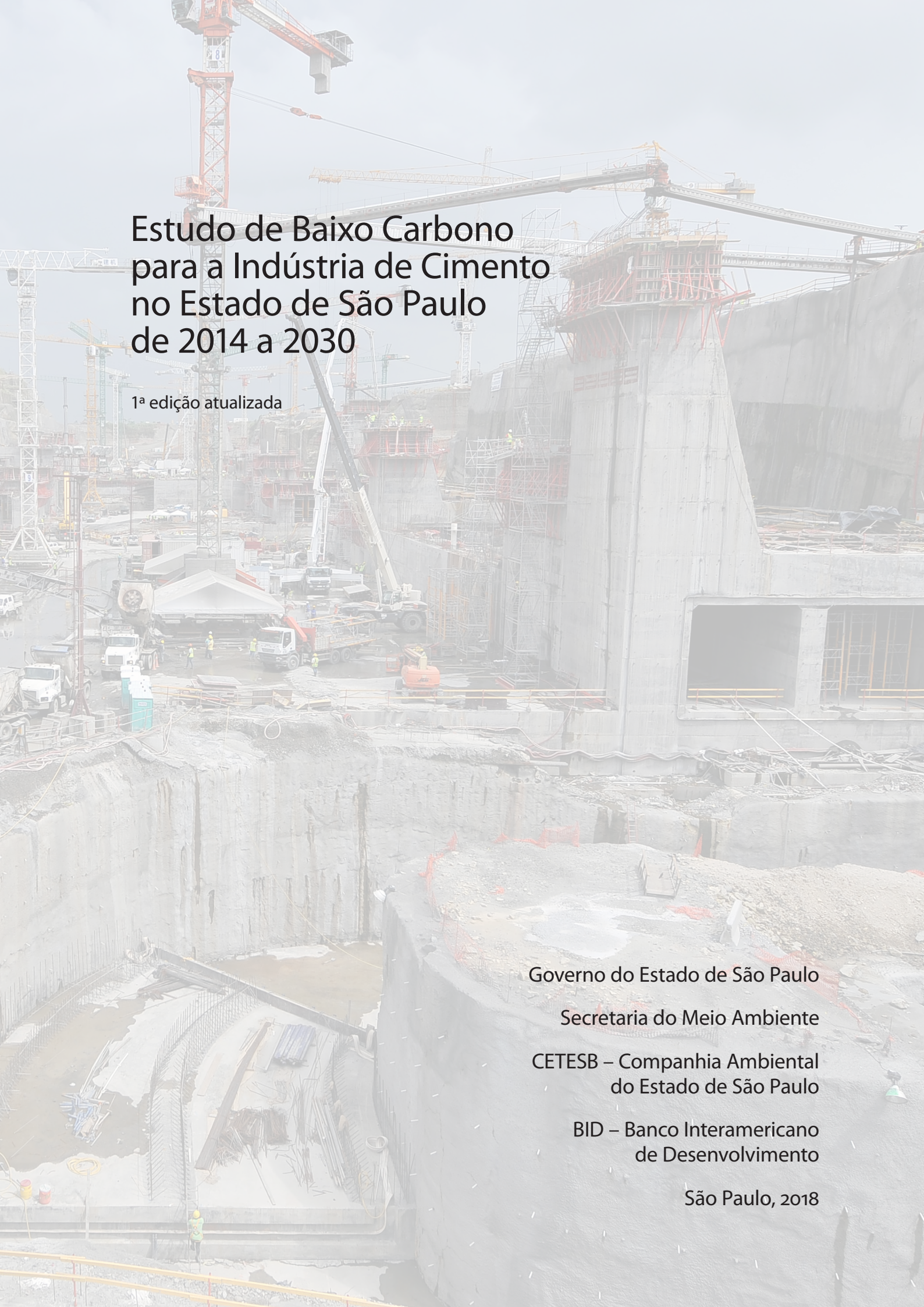


Estudo de Baixo Carbono para a Indústria de Cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030

1ª edição atualizada



Governo do Estado de São Paulo
Secretaria do Meio Ambiente
CETESB – Companhia Ambiental
do Estado de São Paulo
BID – Banco Interamericano
de Desenvolvimento
São Paulo, 2018



Estudo de Baixo Carbono para a Indústria de Cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030

1ª edição atualizada

Governo do Estado de São Paulo

Secretaria do Meio Ambiente

CETESB – Companhia Ambiental
do Estado de São Paulo

BID – Banco Interamericano
de Desenvolvimento

São Paulo, 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CETESB – Biblioteca, SP, Brasil)

C418e CETESB (São Paulo)

Estudo de baixo carbono para a indústria de cimento no estado de São Paulo de 2014 a 2030 [recurso eletrônico] / CETESB, BID ; Autores Kátia Regina Garcia Punhagui ... [et al.] Coordenação executiva Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer ; Coordenação técnica Sérgio Almeida Pacca; Colaboradores Bruna Chyoshi... [et al.]. – 1.ed. atual. – São Paulo : CETESB, 2018.

1 arquivo de texto (128 p.) : il. color., PDF ; 9,4 MB.

Publicado no suporte papel em 2017.

Publicado também em pen-drive.

Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>

ISBN 978-85-9467-031-1

1. Aquecimento global 2. Baixo carbono 3. Cimento – indústria 4. Efeito estufa – gases - cenário 5. Mudanças climáticas 6. Tecnologia química 7. São Paulo (Est.) I. Punhagui, Kátia Regina Garcia, autor. II. Oliveira, Lidiane Santana, autor. III. Souza, Jhonathan Fernandes Torres de, autor. IV. John, Vanderley Moacyr, autor. V. BID. VI. Título.

CDD (21. ed. Esp.) 363.738 748 161

CDU (2. ed. Port.) 504.7:666.94 (815.6)

Catalogação na fonte: Margot Terada CRB 8.4422

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

Avenida Professor Frederico Hermann Jr., 345
Alto de Pinheiros CEP 05459-900 São Paulo SP
Tel.: (11) 3133 3000 Fax: (11) 3133 3402
<http://www.cetesb.sp.gov.br>

© CETESB 2018

É permitida a reprodução total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte.
Direitos reservados de distribuição.



GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO

Governador Márcio França

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE

Secretário Eduardo Trani

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

Diretor Presidente Carlos Roberto dos Santos

Diretoria de Gestão Corporativa Waldir Agnelo

**Diretoria de Controle
e Licenciamento Ambiental** Geraldo do Amaral Filho

**Diretoria de Avaliação
de Impacto Ambiental** Ana Cristina Pasini da Costa

**Diretoria de Engenharia
e Qualidade Ambiental** Eduardo Luis Serpa

Presidência

Carlos Roberto dos Santos

Departamento de Cooperação Institucional e Internacional

Fátima Aparecida Carrara

Divisão de Mudanças Climáticas

Maria Fernanda Pelizzon Garcia

Ficha técnica

Autores

Katia Regina Garcia Punhagui
Lidiane Santana Oliveira
Jhonathan Fernandes Torres de Souza
Vanderley Moacyr John

Coordenação Executiva

Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer

Coordenação Técnica

Sérgio Almeida Pacca

Revisão e Reestruturação

Bruna Patrícia de Oliveira

Colaboradores

Bruna Chyoshi
Carlos Alberto Sequeira Paiva

Daniel Soler Huet

Eduardo Shimabokuro

Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer

Jussara de Lima Carvalho

Maria Fernanda Pelizzon Garcia

Marta Emerich

Neuza Maria Maciel

Oswaldo dos Santos Lucon

Renan Pelegriane

Wilson Issao Shiguemoto

Projeto Gráfico e Diagramação

Brainstorm – Arte em Comunicação

Foto da capa

Acervo BID

Estudo realizado com recursos do Projeto BR T-1262: “Apoio ao desenvolvimento de estudos de mitigação para o Estado de São Paulo” proveniente da parceria entre o Banco Interamericano de Desenvolvimento e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

As opiniões e conclusões expressas nesta publicação são de responsabilidade dos autores e não refletem necessariamente a posição da CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo e do BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento, de sua Diretoria Executiva, ou dos países que eles representam.

O Banco Mundial, através do seu fundo de assistência técnica, ESMAP, apoiou o desenvolvimento deste estudo com a ferramenta Curva MAC e as informações que foram necessárias para sua utilização. A versão mais recente da referida ferramenta encontra-se no link <http://esmap.org/mactool> (acesso em 01/12/2017)

Apresentação do Secretário

O Estado de São Paulo foi pioneiro na instituição da Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC), que começou a ser discutida no âmbito da Secretaria do Meio Ambiente em 1995 e adotada por meio da Lei Estadual nº 13.798, de 9 de novembro de 2009. A PEMC confere atribuições aos diversos órgãos do Estado no sentido de apoiar e facilitar a realização de estudos, pesquisas e ações nos temas relacionados às Mudanças Climáticas, para fins de promover medidas de prevenção, adaptação e mitigação. Considerando este contexto, a CETESB realizou o “Estudo de Baixo Carbono para a Indústria do Cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030”, apresentando contribuições ao Estado de São Paulo para subsidiar os segmentos envolvidos na articulação de estratégias de médio e longo prazos para harmonização com a PEMC, sem comprometer as metas de crescimento do setor.

O estudo compreendeu outros setores industriais, sendo fundamental para a construção de políticas públicas que irão orientar decisões em direção a uma economia competitiva, sustentável e de baixo carbono. Assim, o Estado de São Paulo apresenta este trabalho como parte do compromisso assumido para contribuir com os esforços climáticos nacionais e internacionais.

Eduardo Trani
Secretário do Meio Ambiente do Estado de São Paulo

Apresentação do Presidente

O “Estudo de Baixo Carbono para a Indústria de Cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030” é um dos produtos do “Projeto de Desenvolvimento de Estudos de Mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE) para o Estado de São Paulo”, desenvolvido pela Divisão de Mudanças Climáticas, da CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, com a finalidade de subsidiar a promoção de uma economia mais sustentável e de baixo carbono.

Além do setor de cimento, o projeto contemplou também os setores de química, siderurgia e cal, os mais significativos do estado em termos de emissões de GEE.

Realizado com apoio de Cooperação Técnica do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), o presente estudo foi elaborado por especialistas, com vasta experiência e conhecimento no setor de cimento.

Como resultado, o estudo apresentou opções de tecnologias com potencial de redução das emissões de emissão de GEE na produção de cimento, atuando na melhoria da eficiência energética, na substituição de combustíveis fósseis por outros renováveis e na substituição de componentes do cimento. Com base nesse levantamento, foram observados os investimentos necessários para a implantação das ações de mitigação.

Esta publicação disponibiliza informações atualizadas e de qualidade, com o mérito de, ao mesmo tempo, mostrar os esforços do Governo do Estado frente aos desafios das mudanças climáticas e propicia o diálogo técnico com o setor produtivo buscando o desenvolvimento competitivo e com menor potencial emissor de GEE.

Carlos Roberto dos Santos
Diretor Presidente da CETESB

Apresentação do Representante do BID no Brasil

O Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) aprovou, na sua Assembleia de Governadores de 2016, a meta de dobrar o financiamento a projetos relacionados com a mudança do clima, os quais devem responder a 30% das aprovações do Grupo BID até 2020. A meta está sujeita à demanda por parte dos países membros, dos seus clientes e do acesso a fontes externas de financiamento, mas trata-se de uma diretriz fundamental para a nossa atuação na região. Desta maneira, o BID reforça o seu papel de atuar estrategicamente na mitigação dos impactos ambientais e efeitos da mudança climática e está focado nos projetos que podem ajudar os países da América Latina e Caribe a implementar seus compromissos adotados na Conferência das Partes (COP 21), realizada em 2015, em Paris.

A parceria entre o BID e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) no “Projeto de Desenvolvimento de Estudos de Mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE) para o Estado de São Paulo” se enquadra no esforço do Banco em orientar e instrumentalizar o desenvolvimento da indústria de baixo carbono. As informações coletadas a partir da ferramenta *MACTool* — Curva de Custo Marginal de Abatimento — mostraram alternativas tecnológicas e possibilidades claras de reduções no futuro baseadas no manejo eficiente de insumos — principalmente no emprego da energia — apresentando oportunidades de redução de emissões de GEE, redução de custos e aumento de produtividade.

O apoio do BID ao Estado de São Paulo, por meio da CETESB, busca trazer soluções estratégicas em resposta à Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC), e contribui para seu esforço de promover a redução da intensidade de carbono associada ao desenvolvimento do Estado, sem com isso comprometer as metas de crescimento da indústria.

Essa parceria representa uma experiência de extrema importância técnica e institucional, de caráter pioneiro. A presente publicação compartilha os resultados deste processo de cooperação técnica, e nos permite contribuir com a disseminação de conhecimento relevante e inovador para que outros atores do Brasil e da América Latina e Caribe possam igualmente contar com as bases adequadas para seus esforços de mitigar os efeitos da mudança do clima.

Hugo Florez Timoran
Representante do BID no Brasil

Agradecimentos

Expressamos nossos agradecimentos ao Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) pela parceria e acompanhamento do trabalho desenvolvido. Agradecemos à equipe do BID pela agilidade e comprometimento para que o estudo fosse concluído e pelas revisões e sugestões que resultaram no aprimoramento do trabalho, em especial ao Luciano Schweizer, Maria Netto, Simone Bauch e aos prestadores de serviço do BID que apoiaram este estudo, Mônica de Oliveira Conceição, Rogério Lessa da Paixão, Andreza Leódido e Sarah Rodrigues da Cunha Irff.

Salientamos nosso reconhecimento ao Banco Mundial, através de Christophe de Gouvello e do seu fundo de assistência técnica, ESMAP, que apoiou o desenvolvimento deste estudo com a ferramenta Curva MAC e as informações que foram necessárias para sua utilização.

Agradecemos ao Dr. Otávio Okano e ao Dr. Nelson Bugalho, presidente e vice-presidente da CETESB na época do início deste trabalho pela facilitação da cooperação junto ao BID e pelo apoio e entusiasmo durante todo o projeto.

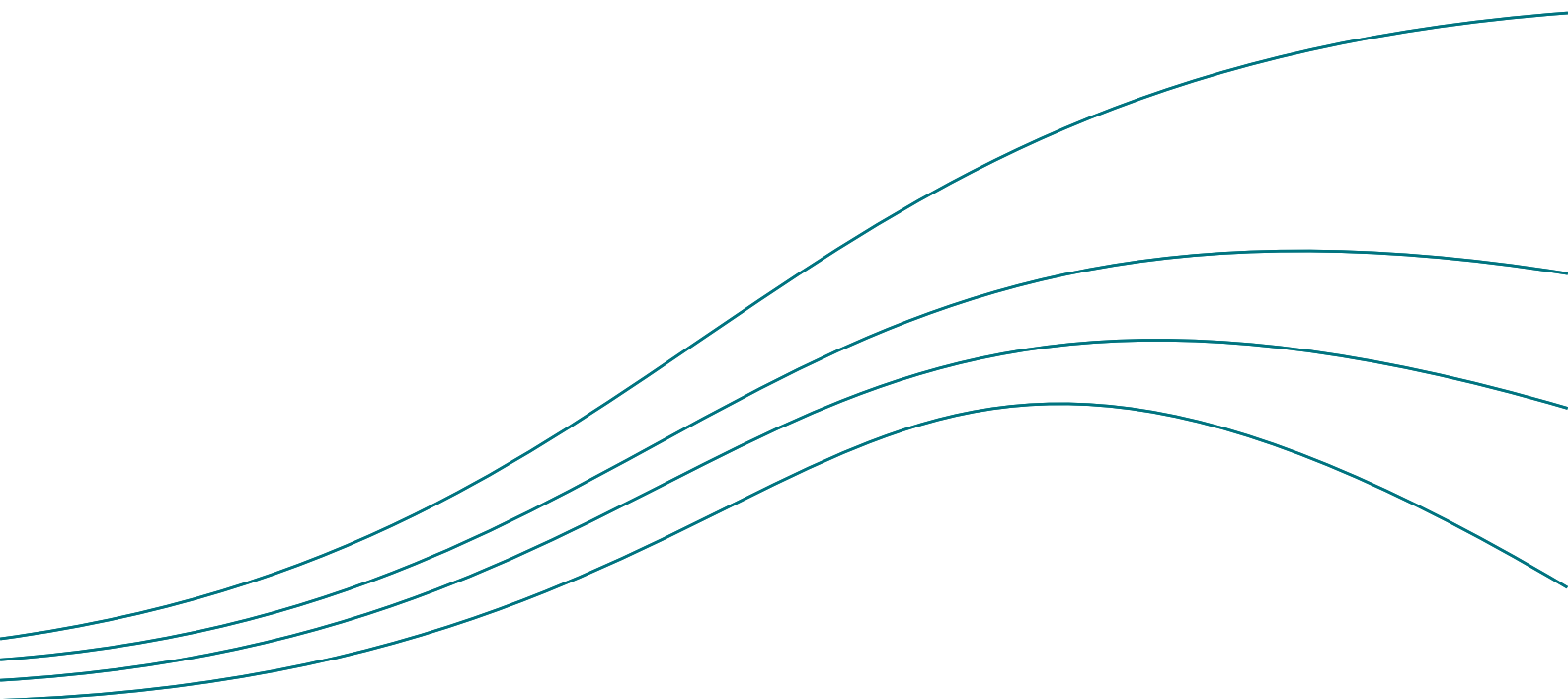
Agradecemos as importantes contribuições das empresas, instituições e especialistas do setor que colaboraram com o desenvolvimento deste estudo.

Destacamos e agradecemos às contribuições dos colegas da CETESB: Fátima A. Carrara, Carlos Lacava, Cristina Poli, Margot Terada, Milton Norio Sogabe, Volf Steinbaun (*in memoriam*), Eduardo Serpa e Maria Heloisa Pádua Lima de Assumpção.

A todos os envolvidos neste projeto nossos sinceros agradecimentos.



Sumário executivo



O presente sumário foi baseado no “Estudo de baixo carbono para a indústria de cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030” o qual apresentou cenários de referência (CR) e o cenário de baixo carbono (CBC) considerando emissões de GEE no processo industrial, no consumo de energia e alternativas de mitigação. No estudo foram avaliados os Custos Marginais de Abatimento (*Marginal Abatement Cost* – MAC) das tecnologias avaliadas e o preço de equilíbrio de carbono (*Break-Even Carbon Price* – BECP). As reduções de emissões proporcionadas ao longo do período analisado em cada opção tecnológica de mitigação foram consolidadas em um gráfico de cunha (*Wedge Graph*).

As emissões futuras de GEE são o produto de sistemas dinâmicos muito complexos, determinados por forças motrizes tais como crescimento demográfico, desenvolvimento sócio-econômico e mudança tecnológica, cuja evolução é altamente incerta. No entanto, os cenários são imagens alternativas de como o futuro poderá se desdobrar e são ferramentas adequadas para analisar como as forças motrizes podem influenciar no resultado de emissões futuras, assim como avaliar as incertezas associadas, não apresentando relação com a probabilidade de ocorrência dos mesmos (IPCC, 2000a).

Os cenários colaboram na identificação das possíveis ameaças, avaliam as competências organizacionais e exercitam o pensamento global para desenvolver alianças e ações estratégicas, proporcionando a elaboração de análises alternativas. Portanto, não se trata apenas de prospecção, mas da construção de um futuro possível, auxiliando a construir as mudanças desejadas para o futuro (WRIGHT, 2008 apud MENDONÇA, 2011). Os cenários no presente estudo foram construídos baseados na análise

de dados históricos, nas informações apresentadas em publicações do setor e em informações atribuídas pelos autores.

O Setor de Cimento no Estado de São Paulo, em 2005, contribuiu com 8,4% das emissões de GEE no Setor de Processos Industriais, fato que se relaciona com a produção, onde o estado foi responsável por 8,1% da produção nacional de cimento (CETESB, 2013).

ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

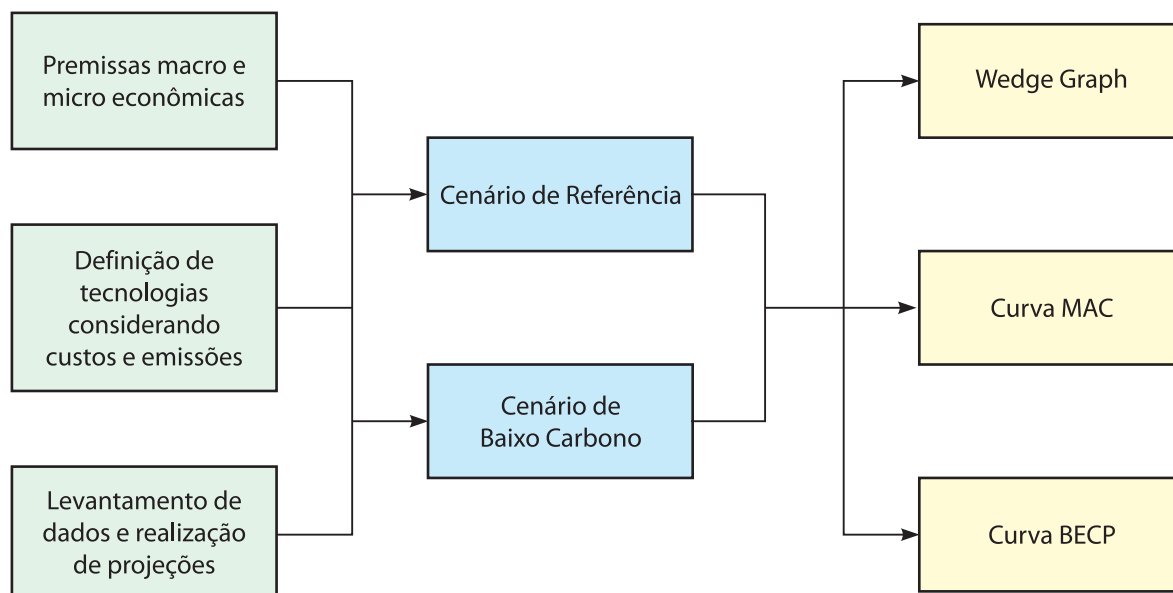
A construção dos cenários seguiu o roteiro metodológico apresentado na Figura 1, onde consta um levantamento inicial de dados, onde foram contactadas empresas e especialistas do setor para o estabelecimento de premissas e a realização de projeções. Posteriormente, seguiu-se com a realização dos CR e CBC e a apresentação dos resultados de mitigação, MAC e BECP.

As estimativas de emissões de GEE foram realizadas empregando-se o método apresentado no guia do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2000b), o *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Essas estimativas consideraram dados de atividade, como produção ou energia consumida e o respectivo fator de emissão.

A abordagem na determinação do MAC e do BECP¹ foi incremental e teve como referência o Estudo de Baixo Carbono para o Brasil (GOUVELLO et al., 2010). Para a construção das curvas de MAC e BECP empregou-se a *MACTool*. De acordo com *Energy Sector Management Assistance Program* (ESMAP, 2016), trata-se de uma ferramenta desenvolvida pelo Banco Mundial que permite avaliar o investimento

1. O preço de equilíbrio de carbono indica o incentivo econômico que os agentes, como por exemplo, a indústria, necessitariam para que a medida de mitigação estudada se tornasse atraente, quando comparada à referência. Este preço é determinado da mesma forma que o custo marginal de abatimento (MAC), porém utilizando uma taxa de atratividade (TIR) setorial. Usualmente, o *benchmark carbon price* é apresentado graficamente da mesma forma que a Curva MAC (GOUVELLO et al., 2010).

Figura 1 – Etapas do desenvolvimento do estudo



Fonte: Pacca et al. (2017).

necessário para um crescimento de baixo carbono, podendo ser utilizada para testar as possibilidades setoriais e as respectivas respostas aos preços. Como entradas, a MACTool utiliza os parâmetros chave para as medidas de mitigação e para as variáveis macroeconômicas, devendo o usuário especificar pelo menos um cenário sobre o futuro macroeconômico incluindo as variáveis de interesse, tais como o preço dos combustíveis fósseis e a demanda futura, e também fornecer cenários de futura inclusão de tecnologias ou medidas de baixo carbono para uma linha de base e pelo menos uma via de redução de emissão (FAY, et al, 2015).

Para aferir quantitativamente a contribuição de cada tecnologia na redução das emissões de GEE, foram elaboradas curvas que apresentem cunhas de mitigação (*Wedge Graph*), referentes à comparação entre o CR e o CBC, com a implantação das respectivas tecnologias. Com esta informação foi possível visualizar a contribuição de cada tecnologia para a mitigação de GEE.

RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados no período de 2014 a 2030 para a evolução da produção de cimento no estado, a evolução do consumo de energia, a evolução das emissões do CR e CBC, os custos de investimentos, as emissões evitadas por cada medida nos cenários, o custo marginal de abatimento (curva MAC) e o BECP das tecnologias.

A evolução da produção de cimento no Estado de São Paulo

A produção de cimento no Estado de São Paulo não é suficiente para suprir sua demanda. No período de 2004 a 2013 o consumo esteve em média 62% acima de sua produção, o que faz com que o estado seja um importador de cimento proveniente de outras regiões do país. Além do cimento, São Paulo importa o clínquer que passa por processo de moagem e adições nas indústrias cimenteiras localizadas no estado.

O estudo do setor do cimento considerou dados primários de fontes de informação setoriais, bem como, referências bibliográficas, sendo uma das limitações encontradas, a obtenção de dados acurados sobre a produção de clínquer no Estado de São Paulo. A deficiência de dados para criação dos cenários foi superada por meio da obtenção de informações primárias e estimativas obtidas em entrevistas com especialistas, pesquisadores e agentes do mercado. As empresas e associações contatadas para participar do estudo foram: Votorantim Cimentos, Inter-cement, SINAPROCIM, ABAI, ABRAMAT, ABESC, MC-Bauchemie, Grace, Fives Group, Saint-Gobain, ABCP, ArtSpray, França e Associados, Cyrela e Infibra.

Para a composição do cenário de evolução da produção de cimento no Estado de São Paulo, assumiu-se que não haverá aumento da capacidade instalada por rota integrada do cimento, ou seja, a rota que inclui a etapa de clínquerização, em razão da dificuldade de obtenção de licença ambiental para a construção de novas fábricas integradas. Quando a produção atingir esta capacidade, o incremento se dará por construção de usinas de moagem.

Para a projeção da produção de cimento adotou-se um crescimento de 5% a.a. (ao ano), com exceção de 2014 e 2015 onde foi utilizada uma taxa de 0,4% a.a. conforme o Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento (SNIC). Existem, no entanto, estimativas mais conservadoras e mais otimistas, que variam entre 3% e 8% a.a.. Considerou-se que ao se atingir a capacidade instalada das usinas integradas em São Paulo, o crescimento continuaria a partir da ampliação de usinas de moagem (PUNHAGUI et al., 2017; MME, 2010).

Na Tabela 1 e no Gráfico 1 é apresentada a produção de cimento correspondente a rota integrada e moagem para o CR e CBC. Observa-se que em 2014 a produção por rota integrada corresponde a 64% e a moagem a 36%, mas

Tabela 1 – Produção de cimento

Ano	Rota integrada	Moagem	Produção de cimento total (integrada + somente moagem)
	(Gg)		
2014R	6.413	3.607	10.020
2015E	6.441	3.623	10.064
2016E	6.763	3.804	10.567
2017E	7.101	3.995	11.096
2018E	7.457	4.194	11.651
2019E	7.800	4.433	12.233
2020E	7.800	5.045	12.845
2021E	7.800	5.687	13.487
2022E	7.800	6.361	14.161
2023E	7.800	7.069	14.869
2024E	7.800	7.813	15.613
2025E	7.800	8.593	16.393
2026E	7.800	9.413	17.213
2027E	7.800	10.274	18.074
2028E	7.800	11.178	18.978
2029E	7.800	12.126	19.926
2030E	7.800	13.123	20.923

Fonte: Elaboração própria (2017).

Legenda: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

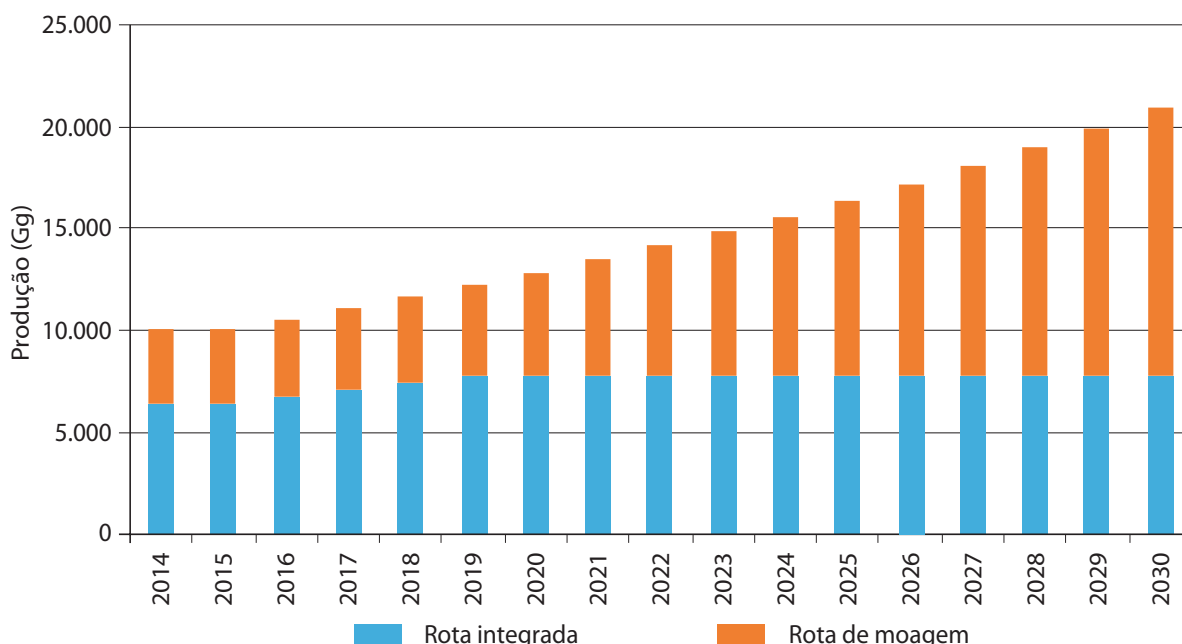
em 2030 a rota integrada corresponde a 37% e a moagem a 63%. Esta inversão se deve principalmente a proposta da ausência de novas usinas integradas no estado, incentivando que ocorra uma importação de materiais para que sejam apenas moídos nos limites territoriais.

O Gráfico 1 apresenta a produção no Estado de São Paulo de 2014 a 2030.

A evolução do consumo de energia

A energia térmica consumida por tonelada de cimento varia devido à composição do mesmo e das condições dos processos industriais. Quanto maior o teor de clínquer no cimento, maior a energia térmica necessária para produzi-lo. Já o consumo de energia elétrica para produção de cimento foi considerado fixo e igual a 107 kWh/t. Como a energia elétrica consumida

Gráfico 1 – Produção de cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030



Fonte: Elaboração própria (2017).

na moagem é baixa, em média 32 kWh/t, e fortemente influenciada pelo que é moído, dadas às incertezas, assumiu-se que a demanda de eletricidade não será afetada no futuro. No ano de 2013, a energia total, térmica e elétrica, consumida por tonelada de cimento foi de 2,74 GJ, cerca de 86% térmica e 14% elétrica.

No CBC, o consumo de energia térmica diminui devido ao aumento da participação do *filler* no cimento, com seu teor atingindo 39% em 2030, enquanto que o teor de clínquer se reduz para 46% (19,6% a menos do que em 2014). O consumo de energia elétrica, entretanto, permanece inalterado. Isto pode ser conferido na Tabela 2, que apresenta a comparação do consumo de energia estimado para o setor de cimento no CR e no CBC.

No CR, a energia térmica corresponde a 80% do total de energia em 2014. Esta relação diminui para 73% em 2030 por conta do aumento da participação das usinas de moagem, em detrimento das usinas de rota integrada ao longo do período. De acordo com as estimativas, espera-se que ocorra um aumento do

Tabela 2 – Consumo de energia do cimento produzido em São Paulo

Ano	Cenário de referência		Cenário de baixo carbono	
	Energia térmica	Energia elétrica	Energia térmica	Energia elétrica
	(TJ)	(GWh)	(TJ)	(GWh)
2014R	15.166	1.069	14.985	1.069
2015E	14.818	1.074	14.617	1.074
2016E	15.619	1.128	15.619	1.128
2017E	16.690	1.184	16.142	1.184
2018E	17.815	1.243	16.663	1.243
2019E	18.996	1.306	17.182	1.306
2020E	19.141	1.371	16.740	1.371
2021E	19.402	1.439	16.401	1.439
2022E	19.651	1.511	16.049	1.511
2023E	19.888	1.587	15.686	1.587
2024E	20.114	1.666	15.312	1.666
2025E	20.329	1.749	14.926	1.749
2026E	20.534	1.837	14.531	1.837
2027E	20.729	1.929	14.126	1.929
2028E	20.915	2.025	13.711	2.025
2029E	21.091	2.126	13.288	2.126
2030E	21.260	2.233	12.856	2.233

Fonte: Elaboração própria (2017).

Legenda: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

consumo energético total de 54% de 2030 em relação a 2014.

Já no CBC, a diminuição do consumo de energia térmica é de 14% em 2030 em comparação a 2014. Comparado ao CR, seria possível economizar um total de 63.323 TJ ao longo do período 2014-2030 com a implantação das estratégias de baixo carbono.

A evolução das emissões do cenário de referência

A produção do clínquer é responsável pela maior parte da energia consumida e da emissão de processo (HUNTZINGER; EATMON, 2009). Para construir o cenário de emissão, foram

consideradas as emissões da rota integrada (descarbonatação, queima de combustível fóssil e consumo de eletricidade) juntamente com as emissões da rota de moagem que ocorrem dentro dos limites físicos do estado, ou seja, as emissões pelo consumo de eletricidade.

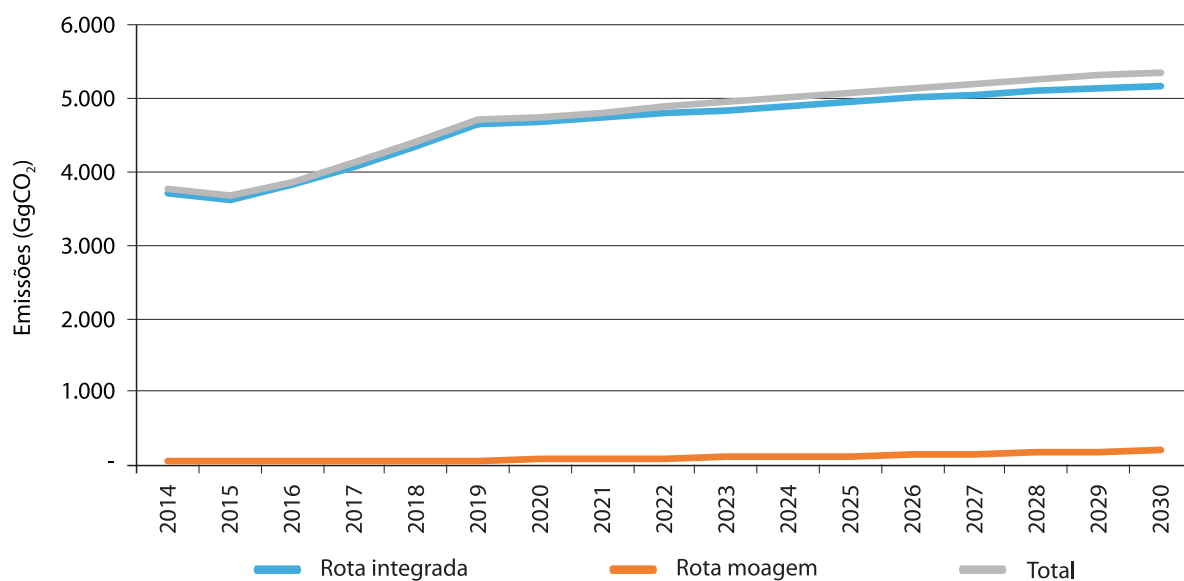
O Gráfico 2 apresenta as emissões de CO₂ projetadas no CR para a produção de cimento, discriminando cada rota.

A Tabela 3 apresenta as emissões de GEE de 2014 a 2030 considerando a emissão da produção no Estado de São Paulo.

Em relação ao CBC, foram levantadas três possibilidades de mitigação:

- Redução do teor de clínquer no cimento pelo aumento do teor de *filler*;

Gráfico 2 – Emissões da produção de cimento em São Paulo no cenário de referência



Fonte: Elaboração própria (2017).

Tabela 3 – Emissões da produção de cimento do Estado de São Paulo no cenário de referência

Ano	Rota integrada			Rota de moagem	Total
	Descarbonatação	Combustível	Eletricidade	Eletricidade	
	(GgCO ₂)				
2014R	2.347	1.266	93	52	3.758
2015E	2.293	1.237	93	52	3.676
2016E	2.455	1.304	98	55	3.874
2017E	2.583	1.393	103	57	4.137
2018E	2.757	1.487	108	60	4.413
2019E	2.940	1.586	114	63	4.702
2020E	2.962	1.598	113	73	4.746
2021E	3.003	1.620	113	82	4.817
2022E	3.041	1.641	113	92	4.886
2023E	3.078	1.660	113	102	4.953
2024E	3.113	1.679	113	113	5.018
2025E	3.146	1.697	113	124	5.080
2026E	3.178	1.714	113	136	5.141
2027E	3.208	1.731	113	149	5.200
2028E	3.237	1.746	113	162	5.257
2029E	3.264	1.761	113	175	5.313
2030E	3.290	1.775	113	190	5.367

Fonte: Elaboração própria (2017).

Nota: O FE do cimento foi calculado ano a ano, uma vez que este varia devido o teor de clínquer no cimento. O FE do clínquer é considerado constante a 848 kgCO₂/t. Mais informações ao longo do relatório principal.

Legenda: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

- b) Substituição de combustível fóssil (coque de petróleo) por combustível derivado de resíduos (CDR);
- c) Substituição de combustível fóssil (coque de petróleo) por pellets de madeira.

A Tabela 4 apresenta o cenário de penetração destas três medidas. É possível observar a introdução gradual de cada uma até atingirem o máximo estipulado em 2030. Para *filler*, considerou-se que este limite será 39% do percentual do cimento. Para a substituição de combustíveis fósseis por biomassa, considerou-se que o máximo potencial de substituição é de 60% da energia térmica. Uma vez que CDR e *pellets* partilham da mesma energia, para evitar duplas contagens, estipulou-se 30% de penetração para cada uma destas opções.

A partir da produção de cimento (Gráfico 1), da penetração das tecnologias (Tabela 4) e dos fatores de emissão específicos, pode-se

Tabela 4 – Penetração das medidas de baixo carbono 2014–2030

Ano	Filler (1)	CDR (2)	Pellets (2)
2014R	2%	0%	0%
2015E	5%	0%	0%
2016E	7%	2%	2%
2017E	9%	4%	4%
2018E	12%	6%	6%
2019E	14%	8%	8%
2020E	16%	10%	10%
2021E	19%	12%	12%
2022E	21%	14%	14%
2023E	24%	16%	16%
2024E	26%	18%	18%
2025E	28%	20%	20%
2026E	31%	22%	22%
2027E	33%	24%	24%
2028E	35%	26%	26%
2029E	38%	28%	28%
2030E	40%	30%	30%

Fonte: Elaboração própria (2017).

(1) Sobre a produção total de cimento, que afeta as emissões de descarbonatação e de energia térmica.

(2) Apenas sobre as emissões de energia térmica.

Legenda: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

projetar as emissões no CBC, apresentado na Tabela 5.

A partir da Tabela 3 e da Tabela 5, pode-se observar que no CBC as emissões de processo (pelo aumento do *filler*) e de energia térmica (pelo aumento do *filler* mais o uso de combustíveis renováveis) no período de análise apresentaram uma redução de emissões de 19,7% e 50,0% em relação às emissões totais do CR 2030. Considerando as emissões totais, processo, energia térmica e elétrica, ocorreria uma redução de 28,9% das emissões no CBC em relação ao CR.

Custo de investimento e de operação

Foi assumido que não haverá aumento da capacidade instalada por rota integrada do cimento, como já explicitado anteriormente. O incremento se dará por construção de usinas de moagem.

Os custos de investimento (CAPEX) e os custos de operação e manutenção (OPEX) estão resumidos na Tabela 6. Estes custos foram essenciais para a análise econômica da estratégia *filler* e determinação do MAC e BECP. Por outro lado, para a substituição de combustível fóssil, considerou-se que não há necessidade de adaptação da estrutura industrial para utilização de CDR ou pellets, igualmente não há variação nos custos de operação, portanto, tanto CAPEX quanto OPEX foram considerados zero em ambos CR e CBC. O MAC e BECP das estratégias de CDR e pellets ficaram em função unicamente da diferença dos preços adotados para cada um destes combustíveis em relação aos preços do coque de petróleo.

A partir da Tabela 6 é possível perceber que, apesar de haver um CAPEX adicional no CBC por conta da implantação de silos para

Tabela 5 – Emissões no Cenário de Baixo Carbono

Ano	Rota integrada			Rota de moagem	Total
	Descarbonatação	Combustível	Eletricidade	Eletricidade	
	(GgCO ₂)				
2014R	2.319	1.251	93	52	3.715
2015E	2.262	1.220	93	52	3.627
2016E	2.417	1.139	98	55	3.709
2017E	2.498	1.062	103	57	3.720
2018E	2.579	991	108	60	3.738
2019E	2.659	925	114	63	3.761
2020E	2.590	863	113	73	3.639
2021E	2.538	805	113	82	3.538
2022E	2.484	751	113	92	3.440
2023E	2.427	701	113	102	3.343
2024E	2.369	654	113	113	3.249
2025E	2.310	610	113	124	3.157
2026E	2.249	569	113	136	3.067
2027E	2.186	531	113	149	2.979
2028E	2.122	495	113	162	2.892
2029E	2.056	462	113	175	2.806
2030E	1.989	429	113	190	2.721

Fonte: Elaboração própria (2017).

Legenda: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

armazenamento do *filler*, o OPEX torna-se menor quando se aumenta o teor de *filler* no cimento, já que seu custo por tonelada é 61% menor que o custo do clínquer.

Tabela 6 – CAPEX e OPEX

Tipo de custo	Equipamento	Unidade	Custo
CAPEX	Fábrica de moagem (1)	(US\$)	87.500.000,00
	Silo de armazenamento (2)	(US\$)	51.852,00
OPEX	Clínquer + gipsita	(US\$/t)	56,34
	Filler	(US\$/t)	21,72
	Escória granulada	(US\$/t)	17,50
	Água (3)	(US\$/m³)	6,45

Fonte: Elaboração própria (2017).

(1) Capacidade instalada aproximada: 900 Gg/ano.

(2) Capacidade de 100 toneladas.

(3) Tabela tarifária – acima de 50 m³/mês.

Emissões evitadas em cada medida de baixo carbono

A partir da aplicação das tecnologias de baixo carbono, é possível alcançar uma redução no período de 23.199 GgCO₂, 29% em relação às emissões do CR da indústria do cimento até o ano de 2030. Considerando os resultados apresentados na Tabela 7, esta redução tem participação predominante da medida de *filler* (65% do total das emissões evitadas), enquanto as medidas referentes aos combustíveis têm igual representação ao longo do período (17,4% cada uma).

A redução das emissões de CO₂ é diretamente proporcional ao percentual de *filler* adicionado, pois este atua substituindo

Tabela 7 – Emissões evitadas por medida ou tecnologia no Estado de São Paulo de 2014 a 2030

Ano	Aumento do teor de <i>filler</i> no cimento	Substituição de combustível fóssil por CDR	Substituição de combustível fóssil por <i>pellets</i> de madeira	Total das emissões do CBC	Total das emissões do CR
	(GgCO ₂)				
2014R	43	0	0	3.715	3.758
2015E	48	0	0	3.628	3.676
2016E	58	35	35	3.746	3.874
2017E	131	143	143	3.721	4.137
2018E	274	200	200	3.738	4.413
2019E	432	255	255	3.761	4.702
2020E	572	267	267	3.639	4.746
2021E	715	282	282	3.538	4.817
2022E	858	294	294	3.439	4.886
2023E	1.001	304	304	3.343	4.953
2024E	1.144	312	312	3.249	5.018
2025E	1.287	318	318	3.157	5.080
2026E	1.430	322	322	3.067	5.141
2027E	1.573	324	324	2.978	5.200
2028E	1.716	325	325	2.892	5.257
2029E	1.859	324	324	2.807	5.313
2030E	2.002	322	322	2.721	5.367

Fonte: Elaboração própria (2017).

Legenda: R - Dado Real, E - Dado Estimado.

o ligante (clínquer) que é o principal emissor da mescla que compõe o cimento, por emissões de processo e energia térmica. Parte da energia remanescente (60%), após a introdução do *filler*, é substituída por CDR e pellets. No Gráfico 3, observa-se a evolução da participação de cada medida avaliada no estudo na mitigação das emissões.

Custo marginal de abatimento (curva MAC) e preço de equilíbrio do carbono das medidas de baixo carbono

De acordo com os resultados da curva MAC na Tabela 8, conclui-se que a medida de filler traz um retorno econômico de US\$ 2 a cada tonelada de CO₂ evitada. As medidas de pellets e CDR, entretanto, apresentam MAC positivo, respectivamente US\$ 10 e US\$ 11. Se a

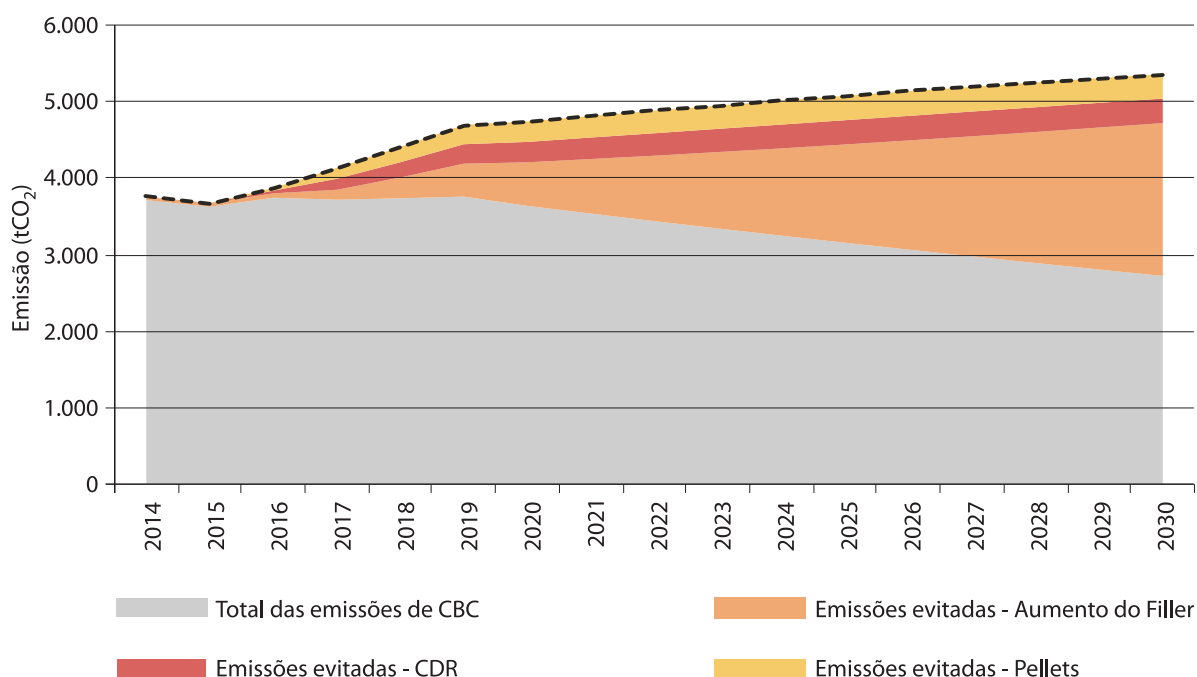
Tabela 8 – Dados para a elaboração da curva MAC, baseados nos resultados dos cenários estratégicos propostos

Tipo de emissão	Medida	MAC	BECP	Emissões evitadas 2014–2030
		(US\$/tCO ₂)	(US\$/tCO ₂)	(MtCO ₂)
Processo e combustível	Filler	– 2	– 5	15,14
Combustível	Pellets	10	23	4,03
	CDR	11	24	4,03

Fonte: Elaboração própria (2017).

indústria de cimento optasse por adotar somente a medida de *filler*, geraria uma economia total de US\$ 28 milhões, evitando 15,14 MtCO₂ até 2030. Logo, se a indústria desejar atingir o potencial máximo de redução avaliado (23,2 MtCO₂), terá que investir US\$ 54,3 milhões ao longo do período.

Gráfico 3 – Wedge Graph para a indústria de cimento em São Paulo 2014–2030



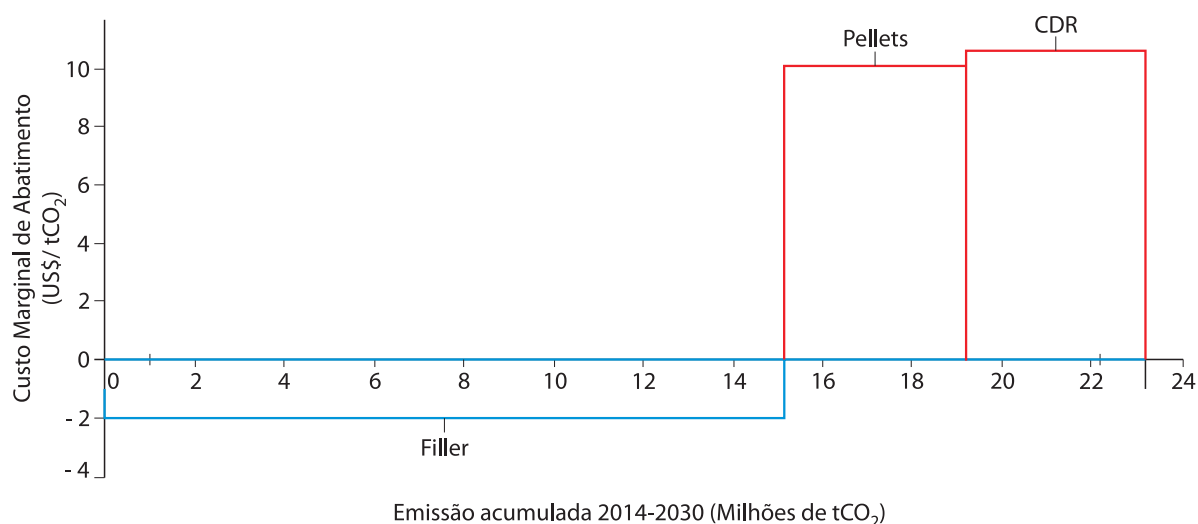
Fonte: Elaboração própria (2017).

O resultado do BECP foi análogo ao MAC, com o *filler* trazendo um retorno interno maior do que o *Benchmark-TIR* estipulado pela indústria (13%), o que a torna uma medida atrativa para investimentos. Já as medidas de *pellets* e CDR não atingem o retorno esperado, portanto,

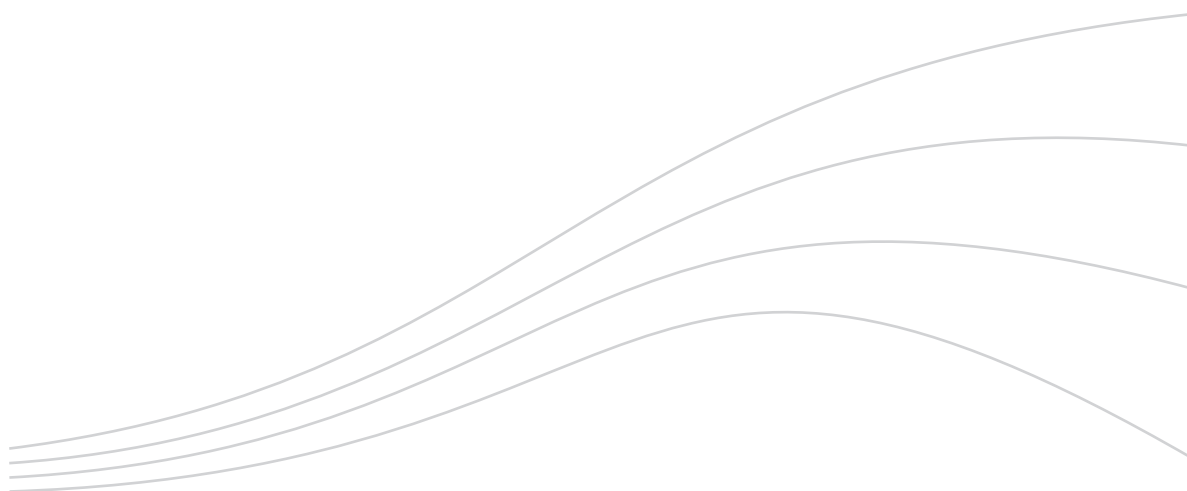
seria necessário vender a tonelada de carbono, respectivamente por US\$ 23 e US\$ 24, para que as mesmas se tornassem atraentes.

O Gráfico 4 apresenta a curva MAC com as três medidas avaliadas para a indústria de cimento no estado.

Gráfico 4 – Curva de custo marginal de abatimento para a indústria de cimento no Estado de São Paulo 2014–2030



Fonte: Elaboração própria (2017)



CONCLUSÕES

As mudanças no teor de clínquer são afetadas pelo fornecimento de escória, que deve apresentar dificuldades nos próximos anos. A única fonte paulista de escória de alto forno, Usiminas, anunciou em outubro de 2015 o fechamento da usina de Cubatão. Assim, as cinzas volantes ou escória não são consideradas uma solução para o Estado de São Paulo, já que não existe fornecedor local. Embora haja opções de adição para a diminuição de ligantes, considera-se que o filler é a melhor opção para o momento e o local.

No CR, as emissões de CO₂ do setor de cimento para o Estado de São Paulo sofrerão um aumento de 1609 GgCO₂, cerca de 43% em 2030 em relação a 2014. Estima-se que as emissões sejam crescentes por conta do aumento da produção de cimento de 5% a.a., que a partir de 2019 ocorre pelo incremento de fábricas de moagem, já que não haverá aumento de capacidade instalada por rota integrada no estado. Também existe o aumento do teor do clínquer no cimento, que atinge 77% em 2030, e por conta disto o fator de emissão por tonelada de cimento irá aumentar. O aumento do teor de clínquer ocorrerá por não haver fornecedor local de cinzas volantes e escória, e se identificou dificuldades (futuras) deste fornecimento.

Na produção de cimento, 60% a 65% das emissões são relacionadas à descarbonatação do clínquer, sobre a qual não é possível propor mitigação, uma vez que é um processo químico. A mitigação desta fração de emissão pode ser feita pela substituição parcial desta matéria-prima por alternativas que não necessitem ser descarbonatadas, como o filler analisado no presente estudo. A outra parte expressiva da emissão (35%–40%) está relacionada à queima de combustíveis fósseis. A eficiência energética não foi considerada como uma possível medida para o CBC, pois para o setor, estratégias desta natureza surtem pouco efeito. As possibilidades

na área de energia neste setor se encontram no aumento da participação de biomassa, como o CDR e os pellets analisados no estudo, dentro do *mix* de combustíveis utilizados na produção de cimento.

Os resultados obtidos no *Wedge Graph* gerado na MACTool, a partir da comparação do CR e do CBC, permitem concluir que é possível alcançar uma redução de 23.199 GgCO₂, que considerando o total mitigado no período de 2014 a 2030 representa uma redução de 28,9% sobre as emissões do CR. Esta redução tem participação predominante da estratégia do filler, 65,3% do total das emissões evitadas, que inclusive é a única medida que apresentou MAC e BECP negativos. Este resultado mostra que é atrativo para a indústria de cimento investir no aumento do filler, podendo gerar uma economia de US\$ 28 milhões até o ano de 2030.

Por outro lado, pellets e CDR apresentaram MAC e BECP positivos. O preço dos combustíveis foi o único determinante deste resultado, já que se pressupôs que não há mudanças no CAPEX ou no OPEX para implantação destas medidas. Por conta disto, o futuro cenário dos preços dos combustíveis poderá acarretar em MAC e BECP maiores ou menores do que foi apresentado para estas medidas.

O uso de CDR em substituição ao combustível fóssil convencional (neste caso carvão) em fornos de cimento além de permitir reduzir as emissões de GEE, também, diminui a demanda por aterros e, dessa a probabilidade de contaminação do ambiente.

A implementação de tais estratégias depende de política fiscal e de um plano de desenvolvimento setorial. O custo destas ações deve ser baixo, uma vez que se trata de práticas existentes.

Finalmente, destacam-se as limitações e dificuldades encontradas ao longo do período de execução deste documento, um dos seus principais objetivos foi identificar possíveis direções para um futuro de baixo carbono, tendo

um recorte específico e exploratório, a indústria de cimento no Estado de São Paulo. Uma vez que tomadores de decisão optem por determinados caminhos, novos estudos deverão surgir para ampliar o escopo e aprofundar o caráter técnico, político, regulatório, social e ambiental destas tecnologias de baixo carbono. Cabe

ressaltar que o enfoque deste estudo foi a análise de tecnologias para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa, com enfoque no dióxido de carbono, e, portanto, a emissão de outros poluentes deve ser analisada de acordo com a legislação vigente, sendo necessária por vezes a regulamentação de procedimentos específicos.

Lista de gráficos

Gráfico 1 – Produção nacional por grupo industrial	43
Gráfico 2 – Produção e consumo anual de cimento no Estado de São Paulo	44
Gráfico 3 – Distribuição do cimento consumido no Sudeste	44
Gráfico 4 – Esquematização de uma curva MAC	50
Gráfico 5 – Fatores de emissão de CO ₂ no cenário de referência segundo variação de ligante e adições no cimento	60
Gráfico 6 – Distribuição territorial do consumo energético na produção de cimento no cenário de referência	61
Gráfico 7 – Variação da energia incorporada no cimento segundo o teor de clínquer (sem mudança de tecnologia)	62
Gráfico 8 – Evolução do consumo de energia térmica da indústria cimenteira e distribuição energética por tipo de combustível no Brasil	63
Gráfico 9 – Distribuição percentual dos componentes do custo de produção do cimento	65
Gráfico 10 – Fatores de emissão de CO ₂ no cenário de baixo carbono segundo variação de ligante e adições no cimento	67
Gráfico 11 – Origem das emissões de CO ₂ na produção de cimento	79
Gráfico 12 – Distribuição territorial da emissão de CO ₂ na produção de cimento para São Paulo	80
Gráfico 13 – Emissões evitadas pelas tecnologias de baixo carbono	83
Gráfico 14 – Curva de custo marginal de abatimento para o setor de cimento	84
Gráfico 15 – Curva de <i>Break-Even Carbon Price</i> para o setor de cimento	85
Gráfico 16 – Projeção exponencial dos preços em leilões de energia	100
Gráfico 17 – Projeção anual do <i>Brent</i> no período de 2014 a 2030	103
Gráfico 18 – Projeção da produção de clínquer segundo rota, considerado apenas clínquer consumido na produção de cimento ocorrida dentro dos limites do estado	111
Gráfico 19 – Consumo total de energia (térmica e elétrica) para produção do cimento do Estado de São Paulo, somadas as consumidas dentro e fora dos limites geopolíticos do estado	111
Gráfico 20 – Consumo total de energia (térmica e elétrica) para produção do cimento de São Paulo, somadas as consumidas dentro e fora dos limites geopolíticos do estado, por rota de produção	112

Gráfico 21 – Emissão total da produção de cimento do Estado de São Paulo, geradas dentro e fora dos limites geopolíticos	1 1 3
Gráfico 22 – Emissão total da produção de cimento do Estado de São Paulo, somadas as emissões geradas fora dos limites geopolíticos por fonte de emissão. . .	1 1 3
Gráfico 23 – Emissão total da produção de cimento do Estado de São Paulo, somadas as emissões geradas fora dos limites geopolíticos do estado, por rota de produção	1 1 4
Gráfico 24 – Estimativa da demanda de concreto, em volume, para o Estado de São Paulo.	1 2 1
Gráfico 25 – Estimativa da demanda de argamassa, em volume, para o Estado de São Paulo	1 2 2
Gráfico 26 – Energia incorporada no concreto e argamassa no Estado de São Paulo, com apresentação das parcelas oriundas do cimento e da cal	1 2 2
Gráfico 27 – Energia incorporada nos ligantes utilizados para a produção de argamassa no Estado de São Paulo	1 2 3
Gráfico 28 – Projeção das emissões de CO ₂ do concreto e argamassa consumidos no Estado de São Paulo	1 2 3
Gráfico 29 – Emissões evitadas pelas tecnologias de baixo carbono	1 2 5
Gráfico 30 – Curva de custo marginal de abatimento para o setor de cimento, considerando as emissões que ocorrem fora do Estado de São Paulo . . .	1 2 6
Gráfico 31 – Curva de <i>Break-Even Carbon Price</i> para o setor da cimento, considerando as emissões que ocorrem fora do Estado de São Paulo	1 2 7

Lista de figuras

Figura 1 – Etapas do desenvolvimento do estudo	48
Figura 2 – Esquematização de um <i>Wedge Graph</i>	51
Figura 3 – Distribuição do total de cimento pelas três medidas avaliadas no cenário de baixo carbono	67

Lista de equações

Equação 1 – Cálculo da emissão de CO ₂ total da produção do cimento	48
Equação 2 – Cálculo da emissão de gás de efeito estufa por eletricidade	49
Equação 3 – Cálculo da emissão de gás de efeito estufa por descarbonatação	49
Equação 4 – Cálculo da emissão de gás de efeito estufa por energia térmica	49
Equação 5 – Cálculo da energia incorporada no cimento	49
Equação 6 – Regressão exponencial dos preços dos leilões de energia elétrica 2014– 2020	100
Equação 7 – Cálculo da porcentagem mensal referente aos impostos da eletricidade	101
Equação 8 – Cálculo do preço do petróleo <i>Brent</i> (2014–2030)	103
Equação 9 – Preço do coque de petróleo	104
Equação 10 – Preço do <i>pellet</i> de madeira	104
Equação 11 – Preço do combustível derivado de resíduos	105
Equação 12 – Cálculo do fator de equivalência	106
Equação 13 – Preço do combustível em função do <i>Brent</i>	106
Equação 14 – Cálculo do volume de argamassa do cenário de referência	116
Equação 15 – Cálculo do volume de concreto por tipo de concreto	117
Equação 16 – Cálculo do percentual de cimento destinado a argamassas	117
Equação 17 – Cálculo do volume de argamassa demandada	117

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Capacidade instalada de produção de cimento por empresa em 2013	5 5
Tabela 2 – Produção de cimento.	5 6
Tabela 3 – Preço dos energéticos	5 7
Tabela 4 – Variação do teor de clínquer no cimento produzido no Estado de São Paulo, nos anos de 2014 a 2030	5 9
Tabela 5 – Fatores de emissões do cimento no Cenário de Referência	6 0
Tabela 6 – Resultados do cálculo da energia total no cimento de 2014 a 2030.	6 1
Tabela 7 – Consumo de energia térmica na indústria cimenteira e a distribuição energética por tipo de combustível no ano 2013.	6 3
Tabela 8 – Valor monetário de mercado dos insumos utilizados no cenário de referência para produção de cimento em fábricas de moagem	6 4
Tabela 9 – Fatores de emissões do cimento no cenário de baixo carbono.	6 6
Tabela 10 – Penetração das tecnologias de baixo carbono 2014–2030.	6 8
Tabela 11 – Variação do teor de clínquer com aumento de <i>filler</i>	6 8
Tabela 12 – Consumo de energia considerando a inserção de <i>filler</i> em substituição ao clínquer.	6 9
Tabela 13 – Custos de operação e manutenção para produção de cimento no Estado de São Paulo no cenário de baixo carbono com diminuição no teor de ligante até 2030	7 0
Tabela 14 – Quantidade estimada de energia térmica consumida considerando a substituição de coque de petróleo por CDR	7 3
Tabela 15 – Quantidade de energia térmica considerando a substituição do coque de petróleo por biomassa (<i>pellet</i> de madeira)	7 5
Tabela 16 – Energia consumida na produção de cimento no Estado de São Paulo	7 9
Tabela 17 – Comparação das emissões de energia da produção de cimento no cenário de referência e no cenário de baixo carbono.	8 1
Tabela 18 – Comparação das emissões de processo da produção de cimento no cenário de referência e no cenário de baixo carbono.	8 2
Tabela 19 – Emissões evitadas pelas tecnologias de baixo carbono.	8 3
Tabela 20 – Custo marginal de abatimento e potencial de emissões evitadas	8 4
Tabela 21 – <i>Break-Even Carbon Price</i>	8 5
Tabela 22 – Projeção dos preços de compra e venda da eletricidade (MACTool).	1 0 2

Tabela 23 – Projeções do <i>Brent</i> para o período de 2011 a 2030	103
Tabela 24 – Médias anuais do preço do coque de petróleo	104
Tabela 25 – Fatores de equivalência dos combustíveis em relação ao <i>Brent</i>	106
Tabela 26 – Projeção dos preços dos combustíveis 2014 a 2030	106
Tabela 27 – Valor monetário de mercado dos insumos utilizados para cálculo dos custos nos cenários de referência e de baixo carbono do setor da construção civil. . . .	118
Tabela 28 – Valor monetário de mercado dos insumos utilizados para cálculo dos custos nos cenários de referência e de baixo carbono do setor do cimento. . . .	119
Tabela 29 – Custos com os insumos utilizados para a estimativa dos custos nos cenários de referência e de baixo carbono do setor do cimento	119
Tabela 30 – Investimento necessário em equipamentos para adoção das tecnologias dos cenários de referência e de baixo carbono para os setores do cimento e da construção civil.	120
Tabela 31 – Emissões evitadas no setor de cimento, incluindo o consumo de cimento proveniente de outros estados 2014–2030.	124
Tabela 32 – Custo marginal de abatimento e potencial de emissões evitadas	125
Tabela 33 – <i>Break-Even Carbon Price</i>	126

Lista de abreviaturas e siglas

a.a.	ao ano
ABAI	Associação Brasileira de Argamassas Industrializadas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABESC	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAMAT	Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção
BECP	Preço de equilíbrio de carbono (<i>Break Even Carbon Price</i>)
BEN	Balanco Energético Nacional
Benchmark-TIR	Taxa de Atratividade
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
CAPEX	Investimentos (<i>Capital Expenditures</i>)
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CP	Cimento Portland
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CDR	Combustível Derivado de Resíduo
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CSI	<i>Cement Sustainability Initiative</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
GEE	Gás ou Gases de Efeito Estufa
ICMS	Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
INDC	Intended Nationally Determined Contribution
MAC	Custo Marginal de Abatimento (<i>Marginal Abatement Cost</i>)
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (atual MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações)
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira
NDC	Nationally Determined Contribution
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PEMC	Política Estadual de Mudanças Climáticas
RSU	Resíduo Sólido Urbano
Sabesp	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SGT	Superintendência de Gestão Tarifária
Sinaprocim	Sindicato Nacional da Indústria de Produtos de Cimento
SNIC	Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento
WBCSD	Conselho Mundial de Negócios para Desenvolvimento Sustentável (World Business Council for Sustainable Development)
WTI	<i>West Texas Intermediate</i>

Lista de símbolos

CH₄	Metano
CO₂	Dióxido de carbono (gás carbônico)
Gg	Gigagrama
GJ	Gigajoule
kWh	Quilowatt-hora
m³	Metro cúbico
Mt	Megatonelada
PJ	Petajoule
t	Tonelada
TJ	Terajoule

SUMÁRIO

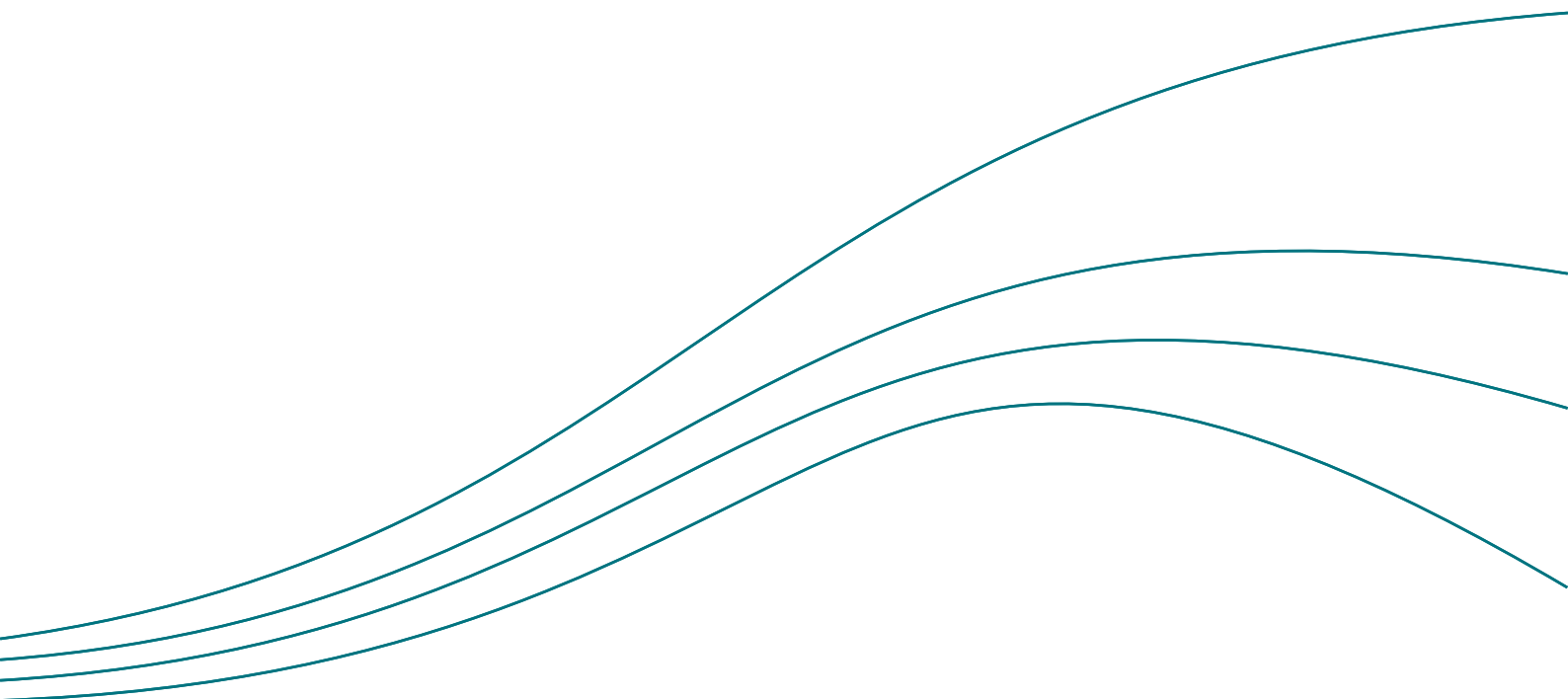
1	INTRODUÇÃO	41
1.1	A indústria de cimento no Brasil e em São Paulo	43
1.2	Processos de produção do cimento	44
1.3	Estimativa da energia do cimento	45
1.4	Emissões de gases de efeito estufa no setor do cimento	45
1.5	Estratégias para a redução das emissões de gases do efeito estufa	45
2	MÉTODOS	47
2.1	Etapas de desenvolvimento do estudo	48
2.2	Estimativas de emissões	48
2.3	Estimativa da energia do cimento	49
2.4	Curva de custo marginal de abatimento	49
2.5	Preço de equilíbrio de carbono	50
2.6	Gráfico de cunhas de redução (<i>Wedge Graph</i>)	51
3	DADOS	53
3.1	Dados gerais	54
3.1.1	Caracterização do sistema de produção de cimento no Estado de São Paulo	54
3.1.2	Taxa de crescimento na produção de cimento	54
3.1.3	Capacidade instalada no Estado de São Paulo	55
3.1.4	Produção de cimento no Cenário de Baixo Carbono	56
3.1.5	Fatores de emissão	56
3.1.6	Consumo específico do clínquer	57
3.1.7	Fator de consumo de eletricidade na rota integrada	57
3.1.8	Fator de consumo de eletricidade na moagem	57
3.1.9	Preço da energia	57
3.1.10	Taxa de desconto	58

3.1.11 Taxa de atratividade (Benchmark -TIR).	58
3.1.12 Taxas de câmbio.	58
3.1.13 Estimativa dos custos.	58
3.2 Cenário de referência.	58
3.2.1 Variação da composição do cimento no Cenário de Referência	58
3.2.2 Fatores de emissão do cimento no Cenário de Referência.	60
3.2.3 Consumo de energia para produção de cimento no cenário de referência..	60
3.2.4 Frações por tipo de combustível na indústria cimenteira no Cenário de Referência.	63
3.2.5 Investimento em novas fábricas de moagem	63
3.2.6 Custos de operação e manutenção.	64
3.3 Cenário de baixo carbono.	66
3.3.1 Fatores de emissão de cimento no Cenário de Baixo Carbono	66
3.3.2 Cenário de penetração das tecnologias de baixo carbono.	66
3.3.3 Estratégia 1 – Diminuição do teor de ligantes por substituição por filler	68
3.3.3.1 Consumo de energia considerando a inserção de filler em substituição ao clínquer	69
3.3.3.2 CAPEX considerando a inserção de filler em substituição ao clínquer...	69
3.3.3.3 OPEX considerando a inserção de filler em substituição ao clínquer	70
3.3.4 Estratégia 2 – Substituição de combustível fóssil (coque de petróleo) por combustível derivado de resíduo (CDR).	70
3.3.4.1 Consumo de energia considerando a substituição do combustível fóssil por combustível derivado de resíduo.	73
3.3.4.2 Custos de investimento e de operação e manutenção considerando a substituição do combustível fóssil por combustível derivado de resíduo (CDR)	74
3.3.4.3 Custos de energia considerando a substituição do combustível fóssil por combustível derivado de resíduo (CDR)	74
3.3.5 Estratégia 3 – Substituição de combustível fóssil considerando a substituição do coque de petróleo por biomassa (pellet de madeira)	74
3.3.5.1 Consumo de energia considerando a substituição do coque de petróleo por biomassa (pellet de madeira)	74

3.3.5.2	Custos de investimento e de operação e manutenção considerando a substituição do coque de petróleo por biomassa (pellet de madeira) ..	75
3.3.5.3	Custos de energia considerando a substituição do coque de petróleo por biomassa (pellet de madeira)	75
4	RESULTADO E DISCUSSÃO	77
4.1	Comparação dos cenários de referência e de baixo carbono	78
4.1.1	Consumo energético	78
4.1.2	Emissões do cimento.	79
4.1.2.1	Emissões de energia.	80
4.1.2.2	Emissões do processo de descarbonatação do clínquer.	82
4.2	Emissões evitadas em gráfico de cunha (<i>Wedge Graph</i>).	82
4.3	Curva de custo marginal de abatimento	84
4.4	Preço de equilíbrio de carbono (<i>Break-Even Carbon Price</i>).	85
5	CONCLUSÃO.	87
6	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A	99
	APÊNDICE B	109



Introdução



O Brasil instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), por meio da Lei 12.187 de 2009 (BRASIL, 2009), que define o compromisso nacional voluntário de adoção de ações de mitigação com vistas a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) entre 36,1% e 38,9% em relação às emissões projetadas até 2020. Segundo o Decreto 7.390 de 2010 (BRASIL, 2010), que regulamenta a PNMC, as emissões de GEE projetadas para 2020 foram estimadas em 3,2 Giga toneladas de dióxido de carbono equivalente (GtCO_2e)¹. Desta forma, a redução correspondente aos percentuais estabelecidos encontra-se entre 1,2 GtCO_2e e 1,3 GtCO_2e , respectivamente, para o ano meta em questão. Em 2015, durante a vigésima primeira Conferência das Partes (COP 21) da UNFCCC, foi assinado o Acordo de Paris. O Acordo, já em vigor, estabeleceu que cada país publique no site da UNFCCC a sua contribuição para a redução das emissões de GEE, ou seja, a apresentação de uma meta nacional voluntária (*Nationally Determined Contribution* – NDC). Em sua NDC, o governo brasileiro se comprometeu em reduzir 37% de suas emissões até 2025, tendo como base o ano de 2005, e uma meta adicional de 43% para o ano de 2030 (BRASIL, 2015). Estes valores representam respectivamente uma redução anual de 0,777 GtCO_2e e 0,903 GtCO_2e .

Com o objetivo de acompanhar o cumprimento do compromisso nacional voluntário para a redução das emissões até o ano de 2020, o Decreto 7.390 de 2010 estabeleceu que serão publicadas, a partir de 2012, estimativas anuais de emissões de GEE no Brasil em formato apropriado para facilitar o entendimento, por parte dos segmentos interessados da sociedade, de cada um dos setores e subsetores inventariados (BRASIL, 2010). A responsabilidade da elaboração dessas estimativas, bem como do

aprimoramento da metodologia de cálculo da projeção de emissões, é do grupo de trabalho coordenado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI).

O Estado de São Paulo, por meio da Lei Estadual 13.798 de 2009 (SÃO PAULO, 2009), instituiu a Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC) cuja regulamentação parcial se deu por meio do Decreto 55.947 de 2010 (SÃO PAULO, 2010). Em 2011 foi publicado o 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Este estudo mostrou que as emissões do estado, em decorrência das atividades desenvolvidas, se concentram no Setor de Energia, com 57,3% das emissões, incluindo o uso de energia pelas indústrias. O Setor de Processos Industriais e Uso de Produtos contribui com 14,7% (CETESB, 2013).

O Setor de Cimento no Estado de São Paulo, em 2005, contribuiu com 8,4% das emissões de GEE no Setor de Processos Industriais, fato que se relaciona com a produção, no qual, no mesmo período, o estado foi responsável por 8,1% da produção nacional do cimento (CETESB, 2013).

O objetivo deste estudo foi apresentar os custos e o potencial de mitigação de GEE para a indústria de cimento no Estado de São Paulo, a partir da elaboração de cenários de referência (CR) e de baixo carbono (CBC), considerando emissões de GEE de processo e de consumo de energia. No estudo foram apresentados os Custos Marginais de Abatimento (*Marginal Abatement Cost* – MAC) das tecnologias e o preço de equilíbrio de carbono (*Break-Even Carbon Price* – BECP). As possibilidades de reduções de emissões proporcionadas ao longo do período analisado por cada opção tecnológica foram consolidadas em um gráfico de cunha (*Wedge Graph*).

1. No caso do setor de cimento, alvo deste estudo, não se trabalhou com CO_2e , pois não foram estudados outros GEE além do CO_2 .

1.1 A INDÚSTRIA DE CIMENTO NO BRASIL E EM SÃO PAULO

No Brasil, em 2013 foram produzidas 70 Mt_{cimento} e importados 1 Mt_{cimento}. Os principais fabricantes foram a Votorantim e Interceмент que produziram, aproximadamente 35% e 18%, respectivamente (Gráfico 1). No Sudeste produziu-se cerca de 33 Mt_{cimento} (48% do total), sendo que o Estado de São Paulo foi responsável por 10 Mt_{cimento} (14% do total). Os grupos empresariais com fábricas de cimento no Estado de São Paulo, mas que não necessariamente possuem forno para produção de clínquer, são Holcim, Lafarge, Votorantim, Tupi, Interceмент e Mizu (SNIC, 2014a).

A produção de cimento no Estado de São Paulo não é suficiente para suprir sua demanda. No período de 2004 a 2013 esta demanda esteve, em média, 62% acima de sua produção, o que faz o estado ser um importante importador de cimento proveniente de outras regiões do país (Gráfico 2). Além do cimento, São Paulo importa o clínquer que passa por processo de moagem e adições nas indústrias cimenteiras localizadas

no estado. Conforme contato com especialistas da área e profissionais de empresas e associações setoriais, é pouco provável que a capacidade de produção de clínquer de São Paulo cresça antes de 2030. Em parte, isto se deve às restrições para a obtenção de licenças ambientais, tanto para extração quanto para produção, assim como um período de 5 a 10 anos necessário para aumentar a capacidade das fábricas. Provavelmente, novas áreas de extração de calcário não serão licenciadas, uma vez que as melhores jazidas se localizam no sul do estado, em áreas densamente florestadas e, em parte, protegidas por unidades de conservação.

Embora não haja previsão para uma ampliação substancial da produção de clínquer no estado, a demanda por cimento deve aumentar. Isto em razão das obras de infraestrutura e habitação incentivadas por iniciativas do Governo Federal, com o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) e o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). Isto deve aumentar as importações de cimento em São Paulo, o que ocasionará aumento das emissões de CO₂ que serão contabilizadas em outros estados.

Gráfico 1 – Produção nacional por grupo industrial

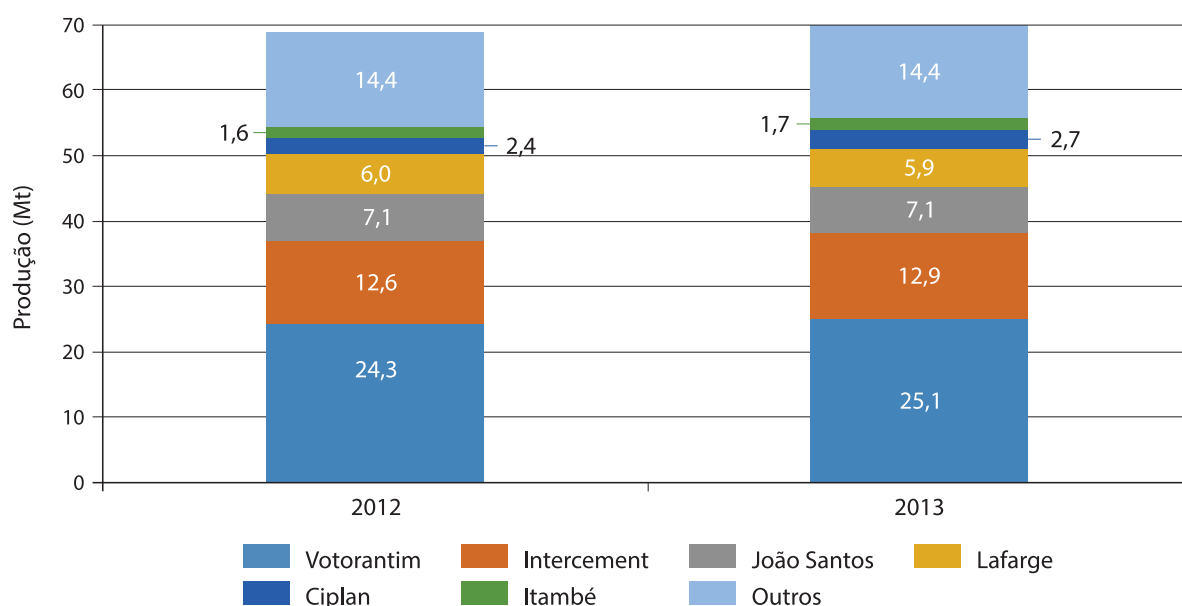
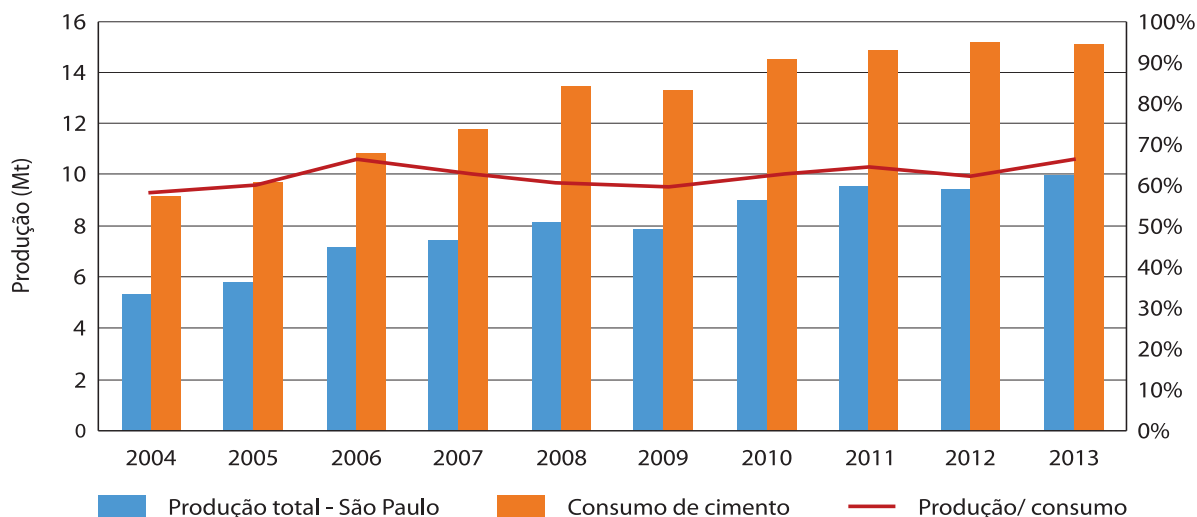
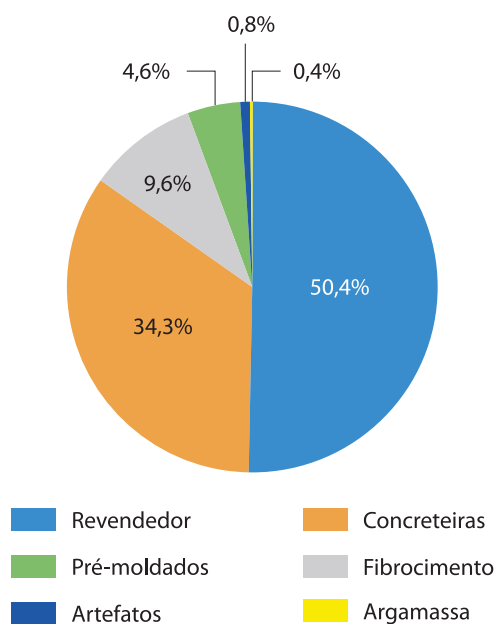


Gráfico 2 – Produção e consumo anual de cimento no Estado de São Paulo

Conforme dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), 24% do cimento do sudeste é consumido por concreteiras e 3% por fábricas de elementos pré-moldados (SNIC, 2014a). Os usos são variados e, no Gráfico 3 é apresentada a distribuição do cimento consumido no Sudeste.

Gráfico 3 – Distribuição do cimento consumido no Sudeste

Fonte: Elaboração própria (2017), com dados do SNIC (2014a).

A interpretação qualitativa de dados da *European Ready Mixed Concrete Organization* (ERMCO, 2014) sobre o consumo médio de cimento para a produção de concreto usinado na União Europeia (ano 2013) pode indicar que, com o desenvolvimento econômico, a fração do cimento que é utilizada para produzir esse concreto aumenta. Este fenômeno pode ser observado em alguns países desenvolvidos e espera-se que o mesmo ocorra no Brasil, reduzindo o consumo de cimento em saco e aumentando o de concreto usinado e elementos pré-fabricados.

1.2 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO CIMENTO

O processo produtivo do cimento pode ser dividido em extração e beneficiamento das matérias-primas, sendo as principais o calcário e a argila. O clínquer é formado pelas transformações químicas e físicas desses insumos, que ocorrem em fornos que atingem até 2.000°C (WBCSD, 2011b). Após essas etapas, ocorre a moagem do clínquer e, por fim, o acréscimo das adições, a depender do tipo de cimento que se deseja produzir (CARVALHO et al., 2010). Estas adições substituem o clínquer e podem ser escória de

alto-forno (resíduo da produção de aço), pozo-lana e *filler* calcário, que além de proporcionarem características específicas ao cimento, ainda reduzem a emissão de CO₂ na produção do mesmo. Isso porque a produção do clínquer é responsável pela maior parte da energia consumida e da emissão de CO₂ de processo (HUNT-ZINGER; EATMON, 2009).

Quando a fábrica de cimento realiza todas as etapas descritas acima, dizemos que a usina é integrada. Já quando a fábrica não produz o clínquer, ou seja, não possui forno, a usina é chamada de moagem, pois importa o clínquer de outra unidade produtora.

1.3 ESTIMATIVA DA ENERGIA DO CIMENTO

Da energia total consumida para a produção de cimento do Estado de São Paulo, parte é consumida dentro do estado e parte fora de seus limites geopolíticos, uma vez que esta última parcela é devido à energia utilizada para a produção do clínquer nas usinas integradas que não estão localizadas em São Paulo, como pode ser observado no APÊNDICE B. Embora exista esta situação, neste estudo foi apresentada apenas a energia consumida em São Paulo, nas usinas integradas do estado e nas fábricas de moagem que importam o clínquer de outras regiões.

A energia considerada para a composição dos cenários foi incorporada aos materiais, ou seja, aquela consumida desde a fase de extração até o processamento industrial do material. Considerou-se a energia proveniente do consumo de combustíveis (térmica) e a eletricidade.

1.4 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO SETOR DO CIMENTO

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) do setor de cimento ocorrem nos processos de

extração das matérias-primas, transformação e mistura dos insumos e nos transportes entre as etapas de produção e distribuição. Dentro dos limites da fábrica de cimento, destacam-se as emissões provenientes do processo químico de decarbonatação do calcário na calcinação, da queima de combustíveis fósseis e do uso da eletricidade. Este estudo considerou estas três fontes de emissão de CO₂ para a composição dos cenários e estudo de estratégias de mitigação.

1.5 ESTRATÉGIAS PARA A REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA

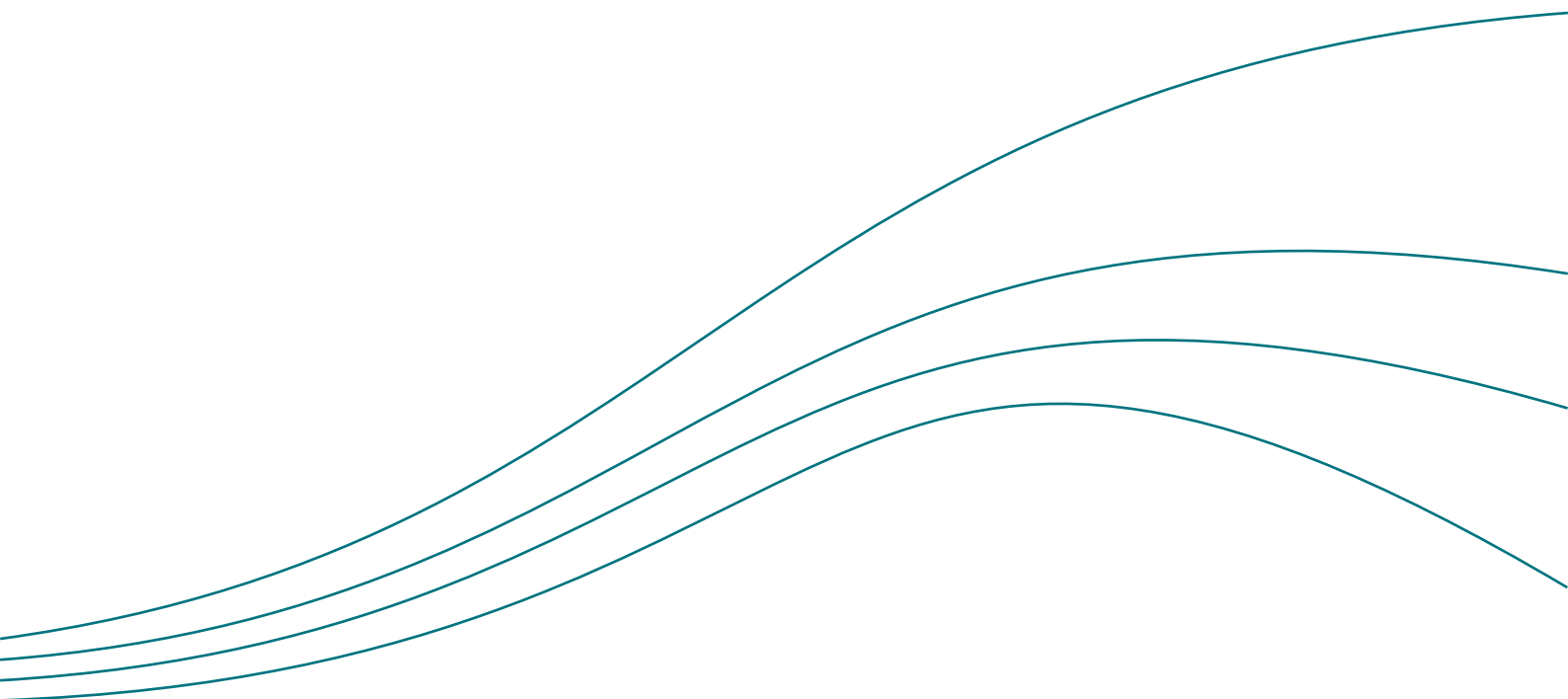
Visto que as emissões do setor de cimento provêm, majoritariamente, do processo químico de decarbonatação do calcário e, portanto, são intrínsecas a sua composição química, as estratégias para mitigação de GEE focaram na porção das emissões relacionadas à queima de combustíveis fósseis nos fornos e nas adições do cimento.

Foram abordadas três estratégias para a redução de emissões onde a primeira busca a redução de clínquer no cimento por meio da inserção de *filler* na mistura, a segunda a redução de combustível fóssil por meio da substituição de coque de petróleo (CVP) por combustível derivado de resíduo (CDR) e terceira, a substituição de coque de petróleo por pellets de madeira.

As emissões do CO₂ do setor de cimento consideraram apenas a emissão oriunda das usinas integradas e fábricas de moagem dentro dos limites geopolíticos do Estado de São Paulo. Apesar disso, como o estado é o demandante da produção de clínquer em outras localidades, ocorre a emissão de CO₂ decorrente desta demanda em outros estados. No APÊNDICE B é possível observar a emissão de CO₂ decorrente dos processos e consumo de energia que ocorrem dentro e fora do Estado de São Paulo considerando esta demanda.



Métodos



Os métodos a seguir se referem aos utilizados para as estimativas de GEE e para a geração das informações financeiras.

2.1 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Primeiramente, realizaram-se as etapas de estabelecimento das informações base para o desenvolvimento do estudo, como a coleta e projeção de dados necessários de produção e consumo. Na etapa inicial, definiram-se as tecnologias potencialmente empregáveis em cada setor, considerando potencial de emissão, potencial de mitigação, consumo energético e custos ou receitas associadas a cada uma delas.

Nesse estudo foram levantados dados junto ao setor do cimento, além de consultas a especialistas da área e em literatura. A partir das informações obtidas foram feitas as estimativas do consumo energético e das emissões de CO₂. Uma análise de custos também foi realizada, tanto os custos referentes aos investimentos necessários para suprir a demanda, quanto os custos operacionais.

2.2 ESTIMATIVAS DE EMISSÕES

Seguindo o método estabelecido pelo IPCC, a emissão de CO₂ do processo produtivo de cimento foi calculada a partir do teor de clínquer. A estimativa das emissões de CO₂ do cimento resulta da soma das emissões provenientes do consumo de eletricidade, da queima dos combustíveis fósseis e da descarbonatação da matéria-prima ocorrida no processo de calcinação, conforme apresentado na Equação 1, Equação 2, Equação 3 e Equação 4.

Equação 1 – Cálculo da emissão de CO₂ total da produção do cimento

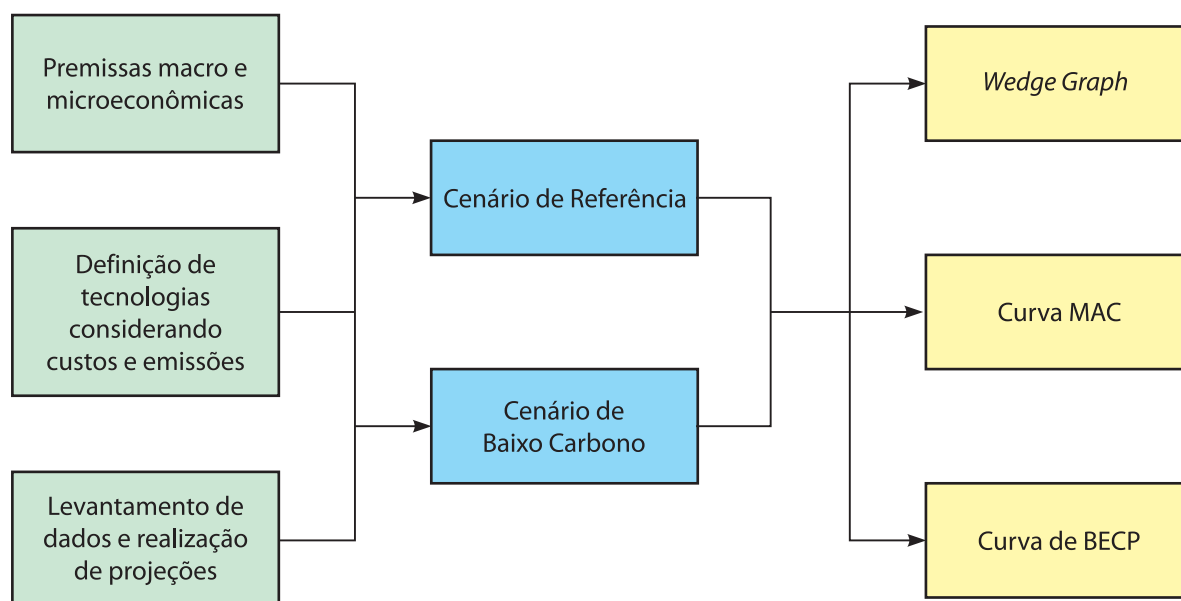
$$EmT = Eme + Emd + Emq$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

EmT	= emissão total;	(tCO ₂)
Eme	= emissão da eletricidade usada na moagem de clínquer, <i>filler</i> e adições;	(tCO ₂)
Emd	= emissão da descarbonatação do clínquer	(tCO ₂)
Emq	= emissão da energia térmica (queima de combustíveis fósseis).	(tCO ₂)

Figura 1 – Etapas do desenvolvimento do estudo



Fonte: Pacca et. al. (2017).

Equação 2 – Cálculo da emissão de gás de efeito estufa por eletricidade

$$Eme = [(P_i * C_i) + (P_m * C_m)] * FE_{eletricidade}$$

Onde:

Eme	= emissão da eletricidade usada na moagem de clínquer, <i>filler</i> e adições	(tCO ₂)
P_i	= produção de cimento para usina integrada	(1000t _{cimento})
C_i	= ator de consumo de eletricidade na usina integrada	(GJ/t _{cimento})
P_m	= produção de cimento para moagem	(1000t _{cimento})
C_m	= fator de consumo de eletricidade na moagem	(GJ/t _{cimento})
FE_{eletricidade}	= fator de emissão de eletricidade	(tCO ₂ /TJ)

Equação 3 – Cálculo da emissão de gás de efeito estufa por descarbonatação

$$Emd = (FE_{cimento} * P_i) * 0,65$$

Onde:

Emd	= emissão da descarbonatação do clínquer	(tCO ₂)
FE_{cimento}	= fator de emissão cimento (variável conform e valor de clínquer)	(tCO ₂ /t _{cimento})
0,65	= fator de referente à descarbonatação	(adimensional)
P_i	= produção de cimento integrada	(t _{cimento})

Nota: O FE_{cimento} considera emissões do processo de descarbonatação e do consumo de energia térmica. Desta forma, foi necessário atribuir um percentual referente apenas à descarbonatação para estimar as emissões de processo.

Equação 4 – Cálculo da emissão de gás de efeito estufa por energia térmica

$$Emq = (FE_{cimento} * P_i) * 0,35$$

Onde:

Emq	= emissão da energia térmica (queima de combustíveis fósseis)	(tCO ₂)
FE_{cimento}	= fator de emissão cimento (variável conform e valor de clínquer)	(tCO ₂ /t _{cimento})
0,35	= fator referente à energia térmica	(adimensional)
P_i	= produção de cimento integrada	(t _{cimento})

Nota: O FE_{cimento} considera emissões do processo de descarbonatação e do consumo de energia térmica. Desta forma, foi necessário atribuir um percentual referente apenas à descarbonatação para estimar as emissões de processo.

2.3 ESTIMATIVA DA ENERGIA DO CIMENTO

O cálculo da energia total incorporada no cimento considerou os fatores: variação do teor de clínquer; energia térmica; energia elétrica, segundo a Equação 5.

Equação 5 – Cálculo da energia incorporada no cimento

$$Ec = (Et * Tc) + Ee$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

Ec	= energia do cimento	(GJ/t _{cimento})
Et	= energia térmica (por tonelada de clínquer)	(GJ/t _{clínquer})
Ee	= energia elétrica (por tonelada de cimento)	(GJ/t _{cimento})
Tc	= teor de clínquer.	(t _{clínquer} /t _{cimento})

2.4 CURVA DE CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO

A determinação do custo marginal de abatimento (*Marginal Abatement Cost – MAC*) e do preço de equilíbrio de carbono (*Break-Even Carbon Price – BECP*) apresentou uma abordagem incremental e teve como referência o Estudo de Baixo Carbono para o Brasil (GOUVELLO et al, 2010). Para a construção das curvas de custo marginal de abatimento e do preço de equilíbrio do carbono empregou-se a MACTool, que, de acordo com *Energy Sector Management Assistance Program* (ESMAP, c2017), é uma ferramenta desenvolvida pelo Banco Mundial para esta finalidade, que permite também avaliar o investimento total necessário para realizar as alterações visando um crescimento de baixo carbono e que, pode ser utilizada para testar as possibilidades explorando os setores e as respostas aos preços.

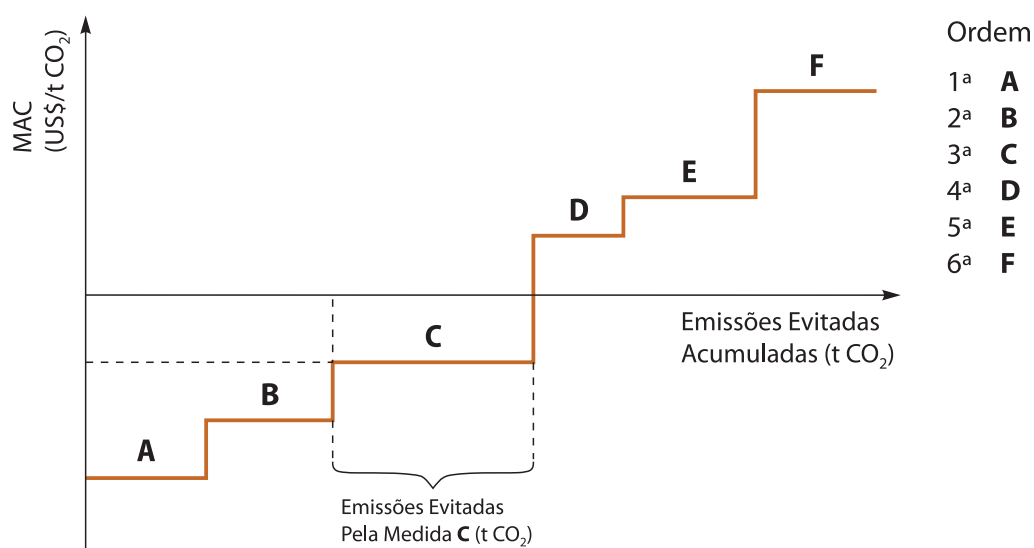
A Curva MAC é uma representação gráfica que apresenta cada uma das tecnologias de baixo carbono, representadas por “degraus”, em ordem crescente de custo. O eixo das abscissas (x) apresenta a emissão evitada no período de análise em dióxido de carbono equivalente (CO_2e), e o eixo das ordenadas (y) apresenta o MAC em custo por tonelada de CO_2 evitada US\$/t CO_2 . A área de cada “degrau” da curva reflete o custo total da referente tecnologia se todo o seu potencial de redução for atingido, como exemplifica o Gráfico 4.

Para a determinação dos MAC e construção desta curva, os custos e benefícios do cenário de referência (CR) são subtraídos, ano a ano, do cenário de baixo carbono (CBC) durante todo o período analisado. A seguir, utilizando uma taxa de desconto social, única para todos os setores, é calculado o valor presente líquido (VPL) dos custos e benefícios incrementais anuais para determinar a média ponderada por emissão evitada. Esta média é denominada MAC (GOUVELLO et al., 2010).

2.5 PREÇO DE EQUILÍBRIO DE CARBONO

O BECP indica o incentivo econômico que os agentes da indústria necessitariam para que a medida de mitigação estudada se torne atraente. O cálculo do BECP é feito a partir de uma taxa de atratividade (*Benchmark-TIR*), que é uma taxa específica estabelecida pelo investidor com base em suas metas de retorno. Por fim, o valor resultante é o preço que deve atingir a tonelada de carbono evitada em um mercado de carbono, de forma que, ao considerar a receita da venda dos créditos de carbono, a implantação da tecnologia proporcione uma taxa interna de retorno (TIR) equivalente ao *Benchmark-TIR*, o que torna a tecnologia atraente para o investidor. (GOUVELLO et al., 2010). A representação gráfica da curva de BECP é basicamente a mesma da curva MAC, excetuando-se os valores do eixo y, onde está o valor de BECP ao invés do valor de MAC.

Gráfico 4 – Esquemática de uma curva MAC



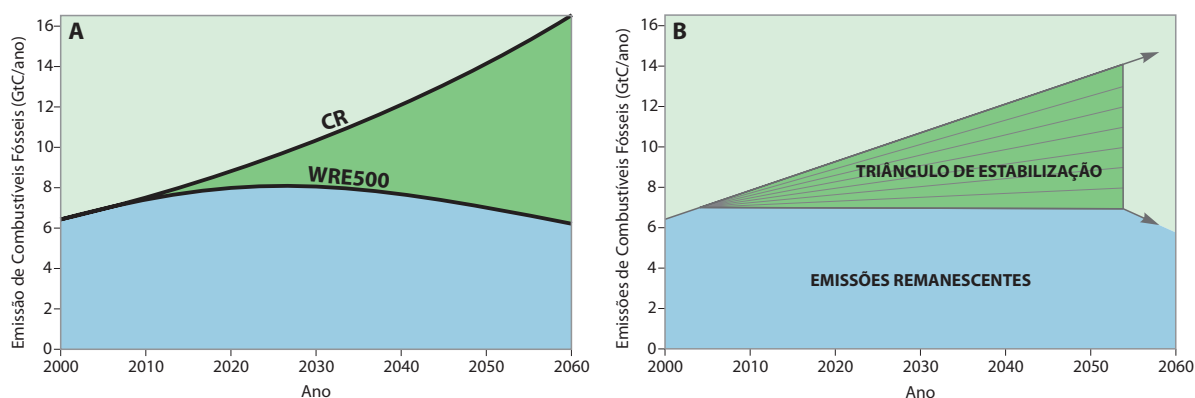
Fonte: Elaboração própria (2017).

2.6 GRÁFICO DE CUNHAS DE REDUÇÃO (WEDGE GRAPH)

A curva com as cunhas de mitigação de GEE (*Wedge Graph*) indica a contribuição quantitativa da redução de GEE em cada tecnologia do CBC considerada no estudo ao longo do período de 2014 a 2030. Como é visível na Figura 2A, o limite superior apresenta as emissões totais do

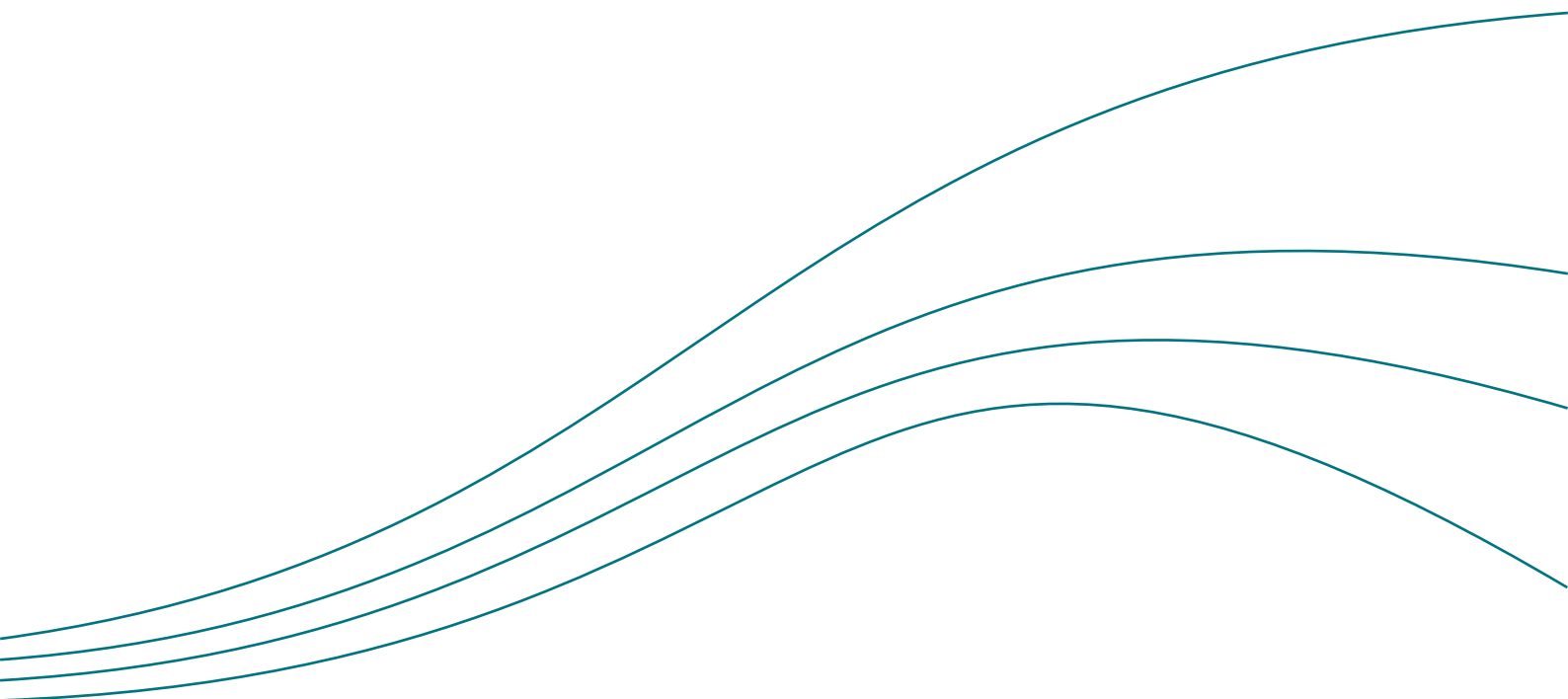
CR, enquanto que o limite inferior representa as emissões residuais do CBC. A diferença entre eles consiste na emissão evitada, que na Figura 2B está discriminada por tecnologia, cada uma formando uma cunha (fatia) de mitigação. Com esta informação é possível visualizar a contribuição de cada tecnologia, e, eventualmente, até servir como ferramenta para priorizar a implantação da tecnologia de mitigação.

Figura 2 – Esquematisação de um *Wedge Graph*



Fonte: Adaptado de Pacala e Socolow (2004).

Nota: WRE500 = modelo de emissões que condiz com o limite de 500ppm CO₂ na atmosfera.



O estudo do setor do cimento empregou dados primários de fontes de informação setoriais, bem como referências bibliográficas devido à inexistência² ou incoerência³ dos dados. Uma das limitações encontradas no desenvolvimento desse estudo foi conseguir dados acurados sobre a produção de clínquer no Estado de São Paulo.

A deficiência de dados para a criação dos cenários foi superada com informações primárias e estimativas levantadas por meio de entrevistas a importantes agentes do mercado e representantes de organizações setoriais⁴. As empresas e associações contatadas para participar desse estudo com informações sobre o setor do cimento foram: Votorantim Cimentos, Interceмент, Sindicato Nacional da Indústria de Produtos de Cimento (SINAPROCIM), Associação Brasileira de Argamassas Industrializadas (ABAI), Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção (ABRAMAT), Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem (ABESC), MC-Bauchemie, Grace, Fives Group, Saint-Gobain, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), ArtSpray, França e Associados, Cyrela e Infibra, além de especialistas e pesquisadores do setor.

Os dados presentes nas seções a seguir se referem aos utilizados para as estimativas de GEE e para a geração das informações financeiras.

3.1 DADOS GERAIS

Esta seção dedica-se a apresentar as premissas adotadas para o desenvolvimento de todo o estudo.

2. Houve informações que não foram conseguidas de forma primária (junto a empresas). Essas foram estimadas ou se basearam em referências bibliográficas, como: capacidade instalada de fábricas de cimento; investimento e custo de operação de usina integrada de cimento; consumo de eletricidade na produção de cimento; consumo de água na produção do cimento; teor de clínquer no cimento.
3. Houve incoerência entre os dados de consumo energético na produção de clínquer divulgados pelo Balanço Energético Nacional e o *Cement Sustainability Initiative* (CSI); onde o primeiro apresenta 4,65 GJ/t (MME, 2014) e o segundo 3,56 GJ/t (WBCSD, 2013). Para os cenários considerou-se o dado do CSI.
4. As informações primárias obtidas são protegidas por confidencialidade.

3.1.1 Caracterização do sistema de produção de cimento no Estado de São Paulo

Os cenários estão baseados na produção de cimento demandada para o mercado de São Paulo e produzida somente dentro dos limites territoriais do estado. A parcela de emissões de CO₂ que ocorre fora dos limites geopolíticos de São Paulo, em decorrência das demandas estaduais, não foi considerada para os cenários deste documento, porém esta estimativa foi realizada e encontra-se no APÊNDICE B.

3.1.2 Taxa de crescimento na produção de cimento

Para a composição do cenário de evolução da produção de cimento no Estado de São Paulo, considerou-se invariável a capacidade instalada das usinas integradas e as jazidas licenciadas, em razão da dificuldade de obtenção de licença ambiental para a implantação de novas usinas integradas (possuem forno para a produção do clínquer). O aumento da oferta de cimento se daria pelo incremento de usinas de moagem (que não produzem clínquer, apenas moem e misturam os compostos do cimento), uma vez alcançada a capacidade máxima de produção das usinas integradas.

Empregou-se uma taxa de crescimento estimada em 5% ao ano (a.a.) a partir de 2016, que foi definida considerando dados históricos e o crescimento previsto para o Brasil no “Plano Nacional de Mineração 2030” (MME, 2010). Segundo dados preliminares do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2014b)

sobre a produção de cimento no sudeste no ano 2014, estima-se que não houve crescimento, com taxa próxima a 0,4%. Este percentual foi aplicado para os anos 2014 e 2015.

Existem estimativas mais moderadas que apontam um crescimento em torno de 3% (REVISTA MINÉRIOS & MINERALES, 2014) e mais otimistas que preveem crescimento de 6% a.a. (CNI; ABCP, 2012). No período de 2004 a 2013, a taxa média de crescimento da produção do cimento no Estado de São Paulo foi de 7% a.a. e a nacional foi de 8% a.a. (SNIC, 2014a).

3.1.3 Capacidade instalada no Estado de São Paulo

A capacidade instalada para produção de cimento no Estado de São Paulo no ano de 2013 foi de 12,15 Mt, considerando usinas integradas e de moagem (Tabela 1). Com base na capacidade instalada para produção de cimento e no tipo de processo industrial das empresas localizadas no estado (SNIC, 2014a; SAUNDERS, 2014),

estima-se que aproximadamente 64% da produção de cimento seja realizada em usina integrada e 36% em fábricas de moagem. Assim, em 2013 a capacidade instalada para a produção de cimento em usina integrada foi cerca de 7,8 Mt, e em fábricas de moagem de 4,35 Mt. Assim, temos que a produção em 2013 foi de 9,98 Mt de cimento (SNIC, 2014a), que representa cerca de 82% da capacidade instalada. Embora se saiba que a fábrica da Votorantim Cimentos localizada em Ribeirão Grande esteja paralisaada no momento, a mesma foi considerada para o cálculo da capacidade instalada. A Tabela 1 apresenta a capacidade instalada para a produção de cimento no Estado de São Paulo, por empresa em 2013.

Não foram encontrados dados públicos da capacidade instalada da produção de clínquer em São Paulo. Ela é, certamente, menor que a capacidade de produção de cimento e, possivelmente, maior que a estimada pela fração de clínquer média do cimento vendido em São Paulo. Ou seja, dentro dos limites definidos, a produção de cimento pode variar significativamente

Tabela 1 – Capacidade instalada de produção de cimento por empresa em 2013

Empresas instaladas no Estado de São Paulo	(Mt/ano)	Tipo
InterCement Brasil S/A, Apiaí	1,50	Integrada
InterCement Brasil S/A, Cajati	1,30	Integrada
Votorantim Cimentos, Salto de Pirapora	3,00 (2)	Integrada
Votorantim Cimentos, Santa Helena	1,00 (1)	Integrada
Votorantim Cimentos, Ribeirão Grande	1,00 (2)	Integrada
InterCement Brasil S/A, Jacareí	0,30	Moagem
Cimento Tupi SA, Mogi das Cruzes	1,00 (1)	Moagem
Holcim Brasil SA, Sorocaba	0,20	Moagem
Mizu Cimentos Especiais, Mogi das Cruzes	0,45	Moagem
Votorantim Cimentos, Cubatão	1,00 (1)	Moagem
InterCement Brasil S/A, Cubatão	1,00 (2)	Moagem
SP Cimentos, Suzano	0,40 (1)	Moagem
Capacidade total instalada para produção de cimento	12,15	—
Capacidade instalada de usina integrada	7,80	64%
Capacidade instalada de fábrica de moagem	4,35	36%

Fonte: Elaboração própria (2017), baseado em dados do (SAUNDERS, 2014), (SNIC, 2014a) e (CETESB, 2015).

(1) Estimado por Saunders (2014).

(2) Estimado pelos autores, baseado em dados de Saunders (2014), informações de produção de algumas empresas com planta em São Paulo e experiência de um dos autores (CETESB, 2015).

para uma dada capacidade de produção de clínquer pelas mudanças de disponibilidade de adições e por variações na demanda de tipos de cimentos. Conforme dados de Saunders (2014), a capacidade instalada para produção de cimento no Brasil em 2013 era de 72,2 Mt/ano e de clínquer de 60 Mt/ano, o que leva a um teor de clínquer máximo possível de 83%. O teor de clínquer médio nacional das empresas do CSI foi de 66% (WBCSD, 2013).

3.1.4 Produção de cimento no Cenário de Baixo Carbono

Na Tabela 2 é apresentada a produção de cimento correspondente a rota integrada e moagem para o CR e CBC.

Tabela 2 – Produção de cimento

Ano	Rota integrada	Moagem	Produção de cimento total (integrada + somente moagem)
			(Gg)
2014	6.413	3.607	10.020
2015	6.441	3.623	10.064
2016	6.763	3.804	10.567
2017	7.101	3.995	11.096
2018	7.457	4.194	11.651
2019	7.800	4.433	12.233
2020	7.800	5.045	12.845
2021	7.800	5.687	13.487
2022	7.800	6.361	14.161
2023	7.800	7.069	14.869
2024	7.800	7.813	15.613
2025	7.800	8.593	16.393
2026	7.800	9.413	17.213
2027	7.800	10.274	18.074
2028	7.800	11.178	18.978
2029	7.800	12.126	19.926
2030	7.800	13.123	20.923

Fonte: Elaboração própria (2017).

3.1.5 Fatores de emissão

A emissão total do cimento varia segundo o teor de clínquer (exceto parcela referente ao consumo de energia elétrica⁵). Este deve aumentar de 66% para 77% ao longo do período analisado, fundamentalmente pela estagnação da oferta da escória (CERQUEIRA, 2014). Adotando o argumento de que a emissão do clínquer é constante a partir de 2012 em 0,848 tCO₂/t_{cimento}. Na seção 3.2.2 e 3.3.1 são apresentados os FE do cimento para os cenários de CR e CBC, respectivamente.

Como comentado anteriormente, as mudanças no teor de clínquer são afetadas pelo fornecimento de escória, que deve apresentar dificuldades nos próximos anos. A única fonte paulista de escória de alto forno, Usiminas, anunciou em outubro de 2015 o fechamento da usina de Cubatão por questões econômicas (USIMINAS, 2015; TRIBUNA, 2015). Assim, as cinzas volantes ou escória não são consideradas uma solução para o Estado de São Paulo, já que não existe fornecedor local. Embora haja opções de adição para a diminuição de ligantes, considera-se que o *filler* é a melhor opção para o momento e o local.

Como já mencionado anteriormente (item 1.1), uma parte da produção de cimento no Estado de São Paulo não ocorre em usina integrada, que inclui forno de clínquer. Votorantim (Votorantim, Salto de Pirapora, Ribeirão Grande e Santa Helena) e InterCement (Apiaí e Cajati) são as únicas empresas com fábricas integradas (que possuem forno de clínquer) no Estado de São Paulo. Além disso, existem várias unidades de moagens das matérias-primas no estado, operada por estes ou outros grupos fabricantes (informações já apresentadas na Tabela 1).

5. A emissão total do cimento é a soma das emissões provenientes do processo químico de descarbonatação, queima de combustíveis fósseis e consumo de energia elétrica. Nesse estudo, considerou-se que o consumo de eletricidade é constante, não variando segundo o teor de clínquer. Portanto, a emissão total de cimento varia segundo o teor de clínquer, exceto parcela referente ao consumo de energia elétrica.

No caso da biomassa, as mesmas foram consideradas neutras em carbono (vide seção 3.3.4).

Para a energia elétrica o FE empregado foi igual a 0,1355 tCO₂/MWh (MCTI, 2015). Isso resulta em uma emissão de 0,0145 tCO₂/t_{cimento}. O cálculo realizado seguiu a Equação 2.

Na produção de cimento são usados diferentes tipos de combustíveis para o provimento de energia térmica, conforme será apresentado na seção 3.2.4. O FE utilizado foi o apresentado pelo WBSD (2013). No caso do CBC foram aplicados fatores de proporção em relação aos combustíveis fósseis e biomassa para definir a parcela de emissões referente a processo e energia térmica.

3.1.6 Consumo específico do clínquer

Para a estimativa da energia térmica incorporada no cimento, considerou-se que o fornecimento de escória se manterá constante, variando o teor médio de clínquer no cimento de 66% em 2013 para 77% em 2030. Dessa forma, a energia térmica incorporada no cimento nos cenários variou de 2,4 GJ/t para 2,7 GJ/t, sendo que o consumo específico do clínquer é de 3,56 GJ/t.

3.1.7 Fator de consumo de eletricidade na rota integrada

O consumo de eletricidade na rota integrada foi considerado constante de 107 kWh/t_{cimento}⁶, equivalente a 0,38 GJ/t_{cimento} segundo dados do WBCSD (2013) para o Brasil.

3.1.8 Fator de consumo de eletricidade na moagem

Possíveis variações nas emissões de CO₂ provenientes de modificações no consumo de

eletricidade foram desconsideradas. Isto devido às incertezas quanto às transformações no consumo elétrico (item 2.2) e ao impacto nas emissões de CO₂, que deve ser inferior a 1%, uma vez que o consumo de eletricidade na moagem é baixo, cerca de 32 kWh/t_{cimento}.

3.1.9 Preço da energia

Os preços dos energéticos utilizados no estudo foram os valores padrões fornecidos pela coordenação técnica do Projeto e presentes na Tabela 3. Mais detalhes sobre as fontes e método de cálculo para obtenção dos preços estão apresentados no APÊNDICE A e o Estudo de baixo carbono para o setor industrial no Estado de São Paulo de 2014 a 2030 (PACCA, et. al, 2017).

Tabela 3 – Preço dos energéticos

Ano	CVP	Pellets de madeira	CDR	Eletricidade
	(US\$/GJ)			(US\$/kWh)
2014	2,58	3,53	4,59	0,05
2015	2,53	3,47	4,51	0,06
2016	2,49	3,41	4,43	0,07
2017	2,44	3,34	4,35	0,07
2018	2,40	3,28	4,27	0,08
2019	2,35	3,22	4,19	0,09
2020	2,31	3,16	4,11	0,10
2021	2,37	3,24	4,21	0,11
2022	2,43	3,32	4,32	0,12
2023	2,48	3,40	4,42	0,13
2024	2,54	3,49	4,53	0,15
2025	2,60	3,57	4,63	0,16
2026	2,65	3,63	4,72	0,18
2027	2,70	3,70	4,80	0,20
2028	2,75	3,76	4,89	0,22
2029	2,79	3,83	4,97	0,24
2030	2,84	3,89	5,06	0,26

Fonte: Adaptado de Pacca et al. (2017).

6. Baseado em WBCSD (2015)

3.1.10 Taxa de desconto

A taxa de desconto social utilizada nos cálculos foi definida em 8% ao ano (a.a.) pela coordenação técnica do Projeto. Este é o mesmo valor adotado no estudo do Banco Mundial, que também utilizou a MACTool (GOUVELLO et al., 2010), pois é o que geralmente corresponde ao custo dos empréstimos adotado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES) para o financiamento de projetos. Ela foi utilizada para calcular o custo marginal de abatimento, em dólares por tonelada de CO₂ evitada US\$/tCO₂ pelas medidas de BC das que compõem a curva MAC e tal valor foi aplicado para todos os setores componentes deste estudo.

3.1.11 Taxa de atratividade (*Benchmark-TIR*)

A taxa de atratividade (*Benchmark-TIR*) varia de acordo com as empresas e deverá pairar com as metas ou retornos financeiros usuais da indústria. A *Benchmark-TIR* para o setor de cimento para investimento em tecnologias do CBC não foi precisamente definida pelas empresas participantes nesse estudo. Por meio de contatos com a indústria foi definido que esta taxa se apresenta entre 8% e 13%.

Para efeitos da ferramenta MACTool, adotou-se 13% de *Benchmark-TIR* para as medidas do setor de cimento.

3.1.12 Taxas de câmbio

Para as conversões entre real e dólar, o estudo adotou a cotação utilizada em comum por todos os setores estudados no projeto, fornecida pela coordenação técnica. Trata-se do valor médio de venda da moeda no ano de 2013, apresentado

no Balanço Energético Nacional (BEN), correspondente a R\$ 2,16/US\$ (EPE, 2014).

Todos os resultados financeiros do estudo foram apresentados em dólar.

3.1.13 Estimativa dos custos

O investimento necessário para implantação de fábricas de cimento no Estado de São Paulo, de modo a suprir o consumo até 2030, foi estimado a partir de estimativas do consultor e dados publicados pelo SNIC (2013a) e SAUNDERS (2014). O valor a ser investido para cada fábrica de moagem estimado foi de 87,5 milhões de dólares⁷.

As fábricas de moagem em operação possuem capacidade instalada de aproximadamente 621.000 t_{cimento}/ano (SAUNDERS, 2014; SNIC, 2013). A partir das informações de capacidade e investimento, os custos para implantação de novas fábricas para suprir a demanda de cimento até 2030 foram estimados. Custos com terreno e valorização imobiliária não foram analisados nesse estudo.

3.2 CENÁRIO DE REFERÊNCIA

3.2.1 Variação da composição do cimento no Cenário de Referência

A composição do cimento irá variar de acordo com o teor de clínquer e de suas adições, como escória de alto-forno, pozolanas e *filler* calcário. As composições variam pelo tipo de cimento e são normatizadas pelas Normas Brasileiras NBR 11.578 (ABNT, 1997), NBR 5733 (ABNT, 1991a), NBR 5735 (ABNT, 1991b) e NBR 5736 (ABNT, 1999). Essa variação interfere nas estimativas de

7. Foi considerada para a estimativa, uma capacidade máxima de 900 mil toneladas para a unidade de moagem com base em (SNIC, 2013) e (SAUNDERS, 2014).

energia e emissões de CO₂ do cimento, principalmente pela variação do teor de clínquer, devido a sua parcial substituição pelas adições.

Em um cenário realista, de acordo com Cerqueira (2014), considerou-se que o fornecimento de escória não deve aumentar nos próximos anos, o que manterá a oferta constante no mercado e forçará uma variação no teor de clínquer de 66% para 77% em 2030 (Tabela 4). Esta variação é o fator determinante para os FE por tonelada de cimento no CR e no CBC, conforme apresentado na seção 3.2.2 e 3.3.1. Como a norma de cimento atual limita a introdução de *filler* a um máximo de 10%, sendo que para muitos cimentos o limite é 5%, mantida a norma

técnica vigente, é improvável que o teor de *filler* suba além dos atuais 6%. Não existe previsão de oferta de cinzas volantes no mercado de São Paulo. A opção de introdução de pozolanas de argila calcinada é considerada pequena.

Apesar de existirem várias opções de aditivos para a diminuição de ligantes, considera-se que o *filler* é a melhor opção para o momento e o local, pela sua disponibilidade de fornecimento e características físico-químicas que cumprem a função desejada. As cinzas volantes ou escória não são consideradas uma solução para o Estado de São Paulo, já que não existe fornecedor local e se identificam dificuldades (futuras) de fornecimento, conforme mencionado no item 3.1.5.

Tabela 4 – Variação do teor de clínquer no cimento produzido no Estado de São Paulo, nos anos de 2014 a 2030

Ano	Quantidade					Fração			
	Cimento	Clínquer	Gipsita	Filler	Escória	Clínquer	Filler	Escória	Gipsita
	(Mt)					(%)			
2014	15,15	10,04	0,61	0,61	4,03	66%	4%	27%	4%
2015	15,22	9,81	0,61	0,91	4,03	64%	6%	26%	4%
2016	15,98	10,34	0,64	1,12	4,03	65%	7%	25%	4%
2017	16,78	11,04	0,67	1,17	4,03	66%	7%	24%	4%
2018	17,62	11,79	0,70	1,23	4,03	67%	7%	23%	4%
2019	18,50	12,57	0,74	1,30	4,03	68%	7%	22%	4%
2020	19,43	13,39	0,78	1,36	4,03	69%	7%	21%	4%
2021	20,40	14,25	0,82	1,43	4,03	70%	7%	20%	4%
2022	21,42	15,16	0,86	1,50	4,03	71%	7%	19%	4%
2023	22,49	16,11	0,90	1,57	4,03	72%	7%	18%	4%
2024	23,61	17,10	0,94	1,65	4,03	72%	7%	17%	4%
2025	24,79	18,15	0,99	1,74	4,03	73%	7%	16%	4%
2026	26,03	19,25	1,04	1,82	4,03	74%	7%	15%	4%
2027	27,33	20,41	1,09	1,91	4,03	75%	7%	15%	4%
2028	28,70	21,62	1,15	2,01	4,03	75%	7%	14%	4%
2029	30,14	22,89	1,21	2,11	4,03	76%	7%	13%	4%
2030	31,64	24,23	1,27	2,22	4,03	77%	7%	13%	4%

Fonte: Elaboração própria (2017), baseados em dados de Cerqueira (2014), SNIC (2014a), WBCSD (2013).

3.2.2 Fatores de emissão do cimento no Cenário de Referência

Os fatores de emissão do cimento foram variáveis e são apresentados na Tabela 5.

Para as estimativas considerou-se a variação das emissões de CO₂ segundo a mudança do teor de clínquer (Gráfico 5).

3.2.3 Consumo de energia para produção de cimento no cenário de referência

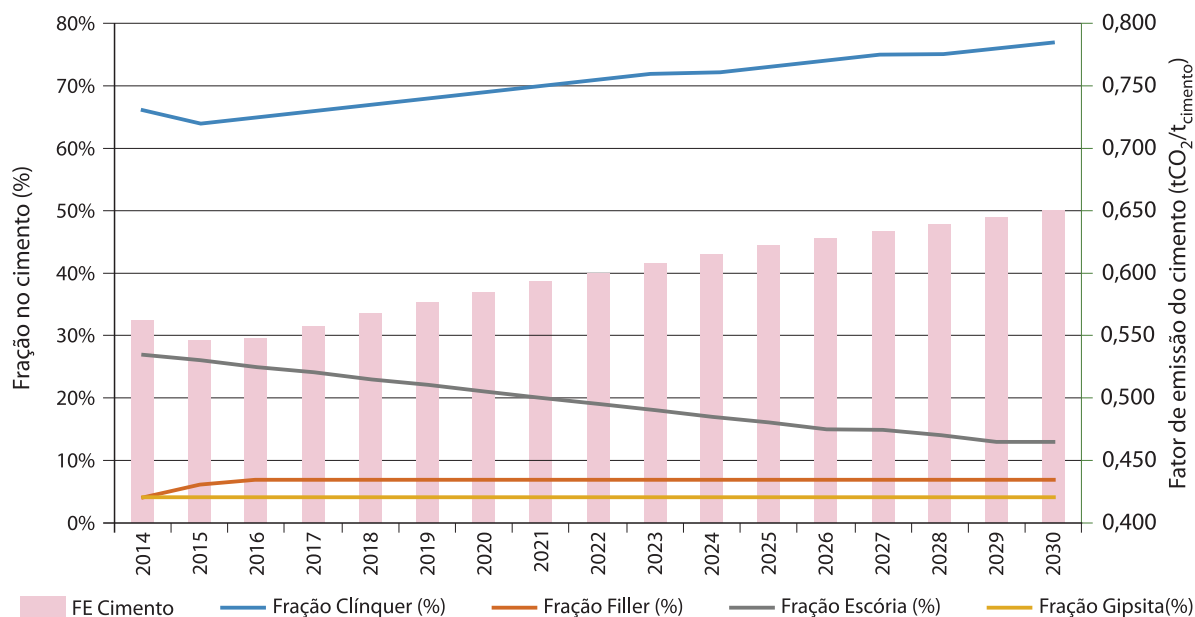
A estimativa do consumo de energia considerou as energias térmica e elétrica apresentadas no item 2.2. Estas foram multiplicadas pela quantidade de cimento produzida por ano. O ganho de eficiência energética no processo de produção de cimento não foi considerado como uma possível medida para o CBC, como será explicado posteriormente.

Tabela 5 – Fatores de emissões do cimento no Cenário de Referência

Ano	FE _{cimento}
	(tCO ₂ /t _{cimento})
2014	0,562
2015	0,546
2016	0,548
2017	0,558
2018	0,567
2019	0,576
2020	0,585
2021	0,593
2022	0,600
2023	0,607
2024	0,614
2025	0,621
2026	0,627
2027	0,633
2028	0,639
2029	0,644
2030	0,649

Fonte: Elaboração própria (2017), baseado em dados de Cerqueira (2014), SNIC (2014a), WBCSD (2013).

Gráfico 5 – Fatores de emissão de CO₂ no cenário de referência segundo variação de ligante e adições no cimento



É importante ressaltar que a energia consumida pelo Estado de São Paulo para a produção do cimento é apenas uma parte (69% em 2014) da energia total consumida para a produção de cimento que é demandado/consumido pelo estado (Gráfico 6). A parcela da energia consumida na usina integrada de outros estados para a produção do clínquer que será moído em São Paulo não foi contabilizada e não aparece nos cenários deste relatório.

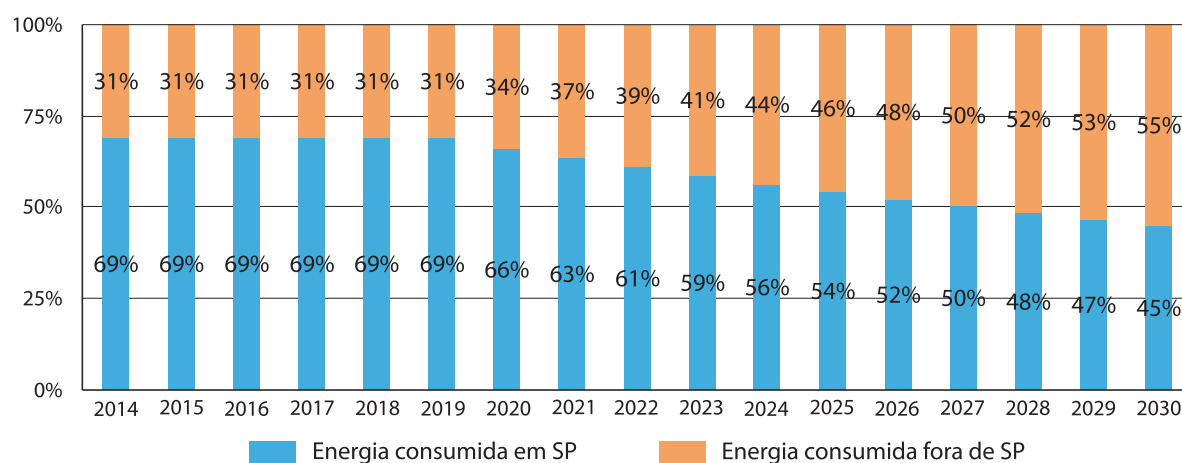
A energia térmica consumida no processo de produção do cimento varia segundo o teor de clínquer e devido às condições dos processos de produção da indústria, principalmente no que se refere aos fornos e combustíveis utilizados. Como mencionado na seção 3.1 a energia térmica incorporada no cimento nos cenários variou de 2,4 GJ/t para 2,7 GJ/t, sendo que, o consumo específico do clínquer é de 3,56 GJ/t. O cálculo da variação do teor de clínquer no cimento teve por base informações de SNIC (2014b) e CERQUEIRA (2014), e a energia incorporada no clínquer em dados do WBCSD (2013) para o Brasil. Na Tabela 6 são apresentados os resultados do cálculo da energia total no cimento de 2014 a 2030.

Tabela 6 – Resultados do cálculo da energia total no cimento de 2014 a 2030

Ano	Teor de clínquer	Energia térmica	Energia elétrica	Energia total
	(%)	(GJ/t)		
2014	66%	2,358	0,384	2,742
2015	64%	2,294	0,384	2,678
2016	65%	2,302	0,384	2,687
2017	66%	2,343	0,384	2,727
2018	67%	2,382	0,384	2,766
2019	68%	2,419	0,384	2,803
2020	69%	2,454	0,384	2,838
2021	70%	2,487	0,384	2,872
2022	71%	2,519	0,384	2,904
2023	72%	2,550	0,384	2,934
2024	72%	2,579	0,384	2,963
2025	73%	2,606	0,384	2,990
2026	74%	2,633	0,384	3,017
2027	75%	2,658	0,384	3,042
2028	75%	2,681	0,384	3,066
2029	76%	2,704	0,384	3,088
2030	77%	2,726	0,384	3,110

Fonte: Elaboração própria (2017), baseada em informações de WBCSD (2013), SNIC (2014a), CERQUEIRA (2014) e MME (2010).

Gráfico 6 – Distribuição territorial do consumo energético na produção de cimento no cenário de referência



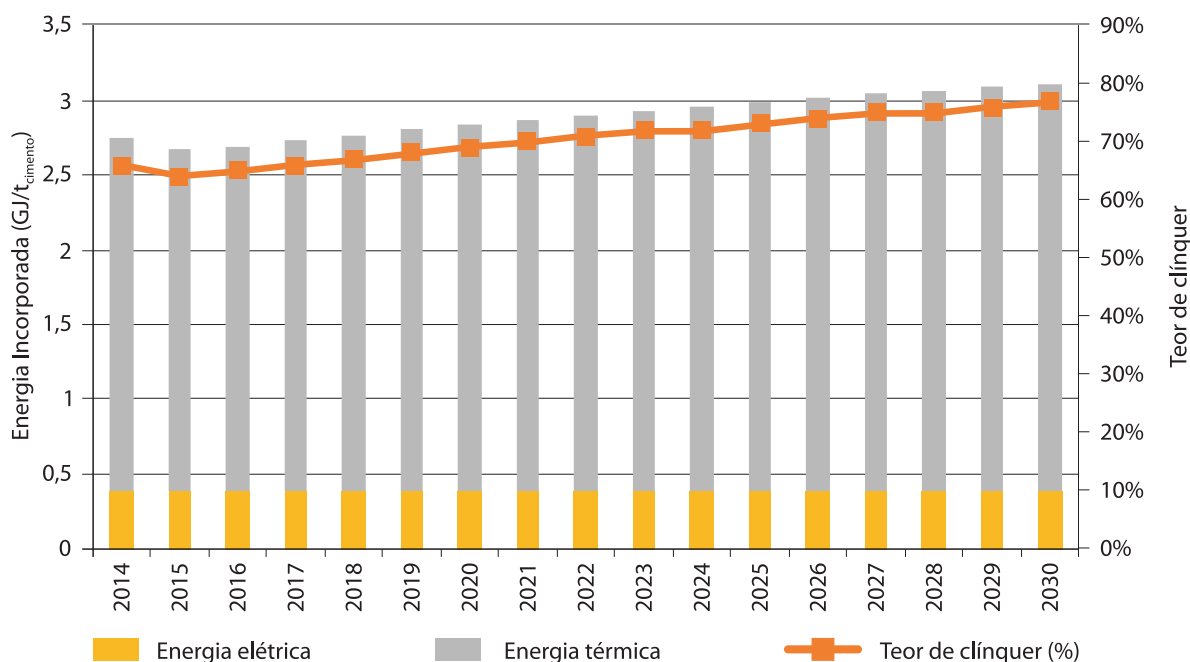
Fonte: Elaboração própria (2017), baseado em dados do SNIC (2014a), WBCSD (2013), Cerqueira (2014) e MME (2010).

O Gráfico 7 apresenta a variação da energia incorporada.

Aumentar a eficiência energética é uma estratégia válida para muitos países. Entretanto, das possibilidades existentes para o Brasil, essa seria uma via com menor potencial para mitigação de impacto energético, uma vez que a indústria cimenteira nacional utiliza o estado da arte tecnológico, ou seja, o nível mais alto de desenvolvimento do setor. Quase a totalidade do cimento (99%) é produzido por via seca, processo pelo qual é possível diminuir até 50% o uso de combustíveis. Além disso, pré-calcinadores, resfriadores e moinhos também podem diminuir o consumo energético (CNI; ABCP, 2012). Assim, neste estudo, a redução de consumo energético não foi considerada uma estratégia, as medidas para mitigação dos GEE seriam relativas à troca do combustível fóssil por renovável.

Como mencionado na seção 3.1.7, o consumo específico de energia elétrica na produção de cimento por rota integrada é de 107 kWh/t_{cimento}, baseado em dados do WBCSD (2013) (para o Brasil); o que equivale a cerca de 0,38 GJ/t_{cimento}⁸. O dado apresentado exclui a moagem final e ensacamento (*up to and including clinker*) (CSI WBCSD, 2013). Combinando estes dados, é possível deduzir que o consumo na moagem final é 32 kWh/t_{cimento}, um valor baixo e que certamente é influenciado pela composição do que é moído. A escória aumenta essa demanda e *filler* calcário diminui. Mas outros *fillers* podem aumentar o consumo. Sistemas compostos com produtos de várias moagens separadas (e não moagem integrada, conjunta, como é usual) podem também demandar mais eletricidade. Ultrafinos, que serão cruciais para altos teores de *filler* (DAMINELI, 2013; SANYTSKY et al., 2015), também podem eventualmente aumentar

Gráfico 7 – Variação da energia incorporada no cimento segundo o teor de clínquer (sem mudança de tecnologia)



Fonte: Elaboração própria (2017), baseado nos dados da Tabela 6.

8. Um kWh equivale a 3,6 MJ (conversão de unidade, não se relaciona com eficiência energética na geração de eletricidade).

o consumo de eletricidade. Dadas as incertezas, assumiu-se que a demanda de eletricidade não será afetada no futuro. No ano de 2013, a energia (térmica e elétrica) gasta por tonelada de cimento foi de 2,74 GJ/t_{cimento} (86% térmica e 14% elétrica).

3.2.4 Frações por tipo de combustível na indústria cimenteira no Cenário de Referência

Na produção de cimento são usados diferentes tipos de combustíveis para o provimento de energia térmica. A fração por tipo de combustível foi utilizada para estimar as emissões de CO₂ procedentes da queima. Utilizou-se a fração encontrada no ano 2013 para a produção de cimento, onde 82% foi de combustível fóssil⁹, 10% de biomassa¹⁰ e 8% de resíduo fóssil¹¹, segundo dados do WBCSD (2013) (Tabela 7).

Tabela 7 – Consumo de energia térmica na indústria cimenteira e a distribuição energética por tipo de combustível no ano 2013

Tipo de combustível	Energia	Porcentagem
	(TJ)	(%)
Resíduos fósseis e mistos	10.200	8
Biomassa	12.500	10
Combustível fóssil	107.000	82
Total	129.700	100

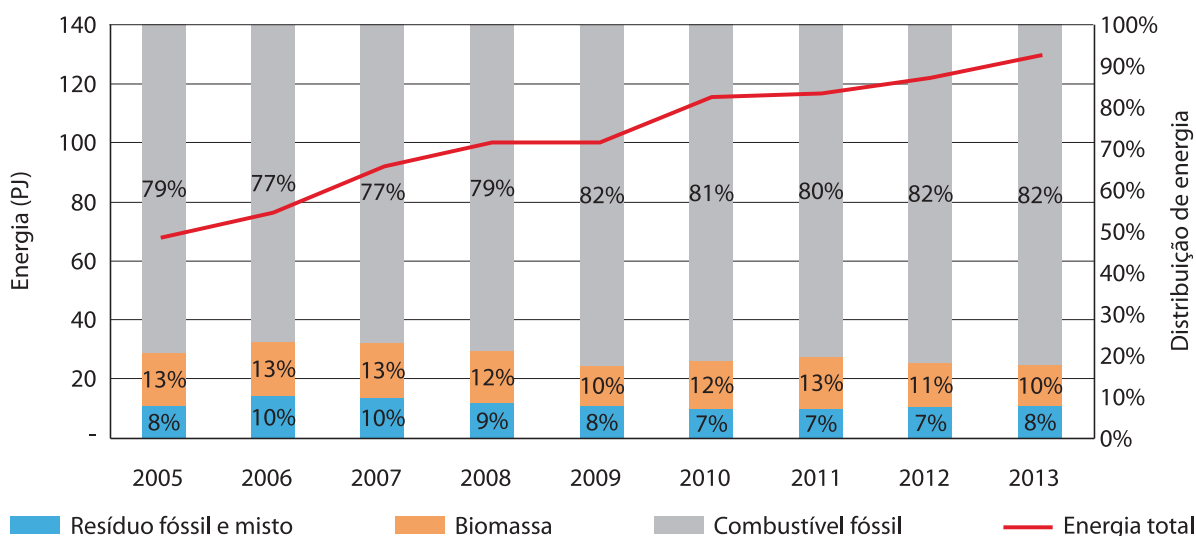
Fonte: Elaboração própria (2017), baseado em dados do WBCSD (2013).

O Gráfico 8 apresenta a variação dessa participação de 2005 a 2013 para o Brasil, assim como o consumo energético total nesse período.

3.2.5 Investimento em novas fábricas de moagem

O cenário de investimento foi construído considerando que não serão construídas novas usinas integradas no Estado de São Paulo, devido à dificuldade de obtenção de licença ambiental.

Gráfico 8 – Evolução do consumo de energia térmica da indústria cimenteira e distribuição energética por tipo de combustível no Brasil



9. Cerca de 75% do combustível fóssil é CVP, seguido de carvão mineral e óleo combustível (CNI; ABCP, 2012).

10. Biomassas: moinha de carvão, casca de arroz, bagaço de cana, etc. (CNI; ABCP, 2012).

11. Pneus, resíduos industriais, etc. (CNI; ABCP, 2012)

Assim, foi considerado que a produção da usina integrada, com as fábricas em operação atualmente, atinge sua máxima capacidade instalada em 2019 e a partir de 2020 o crescimento da produção ocorre apenas pelas unidades de moagem. A produção de clínquer para suprir a demanda ocorreria apenas fora do Estado de São Paulo. O investimento fora do Estado de São Paulo não foi considerado nas análises desse relatório. No período analisado, foi adotado que as fábricas existentes (integradas e de moagem) não serão substituídas, operando ainda dentro da sua vida útil (fábricas apresentadas na Tabela 1).

Com a massa de cimento estimada até 2030 e a capacidade instalada de cada tipo de fábrica, foi calculado o número de unidades produtoras e, assim, o investimento necessário no período para implantação de novas fábricas de moagem. Com a capacidade instalada adotada para as fábricas de moagem, seria necessária a construção de 15 novas fábricas de moagem no período, o que implicaria em um investimento de US\$ 87,5 milhões no ano de 2022 e de 2024 a 2030, totalizando US\$ 700 milhões no período.

3.2.6 Custos de operação e manutenção

Os custos de operação são compostos pelos consumos de materiais, água, energia, administração, mão de obra, manutenção e depreciação. As quantidades das matérias-primas utilizadas na produção do cimento (clínquer, gipsita, escória e *filler*) foram estimadas a partir do teor de clínquer publicado pelo *GNR Project* (WBCSD, 2013), sendo apresentados mais detalhes no item 3.2.1. Os valores monetários dos materiais utilizados para o cálculo do custo de operação são apresentados na Tabela 8. O custo com clínquer foi considerado nas fábricas de moagem, pois estas não produzem esse material. Para as cimenteiras, o custo com *filler* refere-se apenas ao cus-

Tabela 8 – Valor monetário de mercado dos insumos utilizados no cenário de referência para produção de cimento em fábricas de moagem

Item	Unidade	Valor	Valor	Data
		(R\$)	(US\$)	
Clínquer + Gipsita	(t)	—	56,34	2015
Filler	(t)	—	21,72	2015
Escória granulada	(t)	—	17,50	09/2015
Água (tabela tarifária – acima de 50 m³/mês) (1)	(m³)	13,93	6,45	12/2014

Fonte: Elaboração própria (2017), com base em DNPM (2014), IEA (2008), Sabesp (2015) e informações primárias, protegidas por confidencialidade.

(1) Valor referente a dezembro de 2014, dado mais antigo disponível no site da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) na época do levantamento.

to com a eletricidade consumida na moagem, por isso não foi incluído na Tabela 8.

Assim, para o cálculo do custo com materiais foi considerado que até 2019 a proporção do cimento produzido por usina integrada e por moagem será de 64% e 36%, respectivamente, até que se atinja a capacidade instalada da usina integrada. A partir de 2020, o custo com material aumenta gradativamente, pois maior parcela do cimento passa a ser produzido por unidades de moagem, que adquirem o clínquer de terceiros.

O consumo médio de água para produção de cimento ($0,55 \text{ m}_3/\text{t}_{\text{cimento}}$) foi levantado em literatura (MACK-VERGARA; JOHN, 2017), sem considerar via úmida. O consumo de energia foi estimado pelo próprio consultor a partir de dados do *GNR Project* (WBCSD, 2013). Para cálculo do custo com água, foi aplicado o valor citado na Tabela 8 nos consumos estimados. Em relação ao custo com energia, foram aplicados os valores por Gigajoule (GJ) de energia elétrica e de CVP referentes a 2013 e estimado para os demais anos, dados fornecidos pela coordenação técnica desse estudo.

O custo de depreciação foi calculado dividindo o valor de investimento da fábrica pela

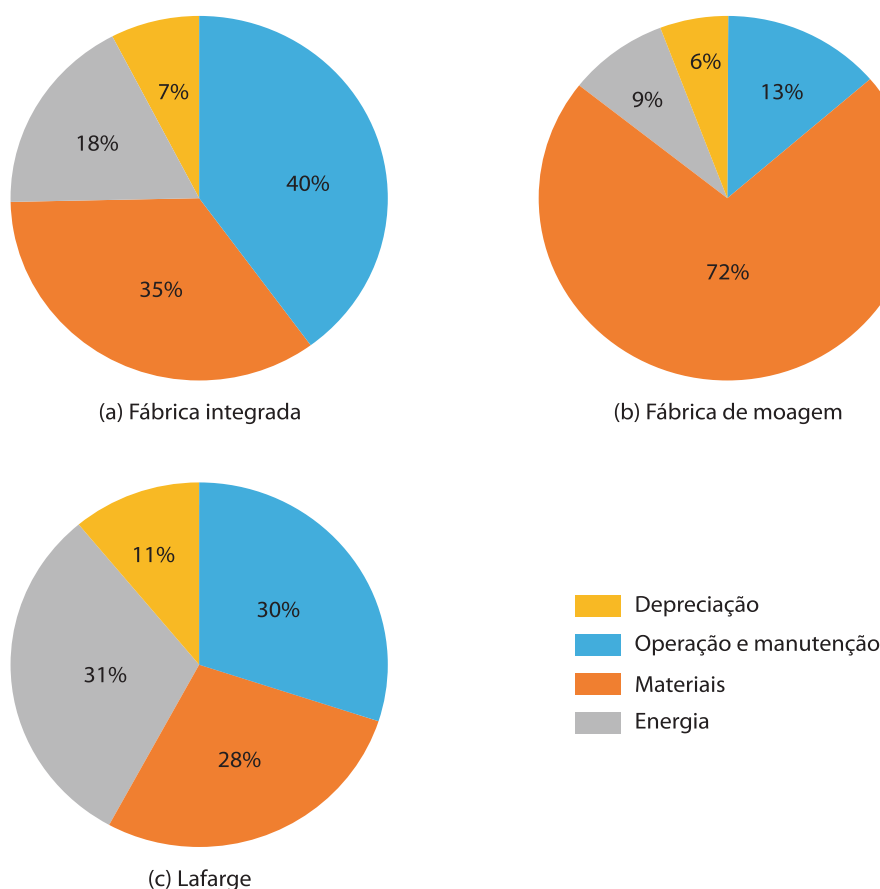
sua vida útil e, para obtenção do valor por tonelada de cimento, pela sua produtividade no ano.

Segundo o SNIC, as despesas com combustíveis e energia elétrica representam mais de 50% na formação do custo direto de produção (SNIC, 2013). De acordo com a Lafarge, esses custos são inferiores, cerca de 31%, enquanto que os mais representativos seriam referentes às matérias-primas (28%) e à operação (30% – produção, mão de obra e manutenção) (LAFARGE, 2007). Segundo informação de especialistas consultados, o combustível representa de 25% a 30% do custo total de operação, podendo essa faixa ser de $\pm 20\%$ entre

plantas, a depender da sua eficiência e dos combustíveis utilizados, assim como de sua localização em relação às fontes dos insumos energéticos.

A partir dos dados estimados no CR, foi observado que a composição dos custos difere significativamente entre a produção em fábrica integrada e em unidade de moagem¹². O Gráfico 9 apresenta essas duas composições dos custos e a distribuição percentual divulgada pela Lafarge (LAFARGE, 2007). Além disso, os custos podem variar entre fábricas a depender da distância de transporte, disponibilidade de escórias e outros ligantes, além do teor de clínquer.

Gráfico 9 – Distribuição percentual dos componentes do custo de produção do cimento



Fonte: Elaboração própria (2017), a partir de estimativas do consultor e de dados de Lafarge (2007).

Nota: Os gráficos (a) e (b) foram calculado no estudo. O gráfico (c) foi publicado pela Lafarge.

12. Usinas integradas são àquelas que possuem forno para a produção do clínquer. Já as usinas de moagem, não produzem clínquer, apenas moem e misturam os compostos do cimento.

Os dados de OPEX consideram manutenção, operação e administração, além de água, energia e matérias primas. Foi considerado a partir de CO₂ Capture in the Cement Industry (2018, página 135) que o custo de uma fábrica de moagem equivale a 35% do custo de uma fábrica integrada.

3.3 CENÁRIO DE BAIXO CARBONO

No CBC, os valores são referentes à quantidade de cimento produzido dentro dos limites do Estado de São Paulo. As emissões de CO₂ de energia consumida das usinas integradas que realizam a descarbonatação fora do Estado de São Paulo¹³ não foram contabilizadas. Portanto, os valores de energia e emissão referem-se apenas à produção por usina integrada e moagem dentro do Estado de São Paulo.

Nesta análise cada uma das estratégias sugeridas foi considerada isoladamente. No item 4.2 apresenta-se um cenário composto, onde todas as estratégias foram agrupadas para que se pudesse analisar concomitantemente o impacto em relação à redução das emissões de GEE da implementação de todas as medidas. No agrupamento retirou-se possíveis interferências que pudessem gerar dupla contagem de emissões de CO₂ mitigadas. Tal cenário é baseado no total de cimento produzido no Estado de São Paulo e permite comparar as estratégias em uma única curva MAC.

3.3.1 Fatores de emissão de cimento no Cenário de Baixo Carbono

Os fatores de emissão do cimento¹⁴ foram variáveis no cenário de baixo carbono e são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Fatores de emissões do cimento no cenário de baixo carbono

Ano	FE _{cimento}
	(tCO ₂ /t)
2014	0,555
2015	0,539
2016	0,557
2017	0,540
2018	0,531
2019	0,521
2020	0,511
2021	0,501
2022	0,490
2023	0,479
2024	0,468
2025	0,456
2026	0,444
2027	0,431
2028	0,419
2029	0,406
2030	0,393

Fonte: Elaboração própria (2017), baseado em dados de Cerqueira (2014), SNIC (2014a), WBCSD (2013).

Para as estimativas considerou-se a variação das emissões de CO₂ segundo a mudança do teor de clínquer no cenário de baixo carbono (Gráfico 10).

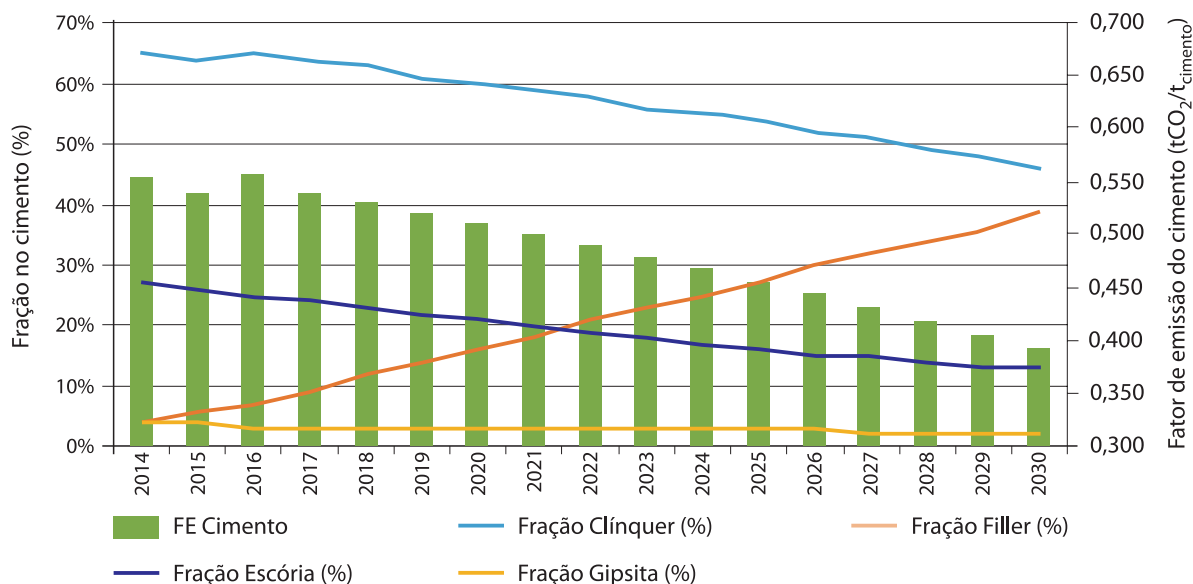
3.3.2 Cenário de penetração das tecnologias de baixo carbono

O cenário de penetração foi construído de forma a evitar duplas contagens na curva MAC. A Figura 3 apresenta a distribuição do total das emissões do cimento considerando as medidas de inserção de *filler* e substituição de combustível fóssil por CDR e pellets. De acordo com a mesma, observa-se que pela inserção de *filler* ~40% das emissões são evitadas. Da emissão

13. Estima-se que cerca de 36% da produção de cimento seja por moagem e o restante por usina integrada localizada no Estado de São Paulo (ano 2014).

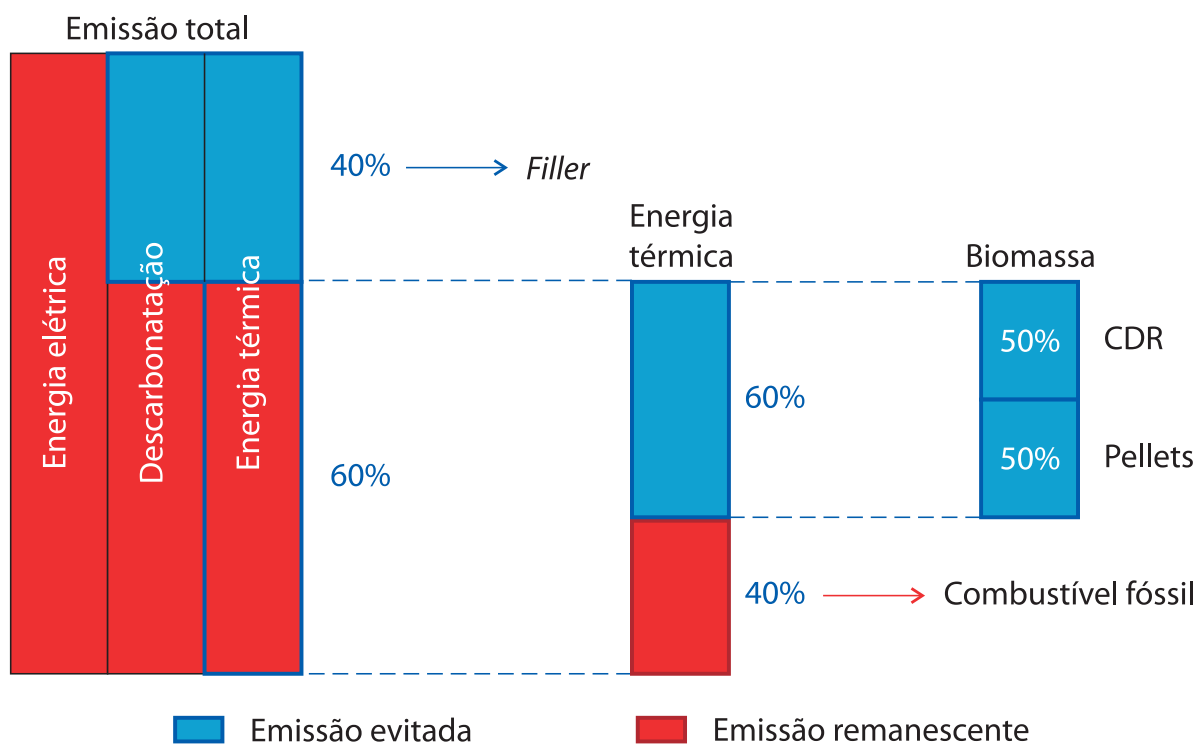
14. Considera a emissão de CO₂ variável segundo teor de clínquer, ou seja, contabiliza apenas a emissão proveniente da descarbonatação e queima de combustível fóssil, e exclui a emissão proveniente do consumo de eletricidade.

Gráfico 10 – Fatores de emissão de CO₂ no cenário de baixo carbono segundo variação de ligante e adições no cimento



Fonte: Elaboração própria (2017).

Figura 3 – Distribuição do total de cimento pelas três medidas avaliadas no cenário de baixo carbono



Fonte: Elaboração própria (2017).

remanescente 60% é evitada pela utilização de CDR e *pellets*.

Para determinar a evolução da penetração das tecnologias no CBC, considerou-se a penetração em taxas de crescimento com início no ano de 2016, até que se atinja a penetração máxima avaliada para cada tecnologia no ano de 2030, o que pode ser acompanhado na Tabela 10.

Tabela 10 – Penetração das tecnologias de baixo carbono 2014–2030

Ano	Filler (1)	CDR (2)	Pellets (2)
2014	2%	0%	0%
2015	5%	0%	0%
2016	7%	2%	2%
2017	9%	4%	4%
2018	12%	6%	6%
2019	14%	8%	8%
2020	16%	10%	10%
2021	19%	12%	12%
2022	21%	14%	14%
2023	24%	16%	16%
2024	26%	18%	18%
2025	28%	20%	20%
2026	31%	22%	22%
2027	33%	24%	24%
2028	35%	26%	26%
2029	38%	28%	28%
2030	40%	30%	30%

Fonte: Elaboração própria (2017).

- (1) Sobre a produção total de cimento, que afeta as emissões de descarbonatação e de energia térmica.
 (2) Apenas sobre as emissões de energia térmica.

3.3.3 Estratégia 1 – Diminuição do teor de ligantes por substituição por *filler*

Considerando a variação da composição do cimento, no CBC, aumenta-se o teor de *filler* no cimento. Isto modifica a energia incorporada e as emissões de CO₂ do cimento. A energia incorporada do clínquer não varia, mas a do cimento diminui proporcionalmente à redução do teor de clínquer substituído pelo *filler*.

O CBC considera a inserção gradativa de *filler* até 39% no ano 2030, conforme Tabela 11. O elevado teor médio de *filler* se deve ao fato de que uma importante parcela do cimento é destinada a elementos construtivos não armados.

Tabela 11 – Variação do teor de clínquer com aumento de *filler*

Ano	Fração			
	Clínquer	Filler	Escória	Gipsita
2014	65%	4%	27%	4%
2015	64%	6%	26%	4%
2016	65%	7%	25%	3%
2017	64%	9%	24%	3%
2018	63%	12%	23%	3%
2019	61%	14%	22%	3%
2020	60%	16%	21%	3%
2021	59%	18%	20%	3%
2022	58%	21%	19%	3%
2023	56%	23%	18%	3%
2024	55%	25%	17%	3%
2025	54%	27%	16%	3%
2026	52%	30%	15%	3%
2027	51%	32%	15%	2%
2028	49%	34%	14%	2%
2029	48%	36%	13%	2%
2030	46%	39%	13%	2%

Fonte: Elaboração própria (2017), baseados em dados de Cerqueira (2014), SNIC (2014a), WBCSD (2013).

Atualmente na Europa, a EN 197-1:2000 (*Cement — Part 1: Composition, specifications and conformity, criteria for common cements*) permite teores de *filler* de 35%. Com o desenvolvimento de cimentos multimodais, cimentos e *fillers* moídos separados, conforme projeto, e misturados posteriormente (SANYTSKY et al., 2015) e incorporação de aditivos dispersantes (massa abaixo de 0,5%) existem sólidas evidências de que estes valores podem ser bastante elevados sem qualquer prejuízo ao comportamento mecânico e reológico de concretos, cimentos e argamassas (COSTA, 2013; DAMINELI, 2013; PROSKE et al., 2013; SANYTSKY et al., 2015). Para escalar a tecnologia acima de 20–30% de

substituição, ainda é requerida alguma pesquisa sobre robustez do sistema, particularmente em relação ao aditivo, mas estas soluções estão a caminho.

Também é interessante mencionar a opção de pozolanas de argila calcinada (30%) misturadas com *filler* calcário (15%), promovida pela EPFL Lausane (FERNANDEZ; MARTIRENA; SCRIVENER, 2011). Esta alternativa resultará em impacto ambiental maior que o do *filler* isoladamente, além de ter maior custo de Investimentos (*Capital Expenditures* – CAPEX) e de operações, pois a pozolana passa por forno a 800°C. A Tabela 11 apresenta a variação de *filler* no cimento considerando um aumento de até 39%. Esta variação é o fator determinante para os FE por tonelada de cimento no CBC, que foram apresentados na Tabela 9.

3.3.3.1 Consumo de energia considerando a inserção de *filler* em substituição ao clínquer

O consumo de energia resulta da soma da energia elétrica e térmica por tonelada de cimento multiplicada pela quantidade de cimento produzida dentro do Estado de São Paulo. Na Tabela 12 é apresentado o consumo de energia estimado para a produção de cimento no Estado de São Paulo considerando a inserção de *filler* em substituição ao clínquer em, no máximo, 39%.

3.3.3.2 CAPEX considerando a inserção de *filler* em substituição ao clínquer

O investimento necessário para o CBC de produção do cimento com diminuição do teor de ligantes, pela substituição de clínquer por *filler*, difere do CR apenas pela inserção dos silos,

Tabela 12 – Consumo de energia considerando a inserção de *filler* em substituição ao clínquer

Ano	Energia térmica	Energia elétrica	Energia total
	(TJ)		
2014	14.985	3.850	18.835
2015	14.617	3.866	18.484
2016	15.619	4.060	19.679
2017	16.142	4.263	20.405
2018	16.663	4.476	21.139
2019	17.182	4.700	21.882
2020	16.740	4.935	21.675
2021	16.401	5.181	21.582
2022	16.049	5.441	21.490
2023	15.686	5.713	21.399
2024	15.312	5.998	21.310
2025	14.926	6.298	21.225
2026	14.531	6.613	21.144
2027	14.126	6.944	21.069
2028	13.711	7.291	21.002
2029	13.288	7.655	20.943
2030	12.856	8.038	20.894

Fonte: Elaboração própria (2017), baseado em dados de (SNIC, 2014a), (CERQUEIRA, 2014), (WBCSD, 2013), (GHG PROTOCOL; FGV, 2013), (MME, 2014) e (MME, 2013).

para seu armazenamento. Para as fábricas existentes, foi considerado que a implantação dos silos ocorreria a partir de 2016, ao longo dos três primeiros anos, motivo pelo qual os investimentos em silos, equivalente a US\$ 207,4 mil anuais, nesses anos são os maiores do período. O preço unitário de um silo com capacidade de 100 toneladas foi estimado em US\$ 51.852, esta é a média dos valores pesquisados com os fornecedores de silos em 2015.

Nos anos em que há a implantação de novas fábricas de moagem, assim como no CR, o valor de US\$ 87,5 milhões é o investimento médio para a implantação de uma unidade de moagem com capacidade produtiva de 900.000 t-cimento/ano.

3.3.3.3 OPEX considerando a inserção de filler em substituição ao clínquer

Os custos com operação (manutenção, operacional, insumos e depreciação) das fábricas, com inserção do *filler* no cenário de baixo carbono, são apresentados na Tabela 13.

3.3.4 Estratégia 2 – Substituição de combustível fóssil (coque de petróleo) por combustível derivado de resíduo (CDR)

Esta estratégia propõe a substituição do coque de petróleo por combustível derivado de resíduo (CDR), que representará 33% da energia necessária para a produção de cimento até o ano 2030. O poder calorífico considerado foi de 18 MJ/kg, segundo a mediana dos valores encontrados

nas referências (PER GLOBAL SOLUTIONS, 2011; BANDEIRA, 2010; REVALORE, 2014; LESCANO et al., 2009; MEYSTRE; SILVA, 2013; BA, sem data; BA, sem data; IEA, 2013a; BNDES, 2013).

A utilização de resíduos como fonte de energia pode ser feita por várias rotas, entre elas as mais conhecidas são o coprocessamento e a incineração. Geralmente a eficiência do processo melhora com a produção de combustível derivado de resíduos (CDR), que podem ser sólidos, líquidos e gasosos. O aproveitamento de resíduos não é uma novidade para a indústria cimenteira, que já utiliza combustíveis alternativos como pneus, casca de arroz, bagaço de cana, entre outros (CNI; ABCP, 2012). Os fornos de cimento são particularmente adequados para a substituição de combustíveis fósseis por alternativos uma vez, observado o poder calorífico, não há prejuízo no processo produtivo; e que

Tabela 13 – Custos de operação e manutenção para produção de cimento no Estado de São Paulo no cenário de baixo carbono com diminuição no teor de ligante até 2030

Ano	Custo operacional – Cenário de baixo carbono/Estratégia 1			
	Energia	Operação sem energia	Manutenção	Total
	(US\$)			
2014	97.538.842	464.089.999	100.193.394	661.822.234
2015	102.299.214	470.058.314	100.630.172	672.987.700
2016	113.887.296	496.583.836	105.661.680	716.132.812
2017	127.693.861	520.716.505	110.944.764	759.355.130
2018	143.412.870	552.651.595	116.492.002	812.556.467
2019	161.350.253	589.260.285	122.316.602	872.927.141
2020	179.317.977	632.427.590	124.621.556	936.367.122
2021	202.489.389	670.761.126	127.520.212	1.000.770.726
2022	229.060.383	713.434.184	130.563.801	1.073.058.367
2023	259.558.716	754.956.793	133.759.569	1.148.275.077
2024	294.380.829	794.765.975	137.115.125	1.226.261.930
2025	334.944.453	835.872.937	140.638.460	1.311.455.850
2026	381.148.438	878.297.634	144.337.961	1.403.784.033
2027	434.427.214	922.060.398	148.222.437	1.504.710.049
2028	495.902.788	967.181.840	152.301.137	1.615.385.766
2029	566.875.008	1.013.682.760	156.583.772	1.737.141.540
2030	648.849.728	1.061.584.039	161.080.539	1.871.514.307

Fonte: Elaboração própria (2017), a partir de estimativas do consultor e de informações de (SNIC, 2013) e (SAUNDERS, 2014).

os componentes inorgânicos (como por exemplo, cinzas) são integrados no produto clínquer (WBCSD; IEA, 2009).

O percentual de substituição de combustível fóssil por combustíveis alternativos na indústria cimenteira no mundo é cerca de 15%¹⁵, sendo que na Alemanha corresponde a 44% da matriz energética (WBCSD, 2013). No entanto o CDR de alta qualidade, pode substituir mais do que 60% (HASANBEIGI *et al.*, 2012) dos combustíveis fósseis. O potencial para ampliação do uso energético de resíduos na indústria cimenteira brasileira ainda é grande, pois atualmente o país substitui pouco mais de 10% (WBCSD, 2013).

No país, pode-se identificar iniciativas como a da Lafarge-Holcim, que possui uma empresa (Resotec) para o coprocessamento de resíduos vinculado à indústria cimenteira, que está em atividade nos Estados do Rio de Janeiro e de Minas Gerais. Também a Votorantim pioneira no coprocessamento de solo contaminado, pneus, borras oleosas, emborrachados, materiais contaminados e solventes, com instalações no Paraná e em São Paulo.

Neste estudo o combustível derivado de resíduos (CDR) foi considerado neutro em emissões de dióxido de carbono para o setor de cimento. Esta premissa de cálculo foi adotada em virtude de sólidos métodos de estimativa de emissões de GEE. A citar:

- a) O *Cement Sustainability Initiative* (CSI), baseado no modelo do GHG Protocol orienta que as emissões de dióxido de carbono da parte fóssil dos combustíveis alternativos derivados de resíduos tenham as emissões de CO₂ apresentadas e consideradas no montante de emissões brutas¹⁶ da empresa. Nas emissões líquidas¹⁷, o protocolo de cálculo assume que o uso de resíduos implica em mitigação das emissões oriundas da decomposição destes, gerando créditos iguais às emissões diretas de CO₂ do uso desses combustíveis (WBCSD, 2011), resultando em emissões nulas.
- b) No caso de resíduos sólidos urbanos (RSU) depositados em aterros sanitários, a decomposição deverá gerar quantidade substancial de metano (CH₄), com potencial de aquecimento global 21 vezes superior ao de dióxido de carbono (SOLOMON; IPCC, 2007), enquanto a queima do CDR gera CO₂. Mesmo incluindo a pegada de CO₂ da transformação do resíduo em CDR, este processo representa uma mitigação substancial da contribuição para as mudanças climáticas. Assim, a hipótese de neutralidade é mais do que justificada.
- c) Do ponto de vista da avaliação do ciclo de vida é usual alocar todos os impactos ambientais ao produto que o gerou e não ao reciclador.

Entende-se que os RSU, e seus impactos, são de responsabilidade do setor público.

15. Média mundial, somando combustíveis fósseis alternativos (resíduos) e biomassa, ambos com emissão nula segundo WBCSD. O *World Business Council for Sustainable Development*, na versão 3 do Protocolo de estimativa de CO₂ e energia do cimento, considera que as emissões provenientes de combustíveis derivados de resíduos devem ser descontadas das emissões do cimento, devido à mitigação de gases de efeito estufa ocorrida de forma indireta (WBCSD, 2011).

16. "As emissões brutas são as emissões totais diretas de CO₂ de uma fábrica de cimento ou empresa, incluindo o CO₂ dos resíduos fósseis (mas excluindo o CO₂ dos resíduos de biomassa, que é tratado como um item de memorando). Os créditos da mitigação indireta de GHG refletem as reduções de emissões de GEE alcançadas nos locais de descarte de resíduos como resultado da utilização de CDR. A mitigação real geralmente é difícil de determinar com precisão; portanto, os créditos da mitigação, em certa medida, devem ser acordados por convenção, em vez de serem baseados em avaliações de impacto "precisas" de GEE" (WBCSD, 2011).

17. "As emissões líquidas são as emissões brutas menos os créditos para a mitigação indiretas de GEE. Na medida do possível, os créditos do uso de CDR relatados devem levar em consideração as circunstâncias locais (por exemplo, acordos nacionais, análises do ciclo de vida do uso local da CDR, etc.). Ao informar a terceiros, devem ser fornecidas evidências de suporte para os créditos e verificados conforme apropriado. Como padrão, o protocolo pressupõe que os créditos para a mitigação indireta sejam iguais às emissões diretas de CO₂ do uso de CDR fóssil. O protocolo reconhece que essa abordagem é uma simplificação da questão do CDR. No entanto, é, no médio prazo, a abordagem menos onerosa e mais praticável, onde a transparência é obtida através da divulgação de emissões brutas e líquidas. A convenção internacional sobre um tratamento mais preciso da AFR ainda não foi alcançada" (WBCSD, 2011).

A indústria cimenteira não é demandante de CDR de RSU, mas sim, um vetor para a minimização do problema de destinação dos resíduos. O uso de CDR pela indústria apresenta um cenário potencialmente positivo para ambos os setores: cimento e gestão de resíduos. Isto porque minimiza as emissões de CH_4 dos aterros e de CO_2 pela queima de combustíveis fósseis da indústria. A substituição de combustível fóssil por alternativo de fonte renovável diminui as emissões totais de CO_2 da indústria cimenteira (KARSTENSEN, 2007). O uso de CDR em substituição ao combustível fóssil convencional, neste caso carvão, em fornos de cimento permite reduzir cerca de $1,6 \text{ kgCO}_2/\text{kgCDR}$ (GENON; BRIZIO, 2008). Também, diminui a demanda por aterros ou incineradores e a probabilidade de contaminação de águas subterrâneas e produção de resíduos perigosos (gases provenientes de incineradores) (CNI; ABCP, 2012).

Além disso, o combustível derivado de resíduos sólidos urbanos (CDR de RSU) apresenta variantes que dificultam a definição precisa de suas emissões de CO_2 . Uma vez respeitado o poder calorífico mínimo exigido pela indústria cimenteira e uma composição não contaminante do produto, o CDR de RSU pode variar sua constituição físico-química segundo disponibilidade de insumos ou custo (por exemplo), o que implica na variação de seu fator de emissão direto. O combustível pode apresentar emissão nula se feito de componentes renováveis (ex. papel ou plástico de cana-de-açúcar) ou emitente se composto por elementos constituídos de dióxido de carbono de fonte fóssil (ex. plásticos ou borracha).

Sabe-se que o fator de emissão da energia proveniente do processamento de resíduos deve

ser adaptado segundo o contexto local (EPE, 2013). Ainda que se encontre na literatura algum fator de emissão de CDR¹⁸ de RSU, aplicá-lo de forma direta ao cenário do Estado de São Paulo, se não considerar condicionantes locais no âmbito tecnológico, econômico, político e ambiental, poderá gerar conclusões errôneas. Estas poderiam desconsiderar possíveis ganhos com a substituição do combustível fóssil¹⁹ ou possíveis impactos referentes à qualidade do ar; uma vez que se sabe que o uso de CDR pode mitigar as emissões de CO_2 , mas piorar a qualidade do ar segundo sua composição.

Faz-se necessário o desenvolvimento de políticas de resíduos na transformação do RSU em CDR que alcancem esses benefícios. A Resolução CONAMA nº 264 (CONAMA, 1999) apenas discorre sobre os critérios técnicos a serem atendidos no coprocessamento de resíduos nos fornos de clínquer, como os limites máximos das emissões atmosféricas. Em recente apresentação, o Ministério das Cidades apoia o reaproveitamento de RSU seco com fim energético e propõe a “instituição de tributo municipal para tratamento e disposição final dos RSU” como forma de sustentar ações do governo. Um dos modelos de negócio exibido é o coprocessamento em fornos de cimento em substituição ao combustível fóssil. Dentre as vantagens, coloca a existência de regulamentação pelo CONAMA (Resolução 264/99), regulamentação de licença ambiental pela CETESB e licenciamento para CDR para algumas fábricas (MC; SNSA, 2017).

Desta forma, o Estado de São Paulo poderia considerar na composição de políticas públicas o uso do CDR de RSU para mitigação das emissões de CO_2 do setor de cimento e do setor de gestão de resíduos; bem como, limitar

18. Emissão média de combustível alternativo empregado pela IEA é de $1,85 \text{ MtCO}_2/\text{mtoe}$ (WBCSD; IEA, 2009); O LBNL apresenta uma faixa de variação entre 0,95 a $1,32 \text{ tCO}_2/\text{t}$ de CDR de RSU, salientando que países em desenvolvimento reportam fatores de emissão menores que o da faixa apresentada (HASANBEIGI *et al.*, 2012).

19. A *Ecofys Consultancy* fez um estudo de oportunidades de mercado para o coprocessamento de resíduos em quatorze cimenteiras na União Europeia e identificou que, com um percentual de substituição de 40%, seria possível evitar em média cerca de $1,66 \text{ tCO}_2/\text{t}_{\text{resíduo}}$ (PREETI SRIVASTAV, 2017, p. 3).

a importação de clínquer e cimento de outros estados a aqueles que possuam uma parcela de combustível renovável ou neutro em carbono em seu processo de produção.

3.3.4.1 Consumo de energia considerando a substituição do combustível fóssil por combustível derivado de resíduo

No CBC, o consumo total de energia térmica se mantém igual ao apresentado para o CR. A estimativa do consumo de energia térmica por tipo de combustível considerou que, até o ano 2030, a energia proveniente do CVP seria substituída em 60%, assim deixaria de representar 82% do total (ano 2013) para representar 49% (ano 2030). A energia térmica proveniente do CVP foi multiplicada por percentuais graduais que reduziram sua participação a 49% no ano 2030. A quantidade de energia subtraída do CVP foi transferida para o CDR (Tabela 14), onde esse passaria a representar 33% da energia térmica total em 2030. Não foi feita modificação no percentual de energia proveniente de outras fontes, como a biomassa, que se manteve constante em 18%.

Essa modificação proposta foi contabilizada apenas para o cimento produzido por usina integrada dentro do Estado de São Paulo. Desta forma, sua eficiência ao longo dos anos fica condicionada à capacidade de produção do estado;

Tabela 14 – Quantidade estimada de energia térmica consumida considerando a substituição de coque de petróleo por CDR

Ano	CVP	CDR	Outros (biomassa e outros resíduos)	Energia térmica total
	(TJ)			
2014	12.511	0	2.654	15.166
2015	12.225	0	2.593	14.818
2016	12.111	774	2.734	15.619
2017	11.998	1.771	2.921	16.690
2018	11.885	2.812	3.118	17.815
2019	11.771	3.900	3.325	18.996
2020	11.658	4.133	3.350	19.141
2021	11.544	4.462	3.396	19.402
2022	11.431	4.781	3.439	19.651
2023	11.317	5.090	3.481	19.888
2024	11.204	5.390	3.520	20.114
2025	11.091	5.681	3.558	20.329
2026	10.977	5.963	3.594	20.534
2027	10.864	6.237	3.628	20.729
2028	10.750	6.504	3.660	20.915
2029	10.637	6.763	3.691	21.091
2030	10.523	7.016	3.721	21.260

Fonte: Elaboração própria (2017), baseado em dados do SNIC (2014a), WBCSD (2013), Cerqueira (2014), MME (2010).

uma vez que não se apresenta neste relatório o impacto de aplicar tal estratégia nas usinas integradas fora do estado que vendem o clínquer para São Paulo. A Tabela 14 apresenta a quantidade estimada de energia térmica consumida por tipo de combustível para a produção de cimento no Estado de São Paulo, com substituição gradativa de coque de petróleo por CDR.

3.3.4.2 Custos de investimento e de operação e manutenção considerando a substituição do combustível fóssil por combustível derivado de resíduo (CDR)

Nesse cenário o consumo de materiais é o mesmo levantado para o CR, portanto, considera-se CAPEX e OPEX como sendo zero para a análise da curva MAC e BEPC.

3.3.4.3 Custos de energia considerando a substituição do combustível fóssil por combustível derivado de resíduo (CDR)

Para a medida de CDR, a modificação que ocorre do CR para o CBC é o consumo de combustíveis, pois nesse caso o CVP será parcialmente substituído por CDR. Parte da energia consumida nas fábricas integradas é oriunda de biomassa e outros resíduos. Como essa parcela não teria seus parâmetros modificados, na composição do OPEX sua participação não foi considerada.

3.3.5 Estratégia 3 – Substituição de combustível fóssil considerando a substituição do coque de petróleo por biomassa (*pellet* de madeira)

Esta estratégia propõe a substituição do CVP por biomassa (*pellet* de madeira), que representaria 60% da energia necessária para a produção

de cimento até o ano 2030. A emissão do *pellet* de madeira foi considerada nula. Isto porque é um combustível renovável, sendo que em alguns casos se emprega resíduos como insumo. Assim, seguem-se as premissas que foram adotadas para o CDR, anteriormente mencionados (vide item 3.3.4). Não se considerou as emissões de seu processamento na composição dos cenários. O poder calorífico considerado foi de 18 MJ/kg, média do *pellet* de madeira brasileiro segundo as referências (LIPPEL, 2014) (BORIM, 2007a) (GARCIA; CARASCHI; VENTORIM, 2012) (COUTO et al., 2004) (ELBRA, 2014).

3.3.5.1 Consumo de energia considerando a substituição do coque de petróleo por biomassa (*pellet* de madeira)

A estimativa do consumo de energia térmica por tipo de combustível considerou que até o ano 2030 a energia proveniente de biomassa (*pellet* de madeira) chegaria a 60%. A energia térmica proveniente do CVP foi multiplicada por percentuais gradativos que reduziram sua participação a 40% no ano 2030²⁰. A quantidade de energia subtraída do CVP foi transferida para o *pellet* de madeira, sendo os resultados apresentados na Tabela 15, dessa forma, são apresentadas as quantidades estimadas de energia térmica consumida por tipo de combustível para a produção de cimento no estado, com substituição gradativa de coque de petróleo por biomassa (*pellet* de madeira).

20. A análise de substituição de CVP por *pellets* aqui está sendo considerada independente da substituição por CDR, portanto a energia total destes dois CBC não deve ser somada, o que geraria dupla contagem de energia. Para a curva MAC, a energia total, que atinge 21.260 TJ em 2030, foi compartilhada entre as duas medidas de substituição de CVP, evitando deste modo a dupla contagem.

Tabela 15 – Quantidade de energia térmica considerando a substituição do coque de petróleo por biomassa (*pellet* de madeira)

Ano	CVP	Biomassa (<i>pellet</i> de madeira)	Energia térmica total (1)
		(TJ)	
2014	12.511	2.654	15.166
2015	12.225	2.593	14.818
2016	11.928	3.691	15.619
2017	11.638	5.052	16.690
2018	11.355	6.460	17.815
2019	11.079	7.916	18.996
2020	10.810	8.331	19.141
2021	10.547	8.855	19.402
2022	10.291	9.360	19.651
2023	10.041	9.847	19.888
2024	9.797	10.317	20.114
2025	9.559	10.770	20.329
2026	9.327	11.207	20.534
2027	9.100	11.629	20.729
2028	8.879	12.036	20.915
2029	8.663	12.428	21.091
2030	8.504	12.756	21.260

Fonte: Elaboração própria (2017), baseado em dados de SNIC (2014a), IEA (2013b), WBCSD (2013), Lippel (2014), Elbra (2014), Borim (2007a), Garcia, Caraschi e Ventorim (2012), e Couto et al. (2004)

(1) O valor da energia total é independente, portanto não deve ser somado ao total apresentado na Tabela 14.

3.3.5.2 Custos de investimento e de operação e manutenção considerando a substituição do coque de petróleo por biomassa (*pellet* de madeira)

Assim como no cenário anterior, nessa estratégia o consumo de materiais é o mesmo levantado para o CR, portanto, considera-se CAPEX e OPEX como sendo zero para a análise da curva MAC e BEPC.

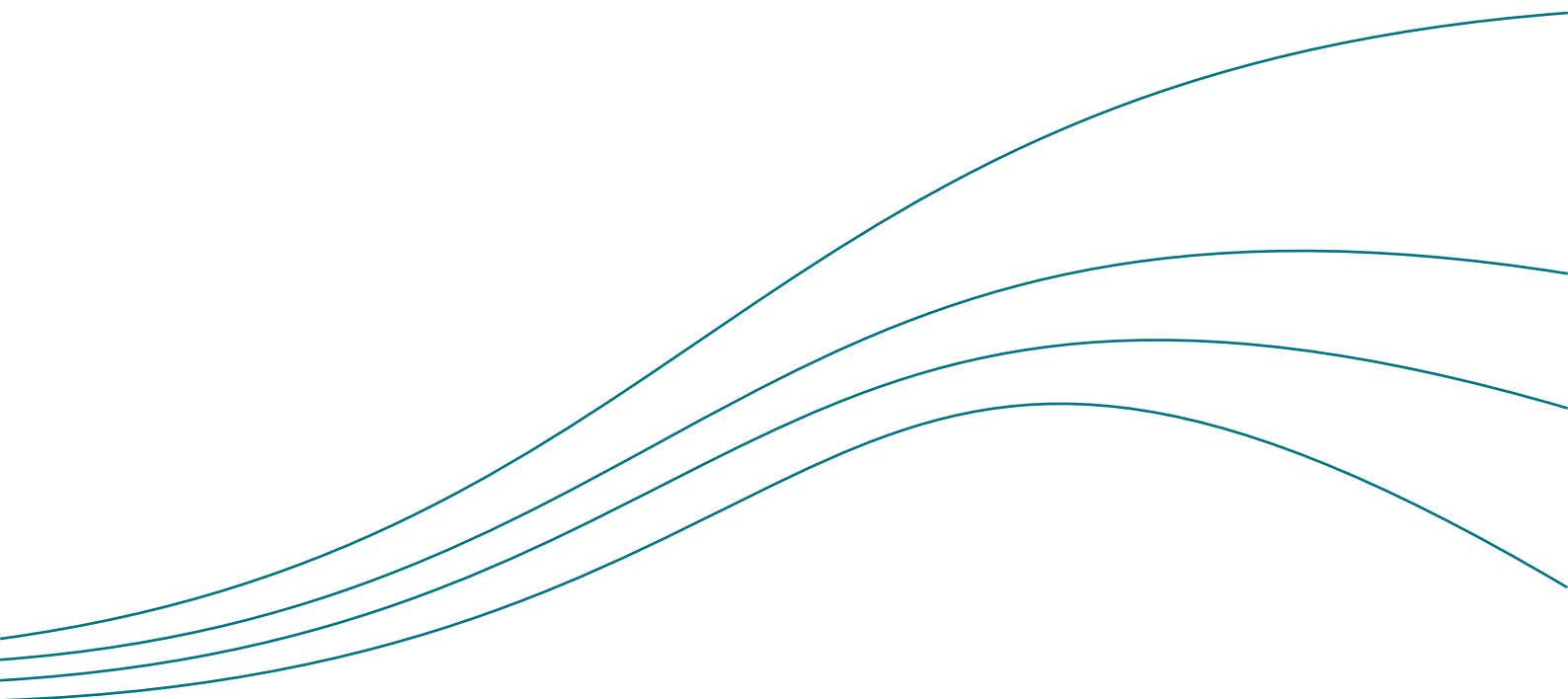
3.3.5.3 Custos de energia considerando a substituição do coque de petróleo por biomassa (*pellet* de madeira)

No CBC, o custo de energia está condicionado à participação do CVP, que é substituído gradualmente e parcialmente por *pellets*, e o preço de ambos energéticos.

Em suma, o MAC e BECP, tanto da substituição por *pellets* quanto a da substituição por CDR, é resultado unicamente da diferença de preços entre o CVP, o CDR e os *pellets* de madeira.



Resultados e discussão



Neste capítulo, são apresentadas as comparações entre os resultados do CR e do CBC alcançados pelo estudo. Também são apresentados os resultados do gráfico de redução das emissões (*Wedge Graph*), da curva MAC, e da curva de BECP geradas pela MACTool.

A partir da aplicação das tecnologias do CBC, seria possível alcançar uma redução de 23,2 MtCO₂, representando 28,9%, em relação às emissões do CR, considerando o período de 2014 a 2030. A substituição do clínquer pelo *filler* tem participação predominante na redução das emissões, esta medida representa 65,3% do CO₂ mitigado.

Neste estudo, as emissões foram classificadas em emissões de processo, emissões de combustível e emissões de energia elétrica. A medida referente ao *filler* envolve a mitigação das emissões de processo e de combustível, enquanto que as medidas referentes ao CDR e *pellets* abrange apenas as emissões de combustível. As emissões do consumo de energia elétrica se mantiveram inalteradas do CR para o CBC.

Em relação aos resultados econômicos, o aumento do *filler* apresentou MAC e BECP negativos, o que significa que é atrativo para a indústria investir em *filler* em detrimento do uso do clínquer. O mesmo não ocorreu com as medidas de substituição de combustível fóssil. Os resultados são detalhados a seguir.

4.1 COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS DE REFERÊNCIA E DE BAIXO CARBONO

A comparação entre o CR e o CBC para o consumo energético, emissões de processo e emissões de energia do cimento estão dispostas nos subitens a seguir.

4.1.1 Consumo energético

O consumo de energia (térmica e elétrica) na produção de cimento em São Paulo refere-se àquela usada nas usinas integradas do estado (eletricidade e combustível fóssil) e nas moagens (eletricidade). As estratégias de CDR e *pellets* não se referem à eficiência energética e sim à troca de combustíveis, portanto, a redução do consumo, observada na Tabela 16, deve-se à diminuição do teor de clínquer pela introdução do *filler* no CBC.

Os resultados mostram uma redução no consumo total de energia em 2030 de 8.404 TJ no CBC em relação ao CR. Isto ocorre pela diminuição da energia térmica, já que a elétrica permanece inalterada entre os cenários.

Conservadoramente, o consumo de eletricidade foi mantido constante, ainda que com a diminuição da demanda por material calcinado seja observada uma redução do consumo de energia para a operação da moagem de cru, forno e moinho de combustível, além de filtros. Os dados do impacto destes processos são escassos. A única literatura que manifesta esse fato sugere que mineração, moagem, empacotamento e outros sistemas de apoio representam 30% e 55% do total (MADLOOL et al., 2011). Os dados do GNR CSI para o Brasil (CSI WBCSD, 2013) mostram que a moagem e ensacamento (após forno) representam cerca de 32 kWh/t_{cimento}, aproximadamente 30% do consumo de eletricidade da fábrica. Adicionalmente, alguns *fillers*, particularmente a produção de ultrafinos e a moagem separada seguida de mistura, podem implicar em aumento da demanda elétrica. Dada a incerteza, optou-se por uma medida conservadora, adequada neste tipo de proposta, que mantém o consumo elétrico constante independente do teor de clínquer, adotado igual a 0,38 GJ/t_{cimento}, como apresentado no item 2.2

Tabela 16 – Energia consumida na produção de cimento no Estado de São Paulo

Ano	Cenário de referência			Cenário de baixo carbono		
	Energia térmica	Energia elétrica	Energia total	Energia térmica	Energia elétrica	Energia total
	(TJ)					
2014	15.166	3.850	19.016	14.985	3.850	18.835
2015	14.818	3.866	18.684	14.617	3.866	18.484
2016	15.619	4.060	19.679	15.619	4.060	19.679
2017	16.690	4.263	20.953	16.142	4.263	20.405
2018	17.815	4.476	22.291	16.663	4.476	21.139
2019	18.996	4.700	23.696	17.182	4.700	21.882
2020	19.141	4.935	24.076	16.740	4.935	21.675
2021	19.402	5.181	24.583	16.401	5.181	21.582
2022	19.651	5.441	25.092	16.049	5.441	21.490
2023	19.888	5.713	25.601	15.686	5.713	21.399
2024	20.114	5.998	26.112	15.312	5.998	21.310
2025	20.329	6.298	26.627	14.926	6.298	21.225
2026	20.534	6.613	27.147	14.531	6.613	21.144
2027	20.729	6.944	27.673	14.126	6.944	21.069
2028	20.915	7.291	28.206	13.711	7.291	21.002
2029	21.091	7.655	28.746	13.288	7.655	20.943
2030	21.260	8.038	29.298	12.856	8.038	20.894

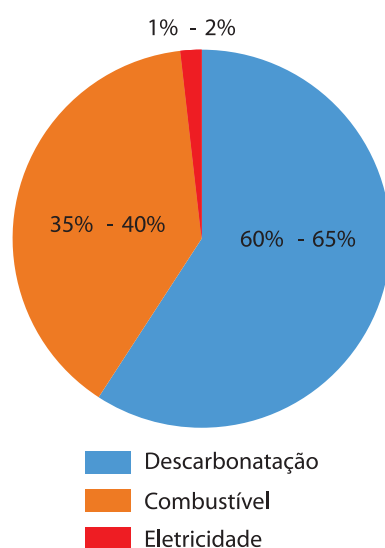
Fonte: Elaboração própria (2017), baseado em dados do SNIC (2014a), WBCSD (2013), Cerqueira (2014) e MME (2010).

4.1.2 Emissões do cimento

Segundo estimativas feitas com dados de SNIC (2013), (CERQUEIRA, 2014) e (WBCSD, 2013)²¹, tem-se que a descarbonatação é responsável por 60% a 65% das emissões de CO₂, a queima de combustíveis fósseis de 35% a 40% e a eletricidade por menos de 2%, conforme apresentado no Gráfico 11.

Quando considerado apenas os processos de produção ocorridos dentro do Estado de São Paulo, os valores de emissão de CO₂ ocultarão uma importante parcela de emissão que é gerada em outros estados que exportam o clínquer para São Paulo. Esta diferença foi da ordem de quase 2,0 milhões de toneladas emitidas fora do estado em 2013; e em 2030 seria da ordem

Gráfico 11 – Origem das emissões de CO₂ na produção de cimento



Fonte: Elaboração própria (2017) com base MME (2014), MME (2013), GHG Protocol e FGV (2013); SNIC (2014a) e WBCSD (2013).

21. Segundo duas rotas de cálculo: 1) dados de produção e consumo energético do GNR Project do World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) para a indústria de cimento no Brasil (WBCSD, 2013) e o fator de emissão de energia elétrica do Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT, 2015) para o ano 2013; b) cálculo estequiométrico que considera o teor de óxido de cálcio segundo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (GIBBS; SOYKA; CONNEELY, 2001), teor de clínquer segundo GNR Project do World Business Council for Sustainable Development (WBCSD, 2013), emissão da energia elétrica segundo Ministério de Ciência e Tecnologia (MCTI, 2015).

de quase 8,5 milhões de toneladas de CO₂; ou seja, em 2030 cerca 61% das emissões do cimento consumido por São Paulo estariam fora de seus limites (Gráfico 12). Portanto, é importante ressaltar que os resultados apresentados neste relatório são pertinentes apenas aos processos ocorridos nos limites geopolíticos do estado.

4.1.2.1 Emissões de energia

A variação das emissões de CO₂ de energia na produção de cimento ocorre pela variação do teor de clínquer no cimento, que como visto afeta o total de energia consumida, e pela composição da matriz energética, com a participação de combustíveis fósseis e renováveis na parcela térmica. A parcela elétrica é a de menor

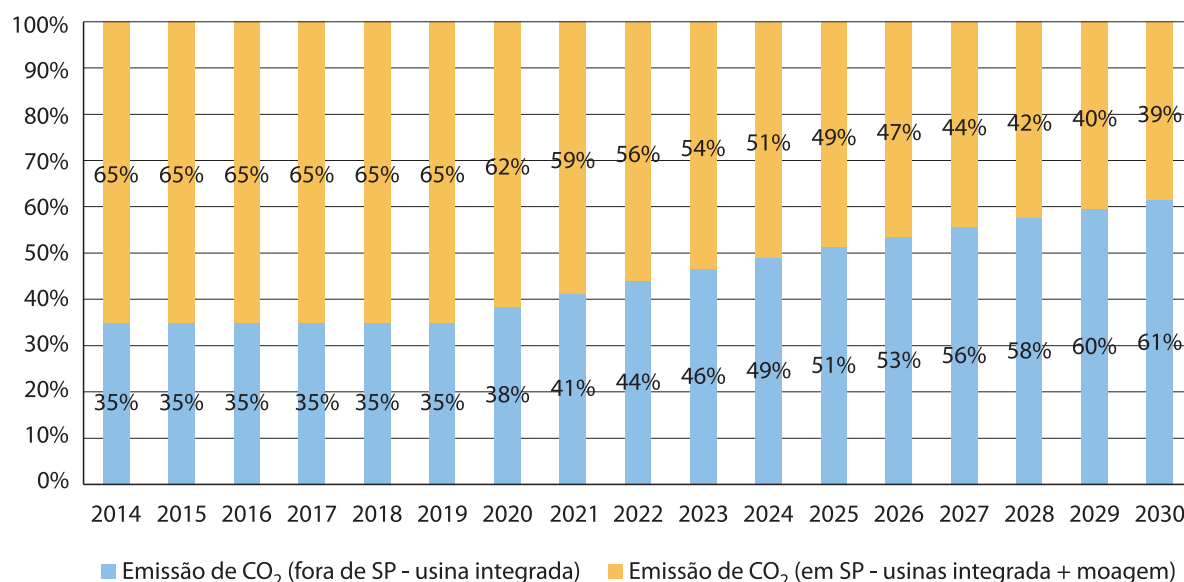
participação nas emissões (vide Gráfico 11) e foi considerada invariável ao longo do período.

As emissões de CO₂ provenientes da queima de CDR e biomassa (resíduos de biomassa e outros) foram consideradas nulas, conforme apresentado na seção 3.3.4.

A comparação entre o CR e CBC de emissões de energia é apresentada na Tabela 17.

No período de análise, seriam evitados um total de 13.437 GgCO₂ das emissões de energia ao CR. Esta redução é decorrente tanto da diminuição do consumo de energia (Tabela 16) por conta do aumento da participação do *filler* no cimento, como pela substituição do coque de petróleo por CDR e *pellets* de madeira no montante de energia remanescente.

Gráfico 12 – Distribuição territorial da emissão de CO₂ na produção de cimento para São Paulo



Fonte: Elaboração própria (2017), baseada em dados do MME (2014), MME (2013), GHG Protocol e FGV (2013), SNIC (2014a), WBCSD (2013) e Cerqueira (2014).

Tabela 17 – Comparação das emissões de energia da produção de cimento no cenário de referência e no cenário de baixo carbono

Ano	Emissões CR		Emissões CBC		Diferença total
	Térmica	Elétrica	Térmica	Elétrica	
	(GgCO ₂)				
2014	1.266	145	1.251	145	15
2015	1.237	146	1.220	146	17
2016	1.304	153	1.139	153	165
2017	1.393	160	1.062	160	331
2018	1.487	168	991	168	496
2019	1.586	177	925	177	661
2020	1.598	186	863	186	735
2021	1.620	195	805	195	815
2022	1.641	205	751	205	890
2023	1.660	215	701	215	960
2024	1.679	226	654	226	1.025
2025	1.697	237	610	237	1.087
2026	1.714	249	569	249	1.145
2027	1.731	261	531	261	1.200
2028	1.746	274	495	274	1.251
2029	1.761	288	462	288	1.299
2030	1.775	303	429	303	1.346

Fonte: Elaboração própria (2017).

4.1.2.2 Emissões do processo de descarbonatação do clínquer

A variação das emissões de CO₂ de processo ocorre segundo a mudança do teor de clínquer (dados já apresentados na Tabela 11). As emissões totais resultam da multiplicação do FE do cimento pela quantidade de cimento produzida dentro do Estado de São Paulo como mencionado na seção 2.

A Tabela 18 apresenta a comparação das emissões de processo no CR e CBC.

No CBC, as emissões de processo do cimento são equivalentes à 1.989 GgCO₂, em 2030, poderão ser 14% menores que o ano de 2014, conforme a Tabela 18. No período de análise, seriam evitados um total de 9.841 GgCO₂ das emissões de processo em relação ao CR, devido ao aumento da participação do *filler* na composição do cimento.

4.2 EMISSÕES EVITADAS EM GRÁFICO DE CUNHA (WEDGE GRAPH)

A Tabela 19 e Gráfico 13 apresentam as estimativas de emissões evitadas no CBC no período de 2014 a 2030. A medida referente ao *filler* representa uma redução de 18,8% das emissões totais de CO₂ no CR de 2014 a 2030, causando o maior impacto no CBC. Por sua vez, as medidas de substituição do combustível fóssil, o CVP, por CDR e *pellets* representam cada uma a redução de 5,0% do CR dentro do mesmo período.

Tabela 18 – Comparação das emissões de processo da produção de cimento no cenário de referência e no cenário de baixo carbono

Ano	Emissões CR	Emissões CBC	Diferença
	(GgCO ₂)		
2014	2.347	2.319	28
2015	2.293	2.262	31
2016	2.455	2.417	38
2017	2.583	2.498	85
2018	2.757	2.579	178
2019	2.940	2.659	281
2020	2.962	2.590	372
2021	3.003	2.538	465
2022	3.041	2.484	557
2023	3.078	2.427	651
2024	3.113	2.369	744
2025	3.146	2.310	836
2026	3.178	2.249	929
2027	3.208	2.186	1.022
2028	3.237	2.122	1.115
2029	3.264	2.056	1.208
2030	3.290	1.989	1.301

Fonte: Elaboração própria (2017).

Em conjunto, as medidas contempladas neste estudo contribuiriam para uma redução de 2,6 MtCO₂ no ano de 2030, fazendo com que a emissão no CBC seja 27,5% menor do que foi em 2014. No período de 2014 a 2030, a indústria de cimento conseguiria reduzir 23,2 MtCO₂, 28,9% em relação às emissões totais do CR.

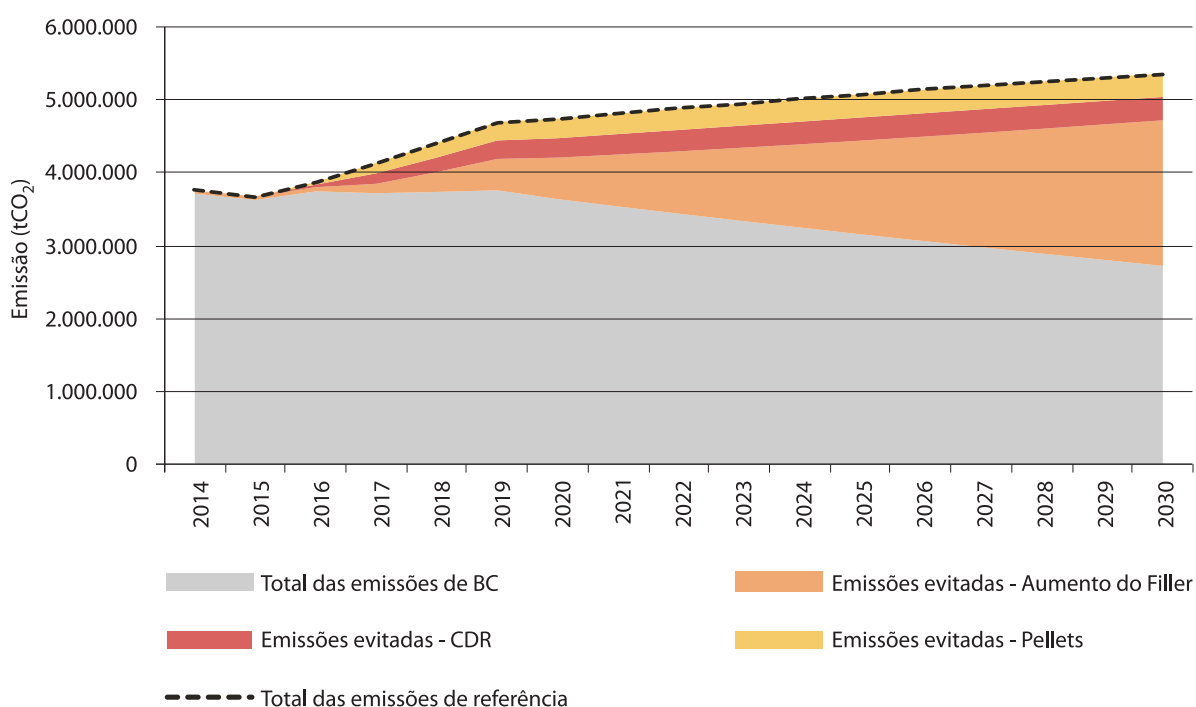
No Gráfico 13 é possível verificar a contribuição de cada tecnologia para a mitigação.

Tabela 19 – Emissões evitadas pelas tecnologias de baixo carbono

Ano	Emissões evitadas			Total das emissões CBC	Total das emissões CR
	Filler	CDR	Pellets		
	(tCO ₂)				
2014	42.959	0	0	3.714.938	3.757.897
2015	47.924	0	0	3.627.858	3.675.783
2016	57.682	35.126	35.126	3.745.878	3.873.813
2017	130.601	142.670	142.670	3.720.679	4.136.619
2018	274.262	200.029	200.029	3.738.245	4.412.566
2019	431.963	254.892	254.892	3.760.564	4.702.310
2020	572.039	267.396	267.396	3.638.970	4.745.802
2021	715.049	282.150	282.150	3.538.003	4.817.353
2022	858.059	294.448	294.448	3.439.447	4.886.403
2023	1.001.069	304.445	304.445	3.343.158	4.953.117
2024	1.144.079	312.285	312.285	3.249.006	5.017.654
2025	1.287.089	318.103	318.103	3.156.872	5.080.167
2026	1.430.099	322.027	322.027	3.066.654	5.140.806
2027	1.573.109	324.174	324.174	2.978.257	5.199.714
2028	1.716.118	324.657	324.657	2.891.599	5.257.031
2029	1.859.128	323.578	323.578	2.806.610	5.312.895
2030	2.002.138	321.989	321.989	2.721.323	5.367.438

Fonte: Elaboração própria (2017).

Gráfico 13 – Emissões evitadas pelas tecnologias de baixo carbono



Fonte: Elaboração própria (2017).

4.3 CURVA DE CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO

A Tabela 20 apresenta resultados das oportunidades de mitigação na área de processo e combustível.

A partir da Curva MAC, observa-se que, além de evitar quase o dobro de CO₂ que as medidas de combustíveis juntas, o *filler* também apresenta MAC negativo. Este resultado é devido à economia em OPEX e em custo de energia quando se aumenta a participação do *filler*

Tabela 20 – Custo marginal de abatimento e potencial de emissões evitadas

Setor	Atividade	Custo de abatimento	Emissões evitadas 2014–2030
		(US\$/tCO ₂)	(MtCO ₂)
Processo (1)	<i>Filler</i>	–2	15,14
Combustível	<i>Pellets</i>	10	4,03
Combustível	CDR	11	4,03

Fonte: Elaboração própria (2017).

(1) Apesar da alocação em processo (*manufacturing*) na ferramenta MACTool, as emissões de combustível também estão no escopo do *filler*.

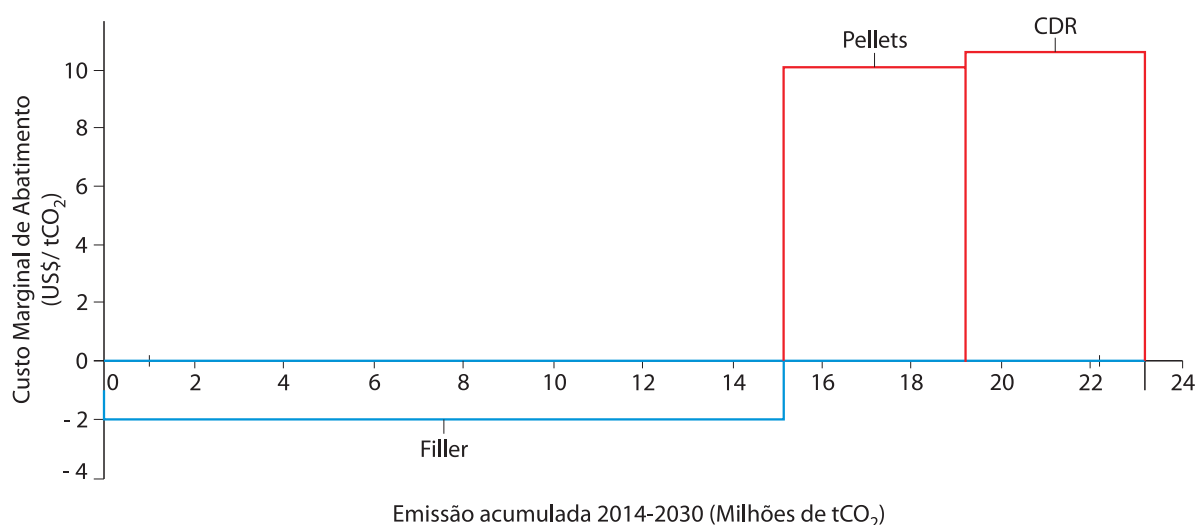
na composição do cimento. Em termos incrementais, no período de 2014–2030, enquanto o CAPEX total no CBC aumenta US\$ 1,2 milhão, o OPEX reduz em US\$ 41,4 milhões e o custo de energia reduz em US\$ 32,3 milhões.

As medidas referentes a *pellets* de madeira e CDR, por outro lado, apresentam MAC positivo. A diferença entre o CR e CBC para estas medidas é unicamente o custo de energia, portanto, uma vez que os preços dos *pellets* e CDR são maiores que os preços do CVP, isto se refletiu diretamente sobre o resultado da MAC.

O Gráfico 14 apresenta a curva MAC para o setor de cimento.

Até o ano de 2030, a indústria de cimento gastaria a mais US\$ 40,7 milhões com a substituição de CVP por *pellets* e US\$ 42,7 milhões com a substituição de CVP por CDR. Entretanto, com a economia de US\$ 28,1 milhões devido ao aumento do teor de *filler*, seriam gastos somente US\$ 55,3 milhões no período avaliado, com a adoção das três medidas de baixo carbono.

Gráfico 14 – Curva de custo marginal de abatimento para o setor de cimento



Fonte: Elaboração própria (2017).

4.4 PREÇO DE EQUILÍBRIO DE CARBONO (BREAK-EVEN CARBON PRICE)

A Tabela 21 apresenta o BECP para cada oportunidade de mitigação. O Gráfico 15 mostra a curva de BECP e o potencial de mitigação para cada medida considerada, o mesmo valor da curva MAC.

Considerando que o produtor de cimento deseja uma TIR de 13%, seria necessário a venda da tonelada de CO₂ por US\$ 23 e US\$ 24 para que se tornem atrativas as estratégias dos *pellets* e do CDR, respectivamente. Já para o

filler, assim como na curva MAC, o resultado de BECP foi um valor negativo, o que demonstra que tal estratégia traz *per se* o retorno esperado pela indústria, sem que se faça necessário a venda de créditos de carbono.

O Gráfico 15 apresenta a curva de BECP para o setor de cimento.

Para a curva de BECP, a ordem das medidas em relação ao custo não foi alterada quando comparada à curva MAC. No entanto, a ordem de grandeza das mesmas aumentou em decorrência da taxa de atratividade ser maior do que a taxa de desconto.

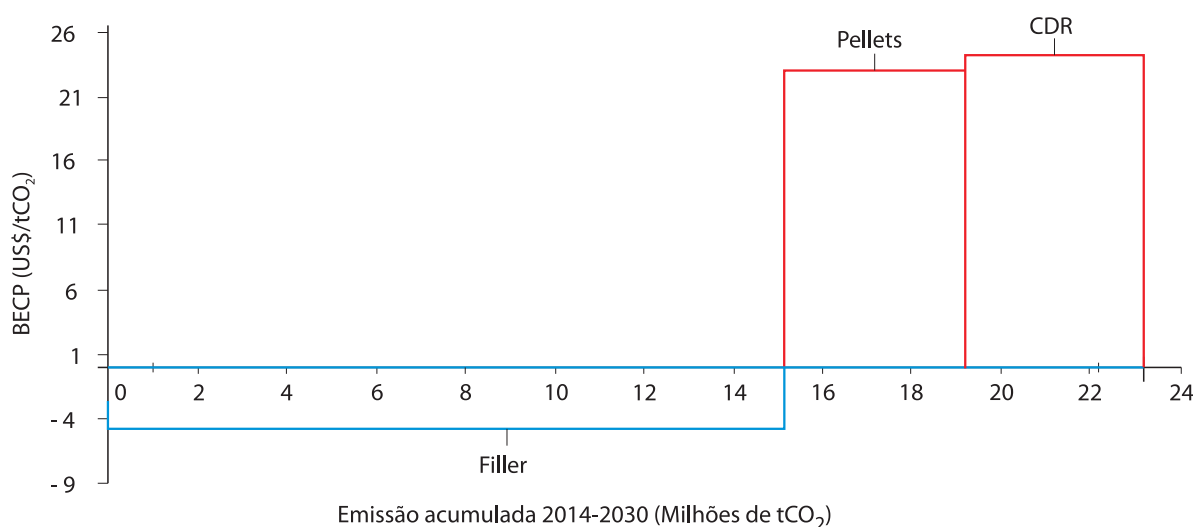
Tabela 21 – Break-Even Carbon Price

Setor	Atividade	Break-Even Carbon Price (BECP)	Emissões evitadas 2014–2030
		(US\$/tCO ₂)	(MtCO ₂)
Processo (1)	<i>Filler</i>	–5	15,14
Combustível	<i>Pellets</i>	23	4,03
Combustível	CDR	24	4,03

Fonte: Elaboração própria (2017).

(1) Apesar da alocação em processo (manufacturing) na ferramenta MACTool, as emissões de combustível também estão no escopo do *filler*.

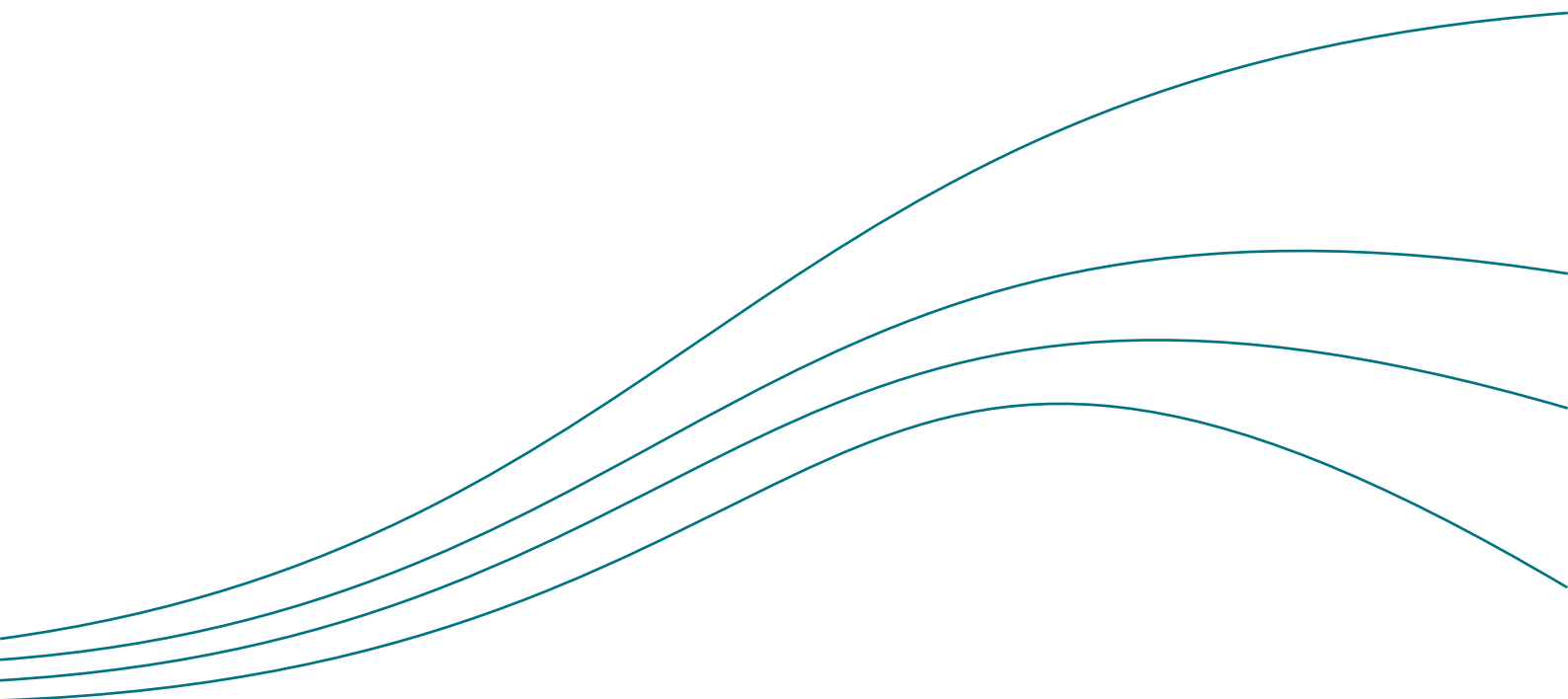
Gráfico 15 – Curva de Break-Even Carbon Price para o setor de cimento



Fonte: Elaboração própria (2017).



Conclusão



O aumento do consumo de cimento em São Paulo requererá o incremento da produção de clínquer ou cimento em outros estados, o que irá causar a transferência de emissões potencialmente significativas de CO₂ para as localidades que exportam para o Estado de São Paulo (*carbon leakage*).

As estratégias de mitigação de emissão de CO₂ para o setor de cimento afetam diretamente o setor da construção que aplica este material na composição de argamassas, concretos e outros produtos cimentícios. Somente os dois primeiros usos representam cerca de 80% do cimento consumido no Estado de São Paulo. A modificação nos procedimentos do processo produtivo do cimento mitiga emissões de CO₂, que podem ser potencializadas por variações no consumo de cimento aplicados à construção. As estratégias de mitigação do setor de cimento foram focadas no processo de produção, especificamente na mistura do cimento e consumo de combustíveis, uma vez que a descarbonatação (responsável entre 60% e 65% das emissões do cimento) é um processo químico sobre o qual não se pode atuar.

Todas as estratégias podem ser implementadas concomitante e gradualmente ao longo do período considerado no estudo (2014–2030). No entanto, algumas medidas possuem limitações técnicas ou legais. Um limitante legal é o teor máximo de *filler* permitido pelas normas brasileiras, que atualmente admitem o teor máximo de 10%, bem abaixo dos 40% propostos neste estudo. Os limitantes técnicos para a implantação do CDR e do *pellet* são: o poder calorífico mínimo necessário para combustíveis a serem usados nos fornos, e a quantidade máxima de combustíveis de baixo poder calorífico que os fornos suportam no mix energético.

Tanto a adição de *filler* no cimento quanto o uso de combustível renovável já são práticas comuns encontradas no setor, mas em percentuais inferiores aos propostos neste estudo.

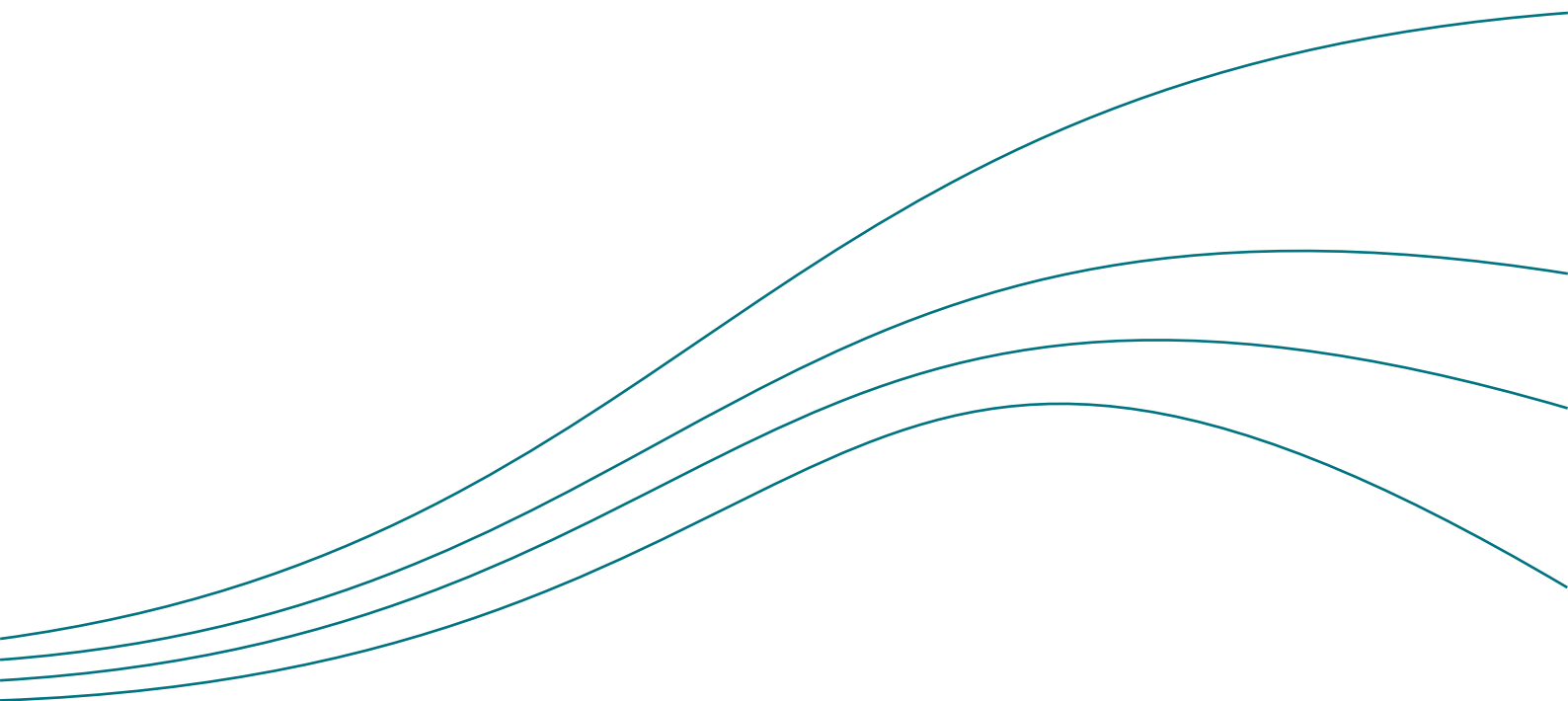
O tipo de combustível renovável diferencia-se do CR, fazendo com que seja necessário viabilizar a logística de fornecimento e garantir as propriedades físico-químicas necessárias ao processo de produção.

Conforme resultados obtidos pela MACTool, a estratégia de *filler* mostra-se atrativa, pois gera a economia de US\$ 2 em cada tCO₂ evitada. Se apenas esta medida fosse implantada pela indústria de cimento, seriam evitados um total de 15,14 MtCO₂, economizando-se US\$ 28,1 milhões. Para alcançar o potencial total de mitigação, equivalente à 23,2 MtCO₂, faz-se necessário implantar também a substituição de combustíveis fósseis por biomassa (CDR e por *pellets* de madeira). Neste caso, o custo total para a indústria de cimento no período de 2014–2030 seria de US\$ 55,3 milhões. Os resultados do BECP foram semelhantes ao do MAC, com *filler* trazendo o retorno esperado pelos investidores, entretanto é necessário vender a tCO₂ para que o mesmo ocorra com o CDR e o *pellet*.

Finalmente, destacam-se as limitações e dificuldades encontradas ao longo do período de execução deste documento, um dos seus principais objetivos foi identificar possíveis direções para um futuro de baixo carbono, tendo um recorte específico e exploratório, a indústria de cimento no Estado de São Paulo. Uma vez que tomadores de decisão optem por determinados caminhos, novos estudos deverão surgir para ampliar o escopo e aprofundar o caráter técnico, político, regulatório, social e ambiental destas tecnologias de baixo carbono. Cabe ressaltar que o enfoque deste estudo foi a análise de tecnologias para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa, com enfoque no dióxido de carbono, e, portanto, a emissão de outros poluentes deve ser analisada de acordo com a legislação vigente, sendo necessária por vezes a regulamentação de procedimentos específicos.



Referências



ABNT. **NBR 5733/1991 – Cimento Portland de alta resistência inicial**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991a.

ABNT. **NBR 5735/1991 – Cimento Portland de alto-forno**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991b.

ABNT. **NBR 5736/1991 – Cimento Portland pozolânico**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1999.

ABNT. **NBR 11578/1991 – Cimento Portland composto**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997.

ABNT. **ABNT NBR ISO 14040:2009. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. 2009.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil – 2008**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.globalgarbage.org/Panorama2008.pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2015.

ANEEL. **Novos empreendimentos (implantações e ampliações) decorrentes de leilões de geração (2005 a 2014)**. Brasília, [2015?]. 1 planilha de dados eletrônica, formato XLS. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=58&idPerfil=5&idiomaAtual=0>>. Acesso em: abr. 2015.

BA. **Estudo inicial estimativo de custos para uma planta de conversão de RSU em CDR**. [s.l.] Banco Ambiental, sem data.

BA. **Pré-estudo para planta de conversão de RSU – CDR**. [s.l.] Banco Ambiental, sem data.

BANDEIRA, C. A. L. **Avaliação da Estabilidade Biológica de Combustível Derivado de Resíduo**. Dissertação de

Mestrado –Lisboa: Universidade de Lisboa – Instituto Superior Técnico, 2010.

BNDES. **PESQUISA CIENTÍFICA BNDES FEP Nº 02/2010 – PRODUTO 7: Relatório final sobre as principais rotas tecnológicas de destinação de resíduos sólidos urbanos no Exterior e no Brasil**. [s.l.] Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco – FADE, 2013. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/aep_fep/chamada_publica_residuos_solidos_Rel_estado_arte.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2015.

BORIM, G. V. **Resultado da Análise – Pellet**. Esalq. Departamento de Ciências Florestais. Universidade de São Paulo, 5 fev. 2007b. Disponível em: <http://www.madersul.com.br/Downloads/Pelletbraz/Analise_Pellet_LQCE.pdf>.

BORIM, G. V. **Resultado da Análise – Pellet**. Universidade de São Paulo. Esalq. Departamento de Ciências Florestais, 2007a. Disponível em: <http://www.madersul.com.br/Downloads/Pelletbraz/Analise_Pellet_LQCE.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2007

BRASIL. **Decreto n. 7.390, de 9 de dezembro de 2010**. Regulamenta os arts. 6, 11 e 12 da Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. Com alterações posteriores. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7390.htm>. Acesso em: abr. 2016.

BRASIL. **Federative Republic of Brazil – INDC**. Submetido à UNFCCC em 28 de

setembro de 2015. Disponível em: <<http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/Published%20Documents/Brazil/1/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf>>. Acesso em: abr. 2017.

BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009.** Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. Com mensagem de veto. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm>. Acesso em: abr. 2017.

BRASIL. MCTI. **Arquivos dos fatores de emissão:** fatores médios de emissão CO₂ grid mês ano. Brasília, DF, 2015. Programa Nacional de Mudanças Climáticas. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/320907.html>>. Acesso em: abr. 2015.

BRASIL. MCTI. Coordenação-Geral de Mudanças Globais do Clima. **Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais – produtos minerais – parte II: produção de cal, outros usos do calcário e dolomita, produção e uso de barrilha.** Brasília, DF, 2010. (Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa: Relatórios de Referência). Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0219/219294.pdf>. Acesso em: abr. 2017.

BRASIL. MDIC. AliceWeb 2. Brasília, 2016. **1 banco de dados online de informações estatísticas.** Disponível em: <<http://aliceweb.mdic.gov.br/menu/index/id/21>>. Acesso em: set. 2016.

CARVALHO, J.O. et al. **Emissões fugitivas de gases de efeito estufa na indústria de petróleo e gás natural.** Segundo inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa, v. Parte I, n. SNIC/ABCP/MCT, 2010.

CBIC. **Planilha:** Evolução do valor médio/mediano do Cimento Portland 32 (em US\$/tonelada) – UF e Média Brasil (dado referente à média de 2013 do Estado de São Paulo). Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br/menu/materiais-de-construcao/cimento>>. Acesso em: 17 set. 2015.

CERQUEIRA, C. The steel industry and its by-products for cement industries. In: **CBI BRAZIL & LATAM 2014 – BRAZILIAN AND LATIN AMERICAN CEMENT & LIME CONFERENCE.** São Paulo: 2014.

CETESB. **Emissões do Cimento – CETESB – Dados primários de seis empresas de cimento com planta no Estado de São Paulo,** set. 2015. Acesso em: 21 set. 2015.

CETESB. **Emissões do Setor de Processos Industriais e Uso de Produtos:** Relatório de Referência. 1º Inventário de Emissões Antrópicas de GEE Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo. São Paulo: CETESB, 2013.

CNI; ABCP. **Indústria brasileira de cimento:** Base para a construção do desenvolvimento. Brasília: CNI, 2012.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 264,** de 26 de agosto de 1999.

COSTA, E. B. C. **Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias.** Tese de Doutorado

– São Paulo: Universidade de São Paulo (Escola Politécnica), 2013.

COUTO, L. et al. Produção de pellet de madeira – O caso da bio-energy no Espírito Santo. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p. 45–52, 2004.

CSI WBCSD. “**Getting the Numbers Right**” (GNR). Disponível em: <<http://www.wbcsdcement.org/index.php/key-issues/climate-protection/gnr-database>>.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas – Concepts for formulation of low-binder concretes**. Dr. Eng. Thesis – São Paulo: Universidade de São Paulo (Escola Politécnica), 2013.

DNIT. **Manual de custos rodoviários – Volume 1: Metodologia e Conceitos**. 3ª ed. ed. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes; Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2003.

DNPM. Sumário Mineral 2014. **Departamento Nacional de Produção Mineral**, v. 34, p. 141, 2014.

DONG, H. et al. Emissions from Livestock and Manure Management. In: **IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Hayama, JP: IGES, 2006. v. 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use, chap: 10, p. 10.7. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_10_Ch10_Livestock.pdf>. Acesso em: set. 2016.

EGGLESTON, S. et al. **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Kanagawa (Japan). Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

EIA. **Annual energy outlook 2014 with projections to 2040**. Washington, DC, 2014. (DOE/EIA-0383/2014). Disponível em: <[http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2014\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2014).pdf)>. Acesso em: set. 2016.

EIA. **Electricity Market Module, 2014**. Assumptions to the Annual Energy Outlook 2014. Washington, 2014a. Disponível em: <[http://www.eia.gov/forecasts/aeo/assumptions/pdf/0554\(2014\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/assumptions/pdf/0554(2014).pdf)>. Acesso em outubro de 2015.

EIA. **Europe Brent Spot Price FOB. Period: 1987–2013**. Independent Statistics & Analysis. U.S. Department of Energy. Washington. 2014b. Disponível em: <<http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=p&s=rbrte&f=a>>. Acesso em: nov. 2014.

ELBRA, E. LIMPA DO B. **Pellet**. Disponível em: <<http://www.elbra.ind.br/pellet.php>>. Acesso em: 16 ago. 2014a.

ELBRA, E. LIMPA DO B. **Pellet**. Disponível em: <<http://www.elbra.ind.br/pellet.php>>. Acesso em: 16 ago. 2014b.

EPE; MME. **Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Série Recursos Energéticos**. Rio de Janeiro: EPE, DEA, out. 2014. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2018%20-%20%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20>>

Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos.pdf>. Acesso em: 20 set. 2015.

EPE. **Protocol for the quantification of greenhouse gas emissions from waste management activities (version 5)**. EPE. Disponível em: <<http://www.epe-asso.org/en/protocol-quantification-greenhouse-gases-emissions-waste-management-activities-version-5-october-2013/>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

ERMCO. **Ready-mixed concrete industry statistics – Year 2013**. Belgium: ERMCO, jul. 2014. Disponível em: <<http://www.ermco.eu/documents/statistics/ermco-statistics-y-2013-final-version.pdf>>. Acesso em: 8 jun. 2015.

ESMAP. World bank group. **Modeling Tools and E-Learning: MACTool**. c2017. Disponível em: <<http://www.esmap.org/MACTool>>. Acesso em: mar. 2018.

ETB. **Gases – Densities**. Disponível em: <http://www.engineeringtoolbox.com/gas-density-d_158.html>. Acesso em: 14 dez. 2015.

FAY, M.; HALLEGATTE, S.; VOGT-SCHILB, A.; ROZENBERG, J.; NARLOCH, U.; KERR, T. **Decarbonizing Development. Three Steps to a Zero-Carbon Future**. Climate Change and Development. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-0479-3. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO. Washington, 2015. 182p.

FDE. **Listagem de Preços**. www.fde.sp.gov.br, [S.l.], 15 jul. 2015. Disponível em: <[http://www.fde.sp.gov.br/\(X\(1\)S\(1dnjsyvs3wriginon511wmla\)\)/PagesPublic/InternaFornecedores.aspx?contextme](http://www.fde.sp.gov.br/(X(1)S(1dnjsyvs3wriginon511wmla))/PagesPublic/InternaFornecedores.aspx?contextme)

nu=listpre&AspxAutoDetectCookieSupport=1>. Acesso em: 7 ago. 2015.

FERNANDEZ, R.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: a comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 1, p. 113–122, 2011.

GARCIA, D.P.; CARASCHI, J.C.; VENTORIM, G. **Caracterização energética de pellets de madeira**. In: 7º CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA. São Paulo: 5 nov. 2012.

GENON, G.; BRIZIO, E. **Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF**. Waste Management, 2008. v. 28, p. 2375–2385.

GHG PROTOCOL; FGV. **Programa Brasileiro GHG Protocol. Arquivo em excel (ano 2013). Fatores de conversão**. Acesso em: 30 jun. 2015.

GIBBS, M.J.; SOYKA, P.; CONNEELY, D. CO₂ emissions from cement production. In: IPCC (Ed.). **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories**. [s.l.] IPCC, 2001. p. 175–182.

GOUVELLO, C. de et al. **Estudo de baixo carbono para o Brasil**. Washington, DC: Banco Mundial: Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento, 2010. 280 p. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/Relatorio_Principal_integra_Portugues.pdf>. Acesso em: abr. 2017.

HASANBEIGI, A. et al. **International Best Practices for Pre-Processing and Co-Processing Municipal Solid Waste and Sewage Sludge in the Cement Industry**. Estados Unidos: U.S. Environmental Protection Agency, Institute for Industrial Productivity, U.S. Department of Energy, 2012. Disponível em: <<http://eetd.lbl.gov/node/49959>>. Acesso em: 11 set. 2015.

HUNTZINGER, D.N.; EATMON, T.D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 7, p. 668–675, maio 2009.

IEA. **CO₂ Capture in the Cement Industry**. IEA Greenhouse Gas R&D Programme. [S.l.]: International Energy Agency, 2008.

IEA. **Deployment of CCS in the cement industry**. Reino Unido: IEA, dez. 2013b. Disponível em: <http://www.ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2013-19.pdf>. Acesso em: 2 set. 2015.

IEA. **IEA Bioenergy annual report 2013**. Dublin, Ireland: IEA Bioenergy, 2013a. Disponível em: <<http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2014/03/IEA-Bioenergy-Annual-Report-2013.pdf>>.

IPCC. **Emission Scenarios. Summary for Policymakers**. A Special Report of IPCC Working Group III. 2000a. 27p.

IPCC. **Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories**. Hayama, JP: IGES, 2000. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>>. Acesso em: set. 2016.

IST. **Avaliação do potencial de produção e utilização de CFR em Portugal continental – Estudos base**. Portugal: Instituto Superior Técnico, 2006. Disponível em: <http://enverg.ist.utl.pt/PDF/Potencial%20CDR%20v1%2006_06.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2015.

JOHN, V.M.; PUNHAGUI, K.R.G.; CINCOTTO, M.A. **Produção de cal. Economia de Baixo Carbono – Impactos de Novos Marcos Regulatórios e Tecnologias Sobre a Economia Brasileira**. Ribeirão Preto: Funpec Editora, 2014, p. 371–400.

KARSTENSEN, K.H. **A Literature Review on Co-processing of Alternative Fuels and Raw Materials and Hazardous Wastes in Cement Kilns**. [S.l.]: [s.n.], 2007.

LAFARGE. **Excerpt from the 2007 Annual Report – Document de Référence**. Lafarge,, 2007. Disponível em: <http://www.lafarge.com/04022008-Activities-Details_cement_business-en.pdf>. Acesso em: 10 maio. 2015

LESCANO, G.M.A. et al. Geração descentralizada de reservas operativas através do aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos como fonte de energia renovável. **XLI SBPO – Pesquisa Operacional na Gestão do Conhecimento**, p. 102–113, 2009.

LIPPEL. **Pellets de biomassa**. Disponível em: <<http://www.lippel.com.br/br/sustentabilidade/pellets-de-biomassa#.U-czmMR7Ks>>. Acesso em: mar. 2018.

MACK-VERGARA, Y.L.V.; JOHN, V.M. Life cycle water inventory in concrete production – A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 12, p. 227–250, 2017.

MADLOOL, N.A. et al. A critical review on energy use and savings in the cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 4, p. 2042–2060, maio 2011.

MC; SNSA. **Política Nacional de Resíduos Sólidos** (Desafios para o Setor). [S.l.]: 2017.

MCTI. **Arquivos dos Fatores de Emissão de CO₂ da eletricidade**. Institucional. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>>. Acesso em: 11 ago. 2015.

MENDONÇA, M.B. ANPAD. Técnicas de Prospecção e Análise de Cenários Futuros nos Governos e Administração Pública do Brasil: Revisão da Produção Científica Brasileira de 2001 a 2010. In: **V Encontro de Estudos em Estratégia**. Porto Alegre, 2011.

MEYSTRE, J.A.; SILVA, R.J. The possibility of coprocessing municipal solid waste – MSW in clinker kilns to cement production. **Engenharia Térmica (Thermal Engineering)**, v. 12, n. 2, p. 34–39, dez. 2013.

MME, M. De M.E E. **Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030)**. 2 impressão (revisada) ed. Brasília: [s.n.], 2010b.

MME. **Arquivos dos fatores de emissão**. Dados do ano de 2013. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html>>. Acesso em: 1o out. 2015.

MME. **Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia – Empresa de Pesquisa Energética, 2014. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal.as>

px?anoColeta=2014&anoFimColeta=2013>. Acesso em: mar. 2018.

MME. **Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030)**. Brasília: MME, 2010.

PACALA, S.; SOCOLOW, R. Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. **Science**, Washington, DC, v. 305, n. 5686, p. 968–972, aug. 2004. Special section: Toward a hydrogen economy: review. DOI: 10.1126/science.1100103. Disponível em: <http://fire.pppl.gov/energy_socolow_081304.pdf>. Acesso em: abr. 2017.

PACCA, S. A. et al. **Estudo de baixo carbono para a indústria de São Paulo**: relatório síntese. 1ª ed. 2017. São Paulo CETESB, 2017. 188 p.

PER GLOBAL SOLUTIONS. **CETRA – Waste Treatment Processor (Caribbean Processing)**, 2011.

PREETI SRIVASTAV. Market opportunities for co-processing of waste in cement plants across de EU. In: **CEMENT LCPI**. Apresentação. [S.l.]: 2017. Disponível em: <<http://lctpi.wbcds.org/>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

PROSKE, T. et al. **Approach for eco-friendly concretes with reduced water and cement content**. In: **FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE SUSTAINABILITY**. Tokyo: RILEM FIB, 2013

REVALORE. **Coprocessamento solução segura e definitiva para a destinação final ambientalmente adequada de resíduos**. In: **REVALORE – COPROCESSAMENTO**

- E ENG. DO MEIO AMBIENTE., 2014. Disponível em: <<http://www.revalore.com.br/site/wp-content/uploads/2014/07/coprocessoamento-aspectos-t%C3%A9cnicos.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2015
- REVISTA MINÉRIOS & MINERALES. **Indústria cimenteira investe em expansão em diversos estados.** 2014.
- ROMANO, R.C. De O. **Planilha – Consumo de materiais por m³ – Filitos.**
- SABESP. **Agência Virtual – tarifas.** Institucional. Disponível em: <<https://www9.sabesp.com.br/agenciavirtual/pages/tarifas/tarifas.iface>>. Acesso em: 7 ago. 2015.
- SANYTSKY, M. et al. **Sustainable Green Engineered Composites Containing Ultrafine Supplementary Cementitious Materials.** 14th International Congress on the Chemistry of Cement. **Anais...** In: ICCC 2015. Beijing: Chinese Ceramic Society, 13 out. 2015
- SAUNDERS, A. Country Report: Brazil. Brazil – A resilient cement industry. **Global Cement Magazine**, p. 48–55, 23 maio 2014.
- SNIC. **Números – Resultados Preliminares.** Disponível em: <http://www.snic.org.br/resultados_pre_dinamico.asp>. Acesso em: 1 jun. 2015b.
- SNIC. **Números – Resultados Preliminares.** [S.l.], 2014b. Disponível em: <http://www.snic.org.br/resultados_pre_dinamico.asp>. Acesso em: 1 jun. 2015.
- SNIC. **Press Kit 2013.** SNIC, 2013. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2013_PB.pdf>. Acesso em: 28 set. 2015
- SNIC. **Press Kit 2013.** SNIC. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2013_PB.pdf>. Acesso em: 28 set. 2015.
- SNIC. **Relatório anual 2013.** [s.l.] SNIC, 2014a. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>. Acesso em: 1 jun. 2015.
- SNIC; ABCP; MCTI. **Segundo inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa.** Relatório de Referência. Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais – Produtos minerais. Parte I. Produção de cimento. Brasília: MCT, 2010.
- SOLOMON, S.; IPCC (Org.). Chapter 2 – 2.10.2. **Direct Global Warming Potentials. Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2007.
- THEMELIS, N.J.; ULLOA, P.A. Methane generation in landfills. **Renewable Energy**, v. 32, n. 7, p. 1243–1257, jun. 2007.
- TRIBUNA. **Usiminas suspende operação de alto forno em Cubatão.** Disponível em: <<http://www.tribuna.com.br/noticias/noticias-detalle/cubatao/usiminas-suspende-operacao-de-alto-forno-em-cubatao/?cHash=5d02bfb9fe85377ccbf137aa8cb5c61>>. Acesso em: 25 fev. 2016.

UNFCCC. **PDD 9267: Partial Fuel Switching to Agricultural Wastes, Sewage Sludge & Refuse Derived Fuel (RDF) at Arabian cement plant.** 2012. Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/RWTUV1356603354.08/view>>. Acesso em: jun. 2017

USIMINAS. **Usiminas reestrutura configuração produtiva: Portal Usiminas.** Disponível em: <<http://www.usiminas.com/blog/usiminas-reestrutura-configuracao-produtiva-para-ganhar-competitividade/>>. Acesso em: 11 dez. 2015.

WBCSD. **CO₂ and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry – The Cement CO₂ and Energy Protocol – Version 3.0.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www.cement-co2-protocol.org/v3/Content/Resources/Downloads/WBCSD_CO2_Protocol_En.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2015a.

WBCSD. GNR Project. Dados do ano 2013. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://www.wbcscement.org/GNR-2012/index.html>>. Acesso em: 30 jun. 2015.

WBCSD. IEA. **Cement Technology Roadmap 2009.** Carbon emissions reductions up to 2050. OECD/IEA/WBCSD. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement.pdf>>. Acesso em: 1o jul. 2017.

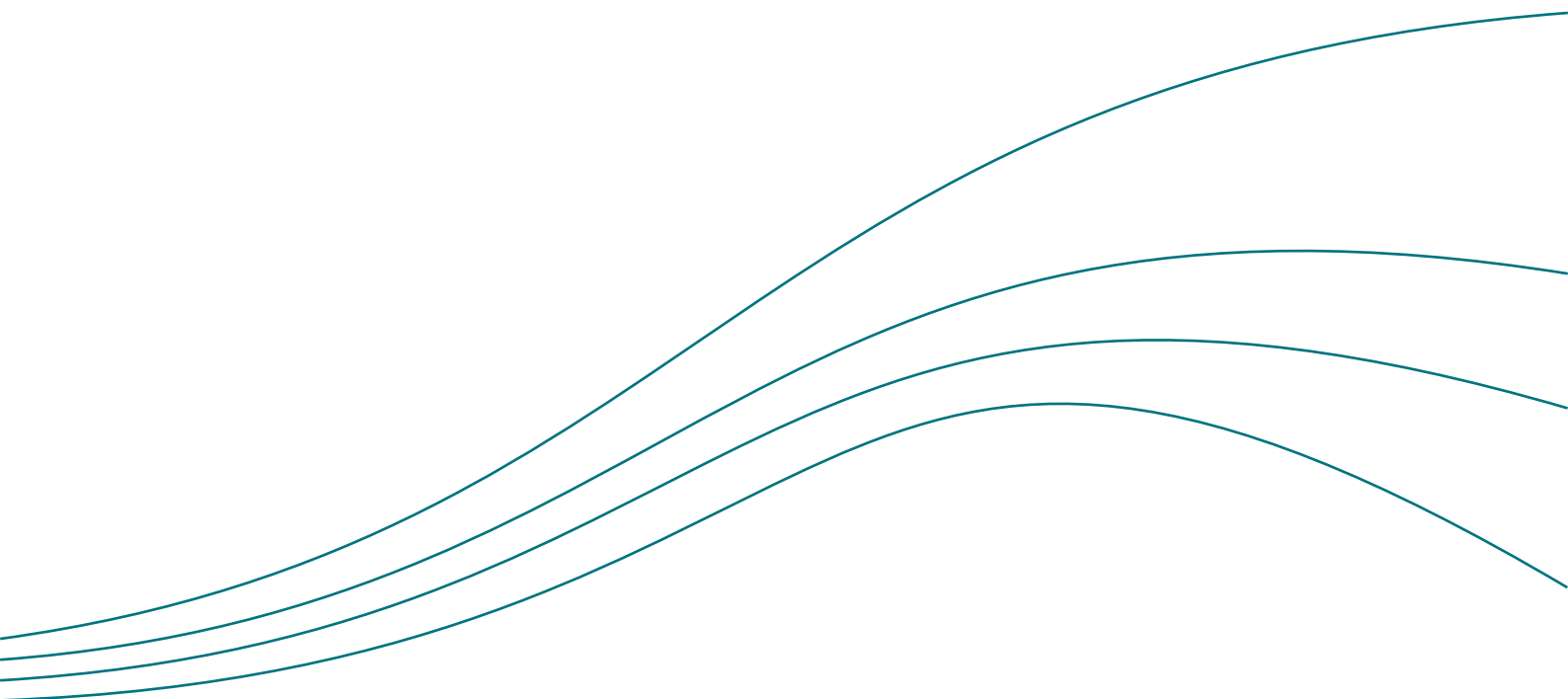
WBCSD, W.B.C. FOR S.D. **Cement Sustainability Initiative (CSI): GNR Project – Reporting CO₂.** Disponível em: <<http://www.wbcscement.org/GNR-2011/index.html>>. Acesso em: 12 jan. 2014b.

WOLFFENBÜTTEL, A. O que é? Petróleo Brent e WTI. **Desafios do Desenvolvimento**, São Paulo: IPEA, ano 2, n. 16, 2005. Disponível em: <http://desafios.ipea.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=2083:catid=28&Itemid=23>. Acesso em: mar. 2018.



Apêndice A

Premissas



Neste apêndice constam as premissas gerais que balizaram o estudo. Maiores detalhes podem ser encontrados no Estudo de Baixo Carbono para a Indústria no Estado de São Paulo de 2014 a 2030 (PACCA et al., 2017).

PREÇOS DA ENERGIA ELÉTRICA CONFORME OS LEILÕES DE ENERGIA

Os preços da geração de energia elétrica têm como base os resultados dos leilões de energia elétrica mais recentes, disponibilizados pela ANEEL ([2015?]). Com base nos preços dos leilões, foram realizadas médias ponderadas anuais considerando a potência das usinas (MW) e o preço por energia (R\$/MWh). A ponderação foi feita para que o preço médio represente melhor o valor de energia das grandes geradoras, principalmente as hidroelétricas e as termoeletricas.

O período selecionado foi de 2014 a 2020²². Em seguida, para se projetar os preços até 2030, foi utilizado um modelo exponencial, calculado de acordo com a Equação 6, cuja $r^2 = 0,51$, com base nos valores dos últimos leilões.

Equação 6 – Regressão exponencial dos preços dos leilões de energia elétrica 2014–2020

$$P_a = 32,301 e^{0,0983(a-2003)}$$

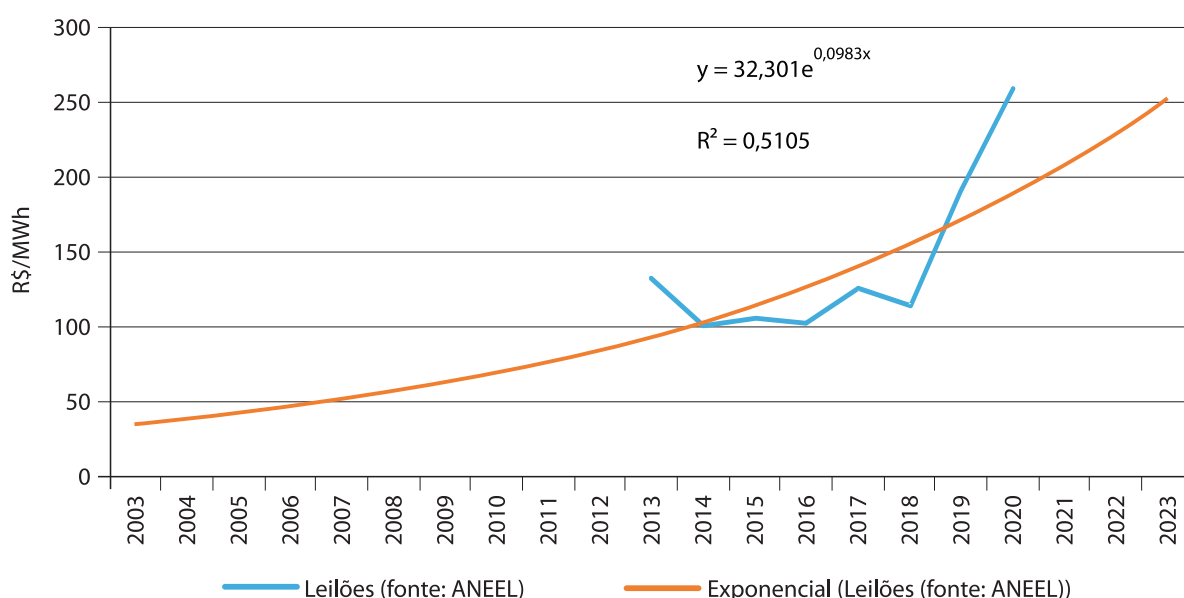
Fonte: Elaboração própria (2017) baseado em ANEEL (2015).

Onde:

P_a = preço da energia elétrica no ano em questão (R\$/MWh)
 a = ano em questão (adimensional)

O Gráfico 16 apresenta a projeção exponencial e os dados dos leilões de energia (ANEEL, [2015?]).

Gráfico 16 – Projeção exponencial dos preços em leilões de energia



22. Para o período de 2016–2020, utilizaram-se leilões de projetos de usinas que operarão no futuro. A exemplo, os leilões de 2020 são referentes a projetos leiloados em 2015 que operarão em 5 anos, por isso são denominados “2015 A-5”.

PREÇOS DA ENERGIA ELÉTRICA PARA O CONSUMIDOR FINAL

Os preços da energia elétrica para o consumidor final, ou seja, a indústria, foram projetados a partir dos preços da geração, adicionando uma porcentagem relativa aos impostos e à taxa de transmissão, tanto nos preços oriundos de leilão quanto de usina termelétrica. No caso dos preços oriundos de termelétrica, esta porcentagem foi introduzida diretamente na ferramenta MACTool, em cada tecnologia referente à conservação ou geração de eletricidade. No caso dos preços oriundos dos leilões, esta porcentagem foi adicionada fora da ferramenta, no montante que compõe os custos de energia das demais tecnologias que não estão relacionadas à conservação ou geração de eletricidade.

O cálculo da referida porcentagem foi realizado a partir dos dados fornecidos²³ pela Superintendência de Gestão Tarifária (SGT) da ANEEL, onde foram apresentados os dados mensais das concessionárias de eletricidade do Estado de São Paulo, que estão apresentadas no Quadro 1. Tomando os dados da referência classificados como “industrial” de cada concessionária, foi aplicada a Equação 7, que estabelece o cálculo da porcentagem dos impostos sobre o custo de geração da eletricidade.

Quadro 1 – Concessionárias de energia elétrica do Estado de São Paulo

Concessionárias de energia elétrica (SP)
Bandeirante – Bandeirante Energia S/A
CNEE – Companhia Nacional de Energia Elétrica
CPFL Leste Paulista – Companhia Leste Paulista de Energia
CPFL- Piratininga – Companhia Piratininga de Força e Luz
EDEVP – Empresa de Distribuição de Energia Vale Paranapanema S/A
Elektro – Elektro Eletricidade e Serviços S/A.
Caiuá-D – Caiuá Distribuição de Energia S/A
CPFL Jaguarí – Companhia Jaguarí de Energia
CPFL Sul Paulista – Companhia Sul Paulista de Energia
CPFL-Paulista – Companhia Paulista de Força e Luz
EEB – Empresa Elétrica Bragantina S/A.
Eletropaulo – Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo S/A

Fonte: Elaboração própria (2017) com base nos dados fornecidos pela SGT ANEEL.

Equação 7 – Cálculo da porcentagem mensal referente aos impostos da eletricidade

$$I_e = \frac{R_E - R_D}{R_E - R_D - \text{Pis_Pasep_Cofins} - \text{ICMS}} - 1$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

I_e	= porcentagem de imposto sobre a eletricidade	(%)
R_E	= receita total arrecadada pela concessionária	(R\$)
R_D	= ônus adicionado por determinada indústria exceder a demanda estabelecida	(R\$)
Pis Pasep Cofins e ICMS	= impostos governamentais	(R\$)

23. Os dados foram enviados em planilha Excel diretamente para a coordenação técnica do Projeto pelo Superintendente de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética, Máximo Luiz Pompermayer.

A Equação 7 foi calculada para obter os valores mensais para cada concessionária e, em seguida, foi realizada a média dos valores para todas as concessionárias no ano de 2013, que é o ano base deste estudo. O resultado médio de 24% indica o valor que é acrescido de impostos ao preço da geração da energia elétrica. Os preços finais de compra e venda são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Projeção dos preços de compra e venda da eletricidade (MACTool)

Ano	Preços da energia oriunda de leilões	
	Preço de geração	Preço para o consumidor final
	(US\$/MWh)	
2014	44,09	54,70
2015	48,65	60,35
2016	53,67	66,59
2017	59,22	73,47
2018	65,33	81,06
2019	72,08	89,43
2020	79,53	98,67
2021	87,74	108,86
2022	96,80	120,10
2023	106,80	132,51
2024	117,84	146,20
2025	130,01	161,30
2026	143,44	177,96
2027	158,25	196,34
2028	174,60	216,62
2029	192,63	238,99
2030	212,53	263,68

Fonte: Elaboração própria com base na análise MACTool.

SÉRIES DE PREÇOS DA ENERGIA

Na MACTool, os preços de todos os energéticos podem ser obtidos para qualquer ano por meio de um fator de comparação entre o preço do energético e o preço do petróleo, ou podem ser incluídos independentemente do petróleo, como

preços adicionais. A opção do fator de comparação é reforçada pelo fato de que qualquer *energy carrier*²⁴ pode ter um substituto produzido a partir do petróleo. Sendo assim, a série de preços do petróleo foi utilizada como referência para a determinação dos preços dos demais energéticos.

Com o objetivo de padronização, foi determinada inicialmente uma relação entre os preços de todos os combustíveis e o preço do barril de petróleo *Brent* (preço do petróleo bruto). Estes fatores, associados às projeções no preço do *Brent*, foram utilizados para estimar o preço dos combustíveis no futuro. Apesar da eletricidade também ser um *energy carrier*, optou-se por fazer uma análise a parte por conta da estrutura da ferramenta. Portanto, os preços da eletricidade não estão diretamente relacionados²⁵ à projeção do preço do petróleo.

PREÇO DO PETRÓLEO BRENT

Para projetar o preço do barril do petróleo foi utilizado o *Brent* apresentado em dólar por barril, em vez do preço do Oeste do Texas (*West Texas Intermediate* – WTI), sugerido na MACTool.

De acordo com estudo divulgado pelo *U.S. Energy Information Administration* do *U.S. Department of Energy* (EIA, 2014), o preço do barril de petróleo *Brent* é uma referência internacional e mais relevante do que o preço do WTI, uma referência nacional do mercado americano, para determinar os preços dos derivados de petróleo. A gasolina é uma *commodity* negociada globalmente e seus preços são altamente correlacionados entre os mercados à vista globais. Apesar de o presente estudo focar o Estado de São Paulo, acredita-se que a mesma consideração é válida para o mercado nacional e estadual.

O *Brent* e WTI são dois adjetivos que normalmente acompanham a cotação do petróleo.

24. Fonte de energia.

25. No caso das medidas de geração/conservação de eletricidade, o preço do gás natural compõe o custo de energia para geração elétrica e está, portanto, indiretamente relacionado ao preço da energia elétrica.

Elas indicam a origem do óleo e o mercado onde ele é negociado. O petróleo *Brent* possui esse nome porque era extraído de uma plataforma da Shell chamada *Brent*. Contudo, *Brent*, hoje em dia, designa todo o petróleo extraído no Mar do Norte e comercializado na Bolsa de Londres. A cotação *Brent* é referência para o mercado europeu e asiático. Já o petróleo WTI provém do Texas, a principal região petrolífera dos Estados Unidos. O óleo WTI é aquele vendido pelos comerciantes do *West Texas*, sendo negociado na Bolsa de Nova Iorque (WOLFFENBÜTTEL, 2005).

Os valores utilizados para as projeções do Petróleo *Brent* foram retirados do relatório do panorama energético anual publicado em abril de 2014 pelo U.S. Energy Information Administration (EIA, 2014a). Tais valores foram compilados na Tabela 23.

Os dados do *Brent* foram apresentados na Tabela 23 para os anos 2011, 2012, 2020, 2025 e 2030 e, realizou-se uma interpolação, para a obtenção dos valores ano a ano, conforme descrito genericamente pela Equação 8:

Tabela 23 – Projeções do *Brent* para o período de 2011 a 2030

Preços (2012) (US\$/unidade)	2011	2012	2020	2025	2030
Petróleo <i>Brent</i>	113,24	111,65	96,57	108,99	118,99

Fonte: EIA (2014a).

Equação 8 – Cálculo do preço do petróleo *Brent* (2014–2030)

$$B_t = B_{t-1} + [(B_{tf} - B_{t0})/p]$$

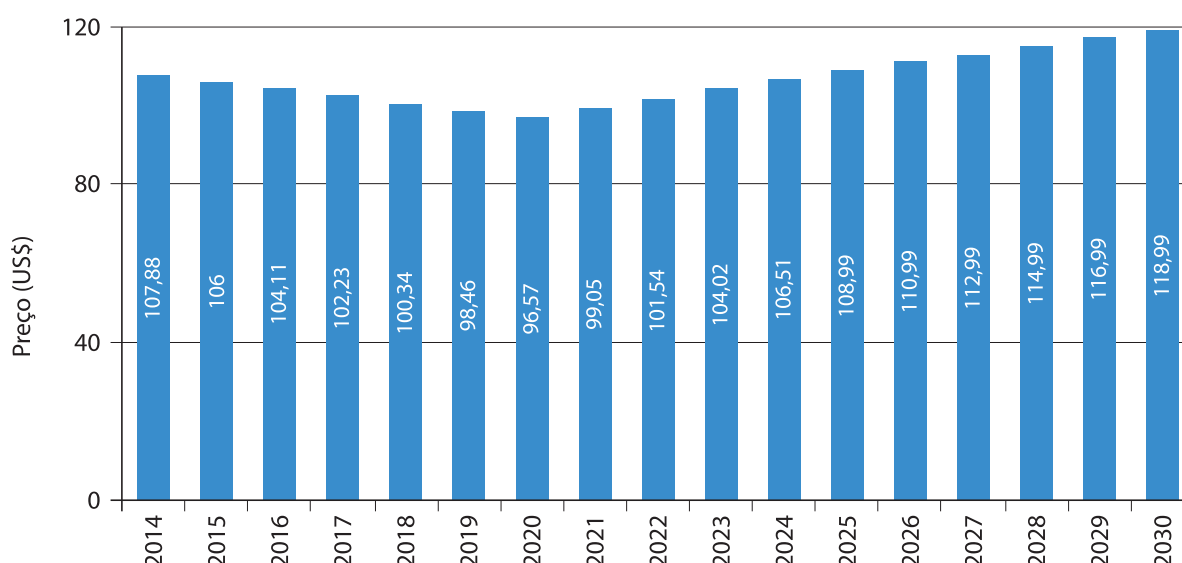
Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

t	= ano de interesse	(ano)
B	= preço do <i>Brent</i>	(US\$/barril)
B _{tf}	= preço do <i>Brent</i> no ano final	(US\$/barril)
B _{t0}	= preço do <i>Brent</i> no ano inicial	(US\$/barril)
p	= período: ano final – ano inicial	(ano)

Após aplicar a interpolação para cada trecho (2013–2019; 2021–2024; e 2026–2030), obtiveram-se os seguintes valores projetados para o *Brent* (Gráfico 17).

Gráfico 17 – Projeção anual do *Brent* no período de 2014 a 2030



Fonte: Elaboração própria com base na Tabela 23 e na Equação 7.

Nota: Os anos de 2020, 2025 e 2030 são dados. Os demais são projeções.

PREÇO DO COQUE DE PETRÓLEO

Apesar de a MACTool só permitir o cálculo automático do preço do coque de carvão mineral a partir do preço do petróleo, também foi calculado um fator de equivalência para o CVP, pois é este o combustível utilizado nos setores como o de cal e o químico. Os dados primários foram retirados do AliceWeb (BRASIL, 2016), uma base de dados com informações do comércio exterior, mediante cadastro gratuito.

Os dados estão apresentados como o valor total pago na importação do produto (CVP, em dólares) e a quantidade total do produto (em quilos) importada em um período selecionado. Foram realizadas médias anuais de 2004 a 2013. A Equação 9 foi utilizada para a conversão da base de dados para dólares por tonelada de petróleo equivalente (US\$/tep).

Equação 9 – Preço do coque de petróleo

$$P_f = \frac{P}{Q} * \frac{1}{C} * F$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

P_f = preço final	(US\$/tep)
P = preço total da importação do CVP no ano	(US\$)
Q = quantidade total da importação do CVP no ano	(kg)
C = poder calorífico do CVP	8.500 (kcal/kg) – (EPE, 2014)
F = fator de conversão de kcal para tep	10^7 (kcal/tep) – (EPE, 2014)

Os preços finais do CVP, que foram utilizados para calcular o fator de equivalência, estão presentes na Tabela 24.

Os preços da Tabela 24 foram utilizados para calcular o fator de equivalência em relação ao *Brent* de acordo com a Equação 12.

Tabela 24 – Médias anuais do preço do coque de petróleo

Ano	Preço
	(US\$/tep)
2004	21,67
2005	34,07
2006	48,33
2007	69,15
2008	106,83
2009	63,14
2010	117,35
2011	166,67
2012	113,86
2013	108,82

Fonte: Elaboração própria (2017) com base em BRASIL (2016) e na Equação 8.

PREÇO DOS PELLETS

Os *pellets* de madeira são biocombustíveis compostos por grânulos de madeira prensada a partir de resíduos como serragem ou maravalha. O preço dos *pellets* foi retirado da base de dados AliceWeb (BRASIL, 2016), que apresenta esta informação a partir de 2012. Visando a padronização, a conversão dos dados primários para a unidade US\$/tep foi realizada por meio da Equação 10.

Equação 10 – Preço do *pellet* de madeira

$$P_f = \frac{P}{Q} * \frac{1}{C} * F$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

P_f = preço final	(US\$/tep)
P = preço total da importação de <i>pellets</i> no ano em dólares sem frete marítimo	(US\$/FOB)
Q = quantidade total da importação de <i>pellets</i> no ano	(kg)
C = poder calorífico do <i>pellet</i>	16,91 (MJ/kg)(1) (GARCIA; CARASCHI; VENTORIM, 2013)
F = fator de conversão de MJ para tep	$4,868 \times 10^3$ (MJ/tep) (EPE, 2014)

(1) Esta é a média dos valores do poder calorífico inferior (PCI) apresentados pela referência (GARCIA; CARASCHI; VENTORIM, 2013).

A partir da Equação 10, constatou-se que os preços dos *pellets* em 2012 e 2013 foram, respectivamente, US\$ 156,09/tep e US\$ 146,67/tep. Estes preços foram utilizados para calcular o fator de equivalência em relação ao *Brent* de acordo com a Equação 12.

PREÇO DO COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO

O CDR é o combustível resultante do processamento de resíduos que podem ser de origem urbana (RSU), industrial ou agrícola. O preço foi baseado em um projeto de MDL que propôs a substituição parcial de combustíveis fósseis por alternativos, dentre eles o CDR, em uma planta de cimento na Arábia (UNFCCC, 2012). O preço equivalente a 400 libras egípcias (EGP) foi convertido conforme a Equação 11.

Equação 11 – Preço do combustível derivado de resíduos

$$P_f = \frac{P}{T} * \frac{F}{C}$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

P_f	= preço final	(US\$/tep)
P	= preço do CDR adotado no Projeto de MDL	400 (EGP/t) (UNFCCC, 2012)
T	= taxa de câmbio do ano de 2012	6,04 (EGP/US\$) (UNFCCC, 2012)
C	= poder calorífico do CDR	14,349 (GJ/t) (UNFCCC, 2012)
F	= fator de conversão de GJ para tep	41,868 (GJ/tep) (EPE, 2014)

Após a aplicação da fórmula, constatou-se que o preço do CDR em 2013 foi de US\$ 193,23/

tep. Este preço foi utilizado para calcular o fator de equivalência em relação ao *Brent* de acordo com a Equação 12.

PREÇO DA ENERGIA CALCULADO COMO UMA PROPORÇÃO FIXA DO PREÇO DO BRENT

Para que fosse possível a agregação de todas as medidas de mitigação dos vários setores em uma única curva, foi preciso estabelecer consistência com relação aos preços dos combustíveis considerados ao longo do período analisado para que fossem os mesmos para todos os cálculos. Desta forma, determinou-se um fator de correlação para cada *energy carrier* com o preço do petróleo.

O objetivo deste fator foi obter a correlação entre preço do *Brent* em dólares por barril de petróleo bruto (US\$/bep²⁶) e o preço corrente da energia (US\$/bep ou US\$/tep²⁷). A maioria dos preços de energia na MACTool estão em US\$/tep.

A série histórica de preços do *Brent* (preço do petróleo bruto, em US\$/barril) foi retirada do site do *U.S. Energy Information Administration* (EIA, 2014b). Correspondem ao “*Europe Brent Spot Price FOB*”, cujos dados foram disponibilizados anualmente, no período de 1987 a 2013.

Os Preços Correntes de Fontes de Energia (apresentados em US\$/bep) foram obtidos da Tabela 7.10 do BEN (EPE, 2014). Os fatores de conversão foram igualmente obtidos do Balanço Energético (EPE, 2014). Logo, foi realizada a conversão, de acordo com a Equação 12.

26. O barril equivalente de petróleo (bep) (ou boe, na sigla em inglês) é uma unidade de medição de energia que equivale à energia contida em um barril de petróleo ou 6,383 GJ. Não deve ser confundida com o “barril”, que é uma unidade de volume (geralmente petróleo cru) igual a 158,98 litros.

27. A tonelada equivalente de petróleo (tep) (ou toe, na sigla em inglês) também é uma unidade de medida de energia, que equivale à energia contida em uma tonelada de petróleo ou 41,8 GJ.

Equação 12 – Cálculo do fator de equivalência

$$R = \frac{P_e * F}{P_b}$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

$R(1)$ = relação de preço do combustível em função do barril de petróleo (bep/tep)

P_e = preço corrente da fonte de energia (US\$/tep)

P_b = preço do *Brent* (US\$/bep)

F = fator de conversão(2) (de bep para tep) 7,0369 (bep/tep)

(1) A unidade do fator de equivalência para a entrada na MACTool depende do combustível, dessa forma, não foi possível padronizar todos os combustíveis para uma mesma unidade, os mesmos foram convertidos em função da demanda da ferramenta.

(2) O fator de conversão só foi utilizado para os preços retirados do BEN (EPE, 2014) que são apresentados em US\$/bep, para os demais combustíveis, que provém de outras fontes, não se utilizou este fator, pois os preços foram convertidos diretamente para US\$/tep.

FATOR DE EQUIVALÊNCIA DOS COMBUSTÍVEIS

O fator de equivalência foi calculado anualmente utilizando-se a Equação 12. Para calcular o fator de equivalência médio, foi tomado um período de 10 anos para cada combustível, esse período variou conforme a disponibilidade de dados da série histórica. A média dos valores encontrados neste período para cada combustível foi calculada e em seguida adicionada à MACTool.

Por fim, a MACTool empregou o fator de equivalência médio obtido na Tabela 25 e os preços do *Brent*, extrapolados no Gráfico 17 para projetar os preços dos combustíveis até 2030 de acordo com a Equação 13.

Equação 13 – Preço do combustível em função do *Brent*

$$P_{comb} = P_{Brent,x} * R_{comb}$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

P_{comb} = preço do combustível em função do *Brent* (US\$/tep)

P_{Brent} = preço do *Brent* no ano x (US\$/bep)

R_{comb} = fator de equivalência do combustível (bep/tep)

Tabela 25 – Fatores de equivalência dos combustíveis em relação ao *Brent*

Ano	CVP	Pellets	CDR
	(bep/bep)		
2004	0,57	sd	sd
2005	0,62	sd	sd
2006	0,74	sd	sd
2007	0,95	sd	sd
2008	1,10	sd	sd
2009	1,02	sd	sd
2010	1,47	sd	sd
2011	1,5	sd	sd
2012	1,02	1,40	sd
2013	1,00	1,35	1,78
Média	1,00	1,37	1,78

Fonte: Elaboração própria com base na Tabela 23 e Tabela 24

Nota: sd = sem dados disponíveis para o período.

Estes preços, apresentados na Tabela 26, e não foram utilizados pela ferramenta em nenhum cálculo programado, sendo empregados apenas como uma base de dados, para que os

Tabela 26 – Projeção dos preços dos combustíveis 2014 a 2030

Ano	Petróleo <i>Brent</i>	CVP	Pellets de madeira	CDR
	(US\$/GJ)			
2014	17,63	2,58	3,53	192,03
2015	17,32	2,53	3,47	188,67
2016	17,01	2,49	3,41	185,32
2017	16,71	2,44	3,34	181,96
2018	16,40	2,40	3,28	178,61
2019	16,09	2,35	3,22	175,25
2020	15,78	2,31	3,16	171,89
2021	16,19	2,37	3,24	176,32
2022	16,59	2,43	3,32	180,74
2023	17,00	2,48	3,40	185,16
2024	17,33	2,54	3,49	189,58
2025	17,81	2,60	3,57	194,00
2026	18,14	2,65	3,63	197,56
2027	18,46	2,70	3,70	201,12
2028	18,79	2,75	3,76	204,68
2029	19,12	2,79	3,83	208,24
2030	19,44	2,84	3,89	211,80

Fonte: Elaboração própria (2017) com base na Tabela 25.

consultores utilizassem como referência padronizada em suas análises.

TAXA DE DESCONTO

A taxa de desconto adotada no projeto para o cálculo do MAC foi de 8% a.a.. Este é o mesmo valor adotado no estudo do Banco Mundial, que também utilizou a MACTool (GOUVELLO et al., 2010), pois é o que, geralmente, corresponde ao custo dos empréstimos adotado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES) para o financiamento de projetos.

Também chamada de “taxa de desconto social”, esta taxa é única para todas as medidas de BC, que difere no caso do *Break-Even Carbon Price*, onde aplicamos a taxa de atratividade específica para cada medida.

TAXA DE JUROS DE LONGO PRAZO (TJLP)

A TJLP foi instituída pela Medida Provisória nº 684, de 31/10/1994 e publicada no Diário Oficial da União em 03/1994, sendo definida como o custo básico dos financiamentos concedidos pelo BNDES. Algumas alterações ocorreram através da Medida Provisória nº 1.790, de 29.12.98 e da Medida Provisória nº 1.921, de 30/09/1999, posteriormente convertidas na Lei nº 10.183, de 12/02/2001 (BNDES, 2016).

A TJLP apresentada pelo BNDES (2011) tem período de vigência de um trimestre, sendo expressa em termos anuais, e é calculada a partir dos seguintes parâmetros:

- A meta de inflação, calculada proporcionalmente para os doze meses seguintes ao primeiro mês de vigência da taxa, baseada nas metas anuais fixadas pelo Conselho Monetário Nacional (CMN);
- O prêmio de risco, que incorpora uma taxa de juro real internacional e um componente de risco Brasil numa perspectiva de médio e longo prazo.

De acordo com o BNDES (2011) a TJLP é aplicada:

- i) Aos contratos passivos do BNDES junto ao Fundo de Amparo ao Trabalhador (FAT); Fundo de Participação PIS-PASEP; e ao Fundo de Marinha Mercante (FMM);
- ii) Aos contratos ativos do BNDES, com os recursos dos mesmos fundos do item i);
- iii) À remuneração das contas dos participantes do Fundo de Participação PIS-PASEP;
- iv) Outros casos, a critério do Conselho Monetário Nacional (CMN).

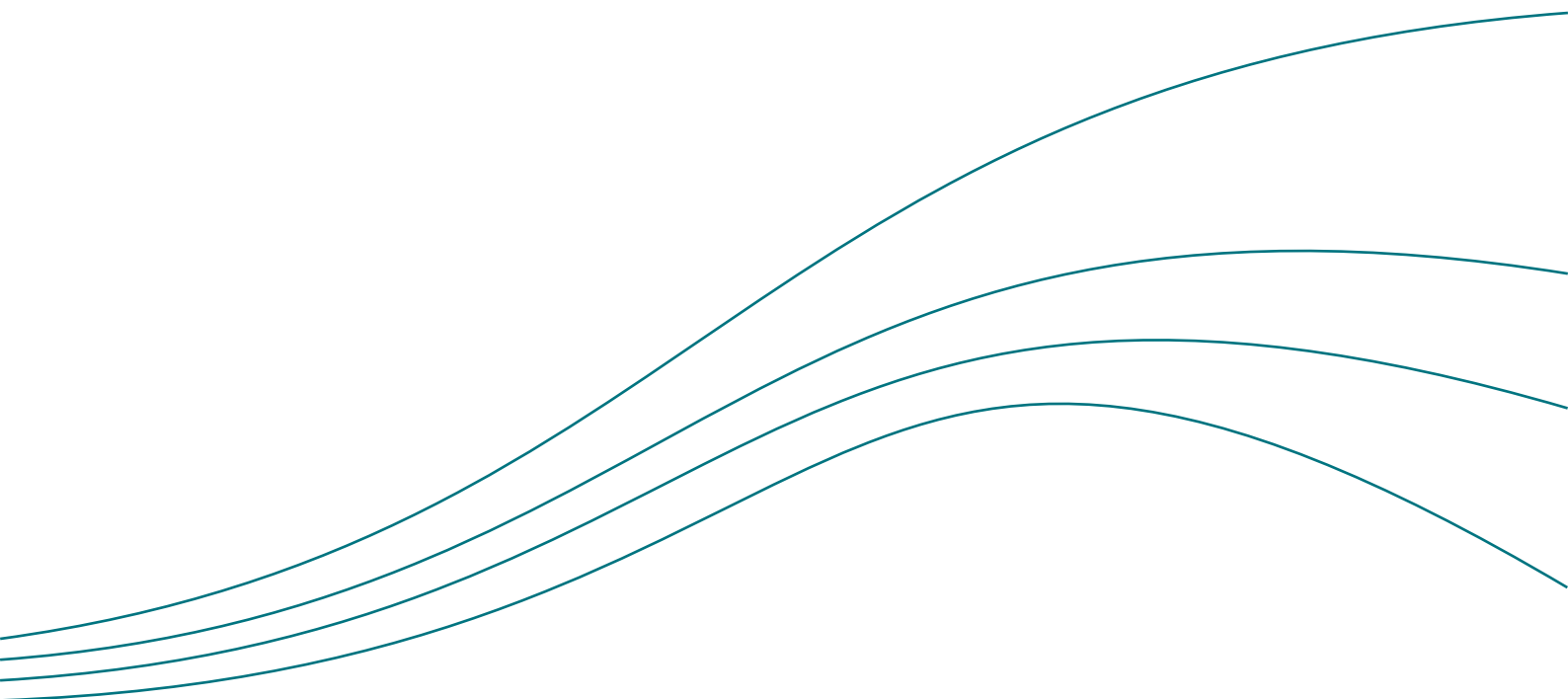
Porém, de acordo com a metodologia de cálculo em relação aos contratos do BNDES atrelados à TJLP incidem também um *spread* básico (que varia de acordo com o estabelecido nas Políticas Operacionais do Sistema BNDES) e um *spread* de risco (que varia de acordo com a classificação de risco do cliente).

Considerando as médias anuais do valor de TJLP para o período de 2006 a 2016, sendo este último até o primeiro semestre, foi obtido um valor médio de 6,19% (BNDES, 2016) e considerando que deve haver a incidência do *spread* básico e do *spread* de risco, estimou-se para emprego no estudo uma taxa de 8% a.a.



Apêndice B

Estudo de baixo carbono
do setor de cimento para
construção civil sob a
ótica do consumo



Neste apêndice, é apresentada uma análise para o setor de cimento considerando os processos e consumo de energia decorrentes do cimento produzido para suprir a demanda estadual, desta forma, inclui-se as emissões de GEE que ocorrem além dos limites territoriais do Estado de São Paulo. Além do consumo de energia e emissões, são apresentadas as premissas utilizadas na construção dos cenários e os custos adotados para determinar o MAC e o BECP, avaliando as medidas de mitigação de aumento de *filler*, substituição de combustível fóssil por CDR e *pellets* sobre o total de cimento consumido, e incluindo três novas medidas para a construção civil: aumento da participação do concreto usinado, adição de misturador para fabricação de concreto e aumento da participação da argamassa industrializada.

CIMENTO – CENÁRIO DE REFERÊNCIA

A produção de cimento no Estado de São Paulo não é suficiente para suprir sua demanda. O estado importa de outras regiões, além do cimento, o clínquer, que passa por processo de moagem e adições nas indústrias cimenteiras localizadas no estado. A demanda de cimento de São Paulo deve aumentar acima de seu potencial de incremento de produção. Assim, uma parte do consumo energético e emissões de CO₂ da produção de cimento para consumo em São Paulo fica alocada fora de seus limites geopolíticos.

A seguir apresenta-se o cenário de referência do setor de cimento considerando os impactos

de consumo de energia e emissão de CO₂ de todo o cimento que é consumido por São Paulo, considerando as etapas da produção que ocorrem dentro e fora dos limites geopolíticos do estado.

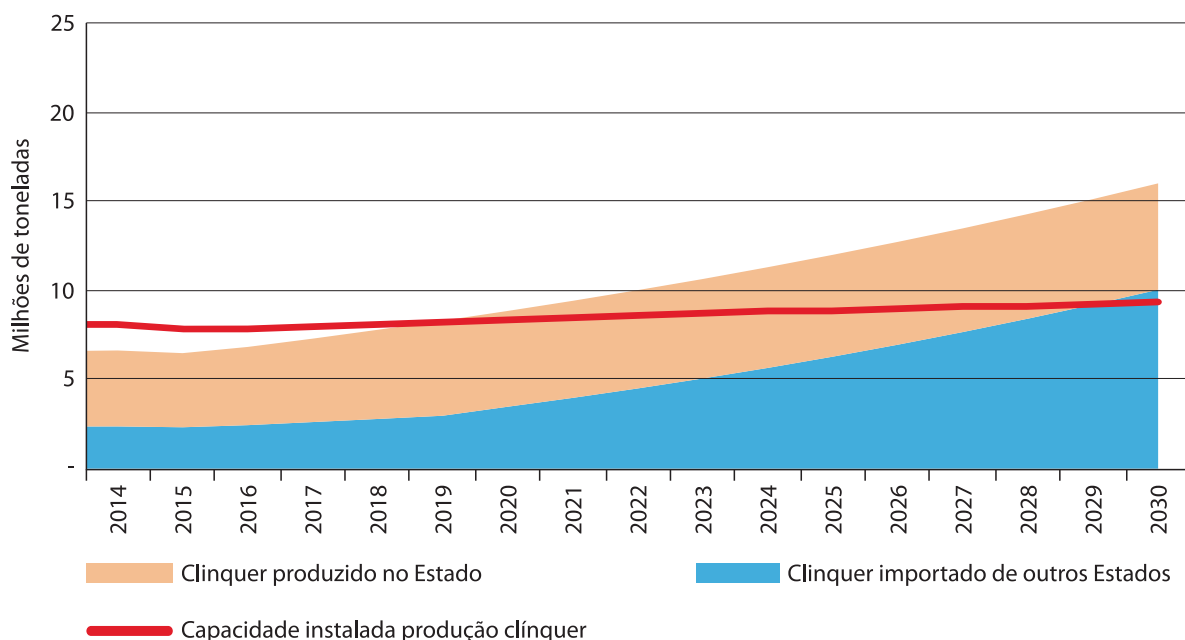
Produção e consumo de cimento

De acordo com o Gráfico 2 observa-se que a produção de cimento em 2013 correspondia a, cerca de, 66% de todo o cimento consumido pelo estado, evidenciando uma necessidade de importação de aproximadamente 5 milhões de toneladas.

Como já mencionado, parte da composição do cimento se refere ao clínquer, o principal responsável pelas emissões no processo de descarbonatação. Como é possível observar no Gráfico 18, em 2014, ano de início da análise, o estado importava cerca de 36% de todo o clínquer consumido para produção de cimento dentro dos limites do estado.

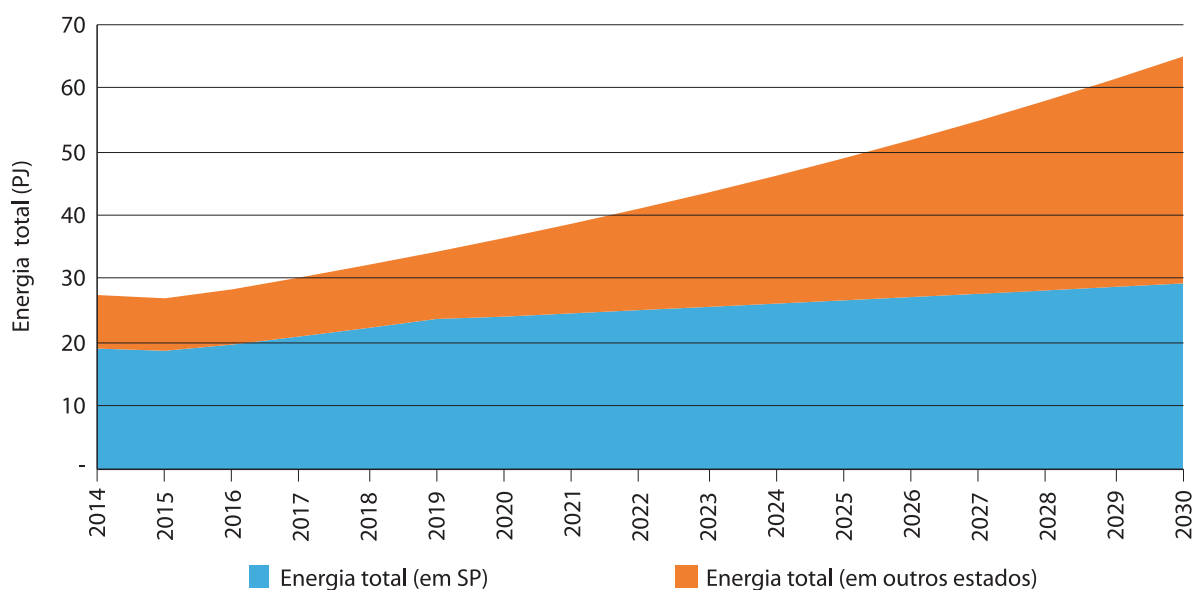
O Gráfico 19 apresenta o consumo de energia, térmica e elétrica, para a produção demandada de cimento do Estado de São Paulo, incluindo as consumidas dentro e fora dos limites geopolíticos. Observa-se que em 2014, o maior consumo de energia ocorre dentro dos limites territoriais mas a expectativa é que em 2030 a participação percentual de outros estados neste consumo seja superior à estadual. Em 2014 a participação da energia proveniente de outros estados representa cerca de 31%, mas a perspectiva é que futuramente, em 2030, a mesma seja responsável por mais de 55%.

Gráfico 18 – Projeção da produção de clínquer segundo rota, considerado apenas clínquer consumido na produção de cimento ocorrida dentro dos limites do estado



Fonte: Adaptado de SNIC (2014a), SAUNDERS (2014), SNIC (2014b) e CETESB (2015).

Gráfico 19 – Consumo total de energia (térmica e elétrica) para produção do cimento do Estado de São Paulo, somadas as consumidas dentro e fora dos limites geopolíticos do estado



Fonte: Elaboração própria, baseado em dados do SNIC (2014a), WBCSD (2013), Cerqueira (2014), MME (2010a).

No Gráfico 20 é apresentado o consumo total de energia, térmica e elétrica, para a produção do cimento de São Paulo, somadas as consumidas dentro e fora dos limites geopolíticos do estado, por rota de produção.

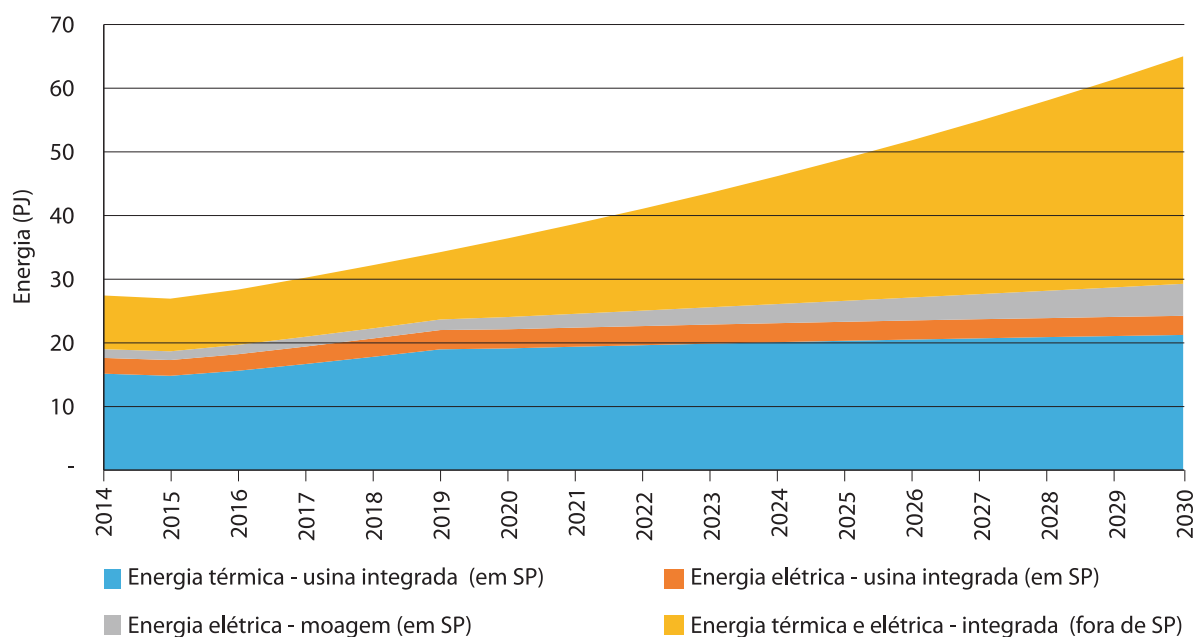
CIMENTO – EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

O Gráfico 21 apresenta as emissões da produção de cimento do Estado de São Paulo geradas

dentro e fora dos limites geopolíticos. Em 2014, as emissões que ocorriam no estado eram correspondentes à 65%, mas em 2030 a perspectiva é que apenas 39% das emissões decorrentes desta demanda ocorram no limite do estado.

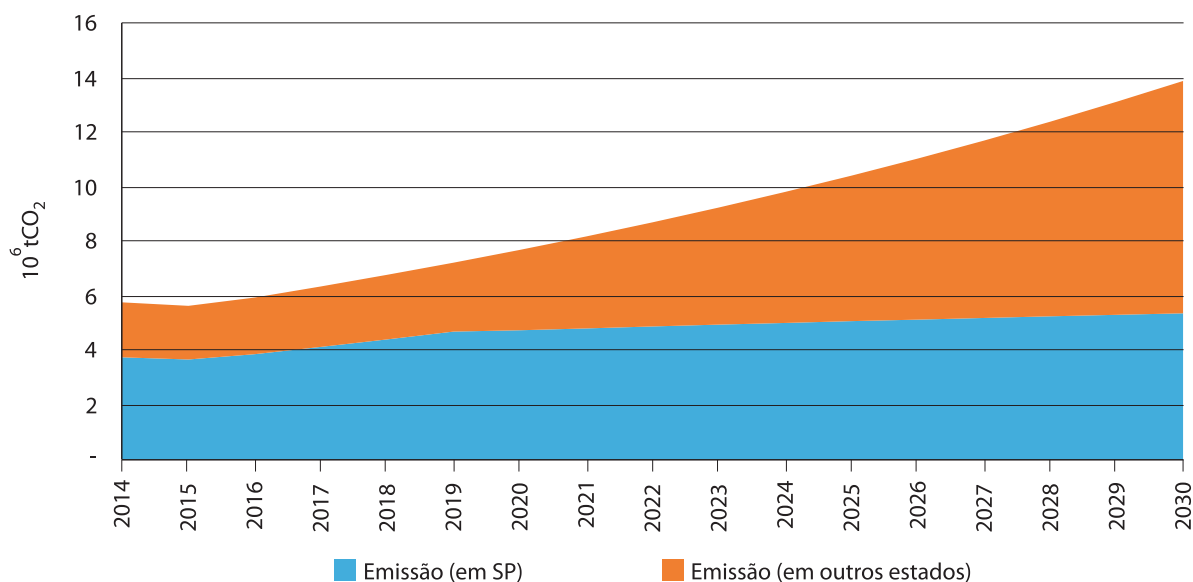
No Gráfico 22 são apresentadas as emissões totais da produção de cimento no Estado de São Paulo, incluindo as emissões geradas fora dos limites geopolíticos, segregadas em processo, consumo de combustível fóssil e consumo de energia elétrica.

Gráfico 20 – Consumo total de energia (térmica e elétrica) para produção do cimento de São Paulo, somadas as consumidas dentro e fora dos limites geopolíticos do estado, por rota de produção



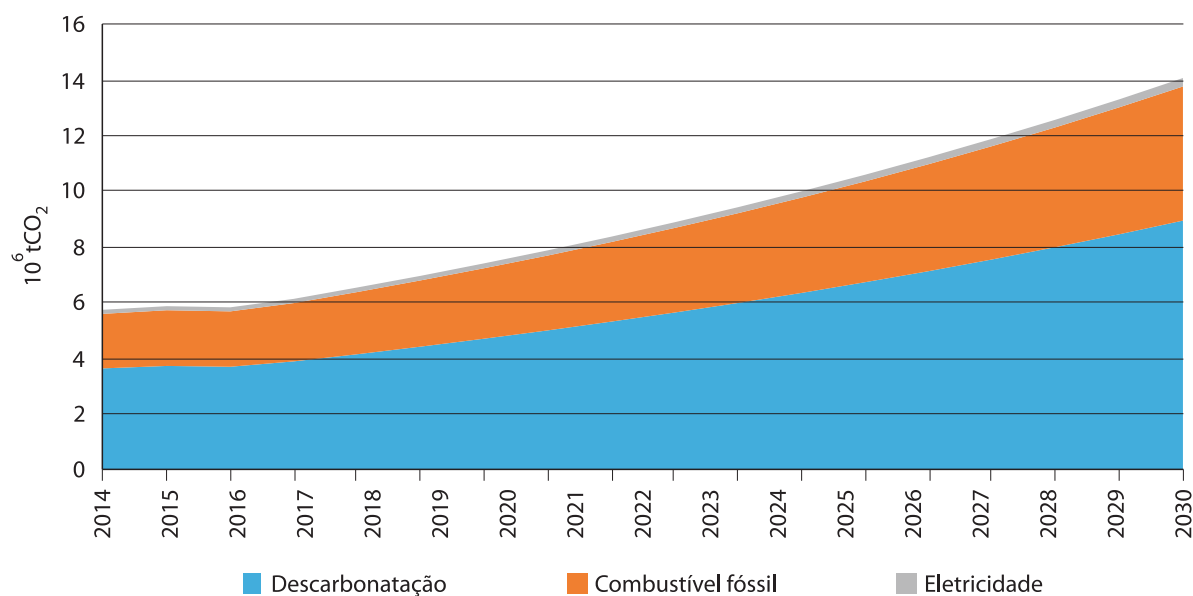
Fonte: Elaboração própria, baseado em dados do SNIC (2014a), WBCSD (2013), Cerqueira (2014) e MME (2010a).

Gráfico 21 – Emissão total da produção de cimento do Estado de São Paulo, geradas dentro e fora dos limites geopolíticos



Fonte: Elaboração própria, baseada em dados do MME (2014), MME (2013), GHG Protocol e FGV (2013), SNIC (2014b), WBCSD (2013), Cerqueira (2014) e Saunders (2014).

Gráfico 22 – Emissão total da produção de cimento do Estado de São Paulo, somadas as emissões geradas fora dos limites geopolíticos por fonte de emissão



Fonte: Elaboração própria, baseada em dados do MME (2014), MME (2013), GHG Protocol e FGV (2013), SNIC (2014a), WBCSD (2013), Cerqueira (2014).

No Gráfico 23 é apresentada a emissão total da produção de cimento de São Paulo, somadas as ocorridas dentro e fora dos limites geopolíticos do estado, por rota de produção. Em 2014 a participação das emissões que ocorrem fora do estado são de 35%, mas a perspectiva é que futuramente, em 2030, a mesma seja responsável por mais de 60%.

CONSTRUÇÃO CIVIL – CENÁRIO DE REFERÊNCIA

Consumo de cimento para concreto e argamassa

O concreto é uma mistura de água, cimento e agregados (pedra e areia), podendo ter adições ou não. Um fator de caracterização do concreto é a relação entre água e cimento. Já a argamassa

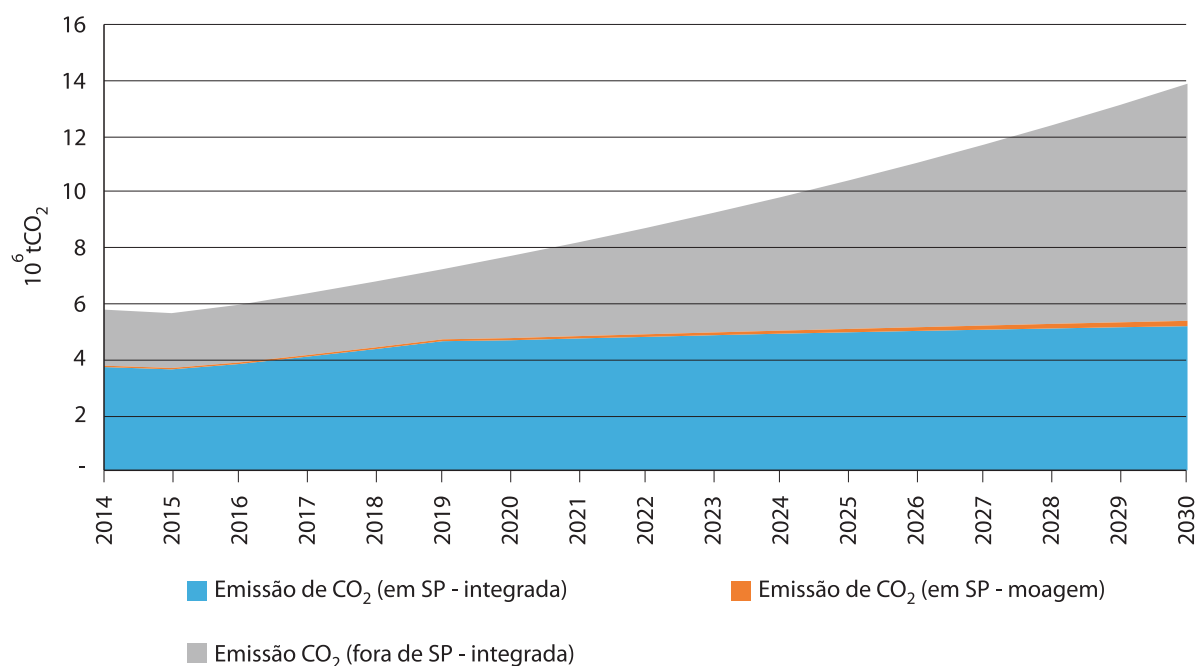
é uma mistura de água com ligantes (cimento e cal) e agregados miúdos. A argamassa pode ser feita sem cimento para casos específicos

A fração do cimento consumido para a produção de concreto e argamassa mostrou-se com variações durante todo o período de análise. Em 2014 era 40% para cimento e para a argamassa, mas em 2030 considerou-se 46% para concreto e 34% para argamassa.

Consumo de concreto e argamassa

Para o estudo da construção civil, foi adotada a mesma taxa de crescimento considerada para o cenário de produção do cimento, 5% a.a. a partir de 2016, uma vez que este é o principal componente do concreto e da argamassa. Para os cenários do consumo de concreto, com o crescimento econômico, foi adotado que as empresas de concretagem devem aumentar a fração do

Gráfico 23 – Emissão total da produção de cimento do Estado de São Paulo, somadas as emissões geradas fora dos limites geopolíticos do estado, por rota de produção



Fonte: Elaboração própria, baseada em dados do MME (2014), MME (2013), GHG Protocol e FGV (2013), SNIC (2014b), WBCSD (2013), Cerqueira (2014), Saunders (2014) e CETESB (2015).

concreto industrializado, diminuindo a parcela de mercado do concreto feito em obra. Assim, estima-se que haverá um crescimento do volume de concreto industrializado sobre o mercado de concreto produzido em obra de cerca de 8% a.a. até 2030. No caso do consumo da argamassa, acredita-se que com incentivo fiscal, diminuição de Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) e Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) seria possível aumentar o *market share*²⁸ da argamassa industrializada para 80% em 2030, reduzindo na mesma proporção o consumo da argamassa feita em obra.

Composição dos concretos

Considerou-se que o consumo de cimento por metro cúbico de concreto foi de 300 kg/m³ para o concreto industrializado e de 375 kg/m³ para o concreto feito em obra. Esses valores podem variar nos cenários de baixo carbono. A energia e emissão de CO₂ dos concretos consideram os dados referentes ao cimento.

Composição das argamassas

Assim como o cimento, a cal é um ligante muito utilizado na produção das argamassas. A quantidade de cal hidratada produzida no Brasil em 2013 foi de 2 milhões de toneladas. Negligenciando a parte da cal virgem que possa vir a se transformar em cal hidratada para construção e, considerando, que os estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná concentram boa parte da produção e consumo de cal hidratada no

Brasil, propôs-se assumir que 33% da cal hidratada produzida no Brasil são consumidos em São Paulo (esta fração é de 20% para o cimento). Assumiu-se que após 2013 a produção de cal cresce no mesmo ritmo do cimento.

Como 40% do cimento é destinado à confecção de argamassas, de 3,6 a 6 Mt em 2013, a proporção entre cal hidratada e cimento variou entre 0,17 em 2004 para 0,1 em 2011, e se estabiliza em torno deste valor após este ano. Esta queda pode ser explicada pelo aumento do *market share* das construtoras no período, que atingiu estabilidade após 2011. Esta proporção varia de 0,6 a 1,1 em argamassas de cimento, cal e areia misturadas em obra nas formulações recomendadas em obra.

No entanto, sabe-se que boa parte das argamassas formuladas em obra não utiliza cal, que é substituída por “filitos”, cimento puro ou aditivos incorporadores de ar. No entanto, esta prática não está documentada. Por se tratar de mercado informal, não se conhece a fração do mercado que cada prática ocupa.

Os dados coletados no mercado mostram que a argamassa industrializada possui um consumo médio de cal de 239 kg/m³. Esta argamassa tem 20% de ar incorporado (em média) e um teor de água ligeiramente inferior. Sabe-se que nem todas as argamassas industrializadas tem cal. As que adotam, tipicamente terão valores entre 1% a 2% da massa de sólidos, algo com 14 a 30 kg/m³. Pode-se assumir uma quantidade de finos de 253 kg/m³ na argamassa industrializada. Corrigindo para a argamassa com 3% de ar incorporado e negligenciando diferenças no teor de água, o teor de finos seria 290 kg/m³

28. Grau de participação de uma empresa no mercado em termos das vendas de um determinado produto.

(média) em argamassa típica de obra. Uma parcela desconhecida destes finos pode ser de inertes, materiais não normatizados, de desempenho extremamente variável, conhecidos como filitos. Dadas as incertezas, neste estudo o uso destes produtos é negligenciado para o cálculo das emissões de CO₂, principalmente em razão do baixo impacto resultante de seu uso. Ponderando as duas classes de argamassa pela participação no mercado, estima-se um teor de finos médio ponderado de 0,287 t/m³. O volume de

Equação 14 – Cálculo do volume de argamassa do cenário de referência

$$V = \frac{Cim_a + Cal_a}{0,287}$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

V	= volume de argamassa consumido no Estado de São Paulo	(m ³)
Cim_a	= consumo anual de cimento em argamassas	(m ³)
Cal_a	= consumo de cal hidratada em argamassa no Estado de São Paulo	(m ³)

argamassa do cenário de referência pode ser então estimado pela Equação 14.

Assim, para o ano 2013, estima-se uma produção de argamassa total em São Paulo de 23.348 m³. A partir destes dados é possível estimar que a argamassa misturada em obra tem, em média, consumo de cimento de 260 kg/m³ e consumo de cal hidratada de 29 kg/m³ (a partir de 2013). Para argamassa industrializada adotou-se consumos de 230 kg/m³ e 14 kg/m³ para cimento e cal, respectivamente.

O fator de emissão da cal hidratada pode ser retirado do estudo do BNDES (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014). Para a descarboxação, assume-se uma média entre a cal calcítica e a cal dolomítica na faixa do teor máximo da cal CH II, 585 kg/t. Assumindo-se que 60% desta cal recarbonata durante o uso de 50 anos

da argamassa, teremos um fator de emissão 292 kgCO₂/t devido à descarboxação. Para o valor de uso de combustíveis, propõe-se utilizar o valor médio dos valores máximos e mínimos, o que resulta em 617 kgCO₂/t de cal virgem. O valor líquido de CO₂ da cal hidratada das argamassas foi então de 700 kgCO₂/t. As emissões associadas aos aditivos orgânicos das argamassas industrializadas não foram consideradas, assim como a energia de secagem dos agregados, posto que em boa parte os agregados saem secos do processo de britagem.

A energia incorporada na cal considerada para estimativas dos cenários foi igual a 5,4 GJ/t de cal, obtida do estudo do BNDES (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014).

Cimento para concreto

Com base em informações de diversos especialistas, admitiu-se que 40% do cimento consumido em São Paulo é destinado à produção de concreto. Tomando como referência os dados do SNIC (SNIC, 2014a), para estimar a porcentagem de concreto produzido em fábrica considerou-se que todo o cimento destinado a concreteiras e para a produção de pré-fabricados (8.486 mil toneladas) é industrializado, representando 27% do total consumido em 2013 (31.643 mil toneladas), o que resulta em um percentual de 13% feito em obra.

O crescimento do consumo de concreto industrializado foi estimado a partir da interpretação qualitativa de dados do *European Ready Mixed Concrete Organization* (ERMCO, 2014) sobre o consumo médio de cimento para a produção de concreto industrializado na União Europeia (ano 2013). Assumiu-se que o consumo de concreto crescerá 1% a.a. a partir de 2016, atingindo a fração de 46% do cimento consumido no ano 2030. Destes, 31% serão para concreto industrializado e 15% para concreto feito em obra.

A partir do consumo de cimento estimou-se o volume de concreto que será consumido pelo Estado de São Paulo até 2030, pela multiplicação do teor de cimento pela quantidade de cimento consumido por tipo de concreto (Equação 15). O volume de concreto foi um fator constante em todos os cenários, pois indica a demanda do estado no período de análise.

Equação 15 – Cálculo do volume de concreto por tipo de concreto

$$V_{ct} = \left(\frac{Q_{cu}}{T_{cu}} \right) + \left(\frac{Q_{co}}{T_{co}} \right)$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

V_{ct}	= volume total de concreto	(m ³)
T_{cu}	= teor de cimento no concreto industrializado	(t/m ³)
Q_{cu}	= quantidade de cimento para concreto industrializado	(t)
T_{co}	= teor de cimento no concreto feito em obra	(t/m ³)
Q_{co}	= quantidade de cimento para concreto feito em obra	(t)

Cimento para argamassa

Segundo as informações de diversos especialistas, 40% (média) do cimento se destina à produção de argamassas. Destes, 4% é industrializada e 96% feita em obra. Isto significa que a argamassa industrializada hoje consome 2% do cimento. Essa proporção foi mantida para a construção do cenário de referência. Com o aumento do consumo de concreto que deve ocorrer nos próximos anos, acredita-se que o *market share* da argamassa deva diminuir, principalmente devido à substituição de elementos construtivos feitos *in loco* pelos pré-fabricados.

O *market share* da argamassa foi calculado subtraindo-se do total da fração de cimento destinado à produção de argamassas e concretos, a parcela do concreto (Equação 16).

Equação 16 – Cálculo do percentual de cimento destinado a argamassas

$$Pa = Ptca - Pc$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

Pa	= percentual de cimento para argamassa;	(%)
Ptca	= percentual total de cimento destinado a concretos e argamassas, constante em 80% do total de cimento consumido pelo Estado de São Paulo;	(%)
Pc	= percentual de cimento para concreto.	(%)

A quantidade de argamassa demandada, em massa, foi obtida pela multiplicação do percentual do *market share* da argamassa pela quantidade total de cimento consumido. O volume de argamassa demandado foi obtido pela multiplicação do teor médio do consumo de cimento para argamassa pelas quantidades de argamassas demandadas (Equação 17). O teor médio do consumo de cimento para argamassas foi calculado considerando os teores do consumo

Equação 17 – Cálculo do volume de argamassa demandada

$$Va = \frac{Q_{ca}}{T_{mca}}$$

ou

$$Va = \frac{(Pa * Ctc)}{\{(Tao * Pao) + (Tai * Pai)\}}$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

V_a	= volume de argamassa	(m ³)
Q_{ca}	= quantidade (em massa) de cimento para argamassa	(t)
T_{mca}	= teor médio de cimento para argamassa	(t/m ³)
Pa	= percentual de cimento para argamassa	(%)
Ctc	= consumo total de cimento no Estado de São Paulo	(m ³)
Tao	= teor de cimento para argamassa em obra	(t/m ³)
Pao	= percentual (<i>market share</i>) da argamassa em obra	(%)
Tai	= teor de cimento para argamassa industrializada	(t/m ³)
Pai	= percentual (<i>market share</i>) da argamassa industrializada	(%)

de cimento por tipo de argamassa multiplicado pelo *market share* de cada tipo de argamassa.

COLETA DE DADOS

No estudo da construção civil, uma restrição foi a inexistência de dados públicos sobre o consumo de cimento para a produção de argamassas. No caso do concreto, foram encontradas informações publicadas sobre o consumo de cimento por tipo de uso para o Estado de São Paulo (SNIC, 2014a) e sobre esta foi possível estimar o consumo de cimento para a produção de concreto (feito em obra e industrializado).

A deficiência de dados para criação dos cenários foi superada com informações primárias e estimativas levantadas por meio de entrevistas a importantes agentes do mercado e representantes de organizações setoriais²⁹. As empresas e associações contatadas para participar desse estudo com informações sobre os setores do cimento e da construção civil foram: Votorantim Cimentos, Intercement, SINAPROCIM, ABAI, ABRAMAT, ABESC, MC-Bauchemie, Grace, Fives Group, Saint-Gobain, ABCP, ArtSpray, França e Associados, Cyrela e Infibra; especialistas e pesquisadores do setor.

Dados sobre custos

Para a estimativa dos custos nos cenários de referência e de baixo carbono foram realizados diferentes procedimentos. Não foi realizada a projeção dos valores monetários, preços dos insumos e equipamentos adotados nesse estudo

para o período analisado, considerados constantes (sem reajustes), sendo exceção os preços da energia, elétrica e térmica, que foram informados pela equipe técnica desse estudo.

Os valores apresentados na Tabela 27 e na Tabela 28 incluem impostos, pois são preços de mercado. Na Tabela 29 são expostos os custos com insumos para produção do cimento, sendo os valores das matérias-primas levantadas a partir de documento do IEA (IEA, 2008), devido à falta de dados nacionais. Para o calcário, foi considerado o preço de mercado por tonelada de material³⁰ medida conservadora, já que possivelmente o custo é inferior.

Tabela 27 – Valor monetário de mercado dos insumos utilizados para cálculo dos custos nos cenários de referência e de baixo carbono do setor da construção civil.

Item	Unidade	Valor	Fonte
		(US\$)	
Cimento (preço varejo, ensacado)	t	170,62	CBIC (2015)
Cal hidratada	kg	0,14	FDE (2015)
Areia	m ³	34,47	FDE (2015)
Brita	m ³	32,19	FDE (2015)
Filito	kg	0,06	ROMANO (2011)
Aditivo (valor médio)	kg	2,35	Especialistas (1)
Água (tabela tarifária – acima de 50 m ³ /mês)	m ³	6,45	Sabesp (2015)
Filler (valor médio ponderado)	t	51,92	Especialistas (1)

Fonte: Elaboração própria, a partir dos dados referenciados na própria tabela.

(1) As informações primárias obtidas são protegidas por confidencialidade.

29. Os profissionais não são identificados no decorrer do estudo para assegurar a confidencialidade da informação.

30. As informações primárias obtidas são protegidas por confidencialidade.

Tabela 28 – Valor monetário de mercado dos insumos utilizados para cálculo dos custos nos cenários de referência e de baixo carbono do setor do cimento.

Item	Unidade	Valor	Fonte
		(US\$)	
Escória granulada	t	17,50	Especialistas (1)
Gipsita	t	10,19	(DNPM, 2014)
Água (tabela tarifária – acima de 50 m³/mês)	m³	6,45	Sabesp (2015)

Fonte: Elaboração própria, a partir dos dados referenciados na própria tabela.

(1) As informações primárias obtidas são protegidas por confidencialidade,

Tabela 29 – Custos com os insumos utilizados para a estimativa dos custos nos cenários de referência e de baixo carbono do setor do cimento

Item	Unidade	Valor	Fonte
		(US\$)	
Cimento (sem adições)	t	56,34	IEA (2008) e Especialistas (1)
Filler	t	21,72	IEA (2008) e Especialistas (1)
Calcário	t	8,33	Especialistas (1)
Argila	t	4,17	Especialistas (1)
Areia	t	69,45	IEA (2008)
Óxido de ferro	t	69,45	IEA (2008)

Fonte: Elaboração própria, a partir dos dados referenciados na própria tabela.

(1) As informações primárias obtidas são protegidas por confidencialidade.

A fábrica integrada, que é composta com os equipamentos necessários para a produção do clínquer, possui capacidade de produção mínima de 1 milhão de toneladas de cimento por ano e necessita de investimento de

200 a 300 milhões de dólares para implantação (SAUNDERS, 2014; SNIC, 2013). O tempo para seu estabelecimento segundo SNIC, considerando desde o projeto até o início das atividades, varia de 3 a 5 anos (SNIC, 2013). Já a fábrica que compra o clínquer para a produção de cimento, ou seja, realiza apenas a moagem das matérias-primas, necessita de investimento estimado em 35% do investimento para implementação de uma usina integrada (IEA, 2008), aproximadamente 87,5 milhões de dólares, com capacidade instalada máxima de 900 mil toneladas de cimento por ano.

As fábricas integradas atualmente em operação consideradas nesse estudo possuem capacidade de produção de 1,56 milhão de toneladas de cimento por ano cada

Na Tabela 30 são apresentados os investimentos necessários em equipamentos para implantação de uma fábrica de cimento (apenas integrada, fábricas de moagem não foram consideradas), de uma usina de concreto e de uma fábrica de argamassa, tanto para os cenários de referência, quanto para os cenários de baixo carbono.

Para a fábrica de cimento integrada (fabricam o clínquer) foi adotada a capacidade de produção de um 1.000.000 t/ano. Para a central de concreto foi considerada a capacidade de produção de aproximadamente 207.000 m³/ano, estimada a partir de informações cedidas por especialistas³⁰. Para a fábrica de argamassa industrializada, adotando estimativa de especialistas³⁰, a capacidade produtiva adotada foi de 156.000 t/ano.

Tabela 30 – Investimento necessário em equipamentos para adoção das tecnologias dos cenários de referência e de baixo carbono para os setores do cimento e da construção civil.

	Equipamentos		Valor	Fonte
			(US\$)	
CR	Fábrica de cimento (integrada)		250.000.000	(SNIC, 2013)
	Usina de concreto	Central nova (silos, balança, infraestrutura para carregamento)	231.481	Especialistas (1)
		Pá carregadeira (1 máquina)	101.852	
		Caminhões betoneira (20 veículos)	1.851.852	
	Fábrica de argamassa industrializada nova (valor médio entre fábricas com e sem moagem de agregados)		12.268.519	Especialistas (1)
CBC	Fábrica de cimento (integrada) com adição de silo	Fábrica de cimento integrada	250.000.000	Estimativa do consultor (1)
		Silo (02 unidades)	103.704	Fornecedores de equipamentos
	Usina de concreto nova com misturador	Central nova (silos, balança, infraestrutura para carregamento)	231.481	Especialistas (1)
		Pá carregadeira (1 máquina)	101.852	
		Caminhões betoneira (20 veículos)	1.851.852	
		Misturador (1 equipamento)	92.593	
	Usina de concreto existente com misturador	Adaptação da infraestrutura para carregamento da central existente	46.296	Especialistas (1)
		Misturador (1 equipamento)	92.593	
	Usina de concreto nova com diminuição de ligante	Central nova (silos, balança, infraestrutura para carregamento)	231.481	Especialistas (1)
		Pá carregadeira (1 máquina)	101.852	
		Caminhões betoneira (20 veículos)	1.851.852	
		Silos (2 unidades)	103.704	Fornecedores de equipamentos
	Usina de concreto existente com diminuição de ligante	Adaptação da infraestrutura para carregamento da central existente	46.296	Especialistas (1)
		Silos (2 unidades)	103.704	Fornecedores de equipamentos
	Fábrica de argamassa industrializada existente com adição de filler	Silo (1 unidade)	51.852	Fornecedores de equipamentos

Fonte: Valores levantados junto a profissionais do setor e fabricantes de equipamentos, referenciados na própria tabela.

(1) As informações primárias obtidas são protegidas por confidencialidade.

Para o levantamento dos investimentos e custos dos cenários referentes ao setor do cimento, considerou-se que em 2013 a produção de cimento nacional atingiu seu pico produtivo. Com isso, observou-se a necessidade de novas fábricas de cimento já a partir de 2016. Assim, para a estimativa dos investimentos e custos para o setor de cimento foram considerados os custos apenas de fábricas integradas, de modo a suprir a produção de cimento no Estado de São Paulo, mesmo que estas estejam localizadas fora do estado. Por essa razão, não foram consideradas as fábricas de moagem no Estado de São Paulo, as existentes e a necessidade da implantação de novas.

Para o cálculo dos custos de operação foram considerados os consumos de matérias-primas (com base na experiência do consultor e em IEA (2008), água (MACK-VERGARA; JOHN, 2017), energia (eletricidade e combustíveis estimados no estudo), depreciação e manutenção dos equipamentos ao longo dos anos e custos operacionais (IEA, 2008). Os custos com manutenção foram calculados a partir de informações publicadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2003), na falta dessas informações diretamente com o setor.

No caso dos investimentos e custos de operação dos cenários da construção civil,

primeiramente estimou-se a quantidade de usinas de concreto e fábricas de argamassa industrializadas existentes no Estado de São Paulo, uma vez que não há conhecimento do número real para ambos os casos. Para isso, considerou-se que a produção dos dois produtos em 2012 (pico dos últimos anos) correspondeu a aproximadamente 90% da capacidade instalada. A partir daí, estimou-se a necessidade de implantação de novas fábricas de acordo com a demanda necessária. Os custos de operação e manutenção de uma usina de concreto e de uma fábrica de argamassa foram levantados em entrevistas com representantes do setor³¹. Essas informações não são apresentadas para preservar os dados das empresas detentora dos dados.

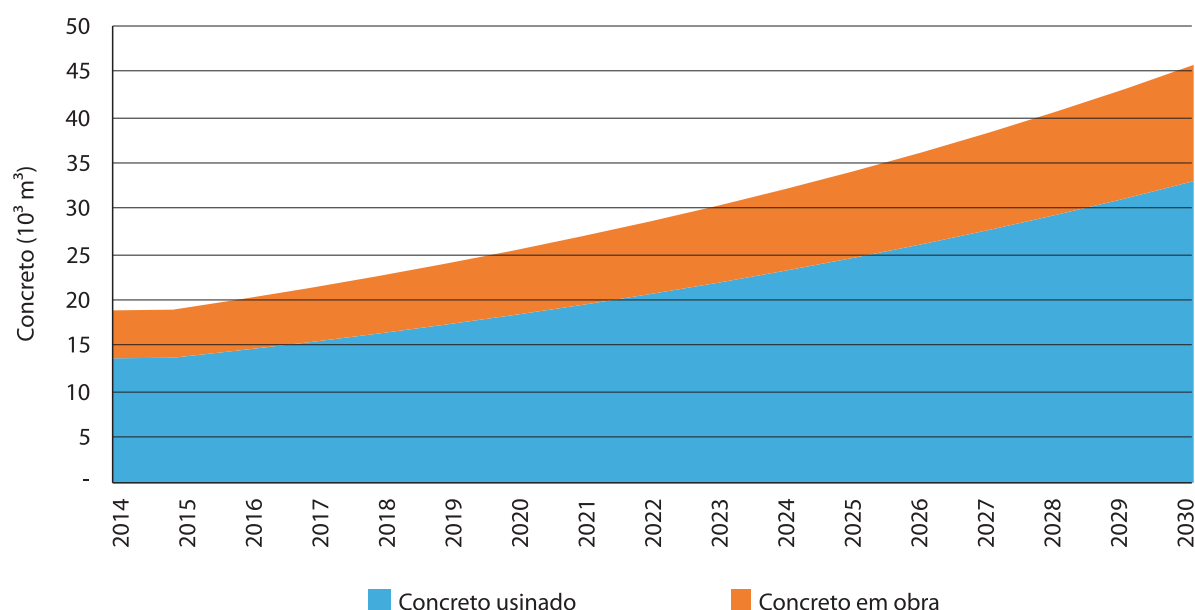
Em relação à taxa de atratividade, a *Benchmark-TIR* do setor da construção para investimentos de baixo carbono também não foi

definida com precisão neste estudo, mas julga-se interessante que a TIR seja superior à praticada para conquista de novos mercados. A partir de discussões com a indústria, os autores propuseram usar entre 20% e 25% de *Benchmark-TIR* para efeitos do presente estudo, que foram considerados semelhantes ou ligeiramente mais elevados do que os retornos anuais típicos da indústria em São Paulo. Para efeitos da ferramenta MACTool, para as medidas de construção civil, adotou-se 22%, que é a média das porcentagens apontadas pelos autores.

RESULTADOS

O Gráfico 24 apresenta a demanda de concreto usinado e feito em obra, em volume, para o Estado de São Paulo.

Gráfico 24 – Estimativa da demanda de concreto, em volume, para o Estado de São Paulo



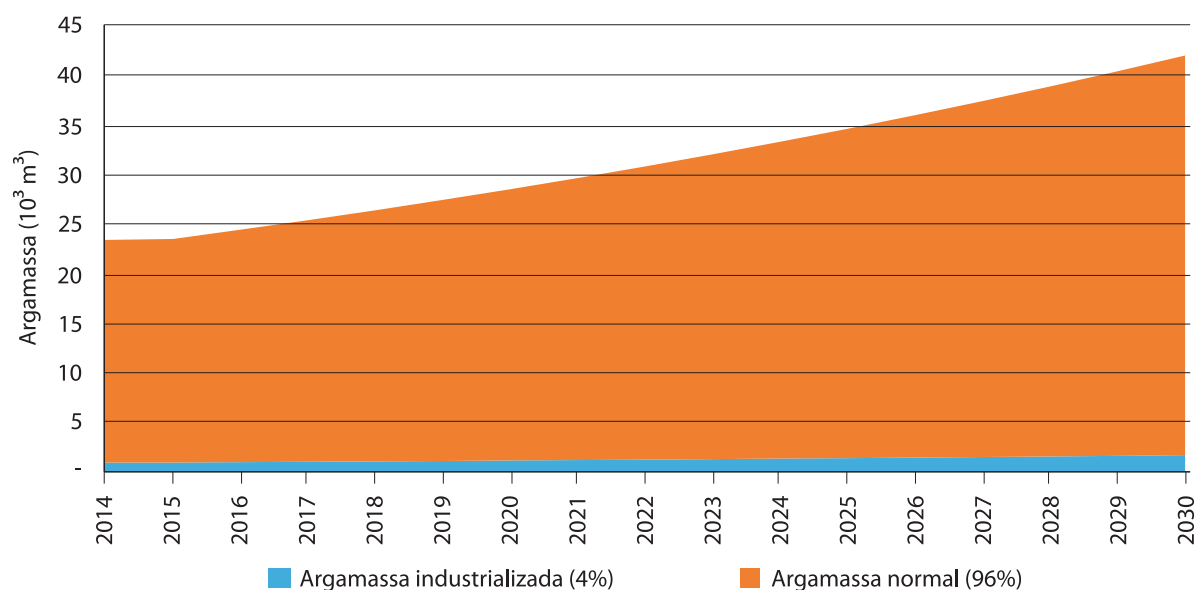
Fonte: Elaboração própria, com base em dados de SNIC (2013, 2014); MME (2010a), especialistas e consultores. As informações primárias obtidas são protegidas por confidencialidade.

31. As informações primárias obtidas são protegidas por confidencialidade.

O Gráfico 25 apresenta a demanda de argamassa, em volume, para o Estado de São Paulo.

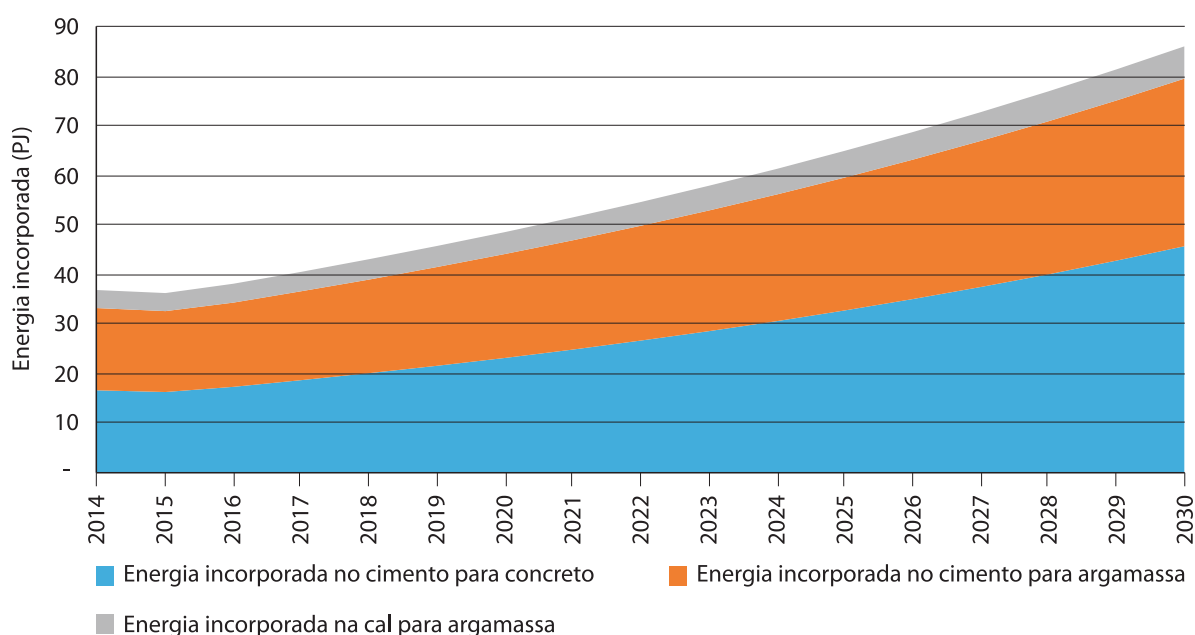
O Gráfico 26 apresenta a energia incorporada no concreto, argamassa e cal para a argamassa no Estado de São Paulo.

Gráfico 25 – Estimativa da demanda de argamassa, em volume, para o Estado de São Paulo



Fonte: Elaboração própria, com base em SNIC (2013, 2014); MME (2010a), especialistas e estimativas dos consultores. As informações primárias obtidas são protegidas por confidencialidade.

Gráfico 26 – Energia incorporada no concreto e argamassa no Estado de São Paulo, com apresentação das parcelas oriundas do cimento e da cal

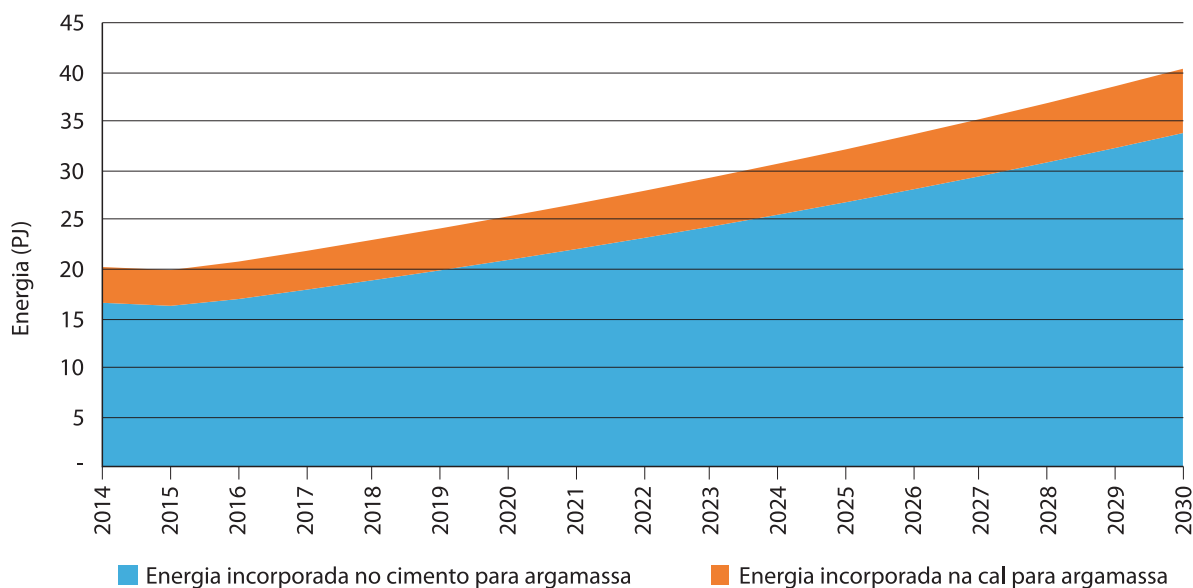


Fonte: Elaboração própria, com base em dados de energia incorporada do (WBCSD, 2013) e do crescimento do consumo de cimento para concreto e argamassa.

O Gráfico 27 apresenta a energia incorporada nos ligantes argamassa utilizados para a produção de argamassa no Estado de São Paulo.

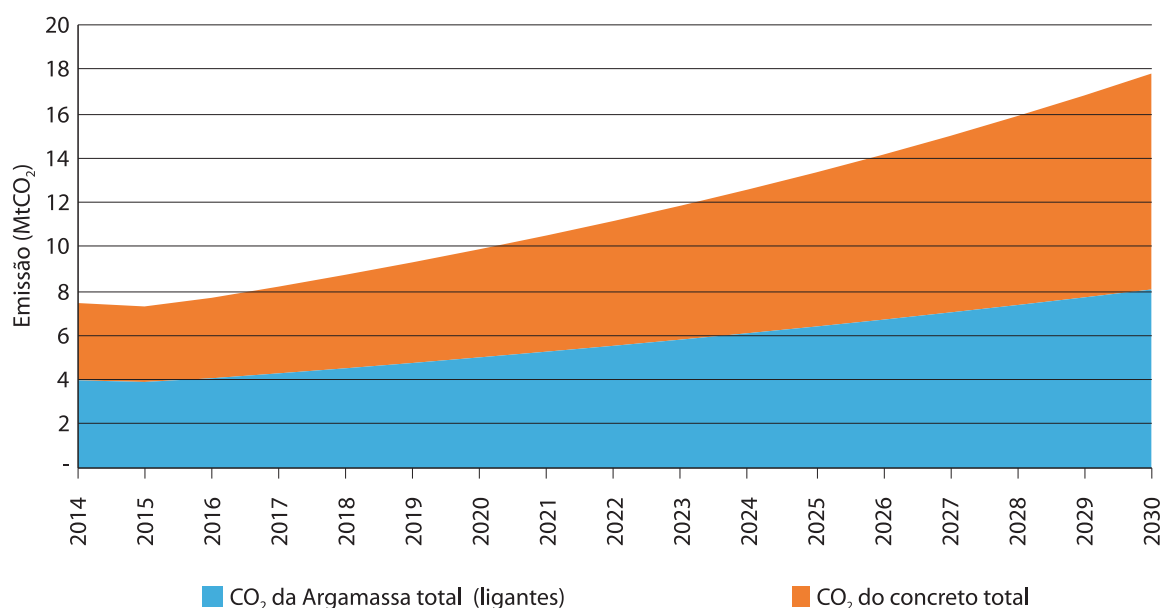
O Gráfico 28 apresenta a projeção das emissões de CO₂ do concreto e argamassa consumidos no Estado de São Paulo.

Gráfico 27 – Energia incorporada nos ligantes utilizados para a produção de argamassa no Estado de São Paulo



Fonte: Elaboração própria, com base em dados de energia incorporada do WBCSD (2013) para cimento, de John, Punhagui e Cincotto (2014) para cal, e no crescimento do consumo de cimento para argamassa.

Gráfico 28 – Projeção das emissões de CO₂ do concreto e argamassa consumidos no Estado de São Paulo



Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do SNIC (2013), WBCSD (2013), Cerqueira (2014) e especialistas. As informações primárias obtidas são protegidas por confidencialidade.

A seguir, são apresentados os três principais resultados, obtidos pelo emprego da MACTool, para o setor de cimento, englobando as emissões que ocorrem fora dos limites territoriais do estado a saber o as emissões evitadas

representadas pelo gráfico de cunha (*Wedge Graph*), o MAC e o BECP.

As emissões evitadas pelas seis estratégias avaliadas são apresentadas na Tabela 31. Ao total, seria possível evitar 88,5 MtCO₂. Com a

Tabela 31 – Emissões evitadas no setor de cimento, incluindo o consumo de cimento proveniente de outros estados 2014–2030

Ano	Emissões evitadas						Total das emissões CBC	Total das emissões CR
	Concreto usinado	Misturador ao concreto usinado	Argamassa industrializada	Aumento do filler	CDR	Pellets		
	(tCO ₂)							
2014	0	0	0	101.203	0	0	9.097.240	9.198.443
2015	0	0	0	112.901	0	0	8.893.601	9.006.502
2016	11.279	49.973	33.845	135.889	171.205	171.205	9.183.826	9.757.222
2017	24.558	109.801	71.107	307.673	246.024	246.024	9.112.226	10.117.413
2018	40.062	135.561	111.977	646.112	342.923	342.923	9.161.219	10.780.777
2019	58.036	165.134	156.657	1.017.627	438.007	438.007	9.203.632	11.477.100
2020	78.749	198.963	205.358	1.424.678	531.172	531.172	9.237.927	12.208.019
2021	102.497	237.538	258.305	1.869.889	622.300	622.300	9.262.428	12.975.257
2022	129.601	281.400	315.733	2.356.061	711.254	711.254	9.275.318	13.780.621
2023	160.414	331.145	377.889	2.886.174	797.881	797.881	9.274.623	14.626.007
2024	195.323	387.430	445.033	3.463.409	882.004	882.004	9.258.203	15.513.406
2025	234.750	450.981	517.442	4.091.152	963.427	963.427	9.223.731	16.444.910
2026	279.155	522.595	595.402	4.773.011	1.041.933	1.041.933	9.168.684	17.422.713
2027	329.043	603.151	679.217	5.512.827	1.117.277	1.117.277	9.090.327	18.449.119
2028	384.964	657.109	769.208	6.314.693	1.189.191	1.189.191	9.022.191	19.526.547
2029	447.518	715.548	865.709	7.182.964	1.257.381	1.257.381	8.931.036	20.657.537
2030	517.362	778.829	969.073	8.122.274	1.306.243	1.306.243	8.844.729	21.844.753

Fonte: Elaboração própria (2017).

aplicação das estratégias em conjunto é possível mitigar 36,3% das emissões do CR no período de 2014 a 2030. Deste total, a medida de maior participação é o aumento do teor de *filler* no cimento (56,8% das emissões evitadas), seguido pelas medidas de substituição de combustíveis fósseis por CDR e *pellets* (13,1% cada uma). As três medidas referentes à construção civil representam 16,9% da mitigação de CO₂ total no período.

O Gráfico 29 apresenta as emissões evitadas pelas tecnologias e medidas consideradas no cenário de baixo carbono.

A Tabela 32 apresenta o resultado do MAC de cada estratégia. Metade delas se mostra com o MAC negativo, sendo de menor custo a que se refere à adição de misturador ao concreto.

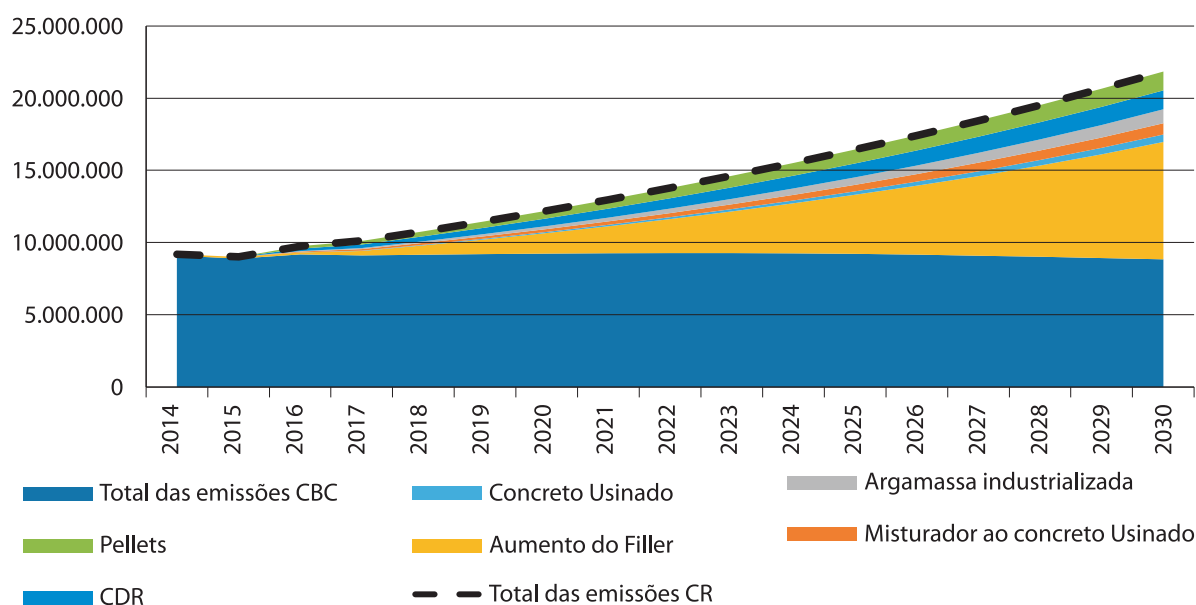
Tabela 32 – Custo marginal de abatimento e potencial de emissões evitadas

Setor	Atividade	Custo de abatimento	Emissões evitadas 2014–2030
		(US\$/t CO ₂)	(Mt CO ₂)
Construção	Misturador	– 212	5,63
Construção	Concreto usinado	– 189	2,99
Processo	Filler	– 2	50,32
Combustível	Pellets	10	11,62
Combustível	CDR	10	11,62
Construção	Argamassa industrializada	120	6,37

Fonte: Elaboração própria (2017).

industrializada, com 120 dólares por tonelada evitada. Se forem adotadas as seis medidas de baixo carbono, estaria sendo economizado um total de US\$ 853,9 milhões no período de 2014–2030.

Gráfico 29 – Emissões evitadas pelas tecnologias de baixo carbono



O Gráfico 30 apresenta a curva do MAC par ao setor de cimento considerando as emissões que ocorrem dentro e fora do estado.

A Tabela 33 apresenta os resultados de BECP para as estratégias avaliadas. As medidas de misturador, concreto usinado e *filler* trazem um retorno acima do estabelecido pela taxa de atratividade, tornando-se investimentos atrativos. As demais medidas apresentam BECP positivo, portanto é necessário vender a tonelada de CO₂ para que as mesmas apresentem o retorno esperado ao longo do período de análise.

A curva de BECP é apresentada no Gráfico 31. Observa-se uma configuração semelhante da curva MAC, onde a posição das medidas

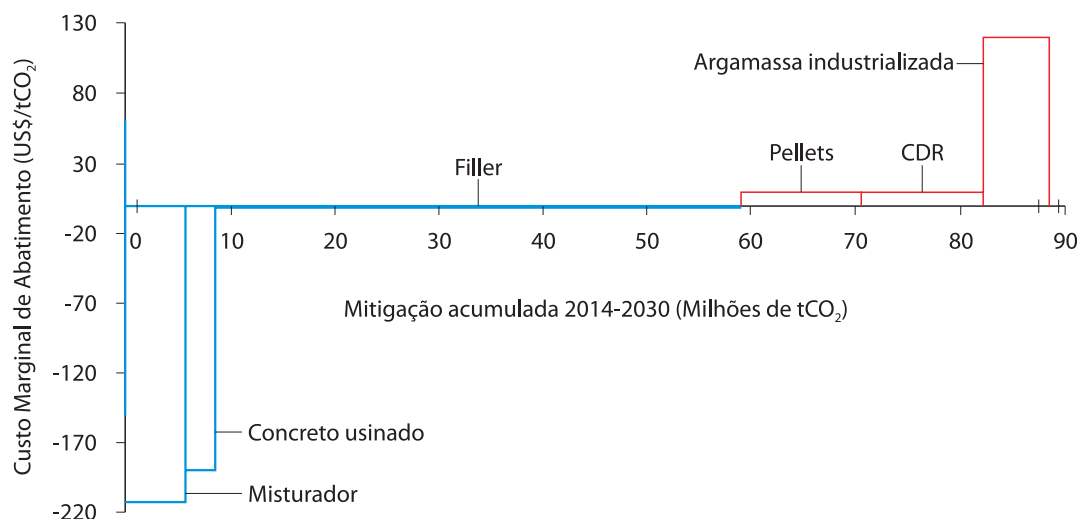
Tabela 33 – Break-Even Carbon Price

Setor	Atividade	Break-Even Carbon Price	Emissões evitadas 2014–2030
		(US\$/t CO ₂)	(Mt CO ₂)
Construção	Misturador	– 543	5,63
Construção	Concreto usinado	– 497	2,99
Processo	Filler	– 5	50,32
Combustível	Pellets	23	11,62
Combustível	CDR	24	11,62
Construção	Argamassa industrializada	933	6,37

Fonte: Elaboração própria (2017).

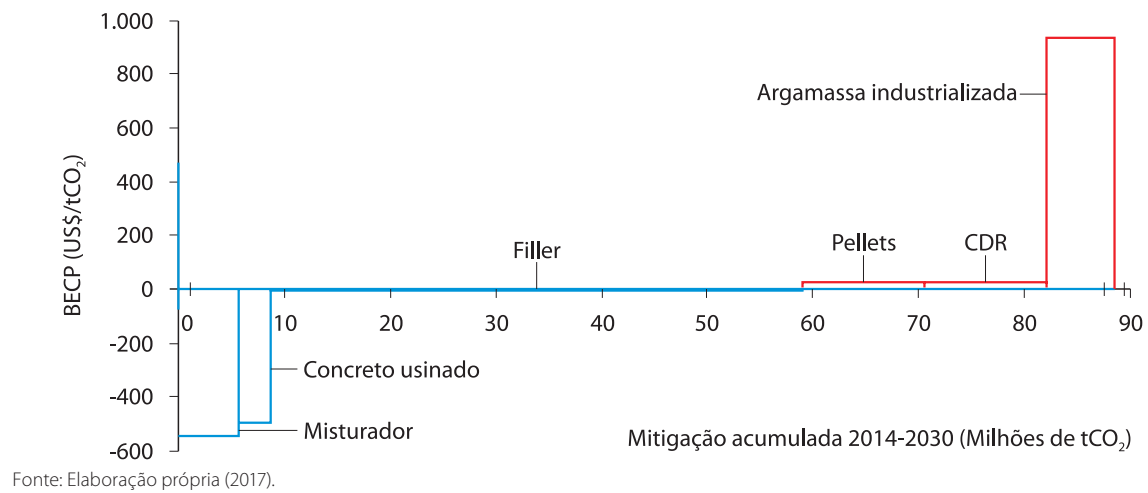
se mantém e há somente um aumento dos valores (em módulo).

Gráfico 30 – Curva de custo marginal de abatimento para o setor de cimento, considerando as emissões que ocorrem fora do Estado de São Paulo



Fonte: Elaboração própria (2017).

Gráfico 31 – Curva de *Break-Even Carbon Price* para o setor da cimento, considerando as emissões que ocorrem fora do Estado de São Paulo



Agenda 2030:



Apoio técnico:



Realização:

