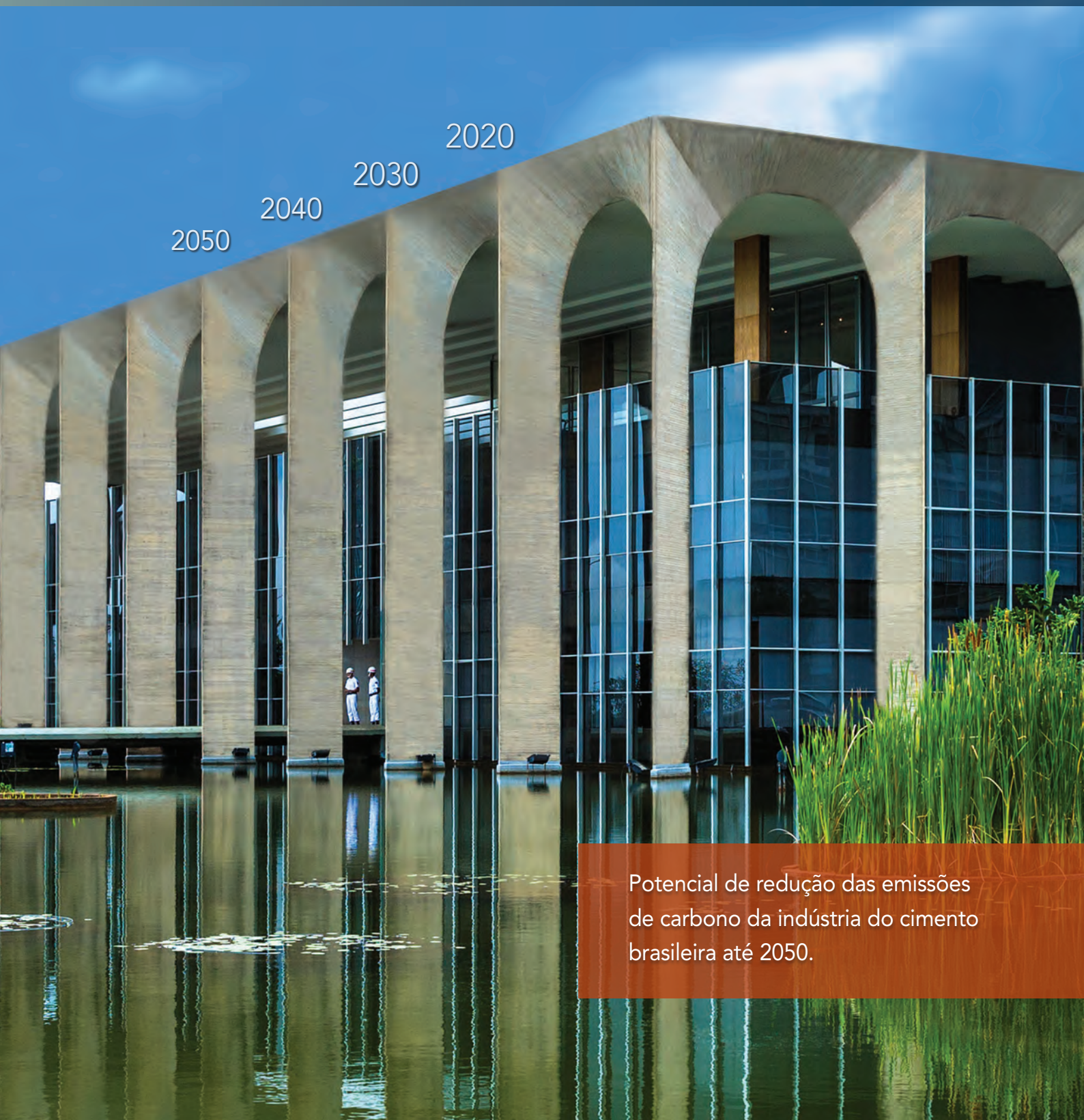


ROADMAP TECNOLÓGICO DO CIMENTO



Potencial de redução das emissões
de carbono da indústria do cimento
brasileira até 2050.

ROADMAP TECNOLÓGICO DO CIMENTO

Potencial de redução das emissões
de carbono da indústria do cimento
brasileira até 2050.

Aviso Legal

O presente relatório é resultado da compilação de pesquisas científicas, levantamento de dados e modelos matemáticos. Sendo assim, os envolvidos no seu desenvolvimento e elaboração não assumem qualquer responsabilidade por eventuais imprecisões ou mesmo pelo uso inadequado de qualquer informação nele contida. Os autores não são responsáveis por eventuais danos ou perdas a pessoas ou instituições originados pelo uso dessas informações. Os usuários deste relatório devem tomar suas próprias decisões de negócios, avaliando a significância e as limitações das informações nele apresentadas. Nenhum compromisso específico foi assumido para a implementação de quaisquer tecnologias apresentadas neste relatório.

Copyright

Este relatório e suas informações não podem ser reproduzidas em partes ou em seu todo sem autorização de seus realizadores.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050 / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019
64 p.

1. Cimento - Fabricação 2. CO₂ 3. Sustentabilidade 4. Mudança climática
4. Eficiência energética 5. Combustíveis alternativos 6. Cimento - Adição I.
Visedo, Gonzalo, coord. II. Pecchio, Marcelo, coord. III. SINDICATO NACIONAL
DA INDÚSTRIA DO CIMENTO IV. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO
PORTLAND V. Título.

CDD – 23.e. – 666.94

Elaborado por Maria Gisele Fonseca de Oliveira CRB-8/4097

Prefácio

O Brasil ainda é um país onde estão presentes inúmeras carências e tem no déficit habitacional e na infraestrutura dois dos principais gravames que comprometem o bem estar e qualidade de vida de sua população. Para mudança deste quadro, é imprescindível o uso de um insumo utilizado do início ao fim de qualquer obra: o cimento. Não à toa, é o material produzido pelo homem mais consumido no mundo.

Por trás desse produto tão essencial, está uma indústria altamente complexa, intensiva em capital humano e financeiro e firmemente comprometida com a mitigação dos impactos ambientais, inerentes a operações desse porte.

No Brasil, em virtude de esforços que vêm sendo realizados há anos, a indústria do cimento já registra um dos menores níveis mundiais de emissão de CO₂ por tonelada de cimento produzida. Mas pode - e irá - continuar avançando.

O Acordo de Paris, negociado em 2015 na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) e ratificado pelo Brasil em 2016, estabeleceu diretrizes e compromissos para tentar limitar o aumento das temperaturas neste século a menos de 2°C.

Como contribuição a este esforço global, a indústria do cimento brasileira, em colaboração com a Agência Internacional de Energia (IEA), a Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (CSI) do Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD), a Corporação Financeira Internacional (IFC) - membro do Grupo Banco Mundial - e um seleto grupo de acadêmicos de renomadas universidades e centros de pesquisa do país, sob a coordenação técnica do emérito professor e ex-ministro José Goldemberg, desenvolveu este roteiro tecnológico que analisa uma série de medidas capazes de acelerar a transição rumo a uma economia de baixo carbono.

A aspiração deste trabalho é contribuir para a redução da intensidade carbônica em 33% até 2050, com base nos valores atuais. Para tanto, reunimos medidas que se concentram em quatro principais pilares: (i) adições e substitutos de clínquer - produto intermediário do cimento -, por meio do uso de subprodutos de outras atividades; (ii) combustíveis alternativos, com a utilização de biomassas e resíduos com poder energético em substituição a combustíveis fósseis não renováveis; (iii) medidas de eficiência energética, mediante investimentos em linhas e equipamentos de menor consumo térmico e/ou elétrico; (iv) tecnologias inovadoras e emergentes, através da pesquisa e desenvolvimento em tecnologias disruptivas, como a captura de carbono.

As soluções aqui apresentadas são realistas. Os objetivos almejados, ambiciosos. A transição da indústria do cimento sugerida neste mapeamento só pode ser alcançada mediante uma estrutura reguladora de apoio e investimentos efetivos e sustentados. O roteiro mapeia políticas públicas necessárias, avalia mecanismos de fomento e descreve desafios técnicos para alcançar a ambição aqui proposta.

O presente Roadmap Tecnológico reafirma o centenário compromisso da indústria do cimento com o progresso.

Paulo Camillo V. Penna

Presidente do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

Presidente da Associação Brasileira de Cimento Portland

Índice

Prefácio	5
Lista de Figuras	7
Lista de Tabelas	7
Lista de Anexos	7
Principais conclusões	8
Ações-chave até 2030	9
1. Introdução	11
Objetivos do Roadmap	12
Colaboradores	12
Processo de elaboração	13
Escopo e limite	13
2. Visão geral da indústria do cimento	15
Processo produtivo e formação das emissões	15
A indústria do cimento a partir de uma perspectiva brasileira	18
Esforços já realizados para a redução das emissões no Brasil	19
3. Alternativas para redução das emissões de carbono	21
Adições ou substitutos de clínquer	22
Combustíveis alternativos	26
Eficiência térmica e elétrica	30
Tecnologias inovadoras e emergentes	33
Potencial de mitigação na cadeia da construção	37
4. Diferenças regionais	39
5. Visão de longo prazo: potencial de redução até 2050	43
6. Recomendações	49
7. Plano de Ação para as Partes Interessadas	53
Abreviaturas e unidades de medida	56
Referências	57
Anexos	58
Parceiros e Colaboradores do Roadmap	62
Agradecimentos	65

Lista de Figuras

Figura 1: Emissões de CO ₂ da produção de cimento	16
Figura 2: Esquema da fabricação de cimento	17
Figura 3: Emissão específica na produção de cimento	19
Figura 4: Evolução da utilização de adições ao clínquer em "Cenário 2°C"	22
Figura 5: Características dos substitutos de clínquer no Brasil	24
Figura 6: Perfil dos combustíveis alternativos utilizados pela indústria brasileira	27
Figura 7: Evolução da utilização de combustíveis alternativos no "Cenário 2°C"	28
Figura 8: Intensidade térmica e elétrica na produção de cimento no "Cenário 2°C"	30
Figura 9: Carbono capturado pela indústria do cimento "Cenário 2°C"	35
Figura 10: Diferenças regionais no Brasil	42
Figura 11: Projeção da produção de cimento no Brasil	44
Figura 12: Indicadores econômicos e produção de cimento	44
Figura 13: Redução de emissões diretas de CO ₂ por alternativa, comparando-se o "Cenário 2°C" com "Cenário 6°C"	47

Lista de Tabelas

Tabela 1: Indicadores-chave para a indústria brasileira do cimento até 2030 no "Cenário 2°C"	9
Tabela 2: Principais tipos de resíduos utilizados pela indústria do cimento	26
Tabela 3: Indicadores-chave para a indústria brasileira de cimento até 2050	46

Lista de Anexos

Anexo 1: Estrutura de modelagem e metodologia	58
Anexo 2: Projeção de demanda de cimento	59
Anexo 3: Perfil tecnológico da indústria do cimento no Brasil	60
Anexo 4: Principais resultados deste Roadmap	61

Principais conclusões

- A indústria brasileira do cimento apresenta um dos menores índices de emissão específica de CO₂ no mundo, graças a ações mitigadoras que vêm sendo implementadas pelo setor nas últimas décadas. Enquanto a produção de cimento aumentou 273% entre 1990 e 2014 (de 26 Mt para 71 Mt), a emissão total cresceu apenas 223% nesse intervalo, em virtude da redução de 18% das emissões específicas (de 700 kg CO₂/t cimento para 564 kg CO₂/t cimento).
- Nesse mesmo período, o consumo térmico específico diminuiu 17%, o uso de combustíveis alternativos aumentou de 5% para 19% e o de substitutos de clínquer passou de 20% para 33%.
- O baixo consumo per capita de cimento no Brasil (260 kg/hab./ano) quando comparado à média mundial (553 kg/hab./ano), aliado ao elevado déficit habitacional e de infraestrutura do país e à expectativa de crescimento populacional, aponta para uma retomada do crescimento na produção em médio/longo prazo, aumentando entre 60% e 120% em 2050 com relação a 2014 (nas variantes de baixa e alta demanda, respectivamente).
- Elevar ainda mais o uso de adições - o Brasil é atualmente uma das referências mundiais - e reduzir a quantidade de clínquer no cimento representam a principal alternativa e desafio do setor na mitigação de suas emissões. Com a redução da razão clínquer/cimento de 67% em 2014 para 52% em 2050, seria possível evitar a emissão cumulativa de 290Mt de CO₂. Isto representa 69% do potencial de redução do setor até 2050. A expectativa de redução na disponibilidade de escórias siderúrgicas e cinzas volantes no longo prazo levará o setor a buscar outras soluções, como ampliar o uso de filer calcário e argilas calcinadas.
- O uso de combustíveis alternativos, em substituição aos combustíveis fósseis não renováveis, como o coque de petróleo, representa a segunda principal alternativa do setor. A ampliação destes energéticos de 15% em 2014 para 55% em 2050 pode resultar em uma redução cumulativa de 55Mt de CO₂. Isto significaria cerca de 13% do potencial de redução. O uso de Resíduos Sólidos Urbanos (17% de substituição) e Resíduos Sólidos Não Perigosos (outros 17%), ambos com elevado conteúdo de biomassa em sua composição, representa o maior potencial.
- O Brasil possui um parque industrial moderno e eficiente, com um consumo térmico de 3,50 GJ/t de clínquer e elétrico de 113 kWh/t de cimento. Assim, não são esperadas mudanças significativas na eficiência energética até 2030, quando ocorreria a substituição gradual de unidades e equipamentos mais obsoletos por novas linhas utilizando as melhores tecnologias disponíveis (BAT). Com isso, seria possível alcançar valores de 3,22 GJ/t de clínquer e 91 kWh/t de cimento em 2050 e uma redução acumulada de 38Mt de CO₂, representando 9% do potencial de mitigação do setor. Otimização e controle de processos, recuperação de calor nos resfriadores, moinhos verticais e equipamentos de *Waste Heat Recovery* (WHR) para geração de energia elétrica terão papel preponderante nessa redução.
- Para alcançar uma redução de emissões compatível com os compromissos globais de menor impacto climático, serão necessários ainda esforços adicionais no desenvolvimento e implementação de tecnologias inovadoras e emergentes, como a Captura e Uso ou Estocagem de Carbono (CCUS). Com isso, seria possível, a partir de 2040, atingir uma redução acumulada de 38Mt de CO₂, representando cerca de 9% do potencial de mitigação do setor até 2050.
- As diferentes alternativas de redução não se encontram distribuídas de forma homogênea pelo país. Considerando as dimensões continentais do Brasil e suas diferenças regionais, é fundamental entender que as diversas ações apontadas neste *Roadmap*, bem como seus potenciais de penetração e redução de CO₂, não necessariamente poderão ser replicadas em todas as regiões brasileiras com a mesma intensidade.

Ações-chave até 2030

Ações concretas de todas as partes interessadas são fundamentais para alcançar o potencial apresentado neste *Roadmap*. Para atingir os níveis de melhoria nos diferentes indicadores de performance (KPI's) e as subsequentes reduções na emissão de carbono previstas, governo, indústria e sociedade em geral devem criar uma agenda conjunta de ações estruturantes, de forma a acelerar a transição sustentável da indústria brasileira de cimento. Entre as ações prioritárias, com vistas a um horizonte de curto/médio prazo (2030), estão:

- Reforçar a cooperação nacional e internacional para reunir e divulgar dados confiáveis de emissões, bem como indicadores de performance referentes a eficiência energética, uso de combustíveis alternativos e de adições, como os do banco de dados *Getting the Numbers Right* da *Cement Sustainability Initiative* (CSI).
- Promover o desenvolvimento de novas normas de cimento, permitindo a incorporação de maiores teores de substitutos de clínquer, sem comprometer a durabilidade dos concretos e de acordo com padrões já utilizados internacionalmente. Desenvolver campanhas de conscientização em toda a cadeia do cimento de modo a informar os consumidores e facilitar a aceitação de cimentos com maiores teores de adições, demonstrando os seus benefícios para a redução das emissões do setor.
- Valorizar a recuperação energética de resíduos, em atendimento à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS); atualizar a legislação existente de forma a agilizar o licenciamento de combustíveis alternativos e incentivar o seu uso; criar legislações específicas sobre coprocessamento de combustíveis derivados de resíduos sólidos urbanos (CDR) em fornos de cimento, estabelecendo diretrizes; fomentar todo tipo de destinação de resíduos, promovendo condições isonômicas de competitividade entre as diferentes alternativas.
- Compartilhar melhores práticas em nível nacional e internacional para a promoção da eficiência energética na indústria do cimento; incentivar a adoção de políticas públicas que resultem em menor consumo de energia e menor desperdício; identificar mecanismos disponíveis para financiamento, tanto em nível público e privado como em âmbito nacional e internacional, de equipamentos e tecnologias de eficiência energética e redução de emissões.
- Promover P&D em tecnologias emergentes e inovadoras de mitigação de gases de efeito estufa, incluindo CCUS, por meio de cooperação com instituições de pesquisa; identificar e/ou criar mecanismos de fomento a pesquisas pré-competitivas, projetos em escala laboratorial e projetos-piloto para demonstração destas tecnologias.

Tabela 1: Indicadores-chave para a indústria brasileira do cimento até 2030 no “Cenário 2°C”

	2014	2030
Fator Clínquer (relação clínquer/cimento)	0,67	0,59
Consumo Térmico [GJ/t clínquer]	3,50	3,47
Consumo Elétrico [kWh/t cimento]	113	106
Combustíveis Alternativos [% da substituição térmica]	15%	35%
Emissão Bruta [Mt CO ₂ /ano]	40	42
Emissão Específica [t CO ₂ /t cimento]	0,56	0,48

Fonte: IEA - modelagem desenvolvida para este projeto. © OECD/IEA, 2016

INTRODUÇÃO



Ponte estaiada sobre o Rio Paraná, entre São Paulo e Mato Grosso do Sul

O cimento é insumo fundamental da cadeia produtiva da indústria da construção, componente básico de concretos e argamassas e o material feito pelo homem mais utilizado no planeta.

Ele é também elemento imprescindível ao desenvolvimento da infraestrutura no país, hoje deficitária. O cimento é base para a construção de casas, escolas, hospitais, estradas, ferrovias, portos, aeroportos, obras de saneamento e energia, entre muitas outras que proporcionam saúde e bem-estar à população e atendem às exigências da vida moderna.

O Brasil, como país em desenvolvimento, tem um importante programa de infraestrutura a ser implementado, e o aumento da população, aliado aos seus crescentes padrões de urbanização, deverá impulsionar a demanda por cimento nas próximas décadas.

O processo produtivo do cimento, por sua vez, é intensivo na emissão de gases de efeito estufa. A indústria cimenteira responde, globalmente, por cerca de 7% de todo o gás carbônico emitido pelo homem.

Particularmente, o Brasil é um dos países que emite menor quantidade de CO₂ por tonelada de cimento produzida. Esta posição de destaque, ao

mesmo tempo em que é um reconhecimento ao esforço do setor no combate às mudanças climáticas, representa um enorme desafio: produzir o cimento necessário ao desenvolvimento do país, buscando ao mesmo tempo soluções para reduzir ainda mais as suas emissões de CO₂.

Objetivos do Roadmap

A Agência Internacional de Energia (IEA) e a Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (CSI) do Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) uniram esforços para publicar, em 2009, uma estratégia global intitulada *Roadmap Tecnológico - Transição de Baixo Carbono na Indústria do Cimento*.¹ Este roteiro global descreveu uma série de alavancas, além do apoio político e financeiro necessário, para reduzir as emissões de CO₂ no processo de fabricação de cimento até 2050. Este foi o primeiro mapeamento da IEA do tipo focado em um setor industrial específico no mundo, tendo sido atualizado em 2018.

Compreendendo o potencial desse roteiro para identificar e desencadear a redução de emissões em médio e longo prazos, a indústria do cimento da Índia elaborou, em 2013, novamente com a participação da IEA e CSI, bem como com a Corporação Financeira Internacional (IFC) – membro do Banco Mundial –, o *Cement Technology Roadmap* específico para o país, apresentando e discutindo as peculiaridades locais e assim projetando os potenciais futuros de mitigação. Estudos de eficiência de recursos também foram realizados em unidades selecionadas de fabricação de cimento, que identificaram várias oportunidades de redução de emissões.

Diante do desafio de procurar meios para reduzir, ainda mais, as suas já baixas emissões de CO₂, a indústria do cimento do Brasil reedita a cooperação com IEA e CSI para produzir o seu próprio *Cement Technology Roadmap* – Brasil, também com o suporte técnico e cofinanciamento da IFC.

Este estudo mapeia a situação atual e as tendências futuras da indústria brasileira do cimento. Se suas trajetórias de crescimento e grau de desenvolvimento tecnológico continuassem sem intervenção, em um cenário de referência, as emissões absolutas decorrentes da produção de cimento no Brasil atingiriam cerca de 66 Mt CO₂ em 2050, um aumento de 64% em relação aos níveis de 2014 (40 Mt CO₂). A partir desse cenário, o *Roadmap* propõe diferentes alternativas técnicas capazes de reduzir estas emissões a patamares condizentes com o de menor impacto climático, limitando o aumento da temperatura global em até 2°C a longo prazo.



Isso implicaria reduzir a atual intensidade carbônica do cimento de 0,56 tonelada de CO₂ por tonelada de cimento (t CO₂ / t cimento) para 0,38 t CO₂ / t de cimento até 2050, fazendo com que as emissões totais permanecessem praticamente constantes apesar do aumento esperado da produção de cimento no período.

O estudo também identifica barreiras ou gargalos que limitam a adoção dessas alternativas e, com isso, propõe uma série de recomendações de políticas públicas, instrumentos de fomento, regulações, aspectos normativos, entre outros, capazes de potencializar a redução das emissões em curto, médio e longo prazos.

Colaboradores

Este *Roadmap* representa o esforço conjunto de uma série de parceiros nacionais e internacionais somado às visões e contribuições de inúmeros especialistas e referentes locais.

O projeto como um todo foi coordenado pelo SNIC e pela ABCP. Além das suas associações representativas, a indústria brasileira do cimento esteve presente por meio dos grupos produtores Cimentos Liz, Ciplan, InterCement, Itambé, LafargeHolcim e Votorantim Cimentos, congregando assim mais de 80% da produção nacional. Especialistas da indústria trouxeram conhecimentos técnicos de sua própria experiência, bem como informações e números do setor.

Sob a coordenação técnica do professor e ex-ministro José Goldemberg, renomados especialistas de importantes universidades e centros tecnológicos do país desenvolveram uma série de *papers* técnicos indicando diferentes alternativas de redução de emissões aplicáveis à indústria nacional, suas barreiras e seus potenciais de penetração no futuro.

A IEA forneceu orientações sobre os processos de coleta de dados e análise, e realizou o exercício de modelagem para entender o impacto das várias alternativas identificadas na redução das emissões ao longo do tempo. Além disso, contribuiu para a estruturação do projeto como um todo, baseada

¹ O *Roadmap Tecnológico do Cimento global* (2009; 2018) e o da Índia (2013) estão disponíveis em: <https://www.wbcscement.org/index.php/key-issues/climate-protection/technology-roadmap>



na sua vasta experiência no desenvolvimento de roadmaps tecnológicos.

A CSI revisou e contribuiu tecnicamente nas diferentes etapas do processo, aportando seu conhecimento global sobre a indústria do cimento, bem como contribuindo com seu robusto banco de dados de emissões.

A IFC apoiou técnica e financeiramente os capítulos de Combustíveis alternativos e Eficiência energética, mediante a contratação de consultores nacionais e internacionais.

Por fim, mais de 200 especialistas da indústria, do governo e da academia, entre outros, contribuíram através de quatro workshops técnicos e várias reuniões de trabalho.

Processo de elaboração

Este *Roadmap* está baseado em um conjunto de mais de 40 alternativas de redução de emissões aplicáveis à indústria brasileira do cimento. Estas alternativas foram concentradas em quatro *papers* técnicos² desenvolvidos por acadêmicos das principais universidades e centros de pesquisa do país, nos quais foram descritos o status atual de cada alternativa, o seu impacto na redução de CO₂, as principais barreiras e restrições à sua implementação e o potencial de penetração ao longo do tempo. Adicionalmente aos quatro *papers* técnicos que integraram o processo de modelagem, foram desenvolvidos outros dois *papers*³ de caráter qualitativo e que não alimentaram o modelo de projeção.

Estes *papers* técnicos se apoiaram na vasta informação disponível do setor no Brasil referente a emissões de CO₂, consumo energético, perfil de combustíveis e adições ao cimento, entre outros indicadores, obtidos a partir do banco de dados da CSI.⁴ Adicionalmente, foram levantadas, junto à indústria, informações referentes ao perfil tecnológico atual do parque: tipos de fornos, tipos de resfriadores de clínquer, tipos de moinhos de cimento, coque e

matéria-prima, idade média das fábricas, expectativa de vida, entre outras. Ao todo, foram coletados dados referentes a 80% do parque industrial e extrapolados para toda a produção nacional, de modo a serem altamente representativos da realidade brasileira.

Todos estes materiais foram utilizados pela IEA para alimentar e calibrar as entradas e resultados do modelo sobre o impacto das diferentes alternativas na redução dessas mesmas emissões, em consonância com o seu modelo global desenvolvido em resposta ao Cenário de 2°C, com variantes de baixa e alta demanda (Box 1).

Por fim, a partir destes cenários, indústria, academia, órgãos de governo e instituições de fomento discutiram uma série de recomendações aos mais diversos *stakeholders* capazes de suprimir as barreiras existentes e viabilizar (ou potencializar) as diferentes soluções técnicas propostas neste documento, de modo a contribuir para a mitigação das emissões da indústria.

Escopo e limite

Este estudo concentra-se nas estratégias de mitigação do carbono gerado na fabricação do cimento, focando nas emissões diretas decorrentes do processo produtivo, no consumo de energia e nas emissões indiretas, oriundas do consumo elétrico dentro da unidade fabril. Mas reconhece também que é importante considerar a redução de emissões no contexto mais amplo de todo o ciclo de vida do cimento, do concreto e do ambiente construído. Por isso, dedica uma seção específica neste relatório a esta abordagem. Esta, porém, encontra-se fora do processo de fabricação de cimento e, portanto, não foi incluída no exercício de modelagem.

Ao mesmo tempo, apesar de o estudo apresentar uma visão consolidada estritamente nacional, é importante considerar que a dimensão continental do Brasil e suas marcadas diferenças regionais, tanto geográficas quanto econômicas e de desenvolvimento, criam potenciais restrições de acesso às diferentes alternativas de redução de emissões propostas, principalmente relacionadas a substitutos de clínquer e combustíveis alternativos. Nesse sentido, os autores alertam que os potenciais sugeridos neste *Roadmap* não necessariamente se distribuem de maneira uniforme em todo o território nacional, sendo fundamental uma análise das peculiaridades locais ao se avaliarem as potencialidades de âmbito regional/estadual.

² 1. Adições e substitutos de clínquer; 2. Combustíveis alternativos; 3. Eficiência energética; 4. Captura e uso ou estocagem de carbono.

³ 1. Potencial de mitigação na cadeia da construção; 2. Diferenças regionais.

⁴ Por ocasião da publicação deste Relatório, o banco de dados *Getting the Numbers Right* (GNR), da Cement Sustainability Initiative (CSI), bem como suas demais atividades, foram absorvidas pela recém criada *Global Cement and Concrete Association* (GCCA) e estão disponíveis em <https://www.wbcsdcement.org>.

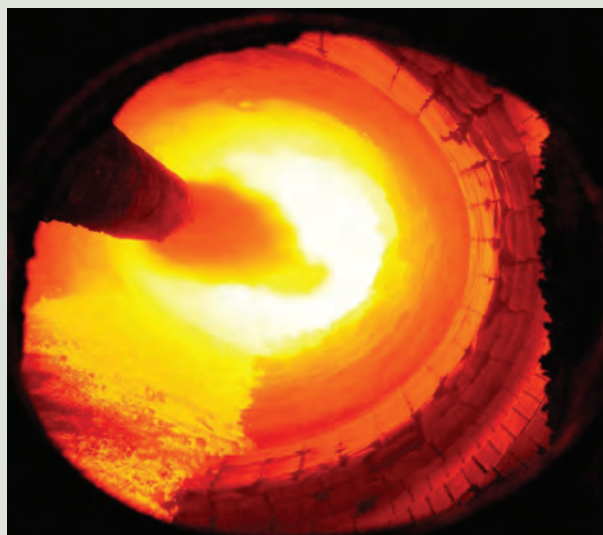
Box 1. Cenários utilizados neste Roadmap

A IEA utiliza uma extensa modelagem para examinar possíveis cenários da demanda global de energia no futuro. O “Cenário 6°C”, que serve como cenário de referência para este Roadmap, é em grande parte uma extensão das tendências atuais, sem esforço por parte do governo, indústria ou público em geral para reduzir as emissões. Em 2050, o uso global da energia no “Cenário 6°C” quase dobra (em comparação com 2014) e as emissões totais aumentam ainda mais. Na ausência de esforços para estabilizar as concentrações atmosféricas de gases com efeito de estufa, o aumento médio da temperatura global deverá ser de pelo menos 6°C no longo prazo. Nesse cenário, as emissões globais de CO₂ de todas as indústrias seriam 45% a 65% mais altas em 2050 do que em 2014.

Em contrapartida, o “Cenário 2°C” é orientado por alvo: começa com o objetivo de limitar o aumento da temperatura média global em até 2°C e examina meios para alcançar cortes de emissões profundos o suficiente para reduzir pelo menos para a metade as emissões globais até 2050. Isso não significa que a indústria precisa reduzir suas emissões em mais de 50%; em vez disso, atingir esse objetivo da forma mais econômica exige que cada setor econômico em cada país contribua com base em seus melhores custos de redução específicos. Sob este cenário, as emissões industriais globais anuais seriam em 2050 cerca de 20% menores que as atuais.

Uma análise detalhada é realizada periodicamente pela IEA para a indústria global do cimento e, neste projeto em particular, foi feita uma abordagem específica para a indústria do cimento do Brasil.

O modelo foi desenvolvido sobre duas variantes dentro de cada cenário: baixa demanda e alta demanda de cimento. Dada a recente crise econômica nacional e as incertezas sobre a projeção do



crescimento em longo prazo no consumo de cimento, este estudo concentrou-se majoritariamente na variante de baixa demanda.

Os cenários baseiam-se em tecnologias existentes a curto prazo, mas assumem uma visão mais otimista do desenvolvimento de tecnologia adicional a longo prazo e consideram que estas novas tecnologias são adotadas à medida que se tornam competitivas em termos de custos. Eles também admitem que as barreiras não técnicas sejam superadas, incluindo, entre outras, aceitação social, marcos regulatórios adequados e déficits de informação. A análise não avalia a probabilidade destas premissas serem cumpridas ou não, mas é claro que reduções profundas de CO₂ só podem ser alcançadas se todos os setores da sociedade (indústria, governo, comunidade) contribuírem coletivamente.

Esses cenários não são previsões. São análises internamente consistentes de caminhos que podem estar disponíveis para atender aos objetivos da política energética e climática, dado um certo conjunto de pressupostos tecnológicos.



VISÃO GERAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO



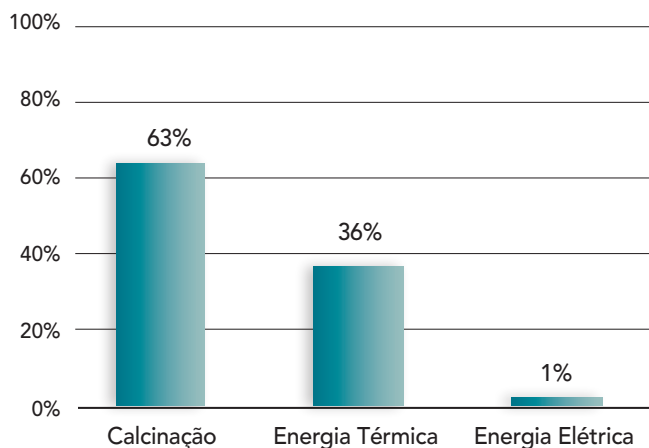
Visão noturna de uma
fábrica de cimento

Processo produtivo e formação das emissões

A fabricação do cimento pode ser considerada como um processo de duas etapas principais. Começa com a produção de clínquer em fornos de alta temperatura e é nesta etapa que ocorrem as emissões diretas de CO_2 . Normalmente, de 30% a 40% das emissões diretas de CO_2 provêm da queima de combustíveis e os 60% a 70% restantes são inerentes ao processo e decorrem da reação química envolvida na conversão de calcário em óxido de cálcio (calcinação), precursor da formação do clínquer. Outros 5% das emissões de CO_2 ocorrem de forma indireta e resultam do consumo elétrico da planta industrial.

No Brasil, a parcela correspondente à queima de combustíveis representa 36% das emissões totais, enquanto que as emissões da calcinação contribuem com outros 63%. Em função da matriz elétrica limpa do país (74% renovável), a participação da energia elétrica é bem inferior à média mundial, sendo de aproximadamente 1%.

Figura 1: Emissões de CO₂ da produção de cimento



Mensagem-chave: Quase 2/3 das emissões do setor são inerentes ao processo e acontecem durante a calcinação da matéria-prima.

Fonte: CSI; SNIC, 2014

Para produzir cimento, o clínquer é moído em conjunto com o sulfato de cálcio, conhecido como gesso. Dependendo das propriedades técnicas exigidas do produto acabado, outros componentes, incluindo cinzas volantes, escórias granuladas de alto forno e fíler calcário também podem ser moídos em conjunto ou misturados posteriormente. O cimento pode ser produzido em unidades integradas, que possuem forno de clínquer e moinho no mesmo local, ou em instalações de moagem separadas ou plantas de mistura, que adquirem o clínquer de unidades integradas.

Existem dois processos industriais básicos para a produção de clínquer: via úmida e via seca, que dependem da tecnologia adotada de homogeneização das matérias-primas. O processo via úmida consome o dobro de energia, pois precisa evaporar toda a água adicionada intencionalmente para mistura das matérias-primas (conhecida como pasta), e praticamente não existe mais no país. Existem ainda diferentes configurações de forno.

O processo de fabricação de cimento é complexo. Exige um minucioso controle da formulação química e envolve várias etapas, que requerem equipamentos especializados.

1. Extração de matérias-primas

Os depósitos carbonáticos que ocorrem naturalmente, como calcário, fornecem carbonato de cálcio (CaCO₃), um material essencial para o cimento. Estes são extraídos por máquinas pesadas de pedreiras, muitas vezes localizadas próximas da fábrica de cimento. Pequenas quantidades de materiais "corretivos", como minério de ferro, bauxita, xisto, argila ou areia, que também são escavados a partir de minas, podem ser necessárias para fornecer conteúdos extras de óxido de ferro (Fe₂O₃), alumínio (Al₂O₃) e sílica (SiO₂), a fim de adequar a composição química da farinha crua necessária ao processo de fabricação e aos requisitos do produto.

2. Britagem

Os materiais extraídos são triturados em fragmentos (<10 cm) e transportados para a fábrica de cimento por correias transportadoras, caminhões ou trens.

3. Preparação de farinha crua

As diferentes matérias-primas são misturadas para manter a composição química necessária em um processo chamado "pré-homogeneização". O material anteriormente britado será agora moído para produzir a "farinha crua". Para garantir a alta qualidade do cimento, a composição química das matérias-primas e da farinha crua é cuidadosamente monitorada e controlada.

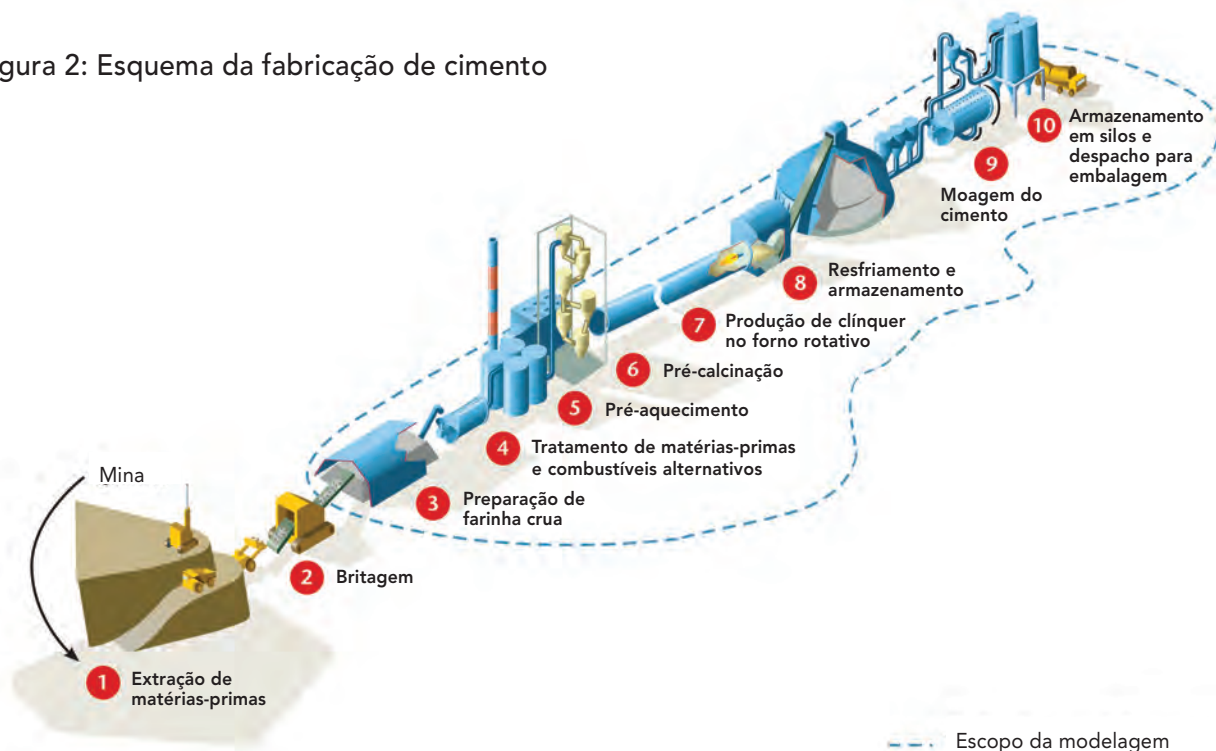
4. Tratamento de matérias-primas e combustíveis alternativos

A produção de cimento pode coprocessar resíduos e subprodutos gerados de outras indústrias ou municípios. Eles podem ser substitutos de matérias-primas da farinha crua ou de combustíveis usados no processo de queima, desde que preparados para tal. Os resíduos e subprodutos variam amplamente de natureza e muitas vezes possuem uma grande quantidade de umidade. Por isso, eles precisam ser analisados, classificados, triturados, separados granulometricamente e, em alguns casos, submetidos a processos de redução da umidade antes de serem introduzidos no forno de cimento.

5. Pré-aquecimento

O pré-aquecedor consiste em uma série de ciclones verticais através dos quais a farinha crua é conduzida, entrando em contato com os gases quentes do forno, que se movem na direção oposta. Nestes ciclones, a energia térmica dos gases quentes é recuperada e a farinha crua é pré-aquecida antes de entrar no forno rotativo. Desse modo, parte das reações químicas necessárias para a formação do clínquer ocorre de forma mais precoce e eficiente. Dependendo do teor de umidade da matéria-prima, um forno pode ter até seis estágios de ciclones, com aumento da recuperação de calor em cada estágio extra.

Figura 2: Esquema da fabricação de cimento



Mensagem-chave: A fabricação de cimento envolve múltiplas etapas.

Nota: Um forno com processo via seca com pré-calcinador e pré-aquecedores de ciclones de múltiplos estágios, como o exibido acima, é considerado o estado-da-arte em tecnologia.

Fonte: IEA/WBCSD, 2009

6. Pré-calцинаção

A calcinação é a decomposição do calcário para formação de cal (CaO). Parte dessa reação ocorre no "pré-calcinador", uma câmara de combustão situada na parte inferior do pré-aquecedor e acima do forno, e parte no interior do forno rotativo. A decomposição química do calcário geralmente emite de 60% a 70% das emissões totais de gases. A queima de combustível gera o restante (cerca de 30% a 40%), 65% dos quais ocorrem no pré-calcinador.

7. Produção de clínquer no forno rotativo

A farinha pré-calcinada então entra no forno rotativo. O combustível é queimado dentro do forno, ao alimentar um maçarico, e temperaturas de até 1.450°C são alcançadas. À medida que o forno gira, cerca de três a cinco vezes por minuto, o material desliza e cai através de zonas progressivamente mais quentes em direção à chama. O calor intenso provoca reações químicas e físicas que fundem parcialmente a farinha, transformando-a em clínquer Portland. A reação química inclui a calcinação, que é a decomposição dos minerais carbonáticos que compõem o calcário com consequente emissão de CO_2 .

8. Resfriamento e armazenamento

O clínquer quente é então resfriado rapidamente, de temperaturas superiores a 1.000°C para até 100°C , por meio de um resfriador que sopra ar frio para dentro do forno. Esse ar será reaproveitado e utilizado também na queima dos combustíveis. Esses sopradores de ar

funcionam com eletricidade e, ao trocar o calor do clínquer, a circulação de ar quente soprado melhora a eficiência térmica do forno. Uma fábrica de cimento típica normalmente armazena o clínquer antes da moagem do cimento. O clínquer pode ser moído na mesma unidade, quando integrada, ou transferido para unidades específicas de moagem.

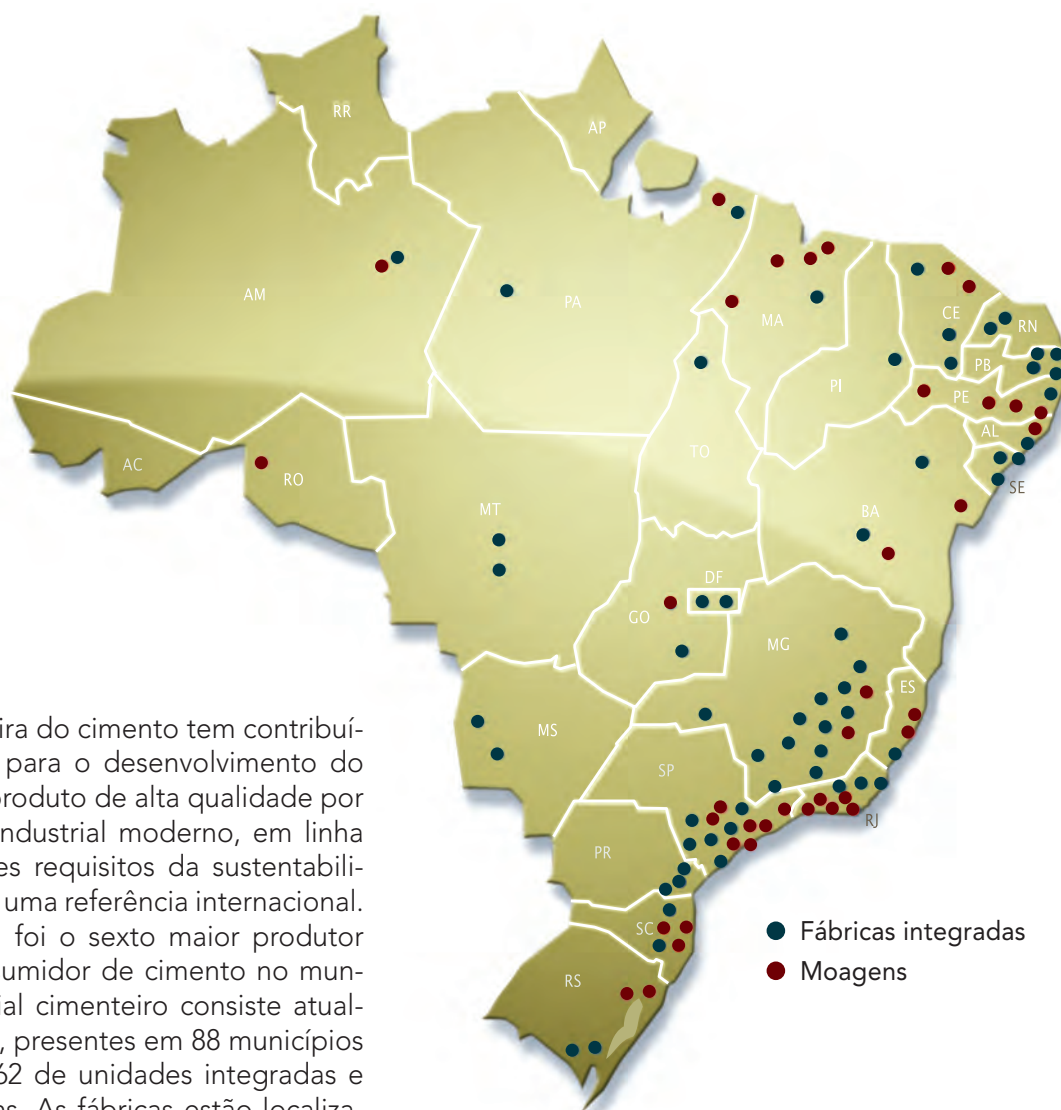
9. Moagem do cimento

O clínquer resfriado e misturado com gesso é moído até se transformar em um pó cinza, conhecido como cimento Portland comum. Todos os tipos de cimento contêm cerca de 3% a 4% de gesso para controlar o tempo de pega do produto. Quando outros materiais de adição estiverem presentes no cimento, ele poderá assumir outras designações e adquirir propriedades especiais. A moagem dessas adições pode ser feita em conjunto com o clínquer ou em separado. Tradicionalmente, moinhos de bolas eram usados para moagem do cimento. Todavia, em muitas plantas modernas já se utilizam tecnologias mais eficientes - prensas de rolos e moinhos verticais.

10. Armazenamento em silos para despacho e embalagem

O produto final é homogeneizado e armazenado em silos de cimento para posteriormente ser enviado ao cliente. Para ser transportado, o cimento é acondicionado em sacos ou em *big bags*, que podem ser paletizados, ou ainda carregado a granel em caminhões.

A indústria do cimento a partir de uma perspectiva brasileira



A indústria brasileira do cimento tem contribuído significativamente para o desenvolvimento do país, fornecendo um produto de alta qualidade por meio de um parque industrial moderno, em linha com os mais exigentes requisitos da sustentabilidade, que fazem dele uma referência internacional.

Em 2016, o Brasil foi o sexto maior produtor e o oitavo maior consumidor de cimento no mundo. O parque industrial cimenteiro consiste atualmente em 100 plantas, presentes em 88 municípios e 24 estados, sendo 62 de unidades integradas e o restante de moagens. As fábricas estão localizadas, em sua maior parte, na região costeira do país, acompanhando a maior densidade populacional e o mercado consumidor.

Entre 2003 e 2014, o consumo anual de cimento no Brasil praticamente dobrou devido ao crescimento da renda e do emprego, forte expansão do crédito imobiliário, queda da taxa de juros e inflação e investimento em programas de infraestrutura, chegando ao consumo recorde de 72 milhões de toneladas nesse último ano. Nesse mesmo período, houve significativos investimentos em ampliação da capacidade instalada, atingindo atualmente cerca de 100 milhões de toneladas por ano.

Desde 2015 o país vem enfrentando uma grave crise político-econômica, que resultou na redução do investimento em infraestrutura e aumento do desemprego. A elevação da taxa de juros e as perdas salariais refletiram pesadamente no mercado imobiliário. Com isso, a atividade da construção civil

sofreu uma forte retração, culminando na pior crise que a indústria brasileira do cimento já enfrentou, com uma queda acumulada de produção de 25% nos últimos três anos.

O consumo per capita brasileiro encontra-se em 260 kg/habitante, menos da metade da média mundial (553 kg/habitante/ano)⁵ e bem abaixo de países em franco desenvolvimento ou já desenvolvidos. O elevado déficit habitacional e a precária base de infraestrutura exigem do Brasil a implementação de importantes programas de investimentos. Considerando o aumento populacional, em trajetória crescente prevista até meados de 2040, e sendo o cimento a base indispensável para a construção dessa infraestrutura, espera-se um aumento de produção do insumo nas próximas décadas. Conciliar esse crescimento com a redução das suas emissões de carbono é prioritário para o setor.

⁵ Fontes: Consumo mundial de cimento: databasedanalysis.com; População mundial: ONU. Dados de 2015.

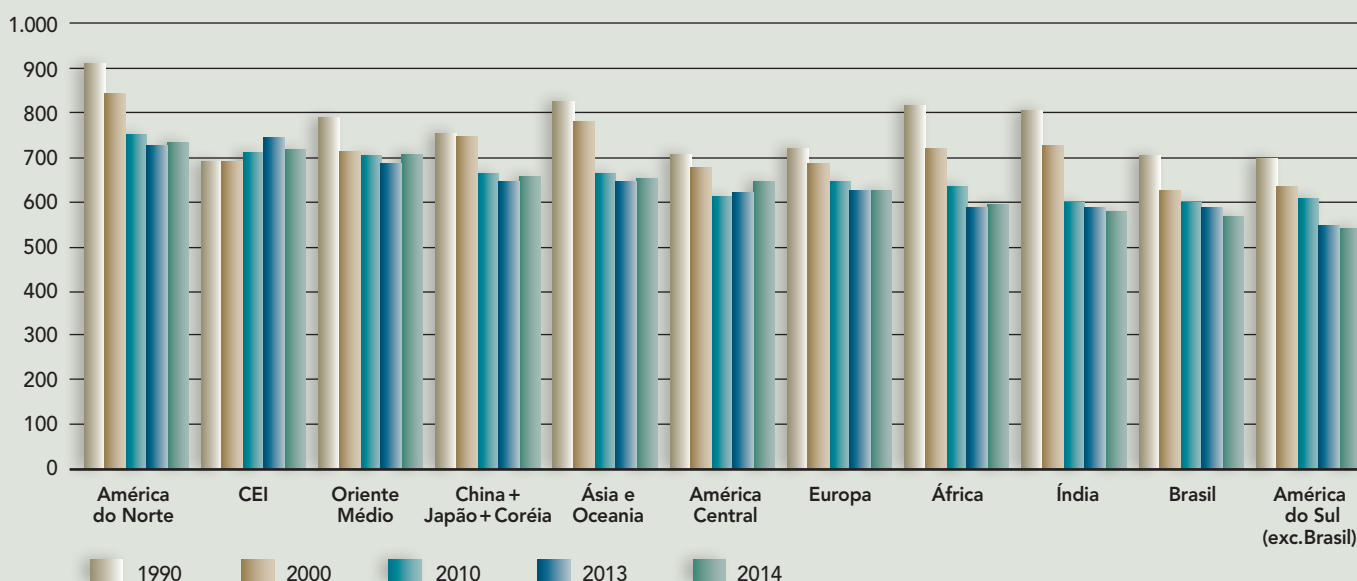
Esforços já realizados para a redução das emissões no Brasil

Globalmente, as emissões de CO₂ da indústria do cimento representam cerca de 7% das emissões totais produzidas pelo homem. No Brasil, em função de ações que vêm sendo implementadas há anos, esta participação é praticamente um terço da média mundial, ou 2,6%, segundo o Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa.⁶

Os esforços da indústria brasileira do cimento para a redução de sua pegada de carbono, por meio da adoção das melhores práticas hoje existentes, se refletem nos seus indicadores de intensidade carbônica. Desde o início da contabilização das emissões de CO₂ no setor, em 1990, até hoje, o Brasil tem ocupado posição de vanguarda entre os países/regiões com menor emissão específica por tonelada de cimento produzida no mundo.

Figura 3: Emissão específica na produção de cimento

kg CO₂ / t cimento



Mensagem-chave: Em função de ações que vêm sendo implementadas ao longo das décadas, o Brasil apresenta um dos menores índices de emissão específica no mundo, desde o início da série histórica.

Fonte: Cement Sustainability Initiative (CSI), 2014

⁶ 3ª Comunicação Nacional do Brasil à Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – MCTI 2016.

Entre os anos de 1990 e 2014, as emissões específicas do setor reduziram 18%, de 700 kg CO₂/t cimento para 564 kg CO₂/t cimento⁷. Enquanto isso, nesse mesmo período, a produção

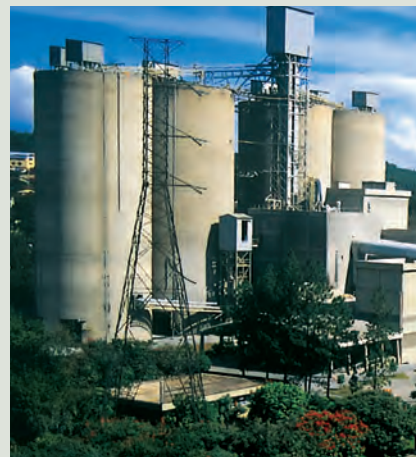
de cimento aumentou 277%, de 26 milhões para 72 milhões de toneladas. A redução das emissões da indústria se deve a ações que podem ser agrupadas em três principais grupos descritos a seguir:

Adições ou substitutos de clínquer

A indústria nacional de cimento tem tradição no uso de adições. O aproveitamento de subprodutos de outras atividades e matérias-primas alternativas é realizado há mais de 50 anos no país.

A produção de cimentos com adições ao clínquer, de materiais como escórias de alto forno, cinzas volantes, argilas calcinadas e filer calcário, além de diversificar as aplicações e características específicas do cimento, representa uma solução ambientalmente correta para subprodutos de outros processos produtivos e para a preservação de recursos naturais não renováveis. Tudo isso atendendo, acima de tudo, as especificações das Normas Técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

No período de 1990 a 2014, conseguiu-se reduzir a relação clínquer/cimento de 80% para 67%, alcançando um dos maiores teores de uso de adições no mundo.



Combustíveis alternativos

Além dos combustíveis fósseis tradicionais utilizados pela indústria do cimento, principalmente o coque de petróleo (85% da matriz térmica atual), é crescente no Brasil o uso de combustíveis alternativos, através do coprocessamento de resíduos e da utilização de biomassas.

A busca por energéticos com menores fatores de emissão que os combustíveis convencionais tem sido uma importante ferramenta do setor para a redução de suas emissões de CO₂, especialmente a partir do início do século XXI. Esta transição energética exigiu investimentos em adequação e adaptação do processo produtivo, além do aperfeiçoamento no monitoramento e controle.

No período de 2000 a 2014, a indústria conseguiu aumentar a participação dos combustíveis alternativos em sua matriz energética de 9% para 15%, diminuindo suas emissões ao mesmo tempo em que reduziu o passivo ambiental representado pelos resíduos.

Eficiência térmica e elétrica

A indústria do cimento no Brasil possui um parque industrial moderno e eficiente, e em constante atualização. A substituição quase que total dos fornos via úmida por via seca entre os anos 70 e 80 (hoje mais de 99% são via seca), o significativo aumento de capacidade nos últimos dez anos, com instalações operando com as melhores tecnologias disponíveis (BAT), e os constantes investimentos em *retrofits* e modernização de equipamentos fazem com que o consumo energético do setor se encontre hoje abaixo do praticado pela maioria dos países.

Assim, entre os anos 1990 e 2014, o setor conseguiu reduzir sua intensidade térmica em 17%, passando de 4,2 GJ/t de clínquer para 3,5 GJ/t de clínquer. Em termos de intensidade elétrica, os avanços foram menos expressivos nesse período, já que o valor de 113 kWh/t de cimento já se encontrava próximo do benchmark.



⁷ Valores obtidos a partir do banco de dados *Getting the Numbers Right*, da Cement Sustainability Initiative – CSI, 2014

ALTERNATIVAS PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CARBONO



Vista da torre de pré-aquecedores e pré-calcinador

Existem inúmeros estudos que apontam uma série de alternativas ou tecnologias com potencial, maior ou menor, de reduzir as emissões de CO₂ da indústria. O presente estudo analisou mais de 70 diferentes medidas abordadas nos Papers Técnicos do *Cement Technology Roadmap* Global, de 2009/2018, e do *Cement Technology Roadmap* da Índia, de 2013, bem como de outras referências internacionais, avaliando a sua aplicabilidade no contexto da indústria brasileira. Como resultado, cerca de 40 alternativas foram identificadas e concentradas em quatro principais conjuntos de ações ou pilares.

A seguir descreve-se cada um destes pilares, bem como o seu potencial técnico de implementação no Brasil ao longo das próximas décadas.

Nota: É frequente o caso de uma alternativa individual ter influência no potencial de outra alternativa para reduzir emissões. Por exemplo, o uso de combustíveis alternativos geralmente aumenta o consumo específico de energia, devido aos seus maiores níveis de umidade. Da mesma forma, o processo de captura e estocagem de carbono eleva também o consumo elétrico total. Portanto, simplesmente somar os potenciais de redução de cada alternativa para calcular os potenciais totais de redução não é tecnicamente correto (ver Box 2).

Adições ou substitutos de clínquer

O aumento no uso de adições e substitutos de clínquer reduziria cerca de 290 Mt de CO₂ ou 69% da mitigação cumulativa de emissões de CO₂ até 2050 no "Cenário 2°C", em comparação com o "Cenário 6°C".

O clínquer é o produto intermediário da fabricação do cimento, sendo constituído por sílica, alumínio e ferro. É obtido a partir da queima, em altas temperaturas, de calcário e argilas em fornos rotativos. Quando finamente moído com gesso, em teores de 3% a 4%, constitui o cimento Portland, ligante hidráulico que ao reagir com a água tem a capacidade de endurecer e adquirir resistência, conservando essa propriedade mesmo submerso. Outros materiais também possuem propriedades hidráulicas ou pozolânicas e no processo de fabricação do cimento podem substituir parcialmente o clínquer, dando origem a diversos tipos de cimento com características e propriedades diferenciadas.

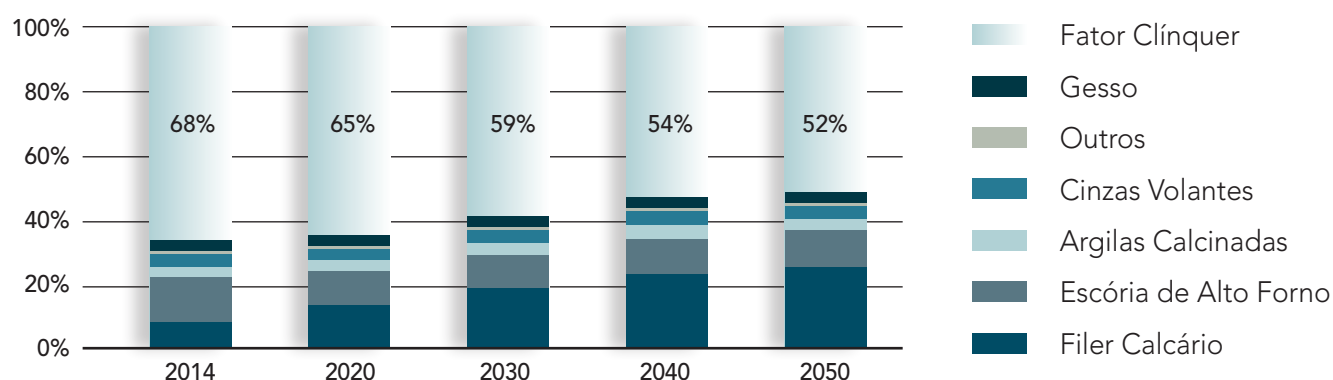
Entre os materiais mais tradicionais utilizados como substitutos do clínquer destacam-se a escória granulada de alto forno (subproduto da obtenção de ferro gusa), as cinzas volantes (resíduos das termelétricas a carvão mineral) e certos materiais naturais calcinados ou não, entre outros. A produção de cimentos Portland com adições propicia a redução das emissões de CO₂, uma vez que diminui

o consumo de clínquer por tonelada de cimento e, consequentemente, a queima de combustíveis e a emissão por calcinação/descarbonatação, além de contribuir para a preservação de jazidas.

O uso de substitutos de clínquer no cimento diversifica as aplicações e características específicas e frequentemente apresenta vantagens relacionadas com a maior durabilidade e vida útil de estruturas de concreto (baixa permeabilidade, resistência ao ataque de cloretos e sulfatos, prevenção das reações álcali-agregado, elevada resistência à compressão em idades mais avançadas).

Para o período 2030 e 2050, o "Cenário 2°C", o volume de adições deverá aumentar, reduzindo o fator clínquer dos níveis atuais (ao redor de 67%) para 59% em 2030 e para 52% em 2050. Dado o caráter regional de distribuição de algumas dessas adições e a previsão de menor disponibilidade futura das adições tradicionais, escória e cinzas volantes, em função da evolução dos processos tecnológicos, prevê-se o aumento do teor de fíler calcário como uma das alternativas mais promissoras na mitigação das emissões.

Figura 4: Evolução da utilização de adições ao clínquer em "Cenário 2°C"



Mensagem-chave: Em um cenário de redução da disponibilidade de escórias e cinzas volantes, o grande potencial do setor para reduzir ainda mais a fração de clínquer no cimento está no maior uso de fíler calcário.

Fonte: IEA - modelagem desenvolvida para este projeto. © OECD/IEA, 2016

O uso de **escória de alto-forno** como adição ao cimento Portland é praticado no Brasil há quase 70 anos e eventuais barreiras técnicas foram bem estudadas e contornadas pela indústria e pela academia. Em 2014, mais de 95% da escória granulada de alto forno produzida no país foi consumida pela indústria de cimento. A barreira para aumento do uso da escória de alto-forno pela indústria de cimento é, em curto e médio prazos, o menor crescimento da oferta em relação ao aumento da produção de cimento, em função da elevada competição global enfrentada pela indústria siderúrgica nacional; e, em longo prazo, pela evolução dos processos tecnológicos, com menor geração de escória por tonelada de gusa produzida. É possível estimar que a geração de escória de alto forno, em 2050, seja de 14,8 Mt. O teor médio de escória de alto-forno no cimento passaria de 14% em 2014 para 11% em 2050, abaixo, portanto, do teor médio atualmente praticado.

Algo semelhante ocorre com o uso de **cinzas volantes** que, pela perspectiva de menores investimentos em usinas termelétricas a carvão e pela tendência de gradual descarbonização da matriz elétrica, num cenário mais favorável para fontes de energia limpa, como eólica e fotovoltaica, terão sua oferta insuficiente para a demanda resultante do crescimento da produção de cimento. A capacidade máxima de produção anual de cinzas é atualmente da ordem de 4,4 Mt. Todavia, esse número é muito influenciado pelo fator de utilização das termoelétricas, que em 2013 foi da ordem de 50%, produzindo apenas 2,2 Mt de cinzas. Em 2050, estima-se que a produção anual de cinzas atinja valores próximos de 3,3 Mt, representando uma taxa de substituição de 2,0% a 2,5% no cimento⁸.

Dois tipos de adições tendem a responder, em longo prazo, pela diminuição do fator clínquer/cimento: o fíler calcário e, em menor escala, as argilas calcinadas.

O uso do **fíler calcário** não exige grandes investimentos, não requer calcinação e possui disponibilidade ampla para todas as fábricas que optarem por sua utilização. Mas essa opção precisa passar por um aumento gradativo do seu teor no cimento para vencer eventuais dificuldades operacionais e garantir o desempenho em serviço, conduzindo à aceitação do consumidor. Dentre todas as adições, o fíler calcário apresenta o maior potencial na mi-

gação de CO₂ e seu uso exige que a base normativa seja adaptada a este cenário de produção de cimentos com menores intensidades de carbono, lastreada em requisitos e critérios de desempenho que forneçam a base técnica para controle da qualidade e especificação.

A mudança da base normativa levando em conta a sinergia existente entre a argila calcinada e fíler calcário é parâmetro facilitador para o aumento deste último no cimento. Entretanto, deverá ser considerada a finalidade de aplicação dos cimentos, de um lado os cimentos destinados a obras estruturais com maiores exigências técnicas e de outro lado cimentos de uso geral com menor responsabilidade estrutural e aptos para atender inclusive um mercado que até 2050 ainda deverá contar com elevada parcela de informalidade na construção ("autoconstrutor").

O Brasil já detém razoável experiência no uso de **argilas calcinadas**, que possuem distribuição quase irrestrita em todo o território. Seu uso isolado como adição já dispõe de uma base normativa. Sua fabricação, entretanto, implica menor potencial de mitigação de CO₂, já que diferentemente das outras adições, a calcinação destas argilas irá demandar consumo de combustíveis e, conseqüentemente, CO₂ resultante, embora cerca de um quarto das emissões do clínquer evitado⁹. Adicionalmente, exige investimentos em maquinários e calcinação.

Assim, sua taxa média de substituição do clínquer deve ser menor que a do fíler calcário, mas pode ter seu uso estimulado em conjunto com o fíler calcário, mitigando seus efeitos indesejáveis na reologia do concreto. Para tanto, uma nova base normativa deve ser criada, à semelhança do que já existe na Europa com outros materiais pozolânicos.

Em menor escala e com potencial de crescimento difícil de prever, deve-se considerar as **escórias ácidas e de aciaria**. O incremento de seu uso em cimento vai depender de ações da indústria siderúrgica e da pressão da legislação ambiental, com investimentos para transformá-los em materiais utilizáveis pela indústria de cimento.

Finalmente, experiências regionais, tais como uso de escórias de cobre, níquel, manganês e outros materiais como pozolanas naturais, que comprovem efetivamente pozolanidade ou hidraulicidade, deverão ser continuadas, pois poderão constituir solução específica e pontual para mitigação do CO₂.

⁸ Embora a expectativa seja de aumento da produção absoluta de cinzas, a participação das térmicas na matriz nacional, que já é mínima, deverá cair ainda mais.

⁹ Argilas calcinadas demandam cerca de 70% da energia requerida para a calcinação do clínquer (ou cerca de 2,5 MJ/t). Assim, embora as emissões de processo (descarbonatação) sejam evitadas, ainda ocorrem as emissões relativas à queima de combustível, porém em menor escala.0

Figura 5: Características dos substitutos de clínquer no Brasil

Substitutos de clínquer	Fonte	Características gerais dos cimentos com adições em relação aos cimentos puros		Nível estimado de produção e consumo
		Positivas	Limitantes	
Escória granulada de alto forno	Produção de ferro gusa	Altas resistências mecânicas a longas idades e melhoria na durabilidade	Maior consumo elétrico da moagem e menor resistência inicial; regionalização da oferta	Produção: 7,4 Mt em 2014, 11,1Mt em 2030 e 14,9 Mt em 2050 Consumo: 7,1 Mt em 2014, 10,0Mt em 2030 e 14,8 Mt em 2050
Cinzas volantes	Termelétricas a carvão mineral	Baixa demanda de água, melhoria da trabalhabilidade, maior resistência mecânica a longas idades, melhoria da durabilidade	Menor resistência mecânica relativa, principalmente às primeiras idades, regionalização da oferta	Produção: 2,2 Mt em 2014, 3,0Mt em 2030 e 3,3Mt em 2050 Consumo: 1,4Mt em 2014, 2,7Mt em 2030 e 3,1 Mt em 2050
Argilas calcinadas	Especificamente produzidas a partir de minas de argila	Melhoria da durabilidade e distribuição irrestrita	Menor resistência mecânica relativa, principalmente nas primeiras idades e maiores contrapartidas para garantia da reologia	Grande disponibilidade de reserva de argilas Consumo: 1,5 Mt em 2014, 3,4 Mt em 2030 e 5,4 Mt em 2050
Fíler calcário	Minas de calcário	Melhoria da trabalhabilidade e efeito sinérgico quando associado a argilas calcinadas	Limitação de teor no cimento, por não apresentar o mesmo desempenho que adições tradicionais	Grande disponibilidade de reservas de calcário Consumo: 4,0 Mt em 2014, 16,4 Mt em 2030 e 33,5 Mt em 2050
Escória ácida de alto forno	Produção de gusa a carvão vegetal	Melhoria da durabilidade, maior resposta a cura térmica	Menor resistência mecânica relativa, principalmente nas primeiras idades	Produção: 1,22 Mt em 2030 e 1,64 Mt em 2050 Consumo: 0,24 Mt em 2030 e 0,49 Mt em 2050
Escória de aciaria	Produção de aço	Diminuição do fator clínquer, efeito sinérgico com escórias de alto-forno	Menor resistência mecânica relativa, principalmente nas primeiras idades. Possibilidade de expansibilidade	Produção: 5,6 Mt em 2030 e 7,5 Mt em 2050 Consumo: 1,1 Mt em 2030 e 2,2 Mt em 2050

Desafios para a implementação

Alguns fatores limitantes para a adoção de cimentos com elevados conteúdos de adições são:

- Incertezas relacionadas à disponibilidade de escórias de alto forno dado o menor crescimento da oferta em relação ao aumento da produção de cimento.
- Devido à ausência de investimentos em termelétricas a carvão e à tendência de maior descarbonização da matriz energética, não haverá aumento significativo da disponibilidade de cinzas volantes, limitando-se a pouco mais do que é utilizado hoje em função da baixa taxa de utilização das termelétricas (atualmente em 50%).
- A disponibilidade regionalizada de escórias granuladas na região Sudeste e de cinzas volantes na região Sul inviabiliza seu uso em outras regiões do país.
- Falta de uma interação com as indústrias siderúrgicas e do aço no sentido de juntar esforços para a ativação de escórias não granuladas, ou mesmo para viabilizar o maior uso de escórias não tradicionais (manganês, níquel, cobre e outras). Assim, de um lado, haveria um aumento da disponibilidade de substitutos de clínquer e, de outro, destinação adequada para esses resíduos.
- As normas brasileiras limitam o uso de fíler calcário em no máximo 10%, sendo necessária a criação de uma nova base normativa, permitido seu uso com outros materiais pozzolânicos e o desenvolvimento de outros tipos de cimentos.
- Necessidade de programas de pesquisa para o desenvolvimento de novos produtos (cimentos quaternários) com teores mais elevados de adições (fíler calcários e argilas calcinadas), bem como de novos materiais a serem utilizados como substitutos de clínquer.
- Desinformação do consumidor informal ("auto-construtor") quanto às melhores práticas de uso do cimento.



Combustíveis alternativos

O aumento no uso de combustíveis alternativos reduziria cerca de 55 Mt de CO₂ ou 13% da mitigação cumulativa de emissões de CO₂ até 2050 no "Cenário 2°C", em comparação com o "Cenário 6°C".

A energia necessária ao seu processo produtivo faz com que a indústria do cimento seja um dos cinco setores mais intensivos em energia no mundo. Por este motivo, procura-se constantemente diversificar a gama de combustíveis utilizados.

Cerca de 85% dos energéticos utilizados pelo setor no Brasil são de origem fóssil, quase que exclusivamente coque de petróleo. Os outros 15% são classificados como combustíveis alternativos, estando subdivididos, essencialmente, em resíduos e biomassas.

A utilização de combustíveis alternativos no processo produtivo reduz a quantidade necessária de combustíveis fósseis, contribuindo para a redução dos gases de efeito estufa por apresentarem menor fator de emissão de CO₂, isto é, emitem menos carbono para gerar a mesma quantidade de energia.

Os fornos de cimento possuem características favoráveis à queima de resíduos, como altas temperaturas, longo tempo de residência em temperaturas acima de 1.450°C, atmosfera oxidante, destruição total dos componentes orgânicos e a não geração de cinzas, entre outras.

A operação combinada de fabricar cimento conjuntamente com a queima de resíduos é conhecida como coprocessamento. Além de reaproveitar o valor energético e a fração mineral destes resíduos, em substituição a combustíveis fósseis não renováveis, o coprocessamento diminui o impacto ambiental causado pela disposição inadequada desses rejeitos na natureza.

Mesmo que problemas técnicos limitem a utilização de certos resíduos para coprocessamento, a gama daqueles que são adequados é muito grande¹⁰.

Tabela 2: Principais tipos de resíduos utilizados pela indústria do cimento

Resíduos oleosos	Pneus inservíveis
Solventes	Resíduos de fábricas de borracha
Graxas	Lama de processos químicos
Resíduos têxteis	Fundos de destilação
Resíduos plásticos	Lama de esgoto municipal
Serragem	Farinha e ossos de animais
Resíduos de fábricas de papel	Grãos de validade vencida

¹⁰ Além daqueles não utilizados por limitações de processo, alguns resíduos são proibidos pela legislação brasileira, como os radioativos, explosivos e os oriundos do sistema de saúde.

Diferentes tipos de resíduos têm sido utilizados como combustíveis alternativos nos fornos de cimento na Europa, Japão, Estados Unidos, Canadá e Austrália desde o início dos anos 70.

No Brasil, as atividades de coprocessamento de resíduos industriais iniciaram-se na década de 90, nos estados do Sul e Sudeste. Entretanto, a experiência de uso de combustíveis alternativos pela indústria de cimento é antiga e pioneira, registrando-se na década de 80 o uso de palha de arroz, moinha de carvão vegetal da indústria siderúrgica, casca de coco de babaçu, bagaço de cana, entre outros.

Em 1999, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), do Ministério do Meio Ambiente, publicou resolução definindo as diretrizes para o licenciamento do coprocessamento, iniciativa complementada posteriormente por outra resolução estabelecendo limites de emissão para dioxinas e furanos.

Desde então, a utilização dos fornos de fabricação de clínquer como ferramenta para a gestão de resíduos vem se tornando cada vez mais importante no cenário nacional.

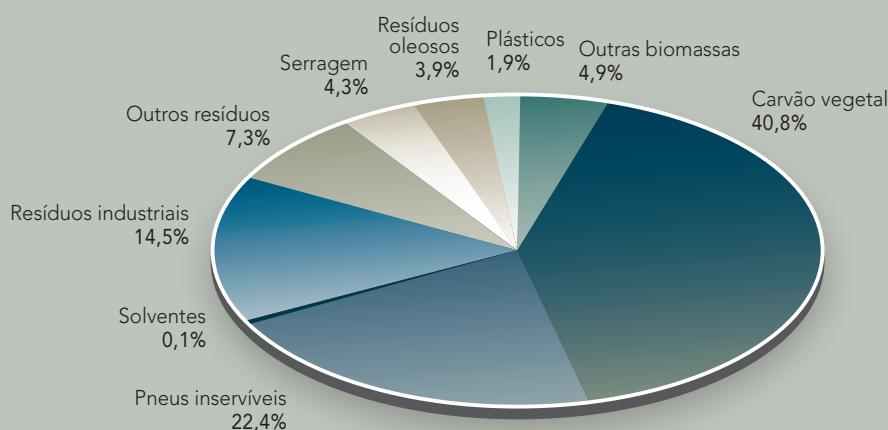
Em 2010, a Lei 12.305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabeleceu uma hierarquia na gestão de resíduos e priorizou o aproveitamento energético frente à disposição em aterros, o que fortaleceu, ao nível legal, a opção pelo coprocessamento de resíduos.

Atualmente cerca de 60% das fábricas integradas possuem fornos licenciados para coprocessar resíduos.

O consumo de combustíveis alternativos pelo setor no Brasil tem aumentado consideravelmente. Todavia, quando comparado o nível atual de substituição térmica (15%) com o de outros países, constata-se existir um grande potencial para o incremento no aproveitamento energético dos resíduos e biomassas, incluindo os resíduos sólidos urbanos.

Em 2014, a indústria brasileira do cimento utilizou 1,5 milhão de toneladas de resíduos e biomassas, representando 15% do total de energia consumida, sendo 8% proveniente de resíduos e 7% de biomassa.

Figura 6: Perfil dos combustíveis alternativos utilizados pela indústria brasileira



Mensagem-chave: Com a escassez total de moinha de carvão vegetal vislumbrada já para 2030, a indústria de cimento deverá buscar outras fontes de biomassa.

Fonte: CSI, 2014; ABCP, 2016

Para alcançar o “Cenário 2°C” no futuro, o setor pretende aumentar a substituição térmica para 35% até 2030 e 55% até 2050. Sob essa ótica, baseando-se em tendências internacionais e também na realidade e em condicionantes brasileiras, foi avaliada uma possível evolução dos principais tipos de combustíveis alternativos e o respectivo potencial de utilização pela indústria brasileira do cimento.

Estes energéticos foram identificados em sete tipologias distintas, sendo quatro já bastante utilizadas pela indústria: pneus inservíveis, resíduos industriais perigosos (*blend*¹¹), resíduos industriais não perigosos e moinha de carvão vegetal; e outros três

com grande potencial de exploração e, principalmente, com menor fator de emissão¹²: combustível derivado de resíduos sólidos urbanos (CDR), lodo de tratamento de esgoto e resíduos agrícolas.

No caso dos **pneus inservíveis**, que atualmente representam o resíduo mais utilizado pela indústria, a tendência é de menor disponibilidade no mercado futuro em razão do surgimento de novas soluções para reciclagem e utilização em obras civis. Por esta razão, apesar de um esperado aumento na frota de veículos, o percentual de utilização de pneumáticos pela indústria do cimento não deverá experimentar significativas alterações no futuro¹³.

¹¹ Óleos, solventes, tintas e outros.

¹² As biomassas puras, como lodo de tratamento de esgoto e resíduos agrícolas, são consideradas neutras em carbono, com fator de emissão igual a zero. No caso dos CDR, considera-se uma fração de biomassa de cerca de 30% para o contexto brasileiro.

¹³ Atualmente cerca de 70% dos pneumáticos no fim de vida são destruídos através do coprocessamento no país.

Os *blends* de **resíduos industriais perigosos** preparados pelas plataformas de blendagem possivelmente serão limitados pela redução da sua geração e custos de preparação. Por este motivo, também não é esperada variação significativa nos percentuais de *blend* nas próximas décadas.

Os insumos mais promissores são certamente os combustíveis derivados de resíduos (CDR) produzidos a partir de resíduos não perigosos e de resíduos sólidos urbanos (RSU).

A disponibilidade de **resíduos industriais não perigosos** deve aumentar no futuro com a limitação da disposição em aterros imposta pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

O combustível derivado de **resíduos sólidos urbanos (CDR)** apresenta enorme potencial, em virtude de maiores pressões ambientais para a redução ou eliminação de aterros em um futuro próximo. Porém, podem ser fatores limitantes a esta alternativa: necessidade de um maduro sistema de coleta seletiva e triagem dos materiais; distância da fábrica em relação aos grandes centros urbanos; dificuldade de estabelecimento de contratos que garantam o suprimento de resíduos;

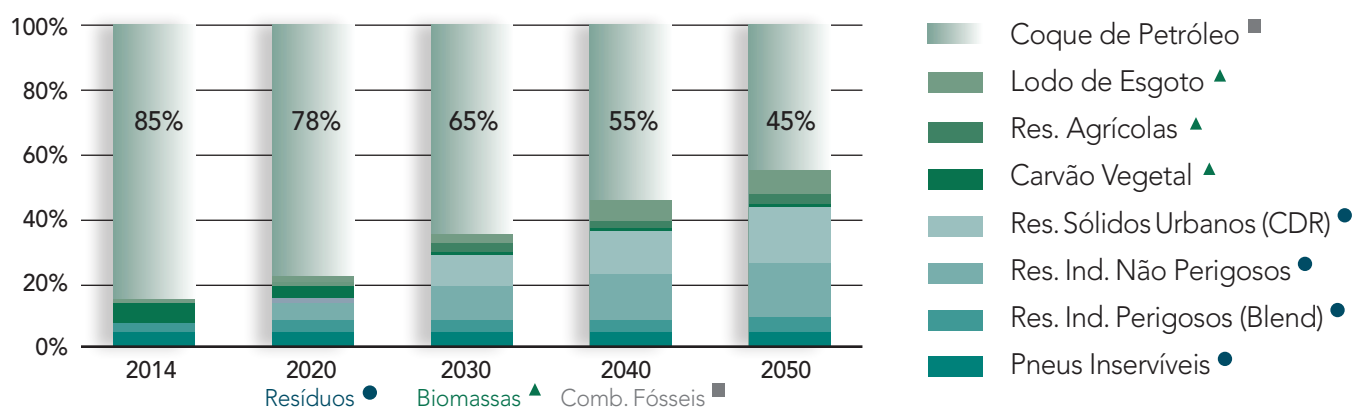
questões técnicas relacionadas a excesso de cloro; e necessidade de processamento para tornar o lixo (RSU) combustível¹⁴.

Com relação às biomassas, a principal fonte utilizada atualmente é a **moinha de carvão vegetal** (resíduos do carvão vegetal), resíduo proveniente das pequenas usinas de ferro gusa. Em virtude da retração deste setor e da sua esperada mudança de rota tecnológica no futuro, é projetada a total escassez desse energético já em 2030. Com isso, o setor precisará buscar outras fontes alternativas de biomassa.

Uma alternativa está no uso potencial de **resíduos da agroindústria**. No entanto, sendo o Brasil um país de dimensões continentais, deve-se levar em consideração a regionalização, ou seja, os locais de produção agrícola, a quantidade, sazonalidade, custos de coleta, transporte etc.

O **lodo de esgoto**, produzido a partir de estações de tratamento de efluentes municipais, poderá ter potencial para coprocessamento em um futuro próximo também, porém com impacto limitado na substituição térmica devido ao baixo poder calorífico e à necessidade de secagem em função da elevada umidade.

Figura 7: Evolução da utilização de combustíveis alternativos no "Cenário 2°C"



Mensagem-chave: A participação de combustíveis fósseis não renováveis na produção de cimento deverá decrescer de 85% para 45% no "Cenário 2°C", em função do uso crescente de resíduos e biomassas.

Fonte: IEA - modelagem desenvolvida para este projeto. © OECD/IEA, 2016

¹⁴ Para transformar o lixo (Resíduo Sólido Urbano – RSU) em combustível ele deve passar por um extenso processo de preparação e tratamento visando separar a porção reciclável.

Desafios para a implementação

- **Limitações técnicas:**

Embora seja possível a substituição térmica por 100% de combustíveis alternativos, desafios técnicos podem surgir devido às diferenças significativas em relação aos combustíveis tradicionais, como por exemplo o baixo poder calorífico, altas concentrações de cloro e umidade ou a presença de outras substâncias prejudiciais ao processo. Com relação especificamente as biomassas, além do exposto, deve-se considerar ainda as dificuldades de manuseio e estocagem, devido a sua baixa densidade, assim como sua disponibilidade, relacionada à regionalização das diversas culturas e à sazonalidade, uma vez que só estariam disponíveis durante os períodos de colheita.

- **Limitações econômicas:**

- O baixo custo da destinação em aterros e lixões não favorece a competitividade com outras tecnologias de tratamento, como CDR.
- Proximidade das plantas de cimento com centros urbanos e/ou fontes de geração de biomassas e resíduos.
- Competição com outras alternativas de recuperação energética ou de materiais.
- Dificuldades e custos de logística.

- **Legislação:**

- Processos de licenciamento longos e burocráticos.
- Leis que dificultam ou proíbem a recuperação energética de resíduos sólidos.
- A possibilidade de haver resoluções estaduais que impeçam ou limitem o depósito, a guarda e o processamento de resíduos perigosos gerados fora do estado.
- Não cumprimento das legislações locais e federais que restringem a disposição em aterros ou incineração dedicada.
- Não atendimento à hierarquia de gestão de resíduos estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, que prioriza a recuperação energética frente à disposição em aterros.
- Dificuldade de estabelecimento de contratos de longo prazo de suprimento de resíduos urbanos com os agentes públicos.

- **Relação com as comunidades locais:**

O coprocessamento de resíduos pode afetar fortemente o relacionamento com a comunidade no entorno. As pessoas, por falta da devida informação, frequentemente associam a utilização de resíduos com o aumento de emissões prejudiciais, quando na realidade ocorre o contrário¹⁵.



¹⁵ Controles de processo e padrões de emissão para unidades que coprocessam resíduos são ainda mais restritivos que para aqueles que utilizam combustíveis convencionais.

Melhorias na eficiência energética reduziram cerca de 38 Mt de CO₂ ou 9% da mitigação cumulativa de emissões de CO₂ até 2050 no “Cenário 2°C”, em comparação com o “Cenário 6°C”.

A produção de cimento é uma atividade intensiva em energia ao longo de todo o seu processo, desde a preparação das matérias-primas até a moagem do produto final, passando pela produção de clínquer a temperaturas que chegam a 1.450°C.

A indústria brasileira do cimento vem adotando ações para melhoria de sua eficiência energética já há muitos anos. Nas décadas de 70 e 80, após as duas principais crises do petróleo, várias empresas incorporaram medidas de economia de energia em seus processos de fabricação, desde ajustes operacionais mais simples até mudanças mais complexas e intensivas em investimento, em processos e equipamentos. Um exemplo foi a rápida substituição do processo via úmida pelo processo via seca na produção de cimento. O processo via úmida, intensivo em energia e que representava cerca de 80% da produção no início dos anos 70, transformou-se em processo via seca, que alcançou quase 90% da produção já na primeira metade da década de 80. Atualmente, 99% do cimento no Brasil é produzido por processo via seca.

Nos últimos dez anos, em resposta à crescente demanda do setor de construção, a indústria duplicou a produção de cimento e ampliou em 50% a capacidade instalada, atingindo 71 milhões e 100 milhões de toneladas/ano, respectivamente. Para tanto, foram utilizadas as mais modernas tecnologias disponíveis (BATs¹⁶).

Hoje, cerca de 40% do parque industrial possui menos de 15 anos e conta com mais de 70% de seus fornos equipados com torres de pré-aquecedores de 4 a 6 estágios e pré-calcinadores. Modernos resfriadores de grelha equipam 80% dos fornos brasileiros e aproximadamente 46% dos moinhos de matéria-prima são verticais, considerados os de menor consumo elétrico.

Com isso, o setor consegue atingir um consumo térmico médio de 3,50 GJ/t de clínquer (836 kcal/kg clínquer) e uma demanda elétrica média de 113 kWh/t de cimento (CSI 2014)¹⁷.

Dado esse perfil moderno e eficiente, esperam-se mudanças mais significativas no consumo térmico a partir de 2030, quando unidades mais antigas - com mais de 40 anos - e equipamentos obsoletos serão gradualmente substituídos por

unidades que utilizarão a melhor tecnologia disponível na época (BAT). Há de se considerar também o efeito do aumento da produção de cimento após 2030, o que abre o potencial para integrar as BATs com a nova capacidade de produção.

Além disso, uma série de medidas de eficiência energética deverão ser adotadas com vistas não só à redução das emissões, mas visando a melhoria geral nas operações. Dentre essas, as mais efetivas são as de aumento da eficiência térmica das plantas: controles de processo e otimização da produção, melhoria da queimabilidade pelo uso de mineralizadores e otimização da recuperação de calor no resfriamento do clínquer.

Devido ao seu baixo custo e fácil implementação, o aprimoramento dos **controles de processo e otimização da produção** é uma das medidas mais promissoras. Essa é a opção de melhor penetração na indústria brasileira nos próximos anos, mesmo porque os sistemas de monitoramento automatizado de processos estão disponíveis e tendem a ser cada vez mais eficientes devido ao aumento da capacidade de processamento de dados e melhoria contínua dos algoritmos para tratamento das informações.

Já a melhoria da queimabilidade usando **mineralizadores**, embora tenha grande potencial de redução de emissões, enfrenta dificuldade de ser implementada no país devido à escassez de jazidas de fluorita, um dos principais mineralizadores. Além disso, a solução requer uma tecnologia específica, a ser aprimorada.

Com relação às medidas de eficiência elétrica, deve-se considerar que, em função da matriz elétrica predominantemente renovável no país, a participação do consumo elétrico nas emissões do setor é significativamente menor que a média mundial (apenas 1%, contra 5% no mundo). Dentre as medidas estudadas que apresentaram maiores potenciais está a **recuperação de calor residual** (*waste heat recovery - WHR*) para a produção de energia elétrica. O potencial de economia elétrica desta tecnologia é bastante significativo, com cerca de 20% a 30% de redução do consumo total da fábrica. Somente esta alternativa apresenta o mesmo impacto que todas as outras opções de redução

¹⁶ Best available technologies (BATs, na sigla em inglês)

¹⁷ Valores obtidos a partir do banco de dados Getting the Numbers Right, da Cement Sustainability Initiative – CSI, 2014

do consumo elétrico aqui apresentadas somadas. Estima-se que essa tecnologia poderia ser adotada em cerca de 35% das plantas brasileiras em médio prazo (2030).

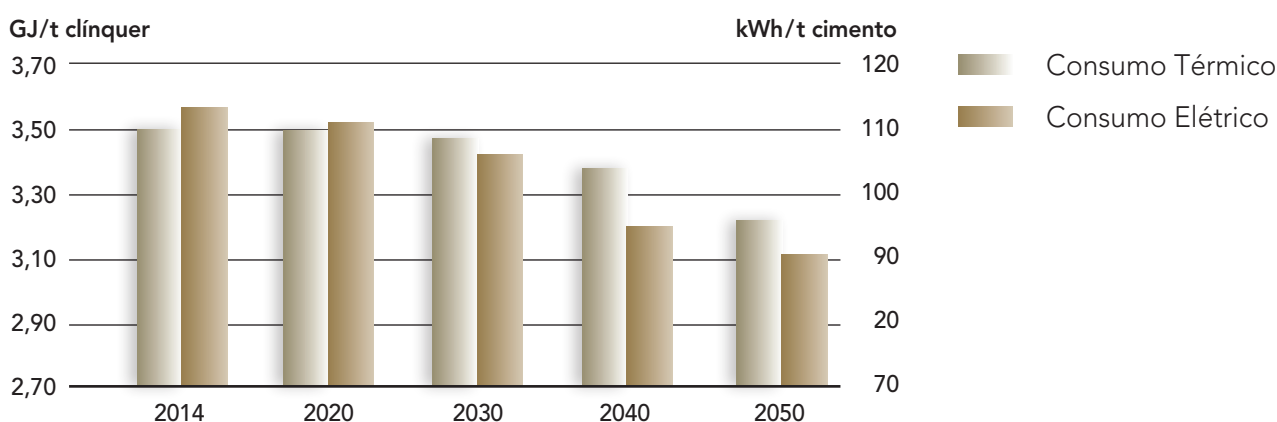
Apesar de a contribuição dessas tecnologias ser modesta em termos de redução das emissões de CO₂, deve-se considerar também: substituição dos moinhos de bolas por **moinhos verticais de rolos, HPGR ou moinhos horizontais**; utilização de **separadores de alta eficiência**; **otimização da operação dos moinhos de cimento**; e **medidas gerais** (utilização de motores de alta eficiência, uso de Unidades de Velocidade Variável (VSD), manutenções preventivas e redução de vazamentos de ar).

Com tudo isso, seria possível alcançar valores próximos a 3,22 GJ/t de clínquer e 91 kWh/t de cimento até 2050 (87 kWh/t de cimento, excluindo as ações de CCUS¹⁸).

Com base nesses números, em um “Cenário de 2°C”, se todas as demais variáveis se mantivessem constantes, estima-se que a redução do consumo térmico seria algo em torno de 137 PJ e a economia elétrica superior a 3.000 GWh, em relação ao “Cenário de 6°C”.

Em termos de mitigação de carbono, essa economia energética resultaria em uma redução das emissões de cerca de 38 Mt CO₂ no período de 2014 a 2050.

Figura 8: Intensidade térmica e elétrica na produção de cimento no “Cenário 2°C”



Mensagem-chave: Avanços mais significativos em eficiência térmica e elétrica serão observados principalmente a partir de 2030, com a substituição de unidades e equipamentos mais obsoletos por novas plantas operando com as melhores tecnologias disponíveis à época (BAT).

Fonte: IEA - modelagem desenvolvida para este projeto. © OECD/IEA, 2016

Box 2: A importância de cenários integrados

É importante destacar que as diferentes alternativas de redução não podem ser tratadas isoladamente. Dessa forma, faz-se necessário considerar o impacto que algumas medidas têm sobre as outras. A busca por clínqueres mais reativos para permitir maior nível de adições e a substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos, com maiores teores de umidade e cloro, têm um impacto negativo no consumo térmico do forno. Sob essa mesma ótica, medidas de CCUS também interferem no consumo elétrico da unidade. Logo, em uma análise integrada dos diferentes cenários e alternativas de redução, na prática torna-se impossível alcançar o estado da arte em termos de consumo térmico (2,9 GJ/t clínquer) e elétrico (80 kWh/t cimento).



¹⁸ Captura e Uso ou Estocagem de Carbono (Carbon Capture and Utilization or Storage)

Desafios para a implementação

O consumo térmico e elétrico específico depende de diversos fatores, como a eficiência térmica dos equipamentos utilizados, a maneira como os materiais são transferidos ao longo do processo, o nível de automação e a qualidade das matérias-primas e combustíveis.

Algumas barreiras que impedem a indústria de atingir menores níveis de consumo energético são:

- **Investimentos:** A diminuição do consumo específico em plantas mais antigas requer grandes modernizações (*retrofits*), que normalmente necessitam de elevados investimentos e só se justificam economicamente se houver necessidade de aumento da produção.
- **Crédito:** As barreiras econômicas e financeiras são possivelmente as mais importantes, em função dos altos investimentos exigidos por algumas medidas. Neste aspecto, são entraves comuns: dificuldade de acesso ao capital, alto custo para desenvolvimento de oportunidades, elevados riscos econômicos e existência de custos não identificados inicialmente. Outra importante barreira são os elevados custos de importação de equipamentos, gerados pela combinação de altas taxas de importação no Brasil e taxas cambiais desfavoráveis.
- **Exigências ambientais:** As políticas públicas para mitigação de impactos ambientais da indústria têm se tornado cada vez mais restritivas, resultando em acréscimo no consumo energético específico. Por exemplo, com a instalação de filtros de manga em vez de precipitadores eletrostáticos; adoção de sistemas mecanizados de carregamento e descarregamento, a fim de evitar emissão de poeiras fugitivas; e instalação de novos controles de emissão de gases (NO_x , SO_x e outros).
- **Aumento do uso de combustíveis alternativos:** Esses combustíveis requerem maior quantidade de ar, sistemas de preparação e injeção, além de apresentarem maior teor de umidade e granulometria. Por outro lado, seus menores fatores de emissão superam as desvantagens causadas pelo aumento do consumo energético.



Tecnologias inovadoras e emergentes

A viabilização de tecnologias inovadoras e emergentes reduziria cerca de 38 Mt de CO₂ ou 9% da mitigação cumulativa de emissões de CO₂ até 2050 no “Cenário 2°C”, em comparação com o “Cenário 6°C”.

As alternativas tradicionalmente utilizadas e conhecidas do setor para a mitigação de suas emissões apresentam um limite tecnológico e operacional. À medida que a indústria se aproxima dessa barreira, é preciso buscar soluções disruptivas de longo prazo, que lhe permitam ir além, rumo a um processo produtivo menos intensivo em carbono e consistente com o “Cenário de 2°C”.

Entre as alternativas inovadoras e emergentes, a **captura e utilização ou armazenamento de carbono** (CCUS – *Carbon Capture and Utilization or Storage*) surge como uma das principais soluções tecnológicas com potencial de aplicação para grandes fontes emissoras, como é o caso do setor de cimento.

Na cadeia do processo de CCUS, consideram-se usualmente três etapas básicas: (i) captura e separação de CO₂ na fonte emissora, (ii) transporte e (iii) utilização em outros processos de produção, como o cultivo de algas (biomassa para utilização como combustível) ou mesmo armazenamento permanente em reservatórios geológicos.

Captura de CO₂

Os processos de captura de CO₂ para aplicação na produção de clínquer são os mesmos considerados na geração de energia de outros setores industriais: pré-combustão, pós-combustão e oxi-combustão.

Dentre estes, a pré-combustão é a menos viável para aplicação na indústria do cimento. Sua aplicabilidade dependeria da viabilidade de adaptação do processo de produção de clínquer para utilizar hidrogênio como combustível principal no forno. Ainda assim, a emissão de CO₂ gerado pela calcinação continuaria sem ser evitada, sendo necessário um processo pós-combustão para isto. Logo, estima-se um potencial de redução de CO₂ de menos de 40% do total emitido (ECRA, 2009/2017).

As técnicas de **pós-combustão** são mecanismos de captura que não requerem mudanças significativas no processo de produção e permitem o *retrofit* de unidades que já estão em operação, a depender de restrições de espaço físico. Entre as opções de pós-combustão, estão:

- **Absorção química:** Método de separação do CO₂ dos demais gases efluentes por meio de soluções químicas, como as aminas. Este processo é o mais avançado, sendo já utilizado comercialmente

em outros setores, e pode alcançar altos índices de captura. No setor de cimento, há testes em escala piloto que apontam para um potencial de redução de até 95% do CO₂, demandando contudo consumo térmico e elétrico adicional (Ketzer et al, 2016; ECRA, 2009/2017).

- **Utilização de membranas:** A solução é interessante do ponto de vista operacional. As membranas são pequenas, requerem pouco monitoramento e manutenção, não necessitam de energia para regeneração e não geram rejeitos. Entretanto, ainda é necessário desenvolver materiais e técnicas de limpeza apropriados. Têm um potencial de absorção de até 80% do CO₂ emitido (ECRA, 2009/2017).
- **Ciclo do cálcio:** É um processo de absorção química em que o cálcio é colocado em contato com o gás de combustão contendo CO₂, formando carbonato de cálcio. A tecnologia vem sendo considerada como opção potencial para *retrofit* de fornos existentes, embora apresente um acréscimo significativo no consumo térmico. Resultados em escala laboratorial apontam para um potencial de redução de até 85% de CO₂ (Romano, M. C. et al, 2013 in Technology Roadmap 2018).

A tecnologia de **oxi-combustão** (queima de oxigênio puro em vez de ar), embora ainda seja muito cara, é considerada bastante promissora para aplicação na indústria de cimento.

Duas possibilidades são consideradas para implementar este tipo de processo na produção de clínquer:

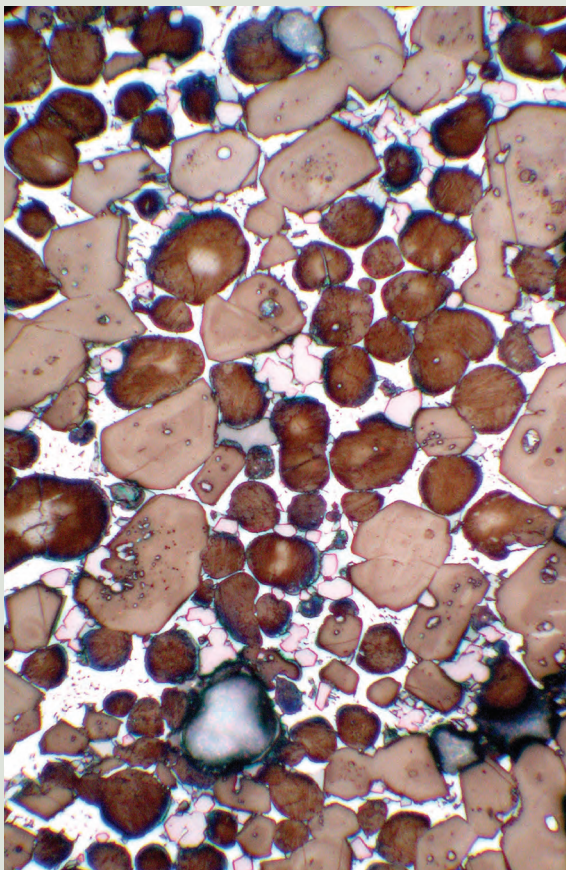
- **Oxi-combustão parcial (aplicada apenas no calcinador):** As plantas existentes poderiam ser adaptadas para usar essa tecnologia. Por este processo, cerca de 60% a 75% das emissões de CO₂ do forno poderiam ser capturadas (Ketzer et al, 2016; ECRA, 2017).
- **Oxi-combustão completa (aplicada no calcinador e no forno rotativo):** A torre de pré-aquecimento não requer alterações. O forno, entretanto, deve ser adaptado ou remodelado para operar em condições de oxi-combustão. Este processo proporcionaria captura de CO₂ da ordem de 90% a 99% (Ketzer et al, 2016 ; ECRA, 2017).

Existem algumas experiências em fornos de clínquer nos Estados Unidos e na Europa que foram operadas com enriquecimento de oxigênio para aumentar a capacidade de produção. A tecnologia de oxi-combustão tem sido investigada também em usinas de geração de energia, com resultados que podem ser transferidos para os fornos de cimento. Há ainda pesquisas em andamento na indústria de cimento que investigam o processo de oxi-combustão para queima de clínquer e o impacto na qualidade do produto e custos (ECRA, 2017).

Armazenamento de CO₂

Uma vez capturado e separado dos demais componentes do efluente, o CO₂ precisa ser transportado até o local de utilização ou armazenamento. As opções de destinação final do CO₂ devem levar em consideração diversos fatores e avaliadas caso a caso. Em particular, o volume gerado e o grau de pureza do CO₂ obtido irão determinar se ele pode ser utilizado ou armazenado permanentemente.

Os custos referentes às atividades de **captura e armazenagem de carbono (CCS - Carbon Capture and Storage)** incluem, além da captura e separação, o transporte, armazenamento geológico e monitoramento ambiental.



Fotomicrografia de clínquer observado sob microscópio de luz refletida com presença dos silicatos cálcicos.

Os reservatórios considerados ideais para o armazenamento de CO₂ são formações rochosas criadas pela deposição de sedimentos acumulados em bacias sedimentares. Esses reservatórios devem possuir porosidade e permeabilidade suficientemente altas, dispor de formações que impeçam o retorno do CO₂ armazenado para a superfície e situar-se a uma profundidade suficiente para armazenamento de grandes quantidades em volumes pequenos, entre outras características.

Utilização de CO₂

Alternativamente à estocagem permanente do carbono, o CO₂ pode ser reutilizado em vários processos e indústrias. Embora o seu potencial seja limitado devido ao grande volume de CO₂ emitido pela indústria de cimento, a **captura e utilização do carbono (CCU - Carbon Capture and Utilization)** apresenta-se como uma solução mais promissora para o setor que o CCS, em função do seu custo. Atualmente existem diversos projetos e estudos em andamento sobre a utilização do CO₂.

Pequenos volumes de CO₂ podem ser utilizados em outras indústrias, como, por exemplo, a de alimentos, embora seja necessário um produto de alta pureza. Como usualmente os volumes obtidos são elevados, devem ser consideradas outras opções, como a utilização em **recuperação terciária de hidrocarbonetos (EOR - Enhanced Oil Recovery)**. Neste processo, o CO₂ é injetado em campos de petróleo para aumentar sua pressão e se dissolver nos fluidos do reservatório, aumentando o fator recuperação de petróleo.

Uma opção de utilização do CO₂ é o processo de **carbonatação mineral**, em que o gás capturado reage com minerais, geralmente silicatos de cálcio ou magnésio, e os produtos da reação (carbonatos de cálcio e magnésio) podem ser utilizados como material de construção ou armazenados.

Ouro processo transforma o CO₂ em **bicarbonato de sódio** por meio de três etapas - tratamento do gás, absorção e transformação eletroquímica -, sendo que cada uma destas fases já é utilizada pela indústria. Em 2014 foi inaugurada uma planta com esta tecnologia associada a uma fábrica de cimento com capacidade para capturar 75.000 t de CO₂ por ano. A principal barreira para o seu uso é a própria saturação no mercado de bicarbonato. Por estas razões, esta tecnologia só pode ser considerada como parte de um portfólio com outras tecnologias ou apenas atender à mitigação parcial do CO₂ emitido pela indústria cimenteira.

A utilização de **algas para capturar o CO₂** surge como outra opção em estudo pela indústria. A tecnologia produz biomassa, que pode ser utilizada

como fonte de energia, agregando receita e potencializando a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Neste processo, a eficiência fotossintética das algas é elevada, desenvolvendo-se mais rapidamente que outras opções biológicas. Além disso, as algas não dependem de áreas terrestres e não competem com a produção de alimentos. Por outro lado, elas demandam água. A principal barreira para a expansão do seu uso na indústria de cimento é o estágio atual de desenvolvimento da tecnologia. Tanto a eficiência de conversão quanto os custos ainda não são competitivos, especialmente se compararmos com o etanol da cana-de-açúcar e a bioenergia, que também convertem a radiação solar em vetores energéticos.

Existem ainda outros projetos em andamento visando a utilização do carbono, como o que captura os gases de exaustão por meio de micro-organismos que convertem CO₂ e hidrogênio em combustíveis e/ou bioplásticos. Outro processo é a conversão do CO₂ em metanol e ácido fórmico, produtos químicos que podem ser utilizados como combustíveis ou na produção de hidrogênio.

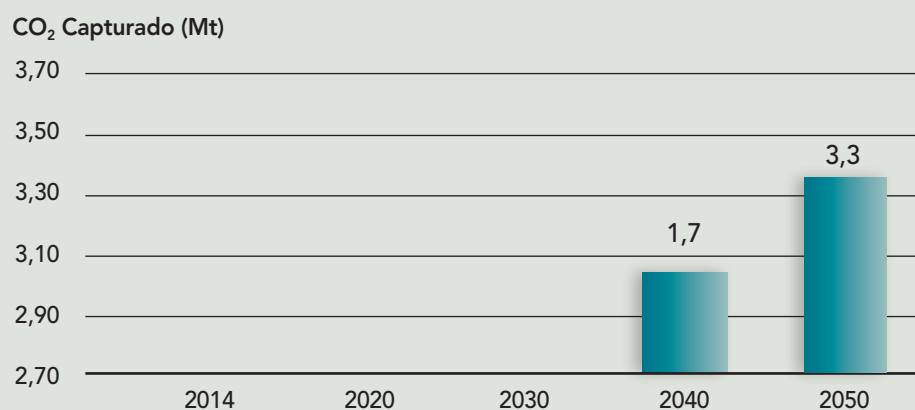
Nota: esta seção inclui diversos tipos de aplicações com características diferentes em relação à duração do efeito de retenção do carbono. Embora o CO₂ utilizado na indústria de alimentos e bebidas seja liberado de volta para a atmosfera logo após o uso, outras aplicações, como o EOR, onde o CO₂ é retido no subsolo, têm um efeito permanente.

À medida que as limitações das emissões de CO₂ se tornam mais rigorosas ao longo do tempo e as alternativas usuais se aproximam do seu máximo potencial técnico, estratégias de mitigação de carbono mais dispendiosas, mas que proporcionam maiores reduções de CO₂, como a captura de carbono, precisam ser implantadas.

No “Cenário 2°C”, para alcançar os objetivos de redução de emissões ambicionados, alternativas deste tipo se tornariam viáveis na indústria do cimento brasileira a partir de 2040, uma vez que a redução da relação clínquer/cimento é identificada como uma alternativa mais custo-efetiva e que contribuiria com a maior parte do esforço de redução de emissões. Assim, CCUS teria um potencial de atingir em 2050 aproximadamente 3,3 Mt de CO₂ capturado por ano. Para isto, no entanto, é fundamental desde já o apoio à pesquisa e desenvolvimento (P&D) de todo tipo de tecnologia emergente e disruptiva, de modo a favorecer sua viabilidade técnica e econômica em larga escala em médio e longo prazos.

Finalmente, um aspecto que ainda requer pesquisa é a questão relativa à recarbonatação do concreto, fenômeno químico que ocorre tanto durante a vida útil do cimento aplicado como durante a reciclagem dos resíduos de construção e demolição, após o fim do período de serviço do concreto. É certo que este fenômeno ocorre, porém há necessidade de quantificá-lo para as diversas aplicações e uso do cimento.

Figura 9: Carbono capturado pela indústria do cimento no “Cenário 2°C”



Mensagem-chave: A captura de carbono, alternativa ainda emergente para a mitigação das emissões de CO₂, se tornaria viável para a indústria do cimento brasileira somente a partir de 2040.

Fonte: IEA - modelagem desenvolvida para este projeto. © OECD/IEA, 2016

Desafios para a implementação

As principais barreiras para a implementação do CCUS são:

- Os altos investimentos necessários e os custos operacionais, em especial o aumento daqueles relacionados à energia elétrica.
- Disponibilidade de toda a infraestrutura de transporte, acesso a locais de estocagem apropriados e políticas públicas para regulamentar os processos de licenciamento da operação.
- Aceitação pela sociedade e instituições ambientais com relação à segurança e efetividade de uma tecnologia complexa e dispendiosa como a estocagem de carbono.
- Custos potencialmente elevados de transporte de CO₂, considerando as dimensões territoriais do país, com ressalva à utilização de consórcios com outras fontes emissoras: etileno, etanol, termelétricas, siderúrgicas, refinarias, amônia, processamento de gás natural e recuperação avançada de óleo (EOR), o que diluiria os custos de investimento e operacionais (CAPEX e OPEX).
- Necessidade de uma articulação nacional em favor da construção de uma agenda política para o CCUS, incluindo temas como tributação, incentivos fiscais, mecanismos de desenvolvimento limpo, projetos de lei e outros.
- Elevados custos das etapas de captura, separação, transporte e armazenamento de dióxido de carbono, principalmente quando considerado o baixo valor agregado do produto.



Potencial de mitigação na cadeia da construção

Cada etapa do ciclo de vida de um produto apresenta impactos ambientais relevantes. Os estudos de emissão e mitigação de CO₂ do cimento, no entanto, têm se concentrado essencialmente na sua fase de produção. Existe, contudo, um potencial de redução das emissões nas etapas de uso e pós-uso dos produtos à base de cimento, por meio de ganhos de eficiência na produção de concretos, argamassas e das próprias construções, bem como através da carbonatação dos materiais cimentícios, isto é, o sequestro e reincorporação natural de CO₂ pelas edificações expostas a uma atmosfera cada vez mais rica em carbono.

Embora as oportunidades de redução de emissões além do estágio de fabricação do cimento não estejam dentro do escopo deste Roadmap, a adoção de uma abordagem mais ampla de ciclo de vida ao longo de toda a cadeia de valor da construção oferece um importante potencial de mitigação adicional que não deve ser desprezado. A seguir são descritas algumas destas oportunidades.

Industrialização do uso do cimento

No Brasil, o cimento ensacado representa 66% das vendas e é quase que integralmente utilizado para a produção de concretos e argamassas em pequenas obras e canteiros. Nestas condições, em que raramente existem conhecimento e equipamentos especializados, essenciais para o controle de variabilidade e otimização da formulação, utiliza-se mais cimento do que quando estes materiais são produzidos em instalações industriais. Neste cenário, com incentivos à industrialização da cadeia de valor do cimento, há potencial para a redução da demanda por cimento e maior mitigação das emissões de CO₂ associadas.

Concreto usinado ou industrializado

Os concretos misturados em obra têm consumo de cimento em torno de 350 kg/m³, enquanto os concretos produzidos em concretoira, a depender da resistência necessária e do tipo de uso, podem apresentar, por exemplo, um consumo de 285 kg/m³. Essa diferença de consumo, por si só, já representaria uma importante contribuição da industrialização para a mitigação do CO₂ na cadeia do cimento.

Adicionalmente, mudanças na política fiscal e outros incentivos permitiriam introduzir misturadores nas centrais de produção de concreto, reduzindo o consumo de cimento em mais 10%, de modo que o consumo específico médio atingiria 260 kg/m³. Esse ganho de competitividade favoreceria o uso do concreto usinado em detrimento do concreto “rodado em obra”, levando a uma taxa de crescimento pelo menos 50% superior à do cenário atual sem tais incentivos.

Estima-se que caso fosse criado um incentivo para produção de concreto usinado – seja ele utilizando caminhões betoneira ou mistura seca – haveria um potencial de redução das emissões da ordem de 47 Mt de CO₂ entre 2014 e 2050, correspondendo a cerca de 3,2% das emissões relativas à produção do cimento.

Argamassas industrializadas

A industrialização das argamassas de revestimento apresenta duas vantagens potenciais:

- (a) o uso do ar incorporado, aumentando em tipicamente 20% o rendimento do produto;
- (b) a redução do uso da cal hidratada, que é intensiva em CO₂.

Por outro lado, argamassa industrializada não apresenta vantagem de custos de produção apreciável quando comparada com a produzida em obra, pois requer embalagem e uso de areia seca, além dos impostos associados à atividade industrial. Por estas razões, seu ganho de mercado tem sido muito lento, consumindo de 2% a 3% da produção de cimento. Sem mudanças institucionais o produto não deverá ganhar mercado significativo no futuro próximo.

O teor de cimento típico das argamassas industrializadas é de cerca de 240 kg/m³, além de 14 kg/m³ de cal hidratada. As argamassas elaboradas na obra devem conter 260 kg/m³ de cimento e 17 kg/m³ de cal hidratada.

Estima-se que um incentivo para a industrialização das argamassas ofereça um potencial de redução das emissões de aproximadamente 29 Mt de CO₂ entre 2014 e 2050, cerca de 2% das emissões totais do cimento no período.

Produção de agregados

Acredita-se que melhorias na distribuição granulométrica e no formato dos grãos dos agregados permitiriam uma redução significativa no

volume médio de pasta (cimento, água, outros finos), reduzindo as emissões de CO₂ do concreto. A literatura aponta para volumes de pasta em concretos de 250 dm³/m³ em 2050, enquanto no Brasil o volume de pasta típico de concretos esteja em torno de 310 dm³/m³.

Um programa consistente que incentive a melhoria da produção de agregado possui um potencial de mitigação de cerca de 15% a 20% das emissões de CO₂ do concreto. Não existem dados equivalentes para as argamassas, mas a experiência laboratorial indica que este potencial é similar ao dos concretos.

Uma produção mais industrializada de concreto e argamassa aumenta as chances de sucesso desta estratégia, que é mais complexa que as demais, pois implica em desenvolvimento tecnológico, investimentos em milhares de unidades produtoras de agregados e mudança das práticas operacionais dos fabricantes e de seus clientes.

Racionalização na construção

A redução das perdas dos materiais possui um grande potencial mitigador, principalmente para revestimentos de argamassa. No Brasil, chega-se a utilizar cerca de 40% a mais de argamassas que o projetado devido somente a excesso de espessura, associado a imperfeições geométricas (desalinhamentos, desaprumos, desníveis) na construção. Uma redução de 40% na taxa de perdas de arga-

massa poderia levar a uma mitigação em torno de 10% das emissões.

Dados da literatura internacional revelam que, a depender do projeto, o consumo de concreto pode variar entre 0,2 e 0,6 m³/m² de área útil. No Brasil, esses dados são menores, entre 0,2 e 0,35 m³/m², mas igualmente dispersos. Considerando todas as oportunidades, os ganhos de eficiência possuiriam um potencial para reduzir cerca de 20% a 25% das emissões totais da produção de cimento.

Recarbonatação: captura de carbono pelos materiais cimentícios

Os materiais cimentícios, durante a fase de uso e pós-uso da construção, capturam CO₂ da atmosfera por meio da reação de recarbonatação. Se a descarbonatação da matéria-prima é inerente ao processo produtivo do cimento, a sua recarbonatação é inerente ao produto ao longo dos anos. No entanto, sua quantificação é ainda pouco estudada e existem poucos trabalhos que estimam a quantidade de carbono recapturado.

Com base no modelo publicado pela *Nature Geoscience*¹⁹, estima-se de modo conservador que entre 2014 e 2050 a carbonatação das argamassas produzidas desde o ano 1950 poderiam capturar algo em torno de 220 Mt CO₂, cerca de 23% do CO₂ oriundo apenas do processo de calcinação do clínquer, ou 15% do total emitido pela fabricação do cimento no período.

¹⁹ Xi, F. et al. Substantial global carbon uptake by cement carbonation. *Nat. Geosci.* advance online publication, (2016).

DIFERENÇAS REGIONAIS



Sementes de açai utilizadas como combustível alternativo para fabricação do clínquer

O Brasil é um país de dimensões continentais, com extensão territorial de mais de 8,5 milhões de km², o que o torna o quinto maior do planeta. Ele subdivide-se em cinco regiões geográficas – Norte [N]; Nordeste [NE]; Centro-Oeste [CO]; Sudeste [SE] e Sul [S] – obedecendo a critérios de semelhança nos aspectos físicos, humanos, culturais, sociais e econômicos.

Nesse contexto se posiciona a produção de cimento, distribuída de maneira heterogênea pelo território nacional. Sendo assim, de uma produção de mais de 71 Mt em 2014, a região SE representou mais de 47% da produção nacional. O NE respondeu pela produção de cerca de 22%, seguido pelo S, com 15%, CO, 12%, e N com 5%. Dentre os fatores determinantes para a localização das indústrias de cimento está a disponibilidade de matérias-primas, sobretudo das jazidas de calcário, e a proximidade de grandes centros urbanos consumidores. Muitas das diferentes alternativas de redução de emissões, contudo, também acompanham uma distribuição heterogênea nas diversas regiões, fazendo com que nem todas as plantas instaladas no país possuam os mesmos potenciais de redução.

Substitutos de clínquer

Uma importante diferença regional refere-se à distribuição dos materiais cimentícios substitutos do clínquer, que se reflete na grande variação do fator clínquer nas diferentes regiões brasileiras. Na região SE é que se registram as maiores taxas de substituição, chegando a 40% em 2014. Em grande parte essa substituição se dá pelo elevado uso de escória granulada de alto forno (26% a 28%) - seguida por filer calcário (6,5% a 8,5%) -, já que é lá que está instalada a maioria das usinas siderúrgicas do país. Já a substituição de clínquer por cinzas volantes concentra-se basicamente na região S, onde estão localizadas as usinas termelétricas a carvão.

A taxa de substituição desta região é de aproximadamente 32%, composta por cinzas volantes (18% a 22%) e filer calcário (5% a 7%). Por sua vez, a utilização de argilas calcinadas e outras pozolanas concentra-se na região N (14% a 16%), CO (8% a 10%) e NE (4,5% a 6,5%), com uma pequena utilização nas regiões SE e S. Espera-se no futuro uma redução do teor de escória granulada nos cimentos na região SE e um aumento nas regiões N e NE. Com relação às cinzas volantes, a expectativa é de uma ligeira queda dos teores praticados em 2050, mantendo a concentração na região S e uma pequena utilização nas regiões N e NE.

Combustíveis alternativos

A disponibilidade e utilização de combustíveis de baixo carbono na produção de cimento no Brasil também apresentam grandes diferenciações regionais, o que se traduz nas particularidades entre as porcentagens de substituição térmica praticadas em cada uma das regiões. A região SE destaca-se por ter as maiores taxas de utilização de combustíveis alternativos (21% a 23%), seguida pela região S (14% a 16%), CO (12,5% a 14,5%) e N (11,5% a 13,5%). Na região NE as taxas de substituição são inferiores a 5%. Essa regionalização está muito relacionada à disponibilidade dos resíduos e sua proximidade com as plantas de cimento. A geração de resíduos perigosos, por exemplo, está concentrada na região SE, seguida pelas regiões CO e S, responsáveis respectivamente por cerca de 44%, 29% e 22% dos resíduos perigosos do Brasil. Já a geração de resíduos não perigosos concentra-se na região SE (49%), seguida novamente pelas regiões S e CO (17% ambas). O coprocessamento de pneus inservíveis, por sua vez, também apresenta forte correlação com esta distribuição, estando concentrado nas regiões SE (28%), S (15%) e CO (9%).

A corrente de resíduos com o maior potencial de substituição térmica no futuro é o combustível derivado de resíduo sólido urbano (CDR). Seguindo a mesma tendência de acompanhar o desenvolvimento urbano, espera-se que os primeiros projetos ocorram nas regiões SE e S, seguidos pelas regiões CO, NE e N. Utilizando dados de quantidade coletada e critérios de viabilidade de uso de CDR no Brasil por região, teríamos mais uma vez o SE como aquele com maior potencial de utilização de CDR

(53% do resíduo coletado no Brasil e cerca de 38% das fábricas dentro dos critérios viáveis para implantação do CDR), seguido pelo NE (22% do resíduo coletado no Brasil e 19% de fábricas dentro dos critérios viáveis), S (11% do resíduo coletado e 19% de fábricas viáveis), CO (8% do resíduo coletado e 19% de fábricas viáveis) e por fim o N (6% do resíduo coletado e 5% de fábricas viáveis).

Com relação às biomassas, estima-se que o Brasil gere cerca de 300 Mt de resíduos agrícolas²⁰. Alguns deles, como o bagaço da cana-de-açúcar, produzidos no SE e CO, já possuem destinação dentro das próprias indústrias de açúcar e álcool. Entretanto, outras biomassas agrícolas, presentes principalmente nas regiões CO, N e SE, poderiam ser utilizadas pela indústria de cimento como fonte de energia.

O potencial de exploração de lodos de estação de tratamento de esgoto (ETE) também está vinculado ao grau de desenvolvimento urbano e sanitário, bem como à proximidade das fontes geradoras com as fábricas. O Brasil tem apenas 43% do seu esgoto tratado²¹, sendo que as regiões com maiores índices de tratamento são CO, SE e S, com 50%, 47% e 41%, respectivamente. Atualmente, a destinação de lodo de ETE para coprocessamento é irrelevante, tendo sido realizados apenas alguns testes até o momento. Mas espera-se que este número cresça significativamente, conforme já ocorre em alguns países da Europa, Japão e Estados Unidos. Assim sendo, esta destinação deverá se concentrar nas regiões SE e S em 2030, ganhando maior participação no CO, NE e N em 2050.

²⁰ Levantamento realizado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), do Governo Federal

²¹ Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS).

Emissões de matéria prima

Outra grande peculiaridade regional refere-se aos tipos de calcário e sua distribuição no Brasil. Comparando-se os valores nacionais de fator de calcinação²² com o default do banco de dados da Cement Sustainability Initiative (CSI), observa-se que os fatores nacionais são maiores que o padrão mundial (média de 550 kg CO₂/t de clínquer do Brasil contra 525 kg CO₂/t da CSI), em função dos elevados teores de carbonato de magnésio (MgCO₃) contidos na matéria-prima. Existe, ainda, grande disparidade entre os valores brasileiros, oscilando entre 540 e 573 kg CO₂/t de clínquer conforme a localização geográfica das jazidas e, objetivamente, a variação destes teores de magnésio.

A região S do país é a que apresenta os maiores percentuais de Mg no calcário, com valores que variam entre 6,5% e 7,5%²³. Por conseguinte, as unidades industriais ali localizadas têm uma condição estrutural que as leva a uma maior emissão de carbono proveniente da matéria-prima. Comparativa-

mente, na região CO os valores de Mg variam de 4% a 5%. Já na região SE encontra-se uma grande dispersão nos teores de magnésio presente nas matérias-primas, variando entre 1,5% e 6% e tendo como média 3%, igual à do NE. Diante dessa realidade, de fato empresas localizadas em regiões com teores mais elevados de Mg no calcário apresentam fatores de emissão da matéria-prima maiores que aquelas em outras regiões.

Em razão de todas estas questões apontadas, os reais potenciais de redução das emissões de carbono em cada uma das regiões brasileiras devem ser avaliados à luz dessas peculiaridades e limitações, de modo que permitam propor soluções e políticas públicas compatíveis e efetivas. Nenhum dos potenciais futuros sugeridos neste Roadmap, que foram tratados sob uma abordagem estritamente nacional, deve ser replicado à risca em caráter regional/estadual, sob o risco de não considerar estas diferenças regionais.

²² Refere-se à emissão da matéria-prima, ou seja, à descarbonatação do calcário para formação do clínquer.

²³ Calculado a partir do percentual de óxido de magnésio (MgO) contido no clínquer, oriundo da descarbonatação do carbonato de magnésio (MgCO₃) presente no calcário.

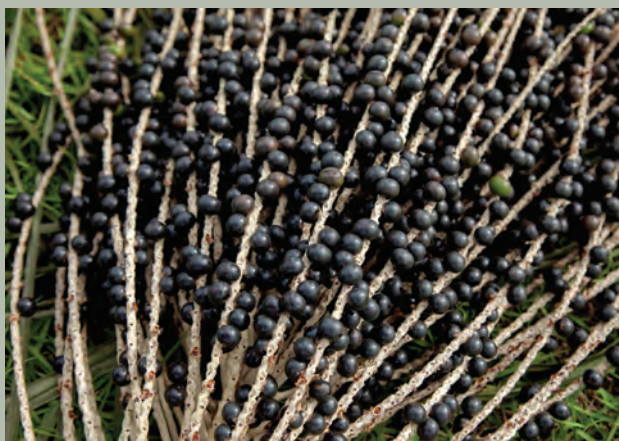
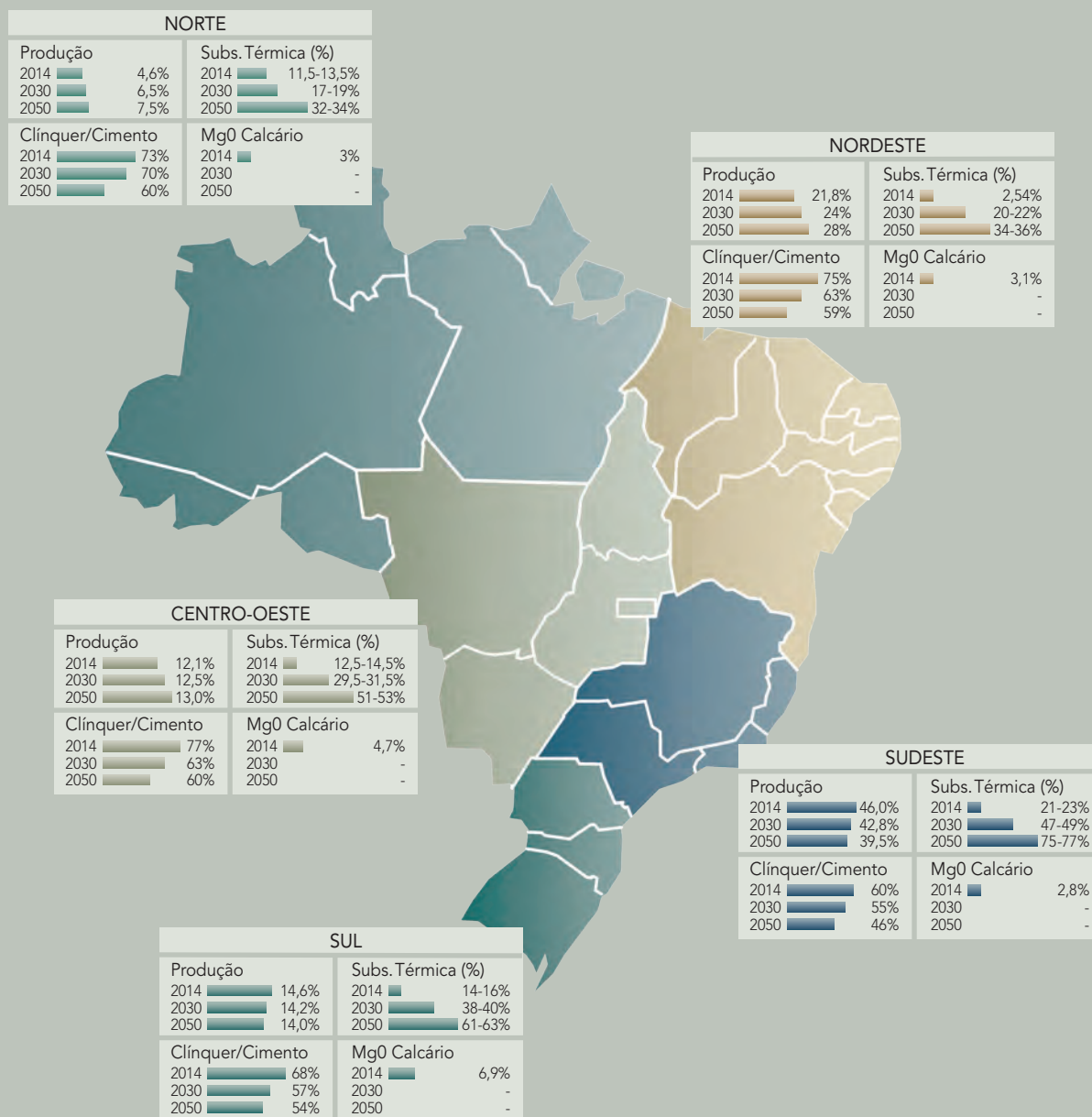


Figura 10: Diferenças regionais no Brasil



VISÃO DE LONGO PRAZO: POTENCIAL DE REDUÇÃO ATÉ 2050

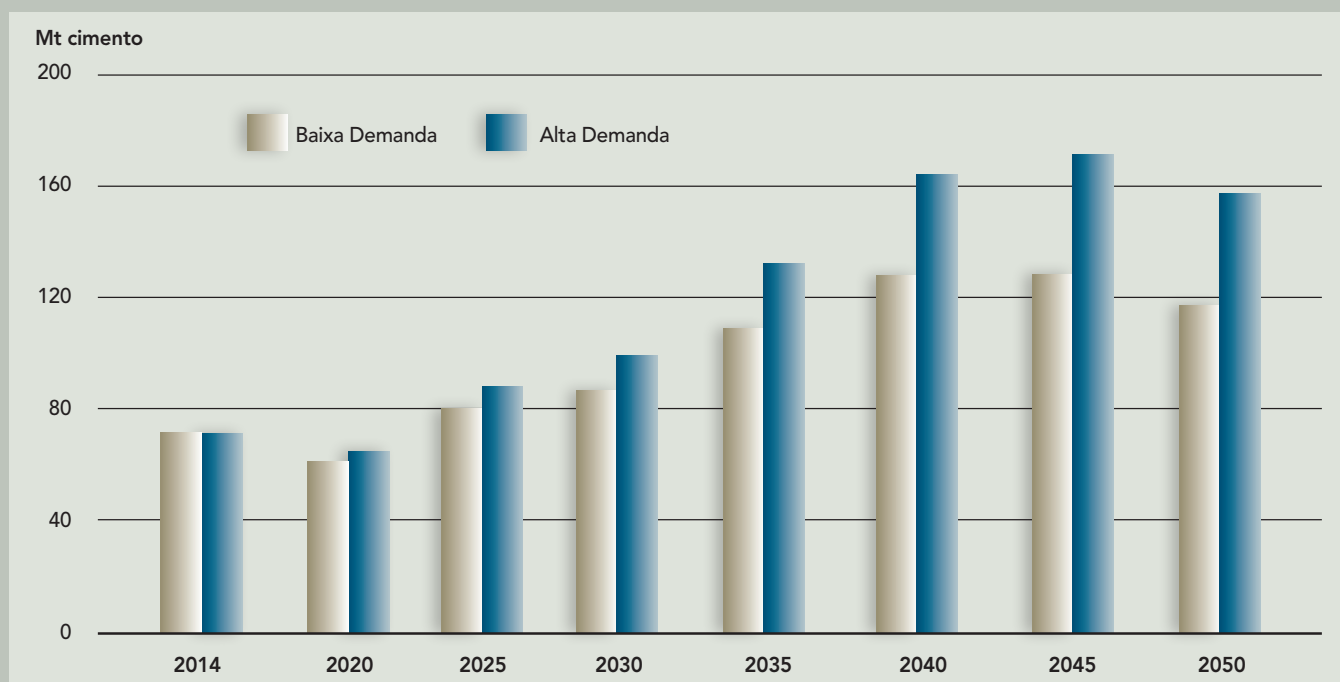


Visão geral do forno rotativo de clínquer com torre de pré-aquecedores ao fundo

A recuperação da economia brasileira a partir da atual recessão, o subsequente crescimento do PIB e os déficits de infraestrutura e habitacional deverão impulsionar a demanda de cimento de forma constante de 2020 a 2040. Entre 2040 e 2050, espera-se um período estável e, por volta de 2050, uma ligeira queda no consumo de cimento, acompanhando inclusive a reversão do crescimento populacional prevista pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Esta tendência ocorre tanto na variante de baixa demanda, que norteou os indicadores e potenciais deste estudo, quanto em uma eventual variante de alta demanda de cimento.

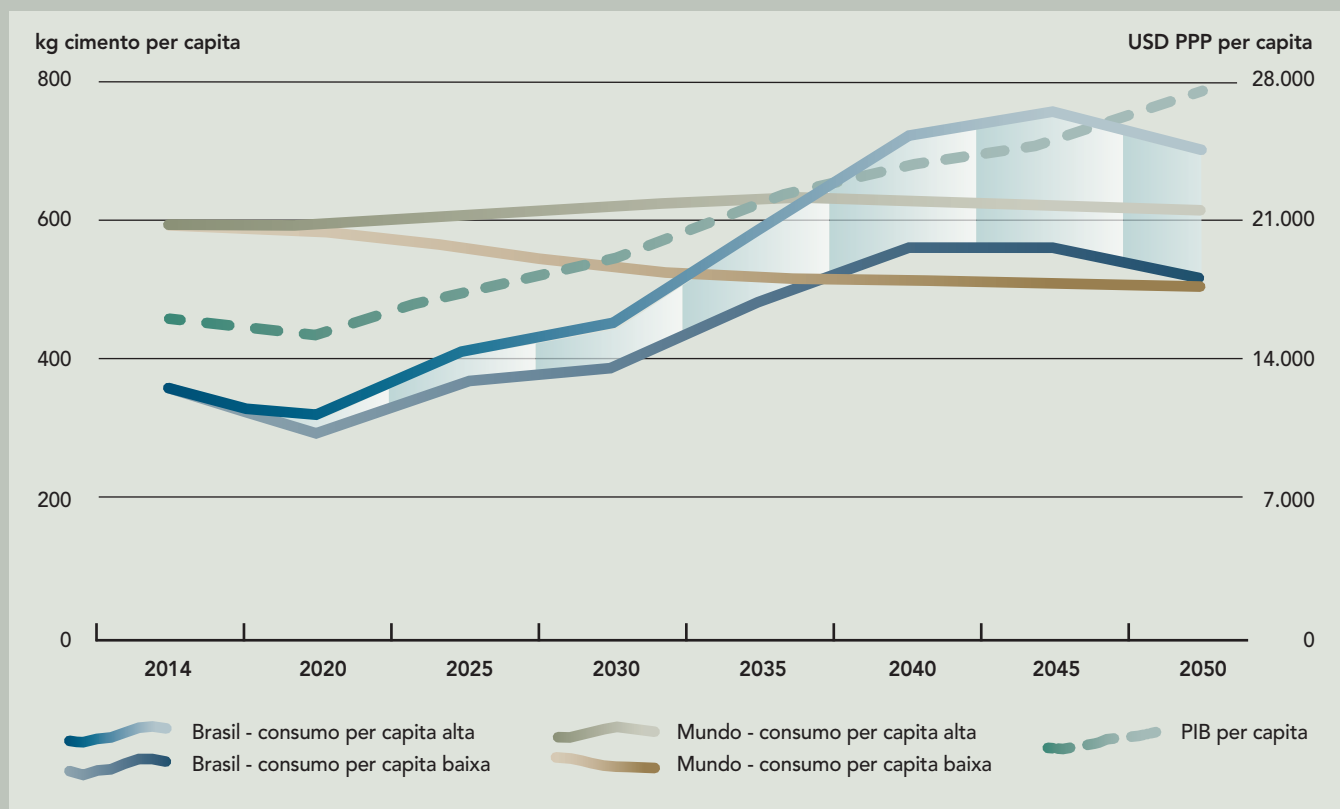
Na variante de baixa demanda, a produção de cimento atinge seu auge em 2045, com 127 Mt; enquanto na variante de alta demanda, o pico ocorre no mesmo ano, mas a um nível que é um terço mais alto, de 170Mt. Em ambos os casos, o crescimento de longo prazo na produção de cimento representa um desafio considerável para o setor brasileiro em termos de demanda de energia e emissões de CO₂.

Figura 11: Projeção da produção de cimento no Brasil



Mensagem-chave: A projeção de emissões e potenciais de redução foram avaliados tendo a variante de baixa demanda de cimento como parâmetro, considerada mais realista. Eventualmente, variantes mais otimistas de produção podem ter impactos significativos nos esforços de redução de CO₂ do setor.

Figura 12: Indicadores econômicos e produção de cimento



Mensagem-chave: Conforme a renda cresce, o aumento da demanda por cimento orienta os níveis de produção, que se estabilizam em 2050 à medida que os níveis de crescimento da população e os altos níveis de intensidade da demanda são atingidos.

Adições ou substitutos de clínquer

Conseguir produzir mais cimento com menores teores de clínquer implica na redução tanto das emissões da calcinação (descarbonatação) quanto naquelas resultantes da queima de combustíveis. Por consequência, o potencial de mitigação de CO₂ dos substitutos de clínquer é significativamente maior que as outras medidas, sendo também a alternativa de melhor custo benefício, tanto em curto quanto em longo prazo. Em 2050, no “Cenário 2°C”, a relação clínquer-cimento deverá atingir 52%, contra os 67% atuais, aproximando-se dos melhores níveis projetados do mundo. Isso representaria cerca de 69% do potencial de redução das emissões acumuladas ao longo do período 2014-2050, comparando-se o “Cenário 2°C” com o “Cenário 6°C”.

Como o suprimento cada vez mais restrito de escória de alto-forno e cinzas volantes (principais substitutos de clínquer hoje) tende a ser um fator limitante para o uso dessas alternativas, e considerando o crescimento da demanda de cimento no longo prazo, no “Cenário 2°C” a queda na proporção clínquer/cimento deverá se basear no incremento do uso de calcário e de argila calcinada como materiais alternativos ao clínquer. O potencial de redução de clínquer na fabricação do cimento, contudo, é limitado ainda pelas características técnicas exigidas nas diferentes aplicações do produto final, na regulação relativa às normas de cimento e na disponibilidade local de matérias-primas.

Combustíveis alternativos

Ao mesmo tempo em que as medidas de eficiência energética diminuem o consumo de combustíveis na produção do clínquer, o uso de fontes de energia com menor intensidade de carbono representa uma opção adicional para reduzir ainda mais as emissões oriundas da queima de combustíveis.

Em 2014, a maior parte da demanda térmica do setor foi atendida por coque de petróleo (85%), com participação de biomassa e resíduos nos 15% restantes. Esse mix de combustíveis permanece constante no “Cenário 6°C”, em que pouco ou nenhum esforço de mudança é despendido, mas no “Cenário 2°C” as contribuições dos diferentes combustíveis se alteram ao longo do tempo. Em 2050, a biomassa assume uma participação de 11% na demanda total de energia e os resíduos participam com 44%. Em conjunto, ambos representam cerca de 55% da demanda de energia térmica total do setor. Com isso, haveria uma redução do fator de emissão dos combustíveis de 91 kgCO₂/GJ em 2014 para 77 kgCO₂/GJ em 2050.

Ao longo do tempo, a substituição do coque de petróleo nos fornos de cimento do Brasil por combustíveis alternativos representará uma importante contribuição para a redução das emissões do setor, com potencial de mitigar cerca de 13% das emissões cumulativas até 2050.

Eficiência energética

Produzir clínquer com menor consumo energético, embora não tenha impacto sobre as emissões de processo – ou calcinação –, tem influência direta nas emissões dos combustíveis.

A intensidade térmica, de 3,5 GJ/t clínquer em 2014, deverá diminuir para um nível próximo a 3,2 GJ/t de clínquer até 2050, no cenário de 2°C. A redução baseia-se, em curto prazo e em menor grau, na adoção de medidas de *retrofit* dentro do processo de produção por via seca (como pré-calcinadores e etapas adicionais de pré-aquecimento), uma vez que quase todo o cimento brasileiro (99%) já é produzido por esse processo. A partir de 2030 deverá ser observada uma redução mais significativa no consumo térmico, em função da substituição de unidades mais obsoletas por modernas fábricas utilizando as melhores tecnologias disponíveis (BAT) para a época. O consumo térmico, porém, será impactado pelo uso crescente de combustíveis alternativos, com maior teor de umidade que os combustíveis fósseis.

No “Cenário 2°C”, a intensidade elétrica deverá diminuir, por sua vez, 0,4% ao ano em média até 2050, passando de 113 kWh/t de cimento em 2014 para 91 kWh/t de cimento em 2050. Isto graças, principalmente, ao aumento na implantação de eficientes tecnologias de moagem e de recuperação de calor residual (*waste heat recovery* - WHR).

No lugar de moinhos de bolas serão instalados moinhos verticais nas novas linhas de clínquer das plantas brasileiras, alcançando cerca de 40% da produção em 2050. As prensas de rolo, por sua vez, não são adequadas para a maioria das operações de moagem no Brasil, devido ao alto teor de umidade das matérias-primas no país, o que representa desafios para essa tecnologia em comparação com outros tipos de moinhos. Assim, prensas de rolo deverão limitar-se a uma pequena parte dos moinhos de farinha crua, tendo uma penetração marginal de não mais que 5% da capacidade total de moagem futura.

A recuperação de calor residual (WHR) será cada vez mais difundida no setor no “Cenário 2°C”. Ao aproveitar o excesso de calor proveniente dos gases de combustão do forno e do resfriador de

clínquer, a tecnologia reduz a necessidade de compra de eletricidade. Hoje, esta solução é utilizada em apenas uma planta no Brasil, mas possui grande potencial de implantação no “Cenário 2°C”, podendo atender a um número de fornos que, somados, representaria cerca de 35% da produção total brasileira. Esta medida de eficiência energética está se tornando cada vez mais utilizada no mundo; em algumas regiões, por exemplo, ela é exigida em todas as novas fábricas de cimento. A melhoria na eficiência energética inclui ainda a integração de processos, operações aprimoradas e práticas de manutenção.

Devido ao atual grau de modernização do parque industrial brasileiro e ao reduzido espaço para melhorias, o impacto das medidas de eficiência energética seria de cerca de 9% de redução das emissões acumuladas entre 2014 e 2050.

Tecnologias emergentes e inovadoras (CCUS)

O avanço das três principais medidas antes abordadas seria quase que suficiente para alcançar uma redução das emissões compatível com o “Cenário 2°C”. Isso exerceria menor pressão sobre

a necessidade de adoção de soluções emergentes e inovadoras, como CCUS (*Carbon Capture and Utilization or Storage*). Assim, em 2040, cerca de 1,7 Mt CO₂ precisariam ser capturados através destas tecnologias, atingindo 3,3 Mt CO₂ em 2050. Com isso, a contribuição desta alternativa na redução das emissões acumuladas ao longo do período 2014-2050 seria de cerca de 9%.

Contudo, em uma hipotética variante de alta demanda, com aumento significativo de emissões em comparação à variante de baixa demanda, o CCUS deverá ser implantado extensivamente para alcançar o “Cenário 2°C”, à medida que as outras opções de redução de carbono, como substitutos de clínquer, combustíveis alternativos e eficiência energética se aproximam do seu potencial máximo. Assim, nesta condição, precisaria ser capturado um volume cerca de seis vezes maior em 2050, contribuindo com cerca de 37% da redução das emissões cumulativas. A perspectiva de crescimento do consumo indica ainda que o CCUS também teria que ser implantado mais cedo nesta variante, começando em 2035, enquanto que na variante de baixa demanda somente em 2040.

Tabela 3: Indicadores-chave para a indústria brasileira de cimento até 2050

	2014	2°C				6°C			
		2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Produção de Cimento [Mt]	71	62	87	126	117	62	87	126	117
Fator Clínquer (relação clínquer/cimento)	0.67	0.66	0.59	0.54	0.52	0.67	0.67	0.67	0.67
Intensidade Térmica [GJ/t clínquer]	3.50	3.49	3.47	3.38	3.22	3.50	3.49	3.46	3.44
Intensidade Elétrica [kWh/t cimento]	113	110	106	95	91	111	108	101	99
Combustíveis Alternativos [% de substituição térmica]	15%	22%	35%	45%	55%	15%	15%	15%	15%
CCUS [Mt CO ₂ /ano]	-	-	-	1.7	3.3	-	-	-	-
Emissão Bruta [Mt CO ₂ /ano]	40	34	42	52	44	35	49	71	66
Emissão Específica [t CO ₂ /t cimento]	0.56	0.53	0.48	0.41	0.38	0.56	0.56	0.56	0.56

Nota: Os valores apresentados são para variantes de baixa demanda dos cenários. O uso de combustível alternativo considera biomassas e resíduos. A intensidade elétrica da produção de cimento não inclui redução de eletricidade adquirida pelo uso de equipamentos de WHR ou uso de eletricidade em equipamentos de captura de carbono. A intensidade direta de CO₂ refere-se a emissões líquidas de CO₂, após a captura de carbono.

Fonte: IEA - modelagem desenvolvida para este projeto. © OECD/IEA, 2016

Emissões de CO₂ até 2050

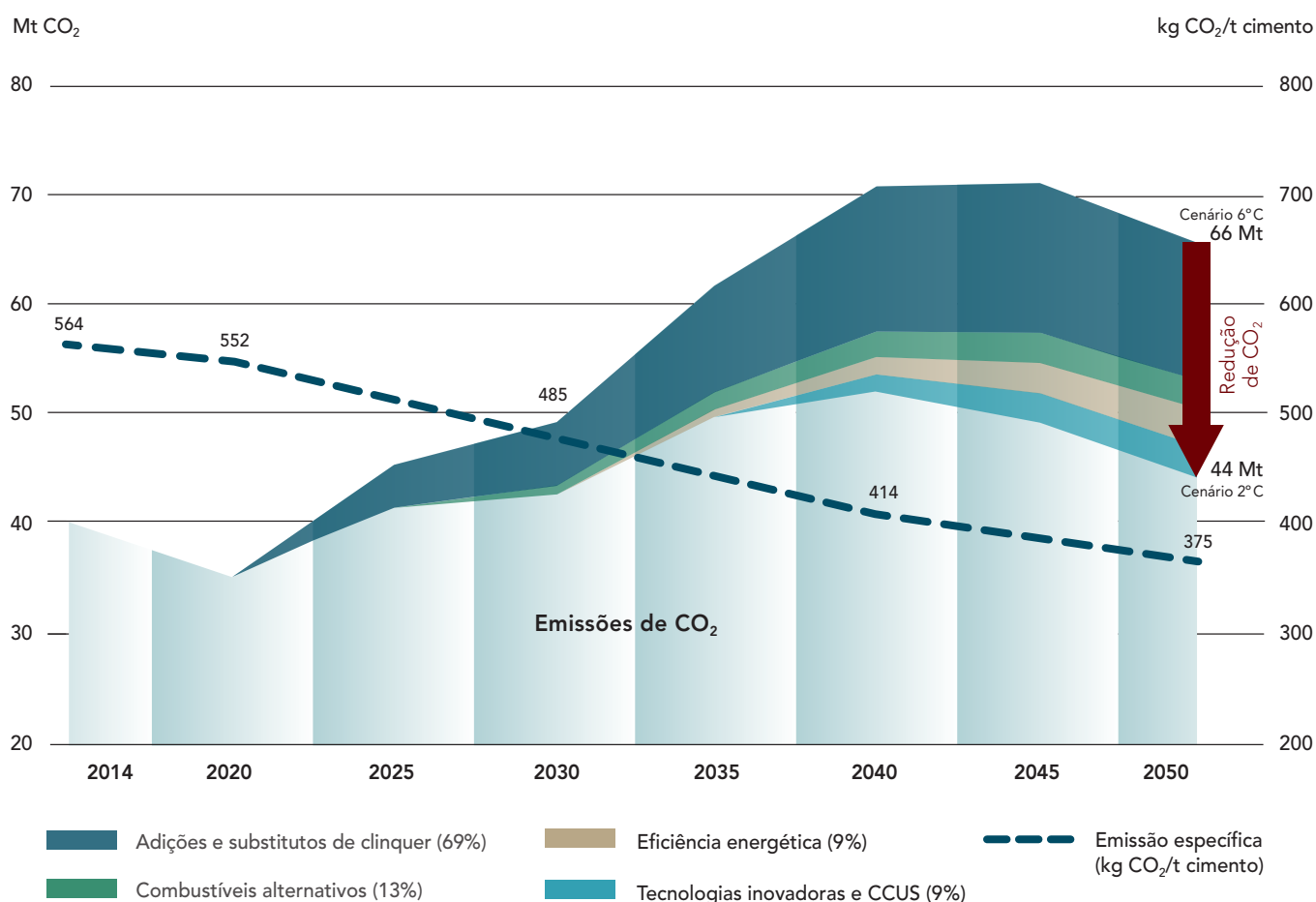
O potencial de redução das emissões diretas de CO₂ apresenta diferentes resultados ao longo do tempo, refletindo tanto a demanda existente como o grau de maturidade e penetração das soluções sugeridas para o setor. Tendo por base as 40 Mt de CO₂ emitidas pela indústria brasileira do cimento em 2014, as emissões poderiam atingir cerca de 66 Mt de CO₂ em 2050, se nenhuma ação mitigadora fosse adotada ("Cenário 6°C").

Contudo, esse valor pode cair a 44 Mt de CO₂ no mesmo ano a partir da combinação das medidas abordadas neste Roadmap ("Cenário 2°C"). Isto representa um acréscimo de emissão de apenas 10% sobre o volume atual, contra um aumento da produção de cimento projetada de cerca de 65%

no período. Com isso, a emissão específica passaria dos 564 kg CO₂/t cimento atuais para 375 kg CO₂/t cimento em 2050, uma redução de 33%.

Em termos de emissão acumulada ao longo de todo o período, comparando-se os dois cenários, seria possível evitar a emissão de 421 Mt de CO₂. O principal fator que contribui para esta redução é a substituição do clínquer, com 290 Mt de CO₂ mitigado entre 2014 e 2050 (ou 69%). O uso de combustíveis menos intensivos em carbono, à medida que o setor migra do coque de petróleo em direção às biomassas e resíduos, contribui com 55 Mt de CO₂ deste total (13%). Medidas de eficiência energética e tecnologias inovadoras como CCUS respondem com 38 Mt de CO₂ cada uma (9%).

Figura 13: Redução de emissões diretas de CO₂ por alternativa, comparando-se o "Cenário 2°C" com "Cenário 6°C"



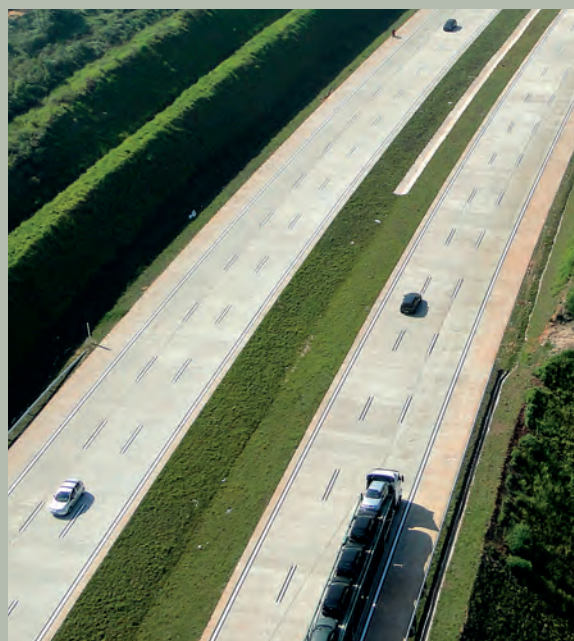
Mensagem-chave: Por impactarem tanto nas emissões da calcinação quanto nas da queima de combustíveis, o uso de substitutos de clínquer contribuirão com uma grande parte da redução das emissões de CO₂, comparativamente às demais opções.

Fonte: IEA - modelagem desenvolvida para este projeto. © OECD/IEA, 2016

Box 3: Considerações sobre uma variante de alta demanda de cimento

Em uma eventual variante de alta demanda, o crescimento da produção de cimento exerce maior pressão sobre os esforços para reduzir a intensidade de carbono, já que a emissão também é maior, alcançando um total de cerca de 88 Mt de CO₂ em 2050 ou 807 Mt acumuladas ao longo do período. Como os substitutos de clínquer, a troca de combustíveis e as melhorias na eficiência energética atingirão seu potencial máximo em termos de custo benefício na variante de baixa demanda, alternativas de redução de emissões de mais alto custo devem ser exploradas.

Assim, para alcançar o objetivo de redução de CO₂ na variante de alta demanda até 2050, que representa um adicional acumulado de 387 Mt de CO₂, as tecnologias inovadoras deverão assumir um papel preponderante. Embora contribuam com menos de 10% para as reduções na baixa demanda, representando a alternativa mais onerosa, uma maior produção de cimento forçará a que esta alternativa tenha que contribuir com cerca de 37% do potencial de mitigação, a mesma parcela que os substitutos de clínquer nesta variante.



RECOMENDAÇÕES



Viaduto construído
em concreto

Este *Roadmap* apresenta uma série de medidas e soluções técnicas capazes de acelerar a transição da indústria brasileira do cimento rumo a uma economia de baixo carbono e de menor impacto para as mudanças climáticas.

Alcançar os níveis de redução de emissões de carbono necessários para atender aos cenários climáticos apresentados nesse *Roadmap* exige, entretanto, a transposição de uma série de barreiras e gargalos que hoje impedem ou dificultam o avanço de muitas das alternativas técnicas aqui propostas. Isto requer, muito além do próprio engajamento da indústria, um esforço conjunto em vários níveis de ação, que vão desde governos municipais, estaduais e nacionais, órgãos legisladores, entidades normativas, agências de fomento e desenvolvimento, instituições de pesquisa nacionais e internacionais, entre tantos outros.

As principais recomendações para alcançar estes objetivos estão sumarizadas a seguir.

1. Aumentar o uso de adições e substitutos de clínquer

Para que o volume de adições aumente, reduzindo o fator clínquer dos níveis atuais (ao redor de 67%) para 59% em 2030 e para 52% em 2050, são necessárias algumas medidas que serão, majoritariamente, conduzidas pela indústria, mas que para serem implementadas com sucesso necessitarão do apoio do governo brasileiro, institutos de pesquisa e academia, além do adequado entendimento por parte dos consumidores.

- Promover o desenvolvimento e aceitação de novas normas de cimento. A principal ação nesse sentido é atualizar as normas brasileiras de modo a permitir a incorporação de maiores teores de adições, seguindo padrões já utilizados internacionalmente, principalmente com relação ao filer calcário, hoje limitado a 10%.
- Promover e incentivar a divulgação de boas práticas e ações de P&D, a fim de proporcionar um melhor entendimento acerca das oportunidades em relação às adições. Atualmente há restrições técnicas ou de qualidade para a utilização de potenciais materiais cimentícios que poderiam ser resolvidas com pesquisas, por exemplo. Há a necessidade premente de desenvolver estudos independentes de impacto ambiental sobre o uso de materiais cimentícios no cimento para mostrar o maior potencial de redução de emissões de carbono, através de Análise do Ciclo de Vida (ACV).
- Desenvolver campanhas e eventos de treinamento e conscientização para os atores da cadeia do cimento. Por exemplo, para aumentar a conscientização e a confiança dos consumidores em cimentos compostos e promover sua aceitação no mercado, para capacitar organismos de normalização e institutos de acreditação, para trocar experiências sobre a redução do teor de clínquer no cimento e os impactos ambientais e econômicos.

2. Incentivar e facilitar o uso de combustíveis alternativos

O uso de combustíveis alternativos pela indústria do cimento tem ganhado relevância no Brasil nos últimos anos, representando hoje cerca de 15% de sua matriz energética. Existe, contudo, um grande potencial a ser explorado, principalmente se comparado a países desenvolvidos, com destaque aos da União Europeia (UE). Lá, o percentual de utilização de combustíveis alternativos chega, em média, a 41%. Em países como Holanda e Áustria, no entanto, esse índice já alcança mais de 75%.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída há sete anos pela Lei 12.305/10 e cuja principal meta era eliminar até 2014 os aterros irregulares (os chamados "lixões"), só conseguiu extingui-los em 40% dos municípios brasileiros. Ainda existem mais de 2.000 deles espalhados no país, recebendo por ano cerca de 30 Mt de lixo²⁴. Mesmo alguns aterros sanitários implantados transformaram-se em lixões devido à falta de controle e fiscalização e ao alto custo de manutenção. Enquanto isso, o volume gerado de lixo no Brasil tende a crescer em maior velocidade que a população²⁵.

A atuação do governo brasileiro teve seu foco na disposição final, ou seja, deposição ordenada de rejeitos em aterros, movimento contrário ao que estão fazendo diversos países desenvolvidos, que é o de priorizar a hierarquia da gestão de resíduos²⁶: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e, por fim, a disposição.

Apesar de existirem duas resoluções CONAMA específicas sobre coprocessamento (264/1999 e 316/2002) e algumas leis estaduais (SP, MG, PR e RS) que, inclusive, dispensam de licenciamento resíduos como madeira, agrícolas e de construção e demolição, ainda há espaço para melhorar o arcabouço legislativo que regula ou impacta essa tecnologia. A mudança do enfoque do coprocessamento como atividade potencialmente poluidora

²⁴ ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016. São Paulo: [s.n.], 2017

²⁵ Consulta às publicações 'Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil' de 2003 a 2015.

²⁶ A Diretriz 31/1999 obrigou os países-membros da União Europeia a reduzir a 35% a destinação de Resíduos Sólidos Urbanos biodegradáveis para aterros até 2016.



para solução definitiva à implementação da PNRS precisa ser incentivada. Para que isso ocorra, é necessário um esforço conjunto e institucional da indústria de cimento no sentido de elaborar um programa de comunicação que engaje todos os grupos de interesse, desde os geradores, passando pelos municípios onde as fábricas de cimento estão instaladas, até os ministérios correlatos.

Este *Roadmap* avalia o potencial técnico de a indústria do cimento no Brasil substituir cerca de 35% de seus combustíveis fósseis por combustíveis alternativos em 2030 e 55% em 2050. Para alcançar números dessa ordem, contudo, as seguintes recomendações principais devem ser implementadas:

- Modificar a legislação existente de forma a: i) dispensar ou simplificar o licenciamento de biomassa proveniente de resíduos agrícolas e de resíduos industriais; ii) incentivar (e não limitar) a recuperação energética e o uso de combustíveis alternativos (não fósseis); iii) estabelecer procedimentos padronizados que devem ser seguidos por todos os atores da cadeia de modo a garantir processos adequados para documentar, monitorar e rastrear de forma confiável os resíduos, inclusive a emissão de Certificado de Destruição Térmica, que só deve ser aceito se concedido pela cimenteira, conforme estabelecido na Resolução CONAMA 316/2002, Art.28, IV; iv) desburocratizar e reduzir os custos associados ao processo de licenciamento.
- Criar legislações específicas sobre coprocessamento de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos (CDR) nos outros estados brasileiros, a exemplo do que foi feito em São Paulo com a Resolução SMA N° 38, de 31/05/17. Isso se torna ainda mais urgente diante da situação de endividamento com as empresas de limpeza pública, enfrentada pela grande maioria das capitais brasileiras (23 e o Distrito Federal) e muitos dos municípios brasileiros e que já ultrapassa o valor de 10 bilhões de reais, segundo o Portal da Transparência do Governo Federal.
- Incentivar outras formas de destinação de resíduos, promovendo condições isonômicas de competitividade entre elas. Como a ênfase da Política Nacional de Resíduos Sólidos foi a extinção dos lixões e a interpretação dada foi que isso significaria construir aterros, esta tem sido a alter-

nativa mais adotada pelos municípios, em vez de investir nas etapas anteriores da hierarquia de resíduos. Enquanto países como o Reino Unido implementaram uma sobretaxa de aproximadamente £90/t para resíduos depositados em aterro²⁷, e cidades como São Francisco têm meta de zerar os resíduos enviados para aterro até 2020²⁸, a tendência que se avista no Brasil é reduzir o custo de destinação de resíduos para aterros.

- Promover a construção de uma política energética que acelere a transição de uma economia baseada em combustíveis fósseis para uma economia de baixo carbono. Incentivo à adoção de biocombustíveis e combustíveis menos intensivos em carbono por meio de programas e políticas de estado como o RenovaBio, do Ministério das Minas e Energia (MME).
- Incentivar o desenvolvimento e a utilização de novos combustíveis alternativos, em especial biomassas. Isto é possível de várias maneiras, como, por exemplo, através da cooperação com instituições de ensino e institutos de pesquisa, do desenvolvimento da agricultura familiar para a produção de biomassa, de incentivos financeiros ao uso de biomassas como combustível etc.

3. Promover a adoção das melhores tecnologias disponíveis em eficiência energética para plantas novas e *retrofits*

Visto que a energia usada na produção de cimento é majoritariamente térmica e que a matriz elétrica brasileira é em sua maior parte hidrelétrica, as medidas de eficiência energética mais impactantes para a redução da intensidade carbônica a serem adotadas pela indústria nos próximos anos devem ser as de eficiência térmica.

O fato de a indústria brasileira do cimento ter feito vultosos investimentos em novas fábricas e novas linhas nos últimos anos ajudou a reduzir o consumo energético da indústria, fazendo com que se encontre atualmente bem próxima ao benchmark. Com isso, novo salto tecnológico e redução energética mais significativa provavelmente só voltará a acontecer a partir de 2030, com a renovação de unidades que até lá se tornarão obsoletas. No horizonte de curto prazo, investimentos em *retrofits* e ações mais pontuais e específicas terão papel preponderante na redução do consumo energético.

²⁷ HM Revenue & Customs. Disponível em <https://www.gov.uk/government/publications/excise-notice-lft1-a-general-guide-to-landfill-tax/excise-notice-lft1-a-general-guide-to-landfill-tax>. Acessado em: 19/12/2017.

²⁸ SF Environment. Disponível em: <https://sfenvironment.org/zero-waste-by-2020>. Acessado em: 19/12/2017.

As ações que este *Roadmap* propõe para que a indústria alcance valores próximos a 3,22 GJ/t de clínquer e 91 kWh/t de cimento até 2050, são:

- Compartilhar melhores práticas em nível nacional e internacional para a promoção da eficiência energética e redução de emissões de CO₂ na indústria do cimento. Melhores práticas tanto em termos de processos e técnicas produtivas quanto de *Melhores Tecnologias Disponíveis (BAT)* para produção de cimento aplicáveis ao Brasil.
- Criar ou identificar os mecanismos disponíveis para financiamento tanto em nível público e privado como em nível nacional e internacional. Isso se mostra de elevada importância diante do horizonte fiscal restrito que figurará no Brasil pelos próximos 20 anos após a publicação da Emenda Constitucional 95/2016, que impactou significativamente um dos principais fundos públicos disponíveis atualmente. Para tecnologias de cogeração como *Waste Heat Recovery (WHR)*, que demanda altos investimentos em importação de equipamentos e está sujeita aos pesados efeitos fiscais das importações no país, é imprescindível buscar mecanismos, produtos e serviços financeiros, bem como parcerias com agências de fomento e ministérios, que sejam adequados às necessidades do setor.
- Incentivar a adoção de políticas públicas que resultem em menor consumo de energia e em menor desperdício. Como, por exemplo, programas de governo que remunerem o consumidor industrial em contrapartida à redução de carga em horários de maior demanda (como é o caso do projeto-piloto de resposta à demanda aprovado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 28 de novembro de 2017).
- Promover programas de isenção ou redução de impostos de importação para tecnologias de redução de GEE que não possuam similar no país. A adoção desses programas viabilizaria economicamente a implementação de tecnologias como WHR em um número maior de unidades, além de facilitar a adoção de BATs, tornando a indústria cimenteira ainda mais eficiente em termos energéticos.
- Reforçar a cooperação nacional e internacional para reunir dados confiáveis de energia e emissões em nível industrial, por exemplo através do banco de dados da *Cement Sustainability Initiative (CSI)*²⁹ e parceria com o governo brasileiro, via SIRENE³⁰ ou BEN³¹.

4. Apoiar o desenvolvimento e a implantação de tecnologias emergentes e inovadoras de baixo carbono, incluindo captura, armazenamento e utilização de carbono (CCUS).

Embora este *Roadmap* sugira que tecnologias inovadoras só se tornarão potencialmente viáveis para a indústria do cimento no Brasil a partir de 2040, os estudos necessários à sua implantação precisam começar a ser desenvolvidos em curto e médio prazos. A fim de viabilizar esses estudos, bem como as fases posteriores necessárias a projetos com emprego de tecnologias inovadoras, as recomendações são no sentido de:

- Promover P&D em tecnologias emergentes e inovadoras. Por meio, por exemplo, de recursos existentes no país, como o Fundo Tecnológico (FUNTEC) do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e outros e de cooperação e parcerias com instituições de pesquisa e instâncias gestoras de projetos de pesquisa. Reduzir riscos, via governo e instituições de fomento, através de mecanismos de investimento que alavanquem o financiamento privado de projetos-piloto em escala comercial para tecnologias de captura no setor de cimento.
- Desenvolver políticas públicas para estabelecer a governança da aplicação de tecnologias disruptivas de baixo carbono. Principalmente no que diz respeito a regras para execução de pesquisas colaborativas e pré-competitivas para tecnologias emergentes, inclusive CCUS, em nível nacional.
- Explorar e desenvolver tecnologias complementares ao CCS, necessárias para a conversão do CO₂ em produtos de valor agregado (CCU). Os elevados custos de exploração de tecnologias de CCS, conjugados ao baixo valor agregado do cimento e elevada intensidade carbônica do setor, sinalizam que alternativas de CCU se tornarão mais atrativas e viáveis que as de CCS para a indústria do cimento no horizonte de médio/longo prazo.
- Aprimorar metodologias para mensurar o volume de carbono sequestrado pelo efeito da carbonatação. Parte do carbono emitido no processo de produção de cimento é reabsorvida quando a argamassa ou concreto entram em contato com o CO₂ atmosférico. Considerando a sua relevância na compensação das emissões do setor, torna-se importante mensurar esse efeito, bem como sua potencial maximização pela reciclagem do concreto.

²⁹ Banco de Dados Getting the Numbers Right (GNR).

³⁰ SIRENE - Sistema de Registro Nacional de Emissões, do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC).

³¹ BEN - Balanço Energético Nacional, do Ministério de Minas e Energia (MME).

PLANO DE AÇÃO PARA AS PARTES INTERESSADAS



Torres em concreto
do Parque Eólico
de Osório/RS

Este capítulo define o plano de ação junto aos ministérios, governos estaduais e municipais, agências de desenvolvimento e fomento, associações de indústria, universidades e instituições de pesquisa, ABNT, e à própria indústria do cimento.

PLANO DE AÇÃO DO ROADMAP

Stakeholder	Ação
Ministério do Meio Ambiente	Desburocratizar e reduzir os custos associados ao processo de licenciamento para o coprocessamento.
	Dispensar ou simplificar o licenciamento de biomassa proveniente de resíduos agrícolas e de resíduos industriais.
	Estabelecer procedimentos padronizados a serem seguidos por todos os atores da cadeia para documentar, monitorar e garantir, de forma confiável, a rastreabilidade dos resíduos.
	Incentivar (e não limitar) via legislação a recuperação energética e o uso de combustíveis alternativos (não fósseis) em substituição aos fósseis.
	Incentivar outras formas de destinação de resíduos, além de aterros, promovendo condições isonômicas de competitividade entre elas.
	Sobretaxar os Resíduos Sólidos Urbanos dispostos em aterros.
Ministério de Minas e Energia	Oferecer incentivos fiscais e financeiros para o uso de biomassas e resíduos menos intensivos em carbono para produção de cimento, geração de eletricidade e outras técnicas de valorização.
	Incentivar a adoção de políticas públicas que resultem em menor consumo de energia e desperdício, como, por exemplo, resposta à demanda, possibilidade de comercialização de geração própria da indústria com outros consumidores etc.
Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações	Apoiar P&D do uso de diferentes tipos de combustíveis alternativos e seus impactos na redução de emissões, e compartilhar amplamente a expertise.
	Promover P&D em tecnologias emergentes e disruptivas por meio de recursos já existentes e de cooperação e parcerias com instituições de pesquisa e instâncias gestoras de projetos de pesquisa.
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento	Integrar a indústria de cimento no Plano de Resíduos da Agroindústria.
	Promover a agricultura familiar para a produção de biomassa.
Ministério do Desenvolvimento Regional	Incentivar a evolução da agenda de saneamento no Brasil, potencializando o reaproveitamento energético de resíduos e de lodos de ETE.
Ministério da Economia	Promover, através do Comitê Técnico da Indústria de Baixo Carbono (CTIBC), a articulação entre o setor industrial e os diferentes ministérios e órgãos de governo, para fomentar e acelerar a adoção das medidas propostas neste Roadmap.
Governos Estaduais e Municipais	Desenvolver o coprocessamento nas regiões do país onde a tecnologia ainda não é difundida.
	Proporcionar o treinamento e capacitação das autoridades e formação técnica adequada dos funcionários públicos responsáveis pelas licenças, controle e supervisão.
	Criar legislações específicas sobre coprocessamento de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos (CDR) nos outros estados brasileiros, a exemplo de São Paulo.

PLANO DE AÇÃO DO ROADMAP

Stakeholder	Ação
Associação Brasileira de Normas Técnicas	Promover o desenvolvimento de novas normas de cimento e revisão de normas existentes, de modo a permitir maior uso de adições em cimentos.
Agências de Desenvolvimento e Fomento	Desenvolver ou identificar mecanismos disponíveis para financiamento de tecnologias de baixo carbono aplicáveis à indústria do cimento (eficiência energética, combustíveis alternativos, substitutos de clínquer etc.), tanto em nível público e privado como em nível nacional e internacional (ex: Green Climate Fund, Títulos Verdes, linhas de crédito específicas do BNDES).
	Apoiar e financiar programas de pesquisa, desenvolvimento, demonstração e escalonamento para direcionar o conhecimento e aplicação nos diferentes aspectos do desenvolvimento de tecnologias inovadoras de mitigação de emissões, como CCUS.
Indústria do Cimento	Desenvolver convênios e/ou parcerias com instituições de ensino, pesquisa e fomento visando consolidar a tecnologia de coprocessamento.
	Divulgar boas práticas de segurança e saúde ocupacional na atividade de coprocessamento.
	Desenvolver treinamento e capacitação para os atores da cadeia do cimento, possibilitando a troca de experiências sobre a redução do teor de clínquer no cimento e seus impactos ambientais e econômicos.
	Compartilhar melhores práticas em nível nacional e internacional aplicáveis à indústria para a promoção da eficiência energética e redução de emissões de CO ₂ na indústria do cimento.
	Elaborar, em parceria com instituições de pesquisa, Guia de Referência sobre as Melhores Tecnologias Disponíveis (BAT) para produção de cimento aplicáveis ao Brasil.
	Estabelecer convênios com instituições de pesquisa para alavancar a eficiência energética na indústria, além de capacitar recursos humanos.
Associações de Indústria	Reforçar cooperação nacional e internacional, através de parceria com o governo brasileiro, para reunir dados confiáveis de energia e emissões em nível industrial.
	Elaborar programa de comunicação sobre a atividade de coprocessamento que engaje todos os grupos de interesse (geradores de resíduos, municípios, ONGs, ministérios correlatos etc.).
Universidades e Instituições de Pesquisa	Realizar Avaliação do Ciclo de Vida dos combustíveis alternativos para determinar sua intensidade de carbono.
	Promover e incentivar P&D de potenciais adições e novos cimentos.

Abreviaturas e unidades de medida

Abreviaturas e acrônimos

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland	FNDCT	Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Brasil)
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais	FUNTEC	Fundo Tecnológico do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
ACV	Análise do Ciclo de Vida	GCCA	Associação Global de Cimento e Concreto (Global Cement and Concrete Association)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil)	GEE	Gases de efeito estufa
BAT	Melhores Tecnologias Disponíveis (Best Available Technologies)	GNR	Banco de Dados Getting the Numbers Right
BEN	Balanço Energético Nacional, do Ministério de Minas e Energia	IEA	Agência Internacional de Energia (International Energy Agency)
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (Brasil)	IFC	Corporação Financeira Internacional (International Finance Corporation)
CAGR	Taxa de crescimento anual composta (Compound Annual Growth Rate)	KPI	Indicador-chave de desempenho (Key Performance Indicator)
CAPEX	Investimento em bens de capital (Capital Expenditure)	P&D	Pesquisa & Desenvolvimento
CCS	Captura e Estocagem de Carbono (Carbon Capture and Storage)	OPEX	Despesas operacionais (Operational Expenditure)
CCU	Captura e Uso de Carbono (Carbon Capture and Utilization)	PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
CCUS	Captura e Uso ou Armazenamento de Carbono (Carbon Capture and Utilization or Storage)	RenovaBio	Política brasileira para biocombustíveis
CDR	Combustível Derivado de Resíduo	RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
CO₂	Dióxido de carbono	SIRENE	Sistema de Registro Nacional de Emissões, do Ministério da Ciência, Tecnologia Inovações e Comunicações
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente	SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (Brasil)
CSI	Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (Cement Sustainability Initiative)	WBCSD	Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (World Business Council for Sustainable Development)
EOR	Recuperação avançada de óleo (Enhanced Oil Recovery)	WHR	Recuperação de calor residual (Waste Heat Recovery)
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto		
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos		

Unidades de medida

°C	Graus Celsius	MJ	Megajoules
EJ	Exajoules	Mt	Milhões de toneladas
GJ	Gigajoules	Mt/ano	Milhões de toneladas por ano
Gt	Gigatoneladas	MW	Megawatt
GWh	Gigawatt hora	PJ	Petajoules
kcal	Kilocalorias	t	Tonelada
kg	Kilograma	tpd	Tonelada por dia
kWh	Kilowatt hora		

Referências

- BJERGE, L-M.; BREVIK, P. CO₂ capture in the cement industry, Norcem CO₂ capture Project (Norway). *Energy Procedia*, v. 63, p. 6455-6463, 2014.
- BOUMA, R. et al. Membrane-assisted CO₂ liquefaction: performance modeling of CO₂ capture from flue gas in cement production. *Energy Procedia*, v.114, p. 72-80, 2017.
- CHINA CEMENT ASSOCIATION. Cement performance data submission through personal communication. China, 2017.
- CHANG, M.-H., et al. Design and experimental testing of a 1.9 MWth calcium looping pilot plant. *Energy Procedia*, v. 63, p. 2100-2108, 2014.
- CLIMATE & STRATEGY PARTNERS. Finance for innovation: towards the ETS Innovation Fund. Madrid, 12 June 2017. Summary Report. 24p.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 197-1 Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels, 2000. (English version)
- Forth coming Confederation of Indian Industries (CII), World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and International Energy Agency (IEA) (2018), Status up date project from 2013 Low-Carbon Technology for the Indian Cement Industry, CII, WBCSD and IEA, Nova Delhi, Genebra e Paris.
- CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. CO₂ and energy accounting and reporting standard for the cement Industry. Genebra: CSI/WBCSD, 2011.
- CSI. Global Cement Database on CO₂ and Energy Information, WBCSD, Genebra. Disponível em: www.wbcscement.org/index.php/key-issues/climateprotection/gnr-database. Acesso em: jan. 2017.
- Ecofys. Status and prospects of co-processing of waste in EU cement plants. Ecofys, Utrecht, 2017.
- EUROPEAN CEMENT RESEARCH ACADEMY. Development of state of the art-techniques in cement manufacturing: trying to look Ahead, revision 2017. Düsseldorf, 2017.
- Global CCS Institute. Projects database. Disponível em: <https://www.globalccsinstitute.com/projects> Acesso em: ago. 2017.
- Green Climate Fund. About the Fund. Disponível em: <https://www.greenclimate.fund/who-we-are/about-the-fund>. Acesso em nov. 2017.
- HONGYOU LU. Capturing the invisible resource: analysis of waste heat potential in chinese industry and policy options for waste heat to power generation Berkeley, CA : Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2015. Disponível em : <https://eta.lbl.gov/sites/all/files/publications/lbnl-179618.pdf>
- IEA and WBCSD (2009), Cement Technology Roadmap 2009: Carbon Emissions Reductions up to 2050, OECD/IEA and WBCSD, Paris and Geneva. Disponível em: www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement.pdf.
- IEA and WBCSD (2018), Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry. IEA and WBCSD, Paris and Geneva. Disponível em: <https://webstore.iea.org/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions. Paris: OECD/IEA, 2007. 321p.
- MCTI. Terceira comunicação nacional do Brasil à convenção - quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima. Brasil, 2016.
- XI, F. et al. Substantial global carbon uptake by cement carbonation. *Nature Geoscience*. v. 9, p. 880-883, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016. São Paulo: ABRELPE, 2017.
- HM Revenue & Customs. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/excise-notice-lft1-a-general-guide-to-landfill-tax/excise-notice-lft1-a-general-guide-to-landfill-tax>. Acesso em: 19 dez. 2017.
- SF Environment. Disponível em: <https://sfenvironment.org/striving-for-zero-waste>. Acesso em: 19 dez. 2017.

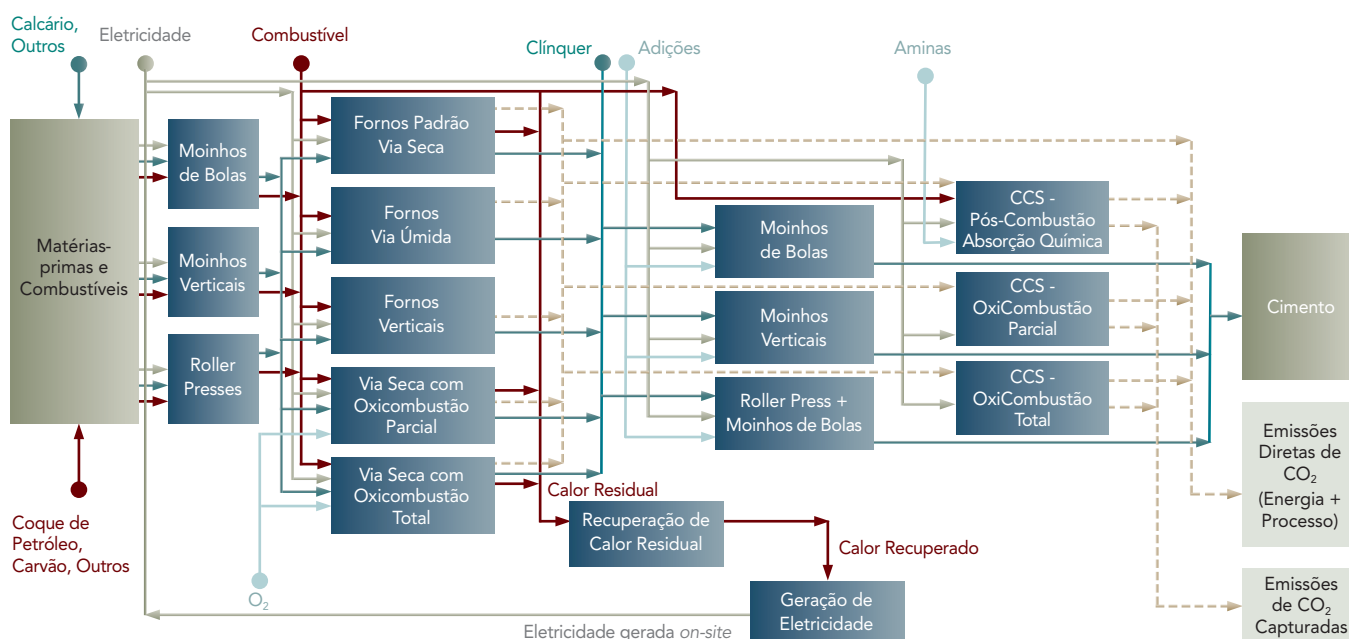
Anexo 1: Estrutura de modelagem e metodologia

A energia e o CO₂ direto resultados deste *Roadmap* derivam do Modelo *Energy Technology and Policy* (ETP), da IEA, que abrange o sistema global de energia. Os resultados aqui discutidos vêm do módulo do setor cimenteiro do modelo ETP-Indústria. O modelo de cimento do ETP segue uma abordagem bottom-up, considerando o processo de fabricação de cimento desde as matérias-primas e preparação dos combustíveis até a moagem do cimento. Cada processo ou tecnologia relevante é caracterizado pelo desempenho energético, rendimento e custo, dentro de um conjunto de restrições realistas. O modelo é baseado no TIMES³¹ e gera um portfólio de tecnologias e alternativas de custo-benefício para atender a um nível de produção de cimento definido exogenamente, dentro de restrições definidas. A demanda final de energia, materiais e fluxos diretos de CO₂, bem como os investimentos em tecnologia relacionados, são gerados como resultados do modelo de cimento do ETP.

O portfólio de uso de energia e tecnologias do setor de cimento para o Brasil foi caracterizado no ano base (2014) usando estatísticas e estimativas relevantes de uso de energia e produção de cimento,

incluindo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), do Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável - Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (WBCSD-CSI) e da Agência Internacional de Energia (IEA). Mudanças na implantação de tecnologias e mix de combustíveis ao longo do tempo em cada cenário são influenciadas por suposições exógenas sobre: o potencial de penetração no mercado e desempenho energético das melhores tecnologias disponíveis (BAT); restrições à disponibilidade de matérias-primas; características técnico-econômicas das tecnologias disponíveis e rotas de processo; progresso assumido na demonstração de tecnologias inovadoras em escala comercial; e a estimativa de emissões diretas de CO₂ definido no cenário. Os resultados são, portanto, sensíveis às premissas sobre o ritmo de giro de capital físico, aos custos relativos de várias opções tecnológicas e de combustíveis, e a incentivos para o uso de BAT para novas capacidades. Os custos de combustível baseiam-se nos resultados do modelo ETP *Supply* do setor e são específicos para cada cenário analisado.

Estrutura detalhada do modelo ETP do setor de cimento



³² O TIMES (The Integrated MARKAL EFOM System) é um gerador de modelo desenvolvido pelo Programa de Análise de Sistemas de Tecnologia de Energia da IEA e permite uma representação econômica local, nacional e multirregional de sistemas de energia em uma base tecnologicamente detalhada.

Anexo 2: Projeção de demanda de cimento

Diversas variáveis estão relacionadas com o consumo de cimento e portanto apresentam potencial para explicá-lo e projetá-lo. A renda nacional é uma candidata óbvia, já que é uma medida satisfatória do dinamismo da economia e de seu crescimento. A observação da relação de longo prazo entre a renda, medida pelo PIB, e o consumo de cimento para um conjunto significativo e variado de países, inclusive o Brasil, mostra que de fato essa variável está estritamente correlacionada com o consumo de cimento, sendo fortemente influenciado pelos ciclos econômicos. Essa cointegração entre as duas séries levou à bem-sucedida estimação de um modelo de projeção baseado em um mecanismo de correção de erros (MCE).

Foram considerados três cenários para o crescimento do PIB até 2050: referência, otimista e pessimista. Com isso, fez-se a projeção de consumo de cimento por habitante e total, levando-se em consideração as elasticidades de longo prazo estimadas. Os cenários para o crescimento do PIB foram construídos a partir de um conjunto de projeções de instituições financeiras e organismos internacionais.

Alguns fatores foram levados em conta para a projeção de cimento: o crescimento populacional, as grandes deficiências em infraestrutura, o elevado déficit habitacional e os avanços tecnológicos.

Com relação à projeção demográfica, estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)³³ apontam para um crescimento populacional até 2040, seguida de estabilização e queda prevista a partir de 2050.

Estradas, pontes, portos, aeroportos, geração e distribuição de energia elétrica e redes de saneamento e abastecimento de água, entre diversos outros tipos de obra, demandarão cimento em sua construção. Uma vez construída esta infraestrutura, haverá moderação no crescimento da demanda pelo material, ainda que sua manutenção tenda a manter o consumo em níveis elevados.

No que diz respeito a habitações, espera-se que com o crescimento esperado da renda e sob a hipótese da persistência de políticas habitacionais ativas ocorra a eliminação ou pelo menos uma diminuição significativa deste déficit, o que igualmente impulsionaria o consumo de cimento por alguns anos, seguindo-se então um período de moderação no consumo para uso na construção residencial.

Finalmente, no longo prazo, avanços tecnológicos e técnicas mais modernas de construção tendem a aumentar a eficiência no uso do material, acarretando uma menor demanda de cimento para um mesmo número de edificações.

Todos estes fatores apontam na direção de uma redução, a partir de algum momento no horizonte de projeção, na intensidade da relação de longo prazo entre a renda do país, medida pelo PIB, e o consumo de cimento. Este efeito foi incluído no modelo estimado.

A análise dos resultados obtidos indica um crescimento significativo da demanda por cimento no Brasil entre 2016 e 2050 tanto no cenário de alta quanto de baixa demanda. Projeta-se que o consumo deva crescer com força até início da década de 2040 para, a partir de então, desacelerar, até que haja redução de demanda a partir de 2045.

Principais indicadores econômicos e projeção de cimento

	2014	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PIB (bilhões 2015 USD em PPC ³⁴)	3.234	3.196	3.796	4.232	4.928	5.413	5.660	6.218
População (milhões)	203	212	218	223	226	228	228	226
PIB per capita (2015 USD /hab)	15.951	15.072	17.386	18.966	21.765	23.724	24.810	27.470
Consumo per capita de cimento (kg/hab)								
Variante de Baixa Demanda	352	290	365	385	478	555	557	513
Variante de Alta Demanda	352	305	402	441	579	714	744	691
Produção de cimento (Mt)								
Variante de Baixa Demanda	71	62	80	86	108	127	127	116
Variante de Alta Demanda	71	65	88	98	131	163	170	156

³³ "Projeção da População do Brasil por Sexo e Idade para o Período 2000-2060". IBGE, 2013.

³⁴ Paridade do Poder de Compra.

Anexo 3: Technological profile of the cement industry in Brazil

2014		
Indicador	Unidade	Valor
Fábricas de Cimento	/	100
Integradas	/	64
Moagens	/	36
Capacidade de Clinquer	Mt/ano	57
Capacidade de Cimento	Mt/ano	95
Produção de Cimento por Tipo	% da produção	
CP I	%	1%
CP II	%	63%
CP III	%	9%
CP IV	%	15%
CP V	%	11%
Outros	%	1%
Tipo de Processo	% da capacidade	
Úmida	%	0,6%
Vertical	%	0,4%
Seca	%	99%
Seca c/ Preaquecedor de 4 estágios	%	30%
Seca c/ Preaquecedor de 4 estágios + Precalcinador	%	20%
Seca c/ Preaquecedor de 5 estágios + Precalcinador	%	37%
Seca c/ Preaquecedor de 5 estágios + Precalcinador	%	12%
Tipo de Resfriador	% da capacidade	
Resfriador Planetário (or Satélite)	%	20%
Resfriador de Grelha	%	80%
Moinho de Matéria-Prima	% da capacidade	
Moinho de Bolas	%	54%
Moinho Vertical	%	46%
Moinho de Cimento	% da capacidade	
Moinho de Bolas	%	84%
Moinho Vertical	%	16%
Moinho de Combustíveis	% da capacidade	
Moinho de Bolas	%	65%
Moinho Vertical	%	35%
Consumo Elétrico Específico	kWh/t cimento	
Prévio à Moagem da Matéria-Prima	%	3%
Moagem da Matéria-Prima	%	21%
Moagem de Combustíveis (coque; carvão; outros)	%	4%
Forno	%	26%
Moagem de Cimento	%	44%
Outros (carregamento; ensacamento, ...)	%	3%
Idade Média dos Fornos	% da capacidade	
≤ 15 anos	%	32%
16-30 anos	%	25%
31-50 anos	%	30%
≥ 51 anos	%	13%

Nota: números coletados e consolidados a partir de cerca de 75% da produção nacional e extrapolados para a totalidade da mesma.

Anexo 4: Principais resultados deste Roadmap

Produção	2014	2020	2030	2040	2050
Cimento (Mt)	71	62	87	126	117
Clinker (Mt)	48	41	51	67	61
Adições	2014	2020	2030	2040	2050
Fator Clinker (%)	68%	65%	59%	54%	52%
Escória de Alto Forno	14%	11%	11%	11%	11%
Cinzas Volantes	3%	3%	3%	3%	2%
Argilas Calcinadas	3%	3%	4%	4%	4%
Filer Calcário	8%	13%	18%	23%	25%
Outros	1%	1%	2%	2%	2%
Gesso	4%	4%	4%	4%	4%
Combustíveis Alternativos	2014	2020	2030	2040	2050
Taxa de Substituição (%)	15%	22%	35%	45%	55%
Resíduos	8%	15%	29%	36%	44%
Resíduos Industriais Não Perigosos	0%	5%	11%	14%	17%
Resíduos Industriais Perigosos (<i>Blend</i>)	4%	3%	3%	4%	4%
Pneus Inservíveis	5%	5%	5%	5%	5%
Resíduos Sólidos Urbanos (CDR)	0%	2%	10%	13%	17%
Biomassas	7%	7%	6%	9%	11%
Carvão Vegetal	6%	4%	0%	0%	0%
Lodo de Esgoto	0%	1%	2%	6%	7%
Resíduos Agrícolas	1%	2%	3%	3%	4%
Eficiência Energética	2014	2020	2030	2040	2050
Térmica (GJ/t clínquer)	3,50	3,49	3,47	3,38	3,22
Elétrica (kWh/t cimento)	113	111	106	95	91
Captura e Uso ou Estocagem de Carbono (CCUS)	2014	2020	2030	2040	2050
Mt CO ₂	0,0	0,0	0,0	1,7	3,3
Emissão Total	2014	2020	2030	2040	2050
Mt CO ₂	40	34	42	52	44
Emissão Específica	2014	2020	2030	2040	2050
(kg CO ₂ /t cimento)	564	552	485	414	375

PARCEIROS E COLABORADORES DO ROADMAP

Coordenação Geral



Sindicato Nacional da Indústria
do Cimento (SNIC)

Constituído em 1953 como representante legal do setor, o SNIC se destaca na representação político-institucional da categoria. Interagindo no âmbito da indústria, comércio e serviços - por meio de órgãos públicos e privados, nacionais e estrangeiros - colabora com o Estado, como entidade técnica e consultiva, nos temas econômicos, tributários, ambientais, de mineração e de saúde e segurança do trabalho. Desenvolve estudos e formula indicadores do setor, que contribuem para que os valores gerados pela atividade cimenteira sejam compartilhados com milhões de pessoas e favoreçam o crescimento econômico e social do país.



Associação Brasileira
de Cimento Portland (ABCP)

Fundada em 1936 para promover estudos e pesquisas sobre o cimento e suas aplicações, a ABCP – com Sede em São Paulo e Regionais em 9 capitais brasileiras - transformou-se em centro tecnológico de referência para o aprimoramento da fabricação do cimento e para o desenvolvimento do mercado da construção civil. Por meio de ensaios laboratoriais de excelência, cursos de capacitação, publicações técnicas, selos da qualidade, soluções inovadoras entre outros produtos, serviços e pesquisas, contribui para que a indústria ofereça um produto de mais alta qualidade e produzido dentro dos mais rigorosos padrões ambientais, ao mesmo tempo em que promove e incrementa o emprego de sistemas construtivos à base de cimento de grande durabilidade.

Empresas Participantes



CIPLAN - CIMENTO PLANALTO S.A.



INTERCEMENT DO BRASIL S.A.



CIA. DE CIMENTO ITAMBÉ



LAFARGE HOLCIM



EMPRESA DE CIMENTOS LIZ S.A.



VOTORANTIM CIMENTOS S.A.

Colaboradores



International
Energy Agency

International Energy
Agency (IEA)

A IEA analisa todo o espectro de questões energéticas, incluindo oferta e demanda de petróleo, gás e carvão, tecnologias de energia renovável, mercados de eletricidade, eficiência energética, acesso à energia, gestão de demanda e muito mais. Por meio de seu trabalho, a IEA defende políticas que aumentem a confiabilidade, acessibilidade e sustentabilidade da energia em seus 30 países membros, 7 países associados e além.

As quatro principais áreas de foco da IEA são:

- **Segurança Energética:** Promover diversidade, eficiência, flexibilidade e confiabilidade para todos os combustíveis e fontes de energia;

- **Desenvolvimento Econômico:** Apoiar os mercados livres para fomentar o crescimento econômico e eliminar a escassez energética;

- **Conscientização Ambiental:** Analisar as opções de políticas para compensar o impacto da produção e uso de energia no meio ambiente, especialmente no combate às mudanças climáticas e poluição do ar; e

- **Engajamento Global:** Trabalhar em estreita colaboração com países associados e parceiros, especialmente as principais economias emergentes, para encontrar soluções conjuntas para questões energéticas e ambientais.



wbcscd

World Business Council for
Sustainable Development (WBCSD)
Cement Sustainability Initiative (CSI)

A CSI foi um esforço global de 25 dos principais produtores de cimento do mundo, com operações em mais de 100 países, que acreditaram haver um sólido argumento comercial para a busca do desenvolvimento sustentável. Coletivamente, essas empresas respondiam por cerca de um terço da produção mundial de cimento e abrangiam, em tamanho, desde grandes grupos multinacionais até pequenos produtores locais.

Os membros da CSI integraram o desenvolvimento sustentável em suas estratégias e operações de negócios, na medida em que buscaram um

forte desempenho financeiro com um compromisso igualmente forte com a responsabilidade social e ambiental. A CSI, uma iniciativa do Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD), continua sendo até o momento um dos maiores projetos globais de sustentabilidade já realizados por um único setor industrial.

Suas atividades foram encerradas no final de 2018 e oficialmente transferidas para a recém criada Associação Global de Cimento e Concreto (GCCA) a partir de janeiro de 2019.

Para mais informações, visite www.wbcscdcement.org



Corporação
Financeira Internacional
GRUPO BANCO MUNDIAL

International Finance
Corporation (IFC)

A IFC, uma organização irmã do Banco Mundial e membro do Grupo Banco Mundial, é a maior instituição de desenvolvimento global focada exclusivamente no setor privado de países em desenvolvimento. Ela alavanca seus produtos e serviços - bem como os de outras instituições em todo o Grupo Banco Mundial - para criar mercados

que atendam aos maiores desafios de desenvolvimento do nosso tempo. A IFC aplica seus recursos financeiros, conhecimento técnico, experiência global e pensamento inovador para ajudar seus clientes e parceiros a superar desafios financeiros, operacionais e outros.

No ano fiscal de 2017, a IFC investiu US \$ 19,3 bilhões, incluindo quase US \$ 7,5 bilhões mobilizados de outros investidores.

Para mais informações, visite www.ifc.org

Agradecimentos

Esta publicação é fruto de um esforço conjunto do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) – ambos representantes dos grupos produtores Cimentos Liz, Ciplan, InterCement, Itambé, LafargeHolcim e Votorantim Cimentos - em colaboração com a Agência Internacional de Energia (IEA), Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (CSI) do Conselho Empresarial Mundial para Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) e Corporação Financeira Internacional (IFC) do Banco Mundial. Este

Roadmap contou também com valiosa contribuição de acadêmicos de renomadas universidades e centros de tecnologia do país na elaboração dos Papers Técnicos, sob a coordenação técnica do professor José Goldemberg. Nossos agradecimentos também aos mais de 200 profissionais da indústria, governo, academia, agências de desenvolvimento e demais atores que participaram das reuniões e workshops realizados ao longo do projeto, aportando ricas contribuições que ajudaram a compor este relatório.

Elaboração

Coordenação Geral

Gonzalo Visedo (SNIC) e Marcelo Pecchio (ABCP).

Comitê Técnico da Indústria

Ana Rita Pinton (Liz), Luiz Germano Bernartt (Votorantim), Norberto Schutz Cruzeiro (Itambé), Patricia Montenegro (Votorantim), Seiiti Suzuki (InterCement), Silvana Ottoboni (Ciplan).

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC)

José Otavio Carvalho, Bernardo Jannuzzi, Brenda Ruhle, Camila Jordan, Carlos Maia e Flavio Guimarães.

Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP)

Renato José Giusti, Ana Starka, Antonia Jadranka Suto, Arnaldo Battagin, Hugo Rodrigues, Mario William Esper e Yushiro Kihara.

Colaboração

Agência Internacional de Energia (IEA)

Araceli Fernandez, Cecilia Tam e Kira West.

Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (CSI/WBCSD)

Cristiana Ciaraldi, Philippe Fonta, Yvonne Leung (extensivo a todo o GT de Mudanças Climáticas da CSI)

Corporação Financeira Internacional (IFC/World Bank)

Alexander Sharabaroff, Luis Salomon e Michel Folliet.

Papers Técnicos (Coordenação: José Goldemberg)

Maria Alba Cincotto e Maristela Gomes (Adições e substitutos do clínquer); Mauricio Henriques Junior (Eficiência energética); José Goldemberg (Combustíveis alternativos); Marcelo Ketzer e Sergio Pacca (CCUS); Patricia Montenegro (Diferenças regionais); Vanderley John (Potencial de mitigação na cadeia da construção).



Objetivos, Parceiros e Colaboradores

O estudo aqui apresentado tem como objetivo mapear a situação atual e as tendências futuras da indústria brasileira do cimento, propondo alternativas para reduzir, ainda mais, as suas já baixas emissões de CO₂. Procura, ainda, identificar as barreiras e gargalos que limitam a adoção dessas alternativas e, com isso, propõe uma série de recomendações de políticas públicas, regulações, aspectos normativos, entre outros, capazes de potencializar a redução das emissões em curto, médio e longo prazo.

Este Roadmap representa o esforço conjunto de uma série de parceiros nacionais e internacionais somado às visões e contribuições de inúmeros especialistas e referências locais. A indústria brasileira do cimento esteve presente por meio dos grupos produtores Cimentos Liz, Ciplan, InterCement, Itambé, LafargeHolcim e Votorantim Cimentos, bem como através das associações de classe SNIC e ABCP. O projeto contou ainda com a colaboração da IEA, CSI e IFC e de uma série de acadêmicos de renome.

Coordenação Geral



Associação
Brasileira de
Cimento Portland

Colaboradores



International
Finance Corporation
WORLD BANK GROUP



International
Energy Agency



wbcsd

Empresas Participantes



InterCement



LIZ
CIMENTOS



CIPLAN



ITAMBÉ



LafargeHolcim



Votorantim
Cimentos