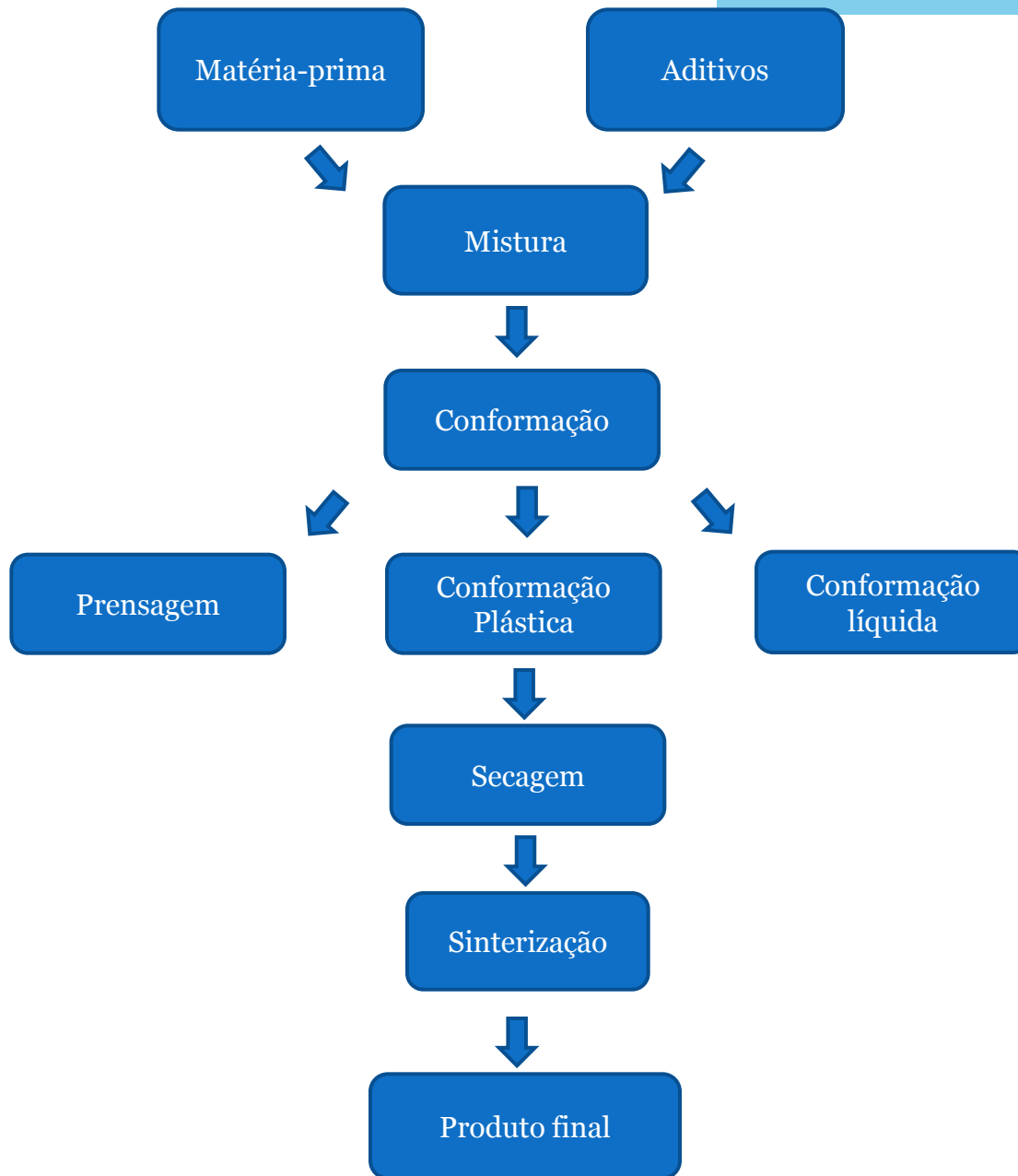


Processamento de Materiais Cerâmicos

Processos de Conformação

Eliria M. J. Agnolon Pallone



Métodos de Conformação

O método de conformação é escolhido dependendo da *forma e complexidade da peça a ser fabricada, volume de produção, acabamento posterior , entre outros.*



O processo de conformação não só inclui produzir compactos com formato e dimensões desejadas, mas também produzir compactos com máxima densidade e uniformidade.

De um modo geral, os métodos de conformação podem ser agrupados de acordo com *as propriedades reológicas da massa cerâmica* utilizada.

Principais Métodos de Conformação

➤ **Prensagem**

- Prensagem unidirecional e bidirecional
- Prensagem isostática
- Prensagem a quente e prensagem isostática a quente
- Prensagem por SPS (“spark plasma sintering”)

➤ **Conformação de massas plásticas**

- Extrusão
- Torneamento
- Moldagem por injeção

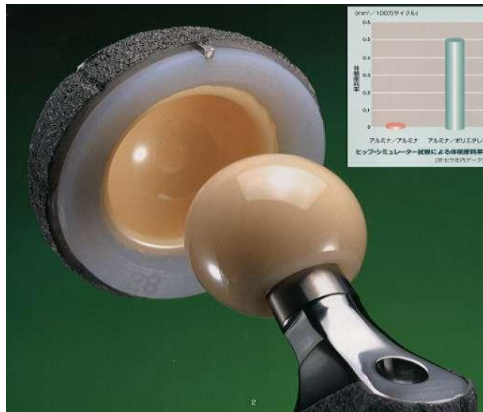
➤ **Conformação líquida ou colagem de barbotina**

- Colagem de barbotina em molde de gesso
- Colagem de fita (“tape casting”)

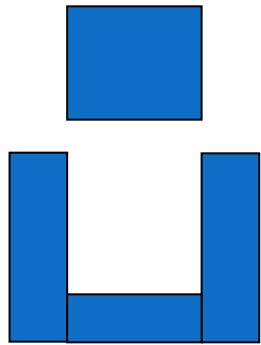
Prensagem

Prensagem a seco – baixa umidade (<4%) ou umidade zero (necessário uso de ligantes e lubrificantes orgânicos).

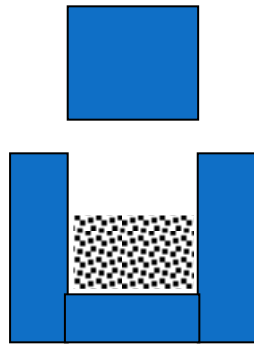
Prensagem semi-seca – 5 a 15% de umidade.



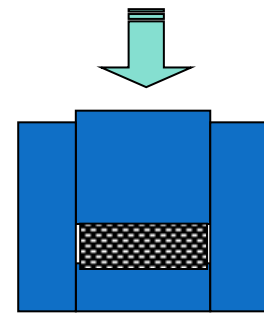
Prensagem



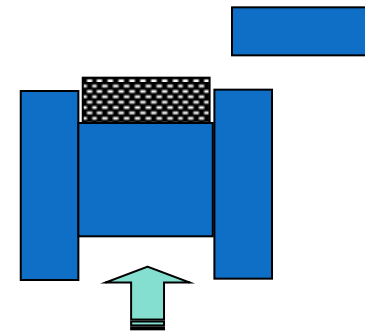
Preparação
do molde



Preenchimento
do molde



Compressão



Ejeção

Prensagem

Etapas de prensagem:

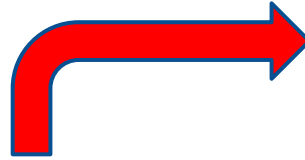
- 1. Preenchimento do molde**
- 2. Compactação**
- 3. Retirada da peça**

Problemas: obtenção de uniformidade de pressão no interior do corpo prensado, de modo a resultar na correspondente uniformidade de densidade de empacotamento de prensagem

Na sinterização – se o corpo sofrer retração com a diminuição da porosidade a retração será maior nas regiões com menor densidade, provocando uma deformação do corpo

Etapas de prensagem: preenchimento do molde

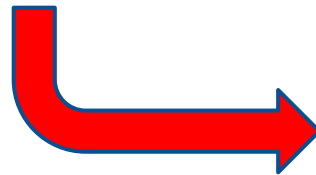
**Empacotamento das partículas
varia com as características
do pó**



**Distribuição de tamanho
das partículas e forma
das partículas.**

Menos esféricas - ↓ Densidade
empacotamento.

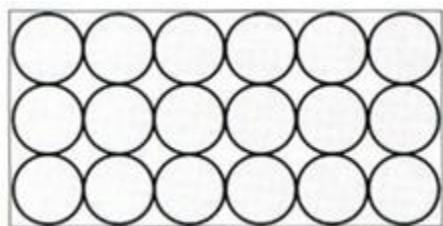
↓ tamanho - ↑ efeito devido a
grande área superficial.



**Estado de aglomeração,
densidade e resistência
mecânica dos grânulos**

Etapas de prensagem: preenchimento do molde

Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento



sistema monodisperso



máxima densidade de empacotamento teórica



deficiência de partículas pequenas



deficiência de partículas grandes



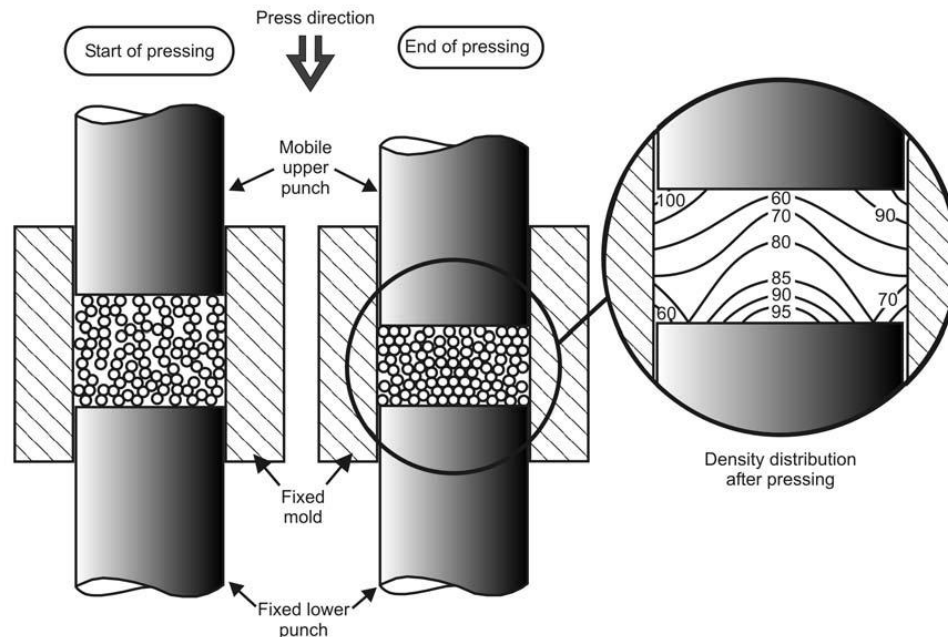
distribuição inadequada de tamanhos de partículas

Etapas de prensagem: compactação

2. Compactação

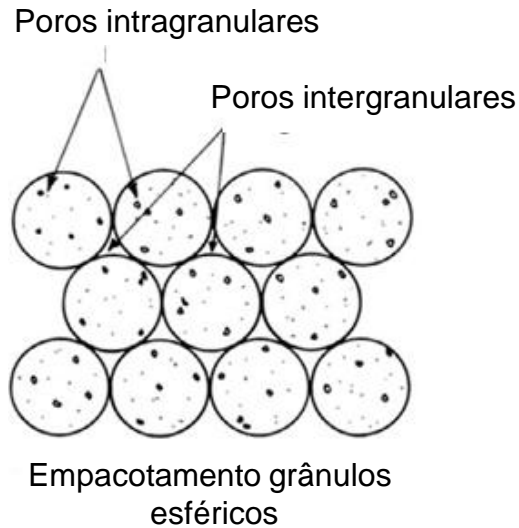
- a porosidade diminui
- agregados se quebram
- aumenta o número de contatos entre as partículas

→ Uniformidade de pressão no interior do corpo prensado – forças de atrito entre o compacto e a parede do molde resulta num gradiente de pressão e conseqüentemente, num **gradiente de densidade no corpo compactado**.

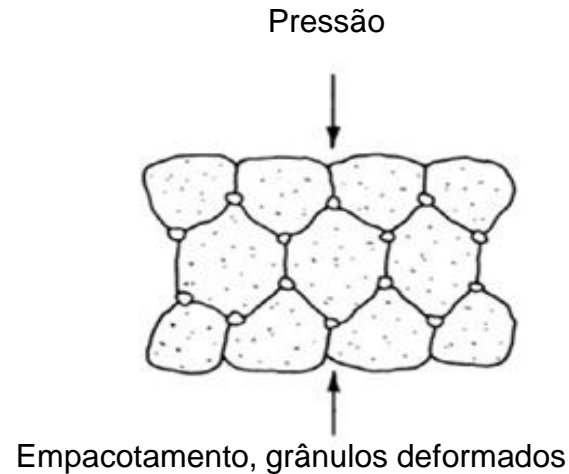


Etapas de prensagem: compactação

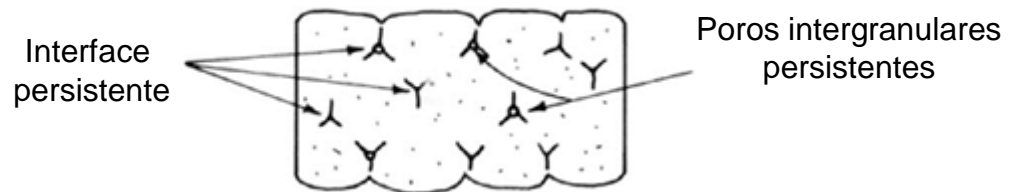
Três estágios de compactação



Estágio 1. Empacotamento de grânulos e rearranjo



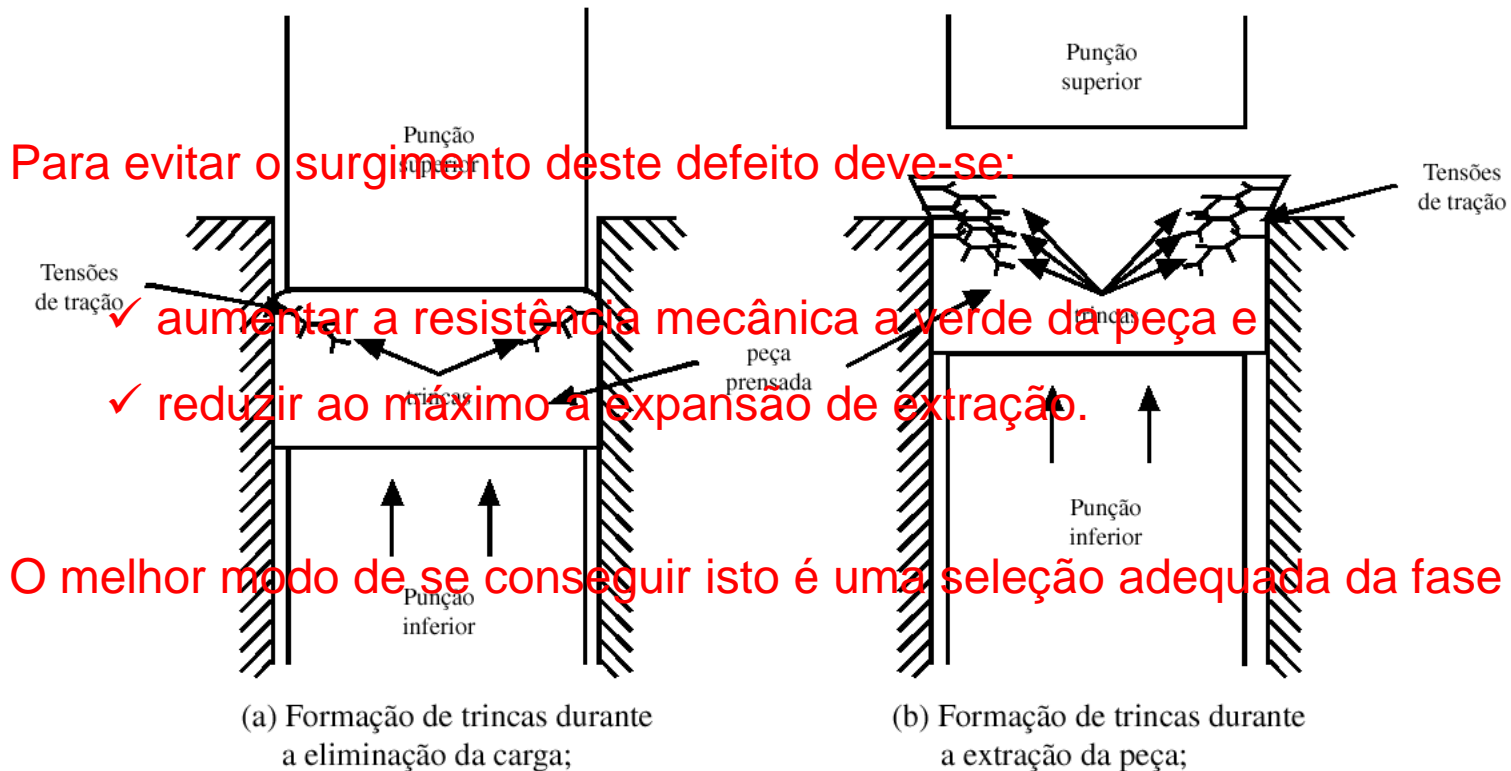
Estágio 2. Deformação dos grânulos



Estágio 3. Densificação dos grânulos

Etapas de prensagem: Retirada da peça

À medida que a peça é extraída do molde, sua secção aumenta de tamanho. Esta expansão provoca o surgimento de tensões de tração na peça, logo acima da borda superior da matriz, provocando a aparição de trincas laminares, quando o valor destas tensões supera o da resistência mecânica do material.



Prensagem “sinterização por plasma”

SPS

**prensagem uniaxial
a quente**

**prensagem isostática
a quente**

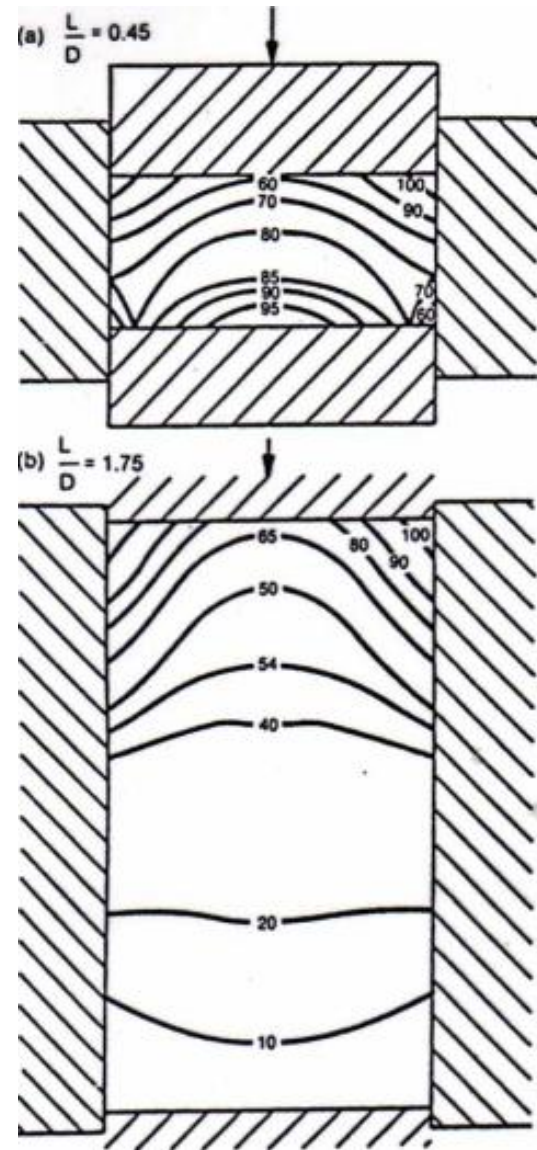
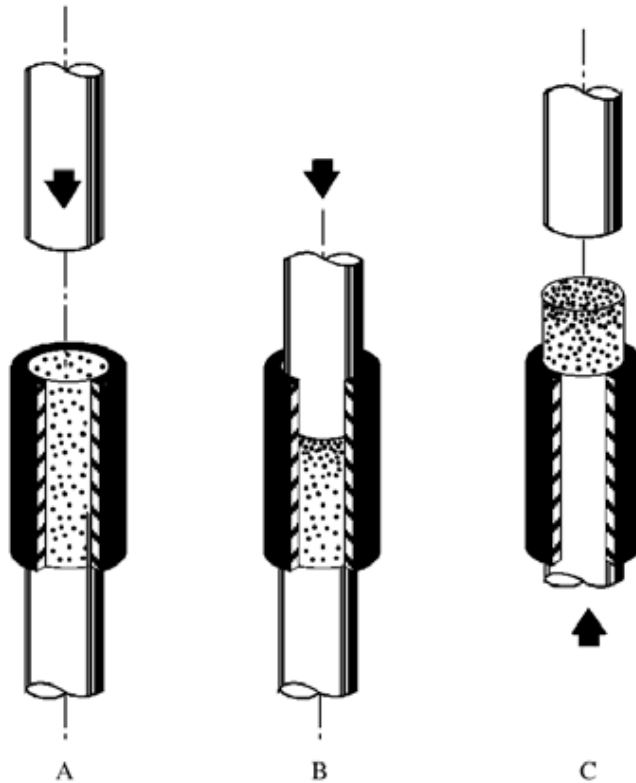
Prensagem

**prensagem uniaxial
Ação simples**

**prensagem uniaxial
Dupla ação**

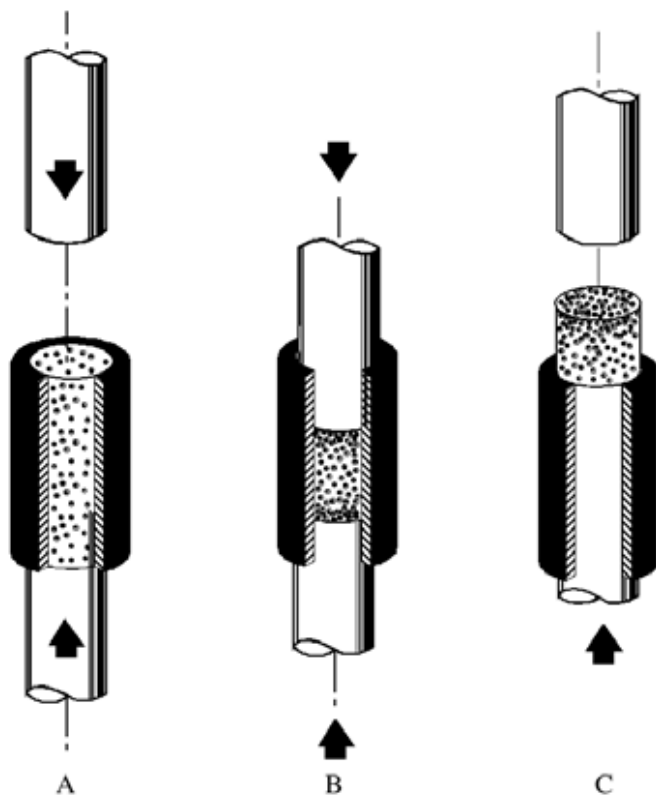
Prensagem isostática

Prensagem de ação simples



A prensagem uniaxial de ação simples é empregada quando se necessita obter peças de geometria simples e de espessura reduzida.

Prensagem uniaxial de dupla ação



Tanto o punção superior como o inferior exercem pressão sobre a massa contida no molde. Uma vez finalizada a aplicação da carga, a retirada do punção superior e o movimento ascendente do punção inferior permitem a extração da peça.

Neste caso a distribuição de densidades ao longo da peça é simétrica

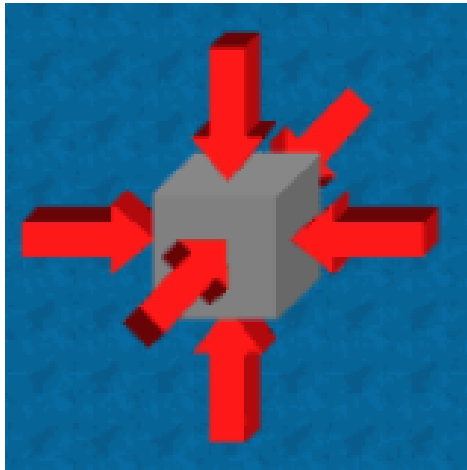
Empregada quando a espessura da peça é muito grande para o emprego da técnica de ação simples

Prensagem isostática

- ✓ Consiste na aplicação de pressão igualmente ao pó por todos os lados
- ✓ Tem como objetivo promover um maior empacotamento das partículas, aumentando a densidade de forma homogênea.



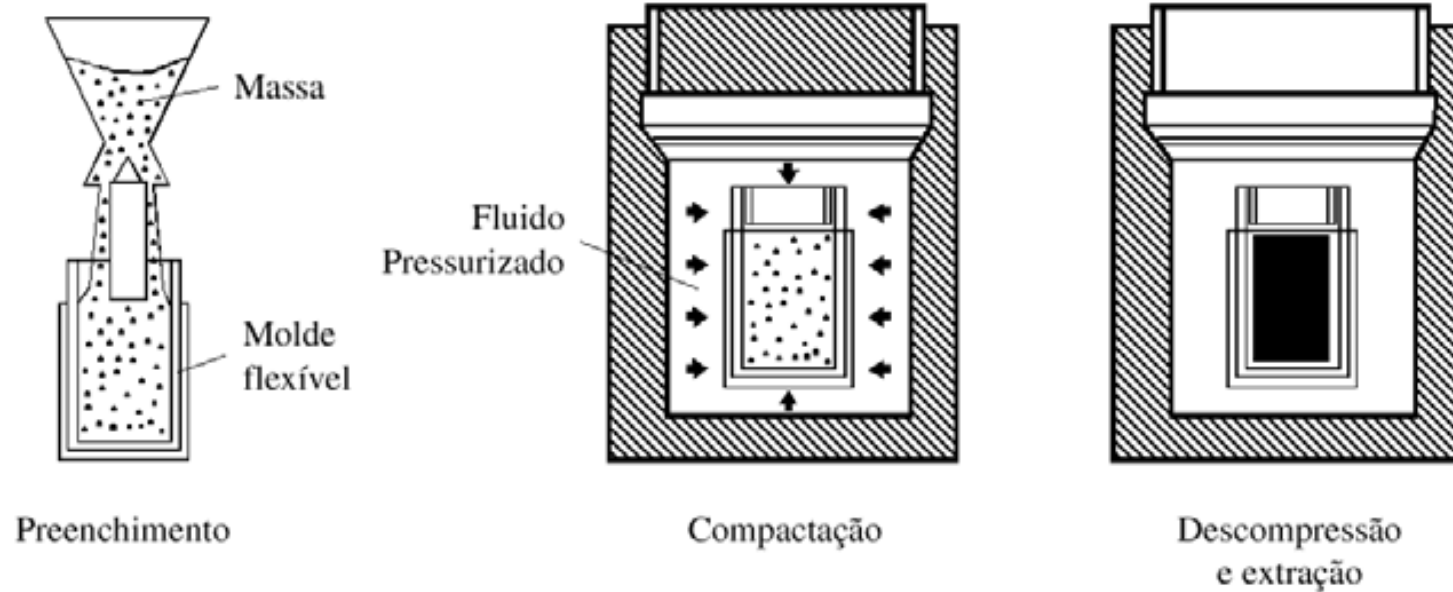
Reduz a fricção e problemas de não-uniformidade do pó no molde
Minimiza o gradiente de tensão



Prensagem isostática

técnica do molde úmido

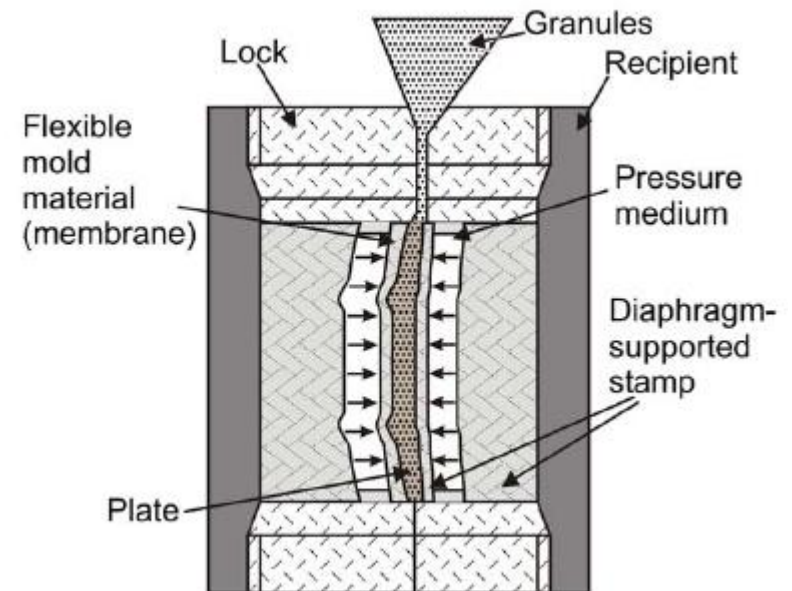
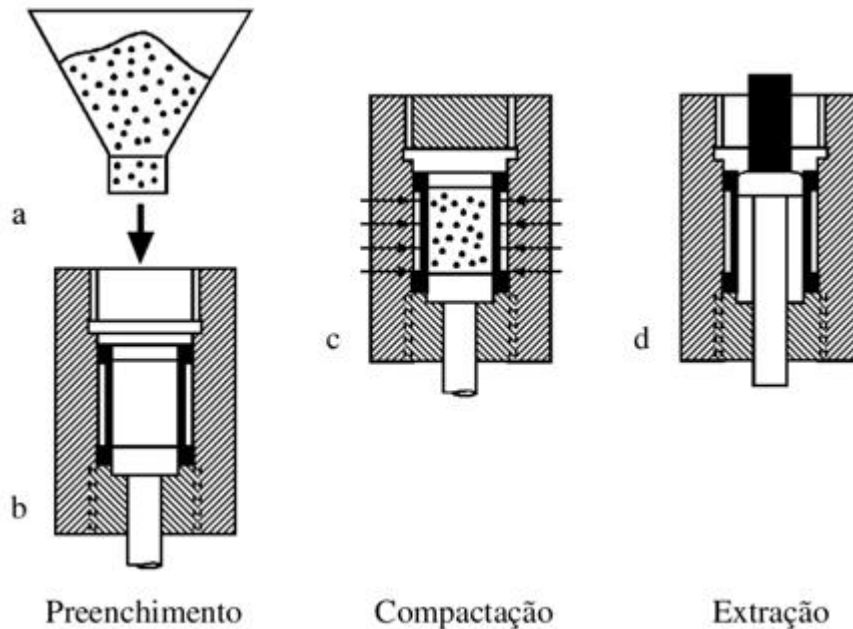
Consiste de um vaso de pressão em que o pó é conformado num molde de borracha imerso num fluido não compressível. Fluido é pressurizado transmitindo a pressão uniformemente a todas as superfícies do molde



Prensagem isostática

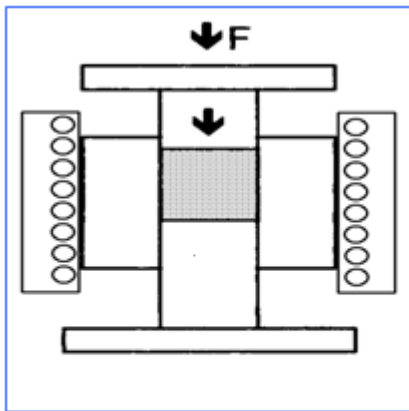
técnica do molde seco

- Pressão é aplicada radialmente por meio de um líquido pressurizado entre um molde flexível e uma casca rígida.
- Basicamente, nesta técnica, em vez de submergir o molde em um fluido, ele é feito com canais internos por onde se faz circular o fluido pressurizado.



Prensagem a quente

A técnica de prensagem a quente consiste da aplicação simultânea de pressão e temperatura. A prensagem é uniaxial em um molde refratário confinado no interior de um forno.



A QUENTE

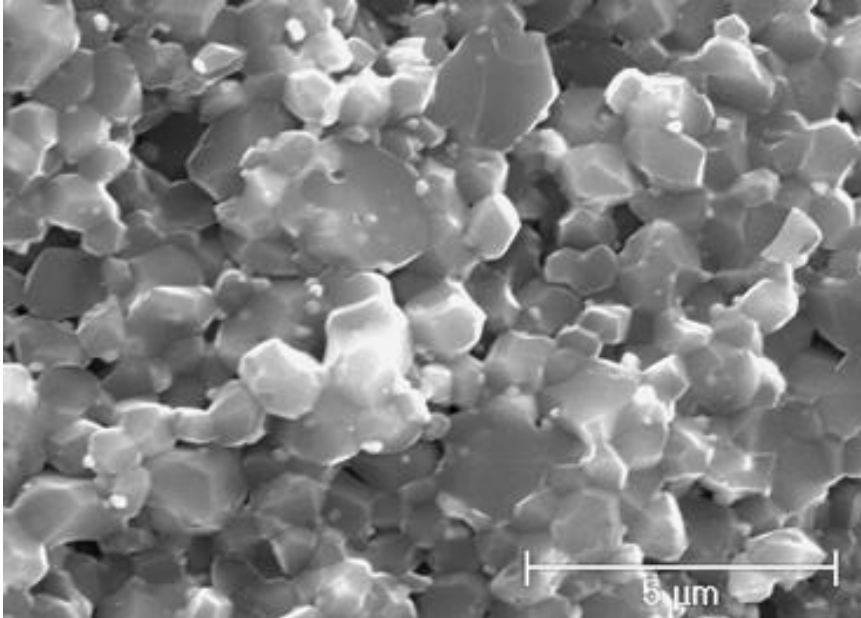
↳ Envolve altos custos e produção lenta, os moldes utilizados normalmente de grafites são caros e de curta durabilidade.

↳ Limite nas formas a serem prensadas.

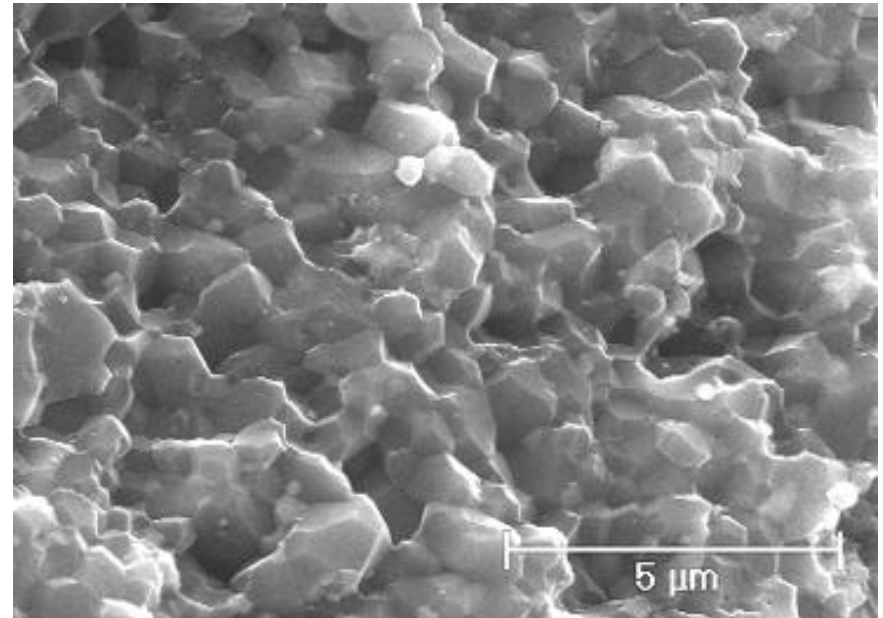
↳ Necessita de temperaturas inferiores as sinterizações convencionais.

Usada quando necessita-se de alta densidade em sistemas que apresentam dificuldade de densificação usando sinterização convencional.

Conformação por prensagem isostática (sinterização sem pressão) e prensagem a quente



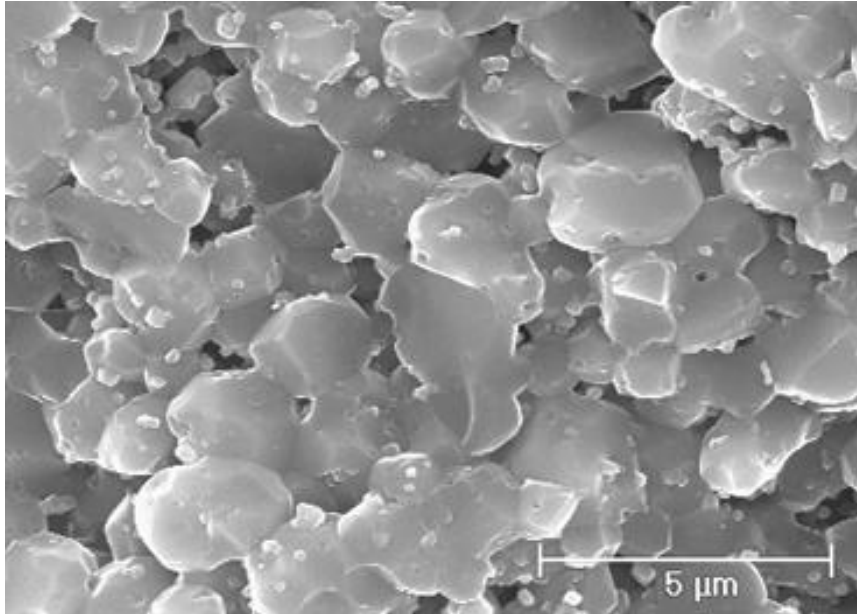
Sinterização sem pressão a 1550°C/60min
Aquecimento 10°C/min
Densidade 94,9 %DT



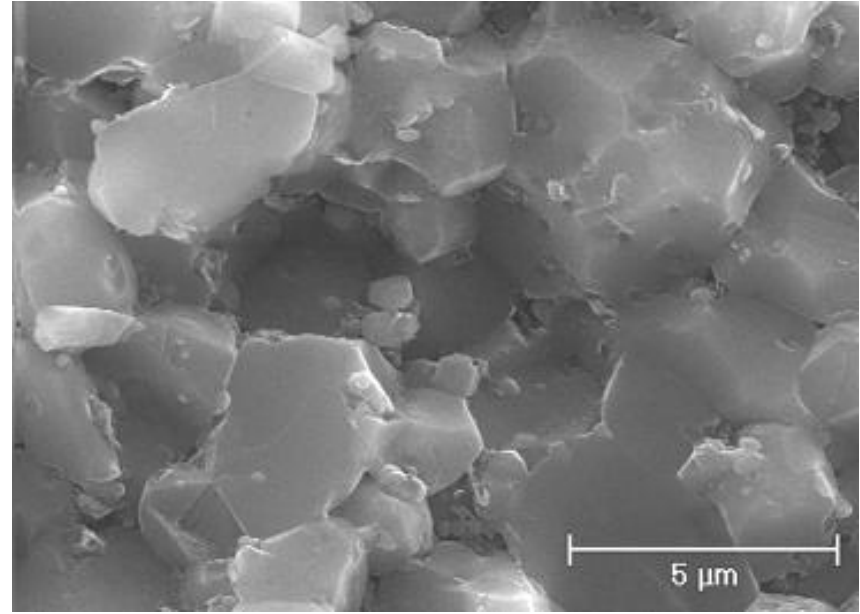
Sinterização com pressão a 1300°C/30min
Aquecimento 15°C/min
Densidade 99,5 %DT

Micrografia obtida por MEV do nanocompósito de Al₂O₃-5%vol NbC

Conformação por prensagem isostática (sinterização sem pressão) e prensagem a quente



Sinterização sem pressão a 1550°C/60min
Aquecimento 10°C/min,
Densidade 88,6 %DT

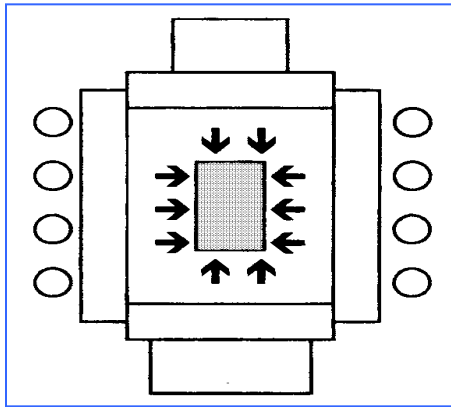


Sinterização com pressão a 1400°C/30min
Aquecimento 15°C/min,
Densidade 96,0 %DT

Micrografia obtida por MEV do nanocompósito de Al₂O₃-5%vol TiC

Prensagem isostática a quente

A técnica de prensagem isostática a quente é similar a prensagem isostática, porém nesse caso o molde utilizado é de vidro de baixo ponto de fusão (pirex) e o fluido compressor é um gás aquecido.



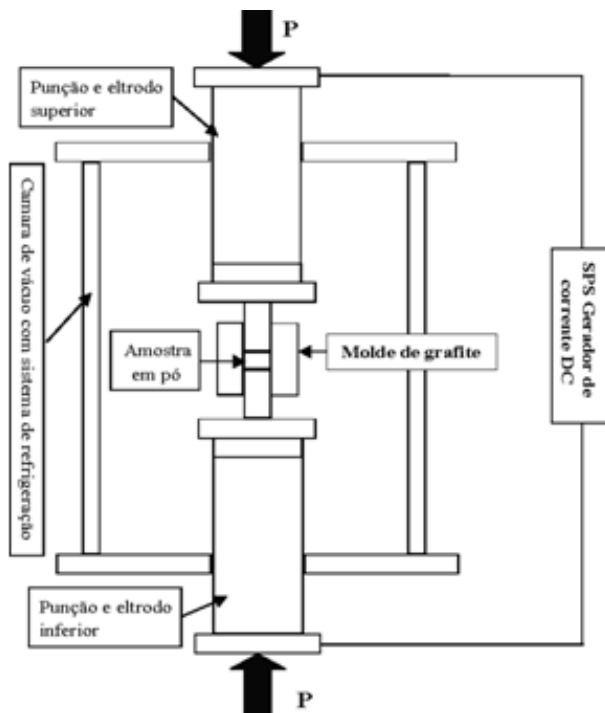
A QUENTE



“Spark plasma sintering” - SPS

O pó é prensado uniaxialmente em um molde de grafite e pulsos de voltagem com altas correntes são aplicados diretamente no molde e no pó.

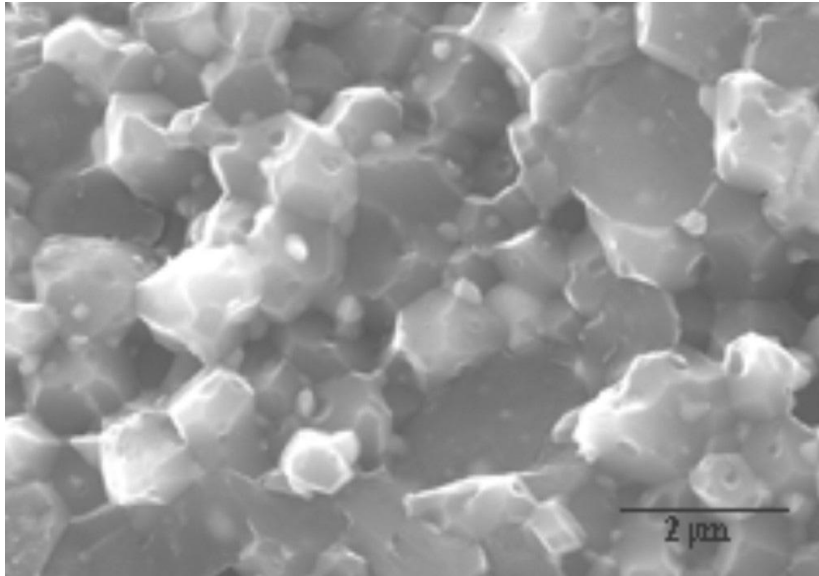
O pó é aquecido pela descarga entre as partículas e pela corrente através do molde de grafite. Devido às descargas, as superfícies das partículas são ativadas e um fenômeno de auto-aquecimento é gerado entre as partículas favorecendo a transferência de calor e de massa.



Vantagens SPS

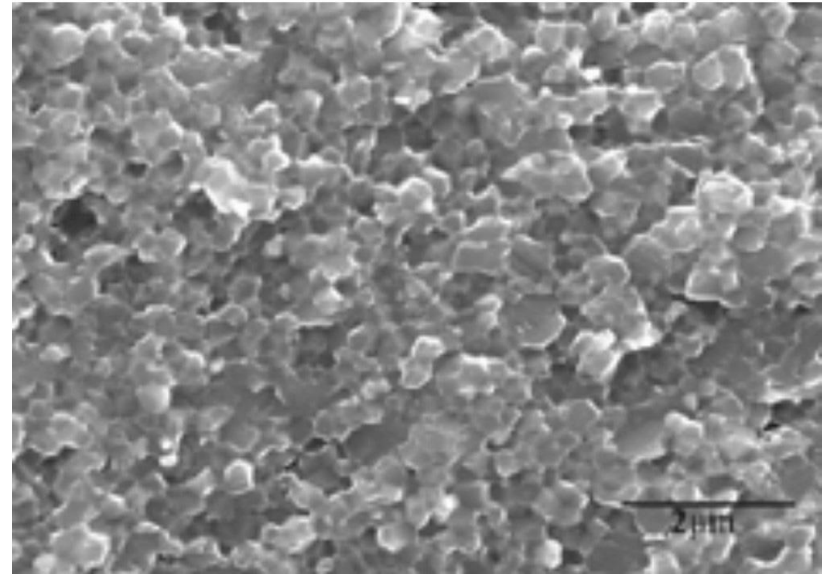
- ↳ O controle de precisão de refrigeração e pressão;
 - ↳ sinterização rápida e uniforme;
 - ↳ uniformidade de densificação de compactação;
 - ↳ baixo custo operacional e energético;
 - ↳ Fácil operação;
 - ↳ *Usada em sistemas de difícil densificação e quando necessita-se de alta densidade com pequeno tamanho de grãos.*
- Discarga
- Corrente elétrica
- Partícula
- Molde de Grafite
- Amostra Joule
-

Conformação por prensagem a quente e SPS



Prensagem a quente

Aquecimento 15°C/min, temp. 1300°C/40min,
Pressão 50MPA
(%TD = 99.9, hardness 20.1±1.0 GPa).

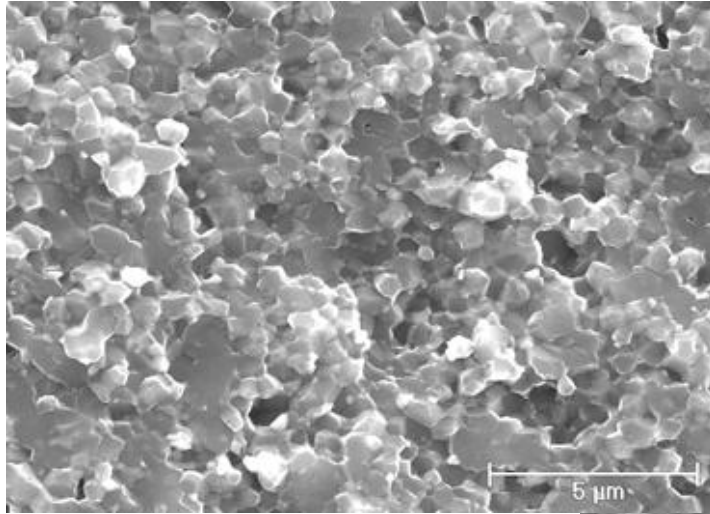


SPS

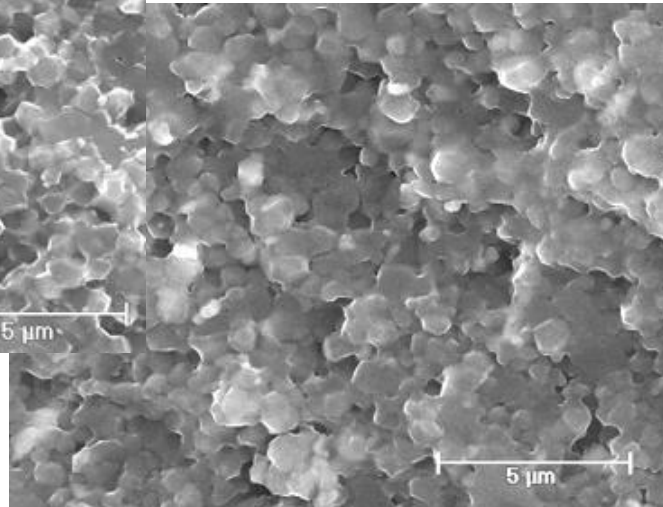
Aquecimento 200°C/min, temp. 1300°C/2min
Pressão 50MPA
(%TD = 99.8, hardness 22.29±0.51 GPa).

Micrografias obtidas por MEV nanocompósitos de Al₂O₃-5%vol ZrO₂

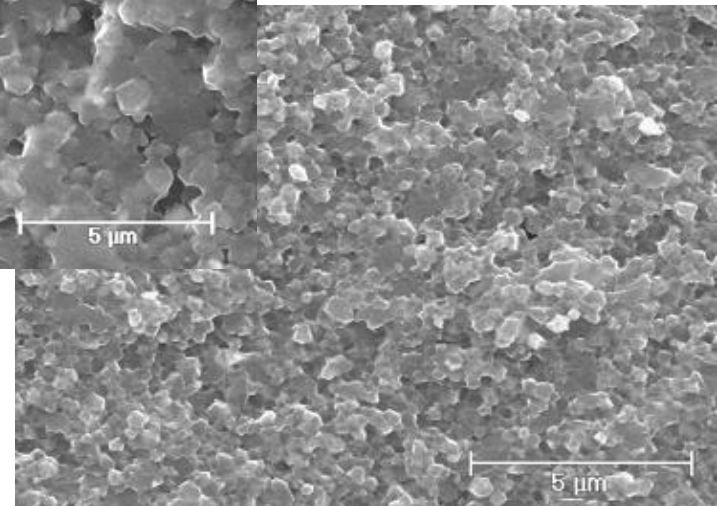
Conformação por prensagem isostática (sinterização convencional), prensagem a quente e SPS



sinterizadas sem pressão a
1460°C/120min
Aquecimento 10°C/min



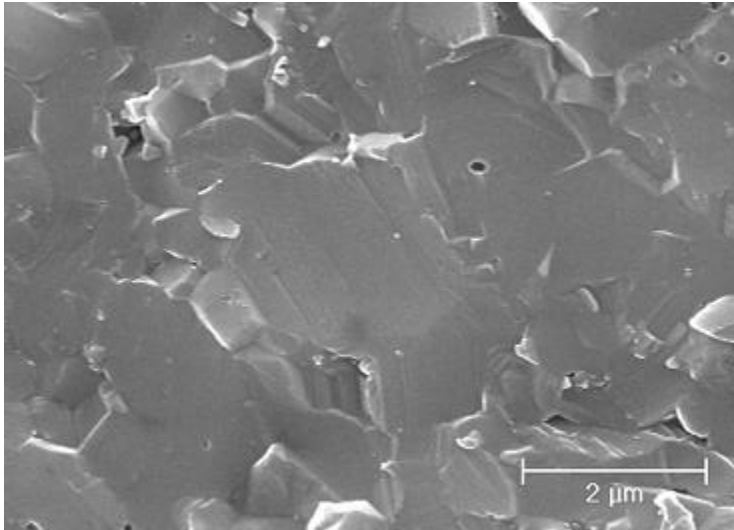
prensada a quente
a 1300°C/40min
Aquecimento 15°C/min



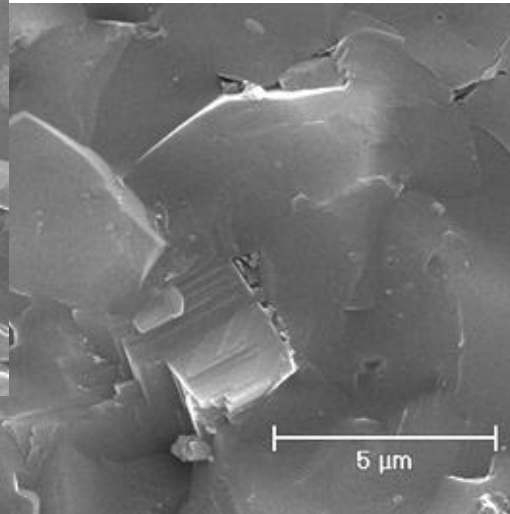
SPS a 1300°C/2min
Aquecimento 200°C/min

Micrografias obtidas por MEV nanocompósitos de Al₂O₃-5%vol ZrO₂

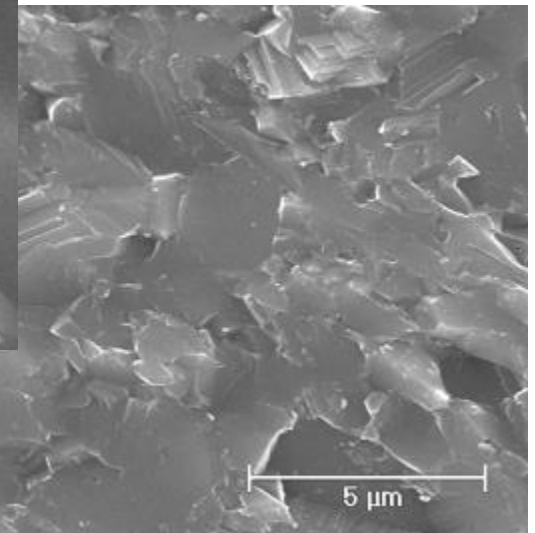
Conformação por prensagem isostática (sinterização convencional), prensagem a quente e SPS



Sinterizada sem pressão
a 1750°C/120min
Densidade 96,7 %DT

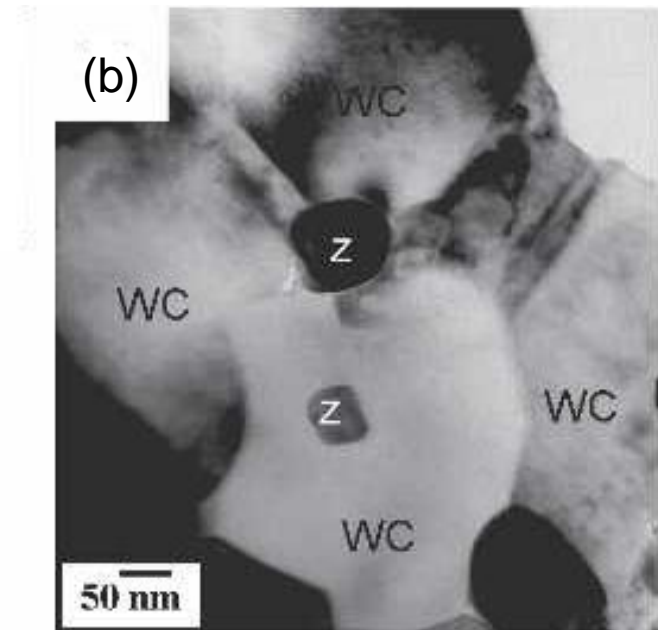
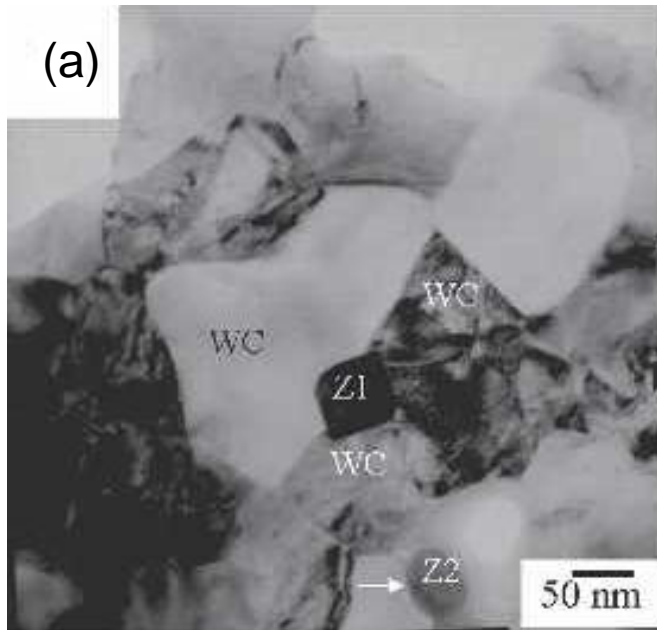


Sinterizada com pressão a
1750°C/30min
Densidade 98,3 %DT



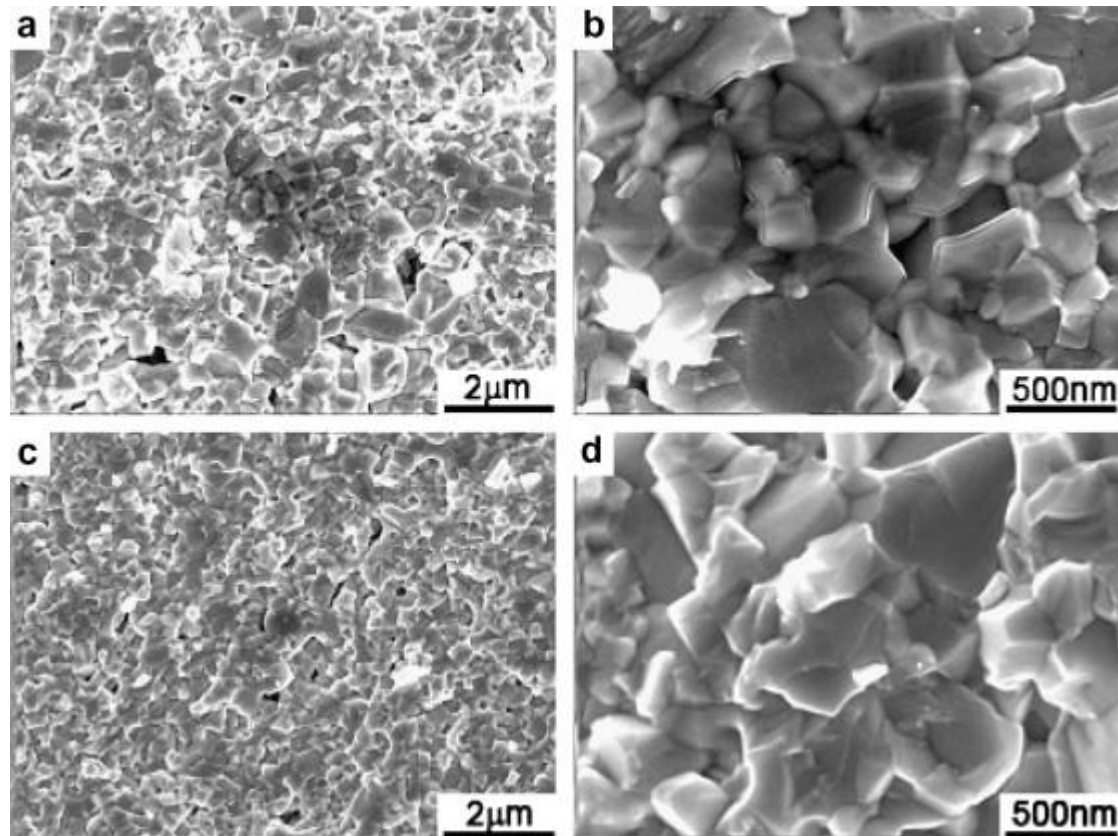
SPS 1500°C/7 min
Densidade 100%DT

Micrografias obtidas por MEV nanocompósitos de Al₂O₃-5%vol SiC



Micrografia obtida por MET do nanocompósito de WC-ZrO₂, SPS 1300°C/5 min

a) ZrO₂ numa junção tripla de WC b) ZrO₂ dentro do grão de WC



Micrografias obtidas por MEV de WC (40–70nm) consolidado por SPS.
(a), (b) sinterizado a 1500°C/3min, com diferentes aumentos, 95.5% DT;
(c), (d) sinterizado a 1750°C/3min com diferentes aumentos, 100%DT .

Peças conformadas por prensagem

