

CAPTURA DE CO₂ DE GASES DE COMBUSTÃO UTILIZANDO ÓXIDO DE CÁLCIO SUPTADO EM ALUMINA

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 contendo óxido de cálcio (CaO) e alumina foram preparados pelos métodos sol-gel e impregnação incipiente e testados na captura de dióxido de carbono (CO₂). Os materiais foram caracterizados por difração de raios x, microscopia eletrônica de varredura e adsorção de nitrogênio. A reação de carbonatação foi realizada a 700 °C e a calcinação a 800 °C. A amostra contendo apenas CaO apresentou boa capacidade de captura nos primeiros ciclos de carbonatação e diminuiu nos demais ciclos. Essa queda na capacidade de captura foi atribuída a sinterização das partículas de CaO. A modificação do CaO com a adição de alumina aumentou a estabilidade do material, mas a capacidade de captura de CO₂ diminuiu. O aumento da estabilidade foi atribuído a presença de aluminato de cálcio, que foi observado por difração de raios x em todas as amostras contendo alumina. A capacidade de captura de CO₂ foi dependente da quantidade de alumina adicionada. Finalmente, a adição de alumina ao CaO pode ser promissora para se capturar CO₂ com eficiência e estabilidade durante diversos ciclos

Palavras-chave: captura de CO₂, óxido de cálcio, alumina, ciclos reacionais.

ABSTRACT

Calcium oxide and alumina containing materials were prepared by sol-gel and incipient wetness impregnation and applied to carbon dioxide capture calcium looping. The materials were characterized by x-ray diffraction, scanning electron microscope, and nitrogen adsorption. The samples were tested in a looping reaction where the carbonation was realized at 700 °C while the calcination was made at 800 °C. The CaO-containing sample showed good CO₂ capture efficiency in the first cycles of reaction but the sample deactivated after the initial cycles. The deactivation was attributed to sintering of the calcium oxide particles. The modification of CaO with alumina increased the stability of material during CO₂ capture but the CO₂ capture efficiency decreased. Increasing in stability was due to presence of calcium aluminate, which it was observe by x-ray diffraction in all samples modified with alumina. The CO₂ capture efficiency depended on the amount of alumina in the samples. The addition of alumina into CaO can be produced to capture CO₂ with high efficiency and stability.

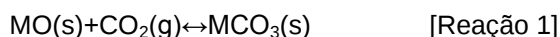
Key-Words: CO₂ capture, calcium oxide, alumina, looping reactions.

1 INTRODUÇÃO

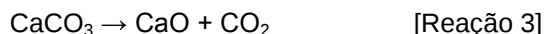
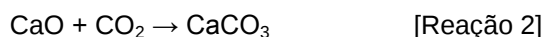
Os eventos climáticos estão cada vez mais relacionados com a crescente presença de gases de efeito estufa (GEE), gerados principalmente pela queima de combustíveis fósseis, sendo que o dióxido de carbono (CO₂) representa mais da metade de GEE. Segundo a Agência Internacional de Energia (2015), a principal fonte de energia ainda será por combustão de combustíveis fósseis até, pelo menos, 2030

Assim, a captura de CO₂ de plantas de combustão de carvão mineral, plantas de processamento de gás natural e da indústria metalúrgica, está sendo amplamente discutida como uma técnica eficiente na redução das emissões de CO₂ (FENNEL; ANTHONY, 2015; LU; HAO; ZHANG, 2014). Diversos métodos, tais como absorção, adsorção, separação por membranas, e ciclos de carbonatação e decomposição, podem ser aplicados a captura de CO₂ (FENNEL; ANTHONY, 2015).

A absorção de CO₂ utilizando amina é o método mais aplicado na indústria para captura de CO₂. Porém, é um processo caro devido à regeneração e degradação da amina (CREAMER; GAO, 2016). Um método alternativo a absorção é a reação entre o CO₂ e um óxido de metal alcalino terroso, de acordo com a reação 1.



De acordo com trabalhos publicados na literatura, levando em consideração o preço, reatividade e desativação do material, o uso do óxido de cálcio (CaO) para captura de CO₂ é o mais viável (BLAMEY et al., 2010). A captura de CO₂ com o emprego de CaO ocorre de acordo com a reação 2, chamada de carbonatação, em temperaturas acima de 500 °C, enquanto a regeneração do CaO ocorre pela reação de decomposição do carbonato de cálcio (reação 3), que acontece acima de 700 °C. Esse processo é denominado Ca-Looping, e se refere a diversos ciclos de carbonatação e decomposição (CHEN et al. 2016, GRASA; ABANADES, 2006; RADFARNIA; SAYARI, 2015; VALVERDE; SANCHEZ-JIMENEZ; PEREZ-MAQUEDA, 2014).



Com isso, a utilização de materiais sólidos a base de CaO tem sido muito reportada em processos de pós-combustão, que tem cerca de 15% de CO₂ em uma corrente de gás em alta velocidade (VALVERDE; SANCHEZ-JIMENEZ; PEREZ-MAQUEDA, 2014). Entretanto, Barker (1973) mostrou que o CaO puro não é indicado para ser utilizado em Ca-Looping devido à sua baixa estabilidade e reatividade depois de diversos ciclos de calcinação e carbonatação. A baixa estabilidade e reatividade foi atribuída a perda do volume dos poros do CaO e a sinterização.

Assim, muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de minimizar a perda da capacidade de captura de CO₂ (ANTZARA; HERACLEOUS; LEMONIDOU, 2015). Por exemplo, o uso de estabilizadores de fase, como a alumina, que é inerte e apresenta alta temperatura de sinterização, foi empregada por Xu et al. (2013).

Feng et al. (2006) estudaram a utilização da γ -alumina em pequenas partículas de CaO, que

foram preparadas pelo método de impregnação úmida. A captura de CO₂ foi realizada a 1000°C e atingiu uma conversação maior do que 90% após 9 ciclos de reação. Gruene et al. (2011) verificaram o efeito da γ -alumina no CaO sobre ciclos de carbonatação e decomposição, que foram realizados ambos a 650 °C. O CaO modificado com alumina apresentou resultados superiores ao CaO puro. Sun et al. (2016) avaliaram a presença de uma cerâmica contendo alumina com CaO, na proporção de 90%CaO e 10% de cerâmica, em 20 ciclos de carbonatação e decomposição. Os autores reportaram uma capacidade de captura de 0,41 g de CO₂ por grama de material empregado e observaram a formação de um aluminato do tipo Ca₁₂Al₁₄O₃₃.

Diante desse cenário e considerando que há uma grande dificuldade em comparar os resultados reportados na literatura devido ao emprego de diversas condições de operação do reator, materiais e métodos de preparação, o objetivo desse trabalho é avaliar a influência da alumina sobre o CaO na captura de CO₂. O material foi preparado pelo método de impregnação incipiente e sol-gel, e a carbonatação foi realizada a 700 °C e a calcinação a 800 °C.

2 PARTE EXPERIMENTAL

2.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

2.1.1 CaO puro

A amostra foi sintetizada utilizando o método sol-gel (LEE et al., 2015) com emprego de nitrato de cálcio Ca(NO₃)₂ (pureza 99%), ácido cítrico (pureza 99%) e água destilada. Primeiramente, Ca(NO₃)₂ foi dissolvido em água destilada na proporção 125:1 e misturado com ácido cítrico na razão de 1:3. Então, a mistura foi agitada e aquecida a 80°C até a formação do gel. Em seguida, a amostra foi envelhecida por 10 h, secada em uma estufa a 90 °C por 24 h, para obter o xerogel. O xerogel foi calcinação a 800 °C por 4 h. O material foi posteriormente moído e peneirado para se obter um pó fino e de mesma granulometria de 100 mesh. A amostra foi denominada CaO sol-gel.

2.1.2 CaO modificado com alumina

Os materiais com composição mássica de 50%CaO50%Al₂O₃, 70%CaO30%Al₂O₃,

80%CaO20%Al₂O₃ e 90%CaO10%Al₂O₃ foram sintetizados utilizando o método de impregnação incipiente (REGALBUTO, 2007). Para isso, foi utilizado o nitrato de cálcio (pureza ≥ 99%) como precursor do cálcio e alumina em pó (previamente calcinada a 800 °C por 4h). O nitrato foi solubilizado em 50 mL de etanol sob agitação por 1h. Em seguida, foi adicionado o suporte à solução e a mistura foi agitada por 2 h. Depois, foi feita a secagem no rotaevaporador 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. As amostras foram denominadas 50CaO50Al₂O₃, 70CaO30Al₂O₃, 80CaO20Al₂O₃ e 90CaO10Al₂O₃.

2.2 TESTE DE CAPTURA DE CO₂

Os ciclos de calcinação e carbonatação foram realizados em uma termobalança da marca Shimadzu. Primeiramente, foi feito o aquecimento de aproximadamente 15 mg de amostra até 800 °C em atmosfera de nitrogênio para eliminação de possíveis impurezas. Em seguida, a temperatura foi diminuída para 700 °C com fluxo de nitrogênio e, então, o fluxo de nitrogênio foi substituído por um de CO₂ puro e a reação de carbonatação foi acompanhada por 60 minutos. A decomposição foi realizada a 800 °C em fluxo de nitrogênio por 60 minutos.

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

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

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

em que m_N representa a massa final após a última etapa de carbonatação, m₀ é a massa de material após a calcinação inicial, m_{CaO} é a massa de CaO da amostra, M_{CaO} e M_{CO₂} são as massas molares do CaO e do CO₂, respectivamente.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram caracterizadas por difração de raios x (XRD), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e adsorção de nitrogênio.

A caracterização dos materiais por XRD foi feita 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.

A análise dos materiais por MEV foi realizada com um microscópio da FEI Magellan 400 L, de alta resolução, no modo elétrons secundários.

As isotermas de adsorção de N₂ foram medidas a -196° C por meio de um equipamento automatizado de análise de adsorção de gases da Micromeritics. A área superficial específica foi determinada pela aplicação do método Brunauer-Emmett-Teller (BET).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A Figura 1 apresenta os difratogramas de raios x para as amostras calcinadas a 800 °C. Pode-se observar que há a presença do CaO em todos os materiais, mas também houve a formação de outras fases.

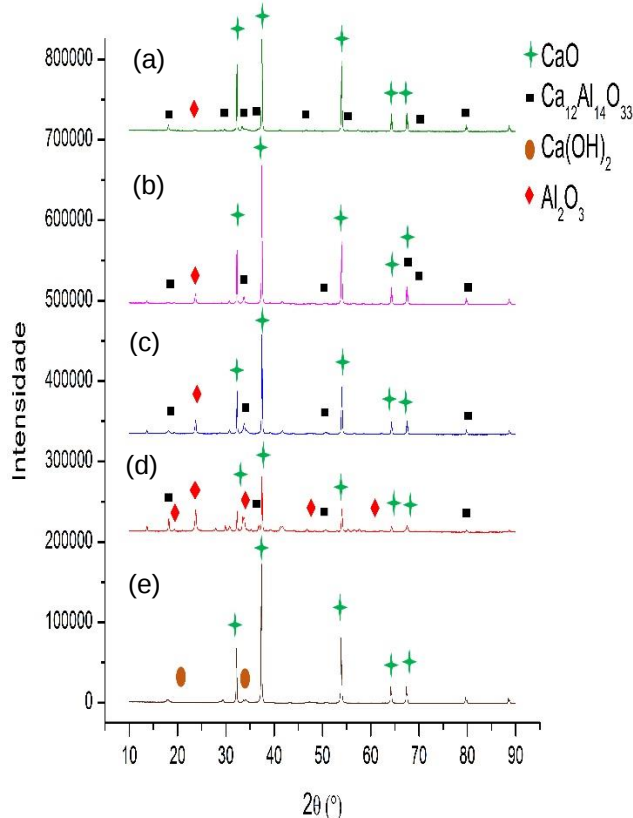
Nas amostras de CaO sol-gel, 80CaO 20Al₂O₃, e 50CaO 50Al₂O₃ foram identificados a presença de Ca(OH)₂ com baixa intensidade. A formação de Ca(OH)₂ ocorre devido à natureza higroscópica da amostra (ANTZARA; HERACLEOUS; LEMONIDOU, 2015).

A fase Ca₁₂Al₁₄O₃₃ (mayenite) foi observada em todas as amostras contendo alumina. De acordo com Lu, Hao e Zhang (2014) a fase Ca₁₂Al₁₄O₃₃ ocorre pela reação entre o Al e óxido de cálcio e é termodinamicamente favorável em temperaturas entre 800 e 900 °C. Pode-se observar na Figura 1 que as amostras contendo 80 e 90% de CaO apresentam maior intensidade dos picos característicos da fase Ca₁₂Al₁₄O₃₃, sugerindo uma maior concentração dessa fase nas amostras. Esses resultados sugerem também que o método de preparação das amostras e a menor quantidade de alumina favoreceu a formação de aluminato, que é uma fase inerte para a reação de carbonatação (LU; HAO; ZHANG, 2014).

A presença da fase alumina também variou de acordo com a amostra (Figura 1). É possível perceber maior intensidade de difração dos picos referentes a Al₂O₃ nas amostras de 50CaO50Al₂O₃ e 70CaO30Al₂O₃. Pode-se observar maior intensidade dos picos característicos do aluminato de cálcio nas

amostras de $90\text{CaO}10\text{Al}_2\text{O}_3$ e $80\text{CaO}20\text{Al}_2\text{O}_3$, indicando uma maior reação entre a alumina e o CaO.

Figura 1 - Difratomogramas de raios x das amostras calcinadas a 800 °C. (a) $90\text{CaO}10\text{Al}_2\text{O}_3$, (b) $80\text{CaO}20\text{Al}_2\text{O}_3$, (c) $70\text{CaO}30\text{Al}_2\text{O}_3$, (d) $50\text{CaO}50\text{Al}_2\text{O}_3$, (e) CaO sol-gel.



Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 2 apresenta as micrografias de MEV das amostras de CaO sol-gel, $50\text{CaO}50\text{Al}_2\text{O}_3$ e $80\text{CaO}20\text{Al}_2\text{O}_3$. A Figura 2a mostra a formação de pequenas partículas de CaO e grande espaçamento entre elas. As amostras contendo alumina, que foram preparadas por impregnação incipiente, apresentam partículas muito compactas e pouco uniformes (Figura 2b e 2c).

A morfologia apresentada pela amostra de CaO sol-gel pode ser explicada através da reação que ocorre durante sua preparação. Nessa reação (reação 4), o nitrato de cálcio atua como agente de oxidação, enquanto que o ácido cítrico atua como um combustível (LU; HAO; ZHANG, 2014)

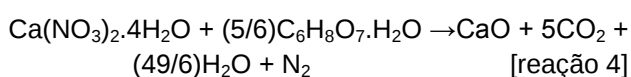
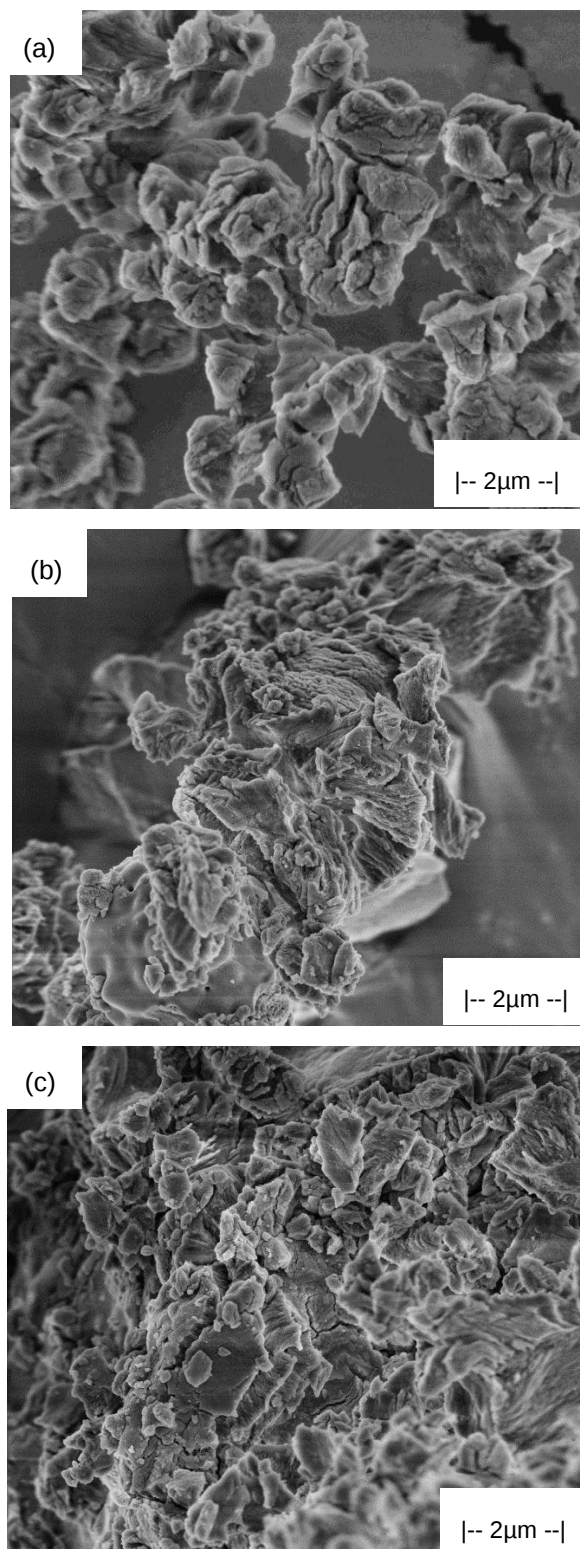


Figura 2 – Micrografias das amostras calcinadas a 800 °C: (a) CaO sol-gel, (b) $50\text{CaO}50\text{Al}_2\text{O}_3$, (c) $80\text{CaO}20\text{Al}_2\text{O}_3$.



Fonte: Arquivo pessoal.

A reação 4 libera uma grande quantidade de gases e calor, o que permite a formação de grãos de CaO bem conectados e espaçados. Dessa forma,

esse material contribui para a difusão de CaO dentro do material, o que leva a uma maior capacidade de capturar o volume de CO₂ (XU et al., 2016).

As Figuras 2b e 2c foram obtidas para os materiais contendo alumina, que foram preparados pelo método de impregnação incipiente (REGALBUTO, 2007). Este método consiste em depositar o precursor (Ca(NO₃)₂) dentro dos poros do suporte. Dessa forma, é possível observar que através desse método obteve-se uma larga distribuição de tamanho de partículas e de baixa porosidade

Outro parâmetro importante na caracterização desses materiais é a área BET que estão representados na Tabela 1. A amostra de CaO sol-gel apresentou uma área específica de 5,6 m²/g, que é a maior área entre as amostras estudadas neste trabalho. Enquanto que os materiais contendo Al₂O₃ apresentaram áreas específicas baixas (entre 1,2 e 0,4 m²/g), sugerindo bloqueio dos poros da alumina após a adição do CaO. De fato, a área inicial da alumina (294 m²/g) reduziu drasticamente com a adição de CaO, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Área superficial específica (BET) do CaO sol-gel e CaO-Al₂O₃ com diferentes composições.

BET - Área específica (m ² /g)				
CaO sol-gel	50CaO 50Al ₂ O ₃	70CaO 30Al ₂ O ₃	80CaO 20Al ₂ O ₃	90CaO 10Al ₂ O ₃
5,6	1,2	0,7	0,4	1,1

Fonte: Arquivo pessoal.

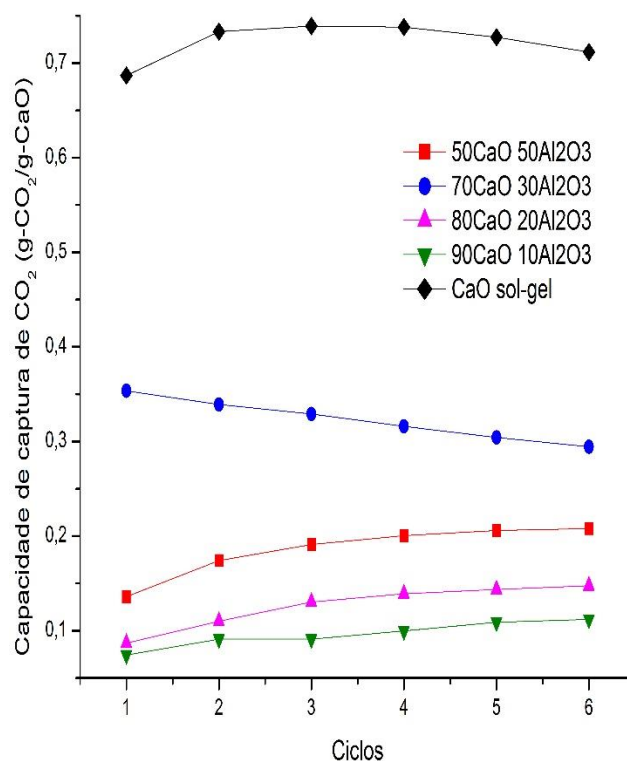
Estudos realizados por Broda e Muller (2012) mostraram que a captura de CO₂ está relacionada a área específica e ao volume de poros da amostra. Os autores prepararam um material contendo Ca²⁺/Al³⁺ na razão de 90:10 pelo método sol-gel, utilizando o nitrato de cálcio como precursor, e o resultado da área superficial foi de 0,2 m²/g. Os autores utilizaram uma alumina com área superficial de 275 m²/g. Portanto, os resultados apresentados neste trabalho estão de acordo com os resultados obtidos por Broda e Muller (2012).

3.2 CAPTURA DE CO₂

Os ciclos de carbonatação e decomposição foram realizados para as amostras contendo

50CaO50Al₂O₃, 70CaO30Al₂O₃, 80CaO20Al₂O₃, e 90CaO10Al₂O₃ e CaO sol-gel (Figura 3).

Figura 3 – Capacidade de captura de CO₂ (g-CO₂/g-CaO) durante os ciclos de reação para todas as amostras calcinadas a 800°C.



Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 3 mostra que a amostra CaO sol-gel apresentou um pequeno aumento na capacidade de captura até o terceiro ciclo e, a partir deste ponto, começou a diminuir, sendo que a captura no último ciclo foi de 0,71 (g-CO₂/g-CaO). A amostra 70CaO30Al₂O₃ apresentou também queda constante na capacidade de captura ao longo dos ciclos, indicando uma perda de captura de CO₂ com o aumento dos ciclos reacionais, sendo que a conversão inicial foi de 45% e a conversão após 6 ciclos foi de 37%. As amostras 90CaO10Al₂O₃ e 80CaO20Al₂O₃ apresentaram boa estabilidade durante os ciclos, mas a captura de CO₂ foi extremamente baixa, em torno de 0,1 (g-CO₂/g-CaO) no último ciclo. A amostra 50CaO50Al₂O₃ apresentou uma taxa de captura praticamente constante nos três últimos ciclos, cerca de 0,2 (g-CO₂/g-CaO).

Pode-se observar que a captura de CO₂ é muito maior sobre a amostra preparada pelo método

sol-gel, sugerindo maior disponibilidade de sítios ativos para a reação entre o CO_2 e o CaO . Este resultado pode ser explicado pela maior área superficial específica da amostra CaO sol-gel em comparação com as amostras contendo alumina (Tabela 1). Entretanto, a capacidade de captura de CO_2 para a amostra CaO sol-gel diminui a partir do quarto ciclo de reação, sugerindo uma perda de atividade. Essa perda de atividade foi observada por vários autores e pode ser atribuída a sinterização do CaO (KIERZKOWSKA et al., 2013).

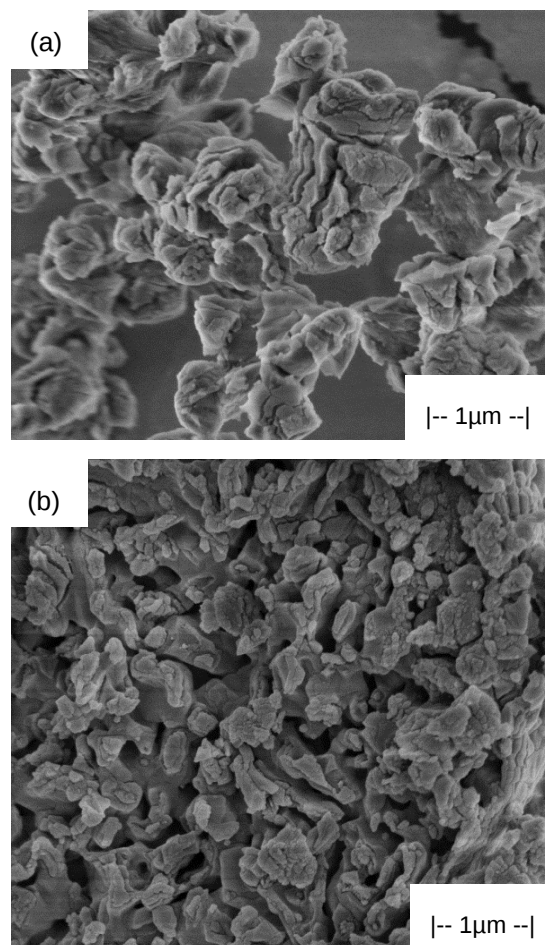
A Figura 4 apresenta micrografias de MEV para a amostra CaO sol-gel calcinada a 800°C (Figura 4a) e para a mesma amostra testada em seis ciclos de carbonatação e decomposição (Figura 4b). Pode-se observar uma densificação das partículas de CaO , indicando sinterização do material. Os resultados apresentados neste trabalho estão de acordo com os resultados apresentados na literatura (BRODA; KIERZKOWSKA; MÜLLER, 2012; KIERZKOWSKA et al., 2013).

Interessantemente, a amostra contendo $70\text{CaO}30\text{Al}_2\text{O}_3$ apresentou uma desativação bem acentuada com os seis ciclos de carbonatação e decomposição, indicando que não ocorreu a estabilização do CaO com a adição de 30% de Al_2O_3 . Os resultados de DRX mostram que houve a formação de aluminato do tipo $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$, mas também pode-se observar a presença da fase CaO . Os resultados indicam que a quantidade de alumina adicionada ao CaO é importante na estabilidade e eficiência do material.

A literatura mostra que a captura de CO_2 utilizando materiais a base de cálcio depende de vários fatores, tais como método de preparação do material, condições de reação, e tipo de precursor utilizado na preparação. De fato, Broda et al. (2012) mostraram que a capacidade de captura de CO_2 foi extremamente baixa para uma amostra preparada pelo método sol-gel com nitrato de cálcio. Os autores também mostram que amostras de CaO modificadas com alumina sofreram desativação com o aumento dos ciclos reacionais.

Portanto, materiais a base de cálcio modificados com alumina podem ser empregados na captura de CO_2 . Entretanto, esses materiais precisam ser preparados com o método adequado, utilizando os melhores precursores e as melhores condições de preparação para se obter elevada estabilidade e eficiência de captura.

Figura 4 – Micrografias de MEV das amostras de CaO sol-gel: (a) antes dos ciclos e (b) após os seis ciclos.



Fonte: Arquivo pessoal.

4 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi avaliado diferentes composições de CaO modificados com alumina na captura de CO_2 . A captura de CO_2 foi eficiente para esse tipo de sistema, sendo que os melhores resultados seguem a seguinte ordem CaO sol-gel > $70\text{CaO}30\text{Al}_2\text{O}_3$ > $50\text{CaO}50\text{Al}_2\text{O}_3$ > $80\text{CaO}20\text{Al}_2\text{O}_3$ > $90\text{CaO}10\text{Al}_2\text{O}_3$. A alumina atuou de forma importante na captura de CO_2 , já que a presença do inerte mayenita reduziu a sinterização, e permitiu estabilidade ao material. Todos os materiais apresentam baixa área superficial específica e baixa captura de CO_2 . O método sol-gel foi mais interessante para captura de CO_2 do que impregnação incipiente, pois permitiu maior exposição do óxido de cálcio ao CO_2 , e consequentemente, maior conversão do CaO . A desativação do material foi devido a sinterização das partículas de CaO . Portanto, a adição de alumina ao CaO pode evitar a sinterização do material, mas o

método de preparação deve ser escolhido com muito cuidado, pois afeta a eficiência de captura de CO₂.

5 REFERÊNCIAS

- 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.
- BLAMEY, J. et al. The calcium looping cycle for large-scale CO₂ capture. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 2, p. 260–279, abr. 2010.
- 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.
- BRODA, M.; MÜLLER, C. R. Synthesis of highly efficient, Ca-based, Al₂O₃-stabilized, carbon gel-templated CO₂ sorbents. **Advanced Materials**, v. 24, n. 22, p. 3059–3064, 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.
- CREAMER, A. E.; GAO, B. Carbon-based adsorbents for postcombustion CO₂ capture: A critical review. **Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 14, p. 7276–7289, 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.
- GRUENE, P. et al. Dispersed calcium oxide as a reversible and efficient CO₂ sorbent at intermediate temperatures. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 50, n. 7, p. 4042–4049, 2011.
- 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.
- 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.
- LU, A.-H.; HAO, G.-P.; ZHANG, X.-Q. **Porous Materials for Carbon Dioxide Capture**. [s.l.: s.n.].
- RADFARNIA, H. R.; SAYARI, A. A highly efficient CaO-based CO₂ sorbent prepared by a citrate-assisted sol – gel technique. v. 262, p. 913–920, 2015.
- REGALBUTO, J. **CATALYST Science and Engineering**. [s.l.: s.n.], p. 490, 2007
- SUN, Z. et al. Improvements of CaO-based sorbents for cyclic CO₂ capture using a wet mixing process. **Chemical Engineering Journal**, v. 286, p. 320–328, 2016.
- 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.