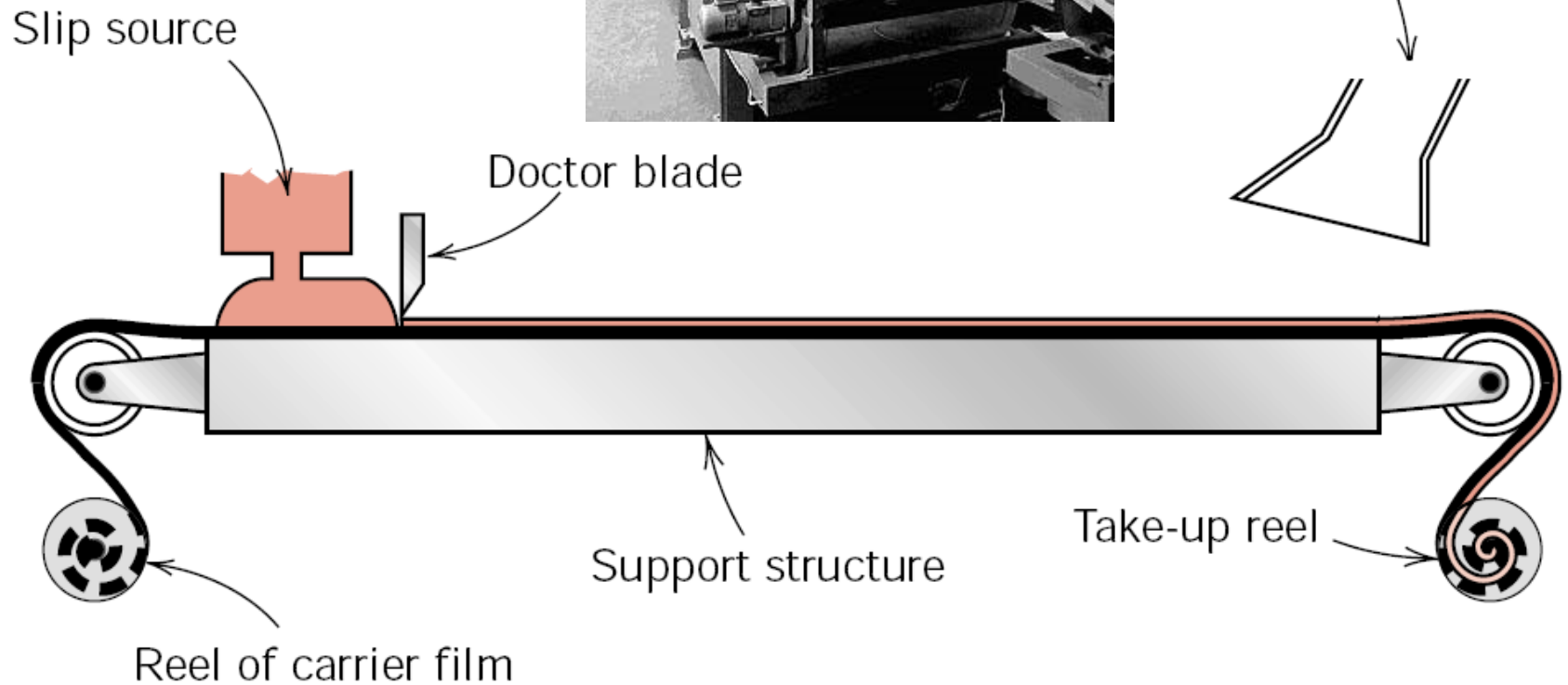
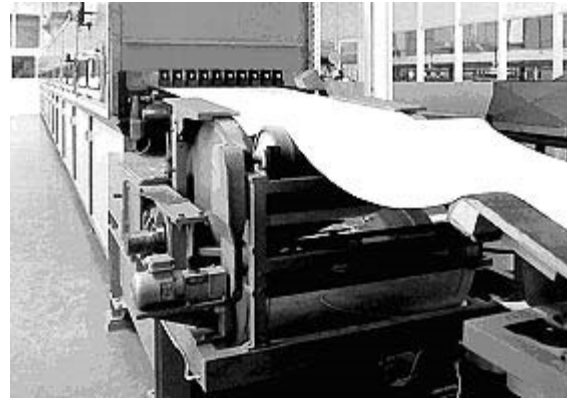


# Porcelana sanitária





# Tape casting (colagem de fita)



# O Sensor Lambda Sensor

## LSF4 planar Lambda oxygen sensor – ETAS

Fig. 4

- 1 Porous protective layer
- 2 Outer electrode
- 3 Sensor foil
- 4 Inner electrode
- 5 Reference-air-channel foil
- 6 Insulation layer
- 7 Heater
- 8 Heater foil
- 9 Connection contacts

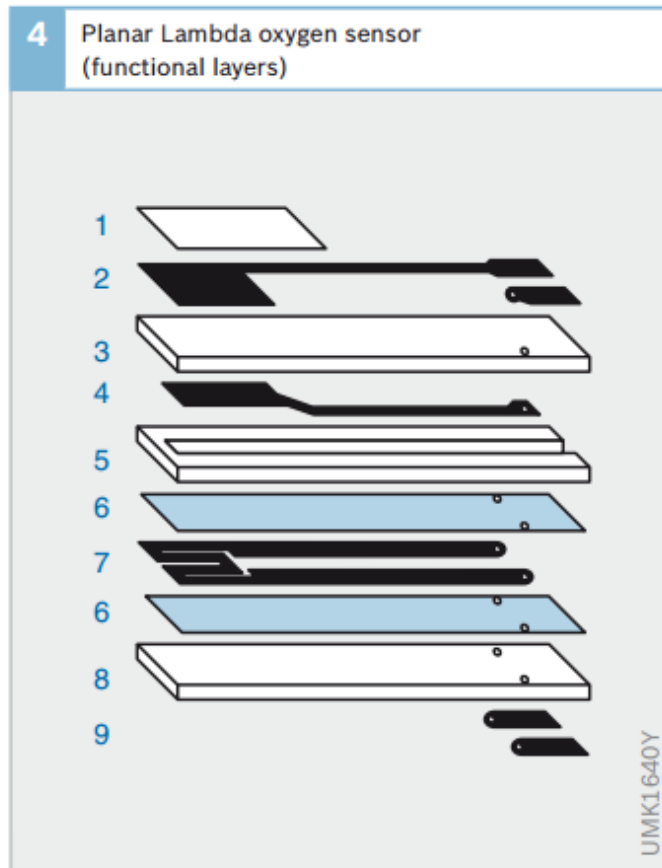
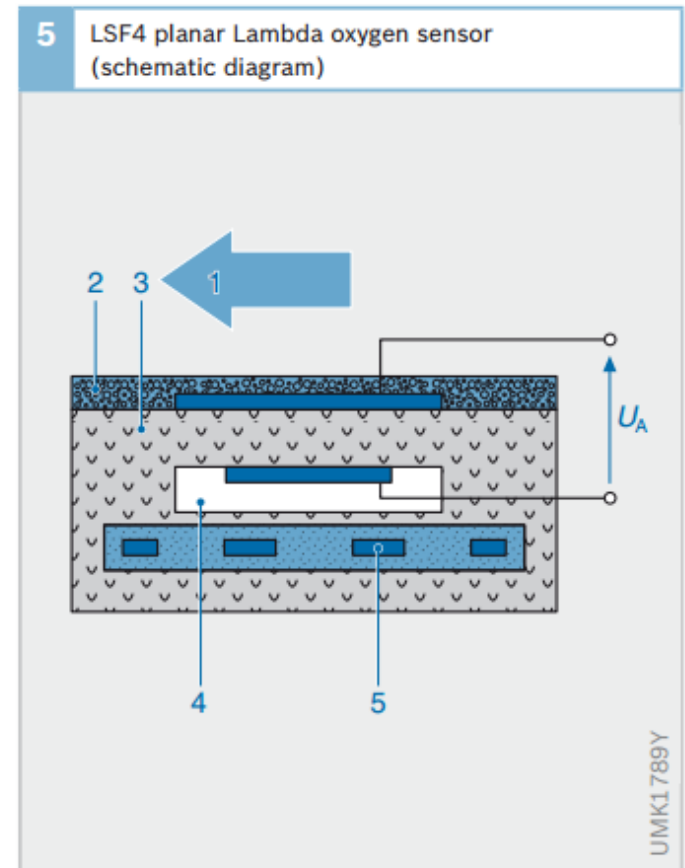
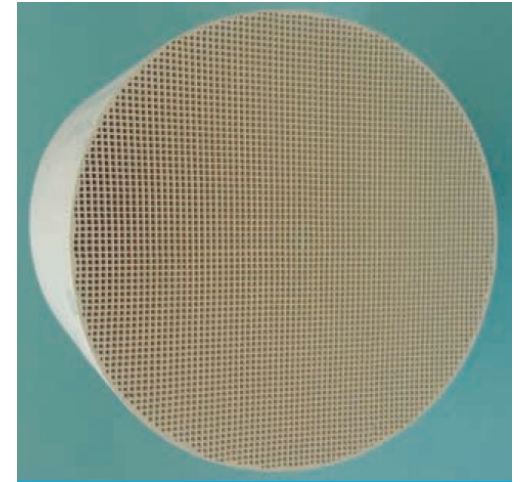
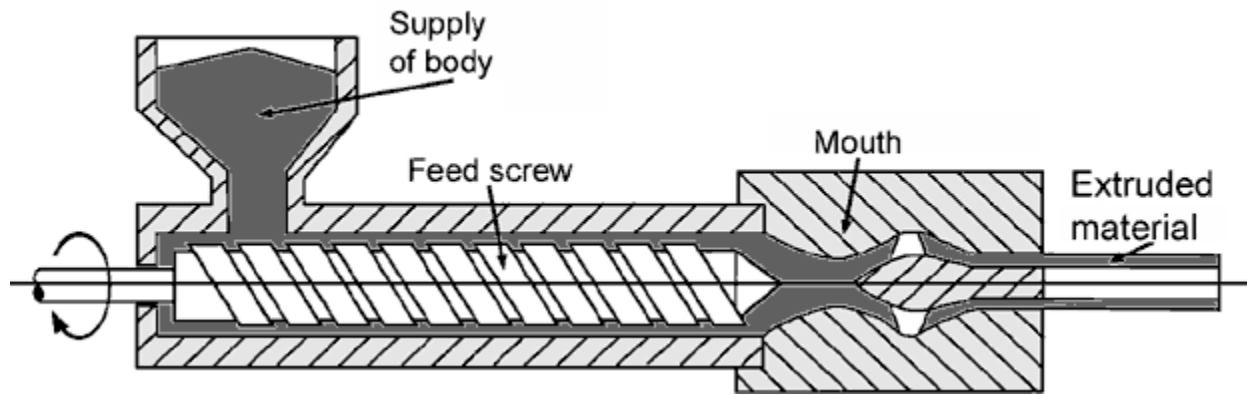


Fig. 5

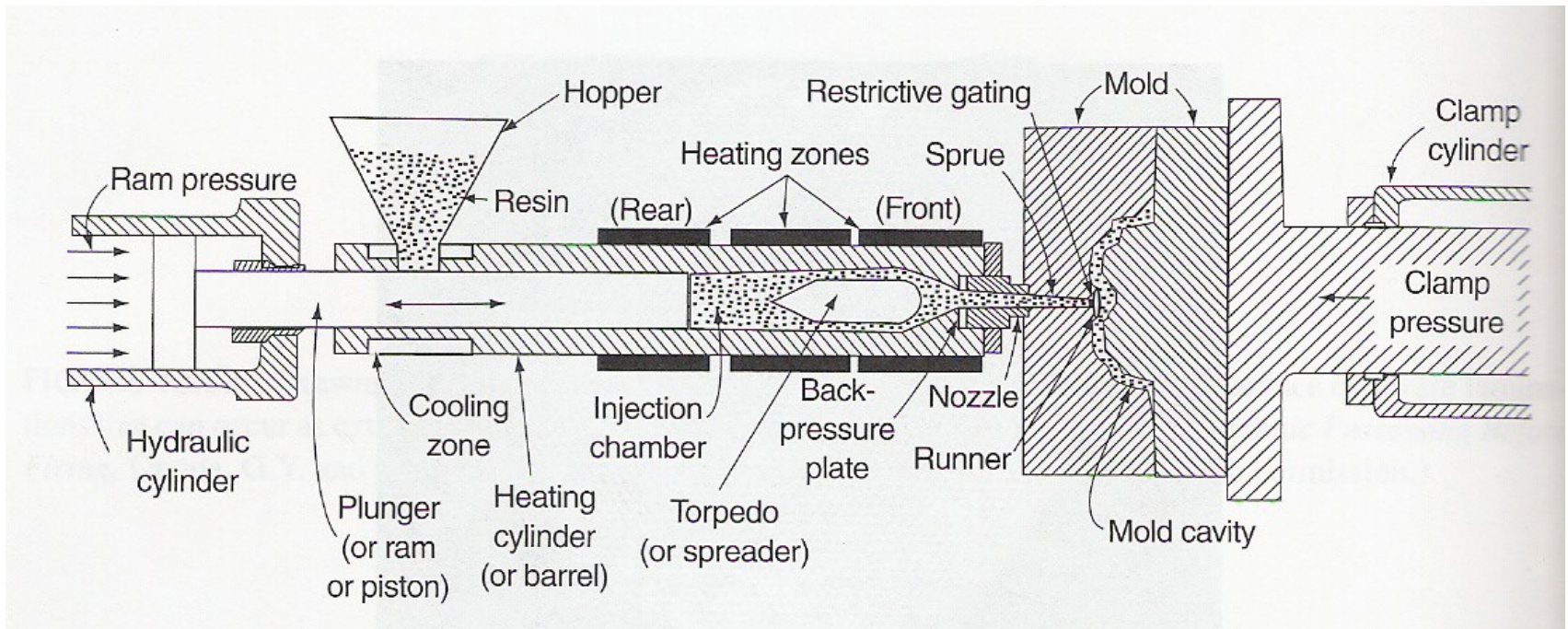
- 1 Exhaust gas
  - 2 Porous ceramic protective layer
  - 3 Measuring cell with microporous noble-metal layer
  - 4 Reference-air channel
  - 5 Heater
- $U_A$  Output voltage



# Extrusão

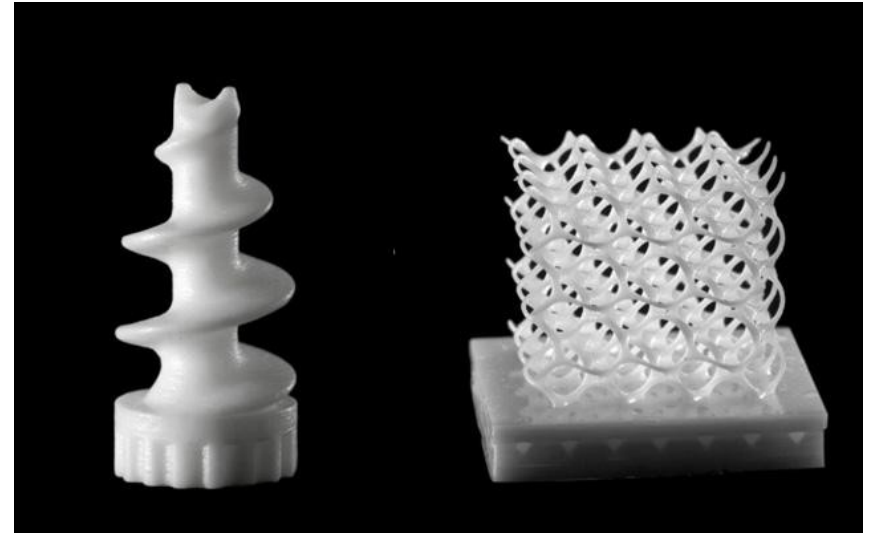


# Injeção





# Manufatura aditiva (impressão 3D)

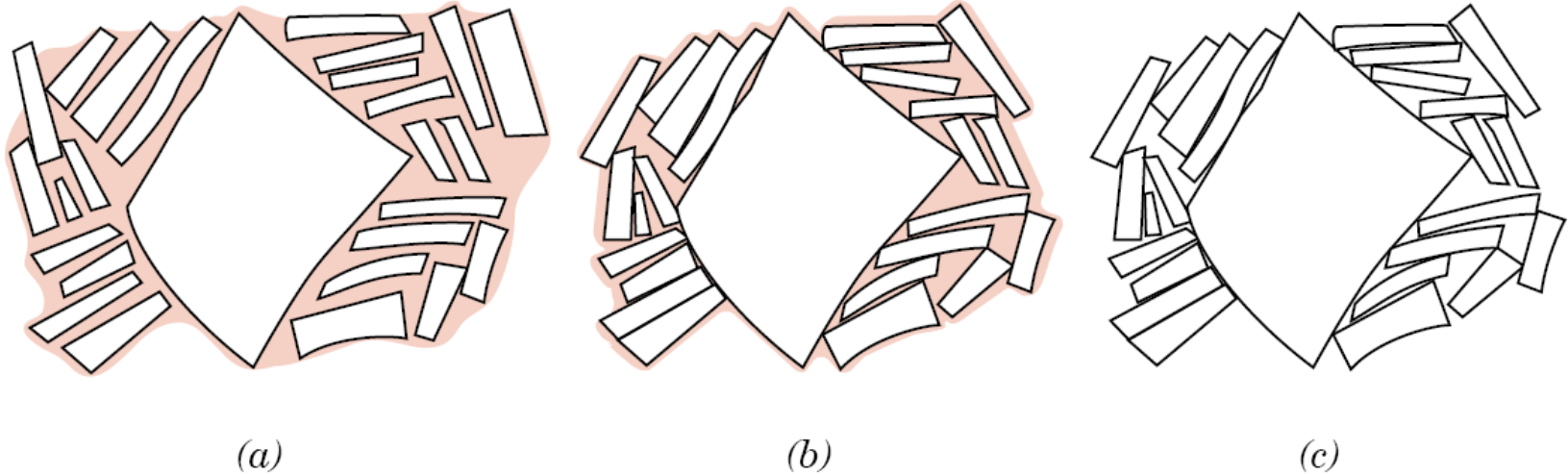


<https://matthey.com/-/media/images-products/3d-ceramic-printing-product-lm/ceramics-3d-printing-l.jpg>

<https://3dprint.com/wp-content/uploads/2014/09/lith-4.jpg>

<https://www.3dprintpulse.com/thumbs/large/4/8/1/481a4353923a3603aa7dac008fb9d2120d0d3a58.jpg>

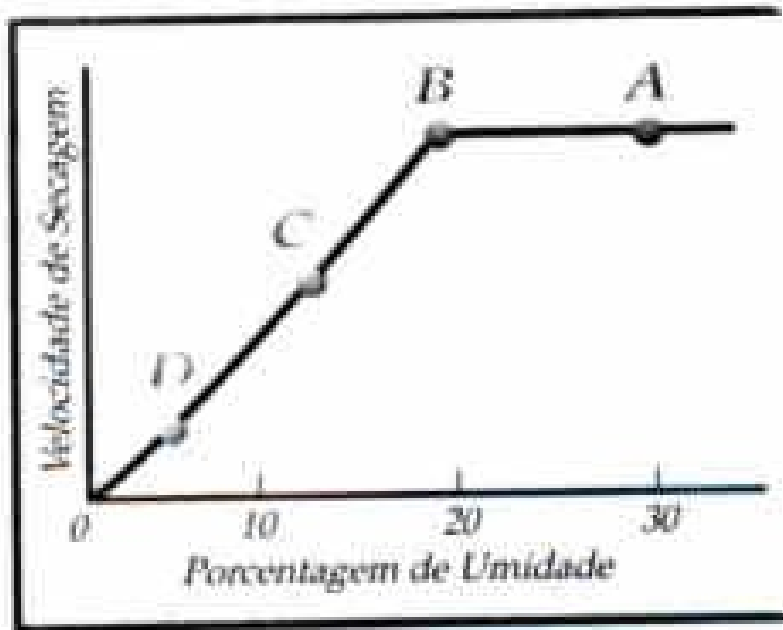
# Técnicas de fabricação – secagem



**FIGURE 14.21** Several stages in the removal of water from between clay particles during the drying process. (a) Wet body. (b) Partially dry body. (c) Completely dry body. (From W. D. Kingery, *Introduction to Ceramics*. Copyright © 1960 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)



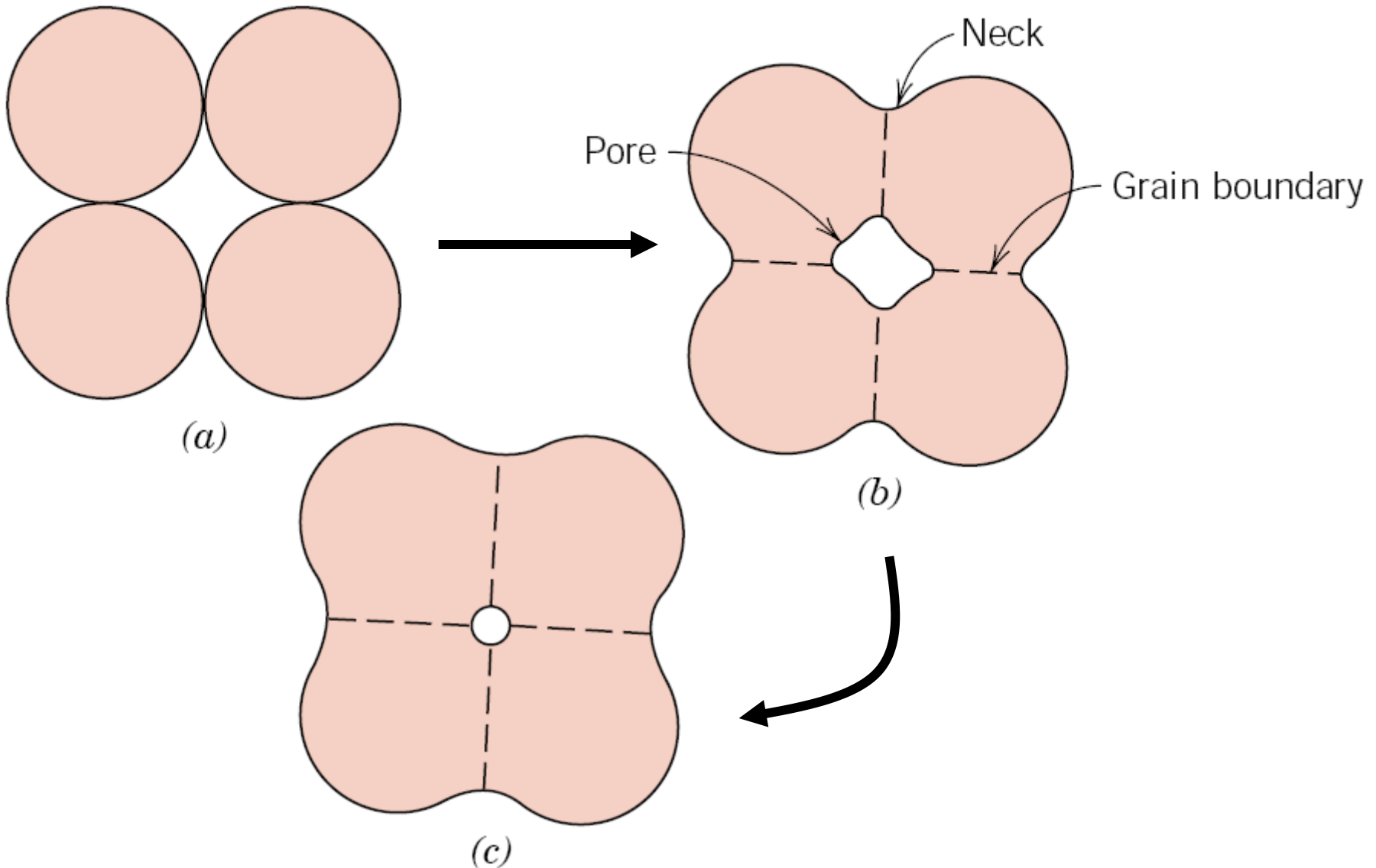
# Secagem



- Enquanto houver uma película (ou filme) de água entre as partículas, a secagem é acompanhada de retração da peça (aproximação das partículas e diminuição do tamanho do corpo).
- Após a eliminação da água entre as partículas não ocorre mais retração, mas ainda há umidade para ser removida.

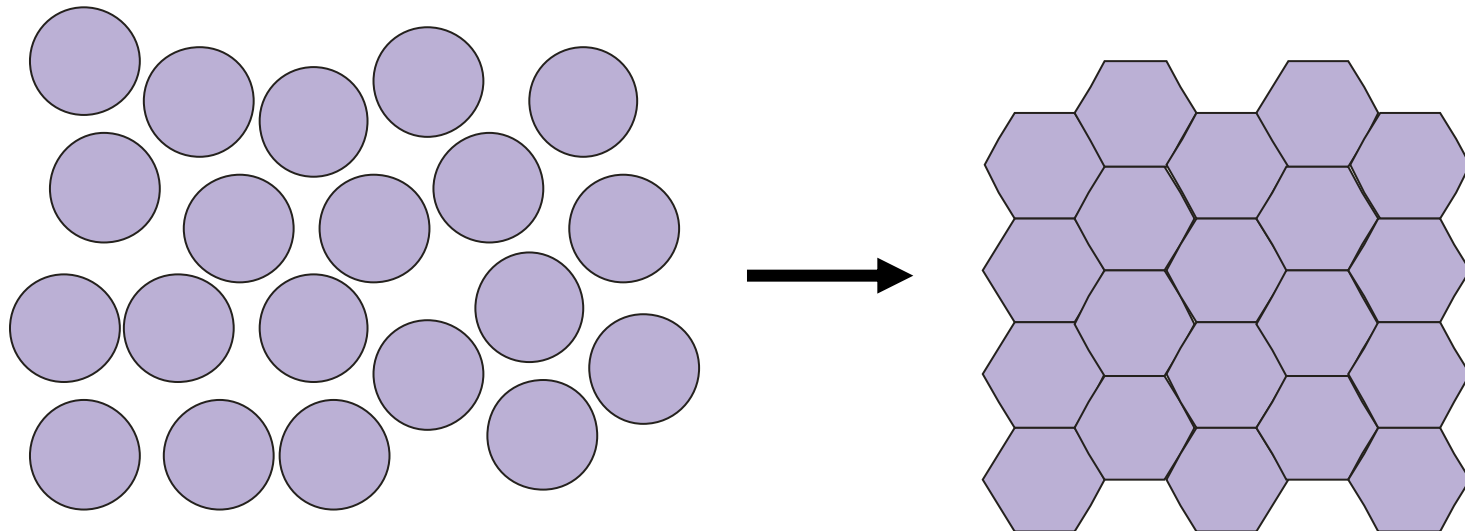


# Queima ou sinterização

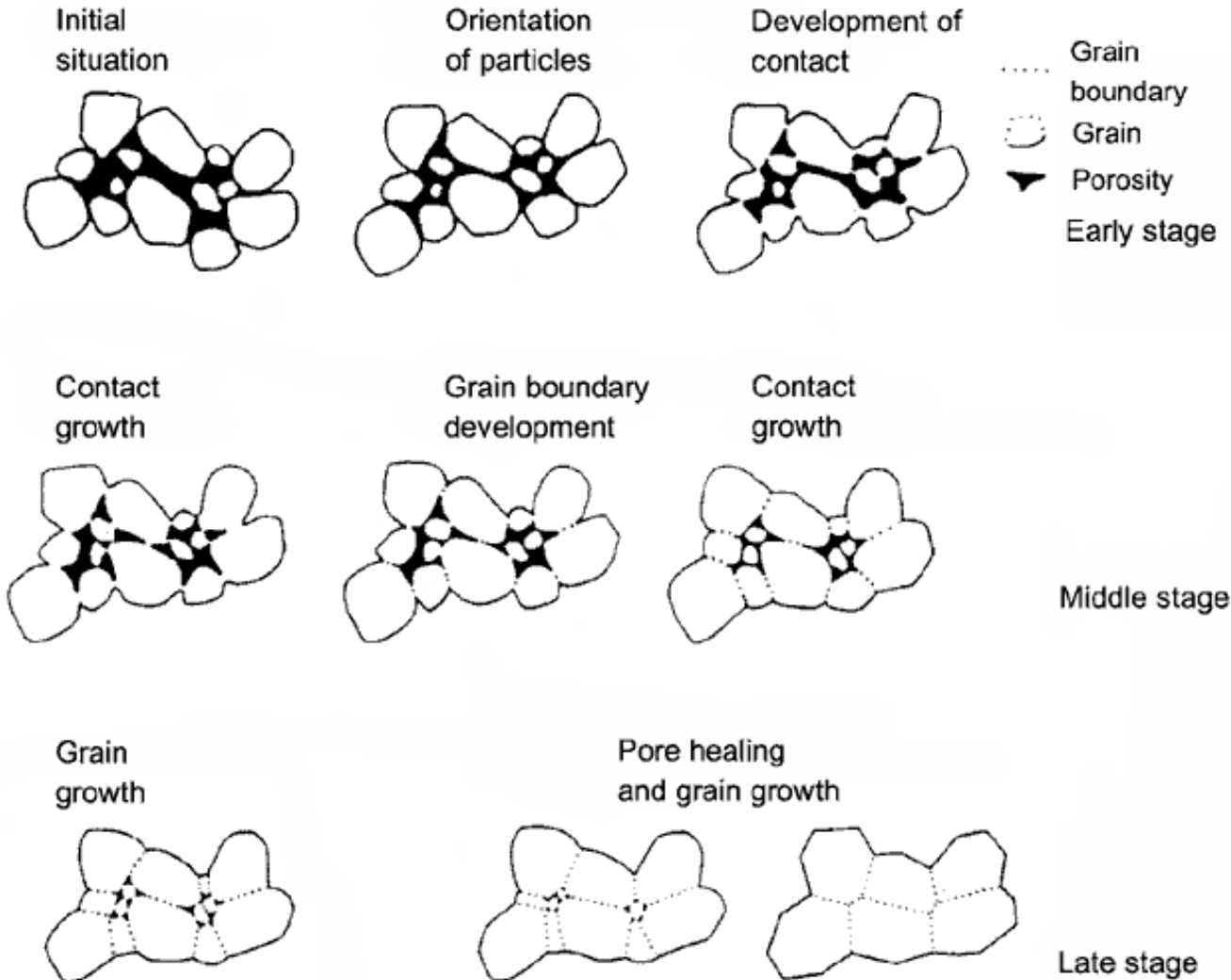


# Sinterização no estado sólido

- Na ausência de um líquido, dizemos que a sinterização ocorre no estado sólido, por diferentes mecanismos de transporte de material.



# Sinterização no estado sólido



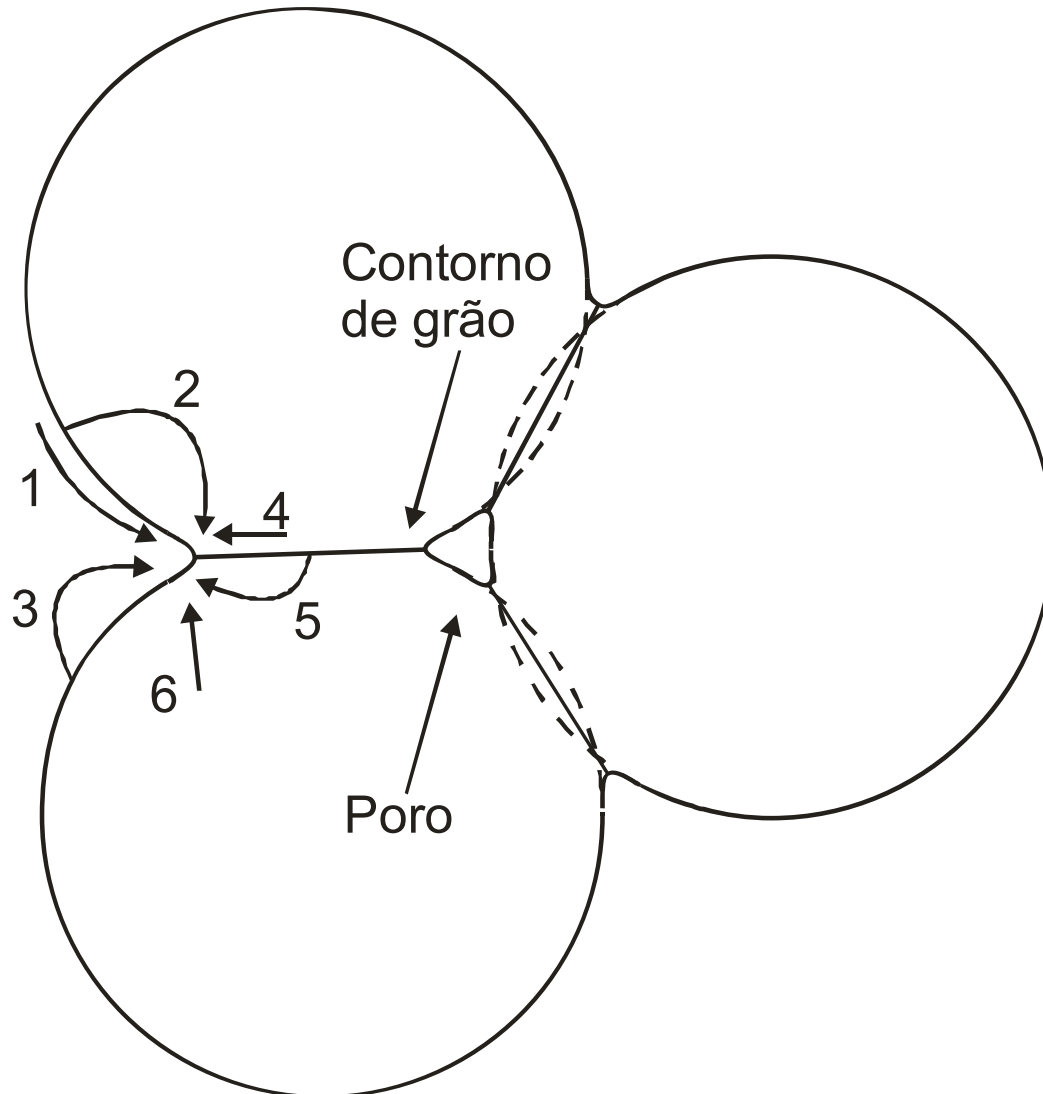
# Sinterização no estado sólido

- A **força motriz** para sinterização é a redução da energia de superfície no compacto de partículas.
- A redução de energia ocorre através de processos que envolvem difusão atômica, que levam a dois fenômenos diferentes:
  - **Densificação**: transporte de materiais para dentro dos poros e conseqüente diminuição do seu tamanho, podendo ocorrer até a total eliminação desses poros
  - **Crescimento de grãos ou poros** (*coarsening*), rearranjo de matéria na superfície dos poros, causando arredondamento, sem densificação.

# Sinterização no estado sólido

- As mudanças que ocorrem durante o processo de queima são relacionadas a
  1. mudanças no tamanho, número e formato dos grãos;
  2. mudanças no tamanho, número e formato dos poros, diminuindo a porosidade.
    - <https://www.youtube.com/watch?v=ah1Q6yqTdpA>
- Também podem ocorrer decomposição das matérias-primas, reações químicas, transformações polimórficas, etc.

# Mecanismos de sinterização no estado sólido



1- Difusão pela superfície;

2- Difusão pela rede (a partir da superfície);

3- Transporte por vapor (evaporação e condensação);

4- Difusão pelos contornos de grão;

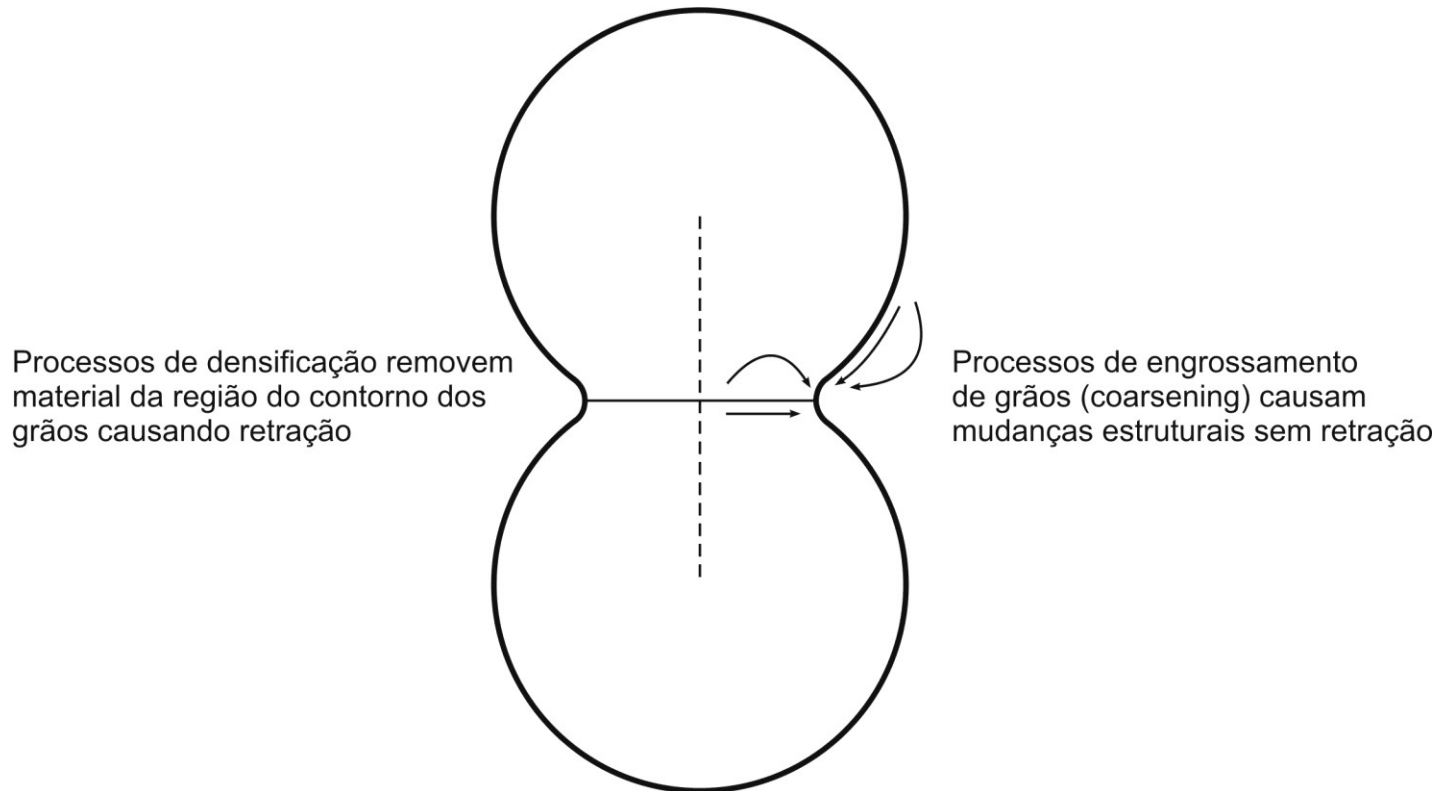
5- Difusão pela rede (a partir dos contornos);

6- Fluxo por deformação plástica (linhas de discordância – em metais).

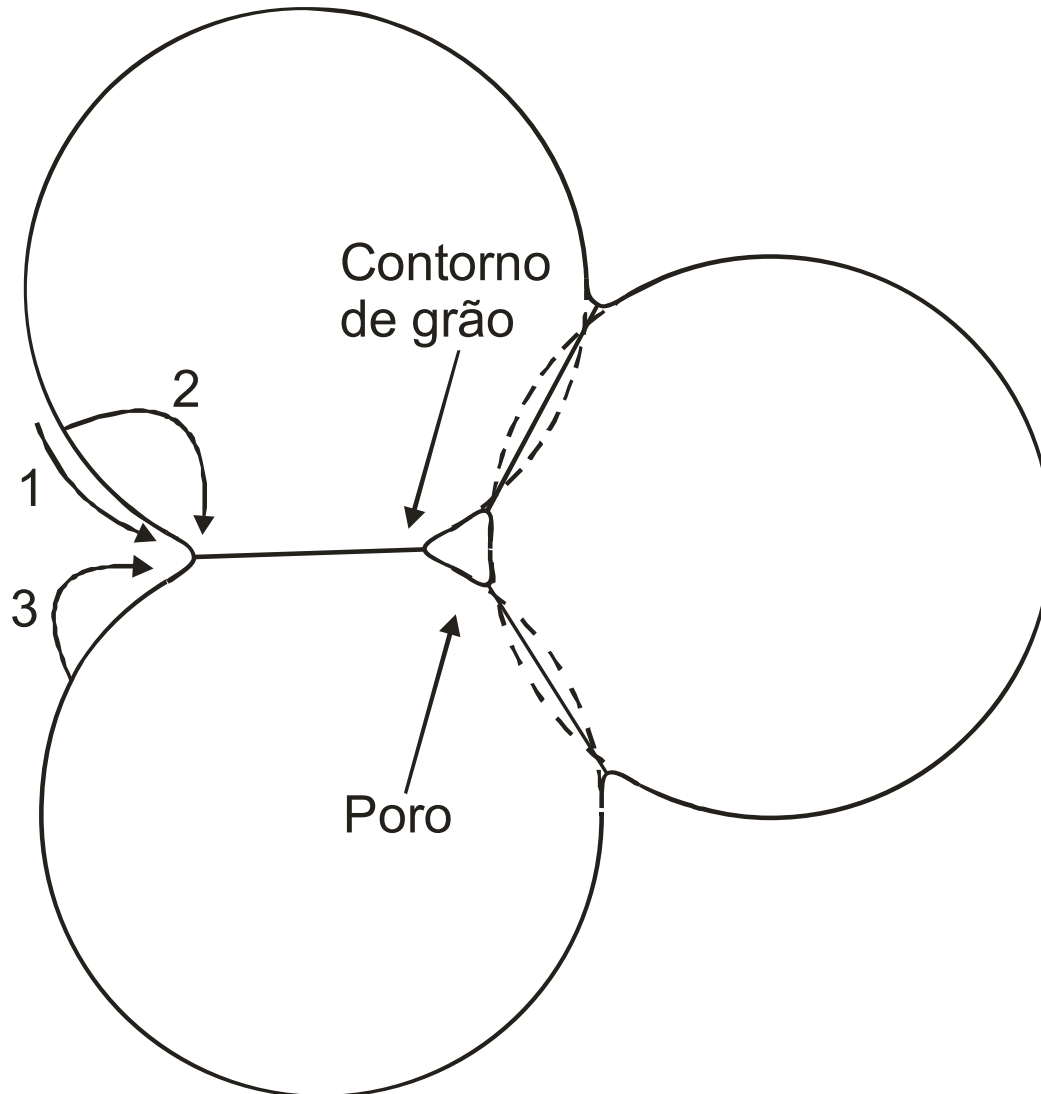


# Mecanismos que causam densificação vs. mecanismos sem densificação

- Apenas os mecanismos cujo material transportado vem do contorno de grãos causam retração e densificação (eliminação de poros).



# Mecanismos que não causam densificação (em azul)



1- Difusão pela superfície;

2- Difusão pela rede (a partir da superfície);

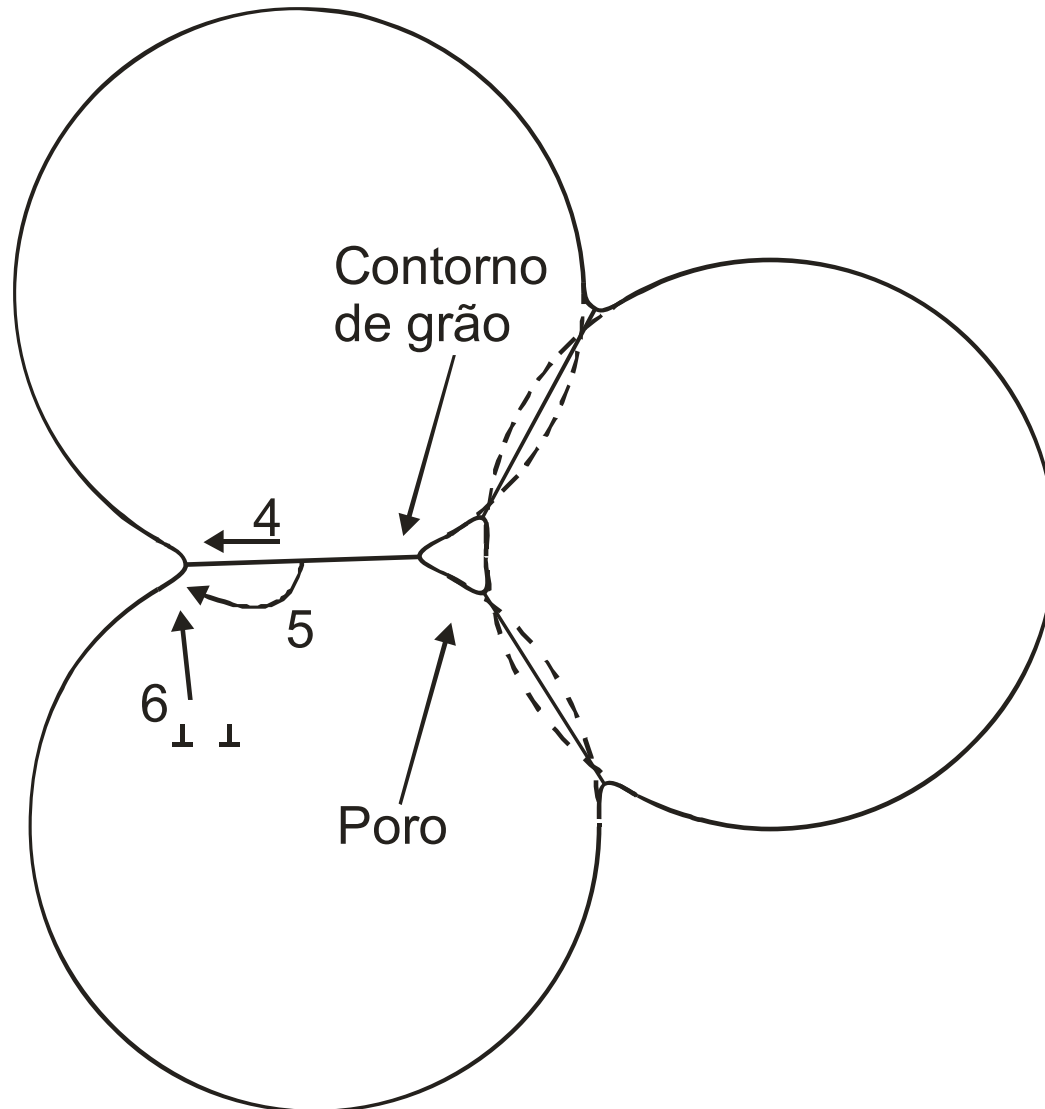
3- Transporte por vapor (evaporação e condensação);

4- Difusão pelos contornos de grão;

5- Difusão pela rede (a partir dos contornos);

6- Fluxo por deformação plástica (linhas de discordância – em metais).

# Mecanismos que causam retração e densificação (em azul)



1- Difusão pela superfície;

2- Difusão pela rede (a partir da superfície);

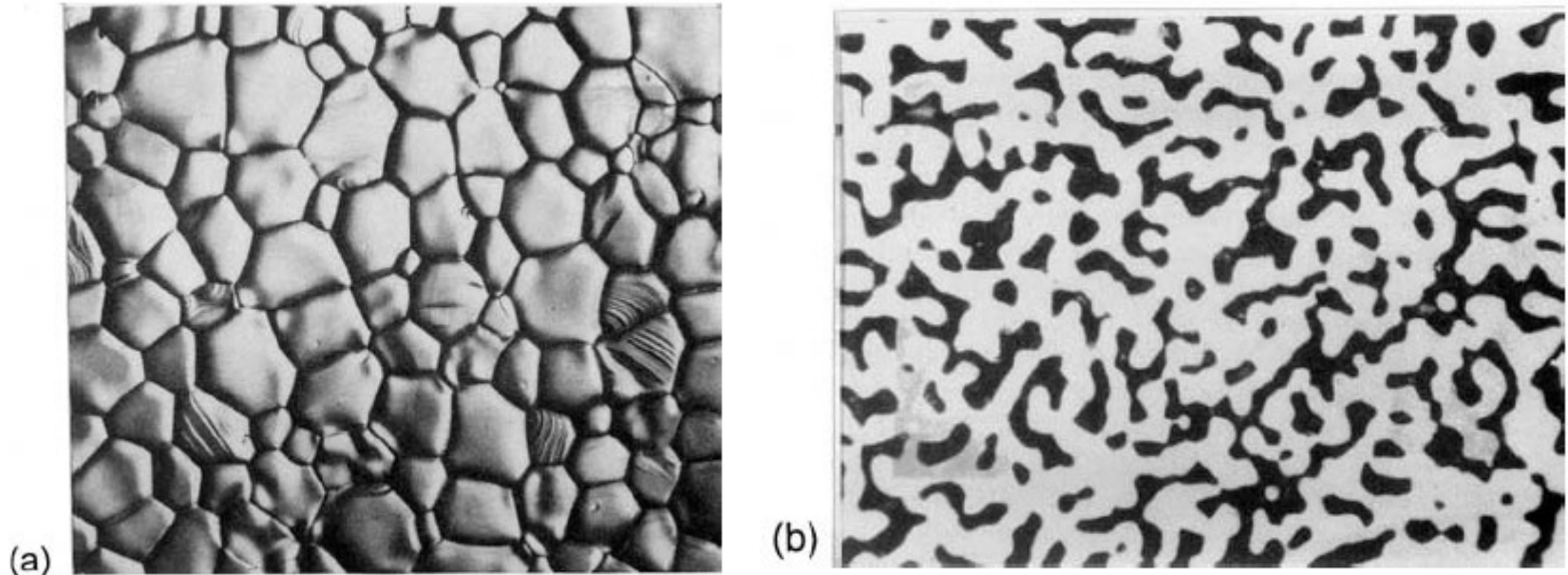
3- Transporte por vapor (evaporação e condensação);

4- Difusão pelos contornos de grão;

5- Difusão pela rede (a partir dos contornos);

6- Fluxo por deformação plástica (linhas de discordância – em metais).

# Sinterização no estado sólido



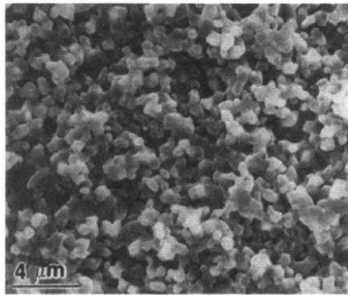
- (a) A superfície de uma cerâmica de alumina da qual toda a porosidade foi removida durante a queima do pó; a microestrutura consiste de grãos cristalinos regulares e contornos de grãos (interfaces) entre eles.
- (b) A sinterização de silício resulta na formação de uma rede contínua de material sólido (branco) e porosidade (preto); essa mudança microestrutural não é acompanhada de retração.

# *Coarsening* (crescimento de grãos)

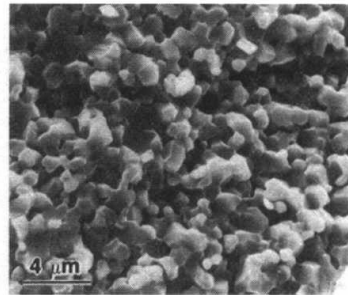
- O maior problema para a obtenção da máxima densidade (mínimo de poros) é o crescimento de grãos, que reduz a força motriz para densificação.
  - Vídeo 1: crescimento de grãos
  - Vídeo 2: crescimento de grãos e poros, sem densificação
- Ocorre “competição” entre densificação e crescimento de grãos, durante a queima, ambos com redução de energia superficial



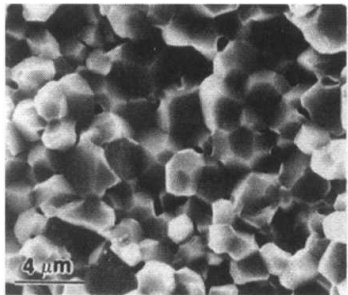
# Sinterização no estado sólido



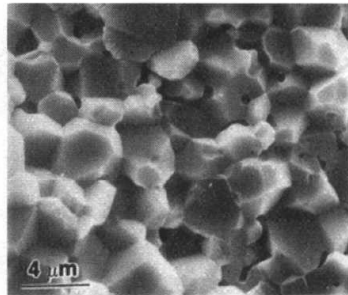
(a)



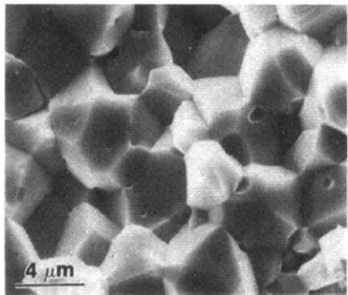
(b)



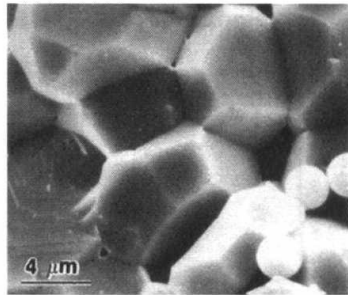
(c)



(d)



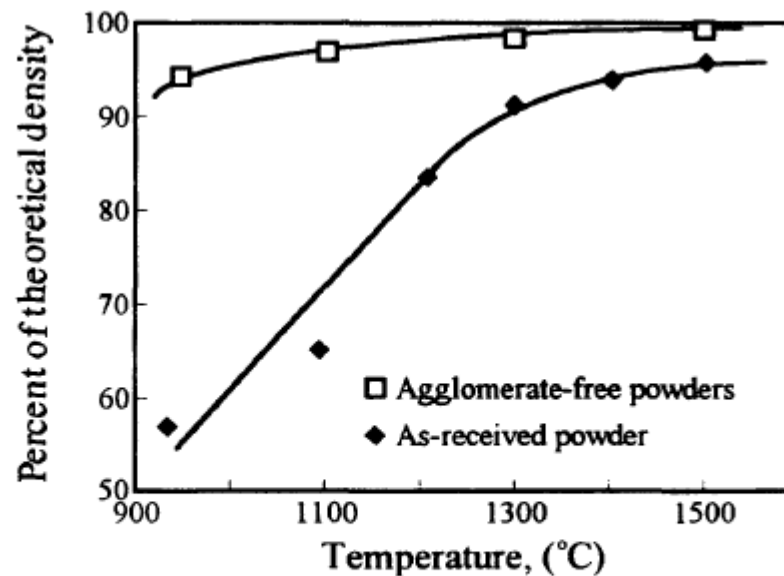
(e)



(f)

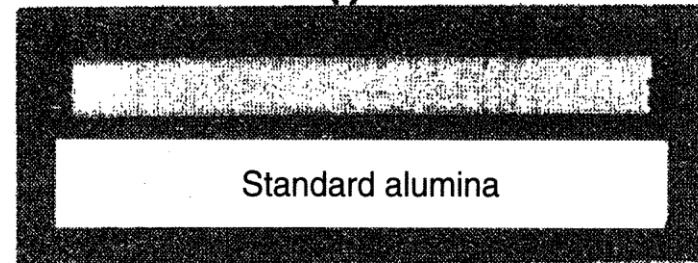
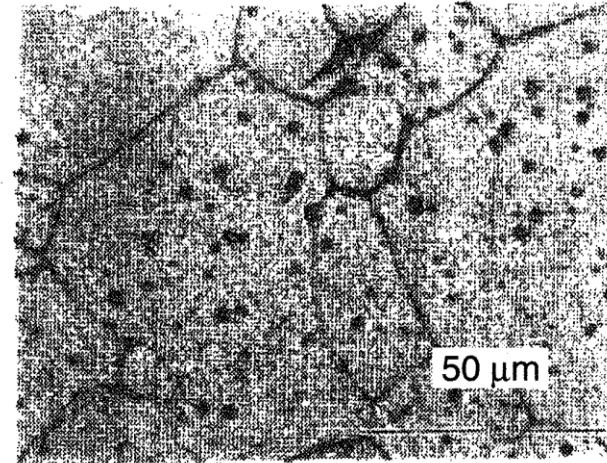
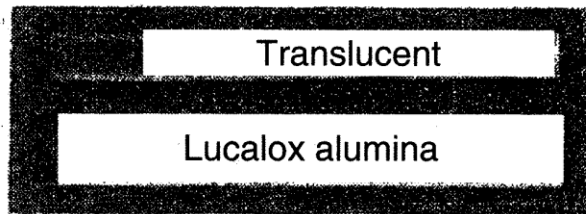
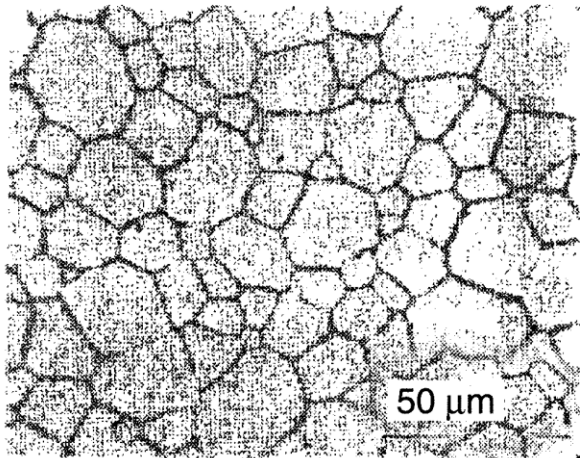
Desenvolvimento da microestrutura de uma alumina dopada com MgO sinterizada em ar a 1600°C em função do tempo. (Barsoum)

# Microestruturas cerâmicas



**Figure 10.10** Temperature dependence of sintered density for an agglomerated or “as-received” and agglomerate-free yttria-stabilized zirconia powder (1 h). Eliminating the agglomerates in the green body resulted in a powder compact that densified much more readily.<sup>157</sup>

# Efeitos de poros na transparência



# Uso de $\text{Al}_2\text{O}_3$ translúcido

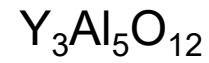
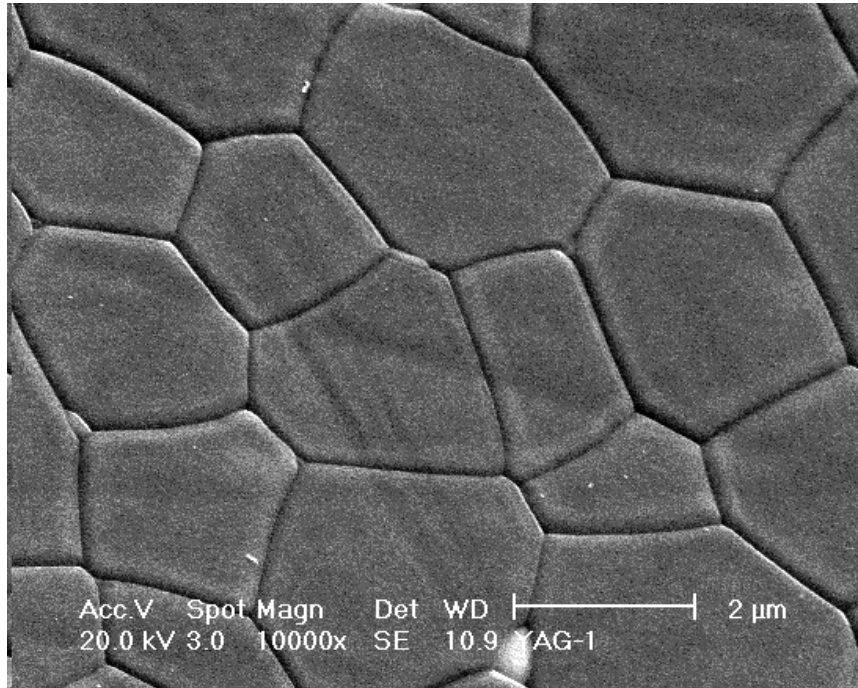


(c)

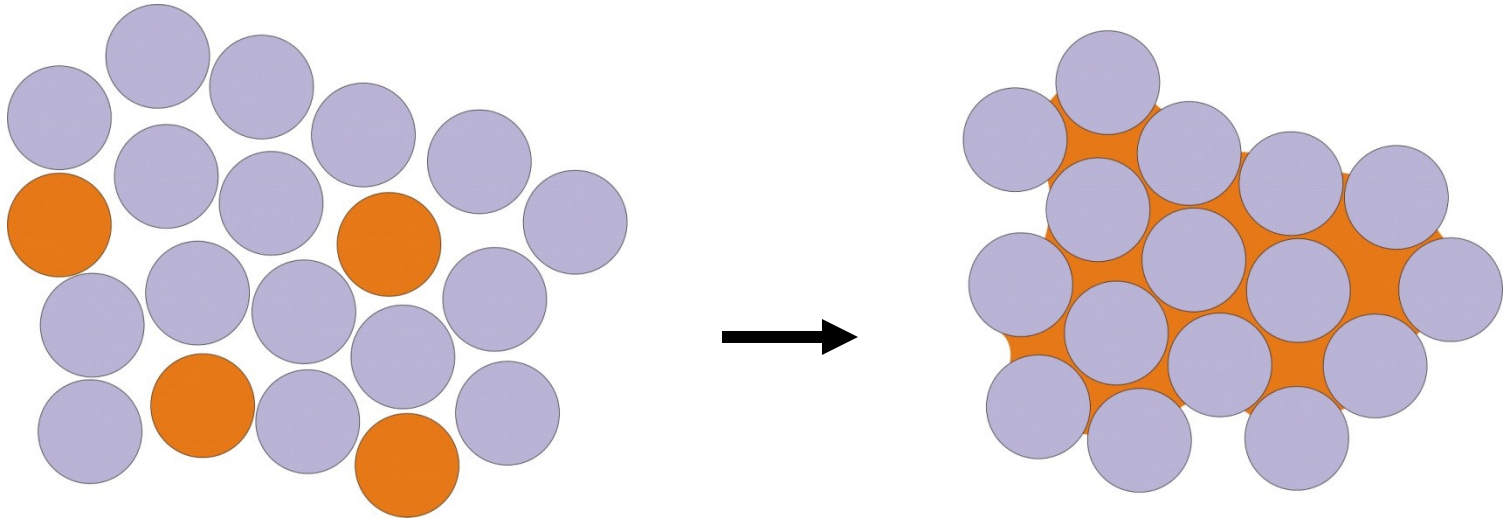
**FIGURE 14.9** Comparison of the microstructure and translucency of relatively pore-free  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (a) with that of opaque  $\text{Al}_2\text{O}_3$  containing pores trapped in grains. (b) Translucent  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tubes are used in sodium vapor lamps that provide energy efficient street lights. (Courtesy of General Electric.)



# Microestruturas cerâmicas

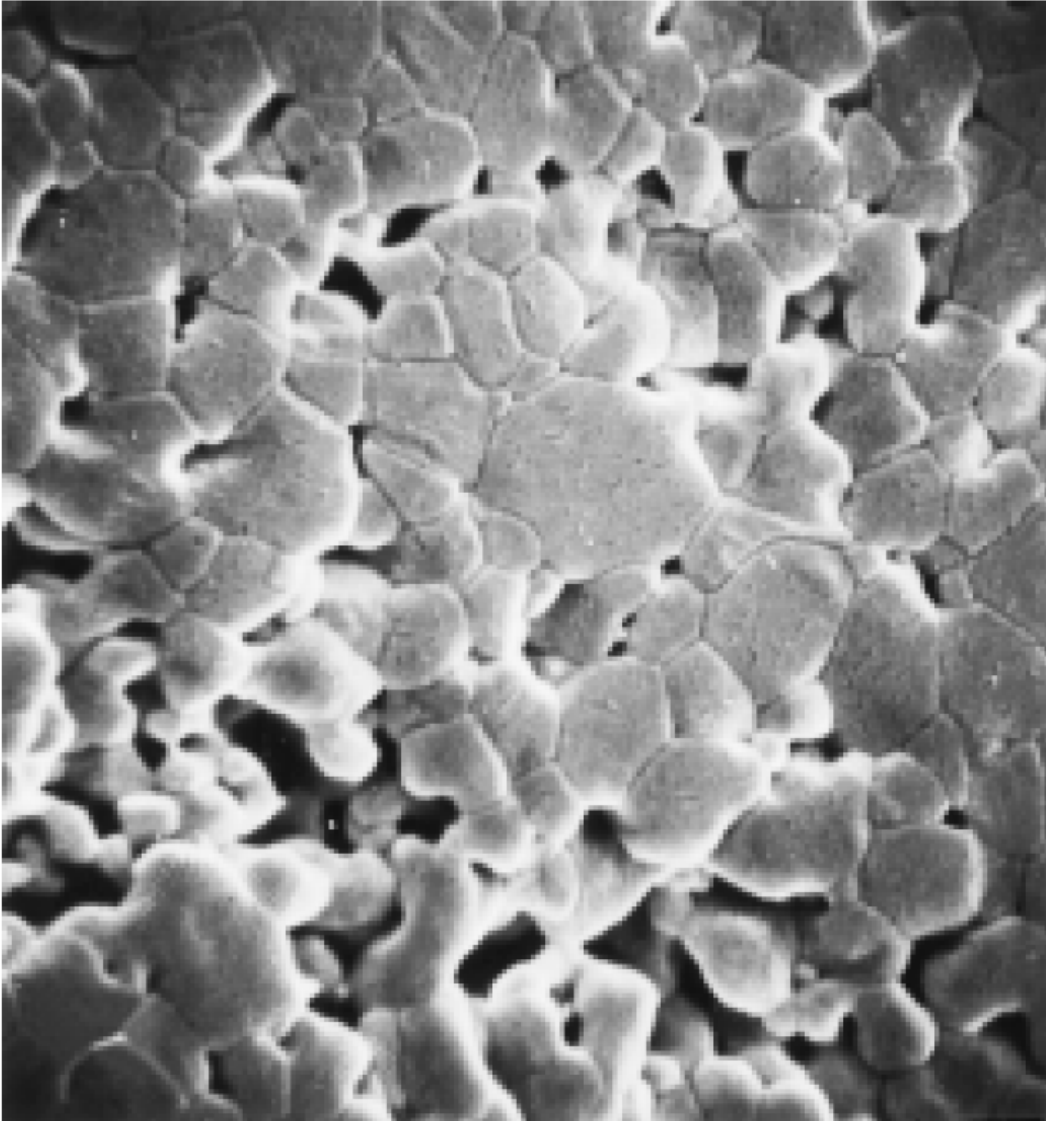


# Sinterização com fase líquida



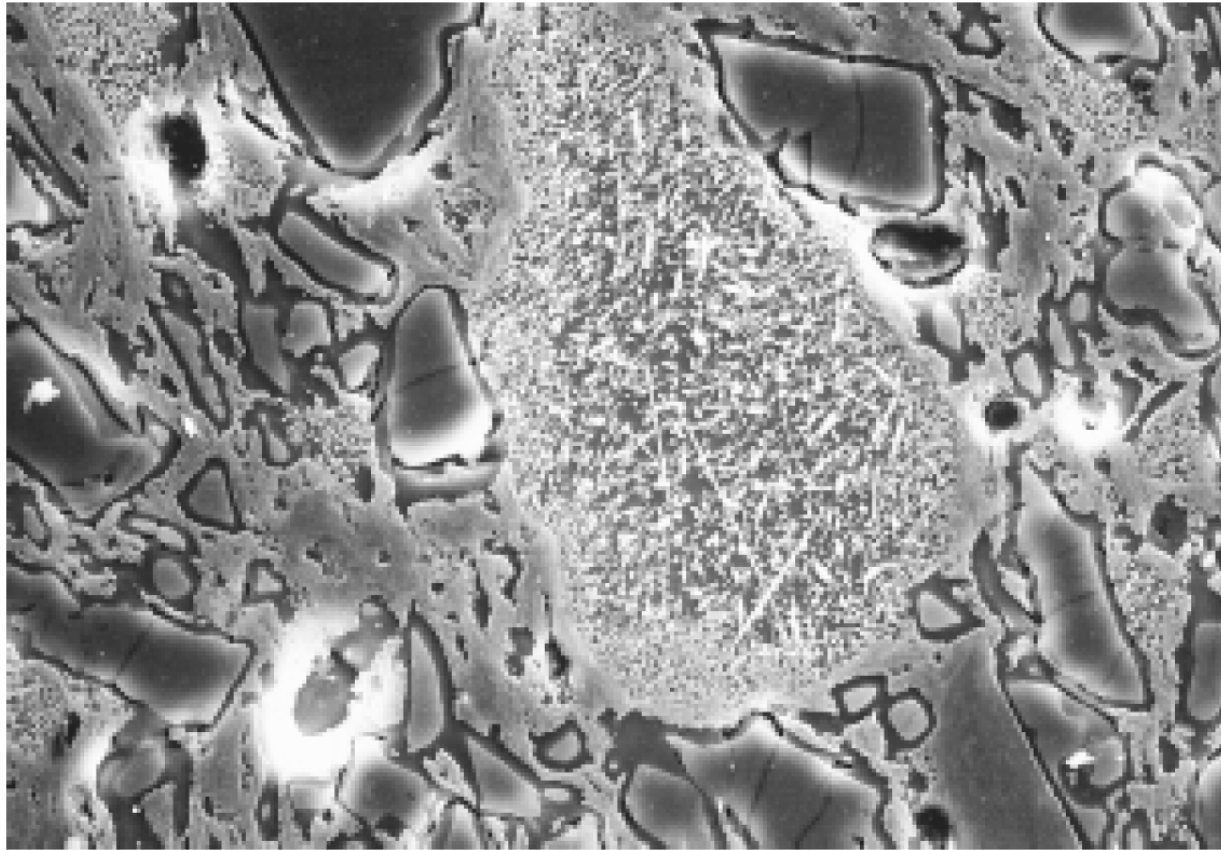
A fase líquida pode ainda ser reativa, gerando um caminho de difusão para a sinterização no estado sólido, ou formar toda a fase presente no sistema – nesse último caso ocorre então **sinterização por fluxo viscoso**, em vidros e vidrados.

# Microestrutura cerâmica



**FIGURE 14.25** Scanning electron micrograph of an aluminum oxide powder compact that was sintered at 1700°C for 6 min. 5000×. (From W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2nd edition, p. 483. Copyright © 1976 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

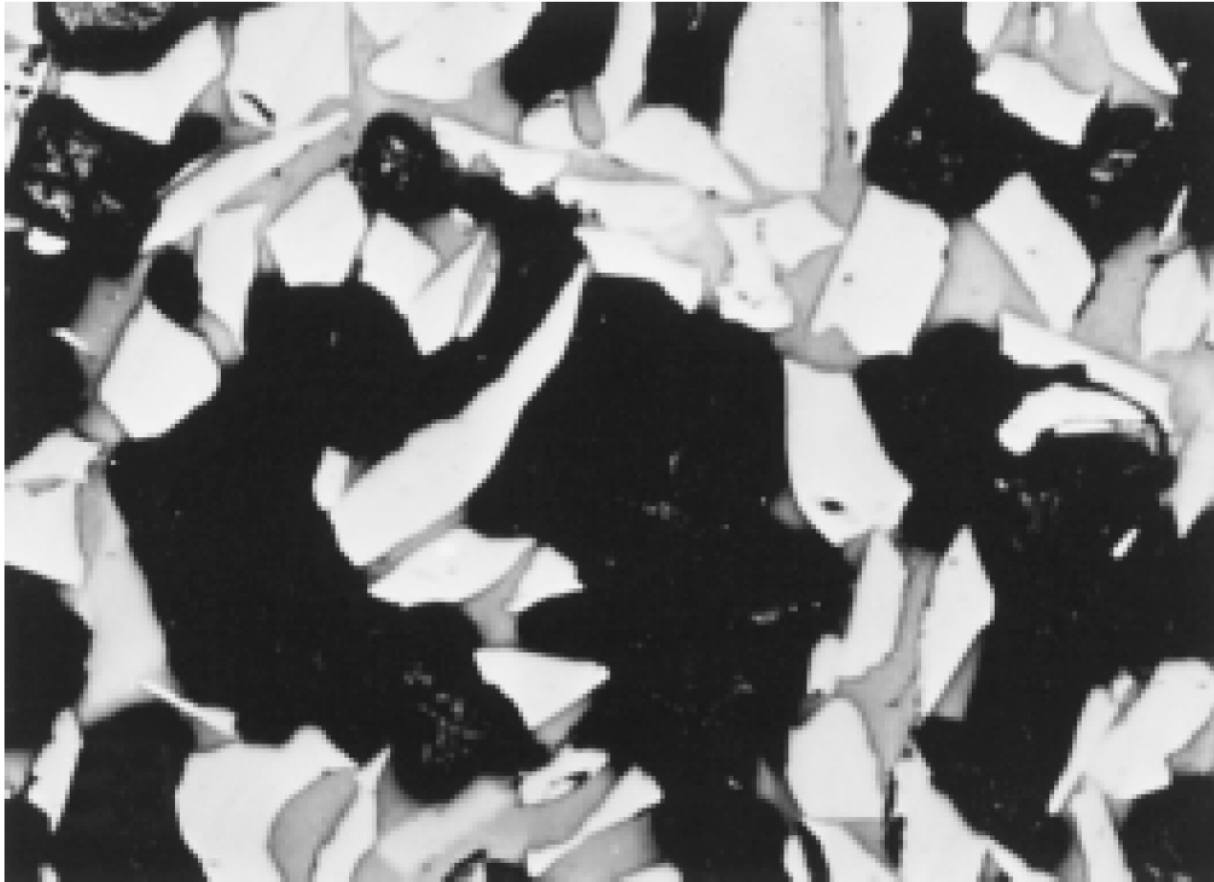
# Microestrutura cerâmica – porcelana



**FIGURE 14.22** Scanning electron micrograph of a fired porcelain specimen (etched 15 s, 5°C, 10% HF) in which may be seen the following features: quartz grains (large dark particles) which are surrounded by dark glassy solution rims; partially dissolved feldspar regions (small unfeatured areas); mullite needles; and pores (dark holes with white border regions). Also, cracks within the quartz particles may be noted, which were formed during cooling, as a result of the difference in shrinkage between the glassy matrix and the quartz. 1500×. (Courtesy of H. G. Brinkies, Swinburne University of Technology, Hawthorn Campus, Hawthorn, Victoria, Australia.)



# Microestrutura cerâmica – abrasivo



**FIGURE 13.7** Photomicrograph of an aluminum oxide bonded ceramic abrasive. The light regions are the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  abrasive grains; the gray and dark areas are the bonding phase and porosity, respectively. 100 $\times$ . (From W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2nd edition, p. 568. Copyright © 1976 by John Wiley & Sons. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)