

## POTENCIAL USO DE SERPENTINITE NO ARMAZENAMENTO MINERAL DO CO<sub>2</sub>

Natacha Alves, Claudia Xavier, Jeane Dullius, Rosane Ligabue, João Marcelo Ketzer, Marcus Seferin e Sandra Einloft\*  
Faculdade de Química, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Av. Ipiranga, 6681, 90619-900 Porto Alegre – RS, Brasil

Recebido em 22/6/12; aceito em 14/12/12; publicado na web em 12/3/13

POTENTIAL USE OF SERPENTINITE FOR CO<sub>2</sub> MINERAL STORAGE. Rising anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions are considered a major contributor to the greenhouse effect. There are several options for reducing atmospheric CO<sub>2</sub> levels, and among these alternatives, Carbon Capture and Storage (CCS) has been identified as an effective and promising approach. This work investigated the feasibility of using serpentinite as a vehicle for carbon storage presenting a source-sink match. The main results of the work confirmed that serpentinite is appropriate for the carbonation process due to the high concentration of Mg in its composition.

Keywords: climate change; mineral carbonation; serpentinite.

### INTRODUÇÃO

A presença de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera, assim como de outros gases causadores de efeito estufa (GEE), tem aumentado bastante nos últimos séculos, principalmente a partir da Revolução Industrial. Entre os principais motivos deste aumento está a crescente queima de combustíveis fósseis para a geração de energia.<sup>1-4</sup> Apesar desta constatação, a utilização de combustíveis fósseis como uma das principais fontes de energia deverá continuar por um longo tempo, uma vez que não se vislumbra, no momento, um aumento significativo de participação das fontes renováveis na matriz energética mundial.<sup>3-5</sup> O problema da emissão de gases poluentes tem ganhado relevância nos debates internacionais, em decorrência das evidências crescentes de sua correlação com alterações no clima do planeta. Conforme Piri<sup>8</sup> e Huet,<sup>9</sup> tais mudanças climáticas tem se manifestado de diversas formas, como o derretimento de geleiras e aumento do nível médio dos mares, expansão das áreas acometidas de desertificação e recorrência de catástrofes naturais como furacões, ciclones e enchentes. Alguns estudos projetam um aumento na temperatura média no planeta, associando tal fenômeno à emissão de compostos de carbono e demais GEE.<sup>2,10,11</sup>

Diante desse cenário, têm sido estudadas alternativas para frear o avanço das emissões de GEE na atmosfera por cientistas em todo o mundo.<sup>2,4,5,12-15</sup> Entre as propostas mais difundidas estão a de ampliação do uso de tecnologias que emitem pouco ou não emitem CO<sub>2</sub> como, por exemplo, algumas fontes de energia renováveis, assim como a energia nuclear. O sequestro de CO<sub>2</sub> em meios geológicos, opção bastante discutida, é uma alternativa em que o dióxido de carbono é devolvido ao solo, ou seja, ele é descartado, exceto quando é utilizado para a recuperação avançada de petróleo.<sup>16</sup> Outra alternativa que se apresenta interessante é a carbonatação mineral, que consiste na reação de fixação do CO<sub>2</sub>, capturado de uma fonte emissora, em compostos metálicos de cálcio (Ca), magnésio (Mg) ou ferro (Fe) provenientes de fontes minerais, para formar carbonatos insolúveis.<sup>4,17,18</sup> Cabe salientar que a reação de carbonatação, apesar de ser exotérmica, é muito lenta. À temperatura ambiente, apesar de termodinamicamente favorecida, é cineticamente desfavorável, tornando-se um desafio aos pesquisadores implantar a carbonatação mineral como uma reação energeticamente viável para o processo de

sequestro de carbono e explorar o calor de reação, com um mínimo de energia despendida.<sup>2,4,19,20</sup>

Uma das formas de acelerar o processo de carbonatação é pelo aumento da área superficial, ou seja, por meio da redução da rocha ou do mineral. Com a redução da faixa granulométrica de 106-150 µm para < 37 µm, por exemplo, ocorre um aumento na conversão em carbonatos de 10 para 90%, segundo a literatura.<sup>21</sup> Outras formas de acelerar o processo de carbonatação são a agitação da reação e a adição de soluções ácidas e/ou básicas. Teir *et al.*<sup>17,19</sup> realizaram estudos envolvendo o serpentinite, nos quais testaram vários ácidos (HCl, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCOOH e CH<sub>3</sub>COOH) e bases (NaOH, KOH, NH<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>Cl), a fim de melhorar a eficiência de dissolução dos silicatos, ou seja, deixando os metais desejáveis mais disponíveis para posterior carbonatação. Segundo esses trabalhos, a dissolução realizada apenas em solução básica não foi satisfatória, diferentemente do ocorrido com as soluções ácidas, que propiciaram excelentes resultados de dissolução, principalmente com os ácidos HCl, HNO<sub>3</sub> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Trabalhando com cristais do mineral olivina, Priggione e colaboradores verificaram que a utilização de soluções tais como HCl e C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>, antes da reação de carbonatação (na etapa de extração e/ou dissolução) e LiOH, para manter o pH entre 3 e 8, colaborou para o aumento da velocidade de reação, tanto na dissolução quanto na carbonatação mineral.<sup>22</sup> Outros autores também indicaram o controle da temperatura e da pressão de CO<sub>2</sub> como formas de acelerar a reação de carbonatação, uma vez que possibilita a otimização dos processos.<sup>23,24</sup>

Dentro deste contexto, este trabalho visou verificar a viabilidade de se utilizar serpentinite, proveniente da região do Rio Grande do Sul, para o processo de armazenamento de carbono. Para isso, foi necessário investigar os locais onde existem altas concentrações de emissão de CO<sub>2</sub> no Brasil, assim como as áreas onde há fontes naturais de serpentinite. O trabalho também teve por objetivo verificar as melhores condições reacionais, tais como tamanho de partícula, temperatura, solução ácida empregada nos experimentos e soluções de ajuste de pH, tanto para a fase de extração como para a de carbonatação.

### PARTE EXPERIMENTAL

Os reagentes empregados para a preparação das soluções de extração (ácido clorídrico (HCl) e ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>)), bem como das soluções para os ajustes de alcalinidade (hidróxido de lítio (LiOH),

\*e-mail: einloft@pucrs.br

hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH)), marca Merck, foram utilizados como recebidos. Para a preparação das soluções utilizou-se água deionizada. As amostras de serpentinito utilizadas foram provenientes da região de Lavras do Sul, situada no Bloco de São Gabriel, no Rio Grande do Sul, onde há um afloramento dessas rochas ultramáficas.

### Preparação da amostra

A amostra foi moída em moinho de bolas de porcelana por 4 h. Utilizou-se como referência o procedimento expresso na norma.<sup>25</sup> Após a cominuição, procedeu-se à seleção granulométrica, a partir da qual foram escolhidas as amostras em tamanhos específicos para a realização das reações de extração de magnésio.

### Caracterização da rocha

#### Difração de Raios-X (DRX)

A amostra de serpentinito foi caracterizada por DRX por meio do método orientado, sob as formas natural, saturada com etilenoglicol (glicolada) e calcinada a 550 °C. O equipamento utilizado para difração de Raios-X foi um difratômetro Siemens Bruker AXS, modelo D5000, com goniômetro  $\theta$ - $\theta$ . A radiação é  $K\alpha$  em tubo de cobre, nas condições de 40 kV e 25 mA.

#### Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A MEV foi empregada tanto para a caracterização das amostras de serpentinito quanto para a caracterização dos produtos das reações de carbonatação. Utilizou-se o microscópio Philips modelo XL 30, com resolução de 3,5 nm (no modo elétron secundário) e faixa de aumentos de 10 a 300.000 vezes, tensão de aceleração de 200 V a 30 kV. A análise de EDS foi utilizada para a determinação qualitativa dos constituintes majoritários dos produtos de carbonatação.

#### Espectroscopia de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES)

A espectroscopia de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) foi utilizada para a caracterização da composição química do serpentinito, bem como para algumas caracterizações de soluções após reação de extração dos cátions. A análise química foi realizada por meio de uma análise multielementar. O equipamento utilizado foi o ICP-OES 2100 DV, da marca Perkin Elmer.

#### Absorção atômica por chama (AA)

Para as caracterizações de soluções após a extração dos cátions (Mg) utilizou-se um AA Varian SpectraAA 55, com lâmpadas de cátodo oco. Para estas análises foi utilizada apenas a lâmpada de Mg. Para as análises de magnésio em solução, foi utilizada a chama oxidante de ar/acetileno. O comprimento de onda foi de 285,2 nm, fenda de 0,5 e corrente de lâmpada de 4,0 mA. A curva de calibração foi preparada com as soluções padrões do elemento magnésio (Mg) de 1000 mg com especificação de  $MgCl_2$  em HCl, da marca Merck/ Tritisol.

#### Sistema reacional

Para a extração de magnésio da amostra utilizou-se um sistema reacional composto de um reator de vidro de 150 mL, com uma dupla câmara para a circulação de um banho termostaticado que mantém o sistema com a temperatura controlada e com agitação feita por meio de agitador magnético, contendo duas entradas: uma para  $CO_2$  (para a etapa de carbonatação) e uma saída de  $CO_2$  (válvula de segurança, visto que o sistema se encontra sob aquecimento). O sistema foi utilizado tanto para a etapa de extração quanto para a de carbonatação.

As faixas granulométricas escolhidas para o estudo foram: entre

75 e 150  $\mu m$ , entre 150 e 300  $\mu m$  e entre 300 e 600  $\mu m$ . Os experimentos foram realizados em triplicata para cada faixa granulométrica. As condições reacionais fixadas para este estudo foram: temperatura de 70 °C, tempo de reação de 2 h e proporção sólido/líquido de 1 g de serpentinito para 50 mL de solução ácida.<sup>17-19</sup> Após o término da reação, filtrou-se em um funil de Büchner (papel Whatman n° 42) para a separação da parte sólida da líquida. O pH foi controlado antes e após as reações. Realizaram-se procedimentos com diferentes soluções de extração (HCl,  $HNO_3$ , mistura de  $HNO_3$ ; HCl na razão 1:3), assim como com diferentes soluções para ajuste de pH (NaOH, KOH, LiOH). Para a etapa de carbonatação, utilizou-se a solução já com o pH ajustado (aproximadamente 11,0). Sob temperatura de 25 °C e agitação foi borbulhado dióxido de carbono (99,99%) na taxa de 1 mL/min por 1 h.<sup>26</sup> Após as reações, o pH voltava a ser verificado, com novo ajuste (para aproximadamente 11,0), caso necessário. Em seguida, realizou-se uma filtração em membrana de 0,22  $\mu m$  (Milipore) sob vácuo, reservando-se o produto para posterior análise.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo dados da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), o Brasil possui 1.098.248 t de rochas do tipo serpentinito e do mineral talco, concentradas principalmente nos estados de Minas Gerais e do Paraná.<sup>27</sup> Essa quantidade expressiva revela-se interessante para o emprego dessas rochas para a carbonatação mineral. Por meio do Projeto CARBMAP - Mapa Brasileiro de Captura, Transporte e Armazenamento de  $CO_2$ , foi elaborado um mapa no qual são associadas fontes emissoras de  $CO_2$  e áreas de ocorrências de serpentinito. Utilizando dados provenientes da Agência Nacional de Energia Elétrica e da *International Energy Agency*,<sup>28,29</sup> realizou-se uma investigação acerca dos tipos de fontes emissoras no Brasil (setor da indústria) e da massa de  $CO_2$  emitida (em kt/ano). Desta forma, foi possível fazer uma classificação dos estados brasileiros por volume de emissões, associando-os às áreas de ocorrência de serpentinito. Identificou-se que algumas regiões no Brasil possuem altas concentrações de  $CO_2$  próximas a estas áreas, o que facilitaria o transporte do  $CO_2$  para a carbonatação destas rochas, aumentando a probabilidade de tais processos serem economicamente viáveis.

A Tabela 1 mostra o resultado do cruzamento de informações sobre a localização de algumas fontes emissoras de  $CO_2$  com os locais onde há serpentinito no Brasil. Os nomes das empresas envolvidas no mapeamento foram preservados.

**Tabela 1.** Emissões de  $CO_2$  das regiões onde há incidência de serpentinito pelo cruzamento

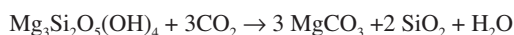
Estado	Localização	Fonte emissora	$CO_2$ kt/ano
DF	Sobradinho	Combustível Fóssil	1226,52
GO	Anápolis	Combustível Fóssil	77,61
MG	Campo Florido	Bagaço de cana-de-açúcar	899,98
MG	Belo Oriente	Licor Negro	2999,59
MG	Monlevade	Combustível Fóssil	1356,99
PR	Araucária	Gás Natural	1187,52
PR	Imbituva	Resíduo de Madeira	344,95
PR	Telêmaco Borba	Licor Negro	3397,04
SC	Otalício Costa	Licor Negro	1012,21
SC	Capivari de Baixo	Carvão Mineral	635,97
RS	Triunfo	Combustível Fóssil	2431,24
RS	Dom Pedrito	Casca de Arroz	1134,51
RS	Canoas	Carvão Mineral	393,85

O estado do Rio Grande do Sul não é uma das regiões mais poluidoras do país. Todavia, existem localidades no estado onde há presença de indústrias que emitem CO<sub>2</sub> nas proximidades de serpentinito. Na cidade de Dom Pedrito, por exemplo, a emissão de CO<sub>2</sub> atinge 1134,51 kt/ano e há afloramentos de serpentinito em regiões próximas. Na região de Triunfo, as emissões são mais expressivas quando comparadas às da região de Dom Pedrito, alcançando 2431,24 kt/ano. Contudo, as regiões que possuem maior potencial de armazenamento são aquelas situadas nos estados de Minas Gerais e do Paraná, devido à alta concentração de fontes emissoras de CO<sub>2</sub> nas proximidades de áreas ricas em serpentinito.

Visando conhecer os componentes do serpentinito bruto em estudo, primeiramente foi realizada a caracterização mineralógica através do método orientado, sob as formas natural, glicolada e calcinada. Esta análise foi conduzida à temperatura de 550 °C. Verificou-se a predominância de minerais tais como talco e serpentina na amostra de serpentinito bruto, em consonância com a literatura, que aponta que serpentinito é predominantemente composto pelo mineral serpentina.<sup>17-20,22,30</sup>

Para a análise de mineralogia total, empregou-se o método do pó, ou seja, a amostra de rocha bruta foi pulverizada para a realização do ensaio, por meio da técnica de difração de raios-X. Os resultados indicaram que a rocha possui em sua composição talco, serpentina (lizardita) e magnetita. De acordo com a análise semiquantitativa desta mineralogia, verificou-se uma composição aproximada de 58% de talco, 39% de lizardita e 4% de magnetita. Portanto, os resultados obtidos foram diferentes daqueles reportados na literatura,<sup>17-20,22,30</sup> que indicam a predominância do mineral serpentina, ao invés do talco.

A análise da composição elementar do serpentinito bruto foi realizada por ICP-OES. Os resultados indicaram que este possui um potencial interessante para a carbonatação mineral, pois 22,4% da rocha é constituída por magnésio. Comparando com o serpentinito estudado por Teir e colaboradores,<sup>17</sup> cujo teor de Mg era de 21,8%, verifica-se pouca diferença em relação às rochas encontradas no Brasil (Rio Grande do Sul) em termos de participação do Mg em sua composição. Contudo, em relação às rochas utilizadas por Park e colaboradores,<sup>31</sup> originadas do estado norte-americano da Pensilvânia, a diferença é mais substancial, uma vez que naquele caso a participação do Mg era de 27%. A reação abaixo ilustra a conversão do mineral serpentina em carbonato de magnésio:<sup>16</sup>



Esta opção tem como principal vantagem a longevidade do armazenamento de CO<sub>2</sub>, na forma de carbonatos termodinamicamente estáveis.<sup>16</sup>

Foi avaliada a influência do tamanho da partícula sobre a taxa de extração de íons magnésio (com solução de HCl 1M). A literatura descreve que quanto menor o tamanho da partícula, mais eficiente é o procedimento de extração (lixiviação) de magnésio das rochas.<sup>17,21</sup> As faixas granulométricas estudadas foram entre 75 e 150 µm, entre 150 e 300 µm e entre 300 e 600 µm com extração de 34; 30 e 18%, respectivamente, comprovando os dados relatados na literatura.

Escolheu-se trabalhar com faixa granulométrica de 75-150 µm nos experimentos subsequentes, em decorrência de sua maior taxa de extração de magnésio e outras soluções ácidas; além do HCl, foram testadas solução de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), assim como uma mistura contendo solução de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) e ácido clorídrico (HCl) na proporção 1:3 a título de identificar qual delas seria mais eficiente na extração de magnésio do serpentinito, mantendo-se sempre a concentração das soluções a 1M. Os resultados obtidos foram substancialmente piores do que aqueles obtidos com a solução de HCl que, para a mesma faixa granulométrica, propiciou uma taxa de

extração de 34%, quando comparado a cerca de 14% para as outras soluções. A partir dos resultados destes experimentos, escolheu-se a solução de HCl para os experimentos seguintes, devido ao seu bom desempenho na extração de magnésio do serpentinito em condições brandas de concentração. Todavia, para melhorar o desempenho na extração de magnésio, aumentou-se a concentração da solução de HCl para 4M, mantendo-se inalterados os demais parâmetros. Teir e colaboradores relataram ter conseguido uma taxa de extração de 93% de magnésio do serpentinito utilizando uma solução de 4M de HCl, em um tempo reacional de 2 h à temperatura de 70 °C.<sup>17</sup> Com o aumento da concentração para 4M, foi possível obter um resultado consideravelmente melhor, 80% de extração, quando comparado com 34% usando solução de HCl 1M.

Durante a reação de extração de magnésio, se extraem outros metais presentes nas rochas. Por isso, para que não ocorra interferência na etapa de carbonatação, o pH deve ser elevado, de modo a eliminar estes interferentes.<sup>19,31</sup> Utilizaram-se, então, soluções alcalinas, para provocar o aumento do pH. Na literatura, a importância do pH das reações é ressaltada, uma vez que as reações de carbonatação necessitam de pH mais altos (entre 9 e 11) para que ocorra carbonatação com eficiência.<sup>17-19,32</sup> Antes do uso de soluções alcalinas para a eliminação de interferentes, retirou-se o solvente da reação (água + HCl) em evaporador rotatório por 45 min, até completa secagem.<sup>18</sup> Após a secagem, adicionaram-se 100 mL de água deionizada, o que conduziu a um aumento do pH de 1 para 3. Em seguida, testaram-se três soluções alcalinas (NaOH, LiOH, KOH, concentração 4 (% p/v) respectivamente). Buscou-se, com isso, verificar a influência dessas soluções tanto no que se refere à manutenção do pH alcalino durante o processo de carbonatação, como sua contribuição para a aceleração da carbonatação. Para todas as reações, realizou-se o ajuste de pH com solução alcalina em duas etapas. Na primeira etapa, ajustou-se o pH para 8 adicionando a solução gota a gota. Após este primeiro ajuste, ocorreu a precipitação dos possíveis interferentes. Em seguida, filtrou-se a

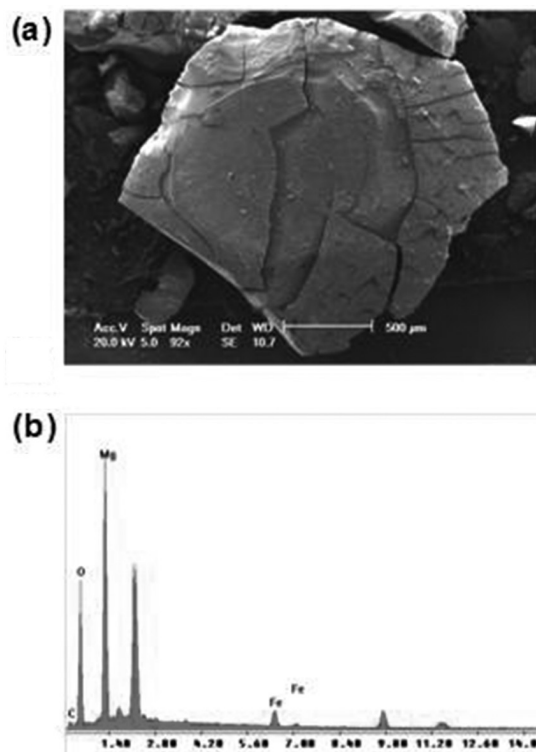
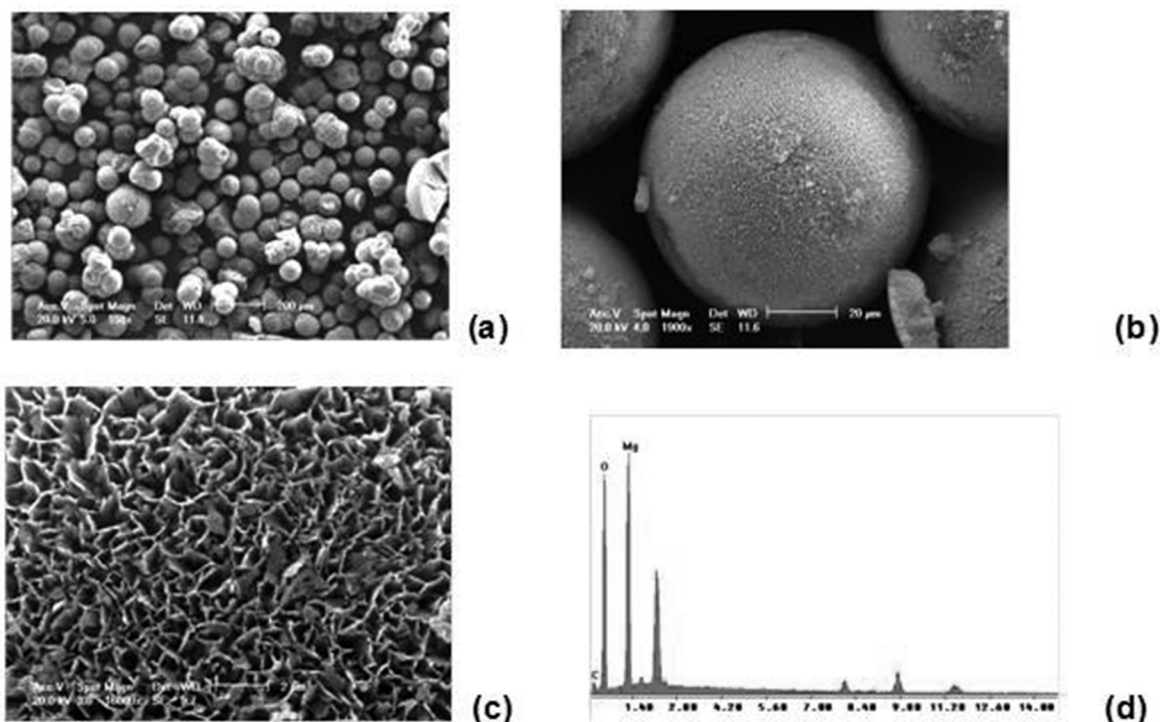


Figura 1. Micrografia (a) do precipitado utilizando como solução alcalina NaOH e EDS (b)



**Figura 2.** Micrografias dos precipitados da carbonatação usando como solução alcalina LiOH em diferentes ampliações (a),(b) e (c) e EDS (d)

solução. No filtrado, foi realizado um segundo ajuste do pH, com a adição de mais solução alcalina até se alcançar o pH 11. Após estes ajustes, foram então iniciados os processos de carbonatação.

Observou-se que logo ao adicionar o CO<sub>2</sub> houve uma queda de pH bastante brusca (pH 5) para as reações que foram ajustadas com a solução de NaOH. Para as reações de carbonatação ajustadas com as outras soluções alcalinas também foi verificada uma queda de pH (pH 6), porém estas quedas ocorreram proximamente ao fim do período de 1 h de reação. Após o término de cada reação, o respectivo pH foi verificado e novamente ajustado, com a adição de mais solução alcalina. O pH foi elevado para 11, quando se observou a formação de precipitado.

Após a carbonatação utilizando a solução alcalina de NaOH e KOH, os precipitados foram analisado por MEV e EDS. O precipitado obtido com solução alcalina de NaOH apresenta Mg, O e C indicando a formação de carbonatos (Figura 1). Já os precipitados obtidos com KOH não apresentaram C na sua composição.

No caso da carbonatação utilizando o LiOH, para o ajuste de pH, verificou-se a manutenção do pH 11 por maior tempo. Tal solução mostrou-se, portanto, melhor quando comparada ao NaOH, uma vez que, no caso da última, o pH se reduziu para 5 logo no início da reação. As micrografias dos precipitados de carbonatação que utilizaram LiOH podem ser vistas na Figura 2(a) e ampliações em (b) e (c), bem como o EDS (d).

A morfologia deste precipitado é visivelmente diferente daquela dos precipitados que utilizaram a solução alcalina de NaOH. O espectro de EDS apresentou picos acentuados de magnésio e de oxigênio, observando-se, também, a presença de carbono. Pode-se observar a semelhança entre a morfologia dos produtos resultantes dos experimentos deste trabalho com os produtos obtidos por Teir e colaboradores.<sup>19,33</sup> Devido à morfologia do precipitado e aos resultados das análises por EDS, acredita-se ter-se obtido carbonato de magnésio, mais precisamente hidromagnesita, nas reações nas quais se utilizou LiOH como solução de ajuste de pH. Assim como em Teir e colaboradores o precipitado possui cristais esféricos e estrutura lamelar.<sup>19,33</sup>

## CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma proposta de carbonatação de serpentinito, na qual a utilização de LiOH revelou-se eficaz, pois proporcionou a obtenção de carbonato de magnésio, mais precisamente de hidromagnesita. Esta solução de ajuste de pH mostrou-se mais adequada do que as demais testadas pois é capaz de manter, por mais tempo, o pH em nível ideal para a precipitação de carbonatos.

## AGRADECIMENTOS

À PETROBRAS e CNPq pelo auxílio financeiro. S. Einloft e J. M. Ketzner agradecem ao CNPq pela bolsa de pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Sun, Y.; Wang, Y.; Zhang, Y.; Zhou, Y.; Zhou, L.; *Chem. Phys. Lett.* **2007**, *14*, 437.
- IPCC; *Climate Change 2007: The Physical Basis*, Contribution of the working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Painel on Climate Change, 2007.
- Avzaradel, P. C. S. Em *Carbono: Desenvolvimento Tecnológico, Aplicação e Mercado Global. Mercado de Carbono*; Sanquetta, C. R.; Ziliotto, M. A. B.; Corte, A. P. D., eds.; UFPR/Instituto Ecoplan: Curitiba, 2006.
- IPCC; Em *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*; Metz, B.; Davidson, O.; de Coninck H.; Loos, M.; Meyer L., eds.; Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, 2005.
- Pacala, S.; Socolow, R.; *Science* **2004**, *305*, 968.
- Uibu, M.; *Tese de Doutorado*, Tallinn University of Technology, Estônia, 2008.
- Wildenborg, T.; Lokhorst, A.; *Oil, Gas Sci. Technol.* **2005**, *60*, 513.
- Piri, M.; Prévost, J. H.; Fuller, R. C.; *VA Proceeding of 4 Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration DOE/ NETL*, Alexandria, 2005.



9. Huet, B.; Fuller, R. C.; Prévost, J. H.; *Proceeding of GHGT8*, Trondheim, Norway, 2006.
10. CGEE; *Manual de Capacitação sobre Mudança do Clima e Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)*, Brasília, DF, 2008.
11. [http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon\\_seq/corerd/storage.html](http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/corerd/storage.html), acessada em Março 2013.
12. Li, Z.; Dong, M.; Li, S.; Huang, S.; *Energy Convers. Manage.* **2006**, *47*, 1372.
13. Nordbotten, J.; Celia, M.; Bachu, S.; *Transport Porous Media* **2005**, *53*, 339.
14. Soong, Y.; Goodman, A. L.; Jones, J. R.; Baltrus, J. R.; *Energy Convers. Manage.* **2004**, *45*, 1845.
15. Roh, Y.; Moon, J.; Song, Y.; Moon, H.; *J. Miner. Soc. Korea* **2003**, *16*, 171.
16. Brent, G. F.; Allen, D. J.; Eicher, B. R.; Petrie, J. G.; Mann, J. P.; Haynes, B. R.; *J. Ind. Ecol.* **2012**, *16*, 94.
17. Teir, S.; Revitzer, H.; Eloneva, S.; Fogelholm, C.; Zevenhoven, R.; *Int. J. Miner. Process.* **2007**, *83*, 36.
18. Teir, S.; Revitzer, H.; Eloneva, S.; Fogelholm, C.; Zevenhoven, R.; *Proceedings of ECOS 2007*, Padova, Italy, 2007.
19. Teir, S.; Eloneva, S.; Fogelholm, C.; Zevenhoven, R.; *Appl. Energy* **2009**, *86*, 214.
20. Hänchen, M.; *Tese de Doutorado*, ETH, Suíça, 2007.
21. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2003/c03016.pdf>, acessada em Junho 2012.
22. Prigiobbe, V.; Hänchen, M.; Werner, M.; Bachiocchi, R.; Mazzotti, M.; *Energy Procedia* 2009, *1*, 4885.
23. Lackner, K. S.; *Science* **2003**, *300*, 1677.
24. O'Connor, W. K.; Dahlin, D. C.; Turner, P. C.; Walters, R. P.; *Proceedings of 2<sup>nd</sup> Dixy Lee Ray Memorial Symposium: Utilization of Fossil Fuel-Generated Carbon Dioxide in Agriculture and Industry*, Washington, D.C., EUA, 1999.
25. ASTM standard D422, 1963(2007) "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, DOI: 10.1520/D0422-63R07.
26. Kunzler, C.; Alves, N.; Pereira, E.; Nienczewski, J.; Ligabue, R.; Einloft, S.; Dullius, J.; *Energy Procedia* **2011**, *4*, 1010.
27. Moreton, L. C.; Martins, E. G.; *Geologia e Recursos Minerais da Província Mineral de Alta Floresta*, Brasília, 2005.
28. ANEEL; *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*, 2<sup>a</sup> ed., ANEEL: Brasília, 2005.
29. <http://www.ieaghg.org/>, acessada em Março 2013.
30. Bennaceur, K.; Gupta, N.; Sakurai, S.; Whittaker, S.; Monea, M.; Ramakrishnan, T. S.; Randen, T.; *Oilfield Review* **2004**, *16*, 44.
31. Park, A.; Fan, L. S.; *Chem Eng Sci.* **2004**, *59*, 5241.
32. Druckenmiller, M. L.; Maroto-Valer, M. M.; Hill, M.; *Energy Fuels* **2006**, *20*, 172.
33. Teir, S.; Eloneva, S.; Fogelholm, C.; Zevenhoven, R.; *IGEC The 3<sup>rd</sup> International Green Energy Conference*, Västerås, Sweden, 2007.