

EFEITO DO SUPORTE SOBRE A CAPTURA DE CO₂ DE GASES DE COMBUSTÃO UTILIZANDO ÓXIDO DE CÁLCIO SUPORTADO EM ÓXIDOS INERTES.

Juliana A. da SILVA¹; Luiza V. BISINOTI¹; Ricardo J. CHIMENTAO²; João Batista O. dos SANTOS¹

¹Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), julianaalves035@gmail.com, luiza_villefort@hotmail.com, joaobatista@ufscar.br;

²Universidad de Concepción-Facultad de Ciencias Químicas-Chile, rchimenton@udec.cl

RESUMO

Materiais a base de óxido de cálcio foram modificados com La₂O₃, ZrO₂ e Al₂O₃ com o objetivo de produzir materiais estáveis e eficientes para a captura de dióxido de carbono (CO₂). Os materiais foram caracterizados por difração de raio-x, microscopia eletrônica de varredura e adsorção de N₂. As medidas de captura de CO₂ foram realizadas de maneira cíclica usando uma termobalança, sendo a carbonatação conduzida a 700° C e a decomposição do carbonato de cálcio realizada a 800 °C. Os resultados mostraram elevada captura de CO₂ e estabilidade para os materiais modificados com óxido de lantânio. Os materiais modificados com alumina mostraram elevada estabilidade durante os ciclos reacionais, mas apresentaram baixa eficiência de captura de CO₂. Esse fato foi atribuído a formação de aluminato de cálcio, que é inerte na reação com CO₂. Portanto, os materiais de cálcio modificados com óxido de lantânio são promissores para serem empregados em sistemas com captura de CO₂.

Palavras-chave: captura de CO₂, óxido de cálcio, alumina, zircônia, óxido de lantânio.

ABSTRACT

CaO-based materials were modified with La₂O₃, ZrO₂, and Al₂O₃ to produce an efficient and stable material to be used in CO₂ capture. The materials were characterized by x-ray diffraction, scanning electron microscope and N₂ physisorption. The measurements of CO₂ capture were carry out in a thermobalance using looping reactions where the carbonation and decomposition of calcium carbonate occurred at 700 °C and 800 °C, respectively. The materials modified with lanthanum oxide showed high CO₂ capture efficiency and stability. The materials modified with alumina showed high stability during cycles but they showed low CO₂ capture efficiency suggesting deactivation by formation of calcium aluminate. Thus, CaO modified with lanthanum oxide are good materials to be used in systems with CO₂ capture.

Key-Words: CO₂ capture, calcium oxide, alumina, zirconium, lanthanum oxide

1 INTRODUÇÃO

Dióxido de carbono (CO₂) é um dos principais gases que contribuem para o efeito estufa e a sua emissão vem aumentando nos últimos anos. As emissões de CO₂, provenientes da queima de carvão mineral, aumentaram cerca de 3% entre 2007 e 2008, totalizando 12,6 Gt de CO₂ (LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014). A previsão das emissões de CO₂ é de 40,2 Gt em 2030 de acordo com a Agência Internacional de Energia (2015).

Diversos métodos vêm sendo utilizados na tentativa de reduzir as emissões de CO₂. A absorção de CO₂ utilizando monoetanolamina é o método de captura de CO₂ mais empregado na indústria

(BRODA; KIERZKOWSKA; MÜLLER, 2012; LEE et al., 2015; LUO et al., 2015). Entretanto, segundo Xu et al. (2013) o custo desse método é elevado e ainda ocorre a degradação da amina e o processo é corrosivo. Existem vários métodos alternativos para a captura de CO₂, mas o mais promissor é a reação do CO₂ com óxido de cálcio (CaO), conhecido como Ca Looping (FENNEL; ANTHONY, 2015; VALVERDE; SANCHEZ-JIMENEZ; PEREZ-MAQUEDA, 2014).

Ca Looping consiste em ciclos de carbonatação e decomposição de materiais a base de cálcio para captura de CO₂. A carbonatação consiste na reação entre o CaO e o CO₂ e a decomposição consiste na reação inversa da

carbonatação. Na decomposição, o CO_2 é liberado com elevada pureza e pode ser armazenado para uma posterior aplicação industrial (GRASA; ABANADES, 2006)

Ciclos de carbonatação e decomposição com materiais a base de CaO tem despertado grande interesse nos últimos anos devido ao seu baixo custo, a elevada taxa de captura de CO_2 e a disponibilidade do CaO. Entretanto, o CaO puro não é indicado para captura de CO_2 em altas temperaturas, pois após alguns ciclos de carbonatação/decomposição, o material perde sua capacidade de captura devido a sinterização (ABANADES; ALVAREZ, 2003; FENG et al., 2006).

Alguns métodos, tais como utilização de materiais inertes e técnicas avançadas de preparação, têm sido aplicados com o objetivo de diminuir o efeito da sinterização das partículas de CaO. Alguns estudos indicam boa estabilidade dos suportes ZrO_2 , La_2O_3 e Al_2O_3 (GUO et al., 2016; KIERZKOWSKA et al., 2013; LUO et al., 2010).

Xu et al. (2016) testaram materiais de CaO modificados com ZrO_2 , La_2O_3 e Al_2O_3 na captura de CO_2 . As reações foram realizadas em um reator de leito fixo, com a carbonatação ocorrendo a 700°C e a decomposição a 850°C . Os autores verificaram conversões de 95,5%, 96,7% e 86,2% no primeiro ciclo para os materiais com ZrO_2 , La_2O_3 e Al_2O_3 , respectivamente.

Com o objetivo de desenvolver um material eficiente e estável para ser empregado em ciclos de carbonatação e decomposição, neste trabalho foram preparados materiais de CaO puro e CaO modificado com ZrO_2 , La_2O_3 , Al_2O_3 e $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, sendo os mesmos caracterizados por difração de raios x, microscopia eletrônica de varredura e adsorção de nitrogênio, e testados em ciclos de carbonatação e decomposição.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

2.1.1 CaO puro

O CaO foi sintetizado a partir do nitrato de cálcio, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (pureza $\geq 99\%$), ácido cítrico (pureza $\geq 99\%$) e água destilada. O $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 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 90°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.

2.1.2 Preparação do CaO suportado em ZrO_2 e CaO suportado em Al_2O_3

As amostras contendo 50% em massa de CaO e 50% de ZrO_2 (denominada 50CaO50 ZrO_2) e 50% de CaO e 50% de Al_2O_3 (denominada 50CaO50 Al_2O_3) foram sintetizadas utilizando o método de impregnação incipiente. Essas amostras tiveram como precursor do cálcio o nitrato de cálcio (pureza $\geq 99\%$). O nitrato foi solubilizado em 50 mL de etanol. Em seguida, foi adicionado o suporte (previamente calcinado a 800°C) à solução e a mistura foi agitada por 2 h. Posteriormente, foi feita a secagem em um rotaevaporador, mantido a 55°C e 85 rpm, até total evaporação do solvente. 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.

2.1.3 Preparação do CaO suportado em La_2O_3

A amostra de 50% em massa de CaO e 50% em massa de La_2O_3 teve como como precursores o CaO preparado no item 2.1.1 e o nitrato de lantânio hexahidratado (pureza $\geq 99\%$). Porém, nesse preparo foi feita primeiramente a solubilização do nitrato de lantânio hexahidratado em etanol e em seguida, o CaO preparado pelo método sol-gel foi adicionado à solução e a mistura foi agitada por 2 h. A mistura foi levada a um rotaevaporador, mantido a 55°C e 85 rpm, para evaporação total do solvente. Em seguida, a amostra foi colocada na estufa a 110°C por 12 h e calcinada a 800°C por 4 h. A amostra foi chamada de 50CaO50 La_2O_3 .

2.1.4 Preparação do CaO suportado em $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3$

Primeiramente, foi preparado o suporte contendo 85% em massa de Al_2O_3 e 15% em massa de La_2O_3 através do método de impregnação incipiente. Para isso, utilizou-se como precursor o nitrato de lantânio hexahidratado e a alumina previamente calcinada a 800°C , e seguiu-se o procedimento descrito no item 2.1.3.

O suporte (85%Al₂O₃-15%La₂O₃) calcinado a 800 °C por 4 h foi adicionado a uma mistura contendo CaO e etanol. A mistura foi agitada por 2 h e o solvente foi removido em um rotaevaporador, mantido a 55°C e 85 rpm. Em seguida a amostra foi levada a estufa a 110 °C por 12 h e calcinada a 800 °C por 4 h. A amostra foi preparada com 50% em massa de CaO e denominada 50CaO/85Al₂O₃-15La₂O₃.

2.2 Medidas da captura de CO₂

Os ciclos de carbonatação e decomposição foram realizados por análise termogravimétrica (TGA) utilizando uma termobalança da marca Shimadzu. Primeiramente, foi feito o aquecimento de aproximadamente, cerca de 15 mg de amostra, até 800 °C em atmosfera de nitrogênio para eliminação de possíveis impurezas e de CaCO₃. A carbonatação foi realizada a 700 °C em atmosfera de CO₂ puro, enquanto a decomposição ocorreu a 800 °C em atmosfera de nitrogênio puro.

A variação de massa de cada amostra foi medida por TGA durante 6 ciclos e a capacidade de captura de CO₂ e conversão da reação de carbonatação foram calculados através das equações 1 e 2, respectivamente.

$$C_N = (m_N - m_0)/m_{CaO} \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$X_N = (m_N - m_0)M_{CaO}/m_{CaO}M_{CO_2} \quad [\text{Eq. 2}]$$

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

2.3 Caracterização das amostras

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

Microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada para as amostras frescas, ou seja, calcinadas a 800° C por 4 h. Algumas amostras foram analisadas após os seis ciclos de reação. 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).

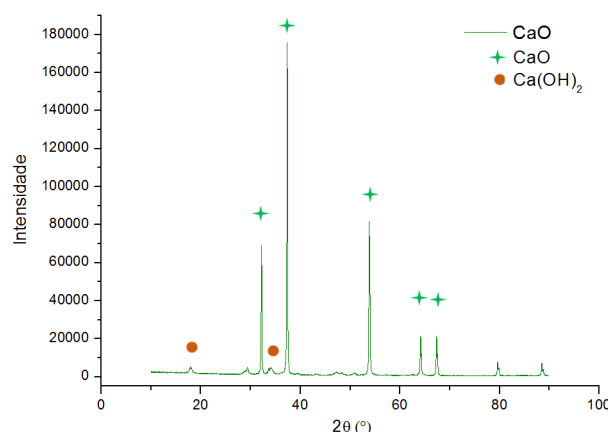
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos materiais

Os difratogramas de raios x de todas as amostras são apresentados nas Figuras de 1 a 5. Nos difratogramas pode-se observar picos de difração característicos da fase de CaO em todas as amostras.

A Figura 1 mostra o difratograma do CaO preparado pelo método sol-gel. Pode-se observar picos de difração característicos das fases CaO e Ca(OH)₂. A formação da fase Ca(OH)₂ ocorre devido ao aspecto higroscópico do material (ANTZARA; HERACLEOUS; LEMONIDOU, 2015).

Figura 1 - Difratograma de raios x da amostra CaO calcinada a 800°C.



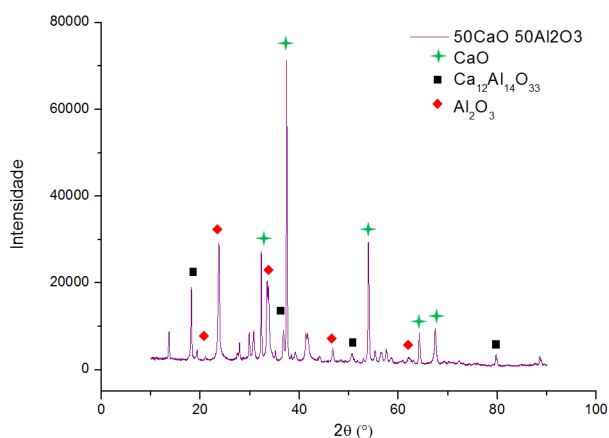
Fonte: Arquivo pessoal.

A amostra contendo 50% em massa de alumina e 50% em massa de CaO (50CaO50Al₂O₃) apresenta picos de difração com as fases CaO, Al₂O₃ e mayenite, Ca₁₂Al₁₄O₃₃ (Figura 2).

A fase mayenite pode aparecer quando é utilizado o nitrato de cálcio como precursor e alumina em temperatura em torno de 800 °C,

enquanto que para a formação da fase contendo $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ é necessária uma temperatura mais elevada. A fase mayenite atua como um material inerte em ciclos de carbonatação e decomposição e apresenta ponto de fusão em torno de 1300 °C (BRODA; KIERZKOWSKA; MÜLLER, 2012; GUO et al., 2016). Portanto, a formação da fase mayenite nos materiais contendo CaO e alumina está de acordo com os resultados reportados na literatura.

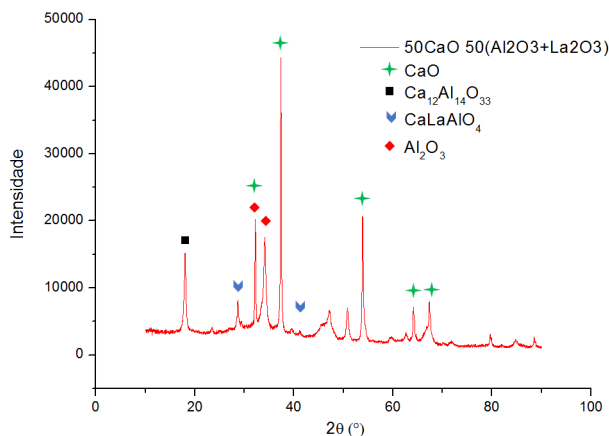
Figura 2 - Difratoograma de raios x da amostra 50CaO50Al₂O₃ calcinada a 800°C.



Fonte: Arquivo pessoal.

Na amostra 50CaO/50(Al₂O₃-La₂O₃) ocorreu a formação das fases como Ca₁₂Al₁₄O₃₃ (mayenite), CaLaAlO₄, Al₂O₃ e CaO, como pode-se observar na Figura 3.

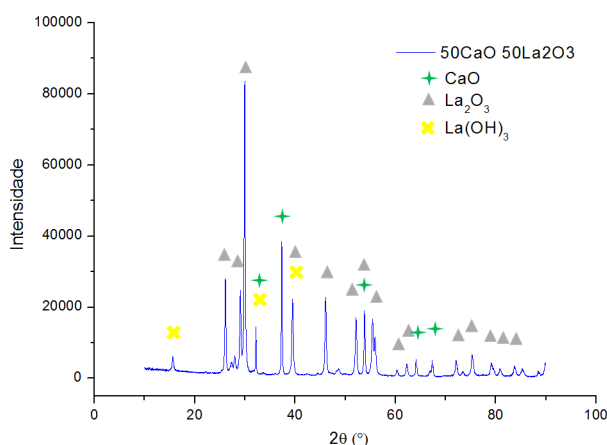
Figura 3 - Difratoograma de raios x da amostra 50CaO/50(Al₂O₃-La₂O₃) calcinada a 800°C.



Fonte: Arquivo pessoal.

Na amostra contendo 50% em massa de CaO e 50% em massa de óxido de lantânio (50CaO50La₂O₃) observa-se picos de difração característicos das fases La₂O₃, La(OH)₃ e CaO (Figura 4). A formação de La(OH)₃ foi observada em outros trabalhos (ANTZARA; HERACLEOUS; LEMONIDOU, 2015; LUO et al., 2010).

Figura 4 - Difratoograma de raios x da amostra 50CaO50La₂O₃ calcinada a 800°C.

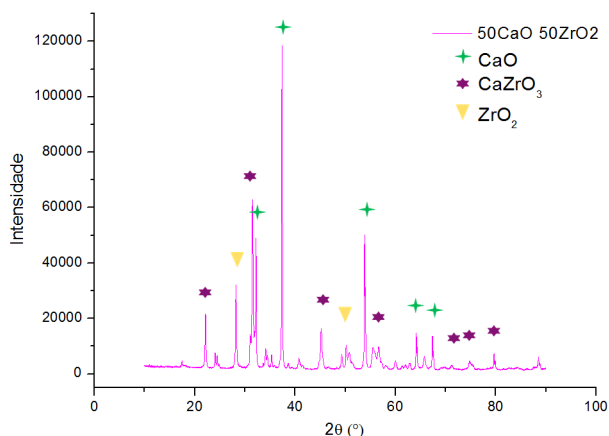


Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 5 mostra que na amostra contendo CaO e zircônia (50CaO50ZrO₂) ocorreu a formação das fases CaZrO₃, além de ZrO₂ e CaO. A fase CaZrO₃ corresponde a reação entre o ZrO₂ e o CaO (GUO et al., 2016). E de acordo com Guo et al., CaZrO₃ apresenta ponto de fusão de 2345°C e estabilidade química e térmica. Quando essa fase está bem dispersa, é criada uma barreira entre os grãos de CaO, evitando-se a aglomeração e crescimento de grãos de CaO. Nesse mesmo estudo, é observado que quanto mais Zr no material, maior a tendência de se formar CaZrO₃.

As imagens de MEV para as amostras de CaO sol-gel e 50CaO50(Al₂O₃+La₂O₃) são apresentadas nas Figura 6a e b, respectivamente. Pode-se observar nas Figuras 6a e 6b partículas bem conectadas e porosas, principalmente para a amostra 50CaO50(Al₂O₃+La₂O₃).

Figura 5 - Difratoograma de raios x da amostra 50CaO50ZrO₂ calcinada a 800°C.



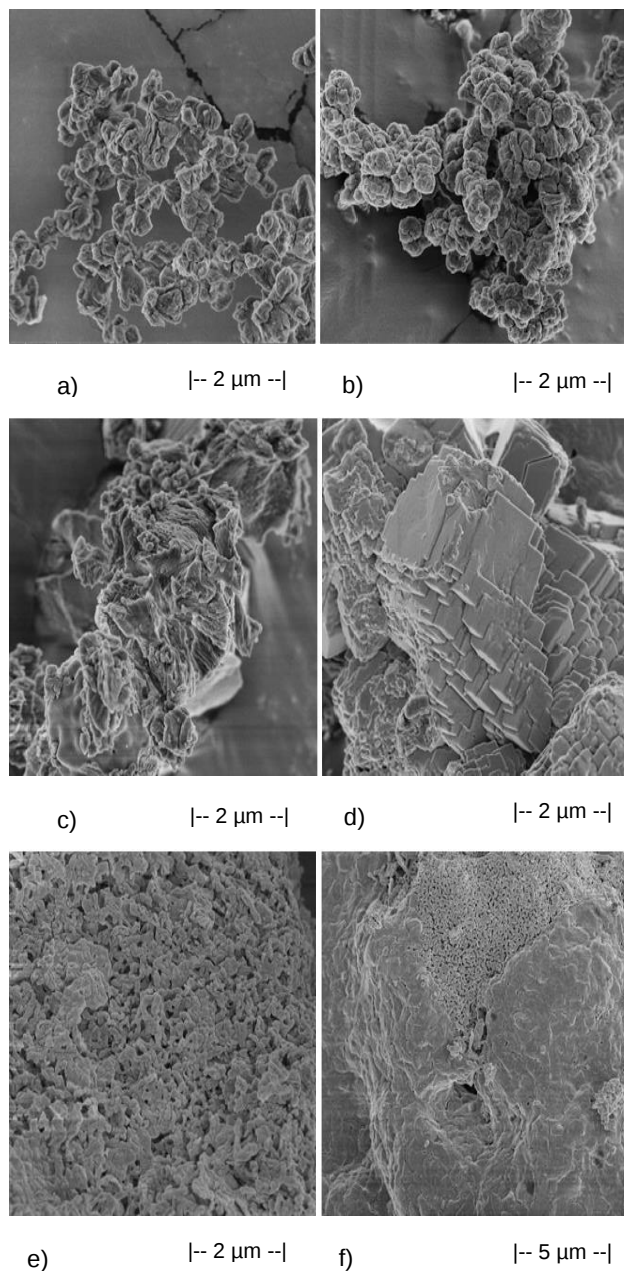
Fonte: Arquivo pessoal.

As imagens de MEV para as amostras 50CaO50Al₂O₃ e 50CaO50ZrO₂ são apresentadas nas Figuras 6c e 6d, respectivamente. Elas apresentam partículas muito maiores que as amostras CaO sol-gel e 50CaO50(Al₂O₃+La₂O₃). A porosidade também é menor do que as observadas para as amostras CaO sol-gel e 50CaO50(Al₂O₃+La₂O₃).

A área BET da amostra CaO sol-gel é de apenas 5,6 m²/g, enquanto que a área de 50CaO 50(Al₂O₃+La₂O₃) é de 60,8 m²/g, ou seja, 10 vezes maior que a CaO sol-gel. Koirala, Reddy e Smirniotis (2012) observaram uma área BET semelhante a encontrada neste trabalho utilizando a técnica de spray pirólise com um material contendo alumina e cálcio na proporção 3:10 (KOIRALA; REDDY; SMIRNIOTIS, 2012). A área BET para as demais amostras foi menor do que 1,2 m²/g, indicando redução da área com a adição do suporte.

A amostra 50CaO50La₂O₃ foi analisada por MEV utilizando duas ampliações (Figuras 6e e 6f). A amostra apresentou partículas bem pequenas e com porosidade similar ao CaO sol-gel, indicando que a adição de La₂O₃ não alterou as propriedades texturas do CaO. De fato, a área BET da amostra de 50CaO50La₂O₃ foi de 4,1m²/g, que é muito similar a área da amostra CaO sol-gel.

Figura 6 - Micrografia antes dos ciclos (a) CaO sol-gel, (b) 50CaO50(Al₂O₃+La₂O₃), (c) 50CaO50Al₂O₃, (d) 50CaO50ZrO₂, (e) 50CaO50La₂O₃ com ampliação de 50000x, (f) 50CaO50La₂O₃ com ampliação de 20000x

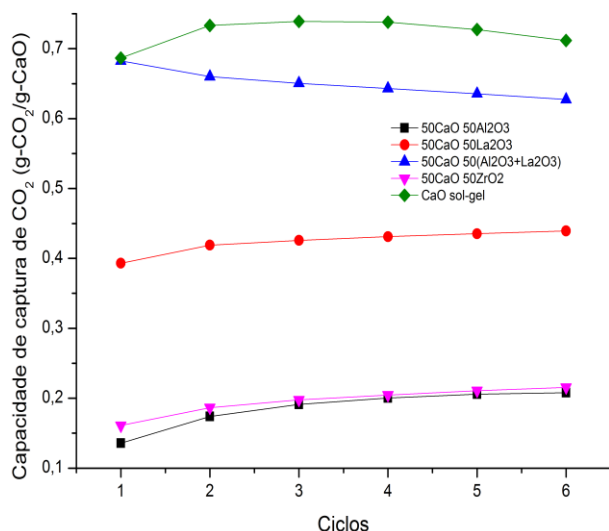


Fonte: Arquivo pessoal.

3.2 Medidas da captura de CO₂

Os ciclos de carbonatação e decomposição foram efetuados em uma termobalança e mediu-se a variação de massa durante os ciclos. A capacidade de captura foi calculada de acordo com a equação 1 e o resultado está representado na Figura 7.

Figura 7 – Capacidade de captura de CO₂ (g-CO₂/g-CaO) durante os ciclos de carbonatação e decomposição para todas as amostras calcinadas a 800 °C.



Fonte: Arquivo pessoal.

O material CaO preparado pelo sol-gel apresentou a melhor capacidade de captura de CO₂. Entretanto, essa captura diminuiu com o aumento dos ciclos de carbonatação e decomposição, indicando sinterização da amostra. Outros trabalhos que utilizam CaO puro também tem reportado sinterização das partículas de CaO durante a captura de CO₂ (LUO et al., 2011; XU et al., 2016).

A amostra 50CaO50(Al₂O₃+La₂O₃) apresentou uma ligeira queda na captura de CO₂ com o aumento dos ciclos reacionais. A queda da capacidade de captura de 50CaO50(Al₂O₃+La₂O₃) deve-se ao fenômeno de sinterização, no qual há uma redução na área específica do material e consequentemente na captura de CO₂ (CHEN et al., 2016; KIERZKOWSKA et al., 2013).

O La₂O₃ é conhecido por estabilizar as fases de outros óxidos (KOBAYASHI; TADANAGA; MINAMI, 1998). Entretanto, a reação de La₂O₃ com a alumina e o CaO não resultou em uma espécie capaz de inibir a sinterização das partículas de CaO durante as reações de carbonatação e decomposição. Essa desativação deve estar relacionada a quantidade de La₂O₃ utilizada na preparação da amostra e ao método de preparação empregado. De fato, a amostra 50CaO50La₂O₃ apresentou resultados satisfatórios da captura de CO₂ e estabilidade durante os ciclos de carbonatação e decomposição.

Os materiais 50CaO50Al₂O₃ e 50CaO50ZrO₂, que foram preparados pelo mesmo método, apresentam capacidade de captura muito baixa e semelhantes. A baixa capacidade de captura de CO₂ para a amostra 50CaO50Al₂O₃ pode ser atribuída a formação do aluminato de cálcio, que não reage com o CO₂, enquanto que a amostra contendo ZrO₂ apresenta baixa área BET, o que inibe a captura de CO₂. Esses resultados estão de acordo com os apresentados por Xu et al. (2016), no qual a zircônia apresentou maior capacidade de captura do que a alumina. Esses dados foram explicados pela temperatura de fusão da zircônia (2709°C) e CaZrO₃ (2345°C) serem maiores do que a da alumina (2000°C) e mayenite (~1300°C) (GUO et al., 2016; XU et al., 2016).

A presença da fase mayenite inibiu a desativação da amostra 50CaO50Al₂O₃, mas diminuiu drasticamente a capacidade de captura de CO₂. Outros autores também observaram alta estabilidade de materiais a base de cálcio modificados com alumina (FENNEL; ANTHONY, 2015; LU; HAO; ZHANG, 2014).

Portanto, os materiais de CaO modificados com La₂O₃ mostraram os melhores resultados para captura de CO₂ a 700° C, sendo que o material com maior quantidade de La₂O₃ mostrou maior estabilidade durante os ciclos de reação. Isso mostra que esses materiais são promissores para serem empregados na captura de CO₂ proveniente de gases de combustão.

4 CONCLUSÃO

A adição de alumina ao CaO inibiu a sinterização da amostra durante os ciclos de carbonatação e decomposição através da presença da mayenite. Efeito similar foi observado na amostra com ZrO₂. A amostra de CaO modificada com La₂O₃ mostrou elevada capacidade de captura de CO₂ e elevada estabilidade. Contudo, a estabilidade dependeu da quantidade de La₂O₃ adicionado ao CaO e do método de preparação empregado. Dessa forma, materiais a base de CaO modificado com La₂O₃ são promissores para uma captura de CO₂ eficiente e estável durante vários ciclos de carbonatação e decomposição.

5 REFERÊNCIAS

- ABANADES, J. C.; ALVAREZ, D. Conversion limits in the reaction of CO₂ with lime. **Energy and Fuels**, v. 17, n. 2, p. 308–315, 2003.
- ANTZARA, A.; HERACLEOUS, E.; LEMONIDOU, A. A. Improving the stability of synthetic CaO-based CO₂ sorbents by structural promoters. **Applied Energy**, v. 156, p. 331–343, 2015.
- BRODA, M.; KIERZKOWSKA, A. M.; MÜLLER, C. R. Application of the sol-gel technique to develop synthetic calcium-based sorbents with excellent carbon dioxide capture characteristics. **ChemSusChem**, v. 5, n. 2, p. 411–418, 2012.
- CHEN, H. et al. Reactivity enhancement of calcium based sorbents by doped with metal oxides through the sol-gel process. **Applied Energy**, v. 162, p. 390–400, 2016.
- FENG, B. et al. Overcoming the problem of loss-in-capacity of calcium oxide in CO₂ capture. **Energy and Fuels**, v. 20, n. 6, p. 2417–2420, 2006.
- FENNEL, P.; ANTHONY, B. **Calcium and Chemical Looping Technology for Power Generation and Carbon Dioxide (CO₂) Capture**. [s.l.: s.n.]. v. 1, 2015.
- GRASA, G. S.; ABANADES, J. C. CO₂ Capture Capacity of CaO in Long Series of Carbonation/Calcination Cycles. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 45, n. 26, p. 8846–8851, 2006.
- GUO, H. et al. Incorporation of Zr into Calcium Oxide for CO₂ Capture by a Simple and Facile Sol-gel Method Incorporation of Zr into Calcium Oxide for CO₂ Capture by a Simple and Facile Sol-gel Method. 2016.
- IEA. Energy and Climate Change. **World Energy Outlook Special Report**, p. 1–200, 2015.
- KIERZKOWSKA, A. M. et al. Synthesis of calcium-based, Al₂O₃-stabilized sorbents for CO₂ capture using a co-precipitation technique. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 15, p. 48–54, 2013.
- KOBAYASHI, H.; TADANAGA, K.; MINAMI, T. Preparation and thermal stability of La₂O₃–Al₂O₃ aerogels from chemically modified Al-alkoxide, **Journal of Materials Chemistry**, 1998, 8, 1241–1244.
- KOIRALA, R.; REDDY, G. K.; SMIRNIOTIS, P. G. Single nozzle flame-made highly durable metal doped Ca-based sorbents for CO₂ capture at high temperature. **Energy and Fuels**, v. 26, n. 5, p. 3103–3109, 2012.
- LEE, Z. H. et al. The role of nickel oxide additive in lowering the carbon dioxide sorption temperature of CaO. **Journal of Energy Chemistry**, v. 24, n. 2, p. 225–231, 2015.
- LEUNG, D. Y. C.; CARAMANNA, G.; MAROTO-VALER, M. M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 426–443, 2014.
- LU, A.-H.; HAO, G.-P.; ZHANG, X.-Q. **Porous Materials for Carbon Dioxide Capture**. [s.l.: s.n.], 2014.
- LUO, C. et al. Development and Performance of CaO/La₂O₃ Sorbents during Calcium Looping Cycles for CO₂ Capture. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 22, p. 11778–11784, 2010.
- LUO, C. et al. SGCS-made ultrafine CaO/Al₂O₃ sorbent for cyclic CO₂ capture. **Chinese Chemical Letters**, v. 22, n. 5, p. 615–618, 2011.
- LUO, C. et al. Wet mixing combustion synthesis of CaO-based sorbents for high temperature cyclic CO₂ capture. **Chemical Engineering Journal**, v. 267, p. 111–116, 2015.
- VALVERDE, J. M.; SANCHEZ-JIMENEZ, P. E.; PEREZ-MAQUEDA, L. A. Calcium-looping for post-combustion CO₂ capture. On the adverse effect of sorbent regeneration under CO₂. **Applied Energy**, v. 126, p. 161–171, 2014.
- XU, P. et al. CO₂ capture performance of CaO-based sorbents prepared by a sol-gel method. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 34, p. 12161–12169, 2013.
- XU, Y. et al. Characteristics and performance of CaO-based high temperature CO₂ sorbents derived from a sol-gel process with different supports. **RSC Adv.**, v. 6, n. 83, p. 79285–79296, 2016.