

Uso de resíduo de madeira como combustível alternativo

DOI: 10.5281/zenodo.10569632

Eliardo Luz^{a*}

Cement moves one of the biggest industries in the world and also one of the fastest growing ones, following the trend of urbanization and country development. But, this reality means a problem when it comes to the environment, due to the fact that the cement manufacturing process has a high use of electricity and high greenhouse gases emission. These can't be completely eliminated, but they can be mitigated with optimizations and changes in the process, with one of the most common ones being the use of alternative fuels to substitute part of the fossil origin ones. With this, it's possible to reduce the amount of carbon released to the atmosphere, in addition to reducing costs with the production, in a win-win situation for the both the industry and the environment.

O cimento movimenta uma das maiores indústrias do mundo e uma das que mais cresce, acompanhando a urbanização e o crescimento dos países. Porém, esta realidade representa um problema para o meio ambiente, pois o processo

de fabricação de cimento requer muita energia elétrica e gera alta quantidade de gases do efeito estufa. Estes impactos não podem ser eliminados completamente, mas podem ser reduzidos com otimizações e mudanças no processo, sendo uma das comuns atualmente o uso de combustíveis alternativos para substituir parte dos combustíveis de origem fóssil. Com isto, é possível diminuir a quantidade de carbono emitida, além de reduzir custos com a produção, em uma situação onde tanto a indústria como o meio ambiente obtêm vantagens.

^a Universidade de Brasília - UnB. Campus Darcy Ribeiro - Instituto de Química.

*E-mail: eliardoluz@gmail.com

Palavras-chave: cimento; combustíveis alternativos; emissões; gás carbônico.

Recebido em 06 de dezembro de 2023,

Aceito em 17 de janeiro de 2024,

Publicado em 31 de janeiro de 2024.

Introdução

O cimento Portland é um dos produtos de maior demanda na atualidade e um dos pilares da construção civil moderna, tendo sua produção atingido a marca de 4,13 bilhões de toneladas somente no ano de 2016.¹ Com o aumento da população, da urbanização e da modernização da infraestrutura, a indústria do cimento está em uma tendência de crescimento cada vez maior e, por isso, deve-se pensar em como acomodar este crescimento de maneira a reduzir seus impactos no meio ambiente.

O processo de fabricação de cimento consiste em 3 etapas principais: A preparação da “farinha” a partir dos materiais brutos, a formação do clínquer nos fornos rotativos e a moagem de cimento. A fabricação começa com a extração de calcário, o qual é misturado com minério de ferro e minério de alumínio, de modo que a mistura de sólidos resultante tenha uma proporção adequada de cálcio, sílica, alumínio e ferro. Essa mistura é então moída para formar um pó conhecido na indústria como “farinha”.²

Essa farinha passa então por uma reação de descarbonatação, de modo a converter o carbonato de cálcio do calcário em óxido de cálcio, que acontece em uma torre com vários ciclones em sequência, como mostrado na figura 1. A farinha entra no topo da torre e sai do seu fundo com aproximadamente 98% do gás carbônico de sua composição

liberado para a atmosfera, podendo então seguir para o forno.² O forno rotativo é um longo cilindro com leve inclinação (3 a 4,5°)³ que gira continuamente, cujo interior tem, em condições operacionais ótimas, uma temperatura de 1450 °C.³ A farinha descarbonatada, ao passar por este forno, sofre uma reação chamada de clinquerização, formando uma substância cristalina chamada de clínquer Portland. Este material cristalino, o qual serve de precursor do cimento Portland, é formado principalmente por 4 minerais: 2 silicatos de cálcio, alita(Ca_3SiO_5) e belita(Ca_3SiO_4), aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) e aluminoferro de cálcio($\text{Ca}_3(\text{Al},\text{Fe})_2\text{O}_5$). Por fim, este clínquer será moído em conjunto com gesso e outros aditivos, como escória de alto forno e *filler* de calcário, a depender do tipo do cimento que se está produzindo.²

É possível inferir, a partir deste processo, que a indústria do cimento tem um alto impacto ambiental, tanto no quesito gasto de energia elétrica, pelos processos de moagem, como em questão da emissão de gás carbônico, por conta da descarbonatação do calcário e da queima de combustível no forno. Em decorrência disto, a indústria do cimento é a terceira que mais gasta energia elétrica no mundo, além de ser responsável por aproximadamente 5% das emissões de gases do efeito estufa provenientes da atividade humana.¹ Os efeitos do aquecimento global que começam a ser sentidos cada vez mais alertam para a necessidade de diminuir nosso impacto no meio ambiente, e o cimento, pelo tamanho de sua indústria e

por sua contribuição para o aquecimento global, tem de ser um dos focos dessa reconsideração.

Porém, estes impactos não podem ser eliminados completamente, pois além deste processo ser o mais consolidado atualmente, as operações unitárias e reações descritas no processo são intrínsecas à produção de cimento, sendo possível apenas mitiga-las através de otimizações e atualizações dos meios de produção. Uma destas possíveis atualizações é descrita no artigo de Hossain et al, a substituição de parte dos combustíveis fósseis usados no forno por resíduos de madeira, chamado de WDF (*Wood Derived Fuel*, combustível proveniente de madeira em tradução livre).

Este tipo de prática, conhecida como substituição por AFRs ou *Alternative Fuel Resources* (Recursos combustíveis alternativos em tradução livre), não é novidade na indústria do cimento, pois é uma maneira de reduzir os custos e o impacto ambiental da produção simultaneamente, pois geralmente possuem menor custo (pois são, geralmente, resíduos de outras indústrias/serviços) além de terem menor teor de carbono.¹ Como é comum em casos de substituição de combustíveis fósseis por AFRs na indústria, em seu artigo, os autores analisam a viabilidade técnica da substituição utilizando este combustível alternativo utilizando indicadores relacionados à qualidade do clínquer produzido, os custos associados e as emissões geradas.^{1,2,3}

Metodologia

A pesquisa para este artigo de revisão foi feita através da plataforma Google Scholar, utilizando as palavras-chave “Portland Cement”, “AFR”, “Alternative Fuel” e “Carbon Emissions” e filtrando artigos publicados a partir de 2019. Além disso, para detalhes sobre a produção e variáveis operacionais da indústria, foi utilizado um livro especializado.

Para o teste da substituição, Hossain et al. utilizaram as instalações de uma indústria de cimento em Hong Kong, em um forno com capacidade para 100 t/d de farinha, onde o WDF deve compor 20% da mistura combustível utilizada e ser alimentado a uma vazão máxima de 4,5 t/h. A substituição foi feita em uma seção da torre chamada de pré-calcinador, que é onde ocorre uma queima secundária da farinha para garantir a descarbonatação desejada, processo chamado comumente de coprocessamento. A operação de teste ocorreu em 2 semanas e consumiu 590 toneladas de combustível alternativo, com 4 dias antes da queima do WDF e 3 dias após sendo apenas

alimentado o combustível fóssil normal como situação de base, sendo neste caso o coque de petróleo.

O WDF foi recebido de plantas de reciclagem de madeira em Hong Kong, na forma de *pellets* (pequenas esferas). Ademais, para caracterização do material, foram determinados diversos fatores como a sua granulometria, através do uso de peneiras, e sua umidade por meio da secagem em fornos. Além disso, o conteúdo das cinzas foi estudado após a queima do material em mufla e o seu poder calorífico foi aferido com o uso de uma bomba calorimétrica. O poder calorífico inferior considera em seu cálculo a energia necessária para vaporizar a água resultante da combustão, não sendo o caso para o poder calorífico superior. Este parâmetro é importante para comparação entre combustíveis, pois caso este tenha um valor baixo, isso pode significar que o combustível tenha baixo teor de carbono ou ainda alta umidade, o que torna o mesmo inviável para uso na pré-calcinação. Também foram medidos por meio de um determinador de enxofre e espectroscopia de absorção os teores de nitrogênio, enxofre, cloro e, por meio de espectroscopia de massa, traços de metais.

Para a alimentação do combustível na câmara de combustão da pré-calcinação, foi utilizado um sistema com duas moegas, uma inicial e outra de “amortecimento”, um britador para quebrar os *pellets* e um dosador de válvula rotativa. A movimentação do material foi feita com correias em parafuso e elevador de canecas para o material peletizado, e um fluidor pneumático para o combustível já pronto para a queima.

Finalmente, quanto ao controle das emissões, foi utilizado o equipamento de medição contínua já encontrado normalmente em fornos de cimento, para monitoramento constante de gases como gás carbônico, monóxido de carbono, óxidos de enxofre e nitrogênio e oxigênio. Além disso, também foram feitos testes periódicos para análise de poluentes não detectados pelo sistema contínuo, como dioxinas, particulados e metais pesados.

Figura 1. Torre de ciclones de uma fábrica de cimento



Fonte: Pixabay

Resultados e discussão

Antes de analisar os resultados do teste de queima em si, podemos comparar os dois combustíveis, pois esta análise preliminar pode explicar os resultados que serão obtidos no teste. Os autores foram bastante detalhados quanto aos combustíveis, mas é possível fazer uma análise mais simples, utilizando os parâmetros na tabela 1.

Tabela 1. Comparação entre WDF e coque de petróleo

Parâmetros	Coque	WDF
PCI (cal/g)	5089	3744
Umidade (%)	8,3	8,7
Enxofre (%)	0,76	<0,5
Cloro (%)	NA	1,0
Nitrogênio (%)	NA	<0,1
Cinzas (%)	10,6	1,14

Fonte: Hossain et al⁴

Por meio destes parâmetros, é possível inferir algumas características da operação. Umidade alta em um combustível pode acarretar perda de eficiência no forno, pois esta água irá

consumir parte do calor gerado na queima para evaporar. Já a presença de enxofre e de nitrogênio no pré-calcinador gera emissões de óxidos, como NO₂, NO e SO₂, a depender da temperatura e do teor de oxigênio na zona de combustão.³ Por fim, as cinzas representam possíveis emissões de particulados, enquanto o cloro, juntamente ao enxofre, pode afetar a produção pois induzem a formação de colagens no interior do sistema de clinquerização, que diminuem a eficiência do forno ou até mesmo danificam o equipamento.³

Podemos ver então que apesar de o combustível alternativo apresentar menor poder de queima, terá menores emissões de enxofre e de particulados, além de ter um teor de umidade excelente. Porém, temos que seus teores de nitrogênio e cloro são maiores, o que pode acarretar os problemas descritos.

Outra análise possível com a composição de combustível, que não foi incluída pelos autores no trabalho, seria a análise de composição de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio. Esta permite calcular a quantidade de ar requerida para uma combustão completa do combustível, o que é um fator importante de controle do processo, pois o excesso de ar no sistema causa ineficiência térmica e perda de produtividade, enquanto ar insuficiente acarreta uma queima incompleta e, consequentemente, instabilidade do processo e formação e emissão de monóxido de carbono para a atmosfera.^{2,3}

Com o teste de substituição, os autores puderam verificar o impacto do combustível alternativo na operação do sistema de produção, na qualidade do clínquer produzido e na emissão de poluentes. Para os parâmetros operacionais, os autores observaram que o sistema de controle da fábrica operou com menor alimentação de farinha no forno durante o teste e que as temperaturas da entrada do forno e do pré-calcinador foram menores em comparação com os valores de base, com alimentação em 100% de coque. Porém, segundo os autores, estes resultados não significaram uma redução no processo como um todo.

Quanto a qualidade do clínquer, os resultados foram semelhantes, com os parâmetros medidos entre o período de teste e fora deste sendo comparáveis, os quais estão descritos na tabela 2. Os óxidos de ferro, cálcio, alumínio e sílica, cujas proporções são determinantes para a qualidade do clínquer se mostraram praticamente equivalentes entre os dois. As diferenças mais perceptíveis foram quanto ao óxido de cálcio livre e à quantidade de sulfeto no produto, que foram maior e

menor que os dados de base, respectivamente.³ O enxofre pode ser explicado pelo menor conteúdo deste elemento sendo incluído na alimentação, por conta do WDF, enquanto que o óxido de cálcio livre pode indicar uma deficiência de queima no forno, pois indica a quantidade do composto que não reagiu para formar os cristais de clínquer.³ Esta diferença é pouca e pode ser explicada por outros fatores, como a saturação de cálcio da farinha, logo os autores não entram em detalhes para explicar tais valores, porém seria interessante incluir esta análise, já que uma quantidade alta de cal livre no cimento pode ser prejudicial para sua qualidade.

Tabela 2. Comparação entre o clínquer com e sem substituição de WDF

Parâmetros	100% Coque	20% WDF
SiO ₂ (%)	20,78	20,48
Fe ₂ O ₃ (%)	3,23	3,22
Al ₂ O ₃ (%)	6,01	5,99
CaO (%)	65,02	65,06
CaO _{livre} (%)	1,17	1,37
SO ₃ (%)	0,50	0,45

Fonte: Hossain et al⁴

Temos que os resultados das emissões foram semelhantes ao que foi inferido com os dados do combustível alternativo, com emissão com menor teor de óxidos de enxofre e particulados e um teor levemente maior de óxidos de nitrogênio. Foi também verificado que as emissões contendo dioxinas, mercúrio e outros metais pesados foi levemente maior para o teste com combustível alternativo, ainda que estejam muito abaixo dos limites estabelecidos por lei.

Por fim, os autores fazem uma análise utilizando o método de ciclo de vida, ou LCA, para verificar em quanto diminuiria as emissões de carbono para a substituição de coque por WDF feita no teste. Foi encontrado que esta diminuiria a quantidade de CO₂ lançada na atmosfera em 16% e os gastos energéticos quanto ao ciclo de vida do combustível em 14%.

Conclusões

De maneira geral, pode-se afirmar que o texto alcançou seu objetivo de verificar a viabilidade de um novo

tipo de combustível para a indústria de cimento, verificando os pontos de interesse mais relevantes para avaliar essa viabilidade, como a redução da pegada de carbono, a mudança nas emissões de poluentes, o efeito na qualidade do clínquer e nas condições de operação. Os autores conseguem desenvolver suas ideias de maneira enxuta e concisa, e demonstrar convincentemente as vantagens de realizar a proposta da pesquisa.

Porém, o texto por vezes peca por conta da maneira concisa que os autores escrevem, tanto para aqueles que não conhecem o processo de fabricação do cimento como para os que conhecem. Por exemplo, uma simples explicação dos processos ou operações envolvidos na produção não estão presentes no texto, até mesmo em partes onde são de extrema relevância, como na descrição da metodologia onde é descrito como será realizado o projeto.

Este é outro problema com o texto, as análises são abrangentes, mas poderiam ser mais aprofundadas, com maiores detalhes sobre a planta e operação usadas no teste e comparação com outras fábricas. Isto fica mais explícito na seção de discussão e resultados, quando os autores poderiam aprofundar-se mais em suas explicações para os resultados, como por exemplo trazendo valores de referência de operação para comparar com os dados de processo obtidos, ou ainda utilizar parâmetros e análises que são comumente usados para analisar a qualidade do clínquer, como a quantificação das fases do cristal por difração de raio X.

De maneira geral, é um bom texto que trata de um assunto bastante relevante para a indústria de cimento e para a sociedade em geral, porém poderia ser mais detalhista em suas explicações.

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Eliardo da Silva P. Luz.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Agradeço ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC), ao Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) pela oportunidade de participar do grupo, e

agradeço à CIPLAN Cimento Planalto por todo o conhecimento em cimento que utilizei ao escrever este artigo.

Notas e referências

- 1 M. Schneider, The cement industry on the way to a low-carbon future, *Cement and Concrete Research*, 2019, **124**, 105792.
- 2 P. A. Alsop, H. Chen and H. H. Tseng, Cement plant operations handbook: for dry process plants, *Tradeship Publications*, Dorking, Surrey, UK, 5th ed., 2007.
- 3 B. Kohlhaas and O. Labahn, Eds., Cement engineers' handbook, Bauverlag, Wiesbaden, 4th English ed., 1983.
- 4 Md. U. Hossain, C. S. Poon, M. Y. Kwong Wong and A. Khine, Techno-environmental feasibility of wood waste derived fuel for cement production, *Journal of Cleaner Production*, 2019, **230**, 663–671.