



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ENGENHARIA E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ALESSANDRA RAQUEL DANTAS

**ESTUDO DO PROCESSO PRODUTIVO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO
PORTLAND**

MOSSORÓ

2023

ALESSANDRA RAQUEL DANTAS

**ESTUDO DO PROCESSO PRODUTIVO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO
PORTLAND**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Alessandro Alisson de Lemos Araújo, Prof. Dr.

Co-orientadora: Marta Ligia Pereira da Silva, Prof^a. Dra.

MOSSORÓ

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

D192e Dantas, Alessandra Raquel.
Estudo do processo produtivo de fabricação do
cimento Portland / Alessandra Raquel Dantas. -
2023.
42 f. : il.

Orientador: Alessandro Alisson de Lemos
Araújo.
Coorientador: Marta Lígia Pereira da Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Química, 2023.

1. Cimento Portland. 2. Concreto . 3. Emissões
atmosféricas. I. Araújo, Alessandro Alisson de
Lemos , orient. II. Silva, Marta Lígia Pereira da,
co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ALESSANDRA RAQUEL DANTAS

**ESTUDO DO PROCESSO PRODUTIVO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO
PORTLAND**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Defendida em: 20 /05 /2023.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
ALESSANDRO ALISSON DE LEMOS ARAUJO
Data: 31/05/2023 12:06:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alessandro Alisson de Lemos Araújo, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Documento assinado digitalmente
MARTA LIGIA PEREIRA DA SILVA
Data: 31/05/2023 11:16:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Marta Ligia Pereira da Silva, Prof^a. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador



Documento assinado digitalmente
KALYANNE KEYLY PEREIRA GOMES
Data: 31/05/2023 11:32:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Kalyanne Keyly Pereira Gomes, Prof^a. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador

A meus avós Alberto Carlos Dantas e Severina
Raquel de Jesus (*In Memoriam*).

*Aos meus pais, Maria de Lourdes e
Manoel Messias, meus irmãos Alisson
Carlos e Alécia Carla e aos meus
sobrinhos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha saúde para poder concluir esse trabalho, por todo cuidado que tem comigo, por sempre me dar forças para persistir em busca dos meus objetivos, por ser muito generoso, por ter aberto inúmeros caminhos para mim e abençoado a minha família para que pudessem me fazer chegar até aqui.

Agradeço aos meus amigos e colegas de graduação Irving Matheus Medeiros de Araujo, Jamerson Jácome da Silva, Paulo Henrique Alves de Azevedo e Pedro Carlos Costa Silva.

Agradeço aos meus orientadores e a banca pelos ensinamentos, direcionamentos, compreensão e por toda contribuição na minha jornada acadêmica.

Agradeço a UFERSA, aos professores do curso de Ciência e Tecnologia – Campus Angicos/RN pela base tecnológica e aos da Engenharia Química - Mossoró/RN pelo conhecimento aplicado à engenharia.

Agradeço a Cimento Apodi por acreditar nos universitários, por ter aberto a seleção de estágio no momento em que eu procurava me encaixar no mercado de trabalho e ter me proporcionado essa incrível experiência.

Aos meus gestores, Jackson Alves, Saulo André Santos Gomes e Francisco Robson dos Santos por acreditarem em mim, pela receptividade e por me guiarem nesse mundo incrível que é a indústria de cimento Portland.

Aos que me inseriram ao chão de fábrica e ao conhecimento tecnológico a respeito do cimento Portland, Francisco das Chagas Silva Neto, Laís Tamires Oliveira Morais e João Batista Pinheiro de Lima.

As minhas colegas de estágio Aline Vitória Maia de Oliveira, Debora Raquel Fernandes Nascimento e Laianny Clemente de Meneses pelo companheirismo e amizade.

“Na natureza nada se cria, nada se perde,
tudo se transforma.”

Antoine Lavoisier.

RESUMO

O cimento Portland é um pó fino que adquire elevadas resistências mecânicas após ser hidratado e seco. Esse material é utilizado, principalmente, como aglomerante e tem sua maior aplicação na construção civil, atuando como componente básico para o concreto. O concreto é hoje o segundo material mais utilizado pelo homem, ficando somente atrás do elemento água. O processo produtivo do cimento não produz diretamente resíduos sólidos, mas há uma alta emissão de poluentes gasosos e material particulado, causadores de muitos problemas respiratórios. Além disso, degrada e contamina a água e solo. Assim, a indústria cimenteira torna-se conhecida pelo seu elevado potencial poluidor. Dada a sua grande aplicabilidade para a sociedade e a problemática ambiental envolvida nesse processo industrial, é de suma importância que o processo de produção do cimento seja objeto de estudo de trabalhos acadêmicos, como forma de viabilidade operacional e ambiental. O presente trabalho visa realizar uma revisão bibliográfica acerca do processo produtivo do cimento, detalhando as operações unitárias envolvidos nessa longa cadeia e apresentando o contexto ao qual essas fábricas se inserem no Brasil e no mundo.

Palavras-chave: Cimento Portland; concreto; emissões atmosféricas.

ABSTRACT

Portland cement is a fine powder that acquires high mechanical resistance after being hydrated and dried. This material is mainly used as a binder and has its greatest application in civil construction, remaining as a basic component for concrete. Concrete is today the second most used material by man, second only to water. The cement production process does not directly produce solid waste, but there is a high emission of polluting gases and particulate matter, causing many controlled problems. In addition, it degrades and contaminates water and soil. Thus, the cement industry becomes known for its high polluting potential. Given its great applicability to society and the environmental issues involved in this industrial process, it is extremely important that the cement production process be the subject of study in academic works, as a way of operational and environmental viability. The present work aims to carry out a bibliographic review on the cement production process, detailing the unit operations involved in the long chain and presenting the context in which these factories are inserted in Brazil and in the world. The research will consist of a bibliographic survey in physical media and online databases.

Keywords: Portland cement; concrete; atmospheric emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Consumo aparente anual no Brasil (em milhões de toneladas).....	24
Figura 2	–	Mina de calcário.....	27
Figura 3	–	Britador primário do tipo martelo.....	28
Figura 4	–	Métodos de empilhamento Chevron e Windrow.....	29
Figura 5	–	Moinho de bolas.....	30
Figura 6	–	Moinho vertical.....	31
Figura 7	–	Silo de Farinha.....	33
Figura 8	–	Torre de ciclones, forno e resfriador.....	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	–	Cimentos normatizados brasileiros.....	21
Quadro 2	–	Limites de composições dos cimentos brasileiros (% em massa).....	22
Quadro 3	–	Principais características dos cimentos normatizados brasileiros.....	22
Quadro 4	–	Principais óxidos constituintes do cimento.....	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas
BC	Baixo calor de hidratação
CP	Cimento Portland
FSC	Fator de saturação de Cal
MA	Módulo de alumínio
MS	Módulo de sílica
NBR	Norma Brasileira
RS	Resistente a Sulfatos
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SP	São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
t	Toneladas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVO	17
2.1	OBJETIVO ESPECÍFICO	17
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1	CONTEXTO HISTÓRICO DA INDÚSTRIA DO CIMENTO PORTLAND....	18
3.2.	DEFINIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND.....	19
3.3.	CONSTITUINTES DO CIMENTO PORTLAND.....	20
3.4.	TIPOS DE CIMENTO PORTLAND.....	20
3.5.	INDÚSTRIA CIMENTEIRA NO MUNDO E NO BRASIL.....	23
3.6.	CONTROLE DE QUALIDADE DO CIMENTO.....	24
3.7.	PROCESSO PRODUTIVO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....	25
3.7.1.	Matéria-Prima.....	26
3.7.2.	Mineração.....	27
3.7.3.	Britagem.....	27
3.7.4.	Pré-homogeneização.....	28
3.7.5.	Moagem de cru.....	29
3.7.5.1.	Corretivos.....	29
3.7.5.2.	Moinhos.....	29
3.7.5.3.	Qualidade da Farinha.....	31
3.7.6.	Homogeneização.....	32
3.7.7.	Moagem de combustível.....	33
3.7.8.	Torre de ciclones.....	34
3.7.9.	Forno rotativo.....	34
3.7.9.	Forno rotativo.....	34
3.7.9.1.	Coprocessamento.....	35
3.7.10.	Resfriador.....	36
3.7.11.	Cogeração.....	37

3.7.12.	Moagem de cimento.....	37
3.7.13.	Expedição.....	38
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
	REFERÊNCIAS	40

1. INTRODUÇÃO

O atual nível de competitividade e exigência do mercado orienta as empresas na busca por elementos capazes de gerar vantagem competitiva. Hodiernamente é marcante a busca incansável pelo equilíbrio entre a conservação do meio ambiente e a produção industrial, incentivando métodos que diminuam a interferência do homem sobre a natureza e que proporcionem uma melhor qualidade de vida para a população.

A emissão de gases na atmosfera é inevitável em processos industriais de combustão, sejam eles tratados ou não. O conhecimento destes é essencial para o controle da poluição ambiental, bem como para a segurança, operação e otimização do processo da planta industrial (FILHO, 2022).

O cimento é um aglomerante hidráulico que em contato com a água forma fases hidratadas responsáveis pela resistência mecânica, tendo sua maior aplicação na construção civil. O cimento Portland é um produto com vasto campo de aplicação resultando no surgimento de cimentos de classes diferentes (LIMA, 2011).

O processo produtivo do cimento não produz de forma direta resíduos sólidos, mas há uma alta emissão de poluentes gasosos e material particulado. Essa produção gera impactos à saúde humana, degrada e contamina a água e solo, desde a extração de matéria-prima passando pela emissão de material particulado, causador de muitos problemas respiratórios. Assim, a indústria cimenteira torna-se conhecida pelo seu elevado potencial poluidor, enfatizando as relações entre produção, ambiente e saúde.

Na busca por processos ecologicamente sustentáveis, a redução da emissão de poluentes deve levar em consideração o consumo de energia, a qualidade do produto e a redução dos custos de produção. Diante da essencialidade do cimento para a sociedade e a problemática ambiental envolvida nesse processo industrial, é de suma importância que o processo de produção do cimento seja objeto de estudo de trabalhos acadêmicos, com o objetivo de conhecê-lo, otimizá-lo e viabilizá-lo. Como resultado, a partir da análise do processo produtivo do cimento será ampliado o conhecimento a respeito desse produto, podendo contribuir positivamente para os pesquisadores da área, bem como para o desenvolvimento de melhorias para o setor a partir dos pontos abordados.

2. OBJETIVO

Descrever o processo de produção do cimento Portland brasileiro.

2.1. OBJETIVO ESPECÍFICO

- Detalhar as operações unitárias envolvidas no processo produtivo do cimento;
- Explanar a respeito dos parâmetros de controle de qualidade exigido para esse produto;
- Contextualizar como essas fábricas estão inseridas no Brasil e no mundo;

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Materiais cerâmicos têm como base a argila, que é plástica e moldável quando molhada, sendo produzidos inicialmente como peças artesanais, há séculos pela humanidade. A grande disponibilidade de matéria-prima fez com que, no Brasil, a indústria cerâmica tivesse um alto crescimento, sendo correspondente a 1% do PIB. O cimento faz parte da classe desses materiais, embora muitos não realizem essa consideração devido a pequenas diferenças na matéria-prima empregada e no processo produtivo. O mesmo atua como principal componente do concreto, material utilizado em todo tipo de construção, tornando-se de grande importância para economia (TOLENTINO, 2015).

As cerâmicas podem ser divididas em classes de acordo com diferenças na matéria-prima, aditivos e etapas de fabricação, sendo elas: cerâmica branca, de revestimento, vermelhas e avançada; materiais refratários; isolantes térmicos; fritas; abrasivos; vidros e cimento (TOLENTINO, 2015).

3.1. CONTEXTO HISTÓRICO DA INDÚSTRIA DO CIMENTO PORTLAND

A palavra cimento tem origem do latim *caementu* que correspondia a espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada (quebrada) na velha Roma. A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos. No Egito antigo, uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado era usada em monumentos (BATTAGIN, 2023).

Em 1756 o inglês John Smeaton conseguiu obter um produto de alta resistência através da calcinação de calcários moles e argilosos. O francês Vicat, considerado o inventor do cimento artificial, em 1818, por meio da mistura de componentes argilosos e calcários obteve resultados semelhantes aos de Smeaton (BATTAGIN, 2023).

No ano de 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin obteve um pó fino mediante a queima conjunta de pedras calcárias e argila em proporções certas e definidas. A mistura obtida, além de não se dissolver em água, após secar era tão dura quanto as pedras empregadas nas construções. Assim, por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland, o construtor a patenteou no mesmo ano como cimento Portland. A partir daí, seu uso e sua comercialização cresceram de forma gradativa em todo o mundo (BATTAGIN, 2023).

As primeiras iniciativas para a fabricação de cimento no Brasil ocorreram no final do século XIX. Em 1888, o comendador Antônio Proost Rodovalho empenhou-se em instalar uma fábrica em sua fazenda Santo Antônio, situada em Sorocaba-SP. Por iniciativa do engenheiro Louis Felipe Alves da Nóbrega, em 1892, durante apenas três meses, uma pequena instalação produtora funcionou na ilha de Tiriri, na Paraíba, sendo que sua construção data de 1890. Porém, o cimento só começou a ser produzido no Brasil em escala industrial no ano de 1926 com inauguração da fábrica Companhia Brasileira de Cimento Portland, em Perus/SP. Assim, em 1933, a produção nacional começava a ultrapassar as importações, até praticamente desaparecer nos dias de hoje (SNIC, 2023; BATTAGIN, 2023).

3.2. DEFINIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

Cimento Portland é a nomenclatura mundialmente convencionada para o material usualmente conhecido na construção civil como cimento. Resultante do processamento de matérias-primas abundantes em todo o planeta, o cimento é um pó fino e homogêneo que possui propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, endurecendo sob a ação de água (ABCP, 2023).

O clínquer Portland é composto majoritariamente por silicatos e aluminatos de cálcio hidráulicos, sendo um produto granulado obtido pela queima a altas temperaturas até a fusão parcial da mistura homogênea formada, resumidamente, pelos minerais calcário e argila, devidamente proporcionados e moídos. O cimento é produzido por meio da moagem de clínquer Portland, uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais. Esse aglomerante é classificado como ativo do tipo hidráulico artificial, que em contato com a água forma fases hidratadas responsáveis pela resistência mecânica. Por ser produto de processos realizados à altas temperaturas, o cimento tem a característica da ausência de água quimicamente combinada (BAUER, 2019; ABNT, 2018).

O cimento Portland é um material utilizado, principalmente, como aglomerante e tem sua maior aplicação na construção civil, atuando como componente básico para o concreto. O concreto é hoje o segundo material mais utilizado pelo homem, ficando somente atrás do elemento água. Apesar de ser perecível, ter baixa condição de estocagem e ocupar grandes espaços, ele é um produto com vasto campo de aplicação, graças as diferentes adições durante sua produção que resulta no surgimento de cimentos de diferentes classes no mercado brasileiro (LIMA, 2011).

O cimento Portland, por sua trabalhabilidade e moldabilidade, é um dos materiais de construção mais consumidos pelo homem. Essas características proporcionam a argamassas e concretos alta durabilidade e resistência a cargas e ao fogo. Diante da sua versatilidade, o cimento pode ser empregado em peças de mobiliário urbano, artes, grandes barragens, estradas, edificações, pontes, tubos de concreto e telhados (ABCP, 2023).

3.3. CONSTITUINTES DO CIMENTO PORTLAND

Fundamentalmente fazem parte da composição do cimento Portland a cal (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e magnésia (MgO). Além disso, uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO_3) é adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega desse material. Ainda possui impurezas, em menor quantidade, tais como óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O) e óxido de titânio (TiO_2). Os óxidos de potássio e sódio são designados como álcalis do cimento (BAUER, 2019).

A cal, sílica, alumina e óxido de ferro são os componentes essenciais do cimento Portland, constituindo, em geral, de 95 a 96 % do total. Também na análise de óxidos, a magnésia corresponde, frequentemente, de 2 a 3 % do todo, porém seu limite superior dado pela especificação é 5 %, sendo que no Brasil o valor máximo é 6,4%. Os óxidos menores apresentam-se em proporção inferior a 1 %, excepcionalmente 2 % (BAUER, 2019).

3.4. TIPOS DE CIMENTO PORTLAND

Os diferentes tipos de cimentos brasileiros, a partir de 2018, seguindo tendência internacional foram reunidos em apenas uma norma de especificação, a ABNT NBR 16697. Porém, essa norma não trata de cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos, que é especificado pela ABNT NBR 9831. Os cimentos Portland são designados por seu tipo que correspondem a adições e propriedades especiais. A nomenclatura dos cimentos é composta pela sigla, que corresponde ao prefixo CP (Cimento Portland) acrescido dos algarismos romanos de I a V, seguida de sua classe de resistência a compressão que pode ser 25, 32, 40 ou ARI. Quando aplicáveis, é adicionado a esse nome o sufixo RS ou BC, respectivamente, cimento que atende aos requisitos de resistente a sulfatos e à condição de baixo calor de hidratação (ABNT, 2018).

As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão, em megapascals (Mpa), aos 28 dias de idade, conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215. Já a classe de resistência ARI aplica-se apenas ao cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 Mpa quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 (ABNT, 2018). O Quadro 1 apresenta os cimentos normatizados brasileiros, com sua sigla e classe de resistência.

Quadro 1 - Cimentos normatizados brasileiros

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland Comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland Composto	Escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Material carbonático	CP II-F		
	Material pozzolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozzolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40	
	Não estrutural	CPB	-	-

Fonte: ABNT (2018).

O clínquer Portland branco, com teores limitados de óxidos corantes em sua composição, constitui o cimento branco, cujas adições, como o sulfato de cálcio, não devem gerar alterações em sua coloração além dos limites estabelecidos (ABNT, 2018). O cimento Portland branco, que possui emprego não estrutural, é isento de óxidos de ferro. Sua obtenção ocorre mediante cuidados adequados na escolha da matéria-prima e na condução do processo de fabricação (BAUER, 2019).

Na Quadro 2 contém as composições dos cimentos brasileiros, em porcentagem de massa, segundo a norma ABNT NBR 16697, estabelecendo os limites mínimos e máximos admissíveis na composição de cada tipo (ABNT, 2018). Aliado a isso, Bauer (2019) sintetiza

em um quadro as principais características químicas e físicas para os cimentos brasileiros segundo as normas ABNT, exposto no Quadro 3.

Quadro 2 – Limites de composições dos cimentos brasileiros (% em massa)

Sigla	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
CP I	95-100	0-5		
CP I-S	90-94	0	0	6-10
CP II-E	51-94	6-34	0	0-15
CP II-Z	71-94	0	6-14	0-15
CP II-F	75-89	0	0	11-25
CP III	25-65	35-75	0	0-10
CP IV	45-85	0	15-50	0-10
CP V-ARI*	90-100	0	0	0-10
CPB**	75-100	0	0	0-25
CPB***	50-74	0	0	26-50

*No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos. **Estrutural. ***Não estrutural

Fonte: ABNT (2018).

Quadro 3 - Principais características dos cimentos normatizados brasileiros

Tipos		CP comum			CP de alta resistência inicial	CP composto			CP de alto-forno			CP pozolânico	
Propriedades		25	32	40		25	32	40	25	32	40	25	32
MgO máx. (%)		6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	—	—	—	6,5	6,5
SO ₃ máx. (%)		4,0	4,0	4,0	3,5 se %C3A ≤ 8, senão 4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
CO ₂ máx. (%)		1,0	1,0	1,0	3,0	5,0	5,0	5,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Resíduo insolúvel (RI) máx. (%)		1,0	1,0	1,0	1,0	CPII-E e CPII-F: 2,5; CPII-Z: 16,0			1,5	1,5	1,5	—	—
Perda ao fogo máx. (%)		2,0	2,0	2,0	4,5	6,5	6,5	6,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Finura	Resíduo na peneira 0,075 máx. (%)	12,0	12,0	10,0	6,0	12,0	12,0	10,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
	m ² /kg	≥ 240	≥ 260	≥ 280	300	≥ 240	≥ 260	≥ 280	—	—	—	—	—
Tempo mínimo de início de pega, Vicat (h)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Expansibilidade a quente máx. (mm)		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Resist. à compressão mín. (MPa)	01 dia	—	—	—	14	—	—	—	—	—	—	—	—
	03 dias	8	10	15	24	8	10	15	8	10	12	8	10
	07 dias	15	20	25	34	15	20	25	15	20	23	15	20
	28 dias	25	32	40	—	25	32	40	25	32	40	25	32
Norma Brasileira		ABNT NBR 5732:1991			ABNT NBR 5733:1991	ABNT NBR 11578:1991			ABNT NBR 5735:1991			ABNT NBR 5736: 1991	

Fonte: Bauer (2019).

3.5. INDÚSTRIA CIMENTEIRA NO MUNDO E NO BRASIL

O total mundial de cimento produzido no mundo no ano de 2020 bateu 4.190.000.000 bilhões de toneladas, sendo o continente asiático o que mais produziu e consumiu esse produto, o equivalente a 80% da produção e consumo mundial, já o continente americano produziu e consumiu em torno de 6,4% do cimento do planeta. Também no ano de 2020, o Brasil figurou como o oitavo maior produtor e o sétimo maior consumidor de cimento do mundo. Dentro desse contexto, a região Nordeste com 13.442.000 milhões de toneladas de cimento produzidas em 2021, considerando o período de 2012 a 2021, destaca-se como a segunda maior produtora de cimento do Brasil, ficando atrás apenas do Sudeste (SNIC, 2021).

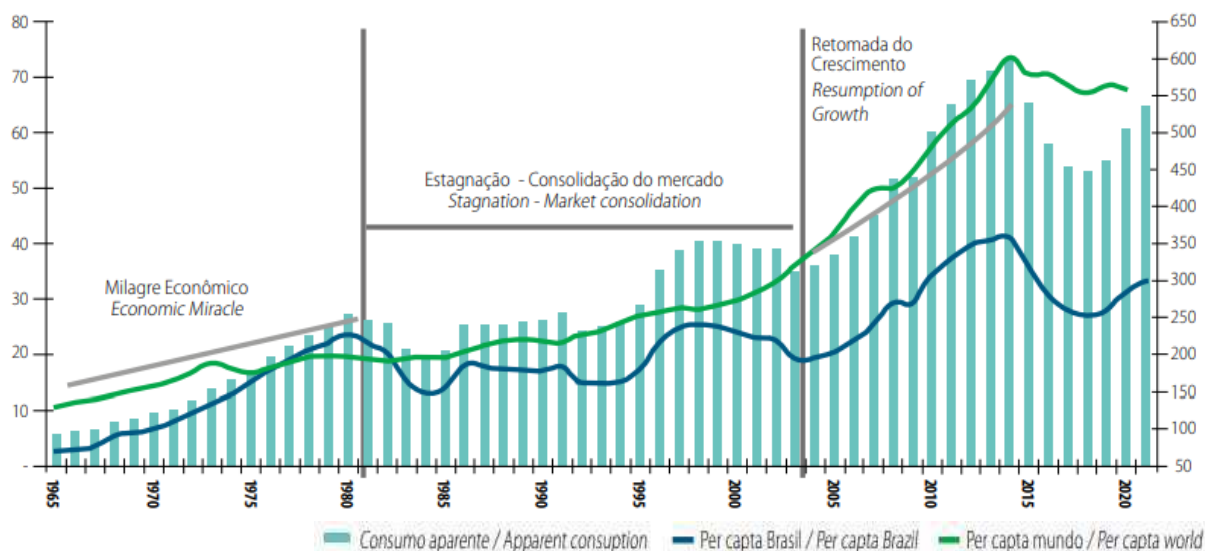
De acordo com Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC (2023), atualmente existem 23 grupos cimenteiros, nacionais e estrangeiros, com 91 fábricas produtoras espalhadas pelos estados brasileiros, exceto em Roraima, Amapá, Acre e Piauí, gerando 18 mil empregos diretos, com capacidade instalada calculada em 2022 de 94 milhões de t/ano.

Segundo o SNIC (2021) mesmo sendo o terceiro ano consecutivo de crescimento na produção de cimento, com uma alta de 6,8% e um total de 64,9 milhões de toneladas em termos de vendas, essa indústria ainda está distante de atingir o recorde de consumo de 72 milhões de toneladas obtido em 2014.

O Presidente do sindicato afirma que a indústria cimenteira no Brasil, permanece sofrendo com a forte pressão dos custos produtivos, como é o caso dos preços dos insumos, como a energia térmica e elétrica, refratários, embalagens e frete, iniciado durante a pandemia. Aliado a isso, o início do conflito entre Rússia e Ucrânia promoveu uma alta importante no preço do coque, principal insumo para geração de energia térmica (SNIC, 2021).

A Figura 1 representa o consumo aparente de cimento no Brasil de 1965 a 2021 em milhões de toneladas, além disso é exposto o consumo per capita no Brasil e no mundo nesses mesmos anos. Conforme demonstra essa Figura, em 2021, no Brasil houve um aumento de produção em 7,9% comparado à 2020, sendo produzidos 65,8 milhões de toneladas de cimento, no qual obteve-se o consumo aparente de 64,5 milhões de toneladas, ou seja, um crescimento também de 6,5% em relação à 2020. Em termos de consumo per capita subiu para 300 kg/hab/ano, o que correspondente a uma alta de 4,9% frente a 2020 (SNIC, 2021).

Figura 1 - Consumo aparente anual no Brasil (em milhões de toneladas)



Fonte: SNIC (2021).

3.6. CONTROLE DE QUALIDADE DO CIMENTO

A qualidade de um produto que é produzido em larga escala requer um sistema de verificação para uma rápida corretiva no processo de fabricação sempre que se fizer necessário. Dessa forma, para obtenção de um concreto ou uma argamassa de boa qualidade é imprescindível medir e manter as propriedades exigidas pelas normas (LISBOA; ALVES; MELO, 2017).

A ABCP participa do PSQ/PBQP-H como Entidade Setorial Nacional Mantenedora e como Entidade Gestora Técnica do Programa de Cimento Portland. Podem solicitar o Selo da Qualidade ABCP, toda empresa associada ou não da ABCP, que fabricar cimento Portland em conformidade com as especificações pertinentes das normas técnicas brasileiras da ABNT (ABCP, 2010).

Com a finalidade de obter a concessão do selo, a empresa passará por uma inspeção pela ABCP em seu laboratório, para verificação da existência do autocontrole integrado da fábrica, ou seja, se há ensaios diários de cada cimento por meio de procedimentos normalizados (normas ABNT). A validação do autocontrole é efetuada através da coleta trimestral de amostras de cimento, na qual é reservada uma porção para a fábrica e outra para a ABCP. Os ensaios são realizados na ABCP e os resultados, confrontados com os da fábrica. Caso todos os requisitos de reprodutibilidade entre os dois laboratórios estabelecidos pelas normas da ABNT forem atendidos, avança-se para a avaliação estatística do autocontrole e

uma vez evidenciada a conformidade, a fábrica recebe o selo para o produto solicitado (ABCP, 2010).

3.7. PROCESSO PRODUTIVO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Existem quatro tipos de processos para a fabricação do cimento Portland, que são via seca, via úmida, via semi-úmida e via semi-seca. Basicamente as mesmas etapas de fabricação estão envolvidas nesses processos: extração das matérias-primas, mistura, moagem e o aquecimento no forno para a formação do clínquer (SILVA, 1994).

Na produção do cimento por via úmida, a moagem da matéria-prima acontece com adição de água e é alimentada ao forno na forma de lama ou pasta, contendo de 30 a 40% de água. A opção por via seca nos modernos processos de fabricação acontece por ser energeticamente mais eficiente, pois antes de ir ao forno a água precisa ser retirada por evaporação. Fazem parte desse último processo o sistema de pré-aquecedores multifásicos suspensos com maior eficiência de troca térmica entre os gases e a farinha, exigindo 800 kcal de energia de combustível fóssil para produzir 1kg de clínquer, em contrapartida são requeridas cerca de 1.400 kcal/kg_{Clínquer} na fabricação via úmida (LISBOA; ALVES; MELO, 2017).

No processo de via semi-seca adiciona-se de 10 a 15% de água a matéria-prima e no semi-úmida acrescenta-se 20%. Em ambos os processos, a matéria-prima é seca em uma grelha de pré-aquecimento antes de ser introduzida no forno (BELATO, 2013).

A produção de cimento por via seca é o objeto de estudo desse trabalho, nele a mistura crua moída pulverizada é adicionada seca ao forno. Assim, esse método requer filtragem de material particulado e sistemas de moagem e forno mais complexos do que a via úmida. Entretanto, diminui os custos da empresa, pois garante maior eficiência energética, menor consumo de energia do forno, economia de combustível, além de ocasionar menores níveis de emissão de poluentes (BELATO, 2013).

A produção do Cimento Portland é uma atividade integrada de exploração e beneficiamento de substâncias minerais, tais como o calcário e argila, onde ocorre a extração das mesmas, britagem, moagem da mistura crua, homogeneização da farinha produzida, pré-calcinação da farinha, clínquerização, moagem do clínquer mais adições e posterior despacho do cimento.

O cimento Portland é um produto de preço relativamente baixo, que não comporta fretes a grandes distâncias. Atualmente as instalações industriais apresentam grande porte, localizam-se preferencialmente junto às jazidas e encontram-se em situação favorável quanto ao transporte do produto acabado aos centros consumidores (BAUER, 2019).

3.7.1. Matéria-Prima

As principais matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento são materiais calcários e argilosos. Entre os materiais calcários utilizados, encontram-se o calcário propriamente dito, conchas de origem marinha etc. Com relação aos materiais argilosos encontra-se a argila, xistos, ardósia e escórias de alto-forno (BAUER, 2019). Em percentual de argila e calcário (CaCO_3) têm-se a variação entre 75 e 80% de argila e 20 e 25% de calcário. A argila utilizada é composta basicamente de silicatos de alumínio e óxidos de ferro, silício e alumínio (TOLENTINO, 2015).

As argilas são coloides eletronegativos com grande plasticidade quando molhadas e capacidade de absorção e retenção de água. São formadas por silicatos hidratados de alumínio $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$, outros minerais não argilosos como hidróxido de ferro e alumínio, feldspato mica e quartzo e material orgânico (TOLENTINO, 2015).

Lisboa, Alves e Melo (2017) complementa que o calcário, sílica, alumina e óxido de ferro, principais constituintes do cimento, são quimicamente representados por uma letra para cada óxido, respectivamente, conforme o Quadro 4.

Quadro 4 – Principais óxidos constituintes do cimento

Óxido	Abreviação
CaO	C
SiO_2	S
Al_2O_3	A
Fe_2O_3	F

Fonte: Lisboa, Alves e Melo (2017).

3.7.2. Mineração

A atividade de mineração da rocha calcária é realizada em grandes pedreiras mecanizadas a céu aberto. A extração da matéria-prima se faz pela técnica usual de exploração de pedreiras no caso de rochas e xistos; usa-se a escavação, segundo a técnica usual de movimentação de terras, quando se trata de argila, e por dragagens, quando é o caso. Após extração, as rochas são desmontadas e reduzidas com explosivos para terem uma granulometria adequada (BAUER, 2019). Escavadeiras hidráulicas são usadas para remoção do calcário da mina e pás carregadeiras abastecem caminhões caçamba que transportam o minério para a britagem (SILVA NETO, 2018). A Figura 2 corresponde a mina de calcário de uma fábrica de cimento.

Figura 2 – Mina de calcário



Fonte: Brasil (2013).

3.7.3. Britagem

A matéria-prima, quando rochosa, é submetida a uma operação de beneficiamento com o propósito de reduzir a granulometria do material à condição de grãos de tamanho conveniente. Os materiais britados, calcário ou uma mistura de calcário e argila vermelha, por exemplo, são encaminhados a depósitos apropriados, de onde são processados segundo as duas linhas principais de operação: via seca e via úmida (BAUER, 2019). A figura 3, ilustra o britador do tipo martelo que possui elevada capacidade de produção, que opera com diâmetro

médio do material de alimentação de até 2,5 m e redução do mesmo até diâmetros menores que 25 mm (SILVA NETO, 2018).

Figura 3 – Britador primário do tipo martelo



Fonte: Silva Neto (2018).

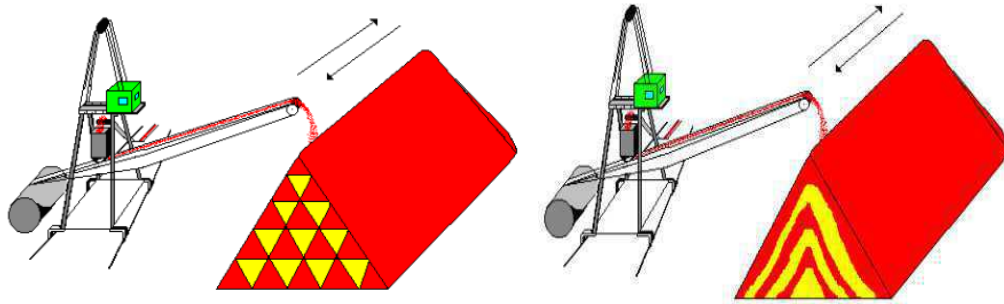
3.7.4. Pré-homogeneização

Após a britagem os materiais são transportados por correias para a pré-homogeneização em galpões, onde ficam armazenados, com o objetivo de minimizar os efeitos das variações na composição da matéria-prima. O empilhamento ocorre através de máquinas empilhadoras.

Dois métodos de empilhamento podem ser citados, o Chevron e o Windrow. O primeiro, apresenta uma ligeira segregação dos grossos no “pé da pilha”, segregação do material fino na parte central e o início e fim de pilha com maior variabilidade química e física, sendo um ponto de atenção para as cimenteiras que utilizam esse método, sua aplicação é em calcário ou argilal. O segundo método diminui consideravelmente a segregação, sendo mais utilizado para argilas e sua forma de retomada é via cadeia de alcatruz (JULIÁ, 2010).

No método de empilhamento Chevron, sobre a linha central da pilha, o material é depositado pela empilhadeira em movimentos da esquerda para a direita. Para garantir a boa mistura da pilha, recupera-se transversalmente a partir da face com o auxílio da retomadora que coleta o material da pilha e o encaminha para um silo de estocagem via correias transportadoras. A Figura 4 exemplifica esses métodos de empilhamento.

Figura 4 - Métodos de empilhamento Chevron e Windrow



Fonte: Juliá (2010).

3.7.5. Moagem de cru

Após todos os componentes armazenados nos silos serem dosados com o auxílio de balança localizada na parte inferior do silo, a mistura resultante segue para moagem, na qual pode acontecer em moinhos de bolas e/ou moinhos verticais, conforme a Figura 5 e 6. O resultado desse processo é um pó fino e homogêneo chamado farinha ou simplesmente cru (TOLENTINO, 2015).

3.7.5.1. Corretivos

Com o objetivo de obter a composição otimizada para a produção de clínquer, aditivos, como minérios de ferro e areia, podem ser utilizados para corrigir deficiências da argila na mistura que irá para o moinho (TOLENTINO, 2015).

3.7.5.2. Moinhos

O moinho de bolas é um equipamento cilíndrico horizontal rotativo, no qual possui em seu interior bolas metálicas que em movimento fragmentam as partículas através do impacto, compressão e cisalhamento. Acoplado ao moinho está o separador de partículas que seleciona

o material que não atingiu a granulometria desejável e o retorna para o moinho com a finalidade de reduzir o seu tamanho. A moagem reduz o tamanho das partículas para 0,05 mm e as mesmas são homogeneizadas em silos verticais (BELATO, 2013).

Figura 5 – Moinho de Bolas

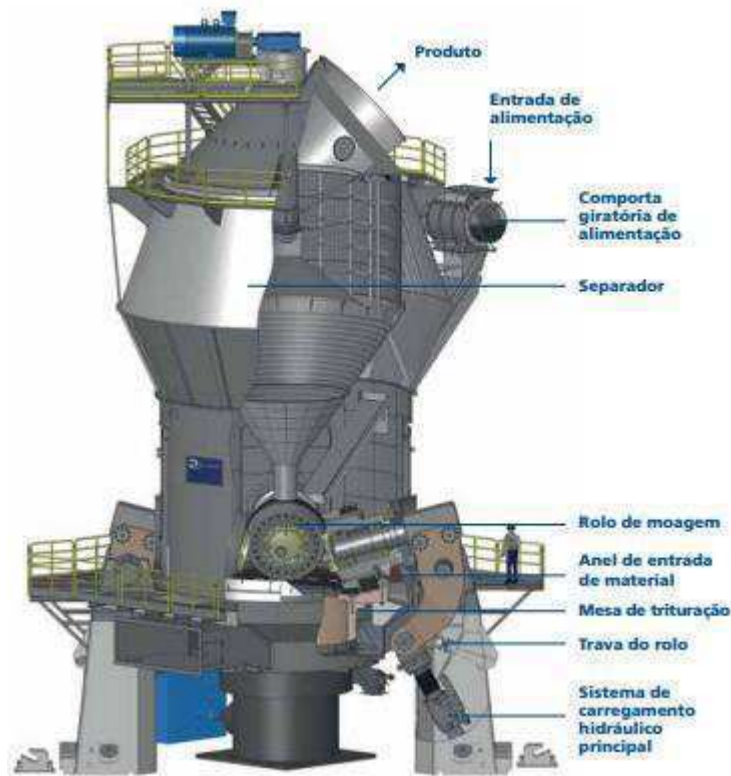


Fonte: GCP (2020).

Outro tipo de moinho utilizado na cominuição das matérias-primas é o vertical, que dependendo do fabricante possui características e dispositivos internos distintos. A característica principal dessa moagem é a presença de rolos que exercem pressão sobre a mistura de material que é alimentada no centro da mesa rotativa de moagem, devendo existir a especificação do gap entre rolo e mesa para não haver impacto direto entre os mesmos, uma vez que quanto menor o gap, maior a vibração do moinho e desgaste dessas estruturas.

Em seu trabalho Silva Neto (2018), explana a respeito das especificações de um moinho vertical. O mesmo possui quatro rolos com inclinação de 15° sobre a mesa rotativa com diâmetro de 3,8 m e capacidade nominal de 295 ton/h. A força centrífuga atual sobre o material na mesa, o qual é contido por um anel responsável por manter o leito de moagem estável. Um ventilador impulsiona os gases quentes do forno através do anel defletor localizado em torno da circunferência da mesa rotativa, esses gases secam e transportam o material moído ao separador. O separador, composto de aletas fixas e móveis, é quem controla a finura da farinha, que deve apresentar $10 \pm 1,33$ % de retidos na peneira #170 mesh (90 μ m), no ensaio de finura com 20 g da mesma. Esse moinho consegue reduzir a granulometria do material de 25mm-70 mm até 90 μ m.

Figura 6 – Moinho Vertical



Fonte: FLSMIDTH (2023).

3.7.5.3. Qualidade da farinha

Algumas relações são utilizadas para determinar a proporção dos componentes na mistura crua, tais como: o fator de saturação de cal (FSC) que é a relação do óxido de cálcio (majoritário) e os óxidos de sílica, alumínio e ferro; o módulo de alumínio (MA) que é a relação entre o óxido de alumínio sobre o ferro e o módulo de sílica (MS) que é a relação entre o óxido de sílica sobre os óxidos de alumínio e ferro, conforme as equações (1), (2) e (3).

$$FSC = \frac{CaO}{2,8SiO_2 + 1,18Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} \quad (1)$$

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2)$$

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3)$$

Um alto valor de FSC resulta em queima difícil da farinha; expansividade no cimento devido a CaO livre; aumento no conteúdo de C₃S e consequentemente redução no conteúdo de C₂S. Já um baixo FSC pode resultar em pega lenta (superqueima) e pega rápida (subqueima). O MS indica a proporção de elementos não fundentes e fundentes, determina a fase líquida e tem influência direta no desenvolvimento das reações de clínquerização. Um alto MS indica elevada carga térmica do forno; queima difícil; redução na quantidade de fase líquida; clínquer pulverulento e alto consumo de combustível. O módulo de Alumínio que define o quanto de alumina terá convertido em C₃A no forno e C₄AF, impacta a cor do clínquer e cimento, trabalhabilidade e resistência a sulfato. Um alto MA reduz a quantidade de fase líquida e a produção do forno e aumenta o calor de hidratação devido à presença de C₃A (BYE, 1999; SILVA NETO, 2018; LADEIRA, 2019).

3.7.6. Homogeneização

A farinha é então estocada em silos, onde é homogeneizada e segue para o processo de pré-aquecimento. Antes de realizar o processo de tratamento térmico da farinha que se irá se transformar em clínquer é necessário fazer uma boa homogeneização (LADEIRA, 2019).

O silo de farinha, exposto na Figura 7, opera em fluxo contínuo. No qual um distribuidor paralelo forma camadas horizontais de farinha, distribuindo-a uniformemente sobre toda a seção transversal do silo. Durante o processo de extração de farinha do silo, as válvulas de controle, instaladas na circunferência interior do silo de cone central, são ativadas em combinação com o sistema de aeração. Um controle programando alterna os pontos de extração que operam em pares de extrações opostas, são quatro pares e oito extrações (LIMA, 2019).

Figura 7. Silo de Farinha



Fonte: Lima (2019).

3.7.7. Moagem de combustível

Diferentes tipos de combustíveis podem ser utilizados no conjunto calcinador e forno, tais como coque de petróleo, óleo diesel e combustíveis alternativos provenientes do coprocessamento de resíduos industriais. Os combustíveis que alimentam os fornos são, na maioria dos casos, de fontes não renováveis, como o petróleo e o carvão. Dentre os combustíveis mais utilizados destacam-se o coque do petróleo e a gasolina, o gás natural e outros derivados do carvão mineral (ECYCLE, 2023).

O coque de petróleo é o principal combustível utilizado, sendo um material granular negro e brilhante formado principalmente por carbono (90 a 95%), mas também costuma apresentar um teor expressivo de enxofre (cerca de 5%). O uso desse combustível se justifica pelo seu elevado poder calorífico (ECYCLE, 2023).

A moagem acontece para o caso do combustível sólido, coque, no qual é utilizado o moinho de bolas, semelhante ao usado em moagem de cru e cimento.

3.7.8. Torre de ciclones

O processo de secagem e pré-aquecimento ocorre em um intercambiador de calor em corrente cruzada denominada como torre de ciclones no meio industrial. Nessa operação unitária, os gases do forno são utilizados para elevar a temperatura da farinha e realizar a descarbonatação. A farinha é alimentada no duto de gases do primeiro estágio e em seguida vai para o ciclone, onde ocorrerá a separação sólido-gás. A troca térmica acontece primeiramente em corrente cruzada e posteriormente em co-corrente, com os gases de combustão do forno rotativo que são alimentados no último estágio e seguem um caminho ascendente na torre (LADEIRA, 2019).

Na Pré-calcinação a farinha passa por um pré-aquecimento que aproveita os gases de saída do forno para aquecê-la, chegando à temperatura de 800°C. Na pré-calcinação é iniciada a descarbonatação do calcário, ou seja, começa a liberação de CO₂ e o carbonato de cálcio se transforma na cal, conforme a equação (4) (TOLENTINO, 2015).



3.7.9. Forno Rotativo

Depois de seca, pré-aquecida e parcialmente descarbonatada, A farinha segue para o forno rotativo, onde acontece o processo de clinquerização (LADEIRA, 2019). O forno rotativo é um cilindro de aço inclinado revestido com tijolos refratários. A farinha pré-aquecida e parcialmente calcinada entra pela extremidade superior (ponta alta) do forno em rotação contínua e é transportada para a parte inferior (ponta baixa), a uma velocidade controlada pela inclinação e velocidade de rotação do forno (LISBOA; ALVES; MELO, 2017).

O combustível é injetado pelas extremidades inferior da zona de calcinação, onde temperaturas de 1.450 a 1.550°C podem ser atingidas, temperatura na qual as reações químicas envolvendo a formação dos compostos do clínquer Portland são completados (LISBOA; ALVES; MELO, 2017).

No forno, ocorrem combinações químicas, principalmente no estado sólido, que conduzem à formação dos compostos: silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C3S}$); silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C2S}$); aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C3A}$) e o ferro aluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C4AF}$) (BAUER, 2019).

O silicato tricálcico (C3S) é o maior responsável pela resistência em todas as idades, principalmente até final do primeiro mês de cura. O silicato bicálcico (C2S) adquire maior importância no endurecimento em idades mais avançadas, sendo amplamente responsável pelo ganho de resistência a um ano ou mais. O aluminato tricálcico (C3A) também contribui para a resistência, especialmente no primeiro dia, ele também contribui significativamente para o calor de hidratação, especialmente no início do período de cura. O silicato tricálcico é o segundo componente em importância quanto a liberação de calor, sendo os demais desprezíveis. O aluminato de cálcio em sua forma cristalina é o responsável pela rapidez de pega, com a adição de gesso, o tempo de hidratação é controlado. O ferro aluminato de cálcio (C4AF) possui grandes vazios estruturais responsáveis pela reatividade elevada, nada contribuindo para a resistência. O silicato tricálcico (C3S) é o segundo responsável pelo tempo de pega do cimento. Os outros constituintes se hidratam lentamente, não tendo efeito sobre o tempo de pega (BAUER, 2019).

3.7.9.1. Coprocessamento

Ultimamente, a produção de cimento tem recebido importância devido ao fato de incorporar resíduos industriais em seu processo de fabricação (TOLENTINO, 2015). Essa indústria trabalha fortemente em projetos de substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, obtendo 28% de taxa de conversão energética. O coprocessamento contribui para a erradicação de lixões e melhoria do saneamento, gerando novos empregos e renda, podendo reduzir custos com saúde pública (SNIC, 2021).

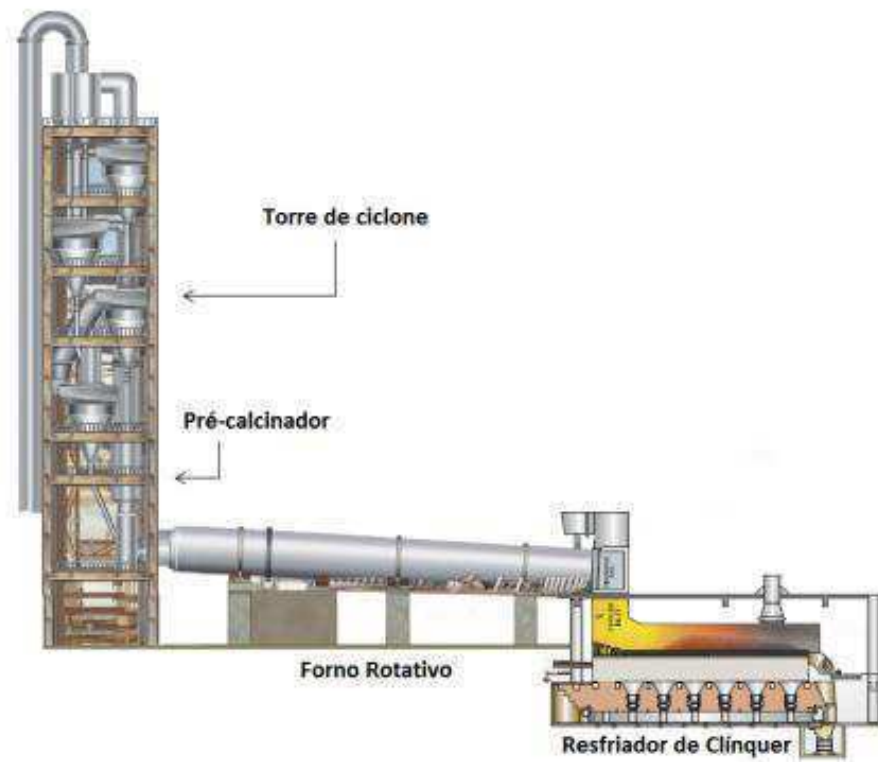
A tecnologia contempla o conceito de economia circular e no tripé da sustentabilidade, através da preservação dos recursos naturais e diminuição das emissões de gases de efeito estufa. É ainda vantajosa por aumentar a vida útil dos aterros e diminuir custo de energia térmica (SNIC, 2021).

3.7.10. Resfriador

Como alguns componentes do clínquer são instáveis, é necessário um resfriamento rápido do mesmo, pois o silicato tricálcio (C_3S) é instável a temperaturas inferiores a $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nesse resfriamento, ventiladores injetam ar nas câmaras e uma fina camada de ar passa através de placas para resfriar o clínquer. Em seguida, o clínquer segue para o silo e é transportado para moagem de cimento, onde clínquer, gesso e aditivos são moídos conjuntamente (TOLENTINO, 2015).

A Figura 8 demonstra o sistema composto pela torre de ciclones, forno rotativo e resfriador de clínquer.

Figura 8 – Torre de ciclones, forno e resfriador



Fonte: PATFAB ENGINEERS PVT. LTD. (2010).

3.7.11. Cogeração

O sistema de cogeração de energia recupera o calor residual proveniente do forno de clínquer através do ar quente do resfriador, conhecido internacionalmente como Waste Heat Recovery System (WHRS). Essa tecnologia comprovada é baseada no ciclo térmico de Rankine utilizando o calor residual para produção de vapor e geração de energia elétrica. Esse sistema requer alto custo de investimento e necessidade de um complexo planejamento e adaptação da planta. Sua aplicação na indústria de cimento na América é limitada, mas na China a maioria das fábricas já utilizam o sistema (SILVA NETO, 2018).

3.7.12. Moagem de cimento

A operação de moagem do clínquer é realizada em moinhos de bolas conjugados com separadores a ar ou em moinhos verticais. Para obtenção dos diferentes tipos de cimento, é necessário o incremento do gesso e aditivos para ajudar na moagem. O gesso é a matéria-prima essencial adicionada na moagem do cimento com intuito de controlar o tempo de endurecimento da massa de concreto, pois sem ele, o cimento endureceria muito rápido. Os aditivos escória de alto forno, material pozzolânico e cinzas têm o objetivo de conferir propriedades específicas ao cimento. A escória de alto forno oriunda de processos metalúrgicos industriais tem a finalidade de melhorar propriedades como resistência e diminuição do calor de hidratação. Materiais pozzolânicos tem como objetivo deixar o cimento mais resistente ao ataque de sulfatos, sendo utilizados em cimentos exposto à maresia e umidade. As cinzas são subprodutos de termoeletricas obtidos a partir da queima do carvão e apresentam propriedades pozzolânicas e hidráulicas (LADEIRA, 2019; BAUER, 2019).

3.7.13. Expedição

O cimento, após a moagem, é transportado para silos de estocagem e pronto para ser enviado aos clientes, seja na modalidade ensacado ou granel. O modal de transporte mais utilizado para transportar o cimento consumido no país é o rodoviário. Porém, na região norte

faz-se necessário a utilização do modal hidroviário. O sistema ferroviário ainda é pouco utilizado (SNIC, 2021).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo produtivo de fabricação do cimento envolve uma longa cadeia de etapas e equipamentos. Uma planta que possui a área de mineração, clínquerização e moagem, ou seja, uma planta industrial completa, torna-se autossuficiente apenas se uma etapa entregar os resultados de qualidade e volume necessários para a etapa seguinte. Assim, é imprescindível que as variáveis de processos e o controle de qualidade sejam medidas, monitoradas e controlados dentro da própria indústria.

Aliado a isso, os equipamentos necessitam de um acompanhamento rigoroso, de forma a agir de modo preditivo e corretivo para garantia da disponibilidade dos mesmos. Nessa perspectiva, a indústria de fabricação de cimento Portland é bem consolidada no mercado, complexa e abre uma ampla possibilidade de estudo desde o controle dos poluentes atmosféricos a otimização das máquinas e equipamentos, bem como estudos direcionados aos diversos setores ligados à produção industrial.

REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Básico sobre cimento**. 2023. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/>. Acesso em: 15 abril 2023.

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Selo da qualidade ABCP para cimento**. 2010. Disponível em: <https://abcp.org.br/selo-de-qualidade-abcp-cimento/>. Acesso em: 15 abril 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - requisitos**. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

ABNT NBR 9831, Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos – Requisitos e métodos de ensaio.

ABNT NBR 7215, Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. **UMA BREVE HISTÓRIA DO CIMENTO PORTLAND**. 2023. Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/historia/>. Acesso em: 03 fev. 2023.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. 1 v. E-book. ISBN 9788521636632. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636632/>. Acesso em: 01 maio 2023.

BELATO, Mariana Natale. **Análise da geração de poluentes na produção de Cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais**. 2013. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

BYE, Gerry. **Portland Cement**. 3. ed. Londres: ICE Publishing, 1999.

BRASIL, Notícias de Mineração (org.). **Holcim triplica sua capacidade de produção de calcário**. 2013. Disponível em: <https://www.noticiasdemineracao.com/produ%C3%A7%C3%A3o/news/1128590/holcim-triplica-sua-capacidade-produ%C3%A7%C3%A3o-calc%C3%A1rio>. Acesso em: 05 maio 2023.

ECYCLE, 2023. **Como ocorre o processo de produção do cimento e quais são seus impactos ambientais**. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/como-ocorre-o-processo-de-producao-do-cimento-e-quais-sao-seus-impactos-ambientais/>. Acesso em: 26 maio 2023.

FILHO, Renat Vergnhanini. Medição da Composição dos “Gases” de Combustão. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação**, São Paulo - SP, v. 6, ed. 19, Maio 2022. Disponível em: <http://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/153>. Acesso em: 15 maio 2022.

FLSMIDTH. **Moinho de Cimento Vertical de Rolos OK**. 2023. Disponível em: https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/milling-and-grinding/2017/fls-ok-mill_pt.pdf. Acesso em: 10 abril 2023.

GPC. **Medição da ventilação do moinho de bolas**. 2020. Disponível em: <https://gcpat.com.br/pt-br/about/news/blog/measuring-ball-mill-ventilation>. Acesso em: 10 maio 2023.

JULIÁ, Alexandre Font. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para dimensionamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério de ferro**. São Paulo, 2010. Dissertação (Mestrado Interdepartamental em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

LADEIRA, Pedro Lucas Gervásio. **Redução das emissões de nox na clínquerização pela utilização das técnicas de requeima e combustão estagiada**. 2019. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/RAOA-BCTLYH/1/dissertacao_pedro_ladeira_22.03.2019.pdf. Acesso em: 06 maio 2023.

LIMA, André Barbosa de. **O processo produtivo do cimento Portland**. 2011. 38 f. Monografia (Especialização) - Curso de Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9C6HHC/1/monografia_processo_produtivo_cimento_portland.pdf. Acesso em: 06 fev. 2023.

LIMA, Quezia. **HOMOGENEIZAÇÃO DA FARINHA: ESTUDO DE CASO NA INDÚSTRIA DE CIMENTO MIZU-BARAUNA/RN**. 2019. 25 f. Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Curso de Engenharia Química. Disponível em: https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/3715/2/QueziaFL_MONO.pdf. Acesso em: 25 abril 2023.

LISBOA, Ederval S.; ALVES, Edir S.; MELO, Gustavo H. A G. **Materiais de construção: concreto e argamassa**. Porto Alegre: Grupo A, 2017. E-book. ISBN 9788595020139. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595020139/>. Acesso em: 06 fev. 2023.

PATFAB ENGINEERS PVT. LTD. **“Scaling the tallest peak”**. 2010.

SILVA NETO, Francisco das Chagas Silva. **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. Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Curso de Engenharia Química, 2018. 65 f.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (São Paulo). **Dados do setor**. 2023. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>. Acesso em: 01 maio 2023.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2021**. São Paulo, 2021. 48 p. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2021.pdf. Acesso em: 01 maio 2023.

SILVA, Rogério Jose da. **Análise energética de plantas de produção de cimento Portland**. 1994. 259 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

TOLENTINO, Nathalia Motta de Carvalho. **Processos químicos industriais: matérias-primas, técnicas de produção e métodos de controle de corrosão**. São Paulo: Érica, 2015. E-book. ISBN 9788536531106. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536531106/>. Acesso em: 17 abr. 2023.