

Título: “Cimentando a descarbonização de uma forma concreta: a proposta do cimento LC3 e suas capacidades”

Autor: Vitor Pedrique Moura e Silva

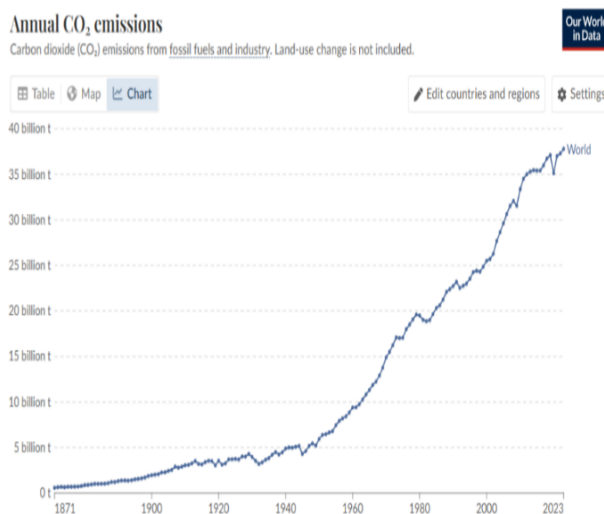
Co-autores: Gabriel Alencar Almeida Barros; Guilherme de Buone Bettini

Professor: Mário Luiz Cantarin

Série (em 2025): 3ª ano do Ensino Médio

É de conhecimento público que vários países começaram a liberar gases do efeito estufa no meio ambiente, como o Dióxido de Carbono (CO_2), após avanços em diversos ramos da ciência e desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas à Química, provocando desequilíbrios ambientais cujas consequências requisitam ações da Química para restaurar as condições estáveis no planeta por meio da descarbonização.

De acordo com o site Our World in Data [1], mais de 37 bilhões de toneladas de CO_2 foram emitidas em 2023, cerca de 7 vezes o que foi emitido em 1950, o correspondente a cerca de 5,2 bilhões de toneladas. Isso denota um crescimento exponencial nas emissões de gases do efeito estufa, visível no gráfico abaixo (Imagem 1). O grande problema de liberar essas substâncias se relaciona com impactos na saúde (poluindo as cidades e o meio ambiente), aumentos na temperatura global e as ameaças que isso traz aos ecossistemas e à vida no planeta.



(Imagem 1 - Gráfico exibindo as emissões anuais de CO_2 no mundo. [1]).

A BBC News Brasil [2] estima que 8% dessas emissões venham da indústria de cimento, que, embora seja responsável pela produção de mais CO_2 do que quase todos os países (atrás apenas da China e dos EUA), também é vital para a economia global. O concreto, material derivado

do cimento, é o segundo recurso mais consumido no mundo, perdendo apenas para a água, e é essencial na construção de casas, prédios, cidades e estradas [3].

Em vista disso, a produção do cimento mais utilizado no mundo, o Portland, libera CO_2 pelo seguinte processo: calcário moído (Carbonato de Cálcio) é aquecido a 1.450°C em um forno, induzindo a decomposição do Carbonato de Cálcio (CaCO_3) em Óxido de Cálcio (CaO) e Dióxido de Carbono (CO_2) (Equação 1). Com o intuito de provar o processo químico citado, realizamos um experimento qualitativo que consistiu em aquecer, com um maçarico, o CaCO_3 contido em um cadinho (Imagem 2), provocando a decomposição de tal em CaO sólido (que permaneceu no cadinho) e CO_2 gasoso, que se despreendeu e foi canalizado por um funil até a solução de indicador universal contida no tubo de ensaio, onde medimos o pH da solução resultante de sua reação com a água (Equação

2). De início, para obtermos valores de referência, preparamos duas soluções dissolvendo 0,5g de CaCO_3 e de CaO em 10 ml de água destilada (cada), e em seguida medimos o pH de cada solução; na primeira solução obtemos um pH de 8,0, e atribuímos esse valor à hidrólise do CaCO_3 (Equação 3), formando Hidróxido de Cálcio – Ca(OH)_2 – e Ácido Carbônico, H_2CO_3 , enquanto na segunda solução o pH medido foi de 12,0 devido à formação de uma solução de Ca(OH)_2 a partir da reação do CaO com água (Equação 4).

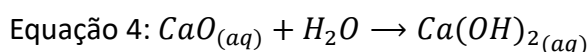
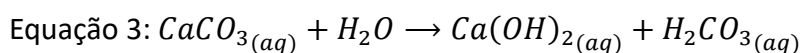
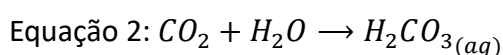
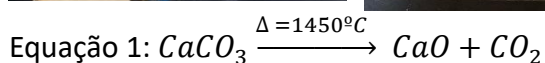
Ao final da decomposição, após resfriamento, preparamos uma solução com 0,5g do resíduo resultante no cadinho em 10 ml de água destilada e medimos seu pH, obtendo um valor aproximado a 13,0 (Imagem 3) e, assim, pela semelhança com o pH da solução de CaO abordada anteriormente, comprovamos que o resíduo citado é o CaO . Além disso, também medimos o pH da solução com CO_2 dissolvido em solução de indicador universal e obtivemos o valor de 3,0 (Imagem 4), que atribuímos à ionização do H_2CO_3 formado a partir da reação entre água e o CO_2 desprendido na pirólise do CaCO_3 .



(Imagem 2: equipamento montado para aquecer CaCO_3 e recolher CO_2)



(Imagem 3: fita à esquerda, pH da solução de CaCO_3 ; fita à direita, pH da solução de CaO)



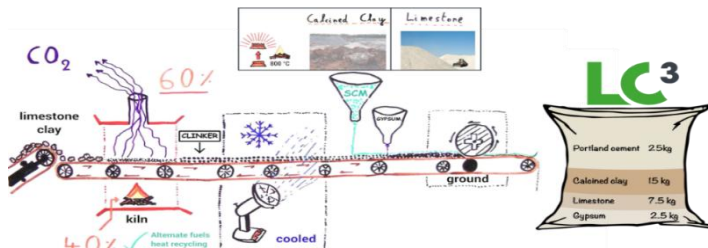
(Imagem 4: à esquerda, CO_2 em solução de indicador universal comparado à escala do pH [4], na direita)

No processo industrial, o CaO obtido da pirólise do CaCO_3 é fundido com derivados da argila, resultando no **clínquer** - principal componente do cimento -, que é então resfriado e misturado com 5% de gesso (Gypsita, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e 10 a 15% de calcário cru sem ser aquecido, assim evitando expelir CO_2 na atmosfera), concebendo o cimento convencional/Portland [5]. Por ser o formante primordial do insumo supracitado, o clínquer é amplamente fabricado

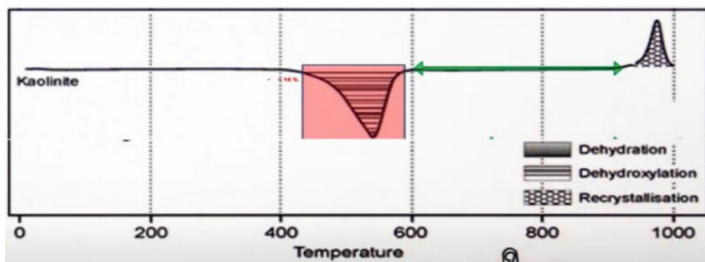
e responsável pelas emissões de CO_2 demonstradas anteriormente, portanto sendo uma opção não sustentável de fabricação do cimento.

Contudo, a química de materiais Karen Scrivener, chefe do laboratório da Escola Politécnica Federal de Lausana (EPFL) e pioneira em pesquisas químicas sobre o cimento, propôs uma forma mais sustentável de produzir este importante insumo que substitui em até 50% de clínquer em sua composição a partir da calcinação da argila a 800°C, uma temperatura notavelmente menor do que a citada na produção do cimento Portland (e que, portanto, não demanda recursos para atingir temperaturas superiores) [3]. O novo cimento foi chamado de LC3 (Limestone Calcined Clay Cement), e o método de sua produção foi ilustrado na imagem abaixo (Imagem 5).

O processo de calcinação da argila, evidenciado no gráfico subsequente (Imagem 6), consiste em aquecer e desestruturar uma substância presente na argila, a Caulinita (cuja fórmula é $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$) entre 700°C a 800°C, quando ocorre a eliminação de Hidroxila (OH^-) por desidroxilação do composto (formando água, H_2O) e a evaporação de água por desidratação (tanto a presente na argila quanto a formada pela hidroxila), mas sem procedência da recristalização da substância (que ocorre acima de 900°C). O produto é a Metacaulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), altamente reativo e ideal para a produção do LC3 [6]. Depois, tal produto é misturado com CaCO_3 (sem ser aquecido) e gesso, formando os SCM (Supplementary Cementitious Materials, ou Materiais Cimentícios Suplementares). No total, o LC3 pode ter diferentes proporções de constituintes, mas o LC3-50 (com 50% de substituição de clínquer) é uma das principais variações, composto por 50% clínquer, 30% argila calcinada (Metacaulinita), 15% CaCO_3 e 5% gesso [7].



(Imagem 5 - Ilustração da produção de cimento LC3. [7])

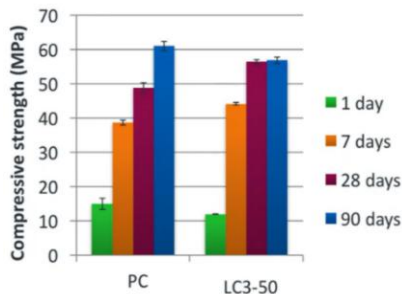


(Imagem 6 - Gráfico demonstrando o processo de calcinação da argila. [6]).

Essa forma inovadora de produzir cimento pela técnica do LC3 utiliza os mesmos materiais, equipamentos e quase os mesmos processos que o método convencional do Portland [3], com disparidade na porcentagem de clínquer utilizado e na calcinação da argila, todavia emite 40% menos CO_2 (por volta de 400 milhões de toneladas de CO_2), o correspondente à quantidade produzida dessa substância pelo Brasil no setor de energia em 2020 [8].

Embora a produção do LC3 seja muito semelhante à do Portland, é fundamental comparar as propriedades físico-químicas dos dois tipos de cimento, já que analisar fatores como resistência são indispensáveis para garantir uma substituição viável e segura. Scrivener realizou experimentos entre o PC (Portland Cement) e o LC3-50 ao longo de alguns dias após sua produção, comparando a força de compressão (ou

resistência) de ambos, e constatou que o LC3-50 suporta uma pressão próxima de 57 MPa (Megapascals) 90 dias após ser fabricado, um valor similar ao do PC nas mesmas condições - cerca de 60 MPa -, como evidente na Imagem 7. Conclui-se que o novo cimento detém propriedades semelhantes às do tradicional, sendo possível utilizá-lo da mesma maneira que o cimento habitual em obras e construções de estruturas [9].



(Imagem 7 – gráfico comparando a força compressiva do PC e do LC3-50 em função da idade do cimento [9]).

Além disso, também é crucial analisar a matéria prima das indústrias de cimento de cada país/região, uma vez que diferenças na composição química da argila podem alterar a eficácia do produto e a viabilidade de sua aplicação, sendo indispensável ajustar a temperatura dos fornos de acordo com a porcentagem de Caulinita existente na argila local. Segundo Karen Scrivener, implementar o processo de calcinação da argila nas fábricas de cimento é uma operação simples, rápida e barata, e testes do LC3 já foram realizados com a construção de uma casa em Jhansi (Índia), com a redução de 15 toneladas de CO₂ em contraposição ao modo tradicional (caso este fosse utilizado no projeto) [3].

Portanto, visto que o LC3 é produzido com os mesmos materiais, equipamentos e processos parecidos aos do Portland, além de possuir propriedades físicas similares e emitir 40% menos Dióxido de Carbono, é viável implementar sua produção na Indústria Cimentícia em diversas regiões do mundo (processo rápido e barato, pois requer poucas mudanças nas fábricas), considerando os desafios de cada região e as diferenças na composição química da argila. Com uma simples mudança no método químico de produzir cimento é possível deter a produção de cerca de 400 milhões de toneladas de Dióxido de Carbono anualmente em todo o mundo, o equivalente ao valor gerado pelo Brasil em 2020 no setor de energia [8], demonstrando como a Química é importante para a descarbonização e contribuindo dessa forma para a melhoria da qualidade atmosférica em todo o mundo.

Bibliografia (referências de dados, pesquisas e imagens)

- [1]: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
- [2]: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-46591753>
- [3]: <https://www.youtube.com/watch?v=f9618uQIZmc>
- [4]: <https://www.alpax.com.br/produtos/acessorios/papel-indicador-de-ph-universal-merck/>
- [5]: <http://www.petquimica.ufc.br/quimica-do-cimento/>
- [6]: https://www.youtube.com/watch?v=MNd_9oI8H_g
- [7]: <https://lc3.ch/the-material/>
- [8]: <https://energiaeambiente.org.br/emissoes-do-brasil-tem-maior-alta-em-19-anos-20221101>
- [9]: <https://www.youtube.com/watch?v=PEr8MwBg2w4&t=1s>