

CAIO RICHTMANN DE FIORE DE CASTRO OLIVEIRA

CONTRIBUIÇÃO À BUSCA DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ NA PRODUÇÃO
DE CIMENTO PELA DIMINUIÇÃO DO FATOR CLÍNQUER

São Paulo

2018

CAIO RICHTMANN DE FIORE DE CASTRO OLIVEIRA

CONTRIBUIÇÃO À BUSCA DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ NA PRODUÇÃO
DE CIMENTO PELA DIMINUIÇÃO DO FATOR CLÍNQUER

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Minas do curso de graduação do
Departamento de Engenharia de Minas e
de Petróleo da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. Luis Enrique
Sánchez

São Paulo

2018

TF-2018
OL4e
SIPAW
2928855

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

H 2018n



Catalogação-na-publicação

OLIVEIRA, CAIO RICHTMANN DE FIORE DE CASTRO
CONTRIBUIÇÃO À BUSCA DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO2 NA
PRODUÇÃO DE CIMENTO PELA DIMINUIÇÃO DO FATOR CLÍNQUER / C. R.
D. F. D. C. OLIVEIRA -- São Paulo, 2018.
41 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1. CIMENTO PORTLAND (PRODUÇÃO) 2. CLÍNQUER (REDUÇÃO;
ANÁLISE) 3. GÁS CARBÔNICO (EMISSÃO; REDUÇÃO) I. Universidade de São
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo
II.t.

DEDICATÓRIA

À minha irmã, Renata.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Luis Enrique Sanchez, pelas orientações e confiança.

Ao Professor Doutor Maurício Guimarães Bergerman, pelo suporte a atenção.

Aos colegas, Fábio Cirilo, Gabriela Hartin, Affonso Canoilas e Danielle Totti pelas conversas, orientações e conselhos.

Aos amigos da Escola pelos anos de convivência, apoio e amizade.

À minha família pelo carinho, ajuda e tranqüilidade.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional, paciência, força, incentivo e amor.

À Gabriela, pelo companheirismo, carinho, confiança, paciência e inspiração.

RESUMO

A Indústria cimenteira é responsável por importante fatia das emissões antropogênicas de gás carbônico globais. O controle e a regulamentação das emissões de CO₂ já é realidade em muitas partes do mundo e alvo de inúmeros estudos. Observando a cadeia produtiva do cimento, identifica-se que as emissões estão concentradas, sobretudo, na etapa de clinquerização, na qual, além da descarbonatação do calcário, ocorre a queima de grande quantidade de combustíveis fósseis. Após o levantamento da produção brasileira de cimento e clínquer do ano de 2017 e das emissões de CO₂ associadas à essa produção, determinou-se que o indicador de emissão específica de CO₂ por tonelada de clínquer produzido no Brasil é de 885 KgCO₂/t clínquer. Com apoio das normas técnicas, foram traçados alguns cenários de diferentes níveis de fator clínquer para se observar como as emissões de CO₂ se comportariam em cada um destes cenários. Neste trabalho conclui-se que existe relação entre menor fator clínquer e menor nível de emissões, e que esta relação tem um grande potencial para contribuição de uma indústria mais sustentável, reduzindo em até 20% as emissões nacionais. Apesar de existirem desafios técnicos, logísticos e operacionais fica claro que o caminho para uma produção de cimento mais sustentável passa pela redução do fator clínquer e aumento do uso de cimento com adições pela indústria de construção civil.

Palavras chave: indústria cimenteira, fator clínquer, emissões de CO₂, normas técnicas.

ABSTRACT

The cement industry is responsible for considerable part in the anthropogenic emissions in the planet. The control and regulation of CO₂ emissions is already reality in a lot of locations worldwide and is target of many studies. Analyzing the hole productive chain it is possible to identify that one of the steps concentrate most of the emissions, on the cement kiln, besides the emissions related to calcination of limestone, there is a lot of emissions related to the combustion of fossil fuels. By determining the Brazilian cement and clinker production in 2017 and the CO₂ emissions associated to that production we were able to estimate the industry specific emission factor of 885 KgCO₂/tclinker in 2017. With the help of the technical standards, we drew different scenarios of clinker factor and analyzed how the CO₂ emissions were in each scenario. It can be concluded that exist a relationship between lower clinker factor and lower CO₂ emissions and that relationship has a great potential to contribute to a more sustainable industry, reducing up to 20% the national emissions. Despite the technical, logistic and operational challenges it is clear that the path to a more sustainable cement production passes through a reduction on clinker factor and a growth in the consumption of blended cement.

Key words: cement industry, clinker factor, CO₂ emissions, technical standards

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVOS.....	10
2.1. OBJETIVO GERAL.....	10
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1. O QUE É CIMENTO.....	10
3.2. PROCESSO DE PRODUÇÃO.....	11
3.3. FATOR CLÍNQUER.....	13
3.4. MATERIAIS CIMENTÍCIOS.....	15
3.4.1. Escória da produção de gusa.....	15
3.4.2. Materiais pozolânicos.....	16
3.5. TIPOS DE CIMENTO.....	18
3.6. EMISSÕES SETORIAIS DE GASES DE EFEITO ESTUFA.....	21
3.6.1. Diretrizes para emissões relacionadas à energia e combustão.....	22
3.6.2. Diretrizes para emissões relacionadas à descarbonatação do calcário.....	23
3.6.3. O inventário nacional de emissões.....	25
4. MÉTODOS E DADOS.....	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
5.1. PRODUÇÃO DE CIMENTO E CLÍNQUER.....	28
5.2. EMISSÃO ESPECÍFICA DA PRODUÇÃO DE CLÍNQUER.....	29
5.3. LIMITE DAS NORMAS TÉCNICAS.....	31
6. CONCLUSÃO.....	34
REFERÊNCIAS.....	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Matéria prima para produção de cimento.....	11
Figura 2. Fluxograma do Processo produtivo do cimento.....	12
Figura 3. Distribuição da demanda energética por etapa do processo.....	13
Figura 4. Evolução do fator clínquer pelo mundo.....	14
Figura 5. Evolução do fator clínquer no Brasil.....	15
Figura 6. Principais grandes tipos de cimento.....	20
Figura 7. Produção anual brasileira de cimento segundo tipo.....	20
Figura 8. Presença de taxação de CO ₂ no mundo.....	21
Figura 9. Principais dados e fontes.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composicao dos cimentos portland segundo antiga norma.....	18
Tabela 2. Composicao dos cimentos portland segundo nova norma atualizada.....	19
Tabela 3. Composicao dos tipos de cimento segundo norma européia.....	19
Tabela 4. Quantidade e tipos de cimento produzidos no Brasil.....	20
Tabela 5. Produção e fator clínquer 2016.....	28
Tabela 6. Produção e fator clínquer 2017.....	28
Tabela 7. Emissões energéticas 2017.....	30
Tabela 8. Emissão específica de CO ₂ por tonelada de clínquer.....	31
Tabela 9. Mix percentual de cimento produzido.....	31
Tabela 10. Limite mínimo de clínquer por tipo de cimento.....	32
Tabela 11. Fator clínquer e produção em cada cenário.....	32
Tabela 12. Emissões totais de CO ₂ nos cenários simulados.....	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BEN – Balanço Energético Nacional

CEN – *Comitê European de Normalisation*

CSI – *Cement Sustainability Initiative*

EPD - *Environmental Product Declaration*

GNR – *Getting the Numbers Right*

IEA – *International Energy Agency*

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LCA – *Life Cycle Assessment*

MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

NBR – Norma Brasileira Registrada

OECD - *The Organisation for Economic Co-operation and Development*

PCA – *Portland Cement Association*

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

UNEP – *United Nations Environment Programme*

TEP – ToneladaEquivalente de Petróleo

WBCSD – *World Business Council for Sustainable Development*

1. INTRODUÇÃO

A indústria cimenteira desempenha um papel fundamental no desenvolvimento mundial atendendo a demanda da sociedade por habitação e infraestrutura. Casas, escolas, hospitais, indústrias, escritórios, estradas e até mesmo rede de tubulação subterrânea de água e esgoto, necessitam do cimento, material que atualmente não têm substitutos, em termos de efetividade desempenho e preço, para uma gama gigantesca de aplicações. Números do SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento apontam que no Brasil, no ano de 2016, tivemos uma produção de 57 milhões de toneladas gerando 25 mil empregos diretos nas 101 fábricas, presentes em 88 municípios e 24 estados, com capacidade anual de mais de 100 milhões de toneladas.

Segundo o WBCSD (World Business Council for Sustainable Development, 2009), o concreto, composto por cimento, areia e brita, é o material mais consumido do mundo depois da água.

A indústria cimenteira é uma das maiores emissoras de gases de efeito estufa. Neste contexto, o CO₂ é um dos principais gases mapeados devido à sua participação, que corresponde a 98,5% das emissões de GEE (INGRAO, 2014), e implicância direta no aumento da temperatura global e consequências climáticas. No ano de 2010 o setor de cimento foi responsável pela emissão de 2833 milhões de toneladas de CO₂ (OECD, 2012), o que correspondeu a quase 9% das emissões globais derivadas da queima de combustíveis fósseis daquele ano (KAJASTE, 2015).

A produção de cimento responde por fatia importante das emissões antropogênicas, sendo tema recorrente em ações e comitês globais para o desenvolvimento sustentável. Estimativas recentes apontam que as emissões relacionadas ao processo produtivo contribuem com 5% das emissões antropogênicas totais de CO₂ excluindo mudanças no uso da terra (BODEN, 2017). A produção global de cimento cresceu muito nos últimos anos, quadruplicando desde 1990, e crescendo 73% de 2005 a 2013, passando de 2310 Mt para 4000 Mt anuais (CEMBUREAU, 2014). Como consequência desse grande aumento na produção de cimento, as emissões de CO₂ também se elevaram muito. Enquanto que em 1990 as emissões eram de 570 milhões de toneladas, em 2006 esse valor triplicou atingindo 1.88 bilhões de toneladas

(BODEN, 2011). Depois de combustíveis fosseis e uso da terra, a produção de cimento é a terceira maior fonte antropogênica de emissão de dióxido de carbono (ANDREW, 2018).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo é avaliar a redução das emissões de CO₂ propiciadas pela substituição de clínquer por outros materiais cimentícios.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho tem o objetivo de quantificar as emissões de CO₂ associadas à produção de cimento brasileira no ano de 2017, bem como quantificar a relação entre a diminuição do uso de clínquer no cimento e a redução potencial das emissões de CO₂ da indústria cimenteira.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. O QUE É CIMENTO

Segundo Petrucci (1978), o cimento portland é um material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio que, ao serem misturados com água, hidratam e produzem o endurecimento da massa, que pode então oferecer elevada resistência mecânica.

A mistura de agregados, cimento e água é o concreto. A força e durabilidade do concreto fazem com que ele seja um dos materiais mais úteis produzidos pelo homem. (WBCSD - *World Business Council for Sustainable Development*).

Pela ABNT na NBR5732 de 1991, cimento portland comum é “*aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos*”

A ABCP (*Associação Brasileira de Cimento Portland*) define cimento como “*um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água. Na forma de concreto, torna-se uma pedra artificial, que pode ganhar formas e volumes, de acordo com as necessidades de cada obra*”.

O cimento pode conter muitos constituintes entre componentes principais, aditivos e variedades. O quadro da figura 1 mostra alguns dos possíveis elementos que podem compor os mais variados tipos de cimento.

Figura 1. Matéria prima para produção de cimento

Grupo	Exemplos de materiais/matéria prima
Ca	Calcário Outro como: -Lodo de cal de água encanada ou tratamento de esgoto -Cal hidratada -espuma de granulado de concreto -fluoreto de cálcio
Si	Areia Areia de fundição usada
Si - Al	Argila Betonita/caulinita
Fe	Minério de ferro Outros materiais da indústria do ferro e do aço como: -pirita de queima -minério contaminado -óxido de ferro/mistura de cinzas volante -poeira de siderúrgica -Carepa
Si - Al - Ca	Escória granulada de alto-forno Cinzas volantes Óleo de xisto Cinza vulcânica Outros como: -Resíduos de papel -cinzas de processos de incineração -resíduos minerais
Al	Materiais da indústria metalúrgica como: -resíduos de reprocessamento de escória -hidróxido de alumínio
S	Gipsita Anidrido Gesso de dessulfurização de gás de combustão

Fonte: Verein Deutscher Zementwerke (2010)

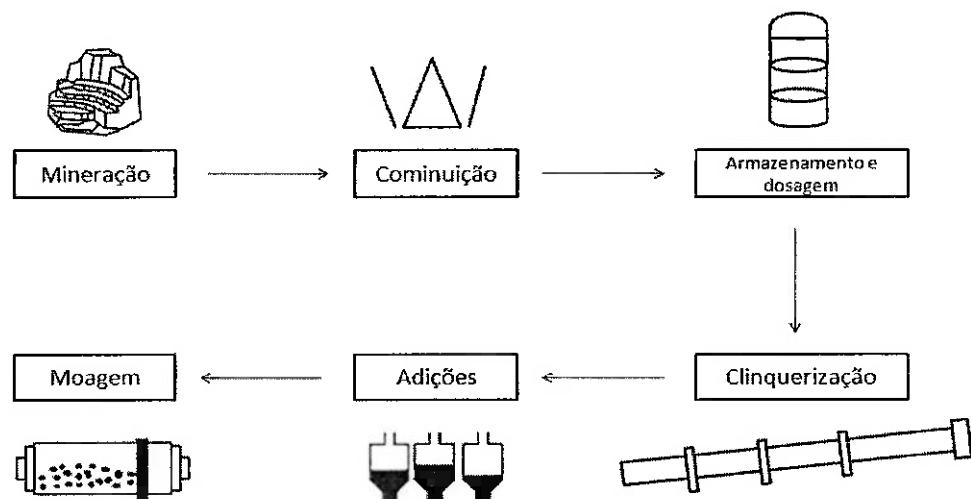
3.2. Processo de produção

O processo produtivo mais moderno e utilizado de produção de cimento portland é o chamado método a seco. A PCA (*Portland Cement Association*) e a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) descrevem o processo de fabricação a seco de maneira semelhante: o primeiro passo é justamente a mineração das principais matérias primas, principalmente

calcário, argila e outros materiais. Depois da extração, o material passa por duas ou mais etapas de britagem sendo reduzido a algo em torno de 75 mm ou menor. Os materiais podem ser armazenados separadamente e então são dosados, recebendo inclusive adição de minério de ferro e cinza volante, para moagem em moinho de bolas, rolo ou barras sendo obtida uma farinha com partículas de aproximadamente 0,050 mm em média. Este material segue para a clinquerização. Antes da entrada no forno propriamente dito, onde ocorre a calcinação a 1450 °C de temperatura, o material passa por pré-aquecedores, equipamentos que aproveitam o calor dos gases gerados no próprio forno promovendo um aquecimento inicial. Dentro do forno de cimento, cilindro rotativo de aço, revestido por tijolos refratários e com comprimento de 50 a 150 metros, um dos maiores equipamentos industriais móveis que existem, a mistura é calcinada formando o clínquer. Este produto que sai pela outra extremidade do forno, devido a sua pequena inclinação, possui aspecto de bolotas escuras do tamanho de bolinhas de gude que é então resfriado, completando o procedimento de clinquerização. A última etapa da produção é uma moagem fina do clínquer, juntamente com algumas adições podendo conter gesso, calcário e cimentícios. Após esta última etapa de moagem, obtém-se um produto extremamente fino, que é o cimento como conhecemos.

Apesar deste método a seco ser o mais popular, ainda encontram-se lugares onde se utiliza do procedimento via úmido, em que, basicamente, o mecanismo é similar com a diferença da adição de água na cominuição das matérias primas, secagem e depois sua alimentação ao forno. Os principais macro estágios da cadeia produtiva estão representados na Figura 2

Figura 2. Fluxograma do processo produtivo do cimento

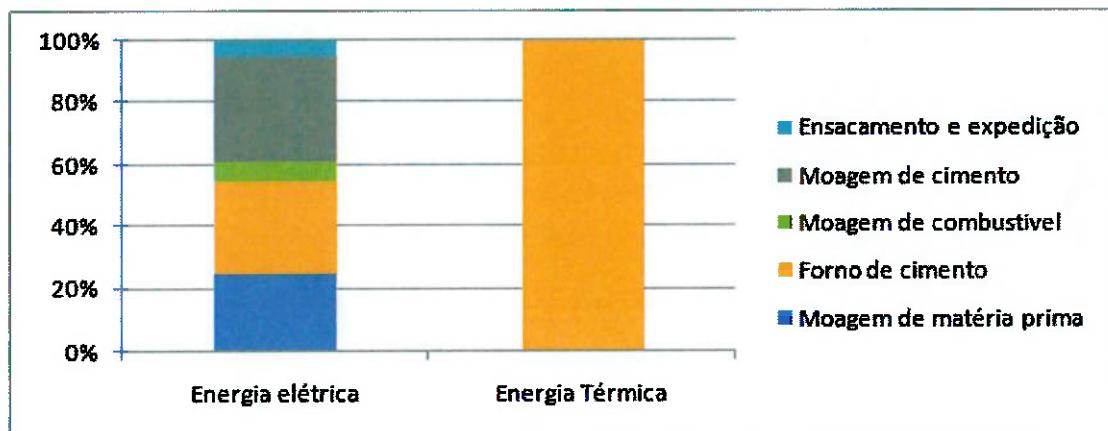


Fonte: ABCP (2018)

As emissões de CO₂ do processo estão especialmente concentradas na etapa de clinquerização. Por volta de 40% das emissões estão associadas a combustão de combustíveis fosseis para aquecer o forno, e em torno de 50% das emissões estão relacionadas a descarbonatação do calcário. O restante, entre 5 e 10%, está relacionado às emissões indiretas relativas ao consumo de energia elétrica (RUBENSTEIN, 2012). Além de CO₂, há ainda, emissões de CH₄ e N₂O, em decorrência da queima de combustíveis fósseis. As emissões destes gases, no entanto, não são tão representativas quanto as de CO₂: enquanto a produção de cimento respondeu por, aproximadamente, 26% das emissões industriais de CO₂ em 2015, os percentuais de metano e óxido nitroso ficaram próximos a 2% (MCTIC 2017).

O consumo de energia está também concentrado nesta etapa de clinquerização da cadeia produtiva. O gráfico da figura 3 mostra a distribuição da demanda energética entre as etapas do processo.

Figura 3. Distribuição da demanda energética por etapa do processo



(Fonte: Technology Roadmap, Low Carbon Transition in the Cement Industry, IEA 2018)

3.3. Fator clínquer

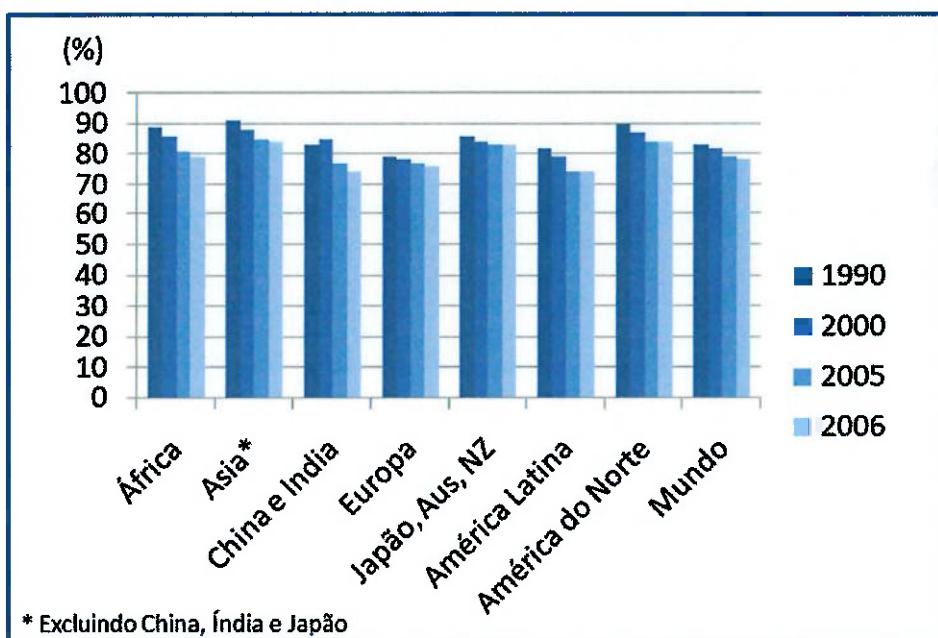
O clínquer, como exposto, é o principal insumo da indústria cimenteira, formado por calcário (~90%), argila (~10%) e adições, produto da calcinação em fornos rotativos. O clínquer, um produto constituído na sua maior parte por silicatos (75%) e em proporções menores de aluminatos e ferro-aluminatos cálcicos (COUTINHO, 2002). Estas pelotas cinza, que saem do forno com um diâmetro médio de 3 mm a 25 mm, são moídas com adição de substâncias chamadas cimentícias, constituindo o cimento.

Estas adições podem envolver uma variedade de componentes, em diversas quantidades para muitas finalidades. Nesse contexto, o clínquer pode representar variadas frações do produto final, dando origem a um importante indicador.

“O chamado fator clínquer (FC) é a proporção de clínquer no cimento. Ele pode ser derivado para qualquer produto de cimento, mas é principalmente utilizado como um indicador da média de substituição de clínquer de um produtor, uma área ou do mundo” (SCHNEIDER, 2011).

Originalmente, até o final da década de 60 e começo da década de 70, a indústria cimenteira tinha como produto base, um cimento com 95% de clínquer e gesso. O panorama mundial já se alterou muito, com vários tipos de produtos e a disseminação do uso de substitutos e consequente redução do fator clínquer. A evolução de como este fator tem variado ao longo das últimas décadas está representada no gráfico da figura 4.

Figura 4. Evolução do fator clínquer pelo mundo

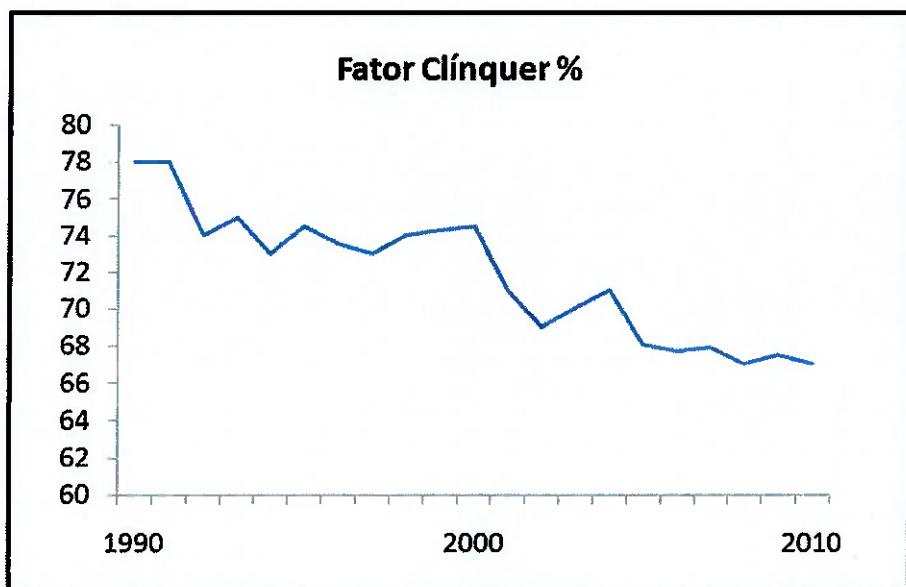


(Fonte: WBCSD – Getting the Numbers Right report, 2009)

Pode-se observar o decréscimo no fator clínquer ao longo dos anos. Estimativas mais atuais já sugerem uma média global de 65% (IEA, 2017). No entanto este valor pode ser reflexo da produção chinesa, 60% da média mundial e com grande utilização de substitutos (fator clínquer < 0.6), devido a grande disponibilidade de cinzas e escória.

No Brasil, observa-se este mesmo movimento, seguindo a tendência de redução mundial como pode-se observar no gráfico da figura 5. Os números colocam-no numa posição mundial favorável.

Figura 5. Evolução do fator clínquer no Brasil



Fonte: Andrew (2018)

3.4. Materiais Cimentícios

Diversos materiais são utilizados e estudados na substituição do clínquer, Schneider (2011) descreve “enquanto a produção de cimento, em seus primórdios, só focou no cimento portland comum, cimentos posteriores com vários constituintes principais foram produzidos substituindo partes do conteúdo do clínquer por materiais cimentícios suplementares. Como tal, cinzas volantes de usinas a carvão, escória granulada da produção de gusa, bem como pozolanas naturais foram usadas cada vez mais. Também o calcário pode substituir parte do clínquer no cimento”.

3.4.1. Escória da produção de gusa

A escória granulada de alto-forno é um sub-produto da fabricação do gusa nos altos-fornos, constituído em sua maior parte de aluminossilicatos de cálcio na forma vítrea. A fusão da ganga do minério de ferro e dos fundentes através de reações químicas formam a escória. Além dos aluminossilicatos cálcicos, ocorrem secundariamente a formação de sulfetos de

cálcio e manganês e óxidos de ferro e manganês (BATAGIN e ESPER, 1988; JACOMINO et al. 2002).

Para que a escória possua atividade hidráulica, ela deve estar no estado amorfo, ou seja, deve ser resfriada rapidamente desde o estado líquido a 1500°C até a temperatura de 200 °C, evitando associações dos átomos segundo as próprias afinidades, em cristais, fato este conhecido como cristalização. A ação de resfriamento brusco da escória líquida é denominado granulação (JACOMINO et al., 2002).

Segundo a ABCP (2002), na sétima edição de seu guia básico de utilização do cimento portland: antigamente, a escória de alto-forno era considerado um material sem maior utilidade, hoje sabe-se que ela tem propriedade de ligante hidráulico muito resistente, desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante a do clínquer.

A ABNT define, na NBR5735 de 1991, escória granulada de alto-forno como “*subproduto do tratamento de minério de ferro em alto-forno, obtido sob forma granulada por resfriamento brusco, constituído em sua maior parte de silicatos e aluminossilicatos de cálcio.*”

3.4.2. Materiais Pozolânicos

A ABNT define na NBR 5736 de 1991: “*materiais silicosos ou silicoaluminosos que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentícias*”.

Cinzas Volantes (*fly ash*)

Segundo Basham (2007), cinzas volante são um subproduto da queima de carvão pulverizado em usinas geradoras de energia elétrica. Durante a combustão, as impurezas minerais do carvão (argila, feldspato, quartzo e xisto) fundem-se em suspensão e flutuam para fora da câmara de combustão com os gases de exaustão. À medida que o material fundido sobe, ele se resfria e se solidifica em partículas vítreas esféricas chamadas cinzas volantes.

Cinza volante é usada como material suplementar de cimento (SCM) na produção de cimento portland. Um material suplementar de cimento, quando usado em conjunto com cimento portland, contribui às propriedades do concreto endurecido através de atividade hidráulica ou pozolânica, ou ambas. Como tal, os SCM's incluem tanto materiais pozolânicos quanto

hidráulicos. Uma pozolana é definida como um material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouco ou nenhum valor cimentício, mas que, finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio em temperaturas normais para formar compostos com propriedades cimentícias. Pozolanas comumente usadas em concreto incluem cinza volante, sílica ativa e uma variedade de pozolanas naturais, como argila calcinada e xisto e cinzas vulcânicas. (THOMAS 2007)

A ABNT define, na NBR 5736 de 1991, cinzas volantes como “*resíduos finamente divididos provenientes da combustão de carvão pulverizado ou granulado.*”

Pozolanas

Como citado por Thomas (2007), além de cinzas volantes, existem outros tipo de materiais pozolânicos como sílica ativa, argila calcina e pozolanas naturais.

“A sílica ativa é um subproduto do processo de fabricação do silício metálico ou das ligas de ferrosilício. A produção destas ligas se dá em fornos elétricos de fusão, tipo arco-voltaico em temperaturas de aproximadamente 2000°C” (MENDES, 2002).

Uma forma de se classificar os materiais pozolânicos diz respeito a sua origem. Elas podem ser: rochas vulcânicas ácidas, tufos vulcânicos, terras diatomáceas, arenitos e folhetos opalinos e argilitos de argilas mal cristalizadas. Essa classificação é conveniente pois dependendo de sua origem, as pozolanas podem apresentar variações consideráveis nas suas propriedades conforme as características físicas, mineralógicas e seus componentes ativos das rochas. (NETTO, 2006)

“Materiais pozolânicos naturais podem ser classificados, segundo sua origem, como: rochas vulcânicas ácidas, tufos vulcânicos, terras diatomáceas, arenitos e folhetos opalinos; argilitos de argilas mal cristalizadas. Dependendo de sua origem, as pozolanas naturais apresentam variações consideráveis nas suas propriedades à medida que variam os componentes ativos das rochas e suas características físicas e mineralógicas” (Netto, 2006)

Da mesma forma, Mehta (1987) afirma que nem sempre é fácil classificar uma pozolana natural, pois sendo um material natural, raramente apresenta apenas um constituinte reativo com o hidróxido de cálcio, e sua composição e propriedades variam bastante. Mesmo assim, baseado nos principais constituintes reativos com a cal presentes nos materiais, as pozolanas

naturais podem ser classificadas em quatro categorias: vidro vulcânico, tufo vulcânico, argila calcinada e sílica opalina (NETTO, 2006).

3.5. Tipos De Cimento

Como apresentado na seção 3.1, o cimento pode conter muitos constituintes, dando origem a muitos tipos de produtos com diferentes características de usos e aplicações. Os diferentes países ou regiões têm seus mercados e produções regidos por diferentes especificações determinadas por agências reguladoras de normas técnicas. Segundo Bhushan (2010), o uso de substitutos de clínquer no mundo é menor do que o permitido nas normas técnicas e regulamentações nacionais.

No Brasil, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), por meio das normas técnicas NBR 11578, NBR 5732, NBR 5735, NBR 5736 e NBR 5733, traz as seguintes especificações gerais de composição para os diferentes tipos de cimento, como pode ser visto na tabela 1.

Tabela 1. Composição dos cimentos portland segundo antiga norma

Cimento Portland (ABNT)	Tipo	Clínquer + Sulfato de cálcio (%)	Escória de alto-forno (%)	Material Pozolânico (%)	Material Carbonático (%)
CP I	Comum	100	0	0	0
CP I-S	Comum	95 - 99		1 - 5	
CP II-F	Composto	90 - 94	0	0	6 - 10
CP II-E	Composto	56 - 94	6 - 34	0	0 - 10
CP II-Z	Composto	76 - 94	0	6 - 14	0 - 10
CP III	Alto-forno	25 - 65	35 - 70	0	0 - 5
CP IV	Pozolânico	45 - 85	0	15 - 50	0 - 5
CP V	Alta Resistência Inicial	95 - 100	0	0	0 - 5

Fonte: ABNT (1991).

Em julho de 2018 ocorreu uma atualização das normas técnicas por parte da ABNT. Essa mudança unificou oito normas técnicas com a publicação da NBR 16697, que visa um maior alinhamento com padrões internacionais. A nova norma traz as seguintes especificações, ilustradas na tabela 2.

Tabela 2. Composição dos cimentos portland segundo nova norma atualizada

Cimento Portland (ABNT)	Tipo	Clínquer + Sulfato de cálcio (%)	Escória de alto-forno (%)	Material Pozolânico (%)	Material Carbonático (%)
CP I	Comum	95 - 100		0 - 5	
CP I-S	Comum	90 - 94	0	0	6 - 10
CP II-F	Composto	75 - 89	0	0	11 - 25
CP II-E	Composto	51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
CP II-Z	Composto	71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
CP III	Alto-forno	25 - 65	35 - 75	0	0 - 10
CP IV	Pozolânico	45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
CP V	Alta Resistência Inicial	90 - 100	0	0	0 - 10

Fonte: ABNT (2018).

Na europa, o CEN (*Comité Européen de Normalisation*), comitê europeu de normatização, regula ou normatiza os tipos de cimento produzidos pelos países aderidos (Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca, Espanha, Finlândia, França, Grécia, Islândia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Holanda, Noruega, Portugal, Suécia, Suiça, República Checa e Reino Unido).

A EN 197-1 de 2000 traz as especificações e conformidades para o cimento. Existe uma gama grande de diferentes tipos de produto, a tabela 3 traz alguns destes tipos e suas especificações quanto a composição

Tabela 3. Composição dos tipos de cimento segundo norma européia

Cimento (European Standard)	Tipo	Clínquer + Sulfato de cálcio (%)	Escória de alto-forno (%)	Material Pozolânico (%)	Calcário (%)	constituintes adicionais (%)
CEM I	Comum	95 - 100	0	0	0	0 - 5
CEM II - S	Composto	65 - 94	6 - 35	0	0	0 - 5
CEM II - P	Composto	65 - 94	0	6 - 35	0	0 - 5
CEM II - L	Composto	65 - 94	0	0	6 - 35	0 - 5
CEM III	Alto-forno	5 - 64	36 - 95	0	0	0 - 5
CEM IV	Pozolânico	45 - 89	0	11 - 55	0	0 - 5
CEM V	Compósito	20 - 64	0	18 - 50	0	0 - 5

Fonte: CEN (2000).

Tanto a norma brasileira, quanto a regulamentação européia, dividem o cimento nos mesmos cinco grandes tipos. Exceção do cimento tipo V que na norma brasileira é um cimento de alta resistência com baixo teor de adição e, na norma européia, trata-se de um tipo compósito de elevado teor de adição. Esta divisão e relação dos principais tipos estão expostas no quadro da figura 6.

Figura 6. Principais grandes tipos de cimento

Cimento tipo I	Cimento portland comum
Cimento tipo II	Cimento portland composto
Cimento tipo III	Cimento de alto-forno
Cimento tipo IV	Cimentopozolânicos
Cimento tipo V	alta resistência inicial(BR)/cimento compósito (EU)

Fonte: ABNT (2018) e CEN (2000)

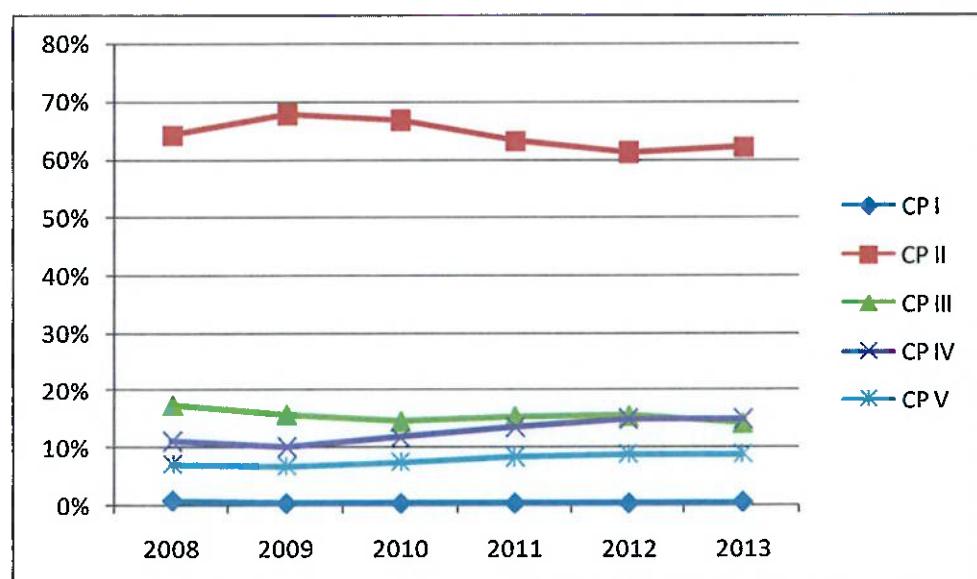
No Mercado brasileiro, se utilizou historicamente, dessa mesma nomenclatura para comercialização de cimento. A tabela 4 e o gráfico da figura 7 mostram dados do SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento) da produção de cada tipo de cimento, no Brasil, entre os anos de 2008 e 2013.

Tabela 4. Quantidade e tipos de cimento produzidos no Brasil

1.000 tons	2008	2009	2010	2011	2012	2013
CP I	346	84	88	103	98	263
CP II	33.080	34.662	38.474	38.659	39.743	41.249
CP III	8.879	7.967	8.345	9.347	10.000	9.405
CP IV	5.714	5.097	6.686	8.247	9.612	9.863
CP V	3.577	3.377	4.211	4.973	5.580	5.660
Total	51.596	51.187	57.804	61.329	65.033	66.440

Fonte: SNIC, relatório anual, (2013)

Figura 7. Produção anual brasileira de cimento segundo tipo



Fonte: SNIC, relatório anual, (2013)

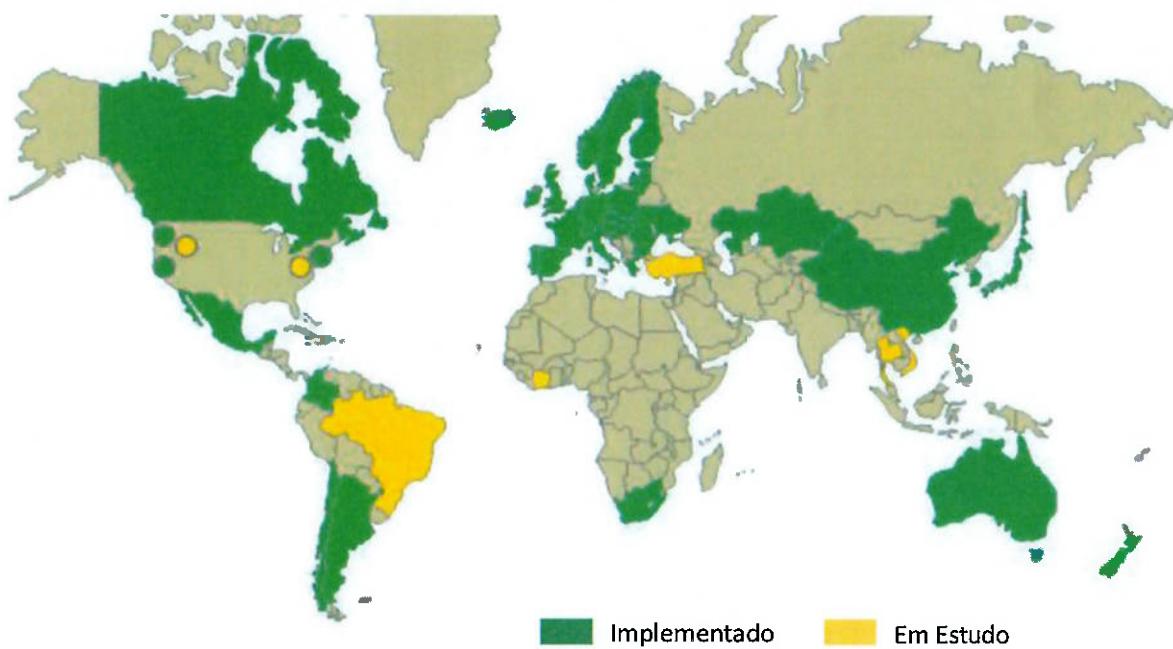
Embora não exista divulgação de dados mais atualizados, por parte do SNIC, pelos valores do período pode-se observar pouca variação da quantidade produzida de cada tipo de cimento.

3.6. Emissões setoriais de gases de efeito estufa

A preocupação com emissões de gases de efeito estufa é uma questão mundialmente discutida política, econômica e academicamente. Diversos fóruns, conferências e ações globais, como a Rio 92, o protocolo de Kyoto e o acordo de Paris, procuraram estabelecer metas, parcerias e direcionamentos supranacionais de atenção ao desenvolvimento sustentável, às mudanças climáticas e aos impactos ambientais decorrentes da ação humana.

As razões político-ambientais fizeram com que o panorama econômico também fosse reestruturado e, nesse contexto, diversas regulamentações se impuseram em vários países do mundo. Hoje, diversos países já incorporaram políticas tributárias de taxação de carbono, ou estudam projetos de implementação. No mapa da figura 8 observam-se regiões onde já ocorreram implementação de projetos ou estão em estudos no mundo

Figura 8. Presença de taxação de CO₂ no mundo



Fonte: Banco Mundial (2018)

Observa-se, neste último estudo divulgado pelo Banco Mundial em maio de 2018, que a questão vem ganhando ainda mais notoriedade principalmente com as entradas recentes de países como a China e a Argentina. Atualmente, ainda segundo mesmo estudo, 20% das emissões globais já estão sob algum tipo de regime de taxação.

Em decorrência de todos estes fatores, se faz clara a necessidade de quantificar as emissões globais de carbono, para efeito de estudo, acompanhamento, regulação e direcionamento. Órgãos internacionais despontaram nesse sentido, estabelecendo diretrizes metodológicas para a quantificação destas emissões e elaboração de relatórios nacionais e internacionais.

3.6.1 Diretrizes para emissões relacionadas à energia e combustão

O IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), criado pela UNEP (*United Nations Environment Programme*) em 1988, publica estudos e relatórios sobre mudanças climáticas, revisando e agrupando informações ao redor do mundo. No segundo volume “*Energy*” da publicação “*Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*” de 2006, o IPCC descreve uma metodologia para elaboração de inventários nacionais de emissão de gases de efeito estufa.

A metodologia divide-se em três níveis, conforme tipos de informação e dados disponíveis em cada localidade estudada. No primeiro nível, quando se dispõe apenas de informação estatística do consumo de combustíveis, o IPCC recomenda tomar os dados de consumo e considerar fatores de emissão padrões fornecidos no mesmo documento. Neste nível de abertura, para o cálculo das emissões, a equação 1, a seguir, deve ser aplicada.

$$\text{Emissões totais}_{\text{combustível}} = \text{Consumo}_{\text{combustível}} \cdot \text{Fator de emissão}_{\text{combustível}} \text{ (equação 1),}$$

Onde:

Emissões totais_{combustível} = emissões por determinado tipo de combustível (Kg CO₂)

Consumo_{combustível} = quantidade de combustível consumido (KJ)

Fator de emissão_{combustível} = fator padrão de determinado tipo de combustível (Kg CO₂/TJ)

As emissões globais de determinado setor são a somatória das emissões para cada tipo de combustível. No segundo nível dispõe-se, além da informação estatística do consumo de combustíveis, os fatores de emissão derivados das características dos combustíveis no local. Para o cálculo das emissões totais, se aplica o mesmo procedimento do primeiro nível, substituindo o fator de emissão padrão pelo fator de emissão específico do local.

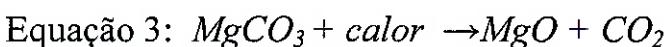
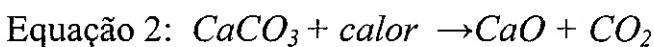
No terceiro nível de abertura, se dispõe de todos os dados referentes ao consumo de combustíveis, fatores de emissão específicos e tecnologia usada na combustão. Este nível

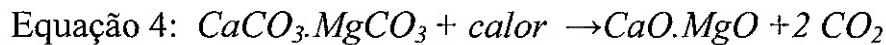
inclui modelos e dados específicos de fábricas e indústrias, quando disponíveis. Aqui são consideradas ainda condições operacionais, tecnologias de controle, qualidade de manutenção e idade dos equipamentos usados para queimar o combustível. O cálculo para este nível de abertura segue o mesmo padrão lógico do primeiro, já apresentado pela equação 1, sendo que ele deve ser aplicado para cada tipo de combustível, em cada tipo de equipamento, sob cada condição operacional.

O WBCSD (World Business Council for Sustainable Development), organização composta por mais de 200 empresas globais, que promove iniciativas para o desenvolvimento sustentável, traz, também, uma metodologia para quantificar e reportar emissões relacionadas às atividades produtivas. No projeto CSI (Cement Sustainability Initiative), são descritas diretrizes para que as empresas possam reportar suas emissões, respeitando as recomendações do IPCC. O método é baseado e extremamente semelhante ao descrito no terceiro nível de abertura do IPCC, com pequenas diferenças. O método do IPCC não contabiliza as emissões de combustíveis de biomassa, pois elas são consideradas neutras, já que podem ser compensadas pelo sequestro de carbono em curto prazo, desigualdades nesse equilíbrio são tratadas em mudanças no uso da terra. Outro fator de atenção é a queima de combustíveis alternativos e coprocessamento, que são tratados, pelo IPCC, na categoria de gestão de resíduos sólidos. Além disso, o CSI indica que devem ser consideradas emissões sobre eletricidade, já que hoje muitas plantas contam com autogeração de energia. As discrepâncias ou possíveis diferentes considerações são reportadas, no entanto, como memorando e não compõe a somatória final. (WBCSD, 2011)

3.6.2 Diretrizes para emissões relacionadas à descarbonatação do calcário

O maior componente de emissões no processo da indústria do cimento, como apresentado, decorre da descarbonatação do calcário (CaCO_3), na calcinação em forno rotativo para produção de clínquer. Dessa reação se produz cal (CaO), que reage com outros componentes, dando origem ao clínquer e ao CO_2 . Existem ainda emissões relacionadas ao calcário magnesiano e dolomítico. Estas três principais reações de liberação de CO_2 são expressas pelas equações 2, 3 e 4 a seguir





Aqui, mais uma vez, o IPCC sugere três níveis de abertura para o cálculo das emissões decorrentes do processo químico. Os níveis um e dois são baseados num fator de emissão para produção de cimento ou clínquer respectivamente, dependendo do nível de abertura dos dados disponíveis. Esse fator é baseado na estequiometria das reações e levam em conta algumas aproximações como: teor de CaO no clínquer mantido em 65%; todo CaO tem origem no carbonato de cálcio (CaCO_3); quantidades de Mg mantidas muito baixas e estas quantidades tendem a não mudar muito ao longo dos anos. O terceiro nível de abertura da metodologia do IPCC, no entanto, sugere um maior grau de detalhe, baseado nos inputs de quantidades e teores dos carbonatos que são apresentados ao forno, em cada planta. As diretrizes do CSI são semelhantes ao terceiro nível do IPCC (2006), com a diferença de que, os teores são medidos no produto do forno, tomando as quantidades de CaO e MgO presentes no clínquer. Basicamente, as duas abordagens convergem para os mesmos valores de emissões, pois são baseados na estequiometria do processo (MCTIC, 2015). O CSI também sugere um valor padrão no caso de ausência de dados específicos, muito semelhante ao do IPCC, apenas corrigido para uma quantidade típica de MgO no clínquer. Existe ainda uma correção de 2% referente à poeira do forno de cimento, presente em todos os níveis, que leva em consideração a perda devida à calcinação incompleta dos carbonatos. Esta poeira é considerada como perda do processo, ou seja, a quantidade de CO_2 emitida na sua geração, não está contabilizada quando se observa somente a produção de clínquer que sai do forno. Assim, em média, adicionam-se 2% às emissões, referentes à formação deste material inerente ao processo.

Para o fator padrão, 1 tonelada de clínquer contém 0,65 toneladas de CaO. Este carbonato é 56,03% CaO e 43,97% CO_2 , em massa. A quantidade de CaCO_3 necessária para atingir 0,65 toneladas de CaO é de 1,1601 toneladas. A quantidade de CO_2 liberada pela calcinação destas 1,1601 toneladas de CaCO_3 é de 0,5101 toneladas. Ao final, tem-se que, para produzir uma tonelada de clínquer, emite-se, no cenário padrão, $0,5101 \times 1,02 = 0,52$ toneladas de CO_2 já corrigida pela poeira não calcinada (2%)(IPCC, 2006). O fator de emissão padrão do CSI, corrige esse valor para quantidade comum de carbonatos magnesianos alimentados ao forno, atingindo um valor padrão de 0,536 já corrigido pela poeira não calcinada.

3.6.3 O inventário nacional de emissões

A fim de acompanhar o compromisso nacional de redução das emissões, conforme estabelecido no Art. 11 do Decreto nº 7.390/2010, são publicadas estimativas anuais de emissão de gases de efeito estufa no Brasil. A elaboração dessas estimativas e aprimoramento e adequação da metodologia são de responsabilidade do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC). No último relatório de referência, publicado em 2015, o grupo de trabalho, coordenado pelo ministério, indica os métodos adotados para elaboração do estudo.

Quanto às emissões referentes ao processo químico, o relatório indica que tendo em vista o objetivo das estimativas mais acuradas possíveis, opta-se por utilizar a metodologia do terceiro nível definida nas diretrizes para inventários nacionais de 2006 do IPCC, modificada a partir das informações disponíveis pela aplicação da metodologia CSI (MCTIC, 2015). As duas metodologias são compatíveis entre si. Quando não se dispuser de dados completos para sua aplicação, utiliza-se o fator padrão de 0,536 tCO₂/t clínquer (MCTIC, 2015).

Quanto às emissões energéticas, o inventário brasileiro se apóia, também, na estrutura metodológica do IPCC (2006). Obedecendo aos seguintes passos: determinação do consumo de combustíveis do setor, nas suas unidades originais, conversão para unidade de energia comum e multiplicação pelo fator de emissão de dióxido de carbono (MCTIC 2015). O relatório de referência aponta, ainda, algumas adequações feitas à realidade brasileira e aos dados disponíveis. As principais considerações se referem à adequação dos combustíveis, que apresentam maior ou menor nível de desagregação, ou não estão descritos pelo IPCC (2006) e aos dados fornecidos no BEN (Balancão Energético Nacional), pelo Ministério de Minas e Energia.

4. Métodos e dados

Neste trabalho, através da revisão bibliográfica, foi feito um levantamento das fontes de dados e métodos necessários para quantificação de alguns indicadores. Buscou-se levantar a produção nacional de cimento e clínquer, a composição dos produtos do mercado de cimento nacional, os limites definidos pelas diferentes normas técnicas e as emissões de CO₂

associadas a produção de cimento brasileira. Os principais dados levantados e fontes estão expostos no quadro da figura 9.

Figura 9. Principais dados e fontes

Dados – Brasil	Fonte	Observações
Produção de Cimento 2017	SNIC – 2018	Obtido no sítio eletrônico
Fator clínquer 2016	CSI (GNR) – 2018	Extrapolou-se para toda produção
Tipo de cimento produzido	SNIC – 2014	Média 2008 – 2013
Consumo energético	MME (BEN) – 2018	Consumo setorial cimento
Emissão específica calcário	MCTIC – 2018	Inventário Nacional – 4 ^a edição

A produção de cimento nacional foi obtida diretamente dos dados do SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento), disponíveis em seu sítio eletrônico. A produção de clínquer nacional foi estimada com base nos dados do CSI (Cement Sustainability Initiative) em seu GNR (Getting the Numbers Right) Project, projeto que coleta dados junto às empresas produtoras e corresponde a mais de 30% do cimento mundial e 67% do cimento nacional. De acordo com a planilha eletrônica disponível em seu sítio, conseguimos estimar o fator clínquer da produção brasileira em 2016, extrapolando os 67%, de que os dados têm cobertura, para a totalidade do mercado brasileiro.

O mix de produto do mercado, foi estimado com base nos dados do relatório anual do SNIC, (SNIC 2013), que apresentam uma série histórica de 2008 a 2013 (figura 7). Mudanças na composição do portfólio nacional se mostraram pouco sensíveis e a produção de cada tipo de cimento foi bastante estável (figura 8). Informações internas de grande empresa do setor, que não estão aqui apresentadas por motivos de sigilo, apontam para uma realidade muito próxima à descrita pela série histórica, de modo que, neste trabalho, foi utilizada uma média dos anos de 2008 a 2013 para compor o mix de produto estimado para 2017.

Para estimativa das emissões nacionais de CO₂, no ano de 2017, foi aplicada a metodologia do IPCC (2006) em concordância com método utilizado pelo MITIC, na elaboração dos inventários nacionais.

Para o setor de energia, foram utilizados os dados do Balanço Energético Nacional, do Ministério de Minas e Energia do ano de 2018, referentes ao período de 2017, disponíveis em seu sítio eletrônico. Para este trabalho, as emissões referentes a biomassa, não foram

consideradas em acordo com o proposto, tanto pelo IPCC quanto pelo WBCSD, e respaldados pelo MCTIC. As emissões referentes a eletricidade, no entanto, foram consideradas no total, dado que o IPCC não as contabiliza para evitar dupla contagem, já que essa emissões estariam contabilizadas em outros setores produtivos. Para contabilizar estas emissões referentes somente ao clínquer, foi utilizado o percentual atribuído à etapa correspondente, como visto na revisão bibliográfica (figura 2). Para os fatores de emissão foram utilizados os mesmos utilizados pelo MCTIC, com base nas diretrizes do IPCC, e disponíveis em seu relatório de referência (2015). A exceção foi ao fator atribuído a eletricidade, fator médio de emissão correspondente a matriz energética brasileira, e disponibilizado, também, pelo MCTIC (2018). Para as emissões do setor industrial, referentes à descarbonatação do calcário, foi utilizado o fator médio padrão sugerido pelo MCTIC no inventário nacional.

Com base nos dados levantados, pôde-se chegar ao índice de emissão específica para produção de clínquer brasileira ($\text{KgCO}_2 / \text{t clínquer}$). A partir desse indicador foram traçados três cenários de redução do fator clínquer, baseados nas normas técnicas expostas na revisão bibliográfica (figuras, 5,6 e7). Em todos os cenários, foi considerado qual seria o mínimo fator clínquer, da produção nacional, necessário para atender o mix de produtos do mercado brasileiro estando em conformidade com os limites impostos pelas normas. No primeiro cenário, levou-se o nível de clínquer ao mínimo imposto pela norma vingente em 2017. No segundo cenário, levou-se o nível de clínquer ao mínimo imposto pela nova regulamentação de julho de 2018. No terceiro cenário, levou-se o nível de clínquer ao mínimo imposto pela norma regulatória européia, com a ressalva de que a quantidade de clínquer, no cimento de tipo V, foi mantida devido ao não enquadramento desse tipo com um correspondente direto especificado na norma européia.

Com base na emissão específica de CO_2 por tonelada de clínquer e nos cenários desenhados de produção de clínquer, foi possível estimar quais seriam as emissões totais de CO_2 em cada um destes cenários e indicar a redução das quantidades de CO_2 emitidas mantendo o mesmo nível de produção nacional de cimento.

5. Resultados e discussão

5.1. Produção de cimento e clínquer

A produção de cimento brasileira, no ano de 2016 foi, segundo dados do SNIC, de 57,6 milhões de toneladas. O CSI, por meio da sua iniciativa, GNR (Getting the Numbers Right), disponibiliza dados agregados da produção de cimento e clínquer das principais empresas nacionais, signatárias e aderidas à iniciativa. O volume reportado pelo CSI, que corresponde somente às empresas signatárias da iniciativa, é de 38,8 milhões de toneladas, o que representa uma cobertura de 67% da produção nacional. Para a produção de cimento destas empresas, o CSI divulga também a produção de clínquer delas. Os dados reportados pelo SNIC e pelo CSI estão expostos na tabela 5

Tabela 5. Produção e fator clínquer 2016

Produção de cimento SNIC (t)	57.556.901
Produção de cimento GNR (t)	38.766.077
Produção de clínquer GNR (t)	27.122.748
Fatorclínquer GNR	70%
Cobertura	67%

Fonte: CSI 2017 e SNIC 2017

Os dados de produção permitem calcular o fator clínquer para 67% da produção brasileira, para o ano de 2016. Pela falta de dados mais atualizados, e pela pouca variação histórica ano a ano, na última década, toma-se esse mesmo valor, de 70%, de fator clínquer para o cálculo da produção de clínquer do ano seguinte, de 2017. A produção nacional de cimento foi obtida, também, junto ao SNIC. Os valores de produção de cimento e clínquer, no ano de 2017, estão expostos na tabela 6.

Tabela 6. Produção e fator clínquer 2017

Produção de cimento SNIC (t)	54.003.893
Fatorclínquer (%)	70%
Produção de clínquer (t)	37.783.910

Fonte: SNIC 2018

Considerando o mesmo fator clínquer do ano anterior, de 70%, chega-se a um valor aproximado da produção de clínquer no período, com base na produção real de cimento.

5.2. Emissão específica da produção de clínquer.

As emissões de CO₂ referentes à energia foram calculadas conforme procedimento descrito na seção 4. Os dados de consumo de combustíveis e a conversão para unidade de energia em toneladas equivalentes de petróleo (tep) foram retirados do Balanço Energético Nacional (BEN 2018). Como os valores de fator de emissão estão expressos pelo IPCC em TJ (tera joules), foi preciso converter as unidades do BEN. A conversão utilizada para transformar os valores, de toneladas equivalentes de petróleo em Tera Joules, foi de aproximadamente 0,042. Assim, 1 tep = 41,868 x 10⁻³ TJ.

Na tabela 7 estão representados: o consumo de cada combustível, pela indústria do cimento, expressos nas unidades reportadas; o valor equivalente em tep; o valor convertido em TJ; o fator de emissão de cada combustível, referenciados nas indicações do (IPCC 2006) e no anexo metodológico do inventário nacional de emissões (MCTIC 2015), e as emissões totais para cada combustível.

Tabela 7. Emissões energéticas 2017

Fonte energética	Consumo 2017 (unidade base)	Consumo (1.000 tep)	Consumo (TJ)	Fator de emissão (Kg CO ₂ /TJ)	Emissões 2017 (t CO ₂)
Gás natural seco (milh m ³)	5	4	168	56.100	9.415
Carvão Vapor-4.500 (mil t)	2	1	41	96.100	3.944
Carvão Vapor-5.200 (mil t)	14	7	282	96.100	27.134
Carvão Vapor-6.000 (mil t)	98	56	2.341	94.600	221.462
Outras fontes não renováveis (mil tep)	174	174	7.277	73.300	533.439
Lenha (mil t)	195	60	2.529	95.280	240.983
Outras fontes renováveis (mil tep)	112	112	4.699	100.000	469.857
Óleo diesel (mil m ³)	61	52	2.158	74.100	159.937
Óleo combustível (mil m ³)	5	5	194	77.400	14.999
GLP (mil m ³)	20	12	523	63.100	33.010
Coque carvão mineral (mil t)	67	46	1.931	107.000	206.652
Eletricidade (GWh)	6.005	516	21.614	25.750	556.555
Carvão Vegetal (mil t)	145	94	3.933	106.519	418.963
Coque Petróleo (mil m ³)	3.258	2.835	118.676	97.500	11.570.933
TOTAL		3.974	166.367		14.467.284
TOTAL Aplicável					13.176.080

Fonte: MME, (2018); MCTIC, (2015 e 2018) e IPCC, (2006).

O valor de total aplicável exclui fontes renováveis, lenha e carvão vegetal além de considerar somente 71% das emissões de energia elétrica conforme citado em métodos.

Os cálculos das emissões específicas levaram em consideração esse valor bruto total de emissão e a produção de clínquer nacional estimada. A este valor foi somado o fator de emissão básico, referente à calcinação, de 536 Kg CO₂ por tonelada de clínquer. Os resultados estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8. Emissão específica de CO₂ por tonelada de clínquer

Produção de clínquer 2017 (t)	37.783.910
Emissão total de CO ₂ (aplicável) (t)	13.176.080
Emissão energética específica (KgCO ₂ /t clínquer)	349
Emissão específica descarbonatação (KgCO ₂ /t clínquer)	536
Emissão específica total (KgCO ₂ /t clínquer)	885

Com base nos parâmetros estabelecidos, nos métodos usados e nos dados coletados, chega-se ao valor estimado de 885 kg CO₂ por tonelada de clínquer produzido no Brasil, no ano de 2017.

5.3. Limite das normas técnicas

Como descrito na seção de métodos, calcula-se qual a substituição máxima de clínquer para cada tipo de cimento se fossem aplicadas as quantidades mínimas de clínquer, expostas nas normas. O cálculo considera a média da série histórica de 2008 a 2013 para a produção de cimento no Brasil, segmentado por tipo. A tabela 9 traz os valores percentuais de produção e a média para o período.

Tabela 9. Mix percentual de cimento produzido

SNIC	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Média	desv. Padrão
CP I	1%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,4%	0,3%	0,2%
CP II E	17%	18%	18%	17%	16%	16%	17%	0,7%
CP II F	14%	14%	14%	13%	13%	13%	14%	0,5%
CP II Z	34%	36%	35%	33%	32%	33%	34%	1,4%
CP III	17%	16%	14%	15%	15%	14%	15%	1,1%
CP IV	11%	10%	12%	13%	15%	15%	13%	2,0%
CP V	7%	7%	7%	8%	9%	9%	8%	0,8%

Fonte: SNIC, (2013)

A média do período, conforme descrito, é base para o cálculo do quanto foi produzido de cada tipo de cimento, no ano de 2017. Acredita-se, assim, como exposto, estimar a produção brasileira com boa acurácia, sem grandes imprecisões.

De posse das normas apresentadas na revisão bibliográfica, faz-se uma análise do percentual mínimo de clínquer em cada tipo de cimento. Os valores resumidos para o limite inferior de clínquer em cada tipo de cimento, nas três normas apresentadas, estão descritos na tabela 10.

Tabela 10. Limite mínimo de clínquer por tipo de cimento

Normas	CP I	CP II E	CP II Z	CP II F	CP III	CP IV	CP V
Antiga Norma	95%	56%	76%	90%	25%	45%	95%
Nova Norma	90%	51%	71%	75%	25%	45%	90%
Norma EUR	95%	65%	65%	65%	5%	45%	90%

Fonte: ABNT (1991 e 2018) e CEN (2000).

O fator clínquer global de cada cenário é alcançado pelo produto, média ponderada, dos percentuais obtidos nas tabelas 8 e 9. Pode-se com ele, calcular a produção necessária de clínquer em cada um dos três cenários, considerando o limite mínimo de clínquer em cada uma das normas apresentadas.

Na tabela 11, são apresentados, os valores de fator clínquer global para cada cenário, e as quantidades absolutas de clínquer necessárias para suprir a produção de cimento de 2017.

Tabela 11. Fator clínquer e produção em cada cenário

Cenário	Situação	Produção de cimento (t)	Fator clínquer	Produção de clínquer (t)
Base	Real 2017	54.003.893	70%	37.783.910
1	Limite velha norma	54.003.893	67%	36.242.228
2	Limite nova norma	54.003.893	60%	32.480.946
3	Limite norma européia	54.003.893	55%	29.854.441

As emissões totais para os cenários 1, 2 e 3 são estimadas com base nos valores aproximados de produção de clínquer, apresentados na tabela 11, obtidos pelo fator clínquer mínimo teórico. Na tabela 12, estão apresentadas essas emissões para os três cenários simulados e para o cenário base, estimativa real, de 2017.

Tabela 12. Emissões totais de CO₂ nos cenários simulados

Cenário	Situação	Produção clínquer (t)	Emissão específica (KgCO ₂ /t clínquer)	Emissões totais CO ₂ (t)	Redução (cenário base)
base	Real 2017	37.783.910	885	33.428.256	-
1	Limite velha norma	36.242.228	885	32.064.296	-4%
2	Limite nova norma	32.480.946	885	28.736.607	-14%
3	Limite norma EUR	29.854.441	885	26.412.880	-21%

Observa-se o comportamento esperado de redução das emissões de CO₂ com o aumento de substituição de clínquer, podendo se chegar a pouco mais de 20% de redução das emissões, no cenário de maior substituição, em relação ao realizado no ano de 2017. Nota-se, também, como a nova norma, aprovada em julho de 2018, pode ter um impacto muito positivo na redução de CO₂.

O impacto desenhado em todos os cenários poderia ser potencialmente maior ainda se fosse considerada uma mudança na quantidade produzida de cada tipo de cimento. Com maior possibilidade de substituição, o mix de produto apresentado na tabela 9 seria alterado, sendo a produção ainda mais voltada para tipos de cimento com maiores percentuais de adição. Como se desejou estudar o impacto sobre o cenário base, esta mudança de comportamento de produção não foi considerada.

Para o cenário exposto de redução, não foram consideradas as possíveis emissões associadas aos insumos que substituiriam o clínquer. Considerando os principais insumos substituintes, pode-se dizer que o aumento do percentual de calcário ou material carbonático não traria impactos significativos, enquanto que, as emissões associadas ao uso de cinzas volantes ou escória de alto forno merece uma discussão mais ampla. A maioria das diretrizes internacionais não contabilizam esse tipo de emissão por considerarem como o uso de um sub produto de outra indústria. O sistema internacional EPD (*Environmental Product Declaration*), programa global de declarações ambientais com base na ISO 14025, por exemplo, acorda a não atribuição das emissões relacionadas à produção de escória à indústria cimenteira. Birat (2011) sugere que a escória seja tratada como um co-produto da indústria siderúrgica e não como um resíduo. Ele descreve assim alguns métodos de alocação baseados na LCA (*Life Cycle Assessment*). Ele apresenta três métodos de alocação, mássica, econômica

e física. Dependendo do método de se alocar estas emissões, pode-se chegar a impactos muito distintos, desde 1,3 KgCO₂/t escória, o que representaria somente 0,15% das emissões da produção de clínquer, até 1720 KgCO₂/t escória, o que significaria 194% das emissões da produção de clínquer. Sendo uma matéria controversa, cita-se apenas que essa questão pode ser relevante, mas não considerada nos cenários seguindo tendência dos principais órgãos e metodologias globais.

6. Conclusão

Neste trabalho, teve-se um entendimento da relevância do aspecto ambiental na produção industrial e mais precisamente da indústria cimenteira. As emissões de CO₂, neste contexto, são alvo de estudos, levantamentos e regulamentações. Procurou-se levantar as emissões de CO₂, por parte da indústria, no ano de 2017. A partir deste levantamento, seguindo metodologia internacional e se adequando a realidade de disponibilização de dados e informações, obteve-se valores condizentes com a divisão citada por diversos autores e, também, com valores brutos próximos aos divulgados nos últimos estudos do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) e do GNR (Getting the Numbers Right) Project do CSI (Cement Sustainability Initiative). Com estas informações obtidas, calculou-se, com auxílio dos dados de produção de cimento, o nível de emissão específica de CO₂ por tonelada de clínquer produzido, o valor obtido de 885 KgCO₂/t clínquer está em linha com resultados de estudos e literatura. Delineando os três cenários abordados, em todos aplicando um menor fator clínquer, pode-se concluir que o fator clínquer é um importante indicador da indústria do cimento e pode explicar, em grande parte, o caminho da indústria em busca de um desenvolvimento mais sustentável. Este caminho de redução de fator clínquer, no entanto, depende de muitos fatores não abordados neste trabalho e que requerem estudos. É de fundamental importância entender como podemos manter o desempenho dos cimentos mesmo elevando o nível de substituição e entender como podemos alterar o consumo de cimento, direcionando o uso do tipo com maior teor de adição possível. Aqui se demonstrou o impacto do benefício de se utilizar cimentos com menor teor de clínquer em sua composição e como esse fator por si só, já colabora significativamente para redução das emissões. Nos cenários simulados conclui-se que poderíamos ter um potencial de até 21% de redução das emissões no ano de 2017 e no cenário mais conservador, 4% poderia ter sido evitado, o equivalente a mais de 4 milhões de toneladas.

Para desenvolver os potenciais estimados nos cenários, deve-se ainda levar em consideração, a disponibilidade regionalmente desigual de substitutos, sobretudo de escória da produção de gusa. A viabilidade de fornecimento e transporte desses materiais também pode representar uma limitação à prática. De maneira geral, três principais abordagens são estudadas quando se fala em mitigação das emissões de CO₂, eficiência energética, captura e armazenamento de carbono e utilização de materiais alternativos. Embora estas abordagens terem mostrado grande contribuição à redução das emissões pela indústria, desafios técnicos, econômicos e legais ainda são obstáculos à implementação em larga escala (BENHELAL, 2013).

Independentemente dos cenários traçados, do percentual de redução e dos desafios operacionais impostos, o que fica claro é a relação entre as duas variáveis, fator clíquer e emissão de CO₂, e que ainda há bastante espaço para avanço nessa questão.

Referências

ANDREW, R. M. **Global CO₂ emissions from cement production** - Earth System Science Data, 10, 195–217. Oslo, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Cimento - Fabricação**. Disponível em <https://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/fabricacao/fabricacao/>. Acesso em: novembro de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578: Cimento Portland Composto: Especificação**. Rio de Janeiro, p. 1-3. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, p. 1-12. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732: Cimento Portland Comum: Especificação**. Rio de Janeiro, p. 1-3. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland com alta resistência inicial: Especificação**. Rio de Janeiro, p. 1-5. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno: Especificação**. Rio de Janeiro, p. 1-5. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736: Cimento Portland Pozolânico: Especificação**. Rio de Janeiro, p. 1-5. 1991.

BASHAM, K. CLARK, M. FRANCE, T. HARRISON, P. Adding fly ash to concrete mixes for floor construction. **Concrete Construction**, Nov, 2007

BATAGIN, A. F.; ESPER, M.W. **Contribuição ao conhecimento das propriedades do cimento Portland de alto-forno.** São Paulo: ABCP, 1988.

BENHELAL, E.; ZAHEDI, G; SHAMSAEI, E.; BAHADORI, A. **Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry.** Journal of Cleaner Production 51, 2013

BHUSHAN, C. **Challenge of the New Balance.** Center for Science and Environment, 2010 New Delhi.

BIRAT, J.P. **The sustainability footprint of steelmaking by-products.** Steel Times International p.4 set. 2011. Acesso em: Outubro de 2018.

BODEN, T. A., ANDRES, R. J., AND MARLAND, G.: **Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions, Carbon Dioxide Information Analysis Center**, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, Estados Unidos. Disponível em: http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/meth_reg.html. Acesso em: agosto de 2018

BODEN, T., MARLAND, G., ANDRES, B. **Global CO₂ Emissions from Fossil-fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring:** Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, Estados Unidos, 2008.

CEMBUREAU, 2014. **The European Cement Association.** <http://www.cembureau.be/about-cement/key-facts-figures>. Acesso em: Novembro de 2018.

Cement & Concrete Applications – How cement is made. **Portland Cement Assossiation (PCA)** Disponível em: <http://www.cement.org/cement-concrete-applications/how-cement-is-made>. Acesso em: Maio de 2018.

Cement production - What is cement? **Cement Sustainability Iniciative.** World Business Council for Sustainable Development. Disponível em: <http://wbcscement.org/index.php/about-cement/cement-production>. Acesso em: 03 de Jun. 2018.

Cement Sustainable Iniciative – **CO₂ and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry – The Cement CO₂ and Energy Protocol,** World Business Council for Sustainable Development, 2011

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION(CEN). EN 197-1: *Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements* Bélgica, 2000

COUTINHO, J. S. Ciência de Materiais - Ligantes e Agregados. Texto de apoio às aulas teóricas de **Ciência de Materiais**, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2002.

INGRAO, C., GIUDICE, A.L., TRICASE, C., MBOHWA, C., RANA, R. The use of basalt aggregates in the production of concrete for the prefabrication industry: environmental impact assessment, interpretation and improvement. **Journal of Cleaner Production**. v.75, p. 195-204, 15, julho 2014.

JACOMINO, V. M. F. et al.. **Controle ambiental das indústrias de produção de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. p.302.

KAJASTE, R.; HURME, M. **Cement industry greenhouse gas emissions and management options and abatement cost** *Journal of Cleaner Production*. 112, Finland 2016

MEHTA, K. Natural Pozzolans. In: **Supplementary Cementing Materials for Concrete**. Ottawa: Canadian Government Publishing Center, 1987. (Vol 1; P. 1-33)

MENDES, S. E. da S. **Estudo Experimental de Concreto de Alto Desempenho Utilizando Agregados Graúdos Disponíveis na Região Metropolitana de Curitiba**. Dissertação (Mestrado). Curitiba, 2002. Universidade Federal do Paraná, Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES (MCTIC) **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**, 4^a edição, 2017. Brasília DF.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME), **Balanço Energético Nacional ano base 2017**. 2018, Brasília DF

NETTO, R. M. **Materiais Pozolânicos**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 2006

OECD, 2012. OECD Environmental Outlook to 2050. **OECD Publishing**, p. 72-135. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264122246-en>.

PETRUCCI, E.G.R; PAULON, V.A. **Concreto de cimento portland**13.ed. São Paulo: Globo, 1978.

RUBENSTEIN, M. **Mitigating Emissions from cement**, The GNCS factsheets, Columbia Climate Center, Columbia, 2012

SCHNEIDER, M.;ROMER, M.; TSCUDIN, M. Sustainable cement production – present and future. **Cement and Concrete Research** n. 41, p. 642–650, março 2011.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC), **Produção nacional de cimento por regiões e estados 2017** Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1537281236.pdf> (Acesso em: novembro de 2018)

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC), **Relatório Anual 2013**. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf (Acesso em: Novembro de 2018)

Tecnology Roadmap. **Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. France: Internaciona Energy Agency, Mar de 2018.

THOMAS, M. Optimizing the use of fly ash in concrete, **Concrete Thinking for a sustainable world**.PortlandCementAssociation, 2007

VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE (Ed.), **Environmental Data of the German Cement Industry** pg 8 2009, 2010.

WORLD BANK GROUP, **State and Trends of Carbon Pricing 2018** Washington DC maio de 2018

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD), **Getting the Numbers Right 2016**, Cement Sustainability Initiative. Disponível em: <http://www.wbcsdcement.org/GNR-2016/index.html> (Acesso em: novembro de 2018)