ESTUDO SOBRE CAPTURA, UTILIZAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE CARBONO EM PRÉ-FABRICADOS CIMENTÍCIOS NÃO ARMADOS

FORTUNATO, L. R. (1); PARSEKIAN, G. A. (2); NEVES JUNIOR, A. (3)

(1) Aluna de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil - PPGECiv/UFSCar, liviarfortunato@hotmail.com
(2) Professor Doutor, Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil - PPGECiv/UFSCar, parsekian@ufscar.br
(3) Professor Doutor, Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arq. Engenharia e Tecnologia, alexnevesjr@gmail.com

Resumo: *O aumento da temperatura média global precisa ser mantido abaixo de 1,5°C - e não de 2°C, conforme preconizado no Acordo de Paris. Para tanto, as emissões globais de dióxido de carbono (CO_2) necessitam ser reduzidas em 45% até o ano de 2030, em relação aos níveis registrados no ano de 2010. A indústria da construção civil colabora com a emissão de poluentes, sendo a produção do clínquer um dos principais componentes da pegada carbônica da construção. No Brasil, cerca de 6% do CO_2 emitido à atmosfera é oriundo da descarbonatação do calcário que ocorre durante a produção de cimento. Todavia, a indústria cimenteira tem incentivado o desenvolvimento de novas tecnologias para reduzir a emissão de poluentes e também capturar e armazenar carbono de forma definitiva. Este artigo traz uma revisão bibliográfica acerca da tecnologia de captura, transporte, armazenamento e utilização do CO_2 de forma a incorporá-lo definitivamente em pré-fabricados cimentícios não armados através da cura por carbonatação acelerada. Está bem documentado na literatura técnica que a referida cura química além de sequestrar CO_2 definitivamente do meio, proporciona ao material cimentício elevado ganho de resistência mecânica logo nas primeiras idades, podendo ser empregada na fabricação de blocos de concreto, peças de concreto para pavimentação, telhas e outros.*

Palavras-chave: *captura, armazenamento, cura, carbonatação, CO_2.*

Área do Conhecimento: *Engenharia Civil, Construção Civil, Materiais e Componentes de Construção, Tecnologia de componentes para construção.*

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de captura e armazenamento de dióxido de carbono é considerada pela Agência Internacional de Energia [1] como essencial para redução em até 56% das emissões de CO_2 no setor de cimento até o ano de 2050. Sabe-se que as emissões de CO_2 do referido setor são advindas da combustão dos combustíveis fósseis e da calcinação do calcário no forno; através da tecnologia citada, o CO_2 é capturado à medida que é emitido, comprimido a um líquido, transportado em oleodutos para ser posteriormente armazenado em reservatórios geológicos, poços depletados de petróleo e tanques pressurizados.

Os materiais cimentícios podem sequestrar CO_2 de forma definitiva através da cura por carbonatação acelerada, através da qual ocorre a reação de carbonatação que transcorre inicialmente entre o principal produto de hidratação do cimento $Ca(OH)_2$ e o CO_2 na presença de água, gerando produtos à base de carbonato e gel de sílica. A reação é apresentada a seguir:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \xrightarrow{H_2O} CaCO_3 + H_2O \qquad (1.1)$$

Quando a maior parte do hidróxido de cálcio já foi consumido, inicia-se a carbonatação do C-S-H (silicato de cálcio hidratado [2]. A reação é apresentada abaixo:

$$3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + 3CO_2 \rightarrow 3CaCO_3{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O \qquad (1.2)$$

O principal produto formado pelas reações de carbonatação é o carbonato de cálcio ($CaCO_3$), este é insolúvel e precipita nos poros do concreto sob a forma mineralógica de calcita, vaterita e aragonita, armazenando permanentemente o CO_2 nos poros do concreto. Além disso, diversos autores verificaram que a referida cura promove elevados ganhos de resistência mecânica inicial, cujos valores são comparáveis aos obtidos em 28 dias quando se utiliza o processo de cura convencional [3] [4] [5] [6].

A referida tecnologia já é implementada em país desenvolvidos como Estados Unidos, Canadá e Reino Unido. O CO_2 utilizado na cura dos concretos é adquirido de fornecedores como a Airgas e Praxair, estes por sua vez, são responsáveis por capturar, purificar, armazenar e distribuir o CO_2 proveniente de fontes emissoras estacionárias, como cimenteiras e usinas de carvão. Nas empresas produtoras do "concreto verde" o CO_2 fica armazenado em tanques pressurizados, os quais são reabastecidos regularmente pelos fornecedores. Dentre as empresas que realizam a cura por carbonatação acelerada destacam-se Carbonclave, Solidia Technologies, CarbonCure, entre outras [7].

Para tanto, o presente artigo, pretende apresentar através de uma revisão bibliográfica os procedimentos empregados para captura, transporte e armazenamento de CO_2 a partir de fontes emissoras estacionárias, bem como tratar da cura por carbonatação acelerada como forma de incorporação definitiva do CO_2.

2 REVISÃO TEÓRICA

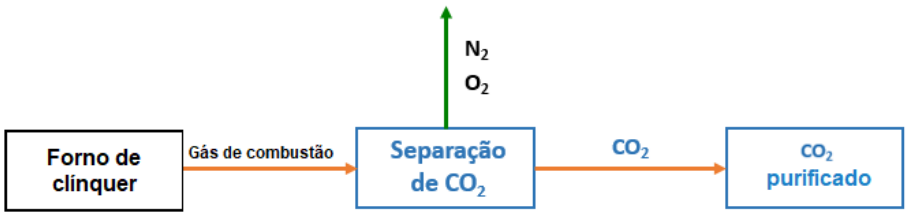
2.1 Captura de CO_2 a partir de fontes emissoras estacionárias

Nesta seção serão demonstrados três métodos empregados para captura de dióxido de carbono a partir de fontes emissoras estacionárias (chaminés) das cimenteiras.

- **Captura de CO_2 pós-combustão**

A captura de CO_2 pós-combustão é uma tecnologia já implementada em outras indústrias e que certamente será aplicada em larga escala na indústria de cimento, pois pode ser executada em plantas existentes e em cimenteiras recém-construídas. Na tecnologia de captura de CO_2 pós-combustão o gás de combustão que sai da chaminé é coletado e transportado até o solvente à base de amina, onde o dióxido de carbono presente no gás é capturado pelo solvente. O solvente rico em dióxido de carbono é então bombeado para um dessorvedor, onde o CO_2 liberado é purificado antes de ser comprimido e transportado para o local de armazenamento [1] [8] [9]. A Figura 1 demonstra simplificadamente o processo.

Figura 1 – Captura pós-combustão.



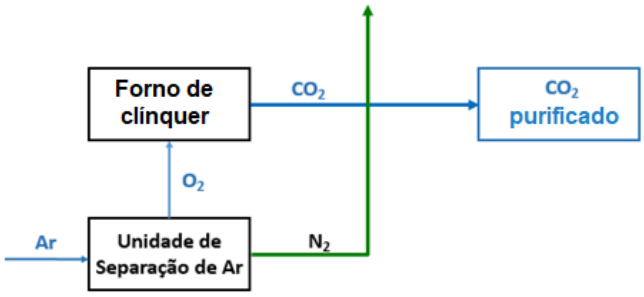
Fonte: Li et al. [10].

- **Captura de CO_2 por Oxicorte**

No processo Oxicorte, o forno do clínquer é alimentado com oxigênio ao invés do ar ambiente (Figura 2). Para tanto, faz-se necessária a instalação de uma Unidade de Separação de Ar de última geração, alterações no forno onde ocorre a calcinação do calcário e em demais instalações da indústria. Ocorre que a adição de

oxigênio puro aumenta a concentração de CO_2 no gás de combustão, proporcionando uma captura de CO_2 mais limpa. A redução da emissão de carbono para a cimenteira que implementar o processo Oxicorte deverá ser de 63% a 100%, porém a referida tecnologia só foi realizada em um projeto piloto [8]. A Figura 2 demonstra a tecnologia do oxicorte.

Figura 2 – Captura por oxicorte.

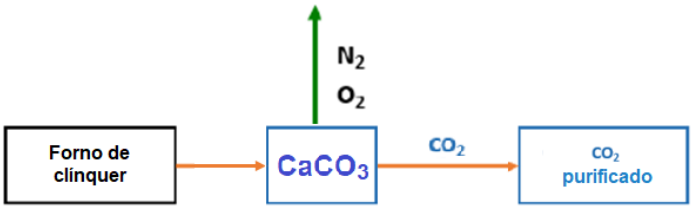


Fonte: Li et al. [10].

- **Captura de CO_2 por *Looping* de carbonato**

O referido método é proposto teoricamente por muitos anos, porém ainda não foi implementado em plantas piloto ou demonstrado em larga escala. Prevê-se que sua aplicação consome menor energia e apresenta menor nível de corrosão e emissão de SO_2. Ocorre que o gás liberado pela combustão reage com o sorvente sólido à base de cálcio (óxido de cálcio) e dá origem ao carbonato de cálcio. Os carbonatos, por sua vez, são aquecidos para liberar dióxido de carbono [9] [10]. A Figura 3 demonstra a tecnologia de *Looping* de carbonato.

Figura 3 – Looping de carbonato.



Fonte: Li et al. [10].

2.2 Transporte e armazenamento do CO_2 capturado

Para o transporte do CO_2 das instalações de captura até o local de armazenamento, geralmente, utiliza-se um sistema constituído por tubulações e estações de compressão semelhantes aos sistemas de oleodutos desenvolvidos para os gasodutos naturais, uma vez que se acredita que este seja o método mais seguro e econômico para encaminhar o CO_2 até as futuras unidades comerciais. O custo de transporte do CO_2 para longas distâncias é relativamente baixo por oleoduto ou por navio. Por oleodutos, o custo pode variar de US $ 1 a US $ 10 / ton de CO_2. O custo real varia de acordo com a distância e o volume transportado [11]. O armazenamento do CO_2 capturado pode ser feito em formações geológicas, poços depletados de petróleo e em tanques pressurizados [12]. O custo para armazenar CO_2 em repositórios geológicos é estimado em US $ 25 / ton de CO_2, não estando contabilizada a responsabilidade potencial desconhecida de se ocorrer vazamento [13]. O custo para as outras formas de armazenamento de CO_2 não foi informado. A Figura 4 demonstra modelos de tanque pressurizado utilizados em empresas produtoras de pré-fabricados cimentícios não armados.

Figura 4- Armazenamento do CO_2 em tanques pressurizados nas empresas: a) Solidia Technologies; b) CarbonCure.



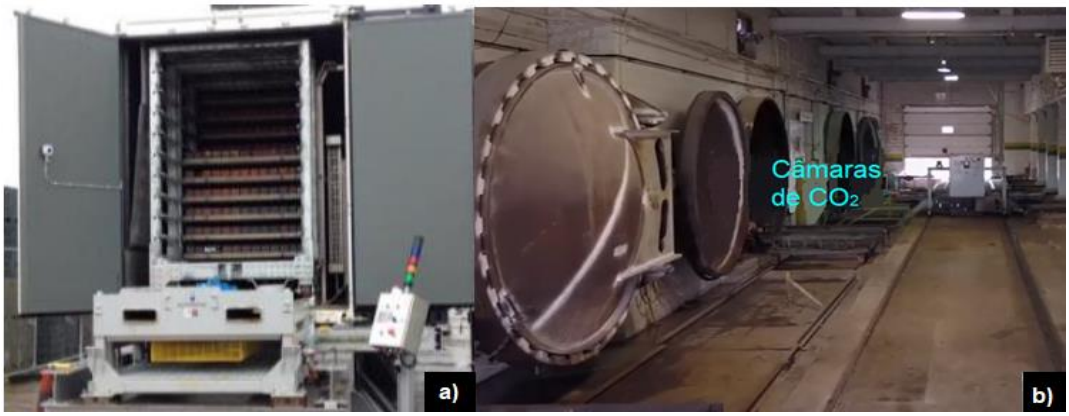
Fonte: a) Disponível em: https://www.solidiatech.com/. Acesso em: 12/04/2021; b) Disponível em:< https://www.carboncure.com/technology/>. Acesso em 13/08/2020.

2.3 Cura por carbonatação acelerada para incorporação de CO_2 capturado em pré-fabricados cimentícios não armados

No procedimento de cura por carbonatação acelerada o material cimentício recém fabricado é inserido na câmara de carbonatação com elevadas concentrações de CO_2, condições adequadas de umidade relativa, pressão e temperatura, dá-se início ao fenômeno da carbonatação acelerada, o qual promove a captura do CO_2 presente na atmosfera da câmara e ganhos de resistência mecânica, cujos valores são comparáveis aos obtidos em 28 dias quando se utiliza o processo de cura convencional [3] [4] .

A cura de materiais cimentícios sem armadura através da carbonatação acelerada vem diretamente ao encontro da grande necessidade industrial referente ao aumento da produção e ganho de tempo, uma vez que o tempo morto (tempo de cura) é reduzido [14]. Segundo El Hassan e Shao [4], o uso comercial do CO_2 nos processos de cura nas indústrias agrega ainda mais valor ao dióxido de carbono, uma vez que este passa a ter valor comercial, além do valor econômico relacionado a geração de créditos de carbono. Estudos mostram que a tecnologia de cura por carbonatação é tecnicamente viável e eficaz para implementação em escala industrial, pois apresenta baixo consumo de energia e alto ganho de desempenho, além de ser uma ferramenta importante no controle do efeito estufa [3]. Em geral o CO_2 é capturado de usinas de carvão e fábricas de cimento, armazenado em tanques pressurizados e utilizado na etapa de cura. A Figura 5, demonstra câmaras de cura por carbonatação utilizadas pelas empresas Solidia Technologies e Carbonclave que utilizam a referida tecnologia.

Figura 5- Câmaras de cura por carbonatação acelerada: a) Solidia Technologies; e b) Carbonclave.



Fonte: a) Disponível em: https://www.solidiatech.com/. Acesso em: 10/03/2021; b) Disponível em: http://www.boehmerblock.com/carboclave.asp. Acesso em: 20/10/2020.

As empresas verificaram que a cura por carbonatação além de promover a captura permanente de CO_2, aumenta a resistência, alivia eflorescências e rachaduras de contração, e melhora a resistência ao congelamento e descongelamento. As propriedades do concreto fresco como tempo de pega, abatimento e trabalhabilidade não são alteradas [7]. Shao e Morshed [15] observaram que a cura por carbonatação apresenta duração inferior quando comparada às curas tradicionais e contribui para melhora das propriedades de alta resistência inicial e baixa permeabilidade do concreto. Alguns estudos tem associado a cura por CO_2 com curas tradicionais. He et al. [16] curaram amostras com CO_2 com posterior cura úmida, e observaram que a pós-hidratação através da cura com água aumentou a formação de gel C-S-H, etringita e monocarboaluminato, os quais reduziram a porosidade na matriz cimentícia.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Segundo estimativas da Netherlands Environmental Assesment Agency [19] até 2050 as emissões globais de CO_2 advindas da indústria do cimento deverão atingir 2,34 bilhões de toneladas. Para tanto, visando reverter esse quadro, a referida indústria tem desenvolvido tecnologias para capturar e armazenar o CO_2 de forma definitiva, bem como reduzir a sua emissão à atmosfera, dentre elas destacam-se: captura de CO_2 a partir de fontes emissoras estacionárias e armazenamento através da cura por carbonatação acelerada em pré-fabricados cimentícios não armados, eficiência energética dos fornos de clínquer, substituição de combustíveis fósseis por fontes alternativas e substituição do clínquer por adições minerais.

Os métodos de captura de CO_2 a partir de fontes emissoras estacionárias apresentados neste trabalho apresentam enfoque nas fábricas de cimento. Por meio das tecnologias apresentadas observa-se que a captura pós-combustão não requer importantes alterações nas plantas das cimenteiras atuais e apresenta um custo de US\$161/tonCO_2, já a captura por Oxicorte requer modificações no forno e em outros equipamentos sendo improvável um *retrofit* e custa em torno de US\$60/tonCO_2, por fim a tecnologia de Looping de carbonato é a que apresenta um menor consumo de energia na separação de CO_2, sendo bastante promissora, porém ainda não implementada na prática, logo não foram informados os custos. As referidas técnicas buscam colaborar com a redução da pegada carbônica da construção civil, ao capturar o CO_2, ao invés de emití-lo à atmosfera.

O armazenamento definitivo do CO_2 nos poros do concreto e concomitante ganho de resistência mecânica propiciado pela cura por carbonatação acelerada tem sido verificado no meio acadêmico através de diversas pesquisas do estado da arte; e no meio industrial, já que empresas fabricantes de pré-fabricados cimenticios não armados realizam a cura com CO_2 e atestam os beneficios da mesma.

As tecnologias citadas nesse trabalho devem ser implementadas visando a redução das consequências deletérias relacionadas às elevadas concentrações de CO_2 na atmosfera. Este é um assunto urgente e não

deve ser banalizado, porém verifica-se a falta de incentivo por parte dos setores público e privado.

4 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à Associação Bloco Brasil pelo incentivo e fomento.

5 REFERÊNCIAS

[1] IEA 2009. Cement Technology Roadmap 2009, **Carbon Emissions Reductions up to 2050**. IEA/OECD. Paris ⟨http://www.iea.org/ papers/2009/Cement_Roadmap.pdf⟩. Acesso em 27/12/2018.

[2] Morandeau A., M. Thiéry, P. Dangla, **Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties,** Cem. Concr. Res. 56 (2014).

[3] SHAO Y., MONKMAN S., WANG S., —**Market analysis of CO_2 sequestration in concrete building products**‖. 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Italy, Ancona, 28–30 June 2010.

[4] El-Hassan, H, Shao Y, Ghouleh,Z**. Effect of Initial Curing on carbonation of Lightweight Concrete Masonry Units,** ACI Materials Journal/July-August 2013.

[5] NEVES, J,A.; **Captura de CO_2 em Materiais Cimentícios através da Carbonatação Acelerada** / Alex Neves Junior – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

[6] FORTUNATO, L. R.; PARSEKIAN, G. A.; NEVES JUNIOR, A. **Estudo sobre a absorção de CO_2 em peças pré-fabricadas de concreto para pavimentação.** In: 60° Congresso Brasileiro do Concreto, 2018, Foz do Iguaçu. 60° Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: IBRACON, 2018. v. 1. p. 1-12.

[7] Monkman, S, MacDonald, M, **Carbon dioxide upcycling into industrially produced concrete blocks,** Constr. Build. Mater. 124 (2016) 127–132.

[8] CSI/ECRA (Cement Sustainability Initiative and European Cement Research Academy), 2009. **Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead**. CSI/ECRA – Technology Papers. Geneva ⟨http://www. wbcsdcement.org/pdf/technology/Technology%20papers.pdf⟩.

[9] Bosoaga, A., Masek, O., Oakey, J., 2009. **CO_2 capture technologies for cement industry.** In: Proceedings of Ninth International Conference on Greenhouse Gas Technologies, GHGT-9, Washington DC, USA, EnergyProcedia 1, pp. 133– 140.

[10] Li, Jia, Pradeep Tharakan b, Douglas Macdonald b , Xi Liang. **Technological, economic and financial prospects of carbon dioxide capture in the cement industry**. Elsevier Ltd, Energy Policy 61 (2013).

[11] Mit, J.M., Takahashi, T., Goldberg, D., McGrail, B.P., 2007. **Experimental evaluation of in situ CO_2-water-rock reactions during CO_2 injection in basaltic rocks.** Implications for geological CO_2 sequestration. Geochem. Geophys. Geosyst.

[12] Benhelal a, Gholamreza Zahedi a, Ezzatollah Shamsaei b , Alireza Bahadori. **Global strategies and potentials to curb CO_2 emissions in cement industry**. Elsevier Ltd, Journal of Cleaner Production 51 (2013).

[13] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2005. **Carbon Dioxide Capture and Storage.** Cambridge University Press, UK.

[14] SHAO Y., ZHOU X., MONKMAN S., —**A new CO_2 sequestration process via concrete products production.** EIC Climate Change Technology, Canada, Ottawa, 10-12 May 2006.

[15] ShaoY, Morshed A.Z., **Early carbonation for hollow-core concrete slab curing and carbon dioxide recycling**, Mater. Struct. 48 (2015).

[16] He, Zirui , Yingjie Li,* , Xiaotong Ma , Wan Zhang , Changyun Chi, Zeyan Wang. **Influence of steam in carbonation stage on CO_2 capture by Ca-based industrial waste during calcium looping cycles**. international journal of hydrogen energy 41 (2016).

[17] PAULETTI, Cristiane. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2004.176 p.

[18] LO, Y; LEE, H;.M. **Curing effects on carbonation of concrete using phenolphthalein indicator and Fourier- transform infrared spectroscopy**. Building and Environment, v.37, n5, May 2002.

[19] Netherlands Environmental Assesment Agency**. Trends in global CO_2 emissions and total greenhouse gas emissions: 2019 report**. Disponível em: https://www.pbl.nl/en/trends-in-global-co2-emissions. Acesso em: 17/06/2020.