



MARIANA VILAS BOAS DE OLIVEIRA

**A INDÚSTRIA DO CIMENTO: PROCESSO PRODUTIVO, IMPACTOS E
PERSPECTIVAS**

**LAVRAS - MG
2023**

MARIANA VILAS BOAS DE OLIVEIRA

**A INDÚSTRIA DO CIMENTO: PROCESSO PRODUTIVO, IMPACTOS E
PERSPECTIVAS**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como partedas exigências do Curso
de Engenharia Química, para obtenção do
título de Bacharel.

Prof.^a Dr.^a. Natália Maira Braga Oliveira
Orientadora

**LAVRAS – MG
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Oliveira, Mariana Vilas Boas de.

A indústria do cimento : Processo produtivo, impactos e
perspectivas / Mariana Vilas Boas de Oliveira. - 2023.

63 p. : il.

Orientador(a): Natália Maira Braga Oliveira.

TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2023.
Bibliografia.

1. Cimento Portland. 2. Clínquer. 3. Impactos socioambientais.
I. Oliveira, Natália Maira Braga. II. Título.

MARIANA VILAS BOAS DE OLIVEIRA

**A INDÚSTRIA DO CIMENTO: PROCESSO PRODUTIVO, IMPACTOS E
PERSPECTIVAS**

**THE CEMENT INDUSTRY: PRODUCTION PROCESS, IMPACTS AND
PERSPECTIVES**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como partedas exigências do Curso
de Engenharia Química, para obtenção do
título de Bacharel.

APROVADA em 07 de março de 2023
Dr^a. Natália Maira Braga Oliveira UFLA
Dr. Tiago José Pires de Oliveira UFLA
Dr. Irineu Petri Júnior UFLA

Prof.^a Dr^a. Natália Maira Braga Oliveira
Orientadora

**LAVRAS – MG
2023**

*Ao meu pai, Gilberto, que lutou comigo por
este e vários outros sonhos.*

*O tempo que tivemos juntos foi menor do que
esperava, mas foi suficiente.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade da vida.

Aos meus pais, Gilberto (*in memoriam*) e Maria Inês, pelo suporte e acolhimento nos meus dias mais sombrios. Ao meu irmão Lucas pelo companheirismo e amizade e à minha irmã Camila pela paciência durante esses anos de graduação.

Agradeço também à Cacau, Luciana, Bia, Lucas e Felipe. Sem a amizade de vocês seria muito mais difícil enfrentar todos os obstáculos. Vamos juntos, sempre!

À minha orientadora, Natalia Maira Braga Oliveira, uma professora excepcional que me guiou com muita gentileza durante a escrita do trabalho. Sua empatia e delicadeza fizeram a diferença na minha formação.

Por fim, agradeço a todos os profissionais e colegas da UFLA que cruzaram meu caminho. Cada um contribuiu, seja pelo amor ou pela dor, para a minha formação pessoal e profissional.

Sou e serei para sempre muito grata!

- *Quem estará nas trincheiras ao teu lado?*
- *E isso importa?*
- *Mais do que a própria guerra.*

Ernest Hemingway

RESUMO

O cimento é caracterizado por suas propriedades aglutinantes de endurecimento sob ação da água e diversas aplicações de acordo com as diferentes proporções de aditivos utilizados em sua composição. O mercado deste produto demonstra crescimento constante desde 2019, com crescente demanda para o processo produtivo e soluções energéticas menos poluidoras ao meio ambiente com menores impactos às comunidades que vivem aos arredores das instalações fabris. Nesse contexto, o presente trabalho tem como intuito o levantamento de toda a cadeia produtiva do cimento Portland, da extração das matérias-primas ao produto, contemplando principalmente os impactos socioambientais. Para tal, foi realizada pesquisa bibliográfica em livros, artigos, teses e outras publicações técnico-científicas. O trabalho foi dividido em três etapas: na primeira, realizou-se um levantamento do histórico e panorama econômico produtivo; posteriormente, foi abordada toda a cadeia produtiva do cimento com enfoque nos principais impactos ambientais, sociais e na saúde dos trabalhadores e das comunidades localizadas próximas as unidades de produção; por fim, foram propostas soluções para mitigação dos impactos, bem como perspectivas futuras para o setor. Como resultado, foi possível concluir que medidas de segurança do trabalho devem ser revistas, principalmente nos processos de extração de calcário, principal matéria-prima para fabricação de cimento Portland. Além disso, o aprimoramento e implementação de tecnologias que reduzam as emissões de CO₂, tais como: substituição parcial do clínquer, utilização de combustíveis alternativos, coprocessamento de resíduos e captura e armazenamento de carbono, devem ser priorizadas, pois caso contrário não será possível alcançar as metas propostas pelos acordos de mitigação de impactos firmados mundialmente.

Palavras-chave: Cimento Portland. Clínquer. Impactos socioambientais. Sustentabilidade. Coprocessamento de resíduos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cimento em pó (a) e rochas das ilhas de Portland (b).....	14
Figura 2 – Instalações da Companhia de Cimento Portland Perus, São Paulo.....	15
Figura 3 – Fábrica Santa Helena do grupo Votorantim em 1936.....	16
Figura 4 – Principais aditivos utilizados na produção de cimento Portland.....	17
Figura 5 – Nomenclatura do cimento Portland na embalagem.....	19
Figura 6 – Aplicações dos diferentes tipos de cimento Portland.....	20
Figura 7 – Histórico de produção e consumo nacionais de cimento.....	22
Figura 8 – Histórico de produção e consumo regionais de cimento Portland.....	23
Figura 9 – Histórico de importação e exportação nacionais de cimento Portland.....	24
Figura 10 – Silo de homogeneização fluidizado.....	26
Figura 11 – Silo de homogeneização com misturador mecânico.....	26
Figura 12 – Ilustração do processo produtivo de cimento Portland.....	28
Figura 13 – Forno rotativo de clinquerização.....	29
Figura 14 – Resfriador externo de clínquer do tipo grelha.....	30
Figura 15 – Clínquer nodular.....	32
Figura 16 – Poeira decorrente da extração de calcário na cidade de Nobres, Mato Grosso.....	38
Figura 17 - Acidentes de trabalho relacionados às atividades extrativas de calcário no Brasil...38	38
Figura 18 – Óbitos relacionados às atividades extrativas de calcário no Brasil.....	39
Figura 19 – Acidentes de trabalho relacionados à produção de cimento Portland no Brasil...39	39
Figura 20 – Óbitos relacionados à produção direta de cimento Portland no Brasil.....	40
Figura 21 – Distribuição de combustíveis utilizados nas indústrias brasileiras na fabricação de cimento Portland entre os anos de 2008 e 2017.....	42
Figura 22 – Ciclo de Rankine para gases quentes da torre de ciclones.....	46
Figura 23 – Processo simplificado de captura de carbono de fornos rotativos.....	48

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i>
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i>
GEE	Gases de efeito estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFC	International Finance Corporation
PL	Projeto de Lei
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
TEP	Tonelada equivalente de petróleo
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato de tricálcio
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato de tricálcio
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato de dicálcio
CaCO_3	Carbonato de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio
CO_2	Dióxido de carbono
H_2O	Água
MgCO_3	Carbonato de magnésio
MgO	Óxido de magnésio
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferro aluminato tetracálcico
SO_3	Trióxido de enxofre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	CIMENTO	14
2.1	Histórico	14
2.2	Características e propriedades.....	16
2.3	Classificação de cimentos	18
2.4	Aplicações	19
3	ASPECTOS ECONÔMICOS	21
3.1	Cenário mundial.....	21
3.2	Cenário nacional.....	21
3.3	Impactos da pandemia	24
4	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	25
4.1	Cadeia produtiva	25
4.1	Calcário	30
4.2	Argila.....	31
4.3	Minério de ferro	31
4.4	Clínquer	32
4.5	Aditivos	34
4.5.1	Sulfato de cálcio.....	34
4.5.3	Pozolana	35
4.5.4	Escória de alto forno	36
5	IMPACTOS DA INDÚSTRIA DO CIMENTO.....	37
5.1	Na saúde	37
5.2	Sociais.....	40
5.3	Ambientais	41
6	REDUÇÃO DOS IMPACTOS DA INDÚSTRIA DO CIMENTO	43

6.1	Substituição parcial do clínquer	43
6.2	Combustíveis alternativos e coprocessamento.....	44
6.3	Eficiência energética	45
6.4	Captura e armazenamento de carbono.....	47
6.5	ESG.....	48
7	PERSPECTIVAS FUTURAS PARA O SETOR.....	51
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

O cimento é uma mistura utilizada em construções desde as civilizações gregas e romanas. Contudo, a mistura, na forma de pó, só foi patenteado em 1824 (BATTAGIN, 2009). No Brasil, a primeira fábrica de cimento foi inaugurada em 1924 no estado de São Paulo, mas somente a partir do governo de Juscelino Kubitschek que a demanda por cimento Portland no país passou a ser impulsionada (GARBELINE, 2020).

Diferentes tipos de cimento podem ser obtidos a partir da combinação de aditivos em diversas proporções, principalmente gesso, *filler* de calcário, pozolanas e escória de alto forno, conferindo-os variadas aplicações (GAUTO; ROSA, 2011). O setor é responsável por mais de 18 mil empregos diretos no Brasil, em 91 fábricas espalhadas pelo país, com destaque para as regiões Sudeste e Nordeste (GUIMARÃES, 2022). Mundialmente, a produção se estende por 192 países, concentrando principalmente no continente asiático, que possui sete dos maiores produtores de cimento do mundo (WINSKELL, 2021).

Mesmo na pandemia, em 2020, o setor cimenteiro cresceu 10,6% em relação à 2019. Por ser o segundo produto mais consumido do mundo, atrás somente da água potável, sua produção é considerada como essencial e não foi interrompida durante o *lockdown* (SNIC, 2021).

A cadeia produtiva do cimento Portland se inicia na extração de matérias-primas como calcário, argilas e minério de ferro. Os blocos de calcário e argilas extraídos das jazidas são encaminhados para britagem, sendo reduzidos e estocados em silos, posteriormente são transportados às fábricas, passando por etapas de moagem juntamente com os demais insumos. A mistura das matérias-primas, denominada farinha, segue para calcinação em torres de ciclones e, posteriormente, é encaminhada para o forno rotativo, onde passa por diversas reações químicas responsáveis por transformá-la em clínquer, um material nodular poroso que, após resfriado, é moído com diferentes aditivos, dando origem aos diversos tipos de cimento Portland (ITAMBÉ, 2015).

A atividade produtiva de cimento Portland é considerada uma das mais poluidoras do mundo, responsável por mais de 7% das emissões globais de CO₂. Os impactos abrangem poluição do solo, ar, contaminação de recursos hídricos, poluição sonora e diversos problemas de saúde para trabalhadores diretos e comunidades que vivem ao entorno das instalações fabris (CARVALHO; MESQUITA; MELO, 2016). O número de acidentes de trabalho relacionados às atividades produtivas também é expressivo, principalmente na extração do calcário.

O uso extensivo das terras e os impactos ambientais locais também geram conflitos com comunidades que residem nas proximidades das fábricas. Muitos moradores relatam danos em suas residências, ocasionados pelos tremores de terra, além de problemas de saúde vinculados à poluição do ar por emissões de particulados pelas fábricas (GARBELINE, 2020).

Visando a redução dos impactos sociais e ambientais, principalmente a mitigação de emissões de CO₂ até o ano de 2050, diversas metas já foram propostas de acordo com a agenda internacional *Environmental, Social and Governance* (ESG). A implementação das práticas ESG consiste em ações sustentadas pelo tripé ambiental, social e econômico, e são responsáveis por guiar as organizações à redução da pegada de carbono (diminuição das emissões de gases de efeito estufa – GEE), desenvolvimento de novas tecnologias, investimentos em combustíveis alternativos e foco em eficiência energética, através da responsabilização ambiental, respeito pelas comunidades e transparência das atividades produtivas (COSTA; FERREZIN, 2021).

Com o objetivo de abordar toda a cadeia produtiva, os impactos socioambientais e na saúde dos trabalhadores acarretados pela produção nacional de cimento Portland, o trabalho foi dividido em três etapas. A primeira consistiu no levantamento do histórico e panoramas econômicos produtivos, de forma geral, tanto nacionais quanto globais, buscando compreender a dinâmica econômica do setor ao longo dos anos. Posteriormente, foi abordada toda a cadeia produtiva do cimento com foco nos principais impactos ambientais, sociais e na saúde das comunidades localizadas próximas às unidades de produção. Por fim, foram discutidas soluções para mitigação dos impactos, bem como perspectivas futuras para o setor.

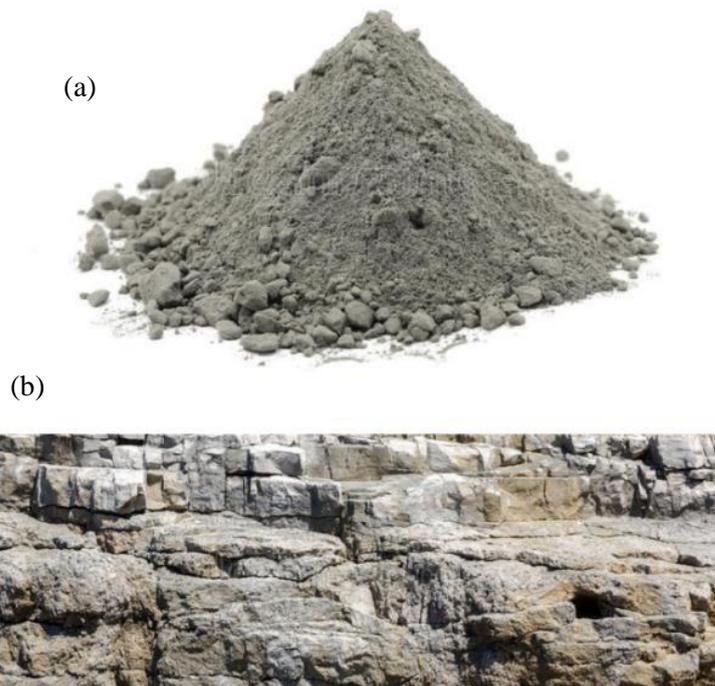
2 CIMENTO

2.1 Histórico

O uso do cimento estende-se há mais de 4500 anos. As grandes construções gregas e romanas já utilizavam ligas de gesso calcinado e solos de origem vulcânica, obtendo misturas com propriedades de endurecimento sob ação da água (BATTAGIN, 2009). Na época, os materiais de melhor qualidade eram encontrados na região de *Pozzuoli*, junto ao vulcão Vesúvio na Itália, sendo denominados como pozolânicos. Como apresentado por Leite e Câmara (2013), cabe ressaltar que essa nomenclatura continuou sendo utilizada, abrangendo todos os materiais cuja composição possui sílica reativa com propriedades de endurecimento sob ação da água.

Em 1818, o francês Vicat, baseado em estudos de 1756 do inglês John Smeaton, obteve uma mistura de alta resistência ao calcinar calcários moles e argilosos, sendo considerado, portanto, o inventor do cimento artificial. O cimento, como pó fino, foi patenteado pelo construtor inglês Joseph Aspdin em 1824, sob o nome de cimento Portland, pois apresentava cor e demais propriedades físicas semelhantes às rochas das ilhas britânicas de Portland, conforme ilustrado pela Figura 1 (BATTAGIN, 2009).

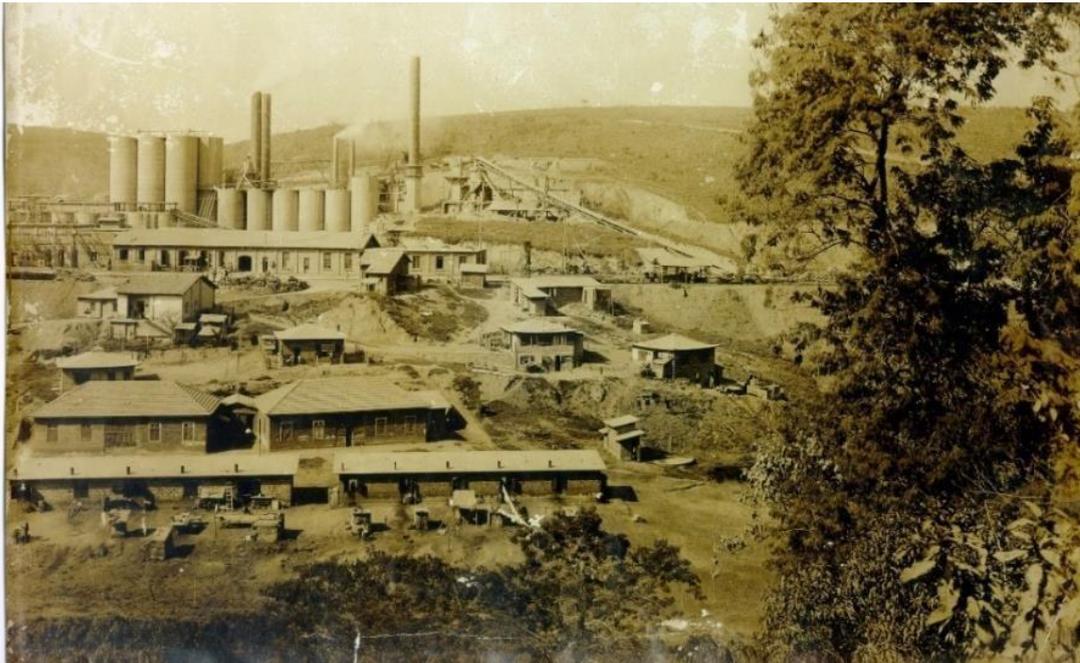
Figura 1 – Cimento em pó (a) e rochas das ilhas de Portland (b).



Fonte: Adaptado de Dreamstime (2023).

No Brasil, a produção expressiva de cimento Portland teve início em 1924 com a Companhia Brasileira de Cimento Portland, com fábrica situada na cidade de Perus no estado de São Paulo (Figura 2). Até então, todo o cimento era importado, mas a partir de 1926 a produção nacional cresceu gradativamente, reduzindo a necessidade de importação de cimento (BATTAGIN, 2009).

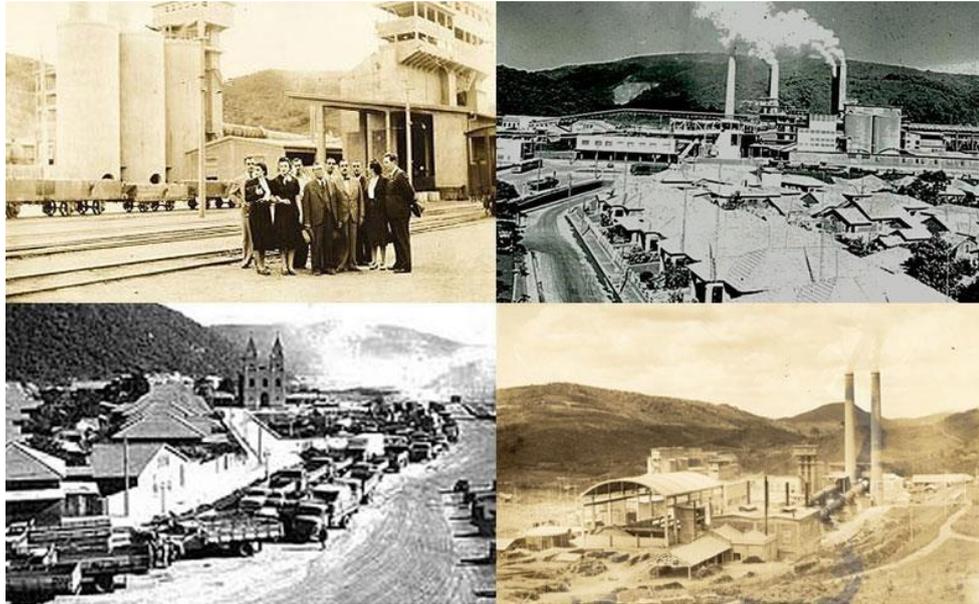
Figura 2 – Instalações da Companhia de Cimento Portland Perus, São Paulo.



Fonte: Camargo (2014).

Em 1933, a segunda fábrica de cimento, Santa Helena (Figura 3), localizada na cidade de Votorantim em São Paulo, foi inaugurada no Brasil, sendo pertencente ao grupo Votorantim. A demanda por cimento passou a ser impulsionada pela construção de barragens, usinas, estradas e diversas outras grandes construções, principalmente durante o governo de Juscelino Kubitschek que, durante seu mandato, através do Plano de Metas, foi responsável por diversos marcos da industrialização do país (GARBELINE, 2020).

Figura 3 – Fábrica Santa Helena do grupo Votorantim em 1936.



Fonte: Mapa da obra (2016).

2.2 Características e propriedades

O cimento Portland, popularmente chamado de cimento, trata-se de um pó fino com propriedades aglutinantes, que endurece sob a ação da água e que, após endurecido, mesmo que seja novamente submetido à água, não se decompõe mais (PUGLIESI, 2018).

Basicamente, o cimento é constituído por uma mistura de silicatos e aluminatos de cálcio, $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (silicato tricálcio), $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (aluminato tricálcio) e $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (silicato dicálcio), em variadas proporções, contendo baixas concentrações de magnésio e ferro. Além disso, a partir da adição de substâncias específicas, o cimento pode ter sua composição modificada, conferindo a ele diferentes características de resistência, tempo de pega, durabilidade e impermeabilidade (GAUTO; ROSA, 2011).

A resistência mecânica à compressão é uma das propriedades mais importantes do concreto como material estrutural. A NBR 7215 regulamenta os ensaios de compressão para os corpos de prova cilíndricos de concreto. Tal resistência mecânica é aferida aos 28 dias de idade do corpo de prova (ABNT, 2019). De acordo com o tipo de cimento Portland, níveis mínimos de resistência à compressão são esperados, e podem ser divididos em classes de 25, 32, 40 e ARI. A resistência química a certos compostos, como sulfatos, também é investigada através de metodologias descritas na NBR 13583 e, caso atenda aos requisitos, é acrescentado o sufixo RS à nomenclatura do cimento. O poder de hidratação do cimento também é regulamentado, e quando apresenta baixo calor de hidratação, recebe o sufixo BC (ABNT, 2018).

O tempo de pega é o período em que o cimento consegue ser trabalhado sem que endureça ao entrar em contato direto com água, tal característica é atribuída à hidratação do aluminato tricálcio, um dos compostos do clínquer (LIMA, 2019). Já a durabilidade se refere à capacidade dos materiais em manter suas características e funções iniciais ao longo do tempo, e pode ser influenciada por fatores físicos, mecânicos ou químicos. Para o cimento, a durabilidade e impermeabilidade estão relacionadas com a porosidade dos produtos cimentícios. Dessa forma, aditivos que possuem capacidade preenchedora de vazios (poros) são utilizados (MENDONÇA, 2019).

Os aditivos mais comumente utilizados na fabricação do cimento são o gesso, *filler* de calcário, pozolanas e escória de alto forno, ilustrados na Figura 4 (GAUTO; ROSA, 2011). O gesso, ou sulfato de cálcio diidratado, é adicionado com o objetivo de estender o tempo de pega, de modo que sem ele o cimento endureceria rapidamente, impossibilitando seu uso. Já o *filler* de calcário assegura uma maior trabalhabilidade ao cimento, diminuindo a presença de vazios na pasta, melhorando o acabamento. Os materiais pozolânicos, naturais ou artificiais, contêm sílica reativa, ou seja, em presença de água reagem com hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formando compostos com propriedades ligantes, conferindo a característica de “cola” do cimento (LIMA, 2019). Por fim, a escória de alto forno, subproduto das indústrias siderúrgicas, incrementam as propriedades de resistência à compressão mecânica do produto, de forma muito semelhante ao clínquer (SALES; ALFERES FILHO, 2014).

Figura 4 – Principais aditivos utilizados na produção de cimento Portland.



Escória de alto forno granulada *Filler* de calcário

Fonte: Adaptado de Dreamstime (2023).

2.3 Classificação de cimentos

De acordo com a ABCP (2018), no Brasil, são regulamentados cinco tipos básicos de cimento e três tipos especiais. A classificação depende dos aditivos e suas proporções empregadas na fabricação do cimento. De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), os cimentos Portland são identificados por suas siglas, seguida de sua classe de resistência à compressão e, quando resistentes à sulfatos ou possuir baixo calor de hidratação, recebem os sufixos RS e BC, respectivamente.

A NBR 16697 é responsável por definir os requisitos do cimento Portland. A norma regulamenta os teores de material carbonático para aditivos, atividade do material pozolânico, limites de SO_3 , requisitos físicos e mecânicos do cimento, além das características específicas para os cimentos dos tipos especiais, como resistência a sulfatos, calor de hidratação e brancura (ABNT, 2018). Os diferentes tipos de cimento Portland, com suas respectivas composições, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação de cimentos Portland.

Tipo de cimento Portland	Subtipo	Sigla	Resistência (MPa)	Composição aditivos (% em massa)			
				Gesso	Filler de calcário	Pozolana	Escória de alto forno
Comum	Sem adição	CP - I		95 - 100	0 - 5	0 - 5	0 - 5
	Com adições	CP - I S		90 - 94	6 - 10	-	-
	Com escória de alto forno	CP - II E	25, 32 ou 40	51 - 94	0 - 15	-	6 - 34
Composto	Com material pozolânico	CP - II Z		71 - 94	0 - 15	6 - 14	-
	Com <i>filler</i> de calcário	CP - II F		75 - 89	11 - 25	-	-
Alto forno		CP - III		25 - 65	0 - 10	-	35 - 75
Pozolânico		CP - IV	25 ou 32	45 - 85	0 - 10	15 - 50	-
Alta resistência inicial		CP - V ARI	> 34	90 - 100	0 - 10	-	-
Branco		CPB	40	75 - 100	0 - 25	-	-

Fonte: Adaptado de ABNT (2018).

Devido à importância da classificação da resistência dos cimentos, essa informação é encontrada na nomenclatura descrita na própria embalagem do produto, conforme exemplificada na Figura 5 (ABNT, 2018).

Figura 5 – Nomenclatura do cimento Portland na embalagem.



Fonte: Adaptado de Marinho Cimentos (2023).

2.4 Aplicações

A depender das características físicas atribuídas pelos diferentes aditivos, cada tipo de cimento possui algumas aplicações específicas (Figura 6). O cimento do tipo CP - I possui alto custo e menor resistência. De acordo com Arnaldo Forti Battagin, gerente de laboratório da ABCP (2018), o CP - I se encontra ausente no mercado. O tipo CP - II pode ser utilizado como argamassa de revestimentos, assentamento de tijolos e blocos, pavimentos, pisos industriais etc. O CP - III é comumente utilizado como concreto armado, com função estrutural, artefatos de cimento curados por aspersão de água, argamassa e concreto para meios agressivos, como água do mar e esgotos. O tipo CP - IV é utilizado para os mesmos fins que o CP - III, porém o primeiro, pozolânico, é aplicado para obras menores, enquanto o de alto forno (segundo) é usado para obras grandes como barragens, usinas e estradas. O tipo CP - V possui uso priorizado em concreto armado curado por aspersão de água ou produto químico. Por fim, o CPB é mais utilizado para fins estéticos como, por exemplo, argamassa de rejuntamento de azulejos e ladrilhos (ABRAHÃO, 2015).

Figura 6 – Aplicações dos diferentes tipos de cimento Portland.



Fonte: Adaptado de Getty Images (2023).

3 ASPECTOS ECONÔMICOS

Aproximadamente 1200 empregos diretos, indiretos e induzidos são criados para cada milhão de tonelada de cimento Portland fabricado no Brasil, isso corresponde a uma arrecadação líquida de R\$ 3 bilhões em impostos (GUIMARÃES, 2022). Atualmente, o Brasil possui 91 fábricas produtoras de cimento presentes em 80 municípios, gerando mais de 18 mil empregos diretos (SNIC, 2023a).

3.1 Cenário mundial

De acordo com o *Global Concrete Report* (WINSKELL, 2021), em 2020, a produção mundial de concreto, principal produto do cimento Portland, se estendeu por 192 países. O volume de cimento consumido por cada país é determinado pelo seu nível de atividade de construção. Geralmente, países em desenvolvimento utilizam quantidades superiores de cimento se comparados àqueles mais desenvolvidos. Dessa forma, a intensidade da utilização de cimento pode ser considerada um indicador do grau de desenvolvimento de uma nação.

Ainda de acordo com esse relatório, dos 10 países maiores produtores de cimento, sete são asiáticos, comprovando a relação com o desenvolvimento econômico mencionada. A China lidera a produção mundial de cimento, com 28% da fatia do mercado global. Com 6,1% da produção mundial de cimento, a Índia é a segunda colocada no *ranking*, seguida pelos Estados Unidos (1,8%), Vietnã e Irã (1,4% cada), Indonésia (1,2%), Brasil (1,1%), Paquistão e Japão (0,9% cada) e Nigéria (0,6%).

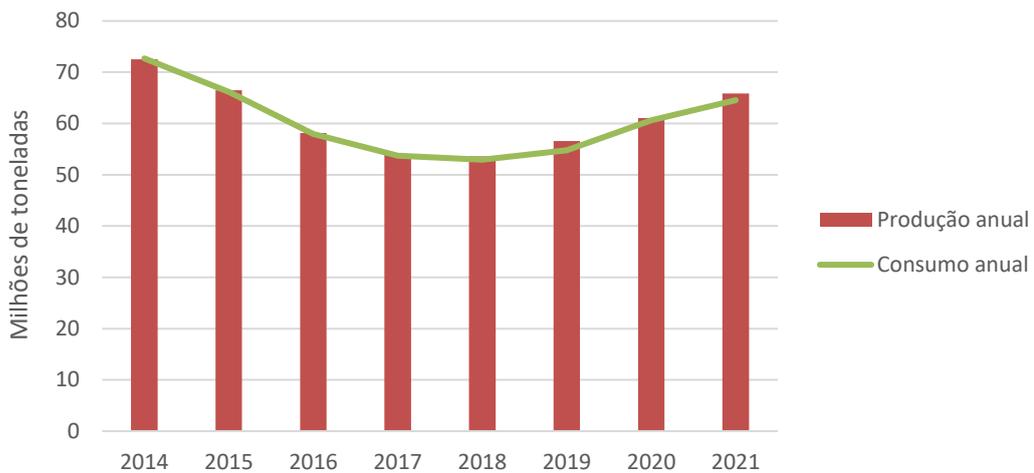
O relatório global (WINSKELL, 2021) também anuncia a companhia China National Building Material, fundada em 1984 na China, como a maior produtora global de cimento, com atividade produtiva equivalente a 1,1% da produção mundial. O México, apesar de deter apenas 0,5% da produção mundial de cimento, abriga a segunda maior companhia cimenteira, Cemex, localizada na Cidade do México, que possui mais de 1300 instalações ao redor do globo. Contudo, a companhia presente em mais países é a suíça Holcim, com instalações em mais de 60 países (HOLCIM, 2022).

3.2 Cenário nacional

De acordo com o Relatório de Produção Regional (SNIC, 2022c), o Brasil produziu 65,9 milhões de toneladas de cimento Portland em 2021, um aumento de 7,9% com relação a 2020.

Após quatro anos em queda, a partir de 2019, a produção nacional de cimento vem aumentando em ritmo considerável, bem como o consumo. Ou seja, trata-se de um mercado de demanda interna, com a produção acompanhando a demanda de consumo, como mostra a Figura 7, que apresenta o histórico de produção e consumo nacionais de cimento Portland, em milhões de toneladas, entre os anos de 2014 e 2021.

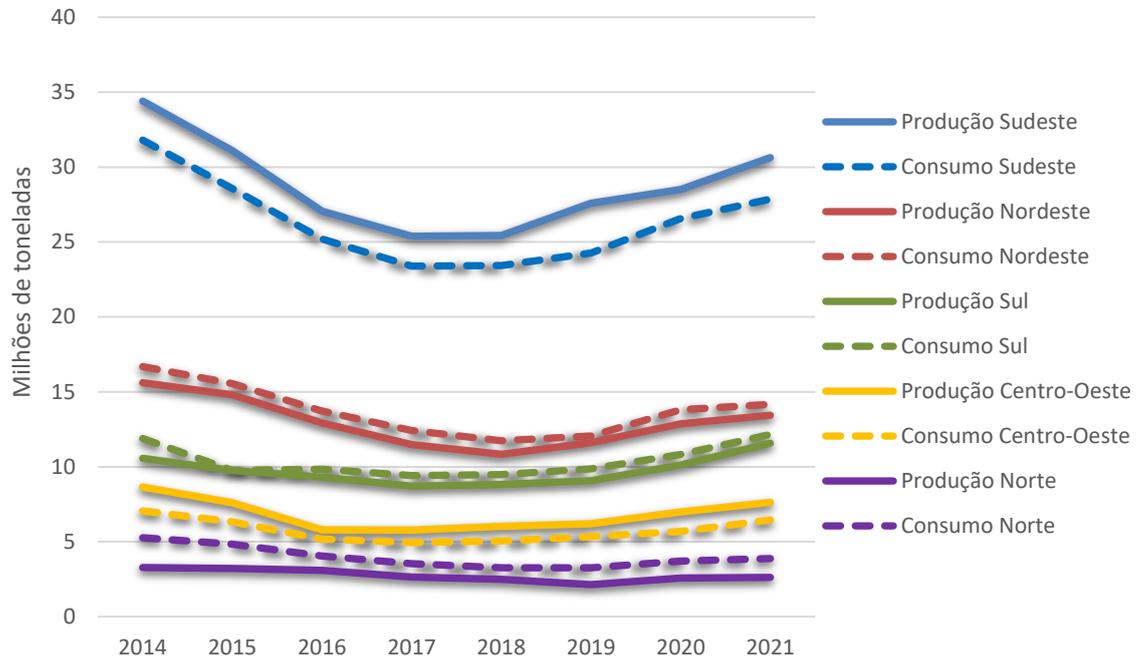
Figura 7 – Histórico de produção e consumo nacionais de cimento.



Fonte: Adaptado de SNIC (2022a).

As regiões Sudeste e Nordeste recebem destaque, representando 46,5 e 20,4%, respectivamente, da produção nacional. O consumo de cimento por região também foi liderado pelo Sudeste e Nordeste com 43,2 e 21,9%, respectivamente, conforme o Relatório de Consumo Regional (SNIC, 2022b). A Figura 8 apresenta o comportamento de produção e consumo de cimento Portland das regiões brasileiras entre os anos de 2014 e 2021 em milhões de toneladas.

Figura 8 – Histórico de produção e consumo regionais de cimento Portland.

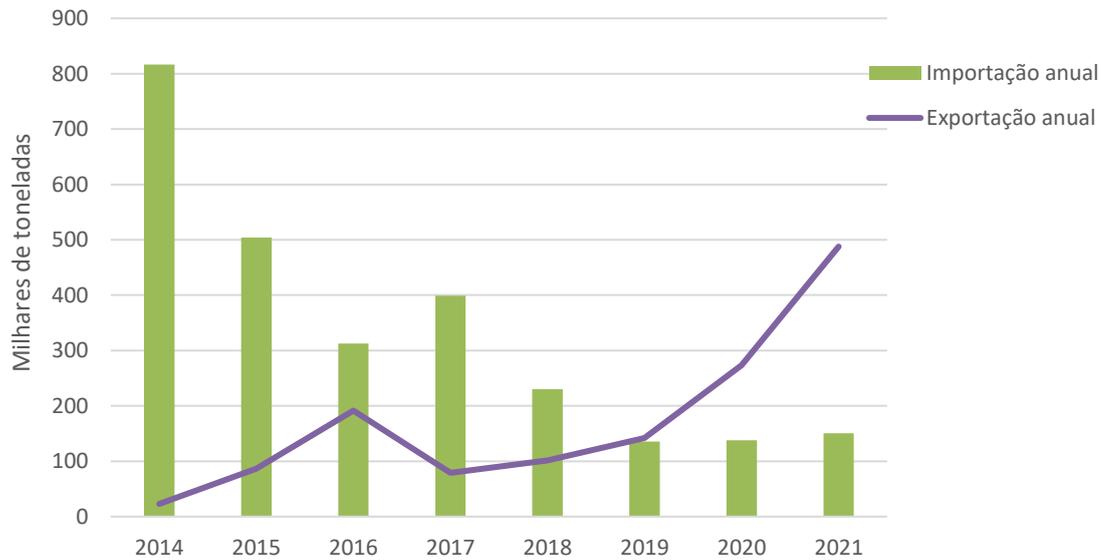


Fonte: Adaptado de SNIC (2022a).

Em Minas Gerais, os grupos CSN e Intercement recebem destaque pela produção no setor. Até o terceiro trimestre de 2022, a receita líquida da CSN foi de R\$ 1,6 bilhão (CSN, 2022). A Intercement fechou o mesmo período com R\$ 2,79 bilhões de receita líquida (INTERCEMENT, 2022). Após a compra da companhia LafargeHolcim em 2021 pela CSN, os dois maiores grupos cimenteiros de Minas Gerais, somam ao todo seis instalações localizadas no estado (SNIC, 2022a).

Com relação às importações, o cimento Portland branco (CPB) é o principal produto de origem estrangeira do setor. Os principais países de origem são Turquia, Espanha, México e Egito, respectivamente, conforme o Relatório Anual de 2021 (SNIC, 2022a). Ainda de acordo com esse mesmo relatório, o Brasil exporta cimento Portland principalmente para Bolívia e Paraguai, totalizando mais de 480 mil toneladas de cimento exportadas em 2021. A Figura 9 apresenta dados de importação e exportação nacionais de cimento Portland, em toneladas, entre os anos de 2014 e 2021.

Figura 9 – Histórico de importação e exportação nacionais de cimento Portland.



Fonte: Adaptado de SNIC (2022a).

3.3 Impactos da pandemia

O cimento, por se tratar de um produto extremamente necessário e consumido em todo o mundo, na maioria dos países, sua produção é considerada como essencial e não foi interrompida durante a pandemia. Apesar disso, o setor passou por turbulências como corte de mão de obra, redução de investimentos em operações não-críticas e suspensão de pagamento de dividendos (IFC, 2020).

No Brasil, ao final do ano de 2020, o setor da indústria cimenteira cresceu 10,6% em relação à 2019. Com o *lockdown* e a população em isolamento social, as residências se tornaram também um local de trabalho e lazer. Dessa forma, a busca por materiais de construção civil foi impulsionada, fechando o ano de 2020 com um aumento de 10,8% desse seguimento, de acordo com o Relatório Anual de 2020 (SNIC, 2021). Em 2020, a maior cimenteira do Brasil, Votorantim, apresentou aumento de 8% nas vendas de cimento em relação ao ano anterior, alta equivalente a 29% em sua receita líquida global (VEROTTI, 2021).

De acordo com Paulo Camillo Penna, presidente do SNIC, durante a pandemia, apesar das empresas comerciais e indústrias realizarem reformas importantes que não seriam possíveis durante condições normais de operação, a área da construção imobiliária representa 65% da demanda por cimento. Cabe ressaltar que até 2011, o setor de infraestrutura nacional era responsável por cerca de 25% do consumo do produto e, em 2022, apenas 10% (ABCP, 2022).

4 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

O processo produtivo do cimento Portland se inicia na extração das matérias-primas carbonáticas e argilosas. Geralmente, as fábricas de cimento são localizadas próximas às jazidas, o que facilita a logística de transporte dos insumos. As operações de produção fundamentais englobam britagem, moagem, calcinação, sinterização, homogeneização, embalagem e transporte (LIMA *et al.*, 2022). Tais etapas podem apresentar variações em função dos diferentes tipos de cimento Portland produzidos e especificações operacionais de cada unidade de produção (SHIMADA, 1999).

4.1 Cadeia produtiva

De acordo com Shreve e Brink Jr. (1997), dois tipos de matérias-primas são necessários para a produção de cimento Portland, uma rica em carbonato de cálcio e outra rica em sílica, como giz de calcário e argila, respectivamente. Tais matérias-primas, após passarem pelo processo de calcinação, formam um produto intermediário denominado clínquer, o qual pode ser obtido por processo úmido ou seco. No primeiro tipo, o teor de umidade varia entre 28 e 43% em peso, porque água é acrescentada na moagem juntamente com a matéria-prima, formando uma pasta. Já na via seca, rota mais empregada, não é utilizada água na moagem, resultando um pó fino, chamado de farinha ou cru, com teores de umidade inferiores à 1% em peso (CARPIO *et al.*, 2005).

A primeira etapa da fabricação do cimento consiste no transporte dos blocos de calcário e argila extraídos das jazidas às centrais de britagem, onde serão reduzidos em dimensões de aproximadamente 2,5 cm, depositados em pilhas e, posteriormente, transportados para a fábrica e carregados para as pilhas de pré-homogeneização. Propriedades como granulometria e composição química do calcário são controladas e amostras são coletadas para ajustes na matéria-prima. Todos os demais insumos (minério de ferro, filito, quartzito etc.), assim como o calcário e argila, são pesados em balanças de alta precisão e encaminhados a um moinho de rolos. O produto dessa moagem, chamado de farinha ou cru está pronto para ser armazenado em silos que garantem a homogeneização da mistura (ITAMBÉ, 2015).

A maior parte das fábricas de cimento utilizam silos fluidizados, como ilustrado na Figura 10, injetando ar comprimido na parte inferior do equipamento, para promover a homogeneização da farinha estocada.

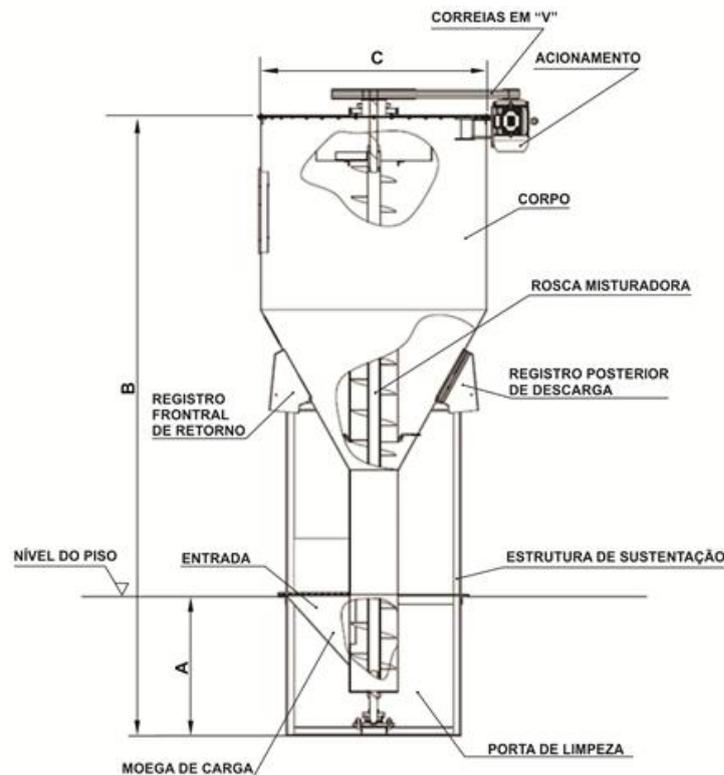
Figura 10 – Silo de homogeneização fluidizado.



Fonte: Claudius Peters (2020).

Contudo, fábricas mais modernas fazem uso de silos gravitacionais, com o intuito de reduzir o consumo de energia elétrica. Os silos gravitacionais com misturadores mecânicos, como representado na Figura 11, possuem formato de cone invertido na base, de forma que todo o material estocado é afunilado e misturado antes de seguir para as etapas de aquecimento (OLIVEIRA, 2017).

Figura 11 – Silo de homogeneização com misturador mecânico.

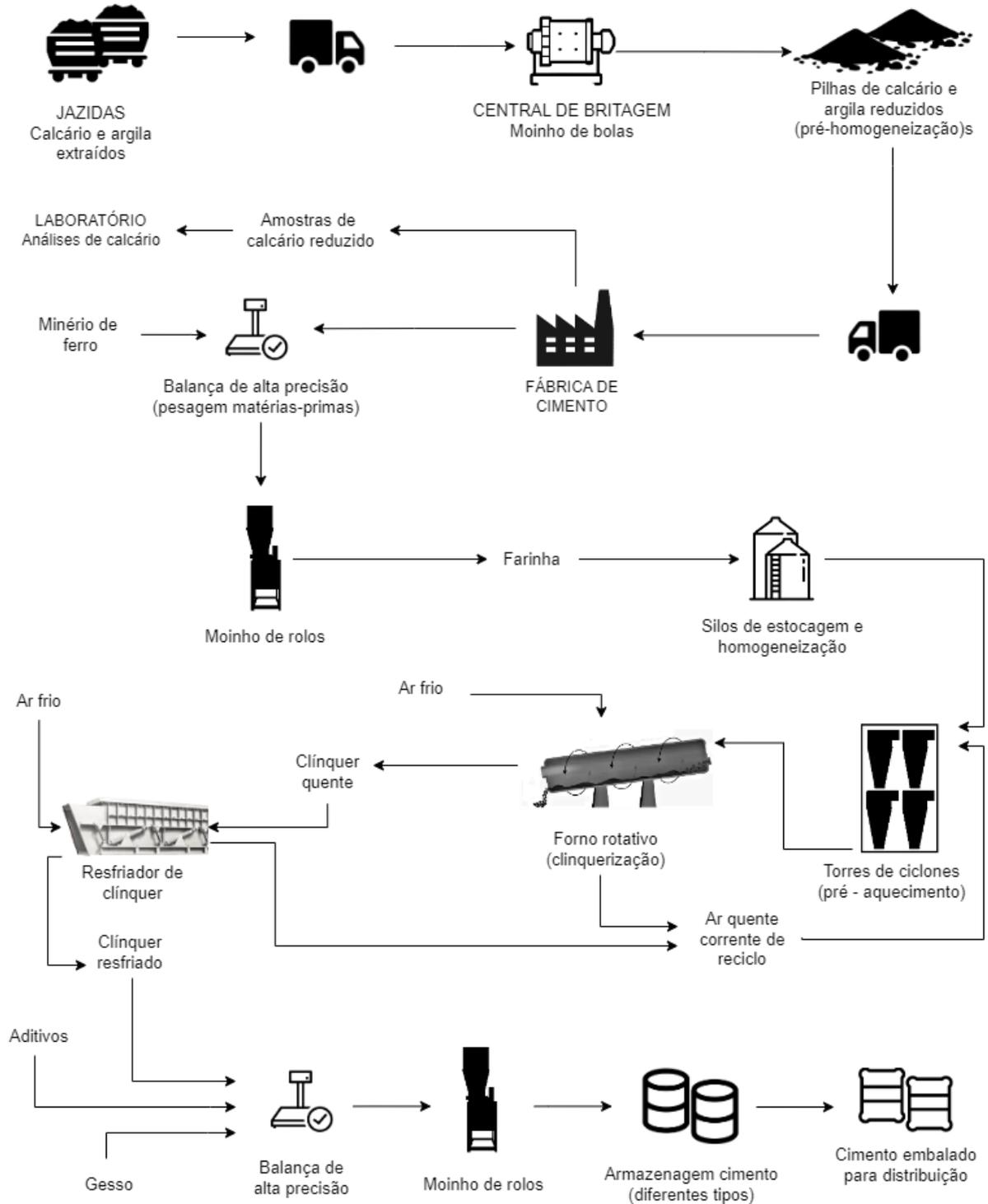


Fonte: Artabas (2023).

Saindo do silo, com o intuito de facilitar as reações que ocorrem no forno, a farinha segue para uma torre de ciclones passando por pré-aquecimento. Essa etapa é a primeira do processo de clínquerização. Ao final da torre de ciclones até à entrada do forno rotativo, ocorre a pré- calcinação, responsável por descarbonatar a mistura a temperaturas próximas de 900 °C. A reação de descarbonatação promove uma expansão de volume nas partículas devido à liberação de CO_2 , mudando o estado físico da mistura para uma fase semilíquida, que se torna mais intensa, atingindo o estado líquido, à medida em que escoar pelo forno rotativo, etapa denominada de sinterização que ocorre a aproximadamente 1300 °C (LIMA, 2019).

Todos os aditivos utilizados e o clínquer produzido são pesados e transportados aos moinhos, para redução granulométrica e homogeneização. Nessa etapa, são definidos os diferentes tipos de cimento, que variam de acordo com a quantidade de cada aditivo em sua composição. Após a mistura atingir tamanho de partículas e homogeneidade desejados, o cimento segue para embalagem e armazenagem, estando pronto para distribuição (ITAMBÉ, 2015). A Figura 12 ilustra resumidamente o processo de produção do cimento Portland.

Figura 12 – Ilustração do processo produtivo de cimento Portland.



Fonte: Da autora (2023).

Características de comprimento, diâmetro e rotação dos fornos rotativos, dependem do volume de produção de cada indústria. Contudo, de forma geral, os fornos são cilíndricos e são instalados horizontalmente com um ângulo de inclinação que varia entre 2 e 4% do seu comprimento (Figura 13). Os rolamentos responsáveis pela movimentação axial do forno

operam em baixa rotação, entre 0,5 e 4,5 rpm. Na parte mais elevada do forno, fica localizada a entrada da farinha, saindo como clínquer na extremidade oposta (PAULA, 2009).

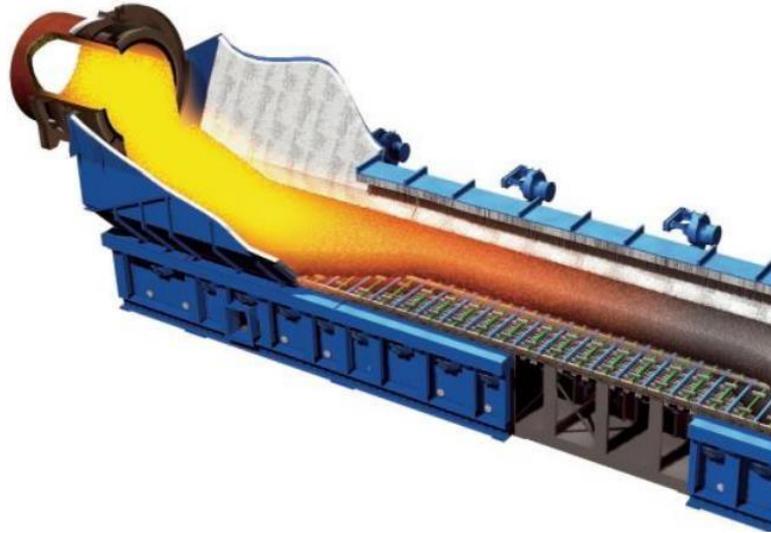
Figura 13 – Forno rotativo de clínquerização.



Fonte: Thomáz (s.d).

Ao sair do forno, o clínquer é direcionado à resfriadores externos (trocadores de calor) responsáveis por reduzir sua temperatura até 150 °C. O calor liberado nessa etapa é recuperado e direcionado como corrente de reciclo para o forno rotativo ou para o pré-calcinador (FERNANDES *et al.*, 2011). Os resfriadores de grelha são mais utilizados e, nesse sistema, o clínquer quente, que sai do forno rotativo, cai em uma grade fixa que, através do movimento de pratos que deslizam sobre a grade, é deslocado ao longo do equipamento (Figura 14). Ar frio é injetado através da grade de resfriamento e é recuperado como ar quente de reciclo na zona de recuperação do resfriador. A eficiência térmica média de um resfriador deve ser acima de 70% (PAULA, 2009).

Figura 14 – Resfriador externo de clínquer do tipo grelha.



Fonte: Paula (2009).

4.1 Calcário

O calcário, principal matéria-prima do cimento, é constituído predominantemente de carbonato de cálcio (CaCO_3), mas é comum a presença de impurezas como magnésio, silício, alumínio e ferro (GAUTO; ROSA, 2011). A rocha calcária é extraída de jazidas através de processos explosivos (QUIRINO *et al.*, 2018). Devido à importância dessa matéria-prima para o setor, a disponibilidade local de jazidas de calcário é um fator determinante para a instalação das indústrias de cimento (BRASIL, 2022a).

Segundo dados da ANM (2023), existem 278 empresas responsáveis pela extração de calcário em todo o território nacional, sendo 55 delas localizadas no estado de Minas Gerais. O Sudeste é a região brasileira que mais se destaca na produção bruta de calcário, seguido pelo Centro-Oeste, Sul, Nordeste e Norte, respectivamente. Em 2020, a produção bruta nacional foi de 130,87 milhões de toneladas de calcário. No mesmo ano, o consumo brasileiro de calcário bruto foi de 181,20 milhões de toneladas, destinadas à produção de cimento Portland, produção de óxido de cálcio, correção de pH dos solos, fabricação de vidro e uso como pedra ornamental (BRASIL, 2022a).

No ano de 2021, o setor extrativo de calcário bruto movimentou R\$ 681,57 milhões. O estado de Minas Gerais contribuiu com 18% do montante total, seguido pelo Mato Grosso (14%) e Tocantins (10,6%). Ainda no mesmo ano, foram investidos R\$ 16,8 milhões em pesquisas relacionadas às atividades extrativas do calcário. Os estados que mais investiram foram Minas Gerais, Pará e Goiás, respectivamente (ANM, 2023).

4.2 Argila

Argilas são materiais advindos de minerais de natureza argilosa, normalmente possui cor avermelhada quando queimadas. Geralmente, elas apresentam granulometria fina, conferindo alto grau de trabalhabilidade (CABRAL *et al.*, 2008). A argila é responsável por prover quantidades de silício, óxidos de alumínio e ferro à pasta do cimento (GAUTO; ROSA, 2011). Em 2020, a produção bruta nacional de argila foi de 37,19 milhões de toneladas, destinadas à produção de cimento Portland, fabricação de telhas e tijolos, dentre outros produtos da construção civil. A região brasileira que mais se destaca na produção de argila é o Sudeste, seguido pelo Sul, Nordeste, Norte e Centro-Oeste, respectivamente (BRASIL, 2022a).

De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro Interativo publicado pela ANM (2023), atualmente, há 1337 registros de empresas que possuem como atividade produtiva a extração de argilas. O estado de São Paulo lidera com 209 empresas registradas, seguido por Minas Gerais (189) e Rio Grande do Sul (142).

Em 2021, a produção bruta de argilas acumulou R\$ 547,09 milhões. O estado brasileiro que mais se destacou foi São Paulo, representando 42,25% do total faturado, em seguida, Santa Catarina (14,5%) e Minas Gerais (7,2%). No mesmo ano, foram investidos R\$ 16,4 milhões em pesquisas na extração de argilas. Os estados que mais investiram foram Bahia, São Paulo e Minas Gerais (ANM, 2023).

4.3 Minério de ferro

O ferro é um metal utilizado em diversos segmentos industriais como construção civil, setor automotivo e de máquinas, engenharia etc. Sua importância se baseia principalmente no fato de ser matéria-prima essencial para fabricação do aço (BRASIL, 2021). A função do minério de ferro na indústria do cimento é ajustar as quantidades de óxidos exigidos na composição do cimento durante seu processo de fabricação, ou seja, possui ação corretiva e, por isso, é utilizado em pequenas quantidades (RODRIGUES; FONSECA, 2018).

O Brasil possui 33,7 bilhões de toneladas de minério de ferro em suas reservas, concentradas principalmente em Minas Gerais e Pará, que detêm 81,6 e 10,6%, respectivamente, das reservas brasileiras medidas (BRASIL, 2021). Em 2020, no Brasil, a produção média de ferro foi 388 milhões de toneladas, a menor medida desde 2017. Apesar disso, o país manteve sua colocação de vice no *ranking* mundial de produtores de minério de ferro com 16,2% da produção mundial, atrás somente da Austrália que lidera com 37,7% do

setor (BRASIL, 2022b).

No Brasil, em 2021, foram contabilizadas 67 empresas relacionadas à extração de minério de ferro, sendo 53 localizadas em Minas Gerais. O faturamento acumulado, no mesmo ano, foi de R\$ 1,22 bilhão, com 77% do valor representado pelo estado de Minas Gerais e 20% pelo Pará. Ainda no mesmo ano, foram investidos R\$ 448,18 milhões em pesquisas focadas na extração de ferro (ANM, 2023).

4.4 Clínquer

O clínquer é um intermediário do processo produtivo que, quando submetido à moagem com gesso e aditivos, forma o cimento (CARPIO *et al.*, 2005). O clínquer, em sua composição, possui quantidades entre 85 e 95% em massa de óxido de cálcio e demais quantidades de argila e corretores de teor de óxidos, como minério de ferro (QUIRINO *et al.*, 2018).

Sua formação se dá no interior de fornos rotativos, através de reações termoquímicas, transformando a farinha, material particulado sólido, em fase líquida que, quando resfriada, forma nódulos maciços e porosos (Figura 15). Esse processo é chamado de clinquerização e pode ser dividido em etapas de acordo com as reações químicas que ocorrem ao longo do comprimento do forno rotativo (MARINGOLO, 2001).

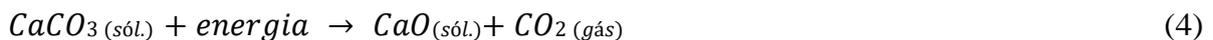
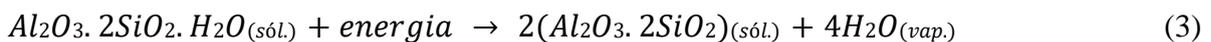
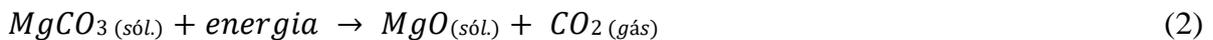
Figura 15 – Clínquer nodular.



Fonte: Cemnet (2020).

A primeira etapa é de pré-aquecimento. A farinha, geralmente, é aquecida antes mesmo de entrar no forno rotativo. O aquecimento ocorre na torre de ciclones, normalmente de 4 a 6 estágios (MARINGOLO, 2001), em que há evaporação da água livre, decomposição parcial do carbonato de magnésio, desidroxilação das argilas e descarbonatação parcial do calcário (GAUTO; ROSA, 2011). Nessa primeira etapa, a farinha atinge temperaturas próximas à 800 °C, devido ao contato íntimo com os gases quentes de reciclo advindos do próprio forno rotativo ou do resfriador externo de clínquer (CARPIO *et al.*, 2005).

A evaporação da água livre inicia-se em temperaturas abaixo de 100 °C. Ao fornecer energia na forma de calor, a água líquida passa para o estado vapor (Equação 1). Já a decomposição do $MgCO_3$, presente no calcário, em MgO e CO_2 , é iniciada em temperaturas próximas a 340 °C (Equação 2). A desidroxilação das argilas tem início em 550 °C e consiste na perda de água da argila dando origem a silicatos de alumínio reativo (Equação 3). Por fim, a descarbonatação parcial do calcário ocorre a partir de 800 °C, sendo $CaCO_3$ transformado em CaO com liberação de CO_2 , de acordo com a Equação 4 (GAUTO; ROSA, 2011).



O restante de $CaCO_3$ passa por decomposição na zona de calcinação, segunda etapa da clínquerização, já dentro do forno rotativo. Para fornos com pré-calcinadores acoplados à entrada, somente 6% da descarbonatação ocorre dentro do forno, na ausência de pré-calcinadores, o forno fica responsável por descarbonatar cerca de 60% do $CaCO_3$ (CARPIO *et al.*, 2005).

A terceira etapa consiste no contínuo aquecimento do material, até temperaturas próximas a 1300 °C, na chamada zona de transição do forno rotativo, preparando-o para a etapa de queima. Posteriormente, na quarta etapa, há mudança de estado físico do material, tornando-se viscoso devido ao processo de sinterização a 1450 °C (CARPIO *et al.*, 2005).

Por fim, o material em estado líquido é resfriado até sua completa solidificação. Tal

procedimento deve ser realizado rapidamente, a fim de evitar a formação de cristais grandes, acarretando em um cimento de baixa qualidade. A primeira etapa do resfriamento ocorre ainda dentro do forno, reduzindo a temperatura de 1450 °C para 1300 °C. Em seguida, fora do forno, em um resfriador independente, o clínquer é resfriado para temperaturas entre 100 e 200 °C. Após ser completamente resfriado, é encaminhado para a etapa de moagem (CARPIO *et al.*, 2005).

O clínquer, como intermediário, possui em sua composição 75% de silicatos, sendo os principais: $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (principal responsável pelas características de resistência mecânica do clínquer) e $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. É encontrado também, em menores proporções, quantidades de aluminatos, como $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ e $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$.

4.5 Aditivos

A NBR 11768 (ABNT, 2011) define aditivos como produtos adicionados em pequenas quantidades ao cimento Portland, não ultrapassando 5% da massa total de cimento. São responsáveis por modificar propriedades físico-químicas do produto, de forma a melhorá-lo ou adequá-lo para diferentes aplicações. Tais aditivos são classificados de acordo com sua função principal, sendo divididos em: plastificantes, superplastificantes, incorporadores de ar, aceleradores e retardadores de pega e aceleradores de resistência (CASTRO; QUARCIONI, 2013).

4.5.1 Sulfato de cálcio

A gipsita, ou sulfato de cálcio, após passar por um processo de calcinação em temperaturas próximas a 160 °C, desidrata-se, originando um produto comumente chamado de gesso, que está presente como aditivo em todos os tipos de cimento (BRASIL, 2020a). É adicionada na etapa de moagem final e é responsável por proporcionar um aumento do tempo de pega da pasta de cimento. A quantidade de gesso utilizada é aproximadamente 3% em massa do total de clínquer (CARPIO *et al.*, 2005).

A indústria de cimento gera a principal demanda por gipsita. A China se destaca como maior produtora mundial desse insumo com uma fatia de 32% da exploração global. O Brasil, maior representante da América do Sul, detém 2,2% da produção total. O estado de Pernambuco é o maior produtor nacional, responsável por mais de 90% da produção brasileira de gipsita (BRASIL, 2020a).

Em 2021, foram contabilizadas 37 empresas responsáveis pela produção bruta de gipsita, acumulando R\$ 43,98 milhões. O estado de Pernambuco se destaca com 31 empresas do setor. No mesmo ano, foram investidos aproximadamente R\$ 580 mil em pesquisas na exploração desse mineral (ANM, 2023). A Mineradora São Jorge, localizada no sertão do Pernambuco, é a maior produtora nacional de gipsita, com produção anual superior a 800 mil toneladas (MINERADORA SÃO JORGE, 2023).

4.5.2 *Filler* de calcário

O *filler* de calcário é um pó fino originado das rochas calcárias, como o próprio calcário, sendo diferente deste na granulometria. A depender de sua composição química, pode ser classificado como dolomítico ou calcítico. O primeiro tipo é aplicado na correção de acidez dos solos. Já o *filler* de calcário calcítico é utilizado na indústria de cimento Portland, adicionado após a moagem do clínquer, com o objetivo de auxiliar no preenchimento de vazios da pasta de cimento, conferindo um acabamento mais homogêneo, além de possibilitar uma melhor hidratação do cimento contribuindo para o aumento da resistência à compressão (MELO *et al.*, 2005).

De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), todo material carbonático utilizado como aditivo deve possuir pelo menos 75% de CaCO_3 . O *filler* de calcário deve ser cuidadosamente incorporado como aditivo porque pode impactar negativamente no processo de moagem, causando aglomerações e recobrando internamente o moinho, prejudicando a fluidez do cimento (GCP, 2020).

4.5.3 Pozolana

Materiais pozolânicos, ou pozolanas, são aqueles ricos em sílica, advindos de rochas vulcânicas ou de material orgânico fossilizado. Também podem ser obtidos industrialmente pela queima de argilas, entre 550 e 900 °C, ou ainda pela queima do carvão mineral em termoelétricas. Além disso, a pozolana reduz a permeabilidade do cimento, através do preenchimento dos poros da pasta de cimento (GAUTO; ROSA, 2011).

A adição de pozolanas modifica a composição química do cimento, aumentando o teor de água na mistura, devido à alta porosidade interna e elevada área superficial específica desses materiais (ABRÃO, 2019). São utilizadas como aditivo ao cimento Portland, porque possibilita a utilização do cimento em meios agressivos, como água do mar e esgotos e também garante

uma melhor trabalhabilidade à pasta (GAUTO; ROSA, 2011).

4.5.4 Escória de alto forno

A escória de alto forno é um coproduto das siderúrgicas, sendo constituída majoritariamente por sílica, cálcio, alumínio, magnésio e oxigênio, porém pode mudar de composição química, de acordo com o tipo de combustível utilizado e impurezas do coque, empregado na fabricação do ferro gusa, intermediário para obtenção do aço. Sua formação ocorre no interior dos fornos, a partir da fusão do minério de ferro e gotejamento de ferro gusa líquido em temperaturas próximas a 1200 °C. Ao ser utilizada no cimento, a escória de alto forno proporciona uma melhor durabilidade e resistência ao produto (NEHRING *et al.*, 2021).

5 IMPACTOS DA INDÚSTRIA DO CIMENTO

O processo produtivo do cimento é considerado uma das atividades mais poluidoras do mundo, com setor sendo responsável por aproximadamente 7% do total de CO₂ emitido globalmente (DIAS *et al.*, 2022). Os impactos abrangem da extração das matérias-primas à expedição do produto causando poluição do solo, ar, contaminação de águas, poluição sonora e diversos problemas de saúde para aqueles que trabalham ou habitam nas proximidades das fábricas (CARVALHO, 2008).

5.1 Na saúde

Os impactos na saúde humana são desencadeados pela exposição aos materiais poluentes produzidos pelas indústrias do cimento. O contato pode ser pelo ar, através da inalação ou interação direta com materiais particulados, pelo solo mediante contato dérmico com poeira contaminada, pela ingestão de corpos d'água poluídos e através da cadeia alimentar, por meio do consumo de alimentos contaminados (CARVALHO, 2008).

Ainda na extração das matérias-primas para a fabricação do cimento Portland, trabalhadores e moradores locais são expostos à diversos riscos. De acordo com a Norma Regulamentadora N° 04 (BRASIL, 2022d), as atividades de extração de minerais não-metálicos apresentam risco de grau 4, classificação máxima na escala de riscos para os profissionais do setor. A exposição à poeira (Figura 16) pode provocar irritações nos olhos e garganta, incluindo redução da capacidade pulmonar dos trabalhadores e comunidades próximas às jazidas. O uso de materiais explosivos e detonadores também podem ocasionar perda de audição, além de acidentes, colocando a integridade física dos colaboradores em risco (AMORIM *et al.*, 2016).

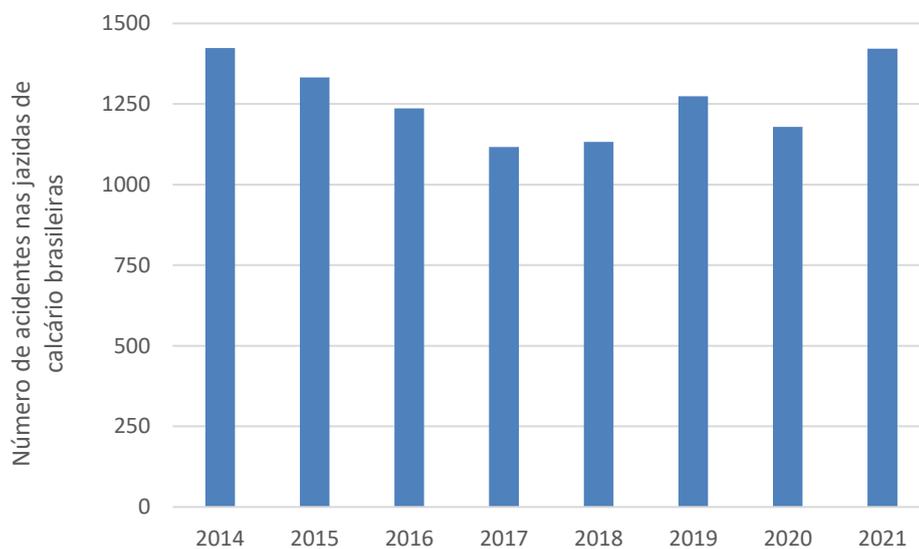
Figura 16 – Poeira decorrente da extração de calcário na cidade de Nobres, Mato Grosso.



Fonte: MT Econômico (2019).

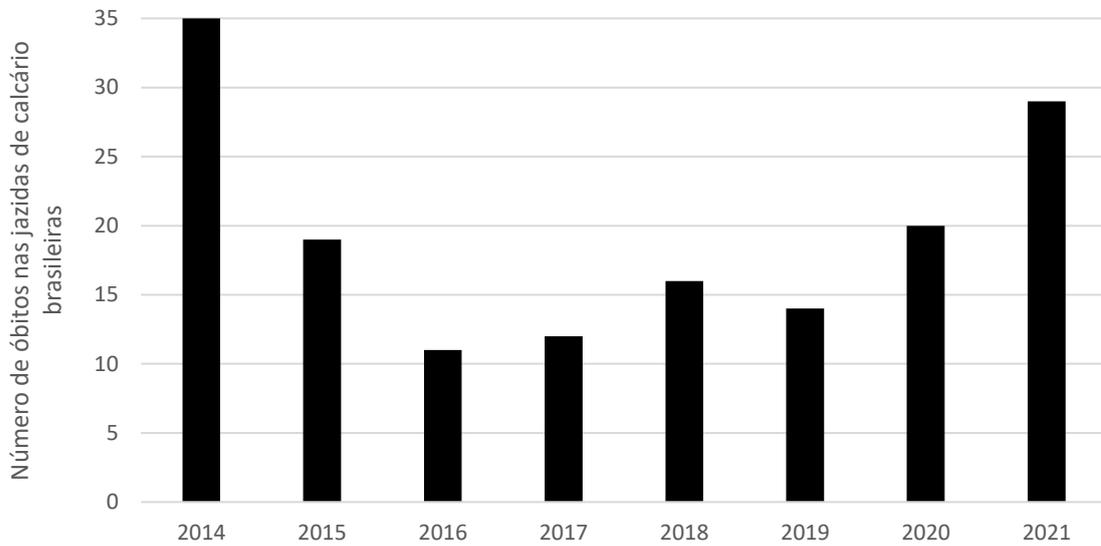
De acordo com os Anuários Estatísticos de Acidentes do Trabalho publicados pelo Ministério do Trabalho e Previdência (BRASIL, 2022e), em 2021, somente o setor extrativo de calcário, principal matéria-prima para produção do cimento Portland, registrou 1422 acidentes de trabalho, incluindo 29 óbitos. As Figuras 17 e 18 ilustram a quantidade de acidentes de trabalho e óbitos, respectivamente, entre os anos de 2014 e 2021 de trabalhadores de jazidas de calcário.

Figura 17 – Acidentes de trabalho relacionados às atividades extrativas de calcário no Brasil.



Fonte: Adaptado de Brasil (2022e).

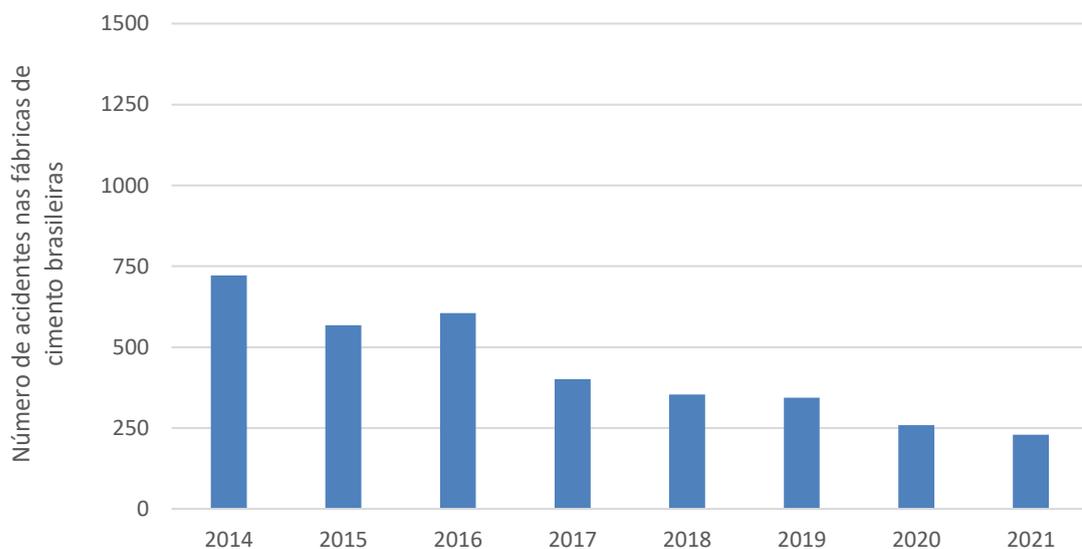
Figura 18 – Óbitos relacionados às atividades extrativas de calcário no Brasil.



Fonte: Adaptado de Brasil (2022e).

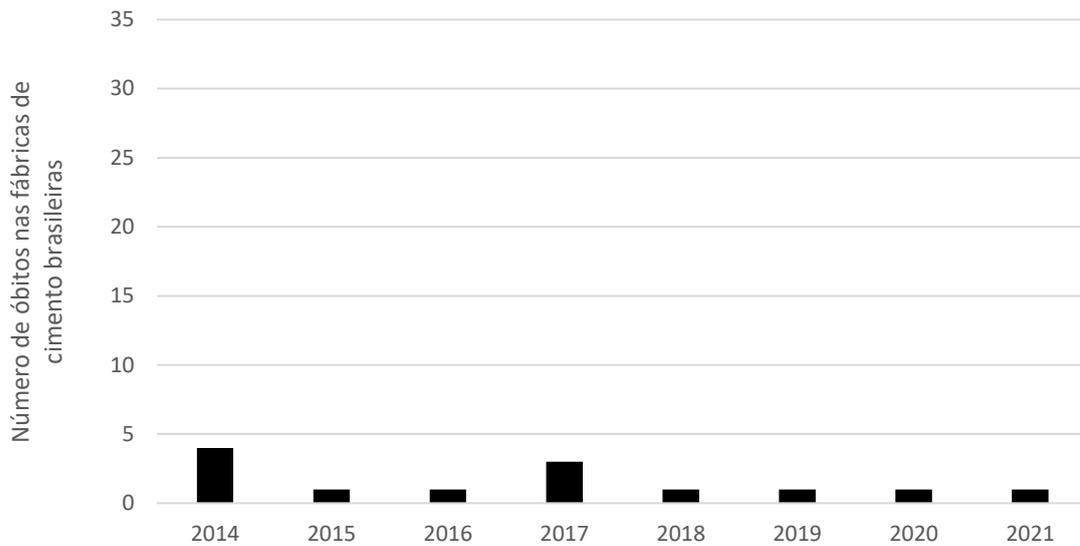
Ainda de acordo com os mesmos anuários, considerando somente as indústrias de cimento do Brasil no ano de 2021, ocorreram 229 acidentes relacionados à produção de cimento e um óbito. As Figuras 19 e 20 apresentam a quantidade de acidentes relacionados à produção direta de cimento no Brasil entre os anos de 2014 e 2021.

Figura 19 – Acidentes de trabalho relacionados à produção de cimento Portland no Brasil.



Fonte: Adaptado de Brasil (2022e).

Figura 20 – Óbitos relacionados à produção direta de cimento Portland no Brasil.



Fonte: Adaptado de Brasil (2020b).

Em 2021, foram registradas 294 empresas responsáveis pela extração de calcário (ANM, 2023) e 91 parques industriais de cimento (SNIC, 2022a). Nesse contexto, relacionando os dados de acidentes de trabalho e óbitos de ambos os tipos de empresas (Figuras 17, 18, 19 e 20), é possível afirmar que, em 2021, o número de acidentes que ocorreram nas jazidas é o dobro dos registrados nas fábricas. E o número de óbitos nas atividades de extração de calcário também é superior, cerca de nove vezes maior. Além disso, fazendo uma relação entre os dados de 2021, tem-se uma média de quase 5 acidentes/jazida, com 0,1 óbito/jazida. Enquanto para as fábricas de cimento, em 2021, a média foi menor que 3 acidentes/empresa, sendo 0,01 óbito/empresa. Portanto, é possível afirmar que aqueles que trabalham em jazidas de calcário estão mais expostos aos acidentes. Isso ocorre devido à falta de investimentos em profissionalização, visto que muitas jazidas estão localizadas em cidades pequenas e que dependem da mão de obra local não qualificada, sobrecarga de trabalho dos funcionários, não uso dos equipamentos de proteção individuais e coletivos e a falta de fiscalização das jazidas pelos órgãos competentes (CAMPOREZ, 2017).

5.2 Sociais

A exploração de matérias-primas minerais implicam, necessariamente, no uso extensivo de terras e, a partir do momento que as atividades de mineração impõem mudanças locais que impactam comunidades próximas, conflitos são inevitáveis. Tais conflitos podem ser divididos

em três grupos: espaciais, gerados pelos impactos ambientais causados nos ecossistemas; distributivos, relacionados às desigualdades nos acessos aos recursos naturais; e territoriais referentes à dominação da terra por determinados grupos sociais (GARBELINE, 2020). Apesar de propagarem uma imagem de responsabilização ambiental e social, as mineradoras e fábricas cimenteiras ainda são atreladas às desapropriações tradicionais, guiadas pelos interesses econômicos.

Em tese, Garbeline (2020) estudou os impactos sociais causados por quatro fábricas de cimento distintas no estado da Paraíba (Intercement, Elizabeth Cimentos, Brennand Cimentos e LafargeHolcim). Em todas as comunidades entrevistadas, há relatos de quebra de expectativas com relação à melhoria econômica na região. Esperava-se que mais pessoas pudessem ser empregadas nas atividades das fábricas. Além disso, é frequente a reclamação da população sobre rachaduras em suas casas, mas nenhuma atitude é tomada por parte das empresas, o que gera frustração na população aos redores das instalações.

Lourenço *et al.* (2021) também estudou os impactos das instalações da empresa do grupo Elizabeth Cimentos em Alhandra, na Paraíba. Os conflitos envolveram os agricultores da comunidade de João Gomes e os indígenas Tabajaras contra o grupo cimenteiro que reivindicava o uso da terra, desapropriando-a da população que ali residia.

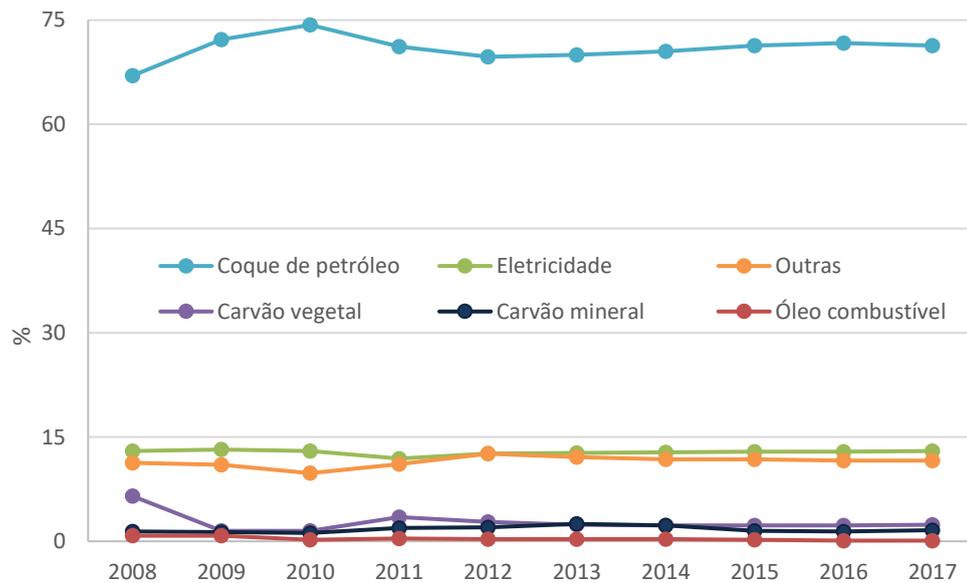
5.3 Ambientais

Os impactos ambientais causados pela produção de cimento abrangem da matéria-prima à distribuição do produto. Ainda na extração das matérias-primas, é possível encontrar desmoronamento de solos e erosão, perturbação de habitats, com consequente redução de biodiversidade na região de exploração, e infertilidade do solo (CARVALHO, 2008). Para extração de rochas calcárias, as atividades de mineração provocam alterações no relevo e na movimentação das águas subterrâneas, ocasionando secagem de nascentes e outros cursos d'água (NERI, 2007).

Já na indústria, responsável por 7% das emissões globais de CO₂, aproximadamente 90% é atribuído ao processo de clínquerização, o restante é representado pelas emissões poluentes do transporte e distribuição do produto e do consumo de energia elétrica pelas fábricas (CARVALHO; MESQUITA; MELO, 2016). O consumo energético no processo de clínquerização está diretamente relacionado ao tipo de processo empregado na produção do clínquer. Considerando um cenário positivo, ou seja, processo por via seca de 6 estágios com pré-calcinador, o consumo de energia médio estimado é de 2,9 GJ/t de clínquer produzido

(TAVARES, 2019). A distribuição de combustíveis utilizados na indústria de cimento de acordo com o tipo entre os anos de 2008 e 2017 pode ser observada na Figura 21.

Figura 21 – Distribuição de combustíveis utilizados nas indústrias brasileiras na fabricação decimento Portland entre os anos de 2008 e 2017.



Fonte: Adaptado de Tavares (2019).

Representando mais de 70% dos combustíveis utilizados na indústria cimenteira brasileira, o coque de petróleo é a matéria-prima mais utilizada para geração de energia térmica ao longo de todo período em análise. Em segundo lugar, a energia elétrica, responsável por alimentar principalmente os moinhos nas etapas de adequação de tamanho de partículas de matérias-primas e cimento. Em seguida, os carvões vegetal e mineral, respectivamente e, por fim, os óleos combustíveis (BELATO, 2013).

O coque de petróleo é um combustível sólido obtido a partir do coqueamento retardado de óleos brutos reduzidos, óleo decantado, alcatrão e suas misturas (GAUTO; ROSA, 2011). É um combustível barato e com alto poder calorífico, por isso, desde 1990 é utilizado como principal combustível na indústria brasileira do cimento (CARPIO *et al.*, 2005). Contudo, tal combustível possui alto teor de carbono, entre 90 e 95%, gerando quantidades impactantes de CO₂ durante sua queima (BELATO, 2013). Estima-se que para cada tonelada de clínquer produzido são necessários 80 kg de coque de petróleo que liberam 825 kg de CO₂ equivalente, unidade relativa que compara o potencial poluidor de todos os GEE com o CO₂ (QUEIROZ, 2018).

6 REDUÇÃO DOS IMPACTOS DA INDÚSTRIA DO CIMENTO

Visando traçar um plano para mitigação dos impactos ambientais causados pela indústria de cimento até o ano de 2050, a Agência Internacional de Energia, em parceria com demais órgãos internacionais, desenvolveram um *Roadmap* Tecnológico do Cimento (SNIC, 2019), visando a redução de 33% das emissões do setor cimenteiro mundial até 2050. São quatro fundamentos principais: redução de clínquer no cimento, através da utilização de adições ou substitutos, utilização de combustíveis alternativos, modernização dos equipamentos, visando maior eficiência energética e investimentos em tecnologias como a da captura e armazenamento de carbono (OLIVEIRA, 2019).

6.1 Substituição parcial do clínquer

Atualmente, o Brasil é referência mundial na redução da quantidade de clínquer na fabricação do cimento. Em 2020, a relação clínquer/cimento foi 71%, enquanto a média mundial foi próxima a 78% (SNIC, 2021). A redução se dá pela substituição parcial do clínquer por outros materiais com propriedades hidráulicas e pozolânicas semelhantes, mas o desafio é garantir que desempenhos mínimos estabelecidos na NBR 16697 (ABNT, 2018) sejam atendidos (SIMONETO, 2020).

Considerando a disponibilidade dos recursos aditivos ao longo do tempo, o *filler* de calcário e as argilas calcinadas apresentam um bom potencial para substituir parcialmente o clínquer. O *filler* de calcário apresenta maior potencial de mitigação de emissões de CO₂, porque não é necessário passar por processos de calcinação. Contudo, surge a necessidade de adaptação das normas regulamentadoras vigentes, para revalidação dos critérios de desempenho, visto que, com uma maior adição de *filler* de calcário, o cimento perde qualidades estruturais, sendo mais desafiador atender às exigências relativas às propriedades de resistência, mas o produto ainda pode suprir os setores de obras de menor exigência técnica (OLIVEIRA, 2019).

Já as argilas calcinadas, apesar de estarem distribuídas ao longo de todo território nacional, possui um menor fator de redução de emissão de CO₂ devido à necessidade de sua calcinação. Porém, seu uso em conjunto com o *filler* de calcário contribui para a redução dos efeitos indesejados da substituição parcial causados por ele (OLIVEIRA, 2019). Dessa forma, o maior desafio é conciliar um bom desempenho do cimento com a disponibilidade de matérias-primas substitutas e redução da emissão de CO₂.

6.2 Combustíveis alternativos e coprocessamento

O coque de petróleo é o principal combustível utilizado na indústria do cimento para fabricação do clínquer (Figura 20). Em 2021, foram produzidos 15 mil m³/dia de coque de petróleo no Brasil, e seu preço teve um aumento de 140,8%. A indústria do cimento foi responsável pelo consumo de 52 mil TEP (tonelada equivalente de petróleo) do total produzido em 2021 (BRASIL, 2022c).

Contudo, o coque é um combustível fóssil e, por isso, alternativas menos poluidoras são propostas para reduzir a emissão de CO₂, seja pela utilização de combustíveis alternativos ou pela redução do uso do coque de petróleo através de coprocessamento de resíduos industriais (BELATO, 2013).

Materiais vegetais como cana de açúcar, milho, cascas de café e óleo de palma podem ser utilizados como combustíveis, porém, é necessária a realização de pré-tratamentos dessas biomassas para retirada de umidade, uma vez que altos teores de umidade prejudicam a liberação energética desses combustíveis alternativos (SANTOS; MASSANARES; SANTOS, 2019). Além disso, o emprego de certos tipos de biomassa colide com a sazonalidade das culturas, o que dificulta a sua utilização contínua pelas indústrias de cimento como combustível alternativo.

O carvão vegetal, segunda fonte de energia térmica mais utilizada nas indústrias de cimento, é obtido através da carbonização de madeiras, principalmente de eucalipto (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012). Dessa forma, trata-se de uma fonte renovável de energia, com fator de emissão de CO₂ nulo, considerando o ciclo de vida completo da madeira. Ao ser utilizado na alimentação de fornos rotativos, sua eficiência média atinge 78%, enquanto o coque de petróleo 80% (OLIVEIRA, 2017).

Ainda que não substitua completamente a utilização do coque de petróleo como combustível, sua utilização combinada com resíduos, chamada de coprocessamento, é uma alternativa interessante para mitigação dos impactos ambientais, porque além de aproveitar o potencial energético dos resíduos, contribui para a redução da disposição inapropriada desses no meio ambiente. O resíduo mais utilizado para o coprocessamento são os pneus: cerca de 70% dos pneus inservíveis são destinados para geração de energia (OLIVEIRA, 2019).

Hoje, no Brasil, há 57 plantas industriais de cimento com forno rotativo, sendo que 38 são licenciadas para o coprocessamento de resíduos, o que corresponde a 67% das fábricas (SNIC, 2023b). Além dos resíduos pneumáticos, são utilizados plástico, lodo de esgoto, borrachas, tintas e solventes, papel e papelão, borras oleosas e graxas, entulhos da construção

civil e terra contaminada (BELATO, 2013). Em 2020, nas indústrias cimenteiras brasileiras foram coprocessados cerca de 2 milhões de toneladas de resíduos (SNIC, 2021).

No processo da queima dos resíduos, os componentes mais voláteis são emitidos através da chaminé do forno rotativo, juntamente com os demais gases do processo. Já os compostos semivoláteis e não voláteis são incorporados no clínquer. Muitos dos resíduos utilizados no coprocessamento contêm metais pesados e compostos organoclorados, como dioxina e furanos, que podem ser associados com dermatites através do contato com o cimento em pó, câncer, problemas reprodutivos, deficiências imunológicas e disfunções endócrinas (ROCHA; LINS; SANTO, 2011).

Devido ao potencial de emissão de poluentes pelos resíduos utilizados no coprocessamento, há restrições para a substituição do coque. É usual uma substituição energética de até 20% do calor total requerido no processo. Contudo, tal porcentagem é reduzida na presença de materiais e elementos perigosos, cloro e metais pesados (PAULA, 2009).

6.3 Eficiência energética

A eficiência energética é atingida quando se mantém a produtividade diminuindo o consumo energético. Para tal, medidas como redução do teor de clínquer no cimento, utilização de equipamentos mais modernos, boa gestão energética e mudanças de hábitos podem ser adotadas para a redução do consumo (BEZERRA, 2011).

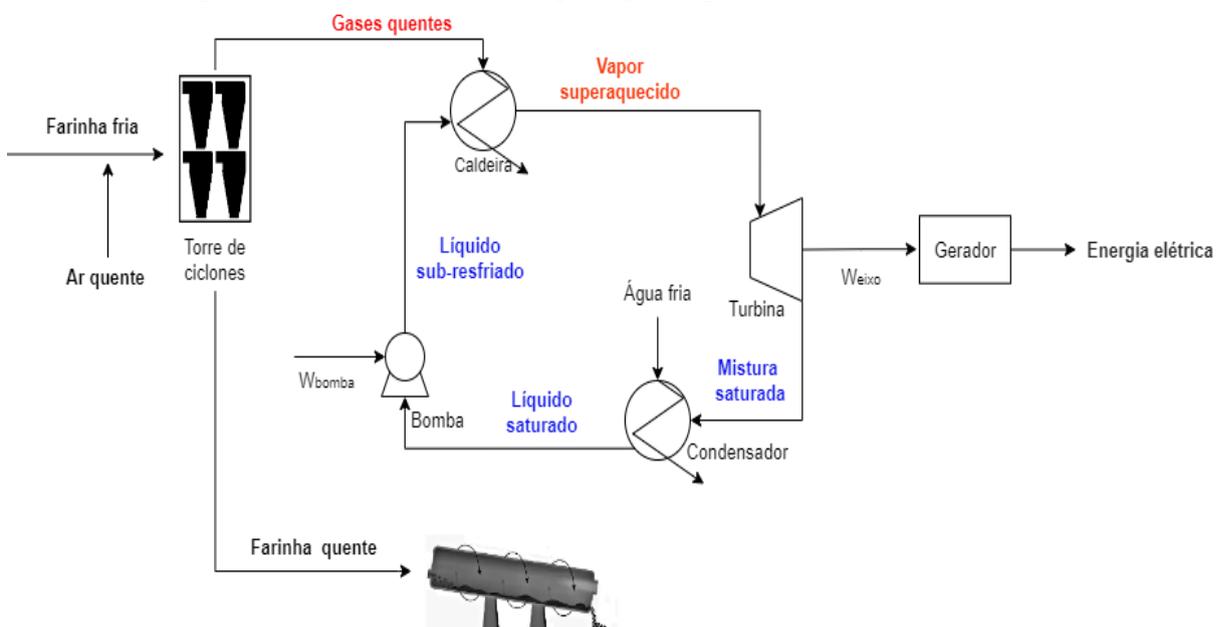
Ao reduzir o percentual de clínquer no produto, através da sua substituição parcial descrita anteriormente, há ganho termo-energético, porque o processo de clínquerização é a etapa que requer maior demanda de energia térmica e é utilizada como unidade de medida para o consumo energético específico (MEJIA, 2015). A redução no teor de clínquer pode ser combinada com o coprocessamento de resíduos nos fornos rotativos, atividade já praticada por 67% das plantas industriais brasileiras (SNIC, 2023b).

Com relação aos equipamentos industriais utilizados nas operações produtivas, a substituição dos moinhos de bolas por moinhos verticais de rolos garante uma economia de 6 a 11,9 kWh/t de clínquer, isso representa uma redução de energia elétrica de aproximadamente 20% nas etapas de moagem. Apesar disso, os moinhos de bolas ainda são utilizados por 60% das fábricas de cimento no mundo. A utilização de fornos rotativos menores, combinados com pré-aquecedores e calcinadores, também fornece um ganho termo-energético de 0,4 a 1,4 GJ/t de clínquer, porque auxilia no preparo térmico da mistura para a etapa de sinterização dentro do forno (MEJIA, 2015).

Grande parte das indústrias de cimento no Brasil são modernas, visto que 99% já utilizam fornos rotativos curtos combinados com pré-aquecedores e calcinadores. É interessante também o investimento em ciclones de pré-aquecimento com menores quedas de pressão, porque para cada hPa reduzido na queda na pressão, são economizados entre 0,12 a 0,15 kWh/t de clínquer por estágio. A otimização do controle e automatização dos processos também contribuem para a redução da demanda de energia térmica, reduzindo de 50 a 100 MJ/t de clínquer (BRASIL, 2019).

As correntes quentes advindas do forno rotativo também podem ser utilizadas para alimentação da torre de ciclones de pré-aquecimento, que podem possuir até 6 estágios, de forma que a cada estágio adicionado há incremento de rendimento no processo (MEJIA, 2015). Há possibilidade também da recuperação do calor residual das torres de ciclones e resfriadores de clínquer, através do ciclo térmico de Rankine, em que calor é utilizado para produção de vapor e geração de energia elétrica. Contudo, devido à necessidade de altos investimentos em adaptações das plantas industriais já existentes, tal prática é bastante escassa, com exceção na China (SILVA NETO, 2018). A Figura 22 representa, de forma resumida, o processo de cogeração de energia através do ciclo de Rankine, utilizando a corrente quente da torre de ciclones.

Figura 22 – Ciclo de Rankine para gases quentes da torre de ciclones.



De acordo com trabalho publicado por Campos (s.d), a utilização do ciclo de Rankine para geração de energia elétrica a partir de gases quentes de escape do forno rotativo é capaz

de suprir até 20% da demanda de energia elétrica de toda a fábrica, e mais de 50% da energia necessária no processo de moagem da farinha.

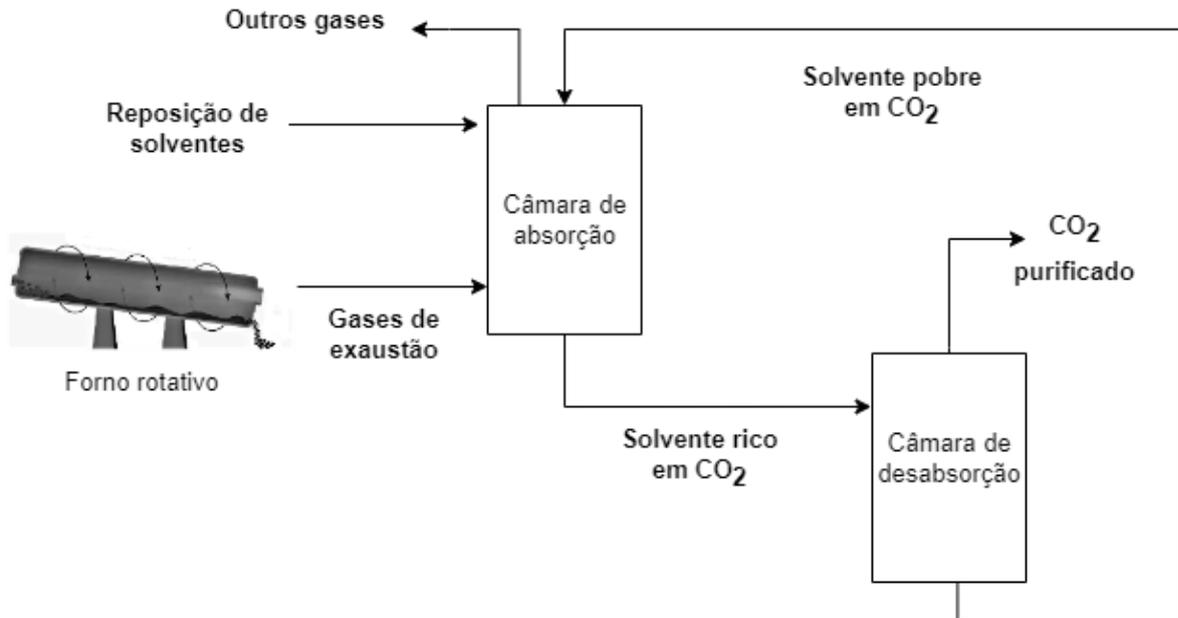
Ademais, além das alternativas apresentadas, pode-se avaliar a instalação de sistemas fotovoltaicos nessas indústrias, utilizando placas fotovoltaicas para realizar a captação da radiação solar, que posteriormente seria convertida em eletricidade corrente, a ser consumida pela própria empresa.

6.4 Captura e armazenamento de carbono

A captura e armazenamento de carbono (*Carbon Capture and Storage* - CCS) consistem em técnicas de separação e transporte de CO₂, armazenando-o em depósitos subterrâneos desativados de gás natural ou petróleo, ou entre camadas de carvão e outras formações geológicas (FARIA *et al.*, 2018). O sequestro de CO₂ deve ser superior a 90%, de forma que somente o restante é liberado para atmosfera (GASPAR, 2014). No Brasil, a tecnologia comercialmente disponível de CCS é a rota de pós-combustão com absorção química (BRASIL, 2019).

No método de pós-combustão, o CO₂ é proveniente da queima direta de combustíveis como carvão, gás natural, óleos ou biomassa. A absorção química é realizada tipicamente por bases de aminas ou amônias. Assim, as emissões gasosas advindas do forno rotativo entram em contato com o solvente na câmara de absorção com temperaturas entre 40 e 60 °C. Água é aspergida na câmara para remoção de partículas sólidas que eventualmente possam ter ficado retidas na corrente gasosa. O solvente rico em CO₂ é transportado para uma coluna de regeneração em temperaturas próximas a 120 °C, de forma que o CO₂ seja desprendido do solvente e comprimido para ser transportado ao local de armazenamento, normalmente por gasodutos. O solvente agora empobrecido é bombeado novamente para a câmara de absorção (GASPAR, 2014). A Figura 23 ilustra o processo de captura de CO₂ de um forno rotativo pelo método de pós-combustão.

Figura 23 – Processo simplificado de captura de carbono de fornos rotativos.



Fonte: Adaptado de Fortunato; Parsekian; Neves (2018).

O Brasil ainda não possui regulamentação para CCS. Em maio de 2022, o senador Jean Paul Prates apresentou um projeto de lei, PL 1425/2022, que visa disciplinar a exploração das atividades de armazenamento permanente de dióxido de carbono em reservatórios geológicos. Entretanto, o PL segue aguardando designação do relator (BRASIL, 2022f).

6.5 ESG

Environmental, Social and Governance, abreviado para ESG, é o conjunto de práticas sustentadas pelo tripé ambiental, social e econômico, desenvolvidas por organizações que visam reduzir os impactos gerados por suas produções, com o objetivo de contribuir para um mundo melhor. O pilar ambiental é o principal direcionador nas tomadas de decisão das organizações globalizadas, visto que há urgência em mitigar os impactos causados pelas ações antropogênicas. O pilar social se baseia em ações voltadas para a comunidade, através de projetos e campanhas que abracem as necessidades da população como um todo, ou de grupos específicos, baseados nos recortes sociais. Por fim, o aspecto econômico, denominado de governança, diz respeito à transparência das atividades lucrativas das organizações, através da divulgação de auditorias e relatórios fiscais, visando o combate à corrupção (COSTA; FERREZIN, 2021).

Um dos maiores desafios para a implementação da agenda ESG nas organizações é a relação entre benefícios e custos, principalmente a longo prazo. Contudo, o mercado financeiro já demonstra que é interessante atender ao movimento. Em 2019 e 2020, foram injetados R\$1,8 trilhão em fundos de investimentos focados em ESG. Das 500 empresas mais negociadas nas bolsas de valores norte-americanas, 90% publicaram relatórios de sustentabilidade em 2019. Nesse contexto, a adoção de práticas ESG impacta diretamente na atração de investidores e alocação de recursos (REZENDE *et al.*, 2022).

Ainda no pilar econômico, o compromisso com a redução de combustíveis, energia e matérias-primas, por si só contribui para a dedução de custos nas operações industriais. No aspecto social, ações voltadas para a comunidade favorecem o diálogo e cooperação popular, construindo relações de confiança e boa reputação das organizações (REZENDE *et al.*, 2022). Já a adoção de políticas de governança sólidas agregam valor e segurança, trazendo a “gestão a vista” das organizações como a principal forma de comunicação com todos os *stakeholders* (clientes, fornecedores, acionistas, funcionários etc).

Ao analisar as informações divulgadas nos sites das maiores indústrias de cimento nacionais, é possível observar que somente 11% das empresas analisadas se preocupam em adotar e divulgar práticas do movimento ESG, enquanto 28% se comprometem em divulgar relatórios anuais de sustentabilidade (Quadro 1).

Quadro 1 – Informações de agenda ESG e divulgação de relatórios de sustentabilidade das maiores cimenteiras nacionais em 2023.

Empresa	Agenda ESG	Relatório de sustentabilidade	Fonte consultada
LafargeHolcim	Não	Não	https://www.lafargeholcim.com.br
Intercement	Não	Sim	https://intercement.com
Cimento Nacional	Não	Sim	https://www.cimentonacional.com.br
Mizu	Não	Não	https://mizu.com.br
Liz	Não	Não	https://www.cimentosliz.com.br
CSN	Sim	Sim	https://esg.csn.com.br
Votorantim	Sim	Sim	https://www.votorantim.com.br
Tupi	Não	Não	http://www.cimentotupi.com.br
Carmocal	Não	Não	site indisponível
Nassau	Não	Não	site indisponível
Cimar	Não	Não	http://www.cimar.ind.br
Cimento Verde do Brasil	Não	Não	https://www.cimentoacai.com.br
Icibra	Não	Não	site indisponível
Apodi	Não	Sim	https://www.cimentoapodi.com.br
Cimento Forte	Não	Não	https://www.cimentoforte.com.br
Ciplan	Não	Não	https://www.ciplan.com.br
Itambé	Não	Não	https://www.cimentoitambe.com.br
Secil	Não	Não	https://www.supremocimento.com.br

Fonte: Da autora (2023).

7 PERSPECTIVAS FUTURAS PARA O SETOR

Projeções apontam que a demanda por cimento Portland será impulsionada entre os anos de 2020 e 2040, atingindo seu pico em 2045 e queda a partir de 2050, momento em que está prevista a reversão do crescimento populacional, segundo IBGE. A produção nacional máxima de cimento deverá atingir entre 127 e 170 Mt, representando um desafio tanto de suprimento da demanda energética quanto de redução das emissões de CO₂ (OLIVEIRA, 2019).

As principais metas para a indústria do cimento estão relacionadas com a mitigação dos impactos ambientais. Em 2019, o SNIC em parceria com ABCP firmaram o *Roadmap Tecnológico do Cimento*, principal documento que reúne as ações e diretrizes do setor no Brasil até o ano de 2050, com foco na redução da pegada de carbono, desenvolvimento de novas tecnologias, investimentos em combustíveis alternativos e eficiência energética (SNIC, 2019).

As ações foram divididas em curto/médio prazo e longo prazo. Até 2030, os esforços serão concentrados em reunir e divulgar dados confiáveis sobre as emissões de poluentes, conscientizar consumidores sobre a importância das adições no cimento para mitigação dos impactos ambientais, atualizar as legislações vigentes de forma a incentivar a utilização de combustíveis alternativos e coprocessamento de resíduos, compartilhar tecnologias de eficiência energética e investir em inovação, através de apoio e fomento a pesquisas e projetos (OLIVEIRA, 2019).

Na segunda etapa, até 2050, espera-se que a relação clínquer/cimento atinja 52%, contrapondo os 67% da relação atual, utilizando principalmente calcário e argila como substitutos parciais do clínquer. Além disso, estima-se que 55% da demanda térmica energética seja suprida por biomassa e resíduos coprocessados, reduzindo a emissão cumulativa de CO₂ em aproximadamente 16% entre 2014 e 2050. As projeções também apontam uma redução média de 0,4% ao ano do consumo de energia elétrica, devido a investimentos tecnológicos nas etapas de moagem e na recuperação energética dos processos produtivos. De forma complementar, estima-se que a captura e armazenamento de carbono contribuam com uma redução de até 9% das emissões cumulativas até 2050, caso seja extensivamente implantada até 2035 (OLIVEIRA, 2019).

Os objetivos e metas foram traçados baseados em dois cenários. O primeiro, chamado de cenário 6 °C, representa as condições e impactos causados pelo setor cimenteiro até o ano de 2050 caso nenhuma medida diferente seja tomada para mitigação dos impactos ambientais, o que contribuiria para um aumento de 6 °C na temperatura média do planeta. O segundo cenário, nomeado de 2 °C, apresenta indicadores que devem ser alcançados para frear a contribuição

para o aquecimento do planeta em até 2 °C em 2050 (OLIVEIRA, 2019). A Tabela 2 descreve os principais indicadores de ambos os cenários para os anos de 2030 e 2050.

Tabela 2 – Indicadores chave dos cenários 2 °C e 6 °C nos anos de 2030 e 2050.

Ano	2030		2050	
Produção de cimento (Mt)	87		117	
Cenário	2 °C	6 °C	2 °C	6 °C
Relação clínquer/cimento (%)	59	67	52	67
Demanda térmica (GJ/t de clínquer)	3,47	3,49	3,22	3,44
Demanda elétrica (kWh/t de clínquer)	106	108	91	99
Substituição por combustíveis alternativos (%)	35	15	55	15
Emissão bruta (Mt CO ₂ /ano)	42	49	44	66

Fonte: Adaptado de Oliveira (2019).

Em 2021, metas ainda mais audaciosas foram propostas pela indústria cimenteira mundial, através do *Roadmap Net Zero*, que visa a neutralidade em carbono até 2050. As novas medidas preocupam não somente com a produção do cimento, mas também com todo o seu ciclo de vida. No Brasil, o escopo do projeto deve ser finalizado no segundo semestre de 2023 (SNIC, 2022a).

Uma proposta nova, que está em fase de estudo, é a implementação de fornos de calcinação solar. São instalações que utilizam fluxos concentrados de radiação solar de até 7000 kW/m² e temperaturas próximas a 3000 °C. Apesar de reduzir extensivamente os gastos com combustíveis e praticamente eliminar as emissões de CO₂, o custo médio por tonelada de cimento produzido varia entre 2 e 3 vezes mais, se comparado aos processos convencionais. Além disso, estão sendo encontrados obstáculos para o controle de temperatura em tais reatores para produções de larga escala (OLIVEIRA *et al.*, 2019). Apesar dos desafios, tecnologias alternativas serão fundamentais para cumprir com as agendas de mitigação de impactos ambientais.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da produção de cimento ser considerada como atividade essencial, os impactos relacionados à sua cadeia produtiva não podem ser ignorados ou menosprezados. Desde a extração das matérias-primas até a logística de transporte do produto, a fabricação do cimento Portland acarreta danos sociais, ao meio ambiente e à saúde das comunidades que cercam as grandes fábricas.

Conforme abordado, a mineração de calcário é responsável por mais de 1200 acidentes de trabalho, incluindo uma média de 20 óbitos por ano. Grande parte dos acidentes ocorrem devido à falta de investimentos em profissionalização na mão de obra das jazidas, combinada com jornadas de trabalho excessivas, equipamentos de proteção inadequados e omissão dos órgãos responsáveis por fiscalizações *in loco*. Isso demonstra a urgência em reformular as medidas de segurança nas jazidas, traçando planos de ação que contenham ou minimizem os riscos aos quais os trabalhadores são expostos diariamente.

Além dos acidentes diretos, que ocorrem nas próprias fábricas e pedreiras, as comunidades que residem próximas às unidades produtivas lidam diariamente com a poluição do ar por material particulado, tremores do solo e poluição sonora. Conflitos territoriais também são comuns, principalmente em regiões mais afastadas dos grandes centros, como no semiárido Paraibano, em que agricultores e indígenas lutam pela reivindicação de suas terras que foram desapropriadas em prol da construção de cimenteiras. Tais embates reforçam a necessidade da presença constante de prefeituras na intermediação das partes. Não há desenvolvimento econômico que contraponha à desarmonia e prejuízo às comunidades que já se encontram estabelecidas na região.

Como visto, as fábricas de cimento são responsáveis por mais de 7% das emissões globais de CO₂, sendo atribuídas principalmente à etapa de clínquerização. Nesse contexto, é imprescindível a utilização de recursos mitigadores de tais impactos. A substituição parcial do clínquer por *filler* de calcário e argila calcinada é uma alternativa já empregada na maior parte das fábricas no Brasil. O desafio é praticar a substituição do clínquer sem comprometer as qualidades requisitadas do cimento pelas normas regulamentadoras vigentes.

O coprocessamento de resíduos também é chave na redução dos impactos ambientais, objetivando a redução da utilização do coque de petróleo, combustível fóssil, por resíduos sólidos, muitas vezes subprodutos ou descartes de outras atividades industriais. Dessa forma, é possível aproveitar o potencial energético de tais resíduos, além de evitar o descarte inapropriado dos mesmos.

Investimentos em parques industriais mais tecnológicos também contribuem para a redução dos impactos ambientais, através da redução de demandas termo energéticas. O método de captura e armazenamento de carbono, apesar de ainda não ser praticado no Brasil pelas indústrias cimenteiras, é designado como uma alternativa atenuadora das emissões de CO₂ do setor. Contudo, é uma prática paliativa, focada em uma abordagem passiva do problema. Deve ser considerada como uma atividade complementar àquelas que se comprometem com a redução das emissões gasosas.

Visando a perenidade das organizações, a agenda ESG vem ganhando cada vez mais espaço e notoriedade. O mercado financeiro já demonstra a importância das empresas se adequarem ao movimento. Além da responsabilização ambiental, a preocupação com o social e políticas de governança cada vez mais sólidas favorecem a reputação das empresas e reforçam o comprometimento com uma produção mais consciente e que respeite a vida.

O cenário futuro é economicamente favorável ao setor, que prevê crescimento pelos próximos 20 anos. Contudo, para que seja possível cumprir os tratados internacionais de mitigação de impactos ambientais, há uma corrida contra o tempo. O Brasil já se destaca na utilização de tecnologias de coprocessamento e substituição parcial de clínquer, mas ainda não implementa a captura e armazenamento de carbono, aliado fundamental na redução das emissões de CO₂. Isso significa que, pelos próximos anos, o setor será desafiado a conciliar a demanda por produção, investimentos em modernização das plantas e mudança de cultura, priorizando não só faturamento das fábricas, mas também a redução dos impactos sociambientais causados por suas atividades.

REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, Antônio Júnior. Tipos de cimento. **Engenheiro no canteiro**. 2015. Disponível em: <https://engenheironocanteiro.com.br/tipos-de-cimento-portland/>. Acesso em: 22 out. 2022.

ABRÃO, Pedro Cesar Rodrigues Alves. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares**: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro Interativo**. 2023. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZTRkNjI3MWEtMGI3My00ZTgzLWIyN2YtMzNjNDhjNTViM2Q2IiwidCI6ImEzMDgzZTIxLTc0OWItNDUzNC05YWZhLTU0Y2MzMTg4OTdiOCJ9&pageName=ReportSection99c5eaca1c0e9e21725a>. Acesso em: 04 jan. 2023.

AMORIM, Luiz Felipe Duarte de *et al.* **Avaliação do impacto atmosférico nas operações de uma mineradora de calcário**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2016.

ARTABAS. **Misturador vertical**. 2023. Disponível em: <https://www.artabas.com.br/Produto/10/misturador-vertical>. Acesso em: 13 mar. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Produtores brasileiros de cimento estão cautelosamente otimistas**. 2022. Disponível em: <https://abcp.org.br/produtores-brasileiros-de-cimento-estao-cautelosamente-otimistas/>. Acesso em: 26 fev. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. 2011. Disponível em: <https://toaz.info/doc-view>. Acesso em: 26 fev. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. 2018. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/12249/nbr16697-cimento-portland-requisitos>. Acesso em: 15 jan. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 2019. Disponível em: <https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-federal-do-reconcavo-da-bahia/materiais-de-construcao-ii/nbr-7215-2019-determinacao-da-resistencia-a-compressao-de-corpos-de-prova-cilindricos/19436091>. Acesso em: 20 fev. 2023.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. Uma breve história do cimento Portland. **Associação Brasileira de Cimento Portland**. São Paulo, nov. 2009. Disponível em: <https://abcp.org.br/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>. Acesso em: 23 fev. 2023.

BELATO, Mariana Natale. **Análise da geração de poluentes na produção de cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

BEZERRA, Francisco Tales Sousa. **Eficiência energética e riscos ambientais em uma fábrica de cimento**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento de Pesquisa em Engenharia e Educação Continuada. **Estudos para o Plano Nacional de Mineração 2050 PNM 2050. Caderno 2: Pesquisa e Produção Mineral, v. I**. 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pnm-2050/estudos/caderno-2-pesquisa-e-producao-mineral/EstudosMSWordPNM2050Caderno220221116_Vol.I.pdf. Acesso em: 28 dez. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento de Pesquisa em Engenharia e Educação Continuada. **Estudos para o Plano Nacional de Mineração 2050 PNM 2050. Caderno 2: Pesquisa e Produção Mineral, v. III**. 2022a. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pnm-2050/estudos/caderno-2-pesquisa-e-producao-mineral/copy_of_EstudosMSWordPNM2050Caderno220221116_Vol.III.pdf. Acesso em: 27 dez. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos**. 2020a. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anuario-estatistico-do-setor-de-nao-metalicos-2019.pdf/view>. Acesso em: 28 dez. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Boletim do Setor Mineral**. 7. ed. 2022b. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/boletim-do-setor-mineral/boletim_sgm_dez2021_digital_7-edicao.pdf/view. Acesso em: 28 dez. 2022

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Resenha Energética Brasileira**. 2022c. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/publicacoes/resenha-energetica-brasileira/resenhas/resenha-energetica-2022.pdf/view>. Acesso em: 05 fev. 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. **Anuário Estatístico de Acidentes de Trabalho - AEAT**. 2022e. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/assuntos/previdencia-social/saude-e-seguranca-do-trabalhador/dados-de-acidentes-do-trabalho>. Acesso em: 08 jan. 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. **Portaria Nº 2.318, de 03 de agosto de 2022.** 2022d. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/sst-portarias/2022/portaria-mtp-no-2-318-nova-nr-04.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2023.

BRASIL. Produtividade e Comércio Exterior. **Elaboração de estudos setoriais (energia elétrica, combustíveis, indústria e agropecuária) e proposição de opções de desenho de instrumentos de precificação de carbono.** 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/pmr/componente-1/produto-2-sumex-diagnostico-setorial-industria.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2023.

BRASIL. Senado Federal. **Projeto de Lei Nº 1425, de 2022.** 2022f. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=9165493&ts=1675310005360&disposition=inline>. Acesso em: 05 fev. 2023.

CABRAL, Marsis Júnior *et al.* **RMI**s: argila para cerâmica vermelha. São Paulo, 2008. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1136>. Acesso em: 24 fev. 2023.

CAMARGO, Nelson. Fotos antigas. **Movimento Fábrica Perus**, 2014. Disponível em: <https://movimentofabricaperus.wordpress.com/fotos/fotos-antigas/#jp-carousel-293>. Acesso em: 21 fev. 2023.

CAMPOREZ, Patrik. Vidas marcadas por acidentes de trabalho em pedreiras do Estado. **A Gazeta**, jan. 2017. Disponível em: <https://www.agazeta.com.br/economia/vidas-marcadas-por-acidentes-de-trabalho-em-pedreiras-do-estado-0117>. Acesso em: 08 jan. 2023.

CAMPOS, Daniel Vigarinho. **Cogeração em uma fábrica de cimento.** s.d. Disponível em: http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2007/Artigos/Art_TCC_013_2007.pdf. Acesso em: 30 de jan. 2023.

CARPIO, Ricardo Carrasco *et al.* **Otimização no co-processamento de resíduos na indústria do cimento envolvendo custos, qualidade e impacto ambiental.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

CARVALHO, Maria Beatriz Maury de. **Impactos e conflitos da produção de cimento no Distrito Federal.** 2008. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de; MESQUITA, Pedro Paulo Dias; MELO, Luciane Paiva d'Ávila. **Cimento.** 2016. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/7207?mode=simple>. Acesso em: 24 fev. 2023.

CASTRO, Alessandra Lorenzetti; QUARCIONI, Valdecir Angelo. Aditivos ao cimento. **Revista Notícias da Construção**, ago. 2013. Disponível em: https://www.ipt.br/download.php?filename=940-Noticias_da_Construcao_SindusCon_Agosto_de_2013.pdf. Acesso em: 05 fev. 2023.

CEMNET. *Belite-based low-carbon clinker cements*. 2020. Disponível em: <https://www.cemnet.com/Articles/story/168469/belite-based-low-carbon-clinker-cements.html>. Acesso em: 26 fev. 2023.

CLAUDIO PETERS. **Tecnologia de silos**. 2020. Disponível em: <https://www.claudiuspeters.com/pt-PT/documents/363/cp-silo-tech-po-0813-8324-web-pt.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2023.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. **Resultado trimestral 3T22**. 2022. Disponível em: <https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/29633c00-23f7-4765-9594-926012179477/51133408-0d94-fd85-85a6-b9297bca1157?origin=1>. Acesso em: 02 de fev. 2023.

COSTA, Edwaldo; FERREZIN, Nataly Bueno. ESG (Environmental, Social and Corporate Governance) e a comunicação: o tripé da sustentabilidade aplicado às organizações globalizadas. **Revista Alterjor**, ago. 2021. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/alterjor/article/view/187464>. Acesso em: 23 fev. 2023.

DIAS, Raquel Pedroso *et al.* Cimento LC³: Emissões, inovações e capacidade de produção no Brasil. **Revista Técnico-Científica do CREA - PR**, jun. 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/361346832_CIMENTO_LC_EMITSOES_INOVACOES_E_CAPACIDADE_DE_PRODUCAO_NO_BRASIL. Acesso em: 23 fev. 2023;

SANTOS, Gabriela Fernanda Moraes dos; MASSANARES, Barbara Ferreira; SANTOS, Alana Melo dos. Utilização de biomassas como combustível na produção de cimento Portland. **Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade**, jun. 2019. Disponível em: <http://autores.revistarevinter.com.br/index.php?journal=toxicologia&page=article&op=view&path%5B%5D=440>. Acesso em: 23 fev. 2023.

DREAMSTIME. *Stock Photos*. (s.d). Disponível em: <https://pt.dreamstime.com>. Acesso em: 20 fev. 2023.

FARIA, Débora Goulart *et al.* **Captura, armazenamento e utilização de dióxido de carbono na indústria de cimento**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

FERNANDES, Renato *et al.* **Metodologia de projeto de queimadores a jato para fornos de clínquer**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

FORTUNATO, L. R.; PARSEKIAN, G. A.; NEVES, A. Júnior. Estudo sobre captura, utilização e armazenamento de carbono em pré-fabricados cimentícios não armados. In: **Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos**, out. 2021. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/tecsic/article/view/1309>. Acesso em: 23 fev. 2023.

GARBELINE, Camila Balista. **Indústria da mineração e o território: uma análise das fábricas de cimento e o conceito de sustentabilidade**. 2020. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Ciências Humanas, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

GASPAR, Hugo Alexandre Curado. **Captura e Armazenamento de CO₂**. 2014. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Lisboa, Lisboa. 2014.

GAUTO, Marcelo Antunes; ROSA, Gilber Ricardo. **Processos e operações unitárias da indústria química**. Ciência Moderna Ltda, Rio de Janeiro, 2011.

GCP, Applied Technologies. Otimizando o cimento Portland com *filler* de calcário. **GCP**. 2020. Disponível em: <https://gcpat.com.br/pt-br/about/news/blog/optimizing-portland-limestone-cement#:~:text=Cimento%20Portland%20com%20filler%20de%20calc%C3%A1rio%20fornece%20vantagens%20para%20o%20desempenho,para%20se%20obter%20esses%20benef%C3%ADcios>. Acesso em: 05 fev. 2023

GETTY IMAGES. *iStock*. (s.d). Disponível em: <https://www.istockphoto.com/br>. Acesso em: 21 fev. 2023

GUIMARÃES, Flávio. Encadeamento da indústria do cimento no Brasil. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, abr. 2022. Disponível em: <https://abcp.org.br/o-encadeamento-da-industria-do-cimento-no-brasil-2/#:~:text=Para%20cada%20milh%C3%A3o%20de%20toneladas,55%2C4%20milh%C3%B5es%20em%20impostos>. Acesso em: 03 fev. 2023.

INTERCEMENT. **Release de resultados 3T22**. 2022. Disponível em: <https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/09aca5fc-25b6-4872-a010-1533fadab672/c6d9213e-168a-2b80-40ac-f396e4c2caf7?origin=1>. Acesso em: 02 fev. 2023.

INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION. **The impact of COVID – 19 on the cement industry**. 2020. Disponível em: <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/c015acbf-8465-4f8e-95e8-857511f10bbb/202008-COVID-19-impact-on-cement-industry.pdf?MOD=AJPERES&CVID=ngxQLJQ>. Acesso em: 26 jan. 2023.

ITAMBÉ. **Processo de fabricação do cimento Itambé**, 2015. 1 vídeo (8 min). Publicado pelo canal Massa Cinzenta. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=CXcUM5TCtTA&t=2s>. Acesso em: 22 nov. 2022.

LEITE, Luís; CÂMARA, Francisco. **Pozolanas nas argamassas tradicionais açorianas**. 2013. Disponível em: <https://repositorio.uac.pt/bitstream/10400.3/2112/1/Pozolana.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2023.

LIMA, João Afonso Né de Andrade. **Rotina do processo produtivo e equipamentos para fabricação de cimento Portland na indústria Mizu-Baraúna/RN**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2019.

LIMA, Pedro Henrique Amaral *et al*. Novas tecnologias aplicadas no estudo da fabricação do clínquer de cimento Portland. **Revista Vozes dos Vales: Publicações Acadêmicas**. 2022. Disponível em: <http://site.ufvjm.edu.br/revistamultidisciplinar/files/2022/05/19.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2023.

LOURENÇO, Nielson Polucena *et al.* **Territorialização do capital extrativista mineral sobre áreas de Reforma Agrária: da voracidade do capital à luta pela defesa da terra e da vida no Assentamento Mucatu/PB.** 2021. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

MAPA DA OBRA. **Primeira fábrica da Votorantim cimentos comemora 80 anos.** 2016. Disponível em: https://www.mapadaobra.com.br/negocios/primeira-fabrica-da-votorantim/?doing_wp_cron=1676927288.6642830371856689453125. Acesso em: 21 fev. 2023.

MARINGOLO, Vagner. **Clínquer coprocessado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento.** 2001. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MARINHO CIMENTO. **Venda de cimento em Vargem Grande Paulista.** (s.d). Disponível em: <https://www.cimentecsp.com.br/venda-cimento-vargem-grande-paulista.php> . Acesso em: 21 fev. 2023.

MEJIA, Carolina Sandoval. **Boas práticas e inovações tecnológicas visando ganhos de eficiência energética em alguns segmentos industriais energo intensivos.** 2015. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

MELO, Karoline Alves de *et al.* **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filler de calcário.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MENDONÇA, Michella Graziela Santos. **Influência de adições de grafite, óxido de grafite e grafite-like em argamassa de cimento Portland: durabilidade, propriedades mecânicas e resistividade elétrica.** 2019. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019.

MINERADORA SÃO JORGE. **Quem somos. 2023.** Disponível em: <https://www.mineradorasaojorge.com.br/historico.php>. Acesso em: 05 fev. 2023

MT ECONÔMICO. **Poeira de calcário preocupa população da cidade de Nobres.** 2019. Disponível em: <https://www.matogrossoeconomico.com.br/agronegocio-e-industria/poeira-de-calcario-preocupa-populacao-da-cidade-de-nobres/>. Acesso em: 26 de fev. 2023.

NEHRING, Victor *et al.* Utilização da escória de alto forno em materiais cimentícios. **A Construção Civil: em uma perspectiva econômica, ambiental e social,** 2021. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.org/articles/210303879.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2023.

NERI, Ana Claudia. **Avaliação da eficácia de medidas de recuperação ambiental em mineração de calcário para cimento.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

OLIVEIRA, Camilla Chaves Nunes. **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de cimento**. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/arquivos/opcoes-de-mitigacao-de-emissoes-de-gee-em-setores-chave/modelagem-setorial-de-opcoes-de-baixo-carbono-para-o-setor-de-cimento.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2023.

OLIVEIRA, F. A. Costa et al. Portland cement clinker production using concentrated solar energy—A proof-of-concept approach. **Solar Energy**. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X19302920>. Acesso em: 23 fev. 2023.

OLIVEIRA, Maria Gisele Fonseca. **Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/roadmap/roadmap-tecnologico-do-cimento-brasil.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2023.
Acesso em: 26 fev. 2023

PAULA, Luiz Gonzaga. **Análise termoeconômica do processo de produção de cimento Portland com co-processamento de mistura de resíduos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

PUGLIESI, Nataly. Cimento: Diferentes tipos e aplicações. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, São Paulo, fev. 2018. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/>. Acesso em: 09 out. 2022.

QUEIROZ, Victor Silva. **Avaliação do ciclo de vida de emissão de CO₂ na indústria do cimento: um estudo comparativo entre o cimento LC3 e o cimento Portland composto**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

QUIRINO, Bryan Getúlio *et al.* **Potencialidade da cinza de cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento Portland no concreto**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista em Produção e Gestão de Ambiente Construído) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017).

REZENDE, Sérgio *et al.* ESG no segmento de obras industriais e corporativas. **Câmara Brasileira da Indústria da Construção**. Brasília, 2022. Disponível em: https://cbic.org.br/cbic/wp-content/uploads/2022/01/cartilha_ESG_PARA-SITE.pdf. Acesso em: 31 de jan. 2023.

ROCHA, Sônia Denise; LINS, Vanessa de Freitas; SANTO, Belinazir Costa. **Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer**. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/3FybtBWKMpCPqCKSXhVnQvp/?lang=pt#>. Acesso em: 12 de mar. 2023.

RODRIGUES, Antônio Fernando da Silva; FONSECA, David Siqueira. **Cimento**. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/8-2-2013-calcario-2013-gipsita-cimento>. Acesso em: 28 dez. 2022.

SALES, Angela Teresa Costa; ALFERES FILHO, Ricardo dos Santos. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Ambiente construído**. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/QgB6PjrvjtrY9D9WYv9FZdq/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 23 fev. 2023.

SANTOS, Sueli de Fátima de Oliveira; HATAKEYAMA, Kazuo. **Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural**. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/gcrKw6mY3TfDRrxSZ9kKHDp/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 13 mar. 2023.

SHIMADA, Helio. **Impacto da prospecção geológica na otimização do processo de produção de cimento Portland na fábrica de cimento Votoran, Votorantim, SP**. 1999. Tese (Doutorado em Recursos minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

SHREVE, R. Norris; BRINK, J. A. **Indústrias de Processos Químicos**. 4. ed. Rio de Janeiro, 1997.

SILVA NETO, Francisco das Chagas. **Acompanhamento do processo produtivo do cimento portland e avaliação da cogeração de energia na unidade fabril da Companhia Industrial de Cimento Apodi em Quixeré-CE**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018.

SIMONETO, Gabriel Werner. **Avaliação da Alteração da Finura e Composição do Cimento Portland Brasileiro nas Últimas Décadas: Estudo Exploratório**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Instituto Latino-Americano, Infraestrutura e Território, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **A indústria do cimento lançou o Roadmap Tecnológico do Cimento**. 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/noticias-ver.php?id=29>. Acesso em: 01 fev. 2023.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Coprocessamento**. 2023b. Disponível em: <http://snic.org.br/sustentabilidade-coprocessamento.php>. Acesso em: 15 jan. 2023.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Dados do setor**. 2023a. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>. Acesso em: 03 fev. 2023.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2020**. 2021. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2020.pdf. Acesso em: 25 out. 2022.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2021**. 2022a. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2021.pdf. Acesso em: 15 jan. 2023.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório de Consumo Regional 2021**. 2022b. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1660573996.pdf>. Acesso em: 25 out. 2022.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório de Produção Regional 2021**. 2022c. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1660573969.pdf>. Acesso em: 25 out. 2022.

TAVARES, Gustavo Pereira. **Análise exergética e estudo da formação de poluentes em fábricas de cimento**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

THOMÁZ, Eduardo. **Notas de aula: Fabricação do cimento Portland**. Disponível em: http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/fab_cim_portland.pdf. Acesso em: 12 mar. 2023.

VEROTTI, Angelo. Uma evolução concreta. **Isto é Dinheiro**. 2021. Disponível em: <https://www.istoedinheiro.com.br/uma-evolucao-concreta/#:~:text=Votorantim%20Cimentos%20expande%20opera%C3%A7%C3%B5es%20em,de%20alta%20chega%20a%206%25.&text=A%20pandemia%20provocou%20estragos%20na,das%20fam%C3%ADlias%20brasileiras%20em%202020>. Acesso em: 02 fev. 2023.

WINSKELL, Jacob et al. **Global Concret Report 2021**. Reino Unido. Pro Global Media Ltd, 2021. Disponível em: <https://www.global-concrete.com/reports>. Acesso em: 22 out. 2022.