

21. Química

Captura de CO₂ utilizando o processo Ca-Looping com CaO e Al₂O₃

Alves da Silva, Juliana; Santos, João Batista Oliveira

julianaalves035@gmail.com; joabatista@ufscar.br;

Departamento de Engenharia Química

Universidade Federal de São Carlos

Resumo

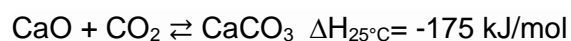
O processo Ca-Looping tem se destacado como uma alternativa promissora na mitigação das emissões de gás carbônico (CO₂), pois é uma tecnologia viável nos aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Esse processo consiste em reações cíclicas de carbonatação entre óxido de cálcio (CaO) e CO₂, e decomposição do carbonato de cálcio (CaCO₃). Entretanto, o CaO perde a capacidade de captura de CO₂ logo depois das primeiras reações, devido a sinterização e fechamento de poros do CaO. O uso de aditivos é uma maneira eficaz de diminuir essa desativação, e por isso esse estudo tem como objetivo avaliar a adição de um aditivo (alumina, Al₂O₃) ao CaO para obter um material com alta capacidade de captura de CO₂ e estabilidade. Materiais de CaO modificados com Al₂O₃ foram preparados, caracterizados e submetidos a reações cíclicas de carbonatação e decomposição. O CaO puro foi preparado pelo método sol-gel e o material de CaO modificado com Al₂O₃ foi preparado por mistura úmida. Os materiais foram caracterizados por difração de raios-X, análise termogravimétrica, microscopia eletrônica de varredura e adsorção de N₂. Os testes de captura de CO₂ foram realizados de maneira cíclica usando uma termobalança, sendo que a carbonatação foi conduzida a 700 °C em fluxo de CO₂ e a decomposição do CaCO₃ realizada a 800 °C em fluxo de N₂ puro. Todos os materiais tiveram capacidade de captura de CO₂ inicial de 0,7 g-CO₂/g-material, e após 6 ciclos de reação, o CaO puro teve apenas 0,5 g-CO₂/g-material, enquanto que os materiais contendo CaO-Al₂O₃ tiveram capacidades de captura de CO₂ constantes. Conclui-se que o método de mistura úmida usando Al₂O₃ foi eficaz para retardar o processo de sinterização, impedindo o fechamento de poros e o crescimento dos cristalitos do CaO.

Palavras-chave: Captura de CO₂, Ca-looping, CaO, Al₂O₃, sinterização

Introdução

A principal fonte de energia no mundo é através da combustão de combustíveis fósseis (IEA, 2015). A queima desses combustíveis fósseis gera gases de efeito estufa, que agravam o aquecimento global e mudanças climáticas. Com isso, tem-se um aumento significativo de interesse em tecnologias que alinham geração de energia e sustentabilidade (Davis, Caldeira, e Matthews, 2010; Figueroa, Fout, Plasynski, Mcllvried, e Srivastava, 2008),

O processo Calcium-looping (Ca-looping) é uma das tecnologias mais promissoras na mitigação do principal gás de efeito estufa, o gás carbônico (CO₂) (Bui et al., 2018). Esse processo consiste na captura do CO₂ utilizando materiais a base de óxido de cálcio (CaO) através de reações cíclicas (Erans, Manovic, e Anthony, 2016).



A reação de carbonatação do CaO ocorre em temperaturas entre 650 e 800 °C em presença do CO₂, enquanto que a decomposição do carbonato de cálcio (CaCO₃) acontece em temperatura entre 800 e 1100 °C. Logo o mesmo material contendo CaO é carbonatado e decomposto diversas vezes (reações cíclicas) para viabilizar o processo (Fennel

e Anthony, 2015). As principais vantagens do Ca-looping são a rápida taxa de reação entre o CaO e CO₂ e o baixo custo de materiais a base de CaO (Barker, 1973). Entretanto, tem-se queda na capacidade de captura de CO₂ depois das primeiras reações cíclicas. Essa desativação do CaO tem sido reportado como sinterização do CaO e fechamento de poros (Wang, Barry, e Costa, 2010; Xu et al., 2016).

Para minimizar a queda na capacidade de captura de CO₂, tem-se abordado diferentes métodos de síntese, uso de aditivos, e condições de reação (Guo et al., 2016; Y. Li et al., 2009; Ridha, Manovic, Macchi, e Anthony, 2012; S. Wang, Li, Wang, e Chen, 2016). O uso de aditivos tem se destacado devido ao aumento significativo na estabilidade na captura de CO₂. Em geral, os resultados mais satisfatório são o uso de aditivos com alta temperatura de sinterização como ZrO₂, Al₂O₃, MgO, entre outros (L. Li, King, Nie, e Howard, 2009; Xu et al., 2016).

Devido a diferentes condições de reação e métodos de preparo desses materiais, é ainda pouco claro na literatura como ocorre a desativação do CaO juntamente com o aditivo. Além disso, é pouco reportado métodos simples e viáveis no preparo do CaO que podem ser

empregados no processo Ca-Looping (Erans et al., 2016).

Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver materiais ativos e altamente estáveis contendo CaO e Al₂O₃, para capturar o CO₂ proveniente de gases de combustão, utilizando um método simples de preparação do CaO-Al₂O₃.

Materiais e Métodos

PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A amostra de CaO foi sintetizada utilizando o método sol-gel (Lee, Ichikawa, Lee, e Mohamed, 2015) com emprego de nitrato de cálcio Ca(NO₃)₂ (pureza 99%), ácido cítrico (pureza 99%) e água destilada. O Ca(NO₃)₂ foi dissolvido em água destilada e, em seguida, misturado com ácido cítrico na razão de 1:3. A mistura foi agitada e aquecida a 80 °C até a formação do gel. Em seguida, a amostra foi submetida a secagem, em uma estufa a 100 °C, por 24 h para obter o xerogel, e calcinada a 800 °C por 4 h para obter o CaO puro. A amostra foi denominada CaO.

Depois de obtido o CaO, foi utilizado o método de mistura úmida para obter os materiais contendo CaO e Al₂O₃. Para esses materiais, misturou-se o precursor do cálcio ao aditivo Al₂O₃ comercial em solução aquosa em um agitador magnético por 2 h em temperatura ambiente. Posteriormente, foi feita a

secagem em um rotaevaporador, mantido a 70°C e 65 rpm, até total evaporação da água. Em seguida, foi realizada a secagem da amostra em estufa a 110 °C por 12 h, e por fim foi realizada a calcinação a 800 °C por 4 h. Foram sintetizados materiais na proporção mássica de 50% CaO e 50%Al₂O₃, e 90% CaO e 10%Al₂O₃, denominados CaO-50 Al₂O₃ e CaO-10Al₂O₃, respectivamente.

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Todas as amostras foram analisadas por difração de raios-X (DRX) utilizando um difratômetro Miniflex, com radiação K α do Cu. O equipamento foi operado a 40 kV e 15 mA, com varredura de 2 θ = 10 a 90.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada para as amostras frescas, ou seja, calcinadas a 800 °C por 4 h. As imagens de MEV foram obtidas em um microscópio FEI Magellan 400 L de alta resolução.

As amostras frescas foram analisadas por adsorção de N₂ utilizando um equipamento da Micromeritics, modelo ASAP 2010. A amostra foi tratada sob vácuo por 2 h para remoção de impurezas e de espécies adsorvidas no material. Em seguida, a adsorção de nitrogênio foi medida a - 296 °C. A área superficial específica foi determinada pela aplicação do método Brunauer-Emmett-Teller (BET) e o tamanho do cristalito foi determinado pela Equação de Debye-Scherrer utilizando dados do DRX.

MEDIDAS DE CAPTURA DE CO₂

Os ciclos de carbonatação e decomposição foram realizados por análise termogravimétrica (ATG).

Primeiramente, foi feito o aquecimento da amostra até 800 °C por 1 h em atmosfera de gás inerte (N₂) para eliminação de possíveis impurezas, Ca(OH)₂ e CaCO₃. A carbonatação foi realizada a 700 °C por 1 h em atmosfera contendo CO₂, enquanto a decomposição ocorreu a 800 °C por 1 h em atmosfera de gás inerte (N₂). Na ATG foi utilizado uma termobalança, DTG-60H da marca Shimadzu, e foi utilizado aproximadamente 10 mg de amostra com fluxo de gases de 100 mL/min.

A variação de massa de cada amostra foi medida durante seis ciclos e a capacidade de captura de CO₂ e conversão da reação de carbonatação foram calculados através das equações 1 e 2, respectivamente.

$$C_N = (m_N - m_0)/m_0 \quad (1)$$

$$X_N = (m_N - m_0)M_{CaO}/m_0M_{CO_2} \quad (2)$$

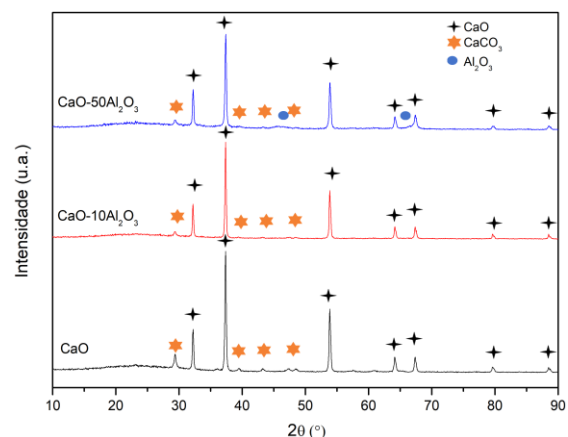
A massa final após a cada carbonatação é representada por m_N, m₀ é a massa de material após a calcinação inicial, m_{CaO} a massa de CaO, M_{CaO} e M_{CO₂} as massas molares do CaO e do CO₂.

Resultados e Discussão

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS
ANTES DAS REAÇÕES DE Ca-LOOPING
A Figura 1 apresenta os difratogramas de raios-X das amostras de CaO e CaO

modificadas com alumina, após a calcinação a 800 °C por 4 h. Pode-se observar que há a presença das fases CaO e CaCO₃ em todas as amostras. Alguns dos picos característicos do CaO são aqueles observados em 2θ=32,3; 37,4; 54,5; 64,1 e 67,4° (ICSD PDF 01-077-2376) enquanto que os picos característicos do CaCO₃ (calcita) em 2θ=23,1; 29,5; 36,1; 39,4; 43,1; 47,8 e 48,8° (ICSD PDF 01-072-1652). A alumina comercial utilizada nos materiais CaO-10Al₂O₃ e CaO-50Al₂O₃ apresenta dois picos de difração em 2θ=45,6° e 2θ=66,9° (ICSD PDF 01-029-0063). Os picos característicos da alumina aparecem em CaO-50Al₂O₃ e não foi possível identificar em CaO-10Al₂O₃ devido à baixa concentração de Al₂O₃.

Figura 1. Difratogramas de raios-X das amostras: CaO, CaO-10Al₂O₃ e CaO-50Al₂O₃ calcinados a 800 °C por 4 h.



A Tabela 1 mostra os resultados da área superficial específica BET, volume de poros e tamanho de cristalito de cada material. Observa-se que a presença de

Al_2O_3 contribuiu de forma significativa no aumento da área e que o aumento da área foi proporcional a quantidade de aditivo. O mesmo foi observado para o volume de poros. Já o tamanho do cristalito diminuiu com a adição de aditivo.

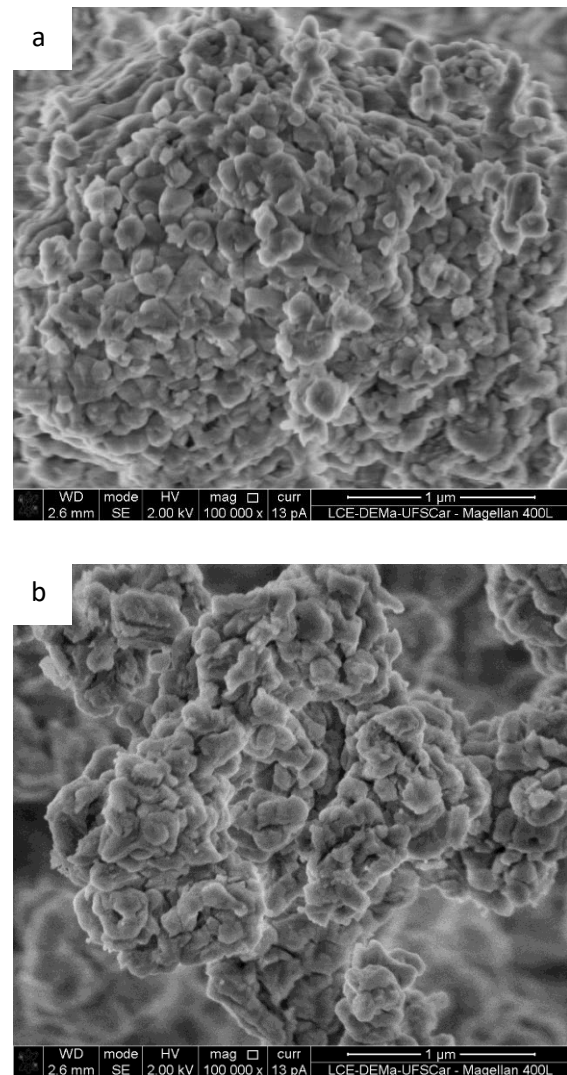
Tabela 1. Propriedades texturais dos materiais calcinados a 800 °C por 4 h.

| | Área BET (m ² /g) | Volume de poros (cm ³ /g) | Tamanho de cristalito (nm) |
|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| CaO | 10 | 0,05 | 46 |
| CaO-10Al ₂ O ₃ | 20 | 0,09 | 43 |
| CaO-50Al ₂ O ₃ | 64 | 0,27 | 35 |

Segundo Li et al. (2009) cristalitos menores favorecem a carbonatação, pois há mais espaço entre os grãos de CaO para a difusão do CO₂. Além disso, pode se ter uma relação linear entre tamanho de cristalito e conversão (Biasin, Segre, Salviulo, Zorzi, e Strumendo, 2015).

A Figura 2 mostra as micrografias de MEV das amostras de CaO e CaO-10Al₂O₃ após calcinação a 800 °C por 4 h. Nota-se que a morfologia não sofreu alterações na forma e no tamanho com a presença do aditivo. Ambos apresentam partículas de tamanho próximos a 100 nm.

Figura 2. Micrografias de MEV das amostras (a) CaO e (b) CaO-10Al₂O₃ após calcinação a 800 °C por 4 h.



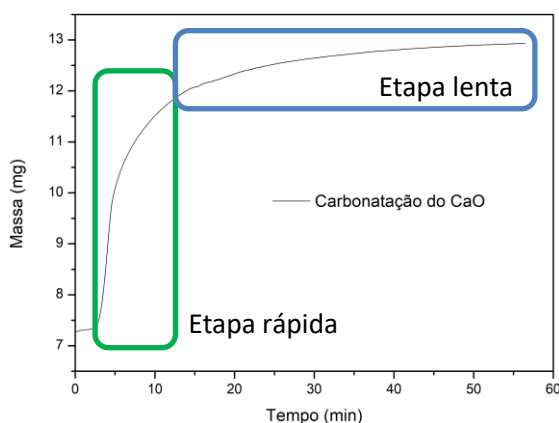
REAÇÕES DE Ca-LOOPING

Os ciclos de carbonatação e decomposição foram efetuados em uma termobalança e mediu-se a variação de massa da amostra contendo CaO durante os ciclos. A captura de CO₂ é dada pela formação do CaCO₃, e consequentemente, o aumento da massa da amostra, determinada pela

termobalança. Esse aumento de massa ocorreu em atmosfera de CO_2 a $700\text{ }^\circ\text{C}$. A decomposição do CaCO_3 a CaO foi observada pela diminuição da massa da amostra, devido a decomposição do CaCO_3 em presença de atmosfera inerte a $800\text{ }^\circ\text{C}$.

A Figura 3 mostra o resultado da reação de carbonatação do CaO no primeiro ciclo. Assim como outras reações gás e sólidos, a carbonatação do CaO é caracterizada por uma etapa rápida e outra lenta. Observa-se que a etapa rápida ocorre nos 10 primeiros minutos e rapidamente é atingido valores de conversão próximos a 90%. Isso ocorre porque no início tem-se alta porosidade e área superficial específica, o que facilita a difusão de CO_2 e a rápida formação de CaCO_3 (Dennis e Pacciani, 2009).

Figura 3. Reação de carbonatação do CaO no primeiro ciclo.

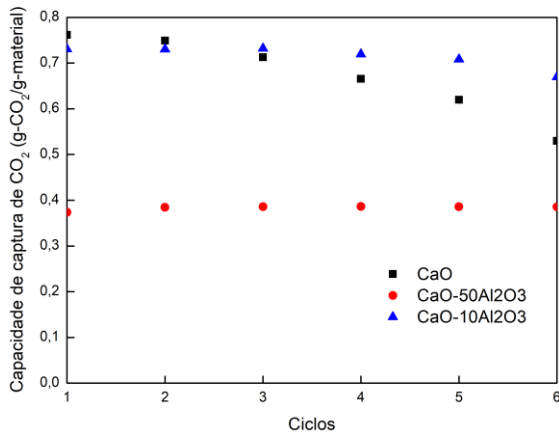


Em seguida, atinge-se um patamar denominado etapa lenta, no qual já foi formado uma camada de CaCO_3 , o que dificulta o acesso de CaO não reagido.

Consequentemente, nessa etapa, há pouca variação na conversão do CaO a CaCO_3 . É importante ressaltar também que o CaCO_3 apresenta volume molar duas vezes maior que o CaO , o que leva a um fechamento dos poros do CaO não reagido e uma maior resistência de difusão do CO_2 (Ridha, Manovic, Macchi, e Anthony, 2015).

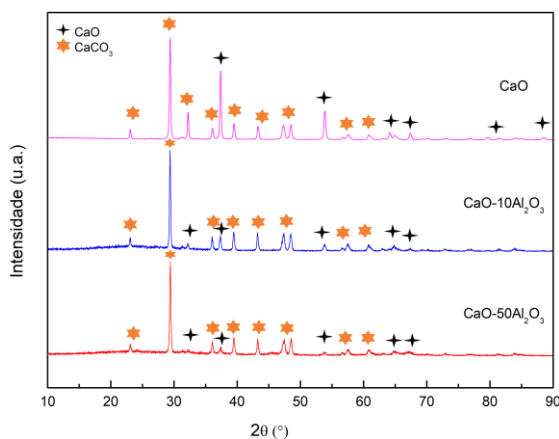
A Figura 4 apresenta os resultados da capacidade de captura de CO_2 de cada ciclo para os materiais CaO , $\text{CaO-10Al}_2\text{O}_3$ e $\text{CaO-50Al}_2\text{O}_3$, calculados a partir da Equação 1. A capacidade máxima teórica do óxido de cálcio é de $0,785\text{ g-CO}_2/\text{g-material}$. Pode-se observar que a capacidade de captura de CO_2 do material CaO no primeiro ciclo foi $0,76\text{ g-CO}_2/\text{g-material}$, ou seja muito próximo do teórico. Isso sugere que o método de síntese sol-gel utilizado gerou grãos de CaO pouco aglomerados possibilitando conversão muito próxima a 100%. Entretanto, observou-se uma queda na capacidade de captura de CO_2 do CaO logo depois do primeiro ciclo, ou seja, ao final de 6 ciclos o CaO teve uma capacidade de captura de $0,5\text{ g-CO}_2/\text{g-material}$ (34% de desativação). O mesmo não ocorreu com os materiais contendo Al_2O_3 , pois a capacidade de captura de CO_2 dos materiais $\text{CaO-10Al}_2\text{O}_3$ e $\text{CaO-50Al}_2\text{O}_3$ foram estáveis ao longo de 6 ciclos, próximos a $0,7\text{ g-CO}_2/\text{g-material}$ e $0,4\text{ g-CO}_2/\text{g-material}$, respectivamente.

Figura 4. Capacidad de captura dos materiais CaO, CaO-50Al₂O₃ e CaO-10Al₂O₃.



Para investigar qual o efeito do aditivo nos materiais CaO-10Al₂O₃ e CaO-50Al₂O₃ foi realizado o DRX das amostras depois da reação de carbonatação após 6 ciclos (Figura 5).

Figura 5. Difratoogramas de raios-X da amostra CaO, CaO-10Al₂O₃ e CaO-50Al₂O₃ no sexto ciclo depois da carbonatação



Observa-se apenas as fases CaCO₃ (devido a reação de carbonatação) e CaO. Nota-se ainda que a quantidade de CaO

não reagido é significativamente maior no material sem o aditivo (CaO) do que nos materiais com aditivos. Isso sugere que a Al₂O₃ permite maior acessibilidade do CO₂ ao CaO, pois promove uma baixa aglomeração dos grãos de CaO, conforme já indicado por Hu et al. (2016). Isso também indica que o efeito de sinterização e fechamento de poros é minimizado quando se tem um aditivo que diminui a formação de um aglomerado de grãos de CaO/CaCO₃.

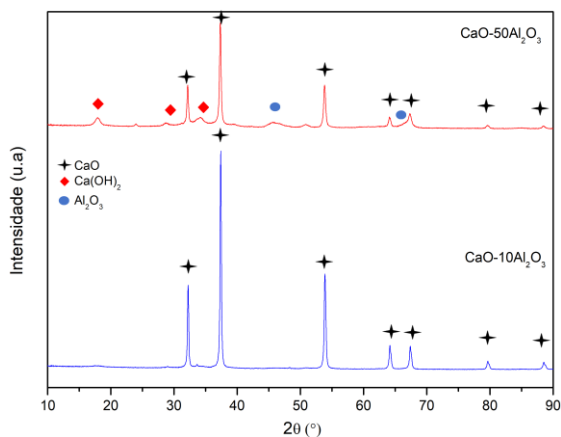
Uma outra forma de desativar o CaO além da sinterização e fechamento de poros, é através da formação de aluminato de cálcio, quando utilizado como aditivo o Al₂O₃. A formação do aluminato de cálcio pode ocorrer durante o preparo do material (calcinação) ou nos ciclos de reação (Benitez-Guerrero, Valverde, Sanchez-Jimenez, Perejon, e Perez-Maqueda, 2018). A formação desse composto retira parte do CaO capaz de capturar CO₂, e por isso não é interessante sua formação. Entretanto, o aluminato de cálcio pode também atuar como aditivo minimizando a sinterização e queda da estabilidade (Jing et al., 2017). Os materiais frescos não apresentam a presença de aluminato de cálcio antes das reações (Figura 1). Para verificar se houve a formação de aluminato de cálcio depois de 6 ciclos, foi realizado o DRX das amostras CaO-10Al₂O₃ e CaO-50Al₂O₃ (Figura 6). É observado apenas as fases CaO em ambas amostras, e no material

CaO-50Al₂O₃ foi também detectado Al₂O₃ e Ca(OH)₂ devido à natureza higroscópica do CaO. Logo, não foi detectado presença do aluminato de cálcio mesmo depois das reações. Esse resultado está de acordo com a performance da capacidade de captura de CO₂ (Figura 4), que não apresentou queda expressiva na captura de CO₂, e um dos motivos foi a não produção do aluminato de cálcio.

Tabela 2. Propriedades texturais depois de 6 ciclos de reação

| | Área BET (m ² /g) | Volume de poros (cm ³ /g) | Tamanho de cristalito (nm) |
|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| CaO | 7 | 0,08 | 62 |
| CaO-10Al ₂ O ₃ | 22 | 0,17 | 38 |
| CaO-50Al ₂ O ₃ | 70 | 0,36 | 32 |

Figura 6. Difratogramas de raios-X das amostras CaO-10Al₂O₃ e CaO-50Al₂O₃ no sexto ciclo depois da decomposição.



Foi medido as propriedades texturais depois de 6 ciclos (Tabela 2). Houve uma diminuição da área superficial BET do CaO enquanto que a mesma tendência não foi observada para os materiais contendo o aditivo. Além disso, houve um aumento significativo do tamanho do cristalito para o material CaO que passou de 46 para 62 nm. Isso indica que o CaO sofreu sinterização e fechamento de poros, e que o uso do Al₂O₃ minimizou esse efeito.

Conclusões

Verificou-se que o CaO foi desativado por sinterização e fechamento de poros, consequentemente, ocorreu reação de carbonatação parcial e capacidade de captura de CO₂ de 0,5 g-CO₂/g-material depois de 6 ciclos. A presença de aditivos nos materiais CaO-10Al₂O₃ e CaO-50Al₂O₃ resultou em alta capacidade de captura de CO₂ e estabilidade de 0,7 g-CO₂/g-material e 0,4 g-CO₂/g-material, respectivamente. Observou-se que o aditivo suprimiu o crescimento dos cristais e, por causa disso, houve mais espaço entre os grãos de CaO para o CO₂ se difundir com uma resistência consideravelmente menor. O método de mistura úmida usando CaO misturado com Al₂O₃ aparece como método simples e barato para alcançar alta capacidade de captura e estabilidade de CO₂ nessas condições de reação.

Bibliografia

Barker, R. (1973). The Reversibility of the

- Reaction $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$ *J. appl. Chem. Biotechnol.*, 23,133-142. 64, 2147–2157.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.01.051>
- Benitez-Guerrero, M., Valverde, J. M., Sanchez-Jimenez, P. E., Perejon, A., e Perez-Maqueda, L. A. (2018). Calcium-Looping performance of mechanically modified Al_2O_3 -CaO composites for energy storage and CO_2 capture. *Chemical Engineering Journal*, 334, 2343–2355. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.183>
- Biasin, A., Segre, C. U., Salviulo, G., Zorzi, F., e Strumendo, M. (2015). Investigation of CaO – CO_2 reaction kinetics by in-situ XRD using synchrotron radiation. *Chemical Engineering Science*, 127, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.12.058>
- Bui, M., Adjiman, C. S., Bardow, A., Anthony, E. J., Boston, A., Brown, S., Mac Dowell, N. (2018). Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy e Environmental Science*. <https://doi.org/10.1039/C7EE02342A>
- Davis, S. J., Caldeira, K., e Matthews, H. D. (2010). Energy Infrastructure. *Science*, 243116 (September), 1330–1334. <https://doi.org/10.1126/science.1188566>
- Dennis, J. S., e Pacciani, R. (2009). The rate and extent of uptake of CO_2 by a synthetic, CaO-containing sorbent, Erans, M., Manovic, V., e Anthony, E. J. (2016). Calcium looping sorbents for CO_2 capture. *Applied Energy*, 180, 722–742. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.074>
- Fennel, P., e Anthony, B. (2015). *Calcium and Chemical Looping Technology for Power Generation and Carbon Dioxide (CO_2) Capture*. *Calcium and Chemical Looping Technology for Power Generation and Carbon Dioxide (CO_2) Capture* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-243-4.00013-6>
- Figuroa, J. D., Fout, T., Plasynski, S., McIlvried, H., e Srivastava, R. D. (2008). Advances in CO_2 capture technology-The U.S. Department of Energy's Carbon Sequestration Program. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(1), 9–20. [https://doi.org/10.1016/S1750-5836\(07\)00094-1](https://doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00094-1)
- Guo, H., Wang, S., Li, C., Zhao, Y., Sun, Q., e Ma, X. (2016). Incorporation of Zr into Calcium Oxide for CO_2 Capture by a Simple and Facile Sol – Gel Method. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55, 7873–7879. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04112>

- Hu, Y., Liu, W., Chen, H., Zhou, Z., Wang, W., Sun, J., ... Xu, M. (2016). Screening of inert solid supports for CaO-based sorbents for high temperature CO₂ capture. *Fuel*, 181, 199–206.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.138>
- IEA. (2015). Energy and Climate Change. *World Energy Outlook Special Report*, 1–200.
<https://doi.org/10.1038/479267b>
- Jing, J. ying, Li, T. yu, Zhang, X. wei, Wang, S. dong, Feng, J., Turmel, W. A., e Li, W. ying. (2017). Enhanced CO₂ sorption performance of CaO/Ca₃Al₂O₆ sorbents and its sintering-resistance mechanism. *Applied Energy*, 199, 225–233.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.131>
- Lee, Z. H., Ichikawa, S., Lee, K. T., e Mohamed, A. R. (2015). The role of nickel oxide additive in lowering the carbon dioxide sorption temperature of CaO. *Journal of Energy Chemistry*, 24(2), 225–231.
[https://doi.org/10.1016/S2095-4956\(15\)60305-9](https://doi.org/10.1016/S2095-4956(15)60305-9)
- Li, L., King, D. L., Nie, Z., e Howard, C. (2009). Magnesia-stabilized calcium oxide absorbents with improved durability for high temperature CO₂ capture. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48(23), 10604–10613.
<https://doi.org/10.1021/ie901166b>
- Li, Y., Zhao, C., Chen, H., Liang, C., Duan, L., e Zhou, W. (2009). Modified CaO-based sorbent looping cycle for CO₂ mitigation. *Fuel*, 88(4), 697–704.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.09.018>
- Ridha, F. N., Manovic, V., Macchi, A., e Anthony, E. J. (2012). High-temperature CO₂ capture cycles for CaO-based pellets with kaolin-based binders. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 6, 164–170.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2011.11.006>
- Ridha, F. N., Manovic, V., Macchi, A., e Anthony, E. J. (2015). CO₂ capture at ambient temperature in a fixed bed with CaO-based sorbents. *Applied Energy*, 140, 297–303.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.030>
- Wang, G., Barry, J., e Costa, (2010). Synthesis of Sintering-Resistant Sorbents for CO₂ Capture, *Environ. Sci. Technol.* 44(8), 3093–3097.
<https://doi.org/10.1021/es903436v>
- Wang, S., Li, W., Wang, S., e Chen, Z. (2016). Synthesis of mesoporous La₂Zr₂O₇ with high surface area by combining epoxide-mediated sol-gel process and solvothermal treatment. *Microporous and Mesoporous Materials*, 234, 137–145.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.04.018>

016.07.020

Xu, Y., Luo, C., Zheng, Y., Ding, H., Wang, Q., Shen, Q., Zhang, L. (2016). Characteristics and performance of CaO-based high temperature CO₂ sorbents derived from a sol-gel process with different supports. *RSC Adv.*, 6(83), 79285–79296.

<https://doi.org/10.1039/C6RA15785H>

Financiamento

Os autores agradecem o suporte financeiro dado pela Universidade Federal de São Carlos e CNPq (Processo 141308/2018-4).