

Uma revisão sobre o uso de adições minerais no cimento portland e suas vantagens

DOI: 10.5281/zenodo.11092692

Eliardo da Silva Pinheiro Luz^{a*}, Júlia Rezende Vargas^a, Bárbara Emília Ribeiro Alcântara^a e Vinícius Neibert Bezerra^a

This review article aims to compile and present the various types of mineral additions in Portland cement. Considering the high environmental impact of the cement industry, mineral additions have emerged as a possible way to reduce the amount of CO₂ emitted per kilogram of Portland cement by replacing your main components. Exploring the types of cement, additives, and mineral additions, the physical and chemical properties that make them so attractive to the cement industry have been highlighted.

Este artigo de revisão busca compilar e apresentar as diversas formas de adições minerais em cimentos Portland. Tendo em vista o alto impacto ambiental da indústria de cimento, as adições minerais surgiram como uma possível maneira de diminuir a quantidade de CO₂ emitida por quilo de cimento Portland por meio da substituição de seus componentes principais. Explorando os tipos de cimentos, aditivos e adições minerais, foram destacadas as propriedades físico-químicas que os tornam tão atraentes para a indústria cimenteira.

Introdução

O cimento desempenha um papel fundamental na infraestrutura mundial, sendo extensivamente utilizado na construção civil e integrando desde estradas, barragens e pontes até os maiores arranha-céus. A indústria do cimento, porém, está longe da estagnação, sendo impulsionada por demandas cada vez maiores por infraestrutura e desenvolvimento tecnológico,^{1,2} que visa, entre outras premissas, reduzir os impactos ambientais ocasionados por este material e o esgotamento de recursos naturais não renováveis.³ Diante disso, busca-se examinar os processos de produção existentes, a atual indústria cimenteira e identificar alternativas sustentáveis para suprir as necessidades da construção civil atual e futura. Essa revisão busca, portanto, explorar alguns dos avanços recentes da indústria do cimento, examinar o impacto ambiental associado e discutir o uso de adições minerais como uma das possíveis abordagens para o aumento da sustentabilidade do cimento.

O cimento pode ser entendido como um material aglomerante ativo e hidráulico,⁴ que passa a apresentar alta resistência mecânica após sofrer processos contínuos de cristalização.^{5,6} Apesar de ser comum usar como referência o Cimento Portland Comum (CPI e CP I-S), existem outros tipos

^a Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB). Brasília, Distrito Federal, Brasil.

*E-mail correspondente: eliardoluz@gmail.com

Palavras-chave: Cimento Portland; Indústria Cimenteira; Adições Minerais; Sustentabilidade.

Aceito em 19 de março de 2024,
Aprovado em 26 de abril de 2024,
Publicado em 01 de maio de 2024.

de cimento, cada um com aplicações específicas, a saber: Cimento Portland Composto (CP II); Cimento Portland de Alto-Forno (CP III); Cimento Portland Pozolânico (CP IV); Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI); e Cimento Portland Branco (CPB).⁵ No Brasil, todas as especificações de cimentos são atualmente regidas pela “NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos”.⁷

A produção de cimento deve obedecer combinações químicas controladas de cálcio, silício, alumínio, ferro e demais segredos industriais, mas, via de regra, pode ser feita a partir de variadas matérias-primas, como calcário, conchas e muitos outros. Ao serem submetidos a altas temperaturas, esses materiais se aglomeram e são então transformados no pó fino que conhecemos.⁸ Existem variadas formas de se produzir cimento, mas o método mais utilizado é chamado “método seco”, em que primeiro se extrai as matérias-primas necessárias, como, mas não exclusivamente, calcário e argila, que passam então por sucessivos processos de britagem e Trituração antes de serem combinadas com minério de ferro ou cinzas volantes (cinzas de textura mais fina arrastadas por gases de combustão de fornalhas e abatidas por precipitadores eletrostáticos)⁹ e a mistura ser disposta em fornos de cimento que chegam até aproximadamente 1500 °C.

Importante ressaltar que ao longo do processo, gases, principalmente CO₂, são expelidos e o material resultante, com aspecto semelhante a carvão, é denominado clínquer, que passa então por resfriamento antes de ser triturado e misturado, respeitadas as proporções estipuladas na legislação, com gesso e calcário para dar origem ao cimento comercializado. O processo de produção por via úmida produz produtos com características físico-químicas semelhantes e a grande diferença para o método seco é que as matérias-primas são umedecidas com uma pasta de argila e água antes de serem alimentadas ao forno.⁸

Para a fabricação de cada tipo de cimento citado anteriormente, são adicionados ingredientes especiais. Para a produção do tipo CP II, por exemplo, pode ser adicionado separadamente escória (CP II-E), Pozolana (CP II-Z) ou Filler (CP II-F). Para as especificações de cada um dos tipos de cimentos, é necessário a observância da NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos.⁷

Como anteriormente citado, o cimento é um material amplamente utilizado na construção civil e para que seja possível a sua aplicação em diversos contextos, com necessidades mecânicas e químicas específicas, difunde-se o uso de aditivos, ou seja, substâncias que são adicionadas intencionalmente ao cimento no processo de transformação a concreto, a fim de melhorar ou reforçar características desejadas.¹⁰ São usualmente, mas não exclusivamente, utilizados como aditivos: tensoativos (como plastificantes e redutores de água), incorporadores de ar, aceleradores de pega, retardadores de pega, impermeabilizantes, produtores de gás ou espuma, fungicidas, germicidas, inseticidas, inibidores de corrosão de armaduras.¹¹

Para além dos aditivos, há ainda as adições, que têm o objetivo de somar ou substituir parcialmente o cimento, graças às propriedades semelhantes às do cimento. Dessa forma, enquanto os aditivos buscam acentuar certas propriedades, as adições geralmente buscam alterar a proporção da composição do concreto, porém também são utilizadas para alterar as propriedades estruturais ou físico-químicas do cimento.¹¹ O objetivo principal das adições é, portanto, reduzir as emissões de CO₂ associadas à produção de cimento pelo uso de materiais alternativos^{12,13}. As adições minerais podem ser classificadas em materiais pozolânicos, cimentantes e filler.¹¹ Em muitos casos, os materiais utilizados como adições minerais são subprodutos de outras indústrias,¹⁴ portanto, a atuação se aproxima de uma tentativa de implementação de economia circular.

Pozolânicos são materiais artificiais ou naturais silicosos ou sílico-aluminosos que possuem pouca ou nenhuma capacidade cimentante, mas que geram materiais com essas propriedades na presença de água e hidróxido de cálcio.^{11,12} São usados no intuito de reduzir problemas ambientais associados à produção de cimento, como a grande quantidade de matéria-prima e a quantidade de gases estufas gerados durante a produção do clínquer.¹² São alguns exemplos de materiais pozolânicos argilas calcinadas ou termicamente ativadas, escória de cobre, manganês e níquel, cinzas volantes, cinzas de casca de arroz e bagaço de cana-de-açúcar.^{11,12}

Cimentantes são substâncias capazes de gerar produtos cimentantes sem a presença de hidróxido de cálcio, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e escória granulada de alto forno.^{11,14} Fillers são materiais sem atividade química, que atuam no efeito de empacotamento granulométrico do cimento e na nucleação para a hidratação do material. São exemplos de filler: calcário, pó de quartzo e pó de pedra.¹¹

Metodologia

Os estudos utilizados nesta revisão foram selecionados de acordo com a relevância em relação à temática avaliada. Foram aplicados critérios de exclusão, evitando periódicos com baixo fator de impacto, para evitar a inclusão de estudos com baixa qualidade metodológica ou que não contribuíssem para com os objetivos da presente revisão. A busca literária foi realizada utilizando bases de dados eletrônicas, como o Portal de Periódicos da CAPES, Web of Science e Scielo. A busca foi restrita a estudos publicados em português e inglês, sem limitação de ano de publicação.

Resultados e discussão

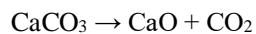
Química do cimento

Para desenvolver uma análise dos efeitos que as adições minerais podem gerar no cimento Portland, é necessário compreender qual papel tomariam no processo e como comporiam quimicamente o produto final com as propriedades desejadas. Os efeitos causados por esses compostos no produto final são advindos da interação dessas substâncias durante o processo de hidratação. Desse modo, é preciso compreender a química do cimento primeiramente, analisando as principais reações químicas e físicas no processo do cimento para posteriormente desenvolver um entendimento dos mecanismos de atuação das adições minerais.¹⁵

Entre os componentes necessários para o processo, têm-se alguns óxidos, como o dióxido de silício (SiO₂), o óxido

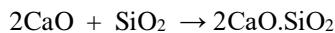
de ferro (III) (Fe_2O_3) e o óxido de alumínio (Al_2O_3), que podem ser extraídos da argila, uma matéria-prima com constituição de baixa granulometria rica em argilominerais, como os silicatos de cálcio, ferro, alumínio, magnésio e potássio. Além disso, utiliza-se o calcário, uma rocha sedimentar com grande composição de carbonato de cálcio (CaCO_3), que em elevadas temperaturas forma o óxido de cálcio (CaO), substância utilizada no processo do cimento, tendo também emissão de CO_2 .¹⁶

Nessa perspectiva, após a devida extração e moagem da matéria-prima, o processo de clinquerização é iniciado, onde sequências de reações físicas e químicas ocorrem em fornos rotatórios. As reações químicas já se iniciam antes da entrada no forno, durante o pré-aquecimento do calcário, onde ocorre a decomposição a uma temperatura de cerca de 840°C do principal constituinte do calcário, o carbonato de cálcio (CaCO_3), que é decomposto à CO_2 e CaO pela reação abaixo.¹⁶



Esse processo é completado no interior do forno. A formação do óxido de cálcio é essencial para as reações seguintes, pois reage com os óxidos advindos da argila para gerar os principais compostos para as reações seguintes, o silicato dicálcico (C_2S), o silicato tricálcico (C_3S), o aluminato tricálcico (C_3A) e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF).¹⁷

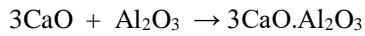
O composto C_2S tem como principal papel oferecer uma maior resistência mecânica a longo prazo ao cimento. A reação química para formar o silicato dicálcico inicia-se em temperaturas próximas a 900°C e segue a seguinte equação.¹⁸



O silicato tricálcico a ser formado, de fórmula $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$, tem por principais funções promover o endurecimento e resistência do cimento e acelerar o processo de hidratação. O C_3S é formado em temperaturas de 1200°C a 1300°C a partir da reação química abaixo.¹⁹



Para o caso do composto C_3A , há maior formação em condições úmidas durante a etapa de resfriamento, tendo maior composição em cimentos aluminosos. A síntese do aluminato tricálcico ocorre a cerca de 1100°C no forno com a seguinte equação química.¹⁸



Por último, o ferroaluminato tetracálcico, de fórmula $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, oferece ao produto final uma maior resistência à corrosão química e a cor típica acinzentada do cimento. A formação do C_4AF ocorre em temperaturas entre 1100°C e 1250°C, pela reação abaixo.¹⁸



Para melhor compreensão, na tabela abaixo é apresentada a composição química de um cimento Portland tipo II, onde é observada a essencialidade dos principais compostos citados na composição dos cimentos.

Tabela 1. Composição química de um cimento Portland tipo II. Extraído da referência²⁰.

Composto	Peso (%)
Silicato dicálcico (C_2S)	42
Silicato tricálcico (C_3S)	32
Aluminato tricálcico (C_3A)	6
Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF)	12

É importante ressaltar também que há outros produtos secundários formados no interior do forno, como o sulfosilicato de cálcio, sulfato de cálcio e $2\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$.¹⁵

O resultado de todo o processo de clinquerização é o clínquer, um material granulado obtido após seu devido resfriamento que possui dimensões entre 2 a 20 mm de diâmetro. Após a obtenção do clínquer, adiciona-se o sulfato de cálcio (CaSO_4), que atua como um retardador da pega, e os materiais são moídos para se obter a granulometria desejada. Para o caso do cimento Portland comum (CP I) puro, não se adiciona outra substância à exceção do sulfato de cálcio, o que serve como um comparativo para analisar os efeitos que as adições minerais podem causar no produto final. Assim, prossegue-se o processo a partir da adição apenas do CaSO_4 ao clínquer.¹⁶

A próxima etapa a ser analisada é a hidratação, processo de mistura do cimento com água que gera mudanças químicas e físico-mecânicas profundas no produto, sendo fundamental para a cura e endurecimento do cimento. A

hidratação é caracterizada por uma série de reações químicas exotérmicas que se iniciam ao contato imediato com a água. As reações produzem hidratos do cimento nas superfícies das partículas que gradativamente crescem, alastram-se, entrelaçam-se e aderem a superfícies adjacentes. Os principais fatores que afetam essa etapa, desconsiderando o uso das adições minerais, são a proporção de água e cimento, a granulometria, a composição do cimento e a temperatura da cura.¹⁹

A hidratação pode ser simplificada em 4 etapas, sendo a primeira caracterizada por um rápido e pequeno aumento de temperatura, a segundo uma fase de dormência, onde não ocorre aumento na temperatura, a terceira uma etapa de rápido aumento de temperatura e a quarta uma fase em que se reduz gradativamente a liberação de calor.²¹

Na primeira etapa, há a reação de ambos C₃S e C₂S com a água, que gera o gel silicato de cálcio hidratado (CSH) e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), porém é observada uma maior geração do Ca(OH)₂ a partir do C₃S, assim como uma reação mais rápida quando comparada ao C₂S. O hidróxido de cálcio desempenha principalmente um papel de estabilizar a matriz do produto hidratado e formar carbonato de cálcio a partir de uma gradual absorção de CO₂. Ademais, nessa fase há formação de hidratos de aluminato de cálcio e hidratos de aluminoferro de cálcio advindos da reação do C₃A e do C₄AF com a água, respectivamente. Nesse sentido, o rápido e pequeno aumento de temperatura observadas nessa etapa são explicadas pela rápida reação de hidratação observada do C₃S e do C₃A.^{19, 22}

Na fase de dormência, uma certa barreira de etringita (trisulfoaluminato de cálcio hidratado) é gerada ao redor das partículas de cimento, desacelerando o processo de dissolução, enquanto silicatos do cimento gradualmente se dissolvem para formar os íons Ca₂₊ e OH⁻. Além disso, há a lenta precipitação do gel CSH nesse período.²³

Na etapa seguinte, observa-se uma intensa precipitação em novas fases sólidas do gel CSH e do hidróxido de cálcio, sendo o pico exotérmico desse período explicado por essa intensa hidratação do C₃S. Ademais, há elevada formação de etringita, composto essencial para desenvolver ligações químicas com outras substâncias no processo de endurecimento, a partir dos íons Ca₂₊ e OH⁻, que por consequência têm sua concentração na mistura reduzida. Nesse período, os compostos C₃A e C₄AF continuam seu processo de hidratação, porém em taxas bem menores. É importante ressaltar que esse é o período que se inicia a cura e

endurecimento do cimento, endurecimento este que ocorre devido ao fato de alguns dos compostos formados possuírem natureza fibrosa ou cristalina, que se entrelaçam e se unem.^{19, 24}

Por último, há o período da redução na liberação de calor, que se estende até o consumo completo do cimento, desde que alimentado com a proporção correta de água-cimento. Nessa fase, a precipitação dos hidratos continua, o que gradualmente causa uma redução na saturação da mistura, que gera maior dissolução dos minerais no cimento. Os compostos obtidos pelas reações de hidratação continuam se entrelaçando, o que gradualmente reduz a taxa de difusão dos íons do cimento na solução, assim gradativamente formando um material sólido, forte, resistente, não-permeável e com forte capacidade aglutinante conforme a água livre presente na mistura evapora.^{15, 19}

Nesse contexto, com uma visão dos principais compostos químicos, reações e processos do cimento, é possível analisar os efeitos das principais adições minerais no produto final: os materiais pozolânicos, o filler calcário e a escória de alto forno. Cada um desses compostos apresentam diferentes interações com o cimento no processo de hidratação, o que gera um produto com propriedades e composições específicas, sendo excelentes opções tanto no ponto de vista ambiental, quanto funcional do cimento.¹⁶

Materiais Pozolânicos

Materiais pozolânicos ou pozolanas são definidos como materiais inorgânicos, podendo ser naturais ou artificiais, que ao serem misturadas com água na presença de hidróxido de cálcio sofrem uma reação e produzem compostos químicos que desenvolvem resistência mecânica.²⁵ O nome pozolana vem do Monte Pozzuoli, onde são encontrados materiais pozolânicos naturais na forma de rochas vitrificadas formadas a partir de cinzas vulcânicas.^{25, 26} Na antiguidade, os romanos já tinham conhecimento e faziam uso dessas rochas que, ao serem moídas e misturadas com cal, se tornavam um aglomerante inorgânico similarmente ao cimento portland tão comum nos dias atuais.^{25, 26}

A reatividade destes materiais com a água para gerar resistência se dá ao fato de sua composição química ser majoritariamente sílica, ou dióxido de silício, e óxido de alumínio.^{25, 26, 27} Quando em presença de um sistema de óxido de cálcio, ou cal, e água, iniciam-se uma série de reações que resultam em hidratos bastante semelhantes aos resultantes da reação de hidratação do clínquer de cimento portland, principalmente silicatos cálcicos hidratados (CSH), visto que

em geral a composição química das duas misturas é similar. Essas reações são chamadas de reações pozolânicas e a capacidade de um material de passar por esse processo, nominalmente a quantidade máxima de óxido de cálcio que pode reagir e a velocidade de reação, é chamada de atividade pozolânica.²⁵

Por conta de sua definição bastante ampla, a classificação das pozolanas é um assunto complexo. Geralmente encontram-se divididas em duas categorias principais: pozolanas naturais e pozolanas artificiais. As pozolanas naturais incluem as já citadas rochas piroclásticas (origem vulcânica), clásticas (sedimentares) e materiais de origem mista.²⁷ Estes são materiais que não precisam passar por nenhum tipo de processo para exibirem atividade pozolânica, exceto a moagem do material.²⁶ Porém, seu uso é limitado por sua disponibilidade, estando restrito principalmente a países da Europa como Itália, Alemanha, Grécia e Rússia, que possuem depósitos abundantes de rochas vulcânicas e terras diatomáceas que se enquadram neste grupo.^{26, 27}

Já as pozolanas artificiais são aquelas resultantes de tratamentos térmicos ou então subprodutos de processos industriais. Existem vários exemplos deste tipo de material, como o fumo de sílica da indústria siderúrgica e cinzas de casca de arroz, mas os principais cujo uso é amplamente difundido são as argilas calcinadas e as cinzas volantes.^{26, 27}

As argilas calcinadas são materiais que exibem atividade pozolânica após tratadas em temperaturas entre 500 e 900 °C²⁶, graças à desidratação dos minerais argilosos, resultando em um material amorfó rico em alumínio e sílica.²⁵ Já as cinzas volantes são resíduos vítreos formados durante a combustão de carvão ou coque pulverizado, coletados a partir da fumaça liberada por meio de filtros ou precipitadores eletrostáticos.^{25, 27} Estes são os principais materiais pozolânicos utilizados como adições minerais graças à maior disponibilidade, seja por obtenção ou mesmo produção para este fim específico.²⁶

Não é novidade a adição deste tipo de material ao cimento portland, com o primeiro registro de cimento pozolânico com argila calcinada datando a 1909 na Inglaterra e o primeiro com cinzas volantes a 1951 na França.^{25, 28} Hoje, a pozolana continua sendo uma adição mineral muito comum, por dois motivos principais: as pozolanas têm custo energético menor que o clínquer e produzem menos CO₂ por quilo, reduzindo o impacto ambiental do cimento e reduzindo seus custos de produção; a adição dá algumas características

distintas ao produto final, além de melhorar outras já existentes.^{26, 27, 28}

Quando adicionada ao cimento portland, a pozolana reagirá com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do clínquer, ou seja, irá sofrer uma reação pozolânica.²⁵ Este composto alcalino é de fácil solubilização e de lixiviação, e sua presença é elevada na massa de cimento portland, o que pode favorecer uma estrutura mais frágil para o concreto.^{25, 26} Além disso, é um composto bastante suscetível à carbonatação, ou seja, a reação de desgaste causada pelo gás carbônico no ar, que pode também enfraquecer o cimento a longo prazo. Ao reagir com este e formar compostos que garantem resistência mecânica ao cimento, a pozolana irá tornar o concreto mais resistente e mais durável.^{26, 27, 29}

Outras vantagens do seu uso incluem uma maior resistência química à ação de sulfatos, menor permeabilidade do concreto, menor quantidade de fissuras por expansão de álcali-agregados (menor basicidade)^{25, 26, 27} e maior resistência mecânica do concreto a longo prazo, apesar de sua resistência a curto prazo ser levemente reduzida.³⁰

No Brasil, as pozolanas artificiais são amplamente usadas como adição mineral, com seu tipo variando com a região e, consequentemente, sua disponibilidade. Nas regiões Nordeste, Norte e Centro-Oeste, é bastante comum o uso de argila calcinada como material pozolânico, por proximidade a depósitos de argila. Já no Sul do país, onde há uma concentração de usinas termelétricas movidas a carvão mineral, o uso de cinzas volantes é predominante.²⁸

Escória de Alto Forno

Escória de alto forno é o nome dado ao resíduo da indústria siderúrgica resultantes da produção do ferro, o qual é composto principalmente de silicatos e aluminossilicatos de cálcio. Como podemos ver, sua composição básica é semelhante à dos materiais pozolânicos e do clínquer portland, porém, a escória de alto forno sozinha possui pouca ou nenhuma capacidade aglomerante. Para que esta possa ser utilizada para este fim, deve ser, assim como as pozolanas, adicionada a outros compostos como cal, clínquer portland e compostos alcalinos, ou seja, sua adição ao cimento portland a torna ativada como composto cimentício.²⁵

Como adição para o cimento, a escória de alto forno é utilizada desde 1892 na Alemanha, por meio de sua adição ao último processo de fabricação: a moagem de clínquer e gesso.²⁸ A sua reação de hidratação é semelhante à das pozolanas, consumindo o hidróxido de cálcio no clínquer para a formação

de compostos com resistência mecânica.²⁵ Semelhantemente, o concreto formado possui maior resistência mecânica a longo prazo em detrimento desta ser menor a curto prazo, além de maior resistência ao ataque químico de sulfatos, cloro e água marinha quando comparado ao concreto feito com cimento convencional.³¹ Porém, se mostra mais vulnerável ao efeito de carbonatação, ao contrário do que contém pozolanas.^{31, 32}

No Brasil, seu uso é comum na região Sudeste, onde estão localizadas as maiores siderúrgicas do país. Contudo, também é comum ser utilizada em outras regiões, apesar de ser em menores quantidades.²⁸

Filler de calcário

“Filler” é o nome dado à adições minerais que são moídas juntamente ao clínquer na fabricação de cimento, que podem ou não interagir quimicamente com os outros compostos.^{28, 33} O calcário moído é um dos principais *fillers* utilizados, pois é de fácil obtenção na indústria cimenteira, considerando que a maioria das fábricas são construídas nas imediações de minas de calcário, o qual é também a matéria prima para o clínquer.^{8, 28}

O *filler* de calcário foi utilizado como forma de reduzir os custos energéticos da produção de cimento durante a crise do petróleo de 1973, pois diminuía a quantidade de clínquer utilizada além de aumentar a moabilidade do cimento. Hoje, além dessas vantagens, sabe-se também que a adição de calcário em baixas quantidades no cimento, abaixo de 10% em peso, principalmente com clínquer que possui alta quantidade de C₃A, também melhora algumas características do mesmo, como maior resistência inicial e mais resistência à sulfatos, ainda que esta seja menor à oferecida pela escória e pelas pozolanas.³⁴ Em geral, pode-se dizer também que o *filler* melhora a trabalhabilidade do concreto, isto é, a capacidade de moldá-lo em novas formas, pois as partículas de calcário servem como uma espécie de “lubrificante” para o cimento.²⁸

Classificação pela ABNT

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), órgão responsável pela normalização técnica no Brasil, tem como objetivo fornecer a base normativa necessária ao desenvolvimento tecnológico brasileiro, estabelecendo padrões necessários à produção, qualidade e segurança de produtos e serviços. Assim, em 2018, foi publicada a ABNT NBR 16697, norma técnica que especifica os requisitos para a produção e o fornecimento de cimento Portland. Essa norma define critérios como composição, especificações, embalagem, armazenamento e métodos de ensaio para diferentes tipos de

cimento Portland, visando assegurar a qualidade e a adequação do cimento para uso na construção civil. Nesse aspecto, tal norma divide o cimento Portland em sete principais tipos segundo sua composição química: Cimento Portland Comum (CP I), Cimento Portland Composto (CP II), Cimento Portland de Alto-Forno (CP III), Cimento Portland Pozolânico (CP IV), Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (CPBC), Cimento Portland Branco (CPB).⁷

O Cimento Portland Comum (CP I) é um ligante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland, ao qual se adiciona apenas uma quantidade necessária de alguma forma de sulfato de cálcio durante sua fabricação. Na maioria das vezes, é adicionado gesso, que é utilizado como um retardador da pega. Esse é o tipo mais comum de cimento Portland, utilizado em uma variedade de aplicações de construção civil em situações em que não são exigidas propriedades especiais do cimento, como lajes, fundações, pisos e paredes.^{7, 34}

Já o Cimento Portland Composto (CP II) se divide em três subtipos que são determinados pelas adições de escória de alto-forno (CP II-E), material pozolânico (CP II-Z) ou material carbonático (CP II-F). Devido a essas adições, é um tipo de cimento de maior resistência, além disso, o tempo de pega do material não é acelerado. Logo, é usado em obras que exigem maior resistência à sulfatação e, por ser mais versátil, pode ser usado em praticamente qualquer obra de concreto armado, como edifícios, pontes e viadutos.^{7, 35}

Obtido através da mistura homogênea de clínquer Portland com escória granulada de alto-forno, o Cimento Portland de Alto-Forno (CP III) apresenta maior resistência final. Essa massa possui como benefício, além da alta resistência, elevada durabilidade até mesmo em ambientes mais agressivos. Portanto, é muito utilizada em obras de grande porte e infraestrutura, como barragens, grandes lajes, e fundações.^{7, 36}

O Cimento Portland Pozolânico (CP IV) é produzido por meio da mistura de clínquer Portland e materiais pozolânicos, que podem ser moídos em conjunto ou separadamente. A adição destas pozolanas tende a aumentar a durabilidade desse material, o que faz com que esse seja fortemente indicado para obras expostas a ambientes agressivos, como construções marítimas, estações de tratamento de água e esgoto, e pavimentos rodoviários.⁷

Outro tipo é o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI) que, como o nome sugere, foi desenvolvido

para atingir elevadas resistências mecânicas já nas primeiras horas após a sua aplicação. Esse rápido ganho de resistência o torna ideal para projetos de construção que exigem desforma precoce de peças de concreto ou quando é necessária a rápida utilização das estruturas, como em obras de restauração de pavimentos, fabricação de pré-moldados e montagens industriais que não podem tolerar longos períodos de interrupção. É uma massa muito utilizada na região sul do país.³⁶

Ademais, o Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (CPBC) é formulado especificamente para minimizar a quantidade de calor liberado durante o processo de hidratação do cimento, uma característica essencial para a construção de grandes volumes de concreto, como em barragens, fundações profundas e pilares de grandes estruturas. A produção do CPBC envolve a redução do conteúdo de clínquer e o aumento de componentes como escórias de alto-forno, cinzas volantes ou pozolanas, que reagem mais lentamente com a água.³⁶

Por fim, o Cimento Portland Branco (CPB) se diferencia pela sua coloração, esse é composto de clínquer Portland branco cujas adições de sulfato de cálcio e outros componentes não causam alteração em sua cor. Pode ser classificado em estrutural e não estrutural. O estrutural é frequentemente usado em trabalhos de arquitetura onde a estética é importante, como revestimentos, argamassas de acabamento, elementos pré-moldados visíveis e obras de arte em concreto. Por outro lado, o não estrutural é aplicado em instalações não estruturais, como rejantes de azulejos, por exemplo.^{7, 35}

Conclusões

Em suma, este artigo de revisão destacou o papel vital do cimento Portland na infraestrutura global e a crescente necessidade de inovações sustentáveis na indústria cimenteira para atender à demanda por desenvolvimento infraestrutural, minimizando ao mesmo tempo o impacto ambiental e o esgotamento dos recursos naturais não renováveis. A investigação centrou-se nas adições minerais - especificamente materiais pozolânicos, escória de alto forno e filler de calcário - como alternativas viáveis para aumentar a sustentabilidade do cimento Portland, oferecendo simultaneamente melhorias significativas em termos de propriedades mecânicas e durabilidade do material.

Os materiais pozolânicos, por exemplo, demonstraram capacidade de melhorar a resistência mecânica e a durabilidade do concreto, além de contribuir para a redução

das emissões de CO₂, graças ao seu baixo consumo energético e menor quantidade de CO₂ emitida em sua produção, em comparação ao clínquer. Da mesma forma, a escória de alto forno, como subproduto da indústria siderúrgica, apresenta benefícios notáveis quando adicionada ao cimento, incluindo maior resistência a longo prazo e melhor desempenho em ambientes agressivos. O filler de calcário, por outro lado, além de reduzir os custos energéticos associados à produção de cimento, também mostrou melhorar a forma de trabalhar o concreto e as propriedades mecânicas iniciais.

Ademais, a normatização pela ABNT, através da NBR 16697, destaca a importância de padrões e especificações que assegurem a qualidade e adequação do cimento Portland para uso na construção civil, ao mesmo tempo que incorpora práticas sustentáveis na produção cimenteira. Essa norma reflete o compromisso do setor em adaptar-se às exigências contemporâneas de sustentabilidade, sem comprometer a eficácia e a eficiência do material.

Em conclusão, a inclusão de adições minerais no cimento Portland não só atende às demandas por materiais de construção de menor impacto ambiental, mas também oferece melhorias significativas nas propriedades do cimento, abrindo novas possibilidades para a construção civil. A continuação da pesquisa e desenvolvimento nessas áreas é essencial para garantir que a indústria cimenteira possa contribuir de forma eficaz para uma infraestrutura global sustentável, resiliente e de alta qualidade. A colaboração entre pesquisadores, indústria e reguladores será crucial para promover inovações que alinhem as práticas de produção de cimento com os objetivos de desenvolvimento sustentável, garantindo, assim, um futuro mais verde para a construção civil global.

Contribuições por Autor

Introdução e Metodologia: Júlia R. Vargas.

Química do cimento: Vinícius Neibert Bezerra

Materiais Pozolânicos, Escória de Alto Forno e Filler de calcário: Eliardo

Classificação pela ABNT e Conclusão: Bárbara Emília Ribeiro Alcântara.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB/MEC, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação

(DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 K.L. Scrivener, P. Juillard and P. J. M. Monteiro, Advances in understanding hydration of Portland cement, *Cement and Concrete Research*, 2015, **78**, 38-56.
- 2 SANTIN, Indústria do cimento acelera a transição rumo a uma economia neutra em carbono, <https://abcp.org.br/industria-do-cimento-acelera-a-transicao-rumo-a-uma-economia-neutra-em-carbono/>, (accessed Mrch 17, 2024).
- 3 M. B. Maury and R. Blumenschein, Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente, *Sustentabilidade em Debate*, 2012, **3**, 75-96.
- 4 A. Martins, S. Mercadé, J. Aoki, F. Madi, C. G. Marcondes and I. Neves, *Cimento*, 2007.
- 5 O que é cimento?, <https://www.portaldoconcreto.com.br/o-que-e-cimento>, (accessed March 12, 2024).
- 6 A. Lima, O processo produtivo do cimento Portland, Especialização em Engenharia de Recursos Minerais, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2011.
- 7 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 16697, Cimento Portland - Requisitos, Rio de Janeiro, RJ, 2018, https://saturno.crears.org.br/pop/profissional/ABNT_NBR_16697_2018.pdf.
- 8 How Cement Is Made, <https://www.cement.org/cement-concrete/how-cement-is-made>, (accessed 17 March 2024).
- 9 N. I. W. D. Silva, L. M. Calarge, F. Chies, J. E. Mallmann and O. Zwonok, Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico, *Cerâmica*, 1999, **45**, 184–187.
- 10 E. Petrucci, *Concreto de Cimento Porland*, Editora Globo, 13th edn., 1998.
- 11 G. Da Fonseca, Adições Minerais e as Disposições Normativas Relativas à Produção de Concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2010.
- 12 G. Cordeiro and R. Fairbairn, Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios, *Quim. Nova*, 2009, **32**, 82–86.
- 13 P. C. Abrão, O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (USP), 2019.
- 14 L. Rosa, Materiais cimentícios suplementares: histórico e novas tendências, <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/materiais-cimenticos>, (accessed 17 March 2024).
- 15 J. W. Bullard, H. M. Jennings, R. A. Livingston, A. Nonat, G. W. Scherer, J. S. Schweitzer, K. L. Scrivener and J. J. Thomas, Mechanisms of cement hydration, *Cement and Concrete Research*, 2011, **41**, 1208–1223.
- 16 V. G. de Castro, Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro, Editora Universitária da Ufersa - EdUFERSA, Mossoró, RN, 2022.
- 17 I. Odler, Special inorganic cements, *E & FN Spon*, New York, 2000.
- 18 L. D. A. Gobbo, Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, 2003.
- 19 I. Odler, in Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Elsevier, 1998, pp. 241–297.
- 20 D. D. Stokke, Q. Wu and G. Han, Introduction to wood and natural fiber composites, Wiley, Chichester, West Sussex, United Kingdom, 2014.

- 21 Y. M. Wei, Y. Guang Zhou and B. Tomita, Hydration behavior of wood cement-based composite I: evaluation of wood species effects on compatibility and strength with ordinary portland cement, *J Wood Sci*, 2000, **46**, 296–302.
- 22 P. D. Evans and Australian Centre for International Agricultural Research., Wood-cement composites in the Asia-Pacific Region: proceedings of a workshop held at Rydges Hotel, Canberra, Australia on 10 December 2000, Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra, 2002.
- 23 K. R. Backe, O. B. Lile and S. K. Lyomov, Characterizing Curing Cement Slurries by Electrical Conductivity, *SPE Drilling & Completion*, 2001, **16**, 201–207.
- 24 J. P. Vieira, Mestrado em Interacção Cimento-superplasticificante, Universidade Técnica de Lisboa, 2010.
- 25 F. M. Lea and P. C. Hewlett, *Lea's chemistry of cement and concrete*, Elsevier-Butterworth-Heinemann, Amsterdam London Paris, 4th edition., 2004.
- 26 V. A. Zampieri and Y. Kihara, Contribuição ao Estudo de Pozolanas de Argilas Calcinadas Brasileiras, *Cerâmica*, 1982, **28**, 145–167.
- 27 V. A. Zampieri and Y. Kihara , in *Contribuição ao estudo de Pozolanas no Brasil*, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1988.
- 28 A. F. Battagin and J. O. de Carvalho, Blends: Cementing Brazil's Sustainability, *World Cement*, 2015, 28–35.
- 29 M. J. Shannag and A. Yeginobali, Properties of pastes, mortars and concretes containing natural pozzolan, *Cement and Concrete Research*, 1995, **25**, 647–657.
- 30 B. Uzal and L. Turanli, Studies on blended cements containing a high volume of natural pozzolans, *Cement and Concrete Research*, 2003, **33**, 1777–1781.
- 31 G. J. Osborne, Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete, *Cement and Concrete Composites*, 1999, **21**, 11–21.
- 32 Ş. C. Bostancı, M. Limbachiya and H. Kew, Portland slag and composites cement concretes: engineering and durability properties, *Journal of Cleaner Production*, 2016, **112**, 542–552.
- 33 K. D. Ingram and K. E. Daugherty, A review of limestone additions to Portland cement and concrete, *Cement and Concrete Composites*, 1991, **13**, 165–170.
- 34 F. G. Simões, Avaliação macroscópica e microscópica do Cimento Portland Comum - CP I e do Cimento Portland Branco não estrutural - CPB incluídos na calvária de ratos, Universidade de São Paulo (USP), 2008.
- 35 S. A. Padilha, C. M. Paliga and A. S. Torres, ESTUDO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PRODUZIDOS COM DIFERENTES CIMENTOS E DOSADOS EM AMBIENTE DE FÁBRICA, *REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, DOI:10.5216/reec.v13i2.46469.
- 36 J. A. Cabrera-Madrid, J. I. Escalante-García, P. Castro-Borges, J. A. Cabrera-Madrid, J. I. Escalante-García and P. Castro-Borges, Resistência à compressão de concreto com escória de alto forno. Re-revisão do estado da arte, *Revista ALCONPAT*, 2016, **6**, 64–83.