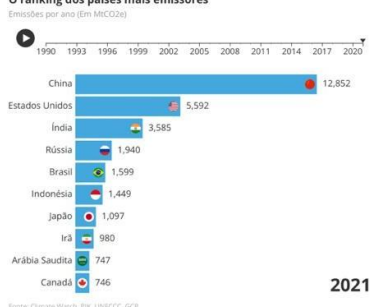


Nome da autora: Fernanda Martines Lopes de Sant' Anna **Série em 2026:** ()3a; (X)2ª ou anterior

Título da Redação: Concretizando a Química: Sequestro de CO_2 nas Cidades Sustentáveis

Segundo o renomado geógrafo Milton Santos, a urbanização é um “processo de transformação social, centrado na cidade, envolvendo mudanças econômicas, culturais, espaciais e ambientais”. Sob essa ótica, a Segunda Revolução Industrial, em 1850, relacionada à onda de urbanização e à produção em larga escala, intensificou as emissões de Dióxido de Carbono (CO_2), um dos principais gases de efeito estufa (GEE). Os impactos foram de tal magnitude que as emissões do gás aumentaram em 526%, desde 1950. [1] Neste quesito, a China é líder na emissão global de CO_2 , refletindo os efeitos da produção industrial intensiva, por isso a urgência em elaborar-se novas tecnologias que viabilizem o sequestro do carbono.[2] É justamente nesse ponto que a Química entra, como ferramenta aliada para o desenvolvimento de cidades e comunidades sustentáveis, em consonância com o 11º dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU). [3]

O ranking dos países mais emissores



Fonte: Climate Watch, PIN, UNFCCC, GCP

Imagem 1. Ranking dos países mais emissores de CO_2 na atmosfera em 2021 [4]



Imagem 2. Curva de Keeling indica aumento da concentração de CO_2 entre 1959 e 2023 [5]

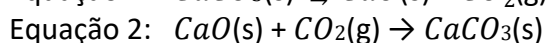
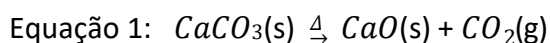
Nesse contexto, surge a inovação do concreto de captura de Dióxido de Carbono, tecnologia que promete a capacidade de diminuição do impacto antropogênico no efeito estufa. A proposta baseia-se no sequestro de CO_2 , proveniente tanto do ar atmosférico quanto de correntes industriais concentradas. Além disso, contribui na redução das emissões na produção de cimento, visto que a indústria cimentícia é responsável por 8% das emissões antrópicas globais do gás. [6] Portanto, a introdução dessa proposta, no setor imobiliário representa uma notável revolução, visando ao planejamento urbano sustentável. A aplicação se estende a blocos pré-moldados, painéis de fachada, meios-fios e, em um futuro promissor, a peças para pavimentação de calçadas e pisos, como revisa artigo da Universidade Federal de São Carlos [7].

Segundo estudo da Verein Deutscher Zementwerke (VDZ), a descarbonização do cimento e do concreto pode ser alcançada principalmente pela captura de Carbono (redução de 33% na pegada de CO_2). [8] Desse modo, destaca-se a relevância da Química para estudos promissores que já demonstram a eficácia do concreto químico para diminuição da pegada de Carbono e, por conseguinte, menor impacto nas mudanças climáticas. Tal inovação, portanto, corresponde também ao ODS 13- Ação Contra a Mudança Global do Clima.

As três principais fontes do Dióxido de Carbono na fabricação do cimento são: a calcinação, responsável por 50% das emissões totais do gás; a combustão de combustíveis, no forno, que resulta outros 40% das emissões; e os restantes 10% correspondem ao transporte e consumo de eletricidade. [9] Esses dois primeiros processos são essenciais para a produção do clínquer, componente do cimento tradicional Portland (corresponde aproximadamente a 15% da massa do concreto), sendo o mais utilizado para construção civil. O clínquer é formado a partir do

aquecimento do calcário moído junto à argila, à temperatura de 1450 °C, processo que leva à decomposição do Carbonato de Cálcio ($CaCO_3$) em Óxido de Cálcio, ou também chamado de cal viva (CaO) e em Dióxido de Carbono (CO_2) (Equação 1).

Dessa forma, destaca-se o uso da carbonatação para sequestro do Dióxido de Carbono em ambientes urbanos densamente construídos, onde o concreto é o principal material estrutural. O processo ocorre tanto naturalmente, ao longo da vida útil do cimento, por difusão do CO_2 atmosférico nos poros do material, quanto de modo acelerado, tecnologia que submete ou o concreto recém-moldado à injeção controlada de Dióxido de Carbono sob pressão atmosférica ou o concreto pré-moldado à câmara com temperatura, pressão e umidade controlados (cura por mineralização ocorre a $T < 80^\circ C$, 0,1–40 bar) [10]. Assim, os materiais carbonatados estáveis gerados a partir do sequestro mineral do CO_2 se tornam potenciais substitutos parciais do Portland e outros ingredientes convencionais do cimento. Nesse procedimento, ocorre a reação do Dióxido de Carbono (CO_2), que é capturado de processos industriais, como dos gases do forno da própria produção do cimento, com a cal viva (CaO), resultando no Carbonato de Cálcio ($CaCO_3$) (Equação 2).



Por ser exotérmica ($\Delta H < 0$, ou seja, libera energia térmica), a reação de carbonatação favorece termodinamicamente a formação de carbonatos estáveis. Além disso, como o $CaCO_3$ possui um baixo produto de solubilidade (Kps), sua precipitação é facilitada. Tais características contribuem para o armazenamento permanente do CO_2 em materiais residuais sólidos alcalinos (escória de aço, cimento e cinzas volantes de carvão), atendendo à necessidade urbana de soluções duradouras, e aumentando a viabilidade do procedimento em escala industrial.

Esse processo pode ser gás-sólido ou aquoso. No primeiro caso, um sólido que contenha Óxido de Cálcio (CaO) ou de Magnésio (MgO) reage com CO_2 em temperatura e pressão adequadas, resultando em carbonatos estáveis e em alta taxa de absorção de CO_2 , contudo, em uma reação geralmente lenta. Já no processo aquoso, a adição da água leva ao aumento da taxa de reação da carbonatação. Como evidenciado na imagem 3 (a), o CO_2 se dissolve na água (H_2O) presente no cimento e cria o ácido carbônico (H_2CO_3), que se decompõe nos íons H^+ e CO_3^{2-} . A solução ácida causa a dissolução de fases sólidas, liberando os íons Ca^{2+}/Mg^{2+} , que reagem com o CO_2 para criação do Carbonato de Cálcio/Magnésio em (b) ($CaCO_3/MgCO_3$). O procedimento é caracterizado como sequestro indireto do CO_2 , uma vez que o Carbono não provém diretamente do ar atmosférico, mas é incorporado a partir de Dióxido de Carbono previamente capturado.

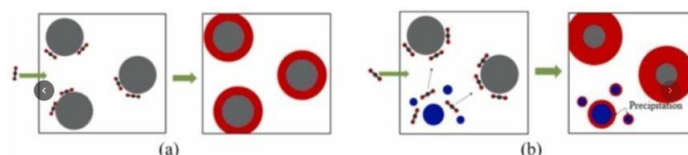


Imagem 3. Bolinhas pequenas simbolizam moléculas lineares de CO_2 (vermelhas, oxigênio; azuis, carbono). Círculos cinzas são fases sólidas de cimento (fonte de Ca^{2+}/Mg^{2+}). Camada vermelha é o carbonato de cálcio precipitado. Em (b), pontos azuis maiores são íons Ca^{2+}/Mg^{2+} em solução que também formam $CaCO_3$. O sólido se deposita na matriz do concreto. [11]

Com a finalidade de comprovar a maior eficácia da carbonatação acelerada aquosa, em comparação com a carbonatação natural, realizei, em ambiente laboratorial escolar, o seguinte experimento: foi adicionada a mesma quantidade de 0,375 gramas de Hidróxido de Cálcio ($Ca(OH)_2$) na proporção de 250 ml de água destilada (H_2O) em dois Erlenmeyer. O segundo ficou exposto ao ar atmosférico, assim como o concreto, quando já foi aplicado. Enquanto isso, a solução no Erlenmeyer 1 sofreu indução do Dióxido de Carbono através do sopro em um canudo, durante 5 minutos, haja vista a liberação de CO_2 do corpo humano na respiração celular. Esse instrumento foi fechado com uma rolha, no intuito de mitigar a influência do Carbono do ar no experimento (Imagem 4).

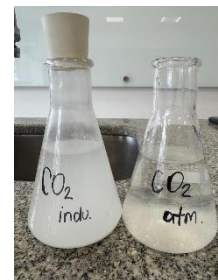


Imagem 4. Amostras com solução de $Ca(OH)_2$ e H_2O . Erlenmeyer 1 com CO_2 induzido e 2 com CO_2 atmosférico
Fonte: da autora

Como o Hidróxido de Cálcio é classificado como uma base forte, o pH inicial da solução foi 12 (Imagem 5). No entanto, após 4 horas, os indicadores passaram a demonstrar um pH 10 (Imagem 6). Tal fato se explica por meio da formação já citada do Ácido Carbônico (H_2CO_3), pois quando esse reage com os íons OH^- da base, ocorre a formação de H_2O e do íon CO_3^{2-} ; sendo assim, a alcalinidade da solução é neutralizada. Esse processo pode ser descrito por meio do Princípio de Le Châtelier, uma vez que a introdução do CO_2 e o consumo de íons hidróxido resultam no deslocamento do equilíbrio do sistema de dissolução do $Ca(OH)_2$ no sentido de formar mais OH^- , ao mesmo tempo que o Hidróxido de Cálcio é consumido e convertido em Carbonato de Cálcio. Nesse sentido, o sistema é incapaz de restabelecer a alcalinidade original, levando à diminuição progressiva do pH. Essa questão simboliza um desafio para o emprego da carbonatação acelerada em estruturas armadas, visto que um pH menor aumenta o risco de corrosão das barras de aço.



Imagem 5. Indicador universal de pH (pH=12)
Fonte: da autora



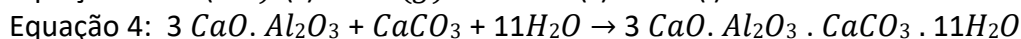
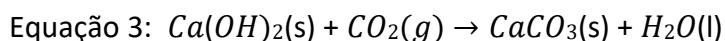
Imagem 6. Indicador universal de pH (pH=10)
Fonte: da autora

Visando à verificação qualitativa da formação de mais Carbonato de Cálcio com a aplicação da carbonatação aquosa acelerada, foi possível observar-se a clara discrepância entre o precipitado formado no primeiro Erlenmeyer e o do segundo, após 4 horas de exposição (Imagem 7). Embora o experimento seja em escala reduzida, ainda pode-se concluir que, com o uso de 0,375g de $Ca(OH)_2$, correspondente a 0,005 mol, a conversão completa viabilizaria o sequestro teórico de 0,005 mol de CO_2 , ou seja, 0,22g do gás, desconsiderando perdas cinéticas e limitações de difusão. Desse modo, conclui-se a partir da observação dos resultados obtidos, que a carbonatação aquosa acelerada promove maior sequestro do CO_2 , do que a carbonatação natural ocorrida durante a vida útil do concreto. Por isso, o processo de indução do gás prova-se como um mecanismo vantajoso na mitigação dos impactos antropogênicos, no meio ambiente.



Imagem 7. Erlenmeyer 1 e 2 após formação do precipitado $CaCO_3$
Fonte: da autora

Além de reduzir as emissões de Carbono, essa nova tecnologia também confere resistência ao material, haja vista a formação de Calcita durante a carbonatação. O CO_2 reage com o Hidróxido de Cálcio do cimento ($Ca(OH)_2$), formando $CaCO_3$ na equação 3 e, assim, preenchendo poros da argamassa. Em meio aquoso, também reage com o Aluminato (C_3A), que gera fases de Carboaluminato de Cálcio (Equação 4). Os benefícios dos carbonatos precipitados abrangem maior resistência, durabilidade e estabilidade volumétrica, contribuindo para estruturas duradouras com menor demanda de manutenção. Entretanto, como qualquer avanço tecnológico, apresenta certas limitações, como inconsistência nas estruturas regulatórias entre regiões; alto consumo energético para aceleração da carbonatação, que ocorre naturalmente em décadas; e o alto custo (50 a 150 dólares por tonelada de CO_2 sequestrado). [12]



Embora a Engenharia Ambiental ainda tenha que enfrentar esses desafios, o impacto climático do concreto químico ainda apresenta maior potencial de mitigação direta do Carbono, em comparação a outras tecnologias promissoras, como o concreto vivo autocurativo e o fotocatalítico. No caso do concreto microbiano, apesar de reservar grande potencial, apresenta ressalvas quanto à exigência de condições de temperatura e umidade específicas e aos altos custos iniciais. Enquanto o fotocatalítico, embora viabilize a redução de poluentes como Óxidos de Nitrogênio (NOx), de Enxofre (SOx) e compostos orgânicos voláteis (COVs) no ar atmosférico, atua unicamente no ambiente local e melhora a qualidade do ar, sem grande impacto climático, visto que não sequestra nenhum GEE.

Como citado anteriormente, a China é a maior emissora de Dióxido de Carbono, no mundo; no entanto, também se apresenta como país líder no sequestro de Carbono por carbonatação do concreto, apresentando uma carbonatação cumulativa de 7,06 Gt (7.060.000.000 toneladas) de CO_2 desde 1930. [13] Ademais, empresas como a LafargeHolcim e a Heidelberg Materials, em parceria com a CarbonCure Technologies são exemplos na estruturação do ambiente urbano, ao buscarem o uso de materiais mais sustentáveis e comprovarem a viabilidade do concreto químico para aplicação no setor industrial.

Pode-se concluir, dessarte, que a Química se comprova como aliada inerente para a busca de soluções inovadoras, visando à construção das cidades e comunidades sustentáveis propostas pelo ODS 11, uma vez que viabiliza o surgimento de novas tecnologias, como o concreto químico de carbonatação acelerada. A integração desse processo na indústria cimentícia, embora com certas limitações, já simboliza um grande avanço na mitigação de emissões de CO_2 , contribuindo, dessa forma, com a concretização do ODS 13 no combate às mudanças climáticas. A urbanização, como sinônimo de transformação, desse modo, simboliza a chance de reconstruir-se o mundo sob um novo olhar ecológico, químico e social. Como afirmado pela ONU, “As cidades também refletem os danos ambientais causados pela civilização moderna; entretanto, os especialistas e os formuladores de políticas reconhecem cada vez mais o valor potencial das cidades para a sustentabilidade em longo prazo.”

Referências Bibliográficas:

- [1] STATISTICO. Environment: Industry CO₂ emissions from fossil fuels, by year – global historical data. (Statistco, 2022). <https://www.statistco.com/s/environment-industry-co2-emissions-from-fossil-fuels-by-year>. Acesso em 21 de fevereiro de 2026.
- [2] GLOBO. *O sobe e desce das emissões: gráfico animado mostra o impacto de cada país no cenário climático ao longo das décadas*. (O Globo, 2025). <https://oglobo.globo.com/brasil/cop-30-amazonia/noticia/2025/11/12/o-sobe-e-desce-das-emissoes-grafico-animado-mostra-o-impacto-de-cada-pais-no-cenario-climatico-ao-longo-das-decadas-gh.html>. Acesso em 21 de fevereiro de 2026.
- [3] ONU Brasil. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>
- [4] EcoDebate- Concentração de CO₂ bate recorde em 2024. <https://www.ecodebate.com.br/2024/04/08/principal-indicador-da-crise-climatica-concentracao-de-co2-bate-recorde-em-marco-de-2024/>
- [5] ALVES, José Eustáquio Diniz. Principal indicador da crise climática: concentração de CO₂ bate recorde em março de 2024. (EcoDebate, 2024). <https://www.ecodebate.com.br/2024/04/08/principal-indicador-da-crise-climatica-concentracao-de-co2-bate-recorde-em-marco-de-2024>. Acesso em 21 de fevereiro de 2026.
- [6] CLIMAINF O. *Cimento: por que as emissões de carbono deste material são importantes para a mudança do clima?* (ClimaInfo, 2018). <https://climainfo.org.br/2018/09/17/cimento-e-clima/>. Acesso em 21 de fevereiro de 2026.
- [7] SILVA, João. Captação de CO₂ em peças de concreto para pavimentação por carbonatação acelerada. 2022. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de São Carlos, 2022. <https://repositorio.ufsc.br>. Acesso em 26 de fevereiro de 2026.
- [8] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE (VDZ). *Decarbonising cement and concrete: a CO₂ roadmap for the German cement industry – Executive Summary*. Düsseldorf: VDZ, 2020. <https://www.vdz-online.de>. Acesso em 21 de fevereiro de 2026.
- [9] SRIVASTAVA, Harish Kumar. *Low-Carbon Concrete Development Through Incorporation ...* Infrastructures, Basel (MDPI, 2026). <https://www.mdpi.com/2412-3811/11/1/36>. Acesso em 21 de fevereiro de 2026.
- [10] IGE, Oluwafemi Ezekiel. *Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model*. *Clean Technologies and Environmental Policy* (SPRINGER, 2024). <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-023-02683-0>. Acesso em 21 de fevereiro de 2026.
- [11] WANG, Tao. *An industrial demonstration study on CO₂ mineralization curing for concrete*. (iScience, 2022). [https://www.cell.com/iScience/fulltext/S2589-0042\(22\)00531-4](https://www.cell.com/iScience/fulltext/S2589-0042(22)00531-4). Acesso em 21 de fevereiro de 2026.
- [12] AHMED, Omer. Carbon dioxide sequestration in cementitious materials: a review of techniques, material performance, and environmental impact. *Journal of CO₂ Utilization*. (ScienceDirect, 2024). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982024001471>. Acesso em 21 de fevereiro de 2026.
- [13] TONG, Dan G. Global carbon uptake of cement carbonation accounts 1930–2021. (Earth System Science Data, 2023). <https://essd.copernicus.org/articles/15/4947/2023/>. Acesso em 21 de fevereiro de 2026.