

## Avaliação do método *Flash Sinter-Crystallization* de vidros no sistema $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ para obtenção de vitrocerâmicas sinterizadas

Pedro Henrique Occhiena Faria

Eduardo Bellini Ferreira

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP

pedrofaria427@usp.br

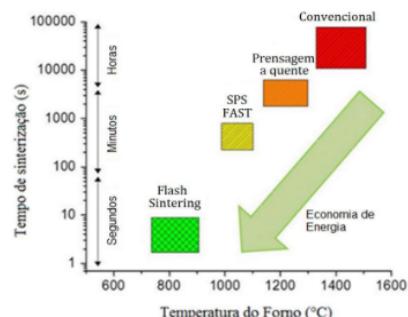
### Objetivos

Os vidros se destacam entre as cerâmicas por suas propriedades versáteis e valiosas. Em especial, as vitrocerâmicas, isto é, cerâmicas policristalinas produzidas pela cristalização controlada de vidros, podem oferecer alta resistência mecânica, estabilidade térmica e durabilidade química. Vítrocerâmicas têm ampla aplicação, desde utensílios domésticos até componentes industriais e biomédicos. Como alternativa à cristalização volumétrica de artigos de vidro, esses materiais podem ser fabricados pela sinterização de compactos de vidros particulados, seguida de cristalização. Nesse caso, a moderna técnica de *flash sintering* é notável por acelerar a sinterização e reduzir o consumo de energia. O objetivo deste trabalho é criar um software em Python para calcular a cinética de sinterização de vidro de composição  $\text{Na}_2\text{O}-2\text{CaO}-3\text{SiO}_2$  (ou 123) em altas taxas de aquecimento para simular seu comportamento por *flash sintering*.

### Introdução

A sinterização é um processo em que o pó é aquecido próximo ao ponto de fusão, o que causa coalescência das partículas e aumento da densidade do compacto. Durante o processo, ocorre a formação de contornos de grãos entre as partículas de materiais cristalinos, ou um contínuo entre elas no caso de sinterização na fase líquida. A energia superficial é a força motriz do processo. Para reduzir o consumo energético da sinterização, surgiram técnicas

como a Flash Sintering, que utiliza um campo elétrico para aquecer o material por efeito Joule, pela passagem de corrente, diminuindo o tempo e a temperatura do processo (Figura 1).



**Figura 01:** Tempo vs T de sinterização por diferentes técnicas ( $\text{ZrO}_2 - 3\% \text{ mol de Y}_2\text{O}_3$ ) [2]

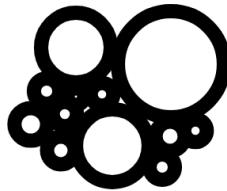
O fluxo viscoso é o principal mecanismo para sinterização de materiais vítreos e ocorre acima da transição vítreia em temperaturas mais baixas do que para fases cristalinas de mesma composição. Nesse caso, o processo acontece no estado líquido super-refriado, impulsionado pela diminuição da tensão superficial.

O modelo de Frenkel descreve os estágios iniciais da sinterização de duas partículas esféricas, inicialmente pela formação de pescoço no contato entre as partículas, cujo diâmetro aumenta com o tempo, aproximando seus centros.

Nas etapas mais avançadas, as partículas formam uma matriz contínua e a sinterização avança pela contração de poros esféricos e isolados, como modelado por Mackenzie &

Shuttleworth. Nesse caso, a densificação também ocorre pela redução dos poros devido à redução de tensão superficial.

Prado et al. propuseram um novo modelo para a sinterização de vidros, que abrange desde o início da coalescência das partículas até o fechamento dos poros em uma matriz viscosa. Esse modelo descreve de forma eficiente todos os estágios da sinterização, sendo o mais adequado para a construção de gráficos teóricos. Ele considera diferentes tamanhos de partículas, que se organizam em pequenos agrupamentos chamados clusters no espaço formado pelo empacotamento das partículas maiores (Figura 2). Posteriormente, Prado et al. aprimoraram o modelo para incluir a cristalização concorrente a partir da superfície das partículas, que progressivamente barra o fluxo viscoso e a densificação devida à sinterização.



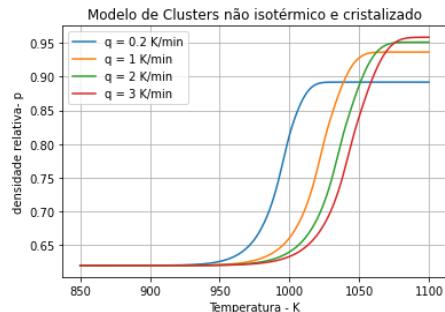
**Figura 02.** Representação geométrica adotada pelo modelo de Clusters.

## Métodos e Procedimentos

Para a elaboração da pesquisa, as equações do Modelo de Clusters para a cinética de sinterização com cristalização concorrente de compactos de vidro em pó com uma distribuição de tamanhos de partículas, de acordo com PRADO e REIS, foram implementadas com o uso de ferramentas como Python e Excel.

## Resultados

Com o modelo definido, foram construídos códigos para casos de sinterização isotérmica e não isotérmica com e sem cristalização. O gráfico a seguir (Figura 3) mostra o resultado para o caso não isotérmico com cristalização com diferentes taxas de aquecimento, considerando a composição  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{CaO}\cdot 3\text{SiO}_2$ .



**Figura 03.** Resultados do modelo de clusters não isotérmico com cristalização concorrente para diferentes taxas de aquecimento de vidro em pó de  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{CaO}\cdot 3\text{SiO}_2$ .

## Conclusões

O estudo aplicou a matemática da sinterização de partículas de vidro  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{CaO}\cdot 3\text{SiO}_2$  com cristalização, usando o modelo de Clusters. As simulações não isotérmicas mostraram como o sistema se comporta em diferentes velocidades de aquecimento, ajudando a identificar as melhores condições para aumentar a densificação. O trabalho apoia futuras pesquisas sobre Flash Sintering na produção de vitrocerâmicas.

## Agradecimentos

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro e ao projeto CeRTEV da FAPESP 2013/07793-6, por parte do auxílio à pesquisa.

## Referências Bibliográficas

- [1] R. M. C. V. Reis, “Avaliação de modelos de sinterização por fluxo viscoso e determinação da taxa de crescimento de cristais e fração cristalizada em vidros”, 134 pg. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2012
- [2] MURDIGA, J. M. R. Efeito do campo elétrico na sinterização de vidros no sistema  $\text{Li}_2\text{O}\text{-SiO}_2$ , 138 pg. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.