

AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS DE DISPONIBILIDADE DE POZOLANAS PARA A FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Assessment of Pozzolan Availability Scenarios for the Manufacturing of Portland Cement in the Southern Region of Brazil

Alice Rohling¹, Gustavo Gutierrez de Oliveira Rodrigues², Natália Salamoni³, Abrahão Bernardo Rohden⁴

Resumo: A produção do cimento Portland é responsável por uma considerável emissão de gases de efeito estufa. Para reduzir estas emissões, busca-se substituir o clínquer por adições minerais, como a cinza volante. No entanto, prevê-se escassez desse material devido ao encerramento das termoeletricas. A argila calcinada surge como uma alternativa livre de emissões durante a calcinação, mas ainda não é amplamente considerada. Baseado nestes princípios, o objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto da redução da disponibilidade de cinza volante na produção de cimento Portland no Sul do Brasil, analisando a viabilidade da argila calcinada como substituta deste material e seus impactos na indústria cimenteira. O estudo comparou diferentes cenários de uso da argila calcinada utilizando dados de projeções existentes sobre a produção de cimento, de adições minerais e crescimento populacional. Foram considerados cenários de majoração do uso da argila em 30, 40 e 50% para se adequar à situação, uma vez que atualmente não há projeções que levem em conta a extinção da cinza volante. A partir disto, os resultados indicaram desafios para a argila calcinada acompanhar a crescente demanda por cimento. No entanto, ainda foi visto que seu uso impulsiona a produção de cimento na região Sul do Brasil.

Abstract: The production of Portland cement is responsible for considerable greenhouse gas emissions. To reduce these emissions, we seek to replace clinker with mineral additions, such as fly ash. However, a shortage of this material is expected due to the closure of thermoelectric plants. Calcined clay appears as an emission free alternative during calcination but is not yet widely considered. Based on these principles, the objective of this work was to evaluate the impact of reducing the availability of fly ash on the production of Portland cement in southern Brazil, analyzing the viability of calcined clay as a substitute for this material and its impacts on the cement industry. The study compared different scenarios for the use of calcined clay using data from existing projections on cement production, mineral additions and population growth. Scenarios of increasing the use of clay by 30, 40 and 50% were considered to adapt to the situation, since there are currently no projections that consider the extinction of fly ash. From this, the results indicated challenges for calcined clay to keep up with the growing demand for cement. However, it was still seen that its use boosts cement production in the southern region of Brazil.

Palavras-chave:

Material cimentício; Impacto ambiental negativo; Cinza volante; Argila calcinada.

Keywords:

Cementitious material; Negative environmental impact; Fly ash; Calcined clay.

¹Graduada em Engenharia Civil pela Universidade de Blumenau (2023);

²Doutorando em Engenharia Ambiental (2022-2026), Mestre em Engenharia Ambiental (2022) e Graduado em Engenharia Civil (2018);

³Doutoranda em Engenharia Ambiental (2023-2027), Mestre em Engenharia Ambiental (2023) e Graduada em Engenharia Civil (2020);

⁴Professor Doutor em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade de Blumenau.

1 INTRODUÇÃO

A redução de emissão de gás carbônico em processos industriais é um tema que vem ganhando espaço de discussão nos últimos anos, porém, também é um grande desafio. A produção do cimento é uma das maiores emissoras de dióxido de carbono (CO₂), sendo responsável por aproximadamente 8% da emissão atmosférica mundial de gás carbônico (Akhlaghi et al., 2017).

O cimento é composto principalmente por clínquer, este sendo produto da calcinação do calcário e argila. O processo de queima é responsável pela emissão de 63% do gás carbônico oriundo da produção de cimento, enquanto 36% são emitidos pela energia térmica e 1% da energia elétrica (SNIC, 2019).

Uma das alternativas para diminuir a emissão de CO₂ durante a produção do cimento é a adição mineral, que pode ser incorporada como substituição parcial do cimento. Além da sustentabilidade envolvida ao utilizar este tipo de adição, esta prática pode melhorar a trabalhabilidade do concreto fresco e aumentar a durabilidade das estruturas, além de ser vantajosa economicamente, já que os custos da adição mineral são menores que os do cimento e do clínquer Portland (Silva, 2017).

A NBR 16697 (ABNT, 2018) estabelece limitações quanto ao emprego de adições minerais no cimento Portland, com o objetivo de garantir a conformidade do produto com os padrões de desempenho mecânico e químico necessários para sua aplicação em diversas condições ambientais e obras, sem afetar sua durabilidade e segurança. Dentre as adições utilizadas nacionalmente destacam-se as escórias de alto forno, fíleres calcários e pozolanas. Tais adições têm ganhado destaque no cenário de produção, principalmente pela disponibilidade de recursos, haja vista reduzir os efeitos ambientais adversos e redução de custos (Silva, 2017).

O Brasil é referência quanto ao uso de adições minerais no cimento, apresentando um dos menores índices de emissão de CO₂ no mundo. Entre os anos de 1990 e 2014, houve um crescimento de 273% na produção de cimento, enquanto o crescimento de CO₂ foi de 223% no mesmo período. Isto se dá por conta das medidas mitigadoras implementadas no país, que obtiveram como resultado uma redução de 18% das emissões específicas, indo de 700 quilogramas de CO₂ por tonelada (kg CO₂/t) de cimento para 564 kg CO₂/t cimento. Porém, o alto déficit habitacional e de infraestrutura do Brasil, aliado à expectativa de crescimento populacional, aponta para um aumento de 60 a 120% (em baixa e alta demanda, respectivamente) na produção de cimento no ano de 2050 com relação a 2014 (SNIC, 2019).

Em decorrência da previsão de aumento da produção de cimento, são necessárias tecnologias inovadoras com implantação emergencial para redução das emissões de gás carbônico, porém, as alternativas disponíveis não se encontram distribuídas homoganeamente pelo território brasileiro, levando em conta as dimensões e diferenças regionais do país.

Na região Sul do Brasil, a adição mineral mais utilizada é a cinza volante, pozolana oriunda de atividades de termoelétricas. Entretanto, a Lei nº 14.299 (BRASIL, 2022) prevê o encerramento desta indústria até o ano de 2040, o que faz com que o futuro da produção de cimento na região seja incerto.

Para diminuir a emissão de CO₂, alternativas como substituição do clínquer, aumento da eficiência energética, uso de combustíveis alternativos e desenvolvimento de tecnologias de captura de carbono devem ser estudadas e implementadas. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo geral avaliar o impacto da redução da disponibilidade de cinza volante na produção de cimento Portland no Sul do Brasil, tendo em vista os impactos ambientais adversos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cimento Portland

Os materiais cimentícios são uma das classes mais importantes de materiais de construção utilizados em todo o mundo. Eles são amplamente utilizados em uma variedade de aplicações, desde a construção de edifícios e infraestrutura até a produção de peças pré-fabricadas e acabamentos arquitetônicos.

A produção dos materiais cimentícios teve origem a partir da descoberta, por parte das primeiras civilizações, de que a mistura de cinzas vulcânicas e cal resultava em um material resistente e durável, que passou a ser utilizado na construção de estruturas. Ao longo do tempo, o processo de produção evoluiu progressivamente, resultando no desenvolvimento e descoberta de novos materiais.

O principal material descoberto foi o cimento, e no seu desenvolvimento, houve um avanço em 1756, quando o inglês John Smeaton, através da calcinação de calcários moles e argilosos, obteve um material de alta resistência. Quase 70 anos depois, em 1824 na Inglaterra, Joseph Aspdin realizou diversos experimentos utilizando calcário e argila, e a partir desta mistura, obteve um pó fino que, ao ser misturado com água, formava uma pasta que endurecia rapidamente. Esse material foi batizado de cimento Portland, em referência à pedra extraída na Ilha de Portland, na Inglaterra (Iglinski; Buczkowski, 2017).

No Brasil, diversas tentativas foram feitas para ingressar na produção de cimento, como a do engenheiro Louis Felipe da Nóbrega, que em 1890 abriu uma pequena fábrica na ilha de Tiriri, na Paraíba, esta operou por apenas três meses. Outra iniciativa foi a usina de Rodovalho, que iniciou suas atividades em 1897, mas interrompeu suas operações em 1904, retornando apenas em 1907, mas encerrou definitivamente suas atividades em 1918. Foi apenas em 1924 que ocorreu a instalação definitiva e bem-sucedida de uma produtora de cimento no Brasil com a inauguração da fábrica de cimento Portland pela Companhia Brasileira de Cimento Portland, no bairro de Perus, na cidade de São Paulo (Visedo; Pecchio; Battagin, 2019).

A necessidade de integração nacional para fortalecer a indústria cimenteira no Brasil levou à criação da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) no ano de 1936, que tinha como objetivo oferecer suporte ao setor e atender às demandas técnicas do país na utilização do produto.

O cimento Portland é um material fino, que possui grande relevância na construção civil, sendo amplamente empregado em diferentes tipos de edificações. Com o passar do tempo, novas formulações de cimento foram desenvolvidas com o objetivo de atender às demandas específicas do setor da construção, buscando aprimorar o desempenho e a durabilidade dos materiais utilizados nas edificações.

A produção de cimento é um processo complexo, que consiste em várias etapas. O processo tem início na extração da matéria-prima principal, o calcário. Este material é transportado e britado para preparação da chamada farinha crua. Esta farinha é produzida pela mistura das matérias-primas (calcário e argila), e em seguida é pré-aquecida em trocadores de calor e encaminhada ao forno rotativo, onde é submetida a temperaturas de até 1450 °C (SNIC, 2019).

Este processo de calcinação transforma o material em clínquer, um material sólido e granulado. O clínquer é resfriado rapidamente em um resfriador de grelha para evitar a formação de cristais e, em seguida, passa pelo processo de moagem, onde adiciona-se à mistura a gipsita. A gipsita retarda o tempo de pega do material, permitindo um tempo de trabalho mais longo para o cimento antes de começar a reagir. Na produção de cimentos compostos, as adições minerais também são adicionadas durante o processo de moagem (SNIC, 2019).

Após a produção, o cimento é armazenado em silos e passa por testes de qualidade antes de seguir para a expedição. A distribuição do produto pode ser realizada de duas formas: a granel ou em sacos

de 50 quilogramas (kg), 40 kg ou 25 kg. O ensacamento é feito por máquinas especiais que enchem e liberam os sacos automaticamente quando atingem a massa correta (SNIC, 2019).

2.2 Adições Minerais

Diversos materiais são utilizados como adições minerais no cimento, podendo ser divididas em três principais categorias: escórias, pozolanas e fileres. A produção da escória de alto-forno é bastante expressiva na região sudeste do Brasil, em função da localização das maiores usinas siderúrgicas à coque nesta região. Esse material é responsável por cerca de 13,6% da produção nacional de Cimento Portland. A escória é utilizada principalmente na produção do cimento Portland composto com escória de altoforno (CP II-E) e no cimento Portland de alto-forno (CP III) (Silva, 2017; ABNT, 2018). Além das escórias, o emprego de materiais pozolânicos tem recebido considerável atenção no contexto da produção de Cimento Portland, sendo utilizados em 5,7% no seu montante de fabricação. No que diz respeito a sua distribuição, há uma diversidade de tipos deste material, compreendendo desde as pozolanas naturais, a exemplo da terra diatomácea, e argilas calcinadas, que se concentram principalmente nas regiões norte e nordeste do Brasil, até a cinza volante, predominantemente produzida na região sul do país, em especial nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. O cimento Portland composto com pozolanas (CP II-Z) e o cimento Portland pozolânico (CP IV) são os tipos de cimento que possuem as pozolanas em sua composição (SNIC, 2019; ABNT, 2018). Durante o processo de queima de carvão mineral, são gerados dois tipos de cinzas: a cinza pesada e a cinza volante. No Brasil, a maioria das usinas termoeletricas que utilizam carvão mineral estão localizadas na região sul do país, com maior concentração nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Essas usinas produzem uma grande quantidade de cinzas que são utilizadas na produção de cimentos compostos, como o CP II-Z, que consiste em 6 a 14% de pozolanas em relação à sua massa total, e o CP IV, que contém de 15 a 50% de pozolanas em relação à sua massa total (ABNT, 2018).

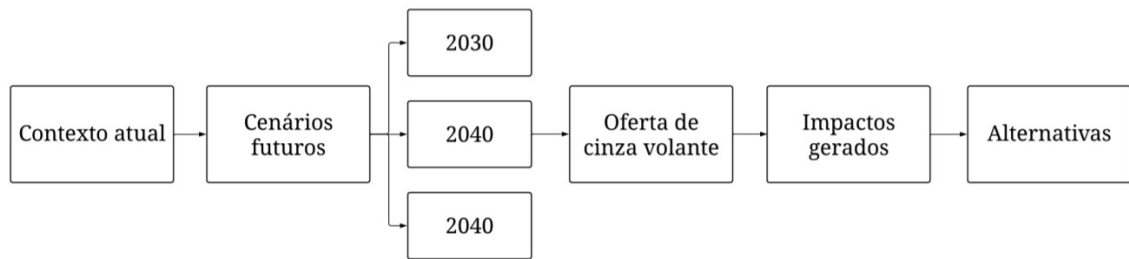
A cinza volante é a principal adição mineral utilizada para fabricação de cimento no Sul do Brasil, região esta que detém as principais termoeletricas em atividade. No cenário atual, as contratações de termoeletricas para geração de energia vêm diminuindo, despertando receio quanto a disponibilidade do material a ser utilizado para a produção do cimento. Mediante a iminente falta deste material, a qual já está prevista pela Lei nº 14.299 (BRASIL, 2022) para o ano de 2040, constata-se uma estabilização de disponibilidade deste recurso até a data prevista, e, posteriormente, a sua extinção. Além do uso de cinza e escória, destaca-se ainda a adição de materiais não reativos, conhecidos como fileres, que são materiais com ampla distribuição pelo território nacional. Em contrapartida, apenas 7,4% da produção total de Cimento Portland no Brasil utiliza este aditivo mineral. Este fato pode ser atribuído à variabilidade das composições químicas e das características físicas do filler, aliado à sua limitada disponibilidade, ainda que seja um elemento amplamente distribuído pelo território brasileiro (SILVA, 2017).

Mesmo com suas limitações, o filler calcário pode estar presente em quase todos os tipos de cimento comercializados no mercado brasileiro, porém, tem mais ampla utilização no cimento Portland composto com filler calcário (CP II-F) (ABNT, 2018).

3 METODOLOGIA

Mediante a exposição dos contextos encontrados, observa-se uma lacuna em relação aos efeitos inerentes aos cenários de fabricação do cimento no Brasil, principalmente na iminente redução da disponibilidade de cinza volante na região Sul do Brasil. Neste sentido, a Figura 1 demonstra o fluxograma metodológico utilizado neste trabalho.

Figura 1 - Fluxograma metodológico



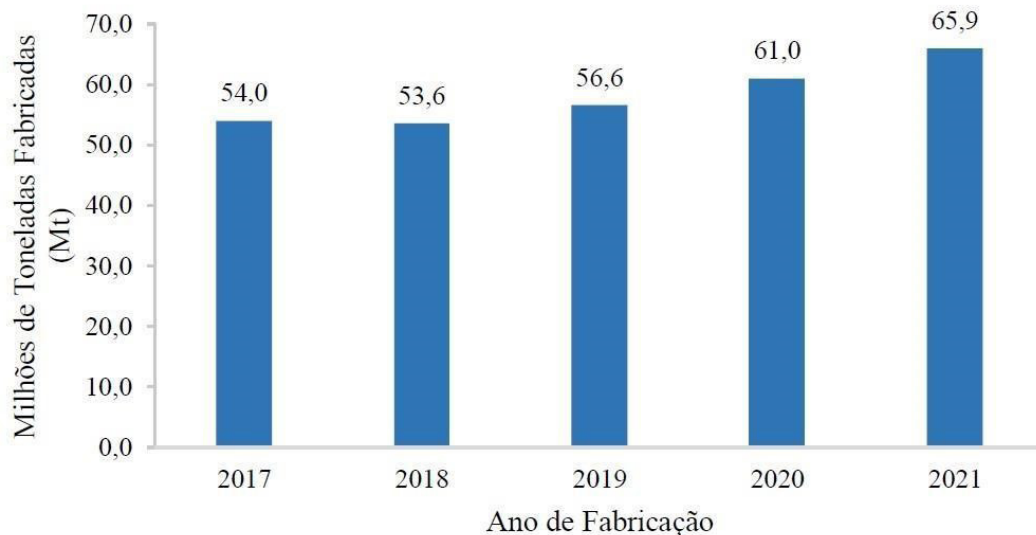
Fonte: Autores (2024)

Nessa seção foram abordados os contextos atual e futuro da fabricação de cimento Portland no Brasil, além da observância acerca das projeções para 2030, 2040 e 2050. Diante do foco principal do trabalho permear as cinzas volantes, observou-se a sua limitada disposição, de forma conjunta com a produção de cimento e os impactos gerados diante da iminente falta. Atrelado a estes efeitos, tem-se a necessidade de serem promovidas alternativas voltadas a minimização dos impactos negativos, além de tornar o processo menos oneroso.

Com a iminente falta de cinza volante pela transição energética prevista para o estado de Santa Catarina, os cenários analisados preveem o uso combinado de argila calcinada e cinza volante até o ano de 2040. Contudo, após esse período, a última projeção realizada, observa apenas o uso de argila calcinada, que tende a ser uma das principais adições minerais utilizadas no país.

Em virtude de o contexto atual apresentar inúmeras incertezas quanto as disponibilidades de adições minerais para utilização na fabricação de cimento, foi importante observar os dados presentes de utilização, com vistas aos efeitos futuros, conforme indicado na Figura 2.

Figura 2 – Dados de fabricação de cimento Portland no Brasil



Fonte: Adaptado de SNIC (2021)

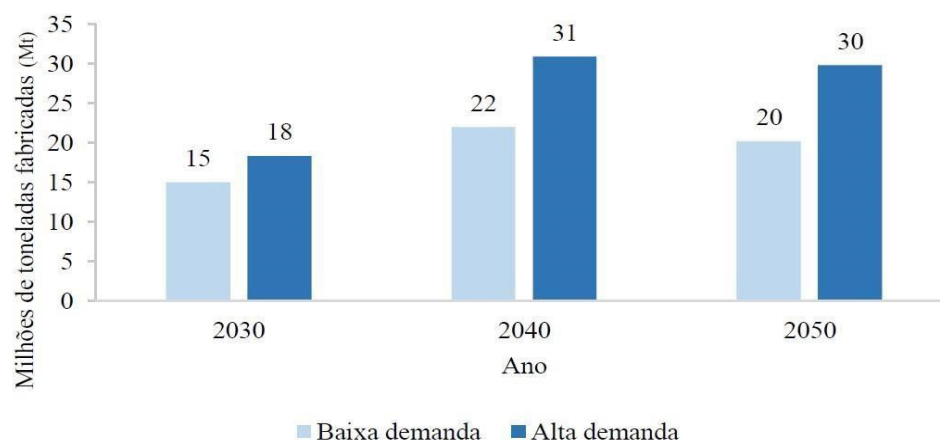
Entre 2018 e 2021, a produção de cimento Portland no Brasil apresentou variações notáveis. Em 2017, a produção totalizou 54,0 milhões de toneladas, tendo uma leve queda de 0,75% no ano seguinte. Em contrapartida, em 2019, a produção cresceu 5,61% em relação ao ano anterior. Comparando a produção entre 2019 e 2021, a fabricação de cimento no país teve um crescimento expressivo de 16,38%, o que resultou em um aumento de 22% nos últimos cinco anos.

Além disso, é relevante considerar a contribuição da região sul do Brasil para a produção nacional de cimento Portland. A produção dessa região corresponde a aproximadamente 16,1% do total nacional, ou seja, em 2021, a região produziu cerca de 10,5 milhões de toneladas de cimento. A cinza volante é a principal adição mineral utilizada na produção de cimento na região, tendo sido consumidas 1,42 milhões de toneladas desta adição em 2014, o que representa aproximadamente 13,5% da quantidade total de cimento produzido (ANM, 2018; SILVA, 2017).

Por conta do crescimento da indústria cimenteira e do uso de argila calcinada como adição, é possível projetar um aumento na produção de cimento na região Sul do Brasil, já que a argila é um material amplamente distribuído e disponível. Atualmente, a indústria cimenteira sulista é responsável por cerca de 16,1% da produção nacional de cimento. Levando em conta o crescimento previsto, espera-se que essa participação alcance 20% até o ano de 2050. Essa análise pode ser visualizada na Figura 3, que fornece dados e informações relacionadas a esse cenário específico.

É possível observar que há projeções de produção de cimento tanto em baixa demanda quanto em alta demanda ao longo dos anos. Em 2030, estima-se a produção de 15 milhões de toneladas em baixa demanda e 18 milhões de toneladas em alta demanda. Em 2040, prevê-se a produção de 22 milhões de toneladas em baixa demanda e 31 milhões de toneladas em alta demanda. Já em 2050, a previsão é de produção de 20 milhões de toneladas em baixa demanda e 30 milhões de toneladas em alta demanda. Através dos dados apresentados, fica evidente um aumento significativo na produção de cimento, o que ressalta a importância da substituição da cinza volante pela argila.

Figura 3 – Projeção de fabricação de cimento no Sul do Brasil



Fonte: Autores (2024)

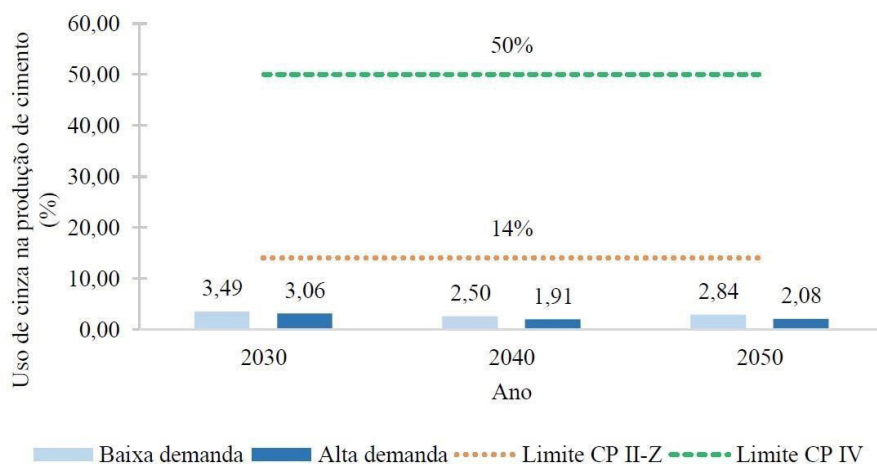
Desta forma, os dados de proporção encontrados nos documentos de referência foram coletados e os quantitativos correspondentes foram calculados. No entanto, foi observado que esses documentos possuíam uma aplicação limitada devido ao fato de terem sido elaborados antes do Acordo de Paris (2015). Como resultado, os cenários de previsão ultrapassaram os dados previstos e foram propostos novos percentuais de utilização (30, 40 e 50% acima dos estipulados) com o objetivo de mitigar os impactos da falta de adição causada pela não utilização das cinzas.

As projeções de consumo de pozolanas na produção de cimento não levam em consideração a interrupção do uso de cinza volante, por terem sido elaboradas anteriormente ao Acordo de Paris (2015). Neste sentido, é importante observar as projeções de uso de cinza volante para produção de cimento (Figura 4).

A análise dos dados apresentados na figura 8 revela que a cinza volante terá uma participação rela-

tivamente baixa na quantidade total de cimento a ser produzido até 2050, com o valor mais alto de uso da cinza na produção de cimento (baixa demanda, 2030) ainda sendo 10,51% menor que o limite de uso desse material no CP II-Z, e 46,51% menor que do CP IV. Essa constatação ressalta a importância de buscar uma alternativa para essa adição mineral, mesmo que sua produção não seja interrompida devido à previsão de baixa relevância na contribuição para a produção de cimento.

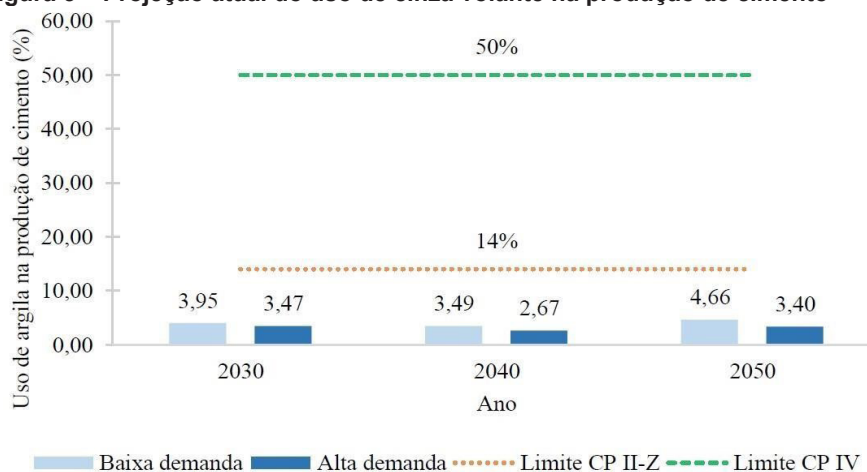
Figura 4 – Projeção atual do uso de cinza volante na produção de cimento



Fonte: Autores (2024)

Por outro lado, a Figura 5 oferece projeções específicas para o consumo de argila calcinada como alternativa à cinza volante. Esses dados são fundamentais para analisar o potencial de crescimento desse material e seu impacto na produção de cimento, considerando as necessidades da indústria e os objetivos de redução de emissões de gases de efeito estufa.

Figura 5 – Projeção atual do uso de cinza volante na produção de cimento



Fonte: Autores (2024)

Ao examinar os dados fornecidos na Figura 5, juntamente com os dados existentes quanto ao uso da cinza volante, pode-se observar uma variação relativamente baixa em relação ao uso da argila calcinada como adição mineral na produção de cimento. Ainda com este material existe um déficit em seu percentual de uso com relação ao limite estabelecido pela norma, com as diferenças entre o maior valor de produção e os limites sendo de 9,34% e 45,34% para CP II-Z e CP IV, respectivamente.

No entanto, essa baixa variação ocorre principalmente porque, neste cenário, a argila calcinada é

utilizada em conjunto com a cinza volante. Devido à coexistência das duas adições minerais, a utilização da argila calcinada pode não sofrer grandes flutuações durante o período considerado. Isso se deve ao fato de que a cinza volante continua sendo utilizada como adição predominante na indústria cimenteira da região Sul.

Devido à necessidade de substituição da cinza volante, que é amplamente utilizada como adição mineral na região Sul do Brasil, surge a demanda por uma alternativa adequada. A argila calcinada tem se destacado como a melhor opção, uma vez que esta adição não emite CO₂ no seu processo de reação química de calcinação. Assim, esperase aumento no uso desse material na fabricação de cimento.

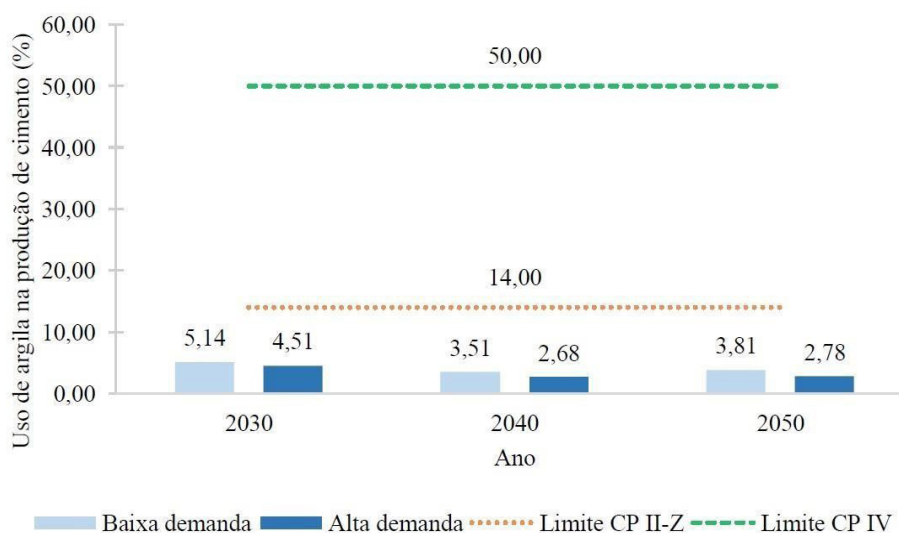
Em 2014, foram utilizadas cerca de 1,5 milhões de toneladas de argila para esse propósito. No entanto, as projeções indicam um aumento significativo nessa demanda, estimando que até 2030 esse número chegue a 3,4 milhões de toneladas, mais que o dobro da quantidade consumida em 2014. Para 2050, é previsto um consumo de 5,4 milhões de toneladas, o que representa mais que o triplo do valor registrado em 2014 (SNIC, 2019). A partir dos dados coletados com relação a produção de cimento, uso de adições minerais, e projeções de consumo do cimento Portland no Brasil, faz-se possível a elaboração de cenários de majoração de 30, 40 e 50% no uso da argila calcinada na indústria cimenteira, já que a ausência de dados específicos sobre o uso de outra adição mineral após a interrupção da cinza volante torna necessário estabelecer cenários para estimar o consumo de argila calcinada.

Diante disto, é relevante destacar que nas projeções analisadas, o uso da cinza volante é mantido de forma contínua até o ano de 2040, quando sua produção será interrompida. Devido a esse encerramento, as projeções consideradas não incluem um aumento no consumo de cinza volante, mantendo sua contribuição atual na indústria cimenteira em 2,7%.

4 RESULTADOS

No cenário 1, foi considerado um aumento de 30% no consumo de argila para a produção de cimento. As projeções anteriores estimavam um consumo de 3,4 milhões de toneladas de argila para 2030, 4,4 milhões de toneladas para 2040 e 5,4 milhões de toneladas para 2050. Ao comparar esses dados com as projeções de produção de cimento em baixa e alta demanda, obtiveram-se os seguintes resultados, conforme demonstrado na Figura 6.

Figura 6 – Cenário 1: Projeção de 30% a mais no consumo de argila calcinada



Fonte: Autores (2024)

A análise dos dados apresentados na Figura 6 revela uma contribuição significativa da argila calcinada na produção de cimento. Além disso, é importante destacar que, até 2040, a cinza volante ainda será produzida. Assim, em 2030 os valores previstos de consumo de argila calcinada a serem utilizados ainda se somam com a cinza volante, resultando na contribuição total de 7,84% em baixa demanda de cimento e 7,21% em alta demanda.

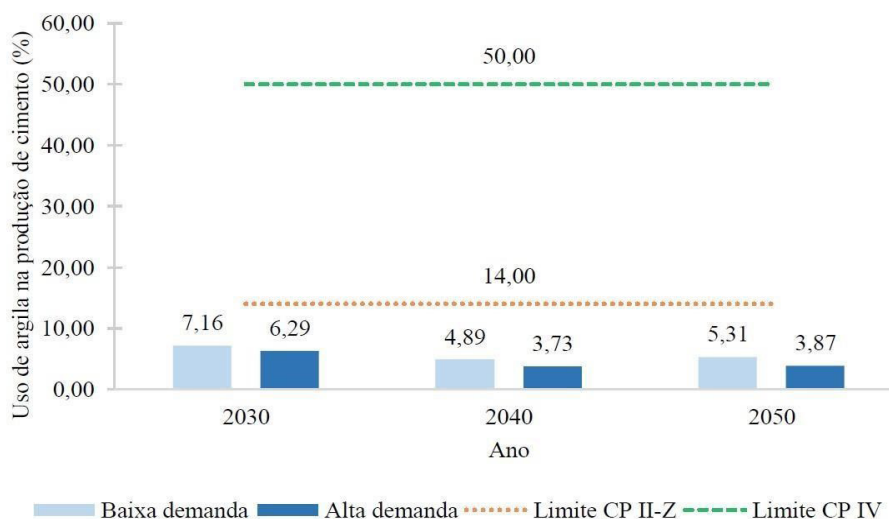
Levando em consideração os maiores valores de uso indicados para este cenário (baixa demanda em 2030, tendo argila calcinada e cinza volante disponíveis), é possível realizar uma comparação com limite de uso de material pozolânico para produção do cimento Portland, estabelecido pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Existe um déficit de 6,16% e 42,16% do material pozolânico para o CP II-Z e CP IV, o que ainda indica a possibilidade de buscar maiores implementações de pozolanas no cimento.

Já no cenário 2, o aumento do consumo de argila a ser considerado foi de 40%, conforme Figura 7. A possibilidade de uso de 40 % conversa de forma direta com os aspectos trazidos pelas normativas brasileiras para aplicação de pozolanas em cimento CP IV de até 50 %. É importante salientar que, apesar de a normativa permitir uma ampla faixa de utilização de materiais cimentícios suplementares, os aspectos relatados na norma, quanto aos desempenhos mecânicos, aspectos físicos e químicos devem ser atendidos para que a durabilidade e o uso sejam propícios de realização.

Atrelando os dados oferecidos pela Figura 7 com a produção contínua de cinza volante, em 2030 a contribuição das pozolanas na indústria cimenteira totalizaria em 9,86% em baixa demanda de cimento e 8,99 % em alta demanda. Assim, neste cenário, a diferença entre o uso do material pozolânico e seus limites estabelecidos por norma é de 4,14% para o CP II-Z e de 40,14% para o CP IV, no ano de 2030 em baixa demanda, unindo valores de cinza e argila.

Já no cenário 3, foi considerado aumento de 50% no consumo de argila, conforme indicado na Figura 8.

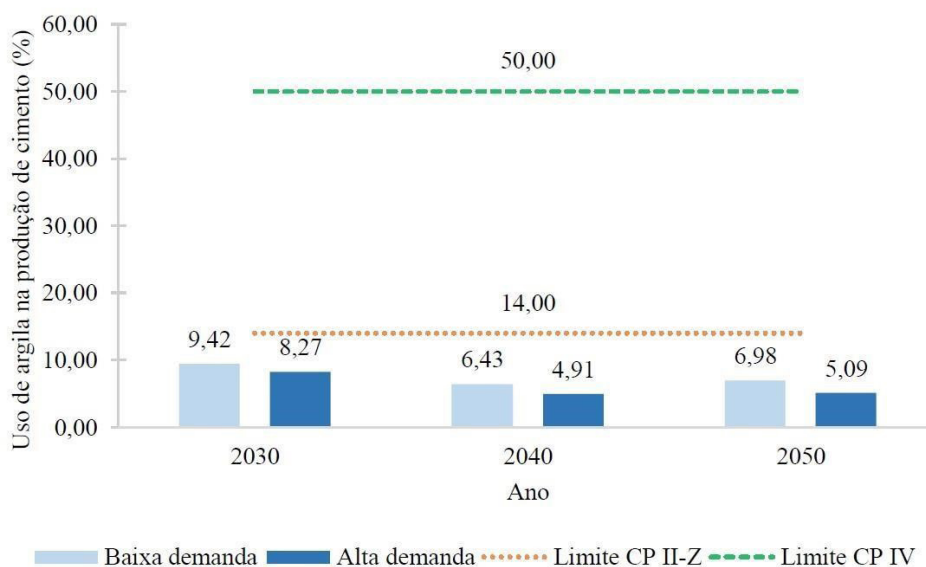
Figura 7 – Cenário 2: Projeção de 40% a mais no consumo de argila calcinada



Fonte: Autores (2024)

Já no cenário 3, foi considerado aumento de 50% no consumo de argila, conforme indicado na Figura 8.

Figura 8 – Projeção de 50% a mais no consumo de argila calcinada



Fonte: Autores (2024)

Ao analisar de forma integrada os dados apresentados nas Figuras 6, 7 e 8 é possível observar uma tendência de aumento na produção total de cimento ao longo dos anos. No entanto, esse crescimento acarreta uma diminuição percentual no uso de argila calcinada. Essa redução ocorre devido ao fato de que o aumento no consumo de cimento supera o aumento projetado no consumo de argila calcinada.

Ainda com o aumento no consumo de materiais pozolânicos, mesmo com o uso conjunto de argila e cinza volante, como é o caso de 2030 (período anterior ao encerramento dos serviços de termoeletricas que utilizam carvão), seu uso não supera os limites estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018), indicando a necessidade de ampliar o uso de argila calcinada como adição mineral no cimento.

No entanto, é importante ressaltar que, mesmo com a redução percentual, os números absolutos indicam um aumento real no consumo de argila calcinada. Isso significa que, embora a proporção possa diminuir, ainda haverá uma demanda significativa e crescente por esse material na produção de cimento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo analisou a disponibilidade de materiais pozolânicos como adição mineral em cimentos Portland, considerando o encerramento das operações de termoeletricas e consequentemente, a indisponibilidade da cinza volante. A ausência desse material causa grande impacto na indústria cimenteira, demandando a busca por alternativas adequadas. Nesse contexto, a argila calcinada surge como uma opção viável, pois é amplamente distribuída e disponível na região.

No entanto, mesmo com maior disponibilidade de argila calcinada, observou-se que seu uso pode enfrentar dificuldades para acompanhar o crescimento na produção de cimento ao longo do tempo. Mesmo considerando um aumento de 50% nas projeções de consumo desse material na produção de cimento Portland, ainda é possível identificar um déficit de material pozolânico quando comparado aos limites de uso estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

Esses resultados evidenciam a necessidade de estratégias adicionais para suprir a demanda de adição mineral na fabricação de cimento, levando em conta a sustentabilidade e conformidade com as regulamentações estabelecidas. É fundamental explorar alternativas promissoras e desenvolver solu-

ções inovadoras que garantam a continuidade e eficiência da produção de cimento, sem comprometer os padrões de qualidade e impactando positivamente o meio ambiente.

Mediante a necessidade de mais estudos acerca do tema, sugere-se realizar estudos futuros sobre o aumento do uso de outras pozolanas artificiais ou o desenvolvimento de novas adições minerais para reduzir os impactos ambientais adversos na produção de cimento Portland. Essas pesquisas podem oferecer informações importantes e soluções inovadoras para substituir o clínquer e diminuir as emissões de gases de efeito estufa. Isso ajudará a promover práticas mais sustentáveis na indústria da construção civil, buscando alternativas mais amigáveis ao meio ambiente.

6 REFERÊNCIAS

AKHLAGHI, O.; AYTAS, T.; TATLI, B.; SEZER, D.; HODAEI, A.; FAVIER, A.; SCRIVENER, K.; MENCELOGLU, Y.; AKBULUT, O. Modified poly(carboxylate ether)- based superplasticizer for enhanced flowability of calcined clay-limestone-gypsum blended Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 101, p.114 – 122, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018. 16 p.

BRASIL. **Lei nº 14.299, de 05 de janeiro de 2022**. Institui subvenção econômica às concessionárias do serviço público de distribuição de energia elétrica [...]. Brasília, DF, [2022].

IGLINSKI, B.; BUCZKOWSKI, R. Development of cement industry in Poland e History, current state, ecological aspects. A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 702720, 2017.

SILVA, M. G. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2021**. São Paulo, 2021.

VISEDO, G.; PECCHIO, M.; BATTAGIN, A. F. Estratégias para mitigação do CO₂ na cadeia produtiva do concreto. **Concreto e Construções**, v. 95, p. 26-32, 2019.