

Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos

Strategies for the minimization of CO₂ emissions from concrete

Vanessa Carina Heinrichs Chirico Oliveira
Bruno Luís Damineli
Vahan Agopyan
Vanderley Moacyr John

Resumo

A maior parte das emissões do concreto originam-se na produção do cimento. A estratégia tradicional de minimização da pegada de CO₂ tem privilegiado o grau de substituição do clínquer. No momento atual estima-se que a indústria cimenteira utilize toda a escória de alto forno gerada no país e a quase totalidade das cinzas de melhor qualidade. Desta forma, aumentando a demanda de cimento, a produção de clínquer aumenta, e o teor de adições no clínquer diminui dentro das extensas faixas permitidas pelas normas técnicas. O aumento do teor de adições em um tipo de cimento também pode ser realizado à custa da redução do teor de adições em outro tipo. Neste cenário, a seleção de um tipo de cimento em detrimento de outro não traz benefícios ambientais para o país, embora possa reduzir o impacto de uma obra específica. Outros fatores podem influenciar no total de emissões além da escolha do cimento, como a eficiência do processo de formulação, da variabilidade do processo de produção, etc. O objetivo do artigo é verificar o impacto de diferentes variáveis na pegada de CO₂ do concreto estrutural, fornecendo subsídios à cadeia produtiva de concreto para minimização do seu impacto ambiental.

Palavras-chaves: Emissão de CO₂. Teor de clínquer. Variabilidade de produção de concretos. Eficiência do processo de formulação.

Vanessa Carina Heinrichs
Chirico Oliveira
Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

Bruno Luís Damineli
Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

Vahan Agopyan
Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

Vanderley Moacyr John
Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

Recebido em 28/02/14
Aceito em 06/10/14

Abstract

Most emissions from concrete originate from cement production. The traditional strategy of minimizing the CO₂ footprint has privileged the degree of clinker replacement. At the present time, it is estimated that the cement industry utilizes all of the blast furnace slag generated in the country and nearly all quality fly ash. Consequently, if there is an increase in the demand for cement, there is an increase in clinker production, and the rate of additions to the clinker decreases, respecting the extensive limits permitted by technical standards. In this scenario, the selection of blast furnace slag cement and fly ash cement does not offer environmental benefits to the country as a whole and does not demonstrate a global impact, despite the possibility of benefiting specific construction sites. Other factors besides the choice of cement can influence the total emissions, such as the efficiency of the concrete mix formulation, and the variability of the production process. The goal of this paper is to investigate the impact of different variables on the CO₂ footprint of concrete, providing grounds for the concrete supply chain to minimize its environmental impact.

Keywords: CO₂ emissions. Clinker replacement. Variability of the production efficiency of concrete mix formulation.

Introdução

De acordo com o Intergovernmental Panel on Climate Change (2007), há evidências de que atividades humanas são as maiores responsáveis pelo aquecimento global nos últimos 50 anos, pois a emissão de dióxido de carbono nas ações antropogênicas é muito alta. A produção de cimento contribui para aproximadamente 5% das emissões de CO₂ do mundo (SINDICATO..., 2010). Pela importância social que o cimento possui e pela abundância geográfica de sua matéria-prima, é produzido em praticamente todos os países (WORRELL *et al.*, 2001). É o material industrializado mais consumido no mundo (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Entre os impactos ambientais do concreto, um dos mais importantes é certamente a emissão de CO₂. Segundo Lima (2010), 88,6% a 92,2% das emissões do concreto originam-se na produção do cimento. O transporte do concreto, mesmo em uma cidade como São Paulo, é responsável por em torno de 4% das emissões do concreto (SOUZA, 2012).

A indústria cimenteira está mobilizada em mitigar as emissões de CO₂ dos materiais cimentícios. A estratégia mais popular para a redução dos impactos ambientais do concreto é a redução do teor de clínquer no cimento. Em consequência, de uma forma geral, a estratégia utilizada pelos consumidores de cimento envolve a preferência dos tipos de cimentos com menor teor de clínquer, com base na hipótese de que as adições ativas, que são resíduos de outras cadeias produtivas, como as cinzas volantes, oriundas da queima de carvão mineral principalmente em termoeletricas, e a escória de alto-forno, gerada na produção do ferro-gusa, chegam para a indústria cimenteira com impacto ambiental nulo. Essa hipótese é uma das

soluções mais aceitas atualmente segundo as técnicas de Análise de Ciclo de Vida (ACV); porém, tem sido questionada, e a tendência europeia é a de alocar a esses resíduos parte do CO₂ e outros impactos ambientais dos processos industriais que os originaram (CHEN *et al.*, 2010).

No Brasil, os teores de clínquer permitidos e suas substituições estão normalizados (Tabela 1). Os tipos de cimento que admitem maior teor de substituição são o CP III e o CP IV. Entretanto, é importante notar que as faixas de adição são bastante amplas. Segundo a norma, um CP II-E pode ter menos clínquer do que um CP III. A existência de faixas de variação do teor de clínquer é uma necessidade prática, uma vez que a indústria cimenteira não controla o volume de oferta, tampouco a reatividade de adições ativas (escória e cinza volante). Em momentos de grande crescimento da demanda de cimento, os teores de substituição tendem a ser reduzidos, pois a produção do cimento aumenta mais rapidamente que a de aço e energia por queima de carvão mineral. A disponibilidade de escória de alto-forno para a produção brasileira de cimento no ano de 2012 atingiu aproximadamente 7,55x10⁶ t (INSTITUTO..., 2013). Como a produção de cimento foi de mais de 59x10⁶ t em 2010 (SINDICATO..., 2010), pode-se estimar que a escória disponível para substituição de clínquer é de pouco mais de 10% do consumo anual de cimento brasileiro, ou próximo de 22% para a região Sudeste. Também se estima que a oferta de cinza volante não é capaz de suprir toda a demanda da indústria cimenteira (HUMPHREYS; MAHASANAN, 2002).

Tabela 1 - Composição do cimento de acordo com as normas brasileiras (% em massa). O teor de clínquer é estimado assumindo-se um teor de sulfato de cálcio médio de 4%

Sigla	CP II - F	CP II - Z	CP II - E	CP III	CP IV	CP V - ARI
Classe (MPa)	25/32/40	25/32/40	25/32/40	25/32/40	25/32	
Clínquer + Sulfato de cálcio	90 a 94	76 a 94	56 a 94	25 a 65	55 a 85	95 a 100
Escória	-	-	6 a 34	35 a 70	15 a 40	
Pozolana	-	6 a 14	-		15 a 40	
Filler	6 a 10	0 a 10	0 a 10	0 a 5	0 a 5	0 a 5
Clínquer (sem os 4% de sulfato de cálcio)	86 - 90	72 - 90	52 - 90	21 - 61	51 - 81	91 - 96
Norma técnica	NBR 11578 (ABNT, 1997)			NBR 5735 (ABNT, 1991a)	NBR 5736 (ABNT, 1999)	NBR 5733 (ABNT, 1991b)

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997, 1991a, 1991b, 1999).

Além da variação permitida de clínquer, as emissões da produção de cimento podem variar devido a diferenças entre processos produtivos de empresas e em uma mesma empresa ao longo do tempo (CHEN *et al.*, 2010). A eficiência dos fornos varia consideravelmente. Adicionalmente, observa-se com frequência alteração dos tipos de combustíveis utilizados (LIMA, 2010). Na média brasileira, os combustíveis são 40% do volume de CO₂ liberado na produção do cimento (JOHN, 2011; CEMENT..., 2009; SINDICATO..., 2010). Cada combustível tem uma intensidade de CO₂ associada. As variações nos combustíveis utilizados podem ser importantes.

É também evidente que o impacto ambiental de concretos e de outros produtos cimentícios depende do impacto do cimento utilizado e do teor de cimento empregado. Existem significativas variações no teor de cimento para concretos com resistências à compressão e trabalhabilidade similares, dependendo das condições de dosagem, variabilidade do processo, e dos materiais empregados, inclusive a reatividade do cimento, as propriedades físicas e mecânicas dos agregados e tipos e teor de aditivo empregado. A fração reativa presente no cimento também varia, pois o teor de *filler* é variável, e a reatividade dos *fillers*, apesar de ser objeto de diversos estudos, é muito menor do que a do clínquer (LOTHENBACH *et al.*, 2008; MENÉNDEZ; BONAVETTI; IRASSAR, 2003). É possível mensurar o efeito desses fatores analisando o estudo apresentado por Daminieli *et al.* (2010a). Os autores analisaram concretos de 28 países utilizando um indicador, a intensidade de

ligante (IL), definido como a massa de ligantes C [kg] (adições ativas, clínquer e sulfato de cálcio) para produzir 1 m³ de concreto dividido pela resistência f_{cj} [MPa] do concreto aos 28 dias (Equação 1).

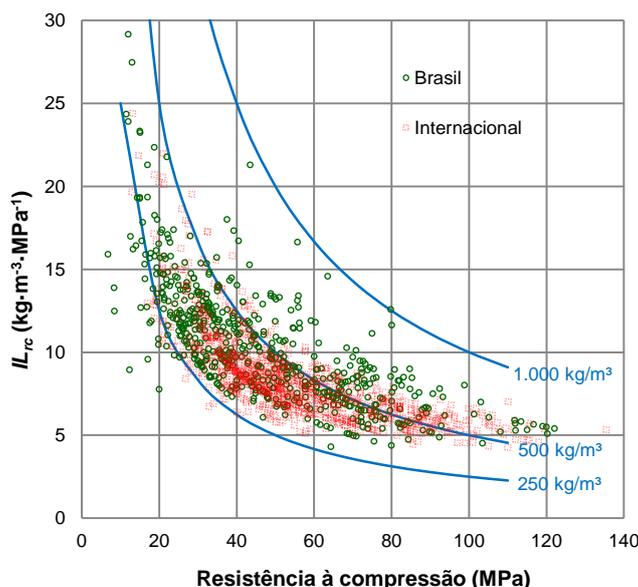
$$IL = C \cdot f_{cj}^{-1} \quad \text{Eq. 1}$$

Os resultados estão apresentados na Figura 1. O *filler* calcário, presente em muitos cimentos, não é computado como ligante (DAMINIELI *et al.*, 2010a). Os dados mostram uma significativa dispersão na intensidade de ligantes. Por exemplo, para uma resistência média (de dosagem, f_{cj}) de 20 MPa, o IL variou entre 10,5 e 22 kg.m⁻³.MPa⁻¹. Isso significa que o teor de ligante variou entre 210 e 400 kg/m³ de concreto. Como o cimento é cerca de 90% da pegada de CO₂ do concreto, a pegada deste varia na mesma proporção. Os resultados referem-se a concretos com diferentes comportamentos reológicos.

Adicionalmente, a variabilidade do processo de produção do concreto aumenta a resistência de dosagem (f_{cj}) em comparação com a resistência característica (f_{ck}) (JOHN, 2011), que se deve à necessidade de se projetar o concreto de resistência média, o que garante que, mesmo com a variabilidade do processo produtivo, a resistência de projeto será sempre alcançada na prática. Isso influencia o teor de cimento necessário à produção de um concreto com determinado desempenho. A Equação 2 mostra a relação entre resistência de projeto e resistência média de dosagem, e dp é o desvio padrão do processo de produção.

$$f_{cj} = f_{ck} + 1.65 dp \quad \text{Eq. 2}$$

Figura 1 - Variação da intensidade de ligantes para concretos plásticos de 28 países mais Brasil



Fonte: Daminieli *et al.* (2010a).

Este valor varia, segundo a norma NBR12655 (ABNT, 1996), entre 4 e 7 MPa, dependendo do grau de controle do processo produtivo – particularmente do grau de controle da umidade dos agregados e da massa de cimento (RECENA; PEREIRA, 2011). Para produzir concreto com f_{ck} de 20MPa, caso não seja conhecido como é feito o controle do processo produtivo, a resistência de dosagem (f_{cj}) irá variar entre 27 e 32 MPa.

Muitas dessas variáveis que influenciam a pegada ambiental de um concreto podem ser controladas por aqueles que especificam e produzem os concretos. No entanto, outras são controladas pelos produtores das matérias-primas, especialmente do cimento, sendo somente possível selecionar o melhor fornecedor dentre os disponíveis. A discussão sistemática do potencial das diferentes estratégias para controlar a pegada de CO₂ de concreto tem estado ausente da literatura.

O objetivo deste trabalho é verificar o impacto de diferentes variáveis na pegada de CO₂ do concreto com resistência à compressão de 20MPa, 30MPa e 40MPa. Com isso, busca-se obter um cenário de importância da variação das emissões de CO₂ da produção de concretos por faixa de resistência e demonstrar como e a partir de que ações os consumidores de concreto podem interferir na cadeia para diminuir o impacto ambiental dos produtos que produzirão e utilizarão em seus empreendimentos.

Método de trabalho

O trabalho utiliza dados da literatura e da normalização técnica para identificar as faixas de variação do teor de clínquer no cimento, a influência do teor de cimento no concreto e o desvio padrão do processo produtivo. Também foram utilizados dados de uma grande empresa produtora de concretos para avaliar a variação do teor de cimento no concreto. São analisados os cimentos CII-E, CII-Z, CII-F, CIII, CIII-V e CPV, com os teores de clínquer permitidos por norma. Para os concretos, são analisados aqueles com resistências à compressão de 20MPa, 30MPa e 40 MPa. Os detalhes de cada variável estão explanados a seguir.

Influência da variação do teor de clínquer para cimentos

Desprezando os impactos da moagem, transporte e secagem das adições, bem como admitindo que a

alocação de emissões de CO₂ do processo produtivo que gera as adições mais utilizadas (escória de alto-forno e cinzas volantes) é nula, hipóteses geralmente aceitas (DAMINELI *et al.*, 2010a; MINISTÉRIO..., 2011), é possível estimar as emissões médias (C) de CO₂ dos cimentos (C_m), seja do país ou de alguma empresa, da fração média de clínquer (k_m) nos cimentos, e da fração de clínquer (k) do cimento em análise que foi substituída por resíduos (cinza volante, escória de alto-forno, cinzas vegetais...) e *filler* em questão (Equação 3). Dessa forma, é possível estimar a emissão média do clínquer, sendo conhecidos os valores de emissão do cimento e o teor de clínquer.

$$C = k \cdot C_m \cdot k_m^{-1} \text{ Eq. 3}$$

De acordo com o Relatório Anual do Sindicato Nacional de Indústria do Cimento (2014), a intensidade de CO₂ do cimento foi em torno de 600 kgCO₂/t, admitindo alocação nula das emissões referentes às adições minerais residuais (escória de alto-forno e cinza volante). Sendo a fração média de clínquer no país 0,69 (MINISTÉRIO..., 2011), calcula-se que a emissão média do clínquer brasileiro seja de 855,07 kgCO₂/t. Com esse dado, pode-se obter um valor máximo e mínimo para as emissões de cimento, baseando-se nos valores de substituição de clínquer permitidos por norma. Tem-se assim que a emissão mínima para o cimento brasileiro é de 179,57 kgCO₂/t, considerando o cimento CIII, que permite um mínimo de 25% de clínquer + sulfato de cálcio e admite 4% do sulfato de cálcio. Da mesma forma, a emissão máxima para o cimento brasileiro é de 820,87 kgCO₂/t, considerando o cimento CPV-ARI, que estabelece até 100% de clínquer (96% de clínquer + 4% de sulfato de cálcio).

Como os cimentos variam entre as empresas do setor, também foram analisados dados das emissões declaradas de três grandes empresas participantes do Cement Sustainability Initiative do World Business Council for Sustainable Development. Para isso, considerou-se a emissão de cimento e o teor de clínquer declarados em relatórios disponíveis ao público (HOLCIM, 2010; INTERCEMENT, 2011; VOTORANTIM..., 2010), e a estimativa da emissão do clínquer foi feita da mesma maneira que para a média brasileira (Tabela 2) – exceção feita a uma empresa, que declarou a emissão de CO₂ específica da produção do clínquer, sendo esse o valor adotado.

Tabela 2 - Emissão de CO₂ (kgCO₂/t) de empresas cimenteiras que participam do Cement Sustainability Initiative, do WBCSD, e declaram publicamente suas emissões - dados de 2010 estimados para diferentes tipos de cimento

	Mínima	Declarada (média)	Máxima
Empresa 1	174,93	656	799,68
Empresa 2	187,68	597	857,98
Empresa 3	176,33	517	806,08

É importante ressaltar que a tendência já consolidada na Europa de alocar as emissões de CO₂ aos resíduos (escória e *filler*) impactaria esse cálculo (CHEN *et al.*, 2010). A metodologia de Análise de Ciclo de Vida permite a alocação das emissões aos resíduos (ou coprodutos), seja por massa, por valor econômico, distribuição por consumo energético ou por distribuição química, o que altera significativamente o cenário das emissões do cimento (BIRAT, 2011). Chen *et al.* (2010) propõem que se busque um equilíbrio econômico entre os agentes com base no preço da tonelada de CO₂. A emissão de CO₂ do transporte das adições até as fábricas de cimento também pode influenciar nesse cenário, dependendo da distância e do meio de transporte utilizados. A alocação de emissão de CO₂ aos resíduos é uma discussão bastante complexa e não será discutida neste artigo.

Influência da variação do consumo de cimento em concretos de mesmo fck

Diferentes condições de aplicação e preparo do concreto, assim como das características das matérias-primas que incluem os cimentos, levam a diferentes consumos de cimento para um concreto com a mesma resistência característica. Isso, por sua vez, influencia diretamente na eficiência do uso dos ligantes (IL_{rc}), já que a relação consumo de ligantes-resistência é alterada. Os dados de dosagem estão apresentados no índice Intensidade de Ligantes (IL_{rc}), definido como a quantidade de ligante (kg/m³ de concreto) necessária para produzir uma unidade de resistência (MPa) aos 28 dias de idade. Esse índice é um indicador ambiental do concreto, que permite uma comparação rápida e objetiva de diferentes misturas, não necessita de nenhum dado além dos parâmetros convencionais de dosagem, o que torna seu cálculo rápido e fácil, e já vem sendo adotado em várias centrais de concreto para medir o desempenho econômico dos produtos.

Neste item foi avaliada a influência da dosagem de concretos sobre o consumo de ligantes e sobre o indicador IL_{rc} . Ao contrário do item anterior, no qual a mitigação de emissões está intimamente

ligada ao processo produtivo do cimento e o usuário apenas tem o poder de selecionar a fábrica produtora e o tipo de cimento, a dosagem do concreto é uma ação de grande potencial para a mitigação de CO₂ da cadeia e depende fundamentalmente do usuário – tanto quando este compra concreto de uma central de concreto como quando produz o material diretamente.

Para a realização desta análise, foram avaliados dados de consumo de concretos de literatura (DAMINELI *et al.*, 2010a) e de uma central de concreto (DAMINELI *et al.*, 2010b). Os dados foram filtrados de acordo com três variáveis:

- tipo de cimento;
- dados de dosagem em central de concreto ou obtidos na literatura – nos dados da literatura foram analisados apenas os brasileiros, por questão de comparação com a central de concreto, também nacional; e
- faixas de resistência à compressão, sendo as analisadas 20, 30 e 40 MPa (fcj), responsáveis pela grande maioria dos concretos usuais no mercado.

Para aumentar o volume de dados, para cada faixa de resistência analisada, foram coletados dados dos concretos de resistência até 3 MPa superior ou inferior ao fcj analisado – por exemplo, para analisar concretos de 20 MPa foram selecionados dados de misturas entre 17 e 23 MPa.

Influência do desvio padrão do processo produtivo

De acordo com a norma técnica NBR 12655 (ABNT, 1996), a produção de concreto deve considerar desviopadrão entre 4 e 7 MPa, de acordo com o controle do processo produtivo. Processos de maior controle podem adotar desvios menores, conforme a dispersão real da obra ou central de concreto.

Quanto menor o controle da condição de produção, maior será o desvio padrão, maior a resistência de dosagem utilizada e, conseqüentemente, maior o consumo de cimento. Assim, quanto menos eficiente o controle de qualidade, maior o teor de cimento utilizado para garantir a mesma resistência, o que diminuirá sensivelmente a eficiência do uso dos ligantes.

Para avaliar qual a influência do controle de qualidade adotado sobre o consumo de cimento, foram selecionadas três resistências à compressão para f_{ck} (20, 30 e 40 MPa). Para cada uma delas, foi calculada a resistência de dosagem f_{cj} para desvios padrão de 3, 5 e 7 MPa. Considerando um consumo de água médio fixo de 185 l/m³, a variação da resistência mecânica é realizada a partir da variação do teor de cimento. Este foi calculado utilizando-se uma curva de Abrams experimental de um cimento CPV-40 ($f_{cj} = 12,073a/c^{-1,725}$ $R^2 = 0,9965$).

Combinação das variáveis

Cruzando os dados da variação do teor de clínquer nos diferentes tipos de cimentos nacionais com a variação do consumo de cimento observada em literatura e na central de concreto estudada, é possível calcular as emissões de CO₂ mínimas e máximas de concretos para cada faixa de resistência e para cada tipo de cimento utilizado. Para os cálculos aqui adotados, foi considerado o teor de emissões de CO₂ por tonelada de clínquer médio nacional (895,6 kg CO₂/tonelada de clínquer), calculado a partir do teor médio de clínquer e a emissão de CO₂ do cimento. A adoção desse valor médio deveu-se ao fato de que a variação das emissões do clínquer para as empresas pesquisadas é pequena, principalmente quando comparada às variações do teor de clínquer

nos cimentos e do consumo de cimento nos concretos. Assim, o resultado desse cruzamento de dados permite a geração de um cenário para visualização e comparação rápida entre o potencial de mitigação de CO₂ para concretos de uma resistência fixada, variando-se a seleção do cimento e a variação do consumo de cimento com relação à eficiência do uso dos ligantes.

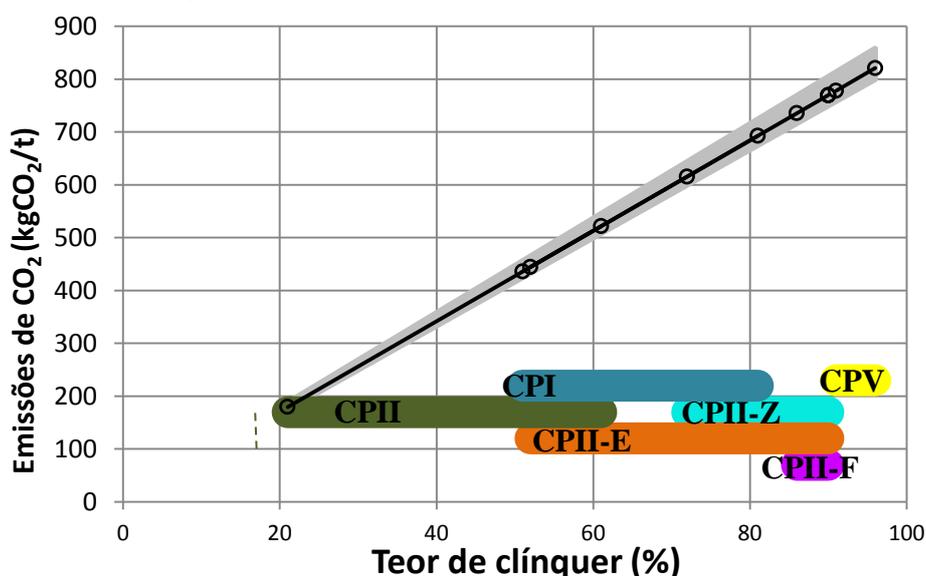
Resultados

Influência da variação do teor de clínquer para cimento

Os resultados da Figura 2 mostram que o tipo de cimento é um fator importante, mas não absoluto, na definição das emissões de CO₂. Um cimento CPV, ou até mesmo um CPII-E, pode apresentar um teor menor de clínquer do que o cimento CPIII. Como a norma permite grandes faixas de teores de clínquer, a melhor decisão somente pode ser tomada sabendo-se qual o teor de clínquer real utilizado no cimento.

Embora seja possível realizar estimativas laboratoriais do teor de clínquer, isso só será feito de forma prática quando for introduzida no mercado a declaração ambiental de produto, na qual a empresa declara os impactos ambientais de seus produtos.

Figura 2- Emissão média brasileira de CO₂ por teor de clínquer permitido por tipo de cimento e faixa de emissão média das três empresas estudadas (em cinza)



A Figura 2 mostra a porcentagem de teor de clínquer no eixo horizontal e as emissões de CO₂ no eixo vertical. Para cada cimento a faixa de clínquer permitida em norma corresponde a uma faixa de emissões de CO₂, com base no cálculo a partir da média brasileira. A legenda em cores abaixo mostra com mais clareza as diferentes faixas de teor de clínquer de cada cimento. Com isso, observa-se a sobreposição de teor de clínquer em diferentes cimentos. Os cimentos CPIII, CPIV e CPII-E, por exemplo, podem ter o mesmo teor de clínquer, o que corresponde à mesma emissão de CO₂. O mesmo acontece para determinada faixa dos cimentos CPIV, CPII-E e CPII-Z, e ainda CPII-Z, CPII-E e CPII-F. A faixa cinza representa a variação das três empresas (valores da Tabela 2).

Há uma variação de 7% nas emissões entre as empresas estudadas para um mesmo teor de clínquer. Espera-se que essa faixa deva ampliar significativamente se forem consideradas outras empresas do mercado brasileiro.

A análise cuidadosa da Figura 2 também demonstra que estimar o ganho ambiental de um concreto baseando-se apenas na seleção do tipo de cimento pode levar a erro. A limitação da oferta de escória e cinza volante pode causar aumento no teor de clínquer em cimentos CPIII e CPIV, reconhecidos no mercado como tendo menor impacto ambiental. Uma alternativa para as empresas seria reduzir significativamente o teor de adições no CPII-E e CPII-Z para valores muito baixos, liberando escória e cinza volante para os cimentos CPIII e CPIV. Esse cenário é aplicável em casos nos quais não há indicação técnica de um cimento específico, que limite o tipo de cimento que poderá ser utilizado.

Considerando que a oferta de escória nacional não é regida pela demanda da indústria do cimento, e sim pela produção do ferro-gusa, variações na demanda de cimento são atendidas com variações no teor de clínquer. Como exemplo, supõe-se que ocorra forte aumento na demanda de um cimento CPIII. Considerando que uma empresa já utilize toda a oferta de escória disponível, ela terá de optar por aumentar o teor de clínquer do cimento CPIII ou diminuir o teor de escória em algum outro cimento, para satisfazer o mercado.

Assim, em cenários em que a indústria já utilize todas as adições ativas residuais disponíveis, o tipo do cimento selecionado não será relevante para a mitigação efetiva de CO₂. Em outras palavras, a seleção do cimento pelo teor de clínquer não irá modificar o cenário das emissões brasileiras. Ao se diminuir a emissão de um prédio, pode haver a ilusão de diminuição da pegada de CO₂ global. No entanto, essa redução será compensada em outra

construção. Talvez faça mais sentido selecionar a empresa fornecedora de cimento por critérios como sua matriz energética e eficiência energética do que pelo teor de clínquer médio de seus cimentos, e ainda menos pelo tipo do cimento.

Influência da variação do consumo de cimento em concretos de mesmo fck

A Figura 3 apresenta a faixa de variação e a mediana do IL_{rc} (quantidade de ligante necessária para produzir uma unidade de resistência (MPa) aos 28 dias de idade) dos dados de literatura, de acordo com variação do tipo de cimento utilizado na mistura e a classe de resistência à compressão. Os dados utilizados para análise são nacionais, do estudo de Damineli *et al.* (2010a). A discussão a seguir se concentra no valor mediano (que mostra a tendência geral) e o mínimo da faixa de variação, que demonstra o potencial do produto. O valor máximo provavelmente revela apenas limitações na qualidade dos materiais (agregados e aditivos utilizados, por exemplo) ou baixa eficiência do processo de dosagem.

Observa-se que o IL_{rc} mediano e mínimo diminuem de acordo com o aumento da resistência. Isso é esperado, conforme analisado em Damineli *et al.* (2010a), já que os elevados teores de cimento nesses concretos acarretam altos teores de pasta, o que permite que sejam misturados com baixas relações a/c. Assim, a seleção de resistências de projeto maiores é uma estratégia que pode ser adotada pelo usuário para aumentar a eficiência do uso dos ligantes. Observa-se ainda tendência do IL_{rc} mínimo e mediano menores (maior eficiência) de misturas feitas com CPV para todas as classes de resistência. Quanto maior a classe de resistência, maior a diferença entre o CPV e os demais tipos de cimento. Porém, os dados de CPIII atingiram valores de IL_{rc} relativamente próximos aos do CPV. Entretanto, deve ser levado em conta que o CPV possui maior pegada de CO₂, como será discutido no item Combinação das variáveis: teor de clínquer no cimento e eficiência de dosagem do concreto.

A dispersão dos resultados dentro de cada barra do gráfico deve-se, entre outros aspectos, à variação nas técnicas de dosagem e materiais utilizados. Para um mesmo tipo de cimento e uma mesma classe de resistência à compressão, os valores de IL_{rc} – e, portanto, o consumo total de ligantes, responsável diretamente pelo aumento ou diminuição das emissões de CO₂ – variaram consideravelmente. Para a faixa de resistência de 20 MPa e uso de CPV, por exemplo, houve variação de até 86% nos valores de IL_{rc} , o que demonstra que a qualidade dos materiais agregados

utilizados, a eficiência dos aditivos e os procedimentos de dosagem influenciaram de forma crucial no aumento ou diminuição das emissões de CO₂. Assim, a classificação dos concretos que tem por base o tipo de cimento é incompleta.

A Figura 4 mostra um comparativo entre os dados da literatura e dados de quatro centrais de concreto brasileiras, todas pertencentes a um mesmo grupo empresarial. Os dados foram retirados, respectivamente, de Damine*li et al.* (2010a, 2010b).

Figura 3 - Desempenho do IL_{rc} de acordo com a variação da classe de resistência e tipo de cimento utilizado nas misturas A linha em preto dentro de cada barra de variabilidade é o valor mediano encontrado em cada conjunto de dados

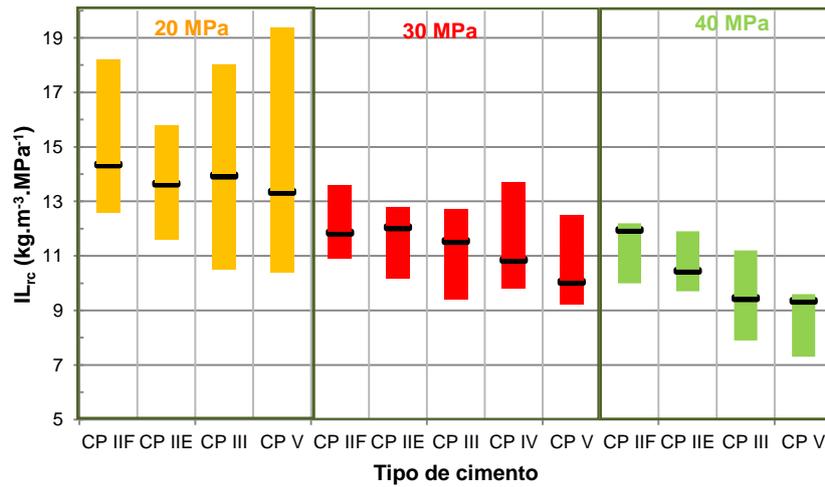
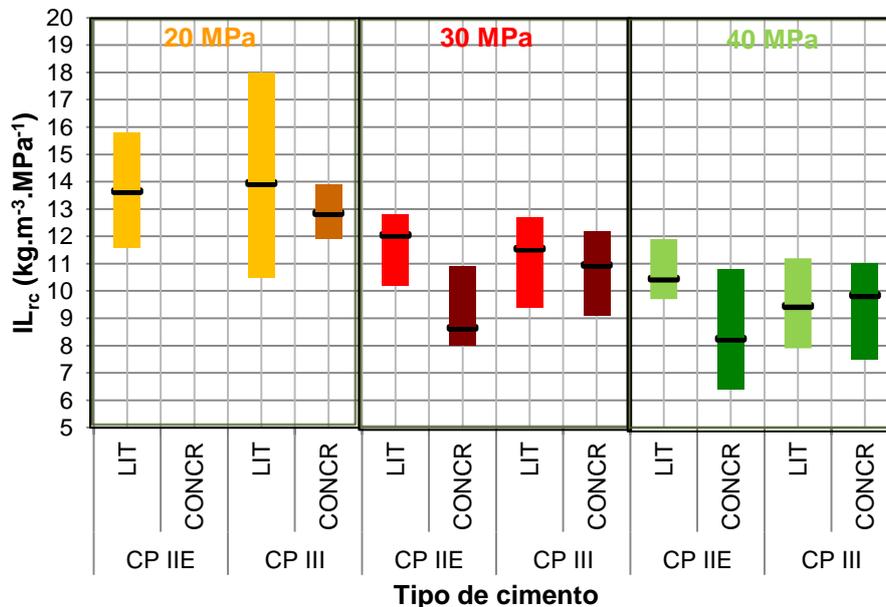


Figura 4 - Desempenho do IL_{rc} de acordo com a variação da classe de resistência, o tipo de cimento e a fonte de dados (LIT - literatura ou CONCR - central de concreto). A linha horizontal apresenta o consumo mínimo estabelecido pela norma



Observa-se que as centrais de concreto apresentam resultados de IL_{rc} menores do que a literatura no caso da utilização do cimento CII-E. Isso demonstra que as centrais de concreto, em geral, sabem dosar concretos com maior eficiência do que se depreende dos dados encontrados em literatura. Por outro lado, no caso do CIII, os resultados de IL_{rc} de literatura e centrais de concreto são muito parecidos. Isso pode ser explicado não pela equiparação no conhecimento de dosagem entre ambas as fontes para esse cimento, mas pelo fato de que as centrais de dosagem recebem de seus clientes solicitações de resistências mínimas, para que a desforma do concreto possa ser realizada em baixas idades – um dos principais problemas do uso dos cimentos com alto teor de adições, como o CIII e CIV, em concretos, pois os cimentos com adições costumam ter resistências iniciais menores (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Para viabilizar isso, as centrais aumentam o consumo desses cimentos, para aumentar a resistência em baixas idades. Conclui-se que as centrais de concreto apresentam menor consumo de cimento do que na literatura quando usam cimentos mais reativos, chegando a 40% de redução do IL_{rc} . Essa diferença torna-se bem menor ou desaparece quando são usados cimentos com adição, como o CIII. Em outras palavras, é provável que os requisitos de resistência de desforma reduzam o benefício ambiental de baixos teores de clínquer. Uma opção para superar o problema é o desenvolvimento de tecnologia para acelerar a reação das adições. Do ponto de vista da construtora, a opção seria o uso de pré-moldados, o que poderia exigir cura térmica (CAMARINI, 1995), que, dependendo do tipo de combustível utilizado, também impacta significativamente na emissão de CO_2 . A opção de atrasar o cronograma é insustentável, pelas implicações econômicas na maioria dos casos.

Dados recentes demonstram que é possível diminuir ainda mais a intensidade de cimento nos concretos. Estudos feitos em laboratório têm desenvolvido concretos com a metade ou um terço da quantidade de ligante utilizada no mercado hoje. É possível, em laboratório, utilizando materiais de mercado, produzir concretos autoadensáveis de 50Mpa com 126kg/m³ de ligante total (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2013).

Existem na literatura e na normalização europeia índices de capacidade ligante equivalente das adições em relação ao clínquer. No estudo de Habert (2013), esse fator aparece para calcular o total de ligante equivalente para uma mistura de cimento (Equação 4).

$$BE = cem + k \cdot SCM \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo:

BE o valor equivalente de ligante dado em quilogramas por metro cúbico;

em o consumo de cimento (kg/m³);

k o parâmetro de capacidade equivalente das adições, específico para a adição mineral utilizada; e

SCM a dosagem da substituição (kg/m³).

Seu estudo adota $k=0,9$ para a escória de alto-forno, e $k=0,6$ para cinza volante. Aplicando a um exemplo brasileiro, com um fator médio de 45% de clínquer (e 50% de escória) para um cimento CIII e o restante substituído para escória, temos a seguinte expressão (Equação 5):

$$BE = 0,45 + 0,9 \cdot 0,55 \quad \text{Eq. 5}$$

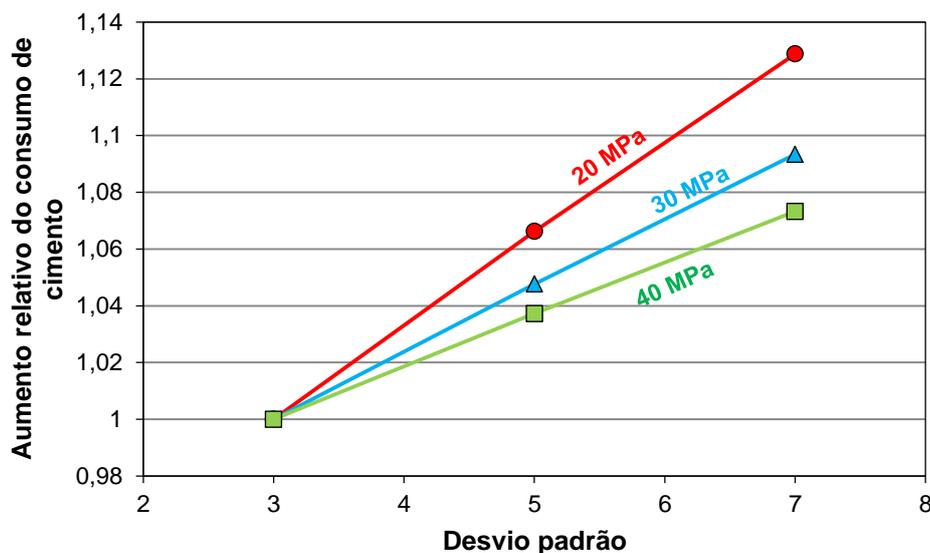
O BE, então, é de 0,945. Esse teor indica que haveria aumento de cerca de 5,5% no consumo de cimento com essa substituição. Porém, os dados das centrais de concreto mostram que o consumo aumenta muito mais do que isso. Assim, esse valor de “*k*” não está apropriado para o caso brasileiro.

Devido à grande amplitude de eficiência do IL_{rc} encontrada, destaca-se que o bom uso do cimento e ligantes através dos aspectos relacionados à dosagem do concreto é, portanto, uma ação de grande impacto. Como isso depende fundamentalmente do usuário, seja este uma central de dosagem ou um consumidor independente, deve-se destacar a responsabilidade do usuário final diante aspectos de sustentabilidade relacionados à cadeia do concreto.

Influência do desvio padrão do processo produtivo

A Figura 5 apresenta a variação do aumento do consumo de cimento de misturas de concreto em porcentagem a partir da variação do desviopadrão adotado para o processo de dosagem. Os dados foram divididos por faixa de resistência.

Figura 5 - Relação entre aumento do consumo de cimento e desviopadrão do processo produtivo do concreto, por faixas de resistência



O menor desvio descrito na norma técnica NBR 12655 é 4 MPa (ABNT, 1996). Porém, na presente análise, o desviopadrão de 3 MPa foi adotado porque nas centrais de concreto o processo é bastante controlado, o que permite o uso de um menor desvio padrão, desde que seja superior a 2 MPa. Considerando-se um aumento deste desvio para 5 e para 7 MPa, observa-se na Figura 5 o aumento do consumo de cimento necessário para que as misturas com maior desviopadrão (portanto, menor controle tecnológico) atinjam a resistência requerida. Quanto menor a resistência do concreto, maior a influência do desviopadrão no consumo de cimento, já que, proporcionalmente, a diferença entre a resistência média (f_{cj}) e a característica (f_{ck}) se torna gradativamente maior. Dessa forma, considerando-se o pior caso (resistência de 20 MPa e desviopadrão de 7 MPa), o aumento do consumo de cimento chega a, no máximo, 13% com relação ao mesmo concreto com desviopadrão baixo (3 MPa). O aumento do consumo de cimento diminui gradativamente à medida que se aumenta a resistência característica de projeto e se diminui o desviopadrão. Em um cenário mediano, com resistência de 30 MPa e desvio de 5 MPa, esse aumento do consumo de cimento não passa de 4%. Vale lembrar que o desvio padrão de uma central não é constante.

Embora os números devam variar em função da curva de Abrams e de diferentes conjuntos de materiais, esta variável tem menor importância do que a eficiência do conjunto materiais e dosagem, discutida anteriormente. Essas conclusões precisam ser confirmadas com uma análise mais abrangente.

Combinação das variáveis: teor de clínquer no cimento e eficiência de dosagem do concreto

As Figuras 6 a 7 apresentam a variação das emissões de CO_2 por metro cúbico de concreto em função da seleção do cimento e da eficiência da dosagem no que diz respeito ao uso dos ligantes. Cada figura apresenta os resultados para determinada resistência à compressão. Os dados utilizados para análise são resultado de diferentes combinações dos dados de centrais de concreto de Damini *et al.* (2010b), considerando os teores de clínquer permitidos nas normas brasileiras.

Observa-se que, por causa da grande variabilidade da eficiência do uso dos ligantes – expressa pela variação do consumo de cimento para obtenção de concretos de mesma resistência –, o uso de cimentos com menor teor de substituição de clínquer pode gerar concretos com emissões de CO_2 menores do que cimentos que teoricamente seriam mais “ecológicos”, por permitirem maior teor de substituição. Isso demonstra que a simples seleção do cimento, apesar de ser uma estratégia reconhecida até mesmo por certificações ambientais, pode não significar um ganho real em termos de emissões caso o cimento não seja bem utilizado. Dessa forma, sugere-se que todas as certificações e estratégias de redução de emissões através da seleção de cimentos devam ser acompanhadas de parâmetros mínimos de eficiência do uso desses cimentos para que o ganho seja real.

Figura 6 - Influência da eficiência do processo de dosagem, expressa pela variação consumo de cimento, e da seleção do tipo de cimento, considerando-se as variações de teor de clínquer previstas em norma, na emissão de CO₂ do concreto final - resistência à compressão de 20 MPa

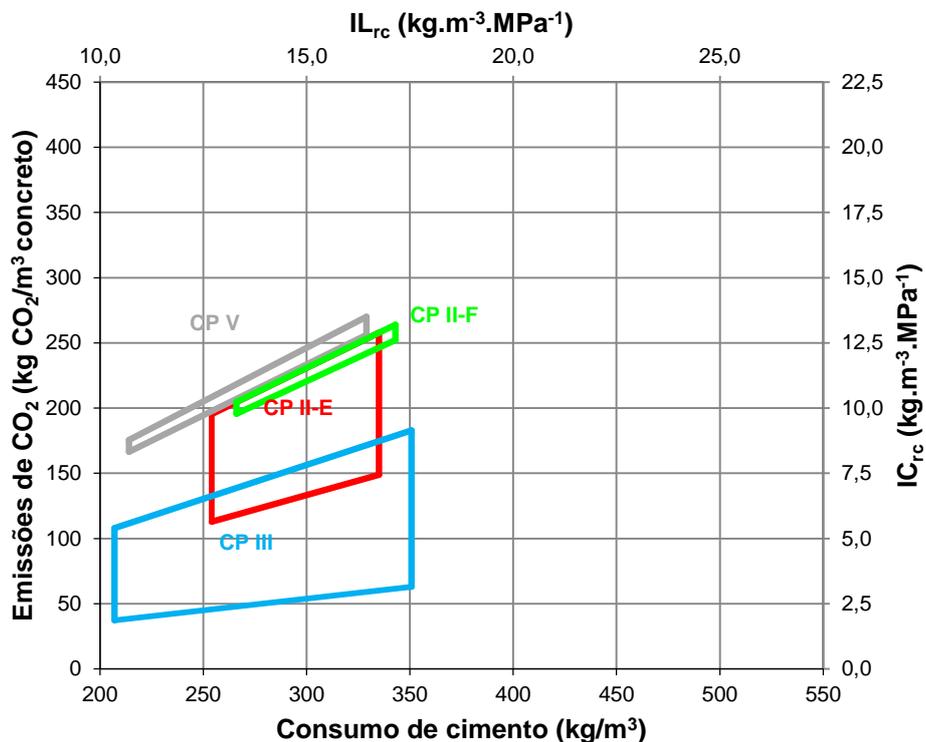


Figura 7 - Influência da eficiência do processo de dosagem, expressa pela variação consumo de cimento, e da seleção do tipo de cimento, considerando-se as variações de teor de clínquer previstas em norma, na emissão de CO₂ do concreto final - resistência à compressão de 30 MPa

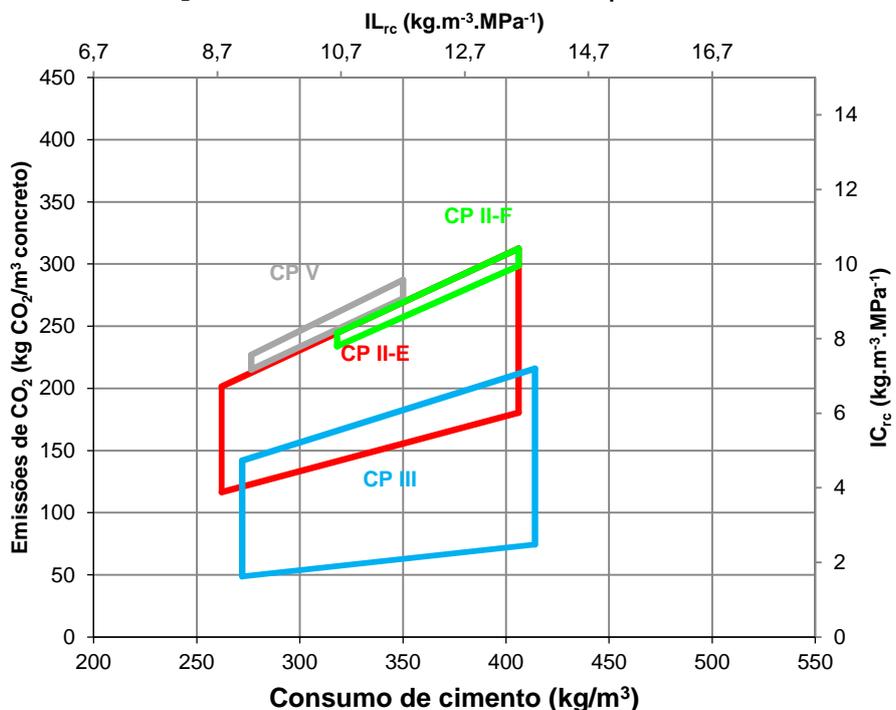
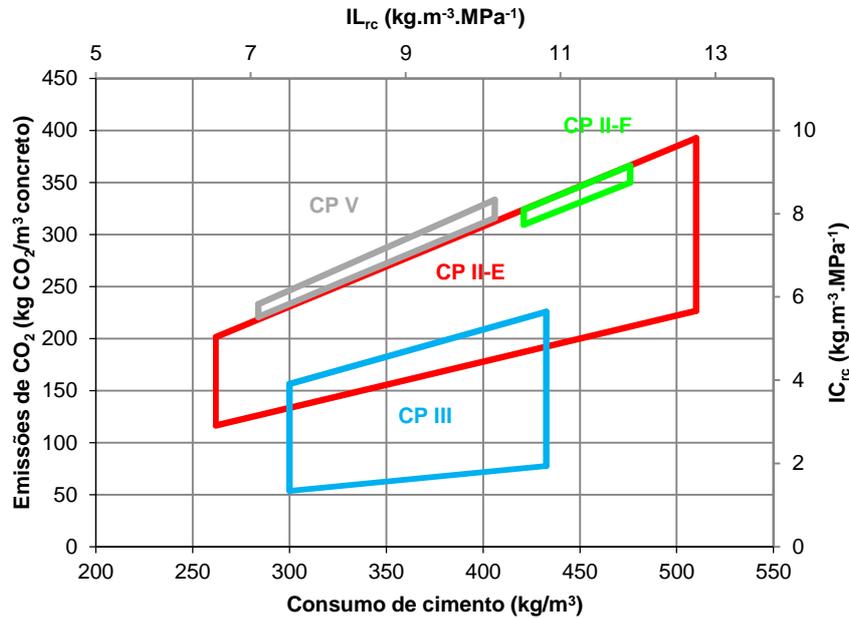


Figura 8 - Influência da eficiência do processo de dosagem, expressa pela variação consumo de cimento, e da seleção do tipo de cimento, considerando-se as variações de teor de clínquer previstas em norma, na emissão de CO₂ do concreto final - resistência à compressão de 40 MPa



O caso do CP II-E e do CP III é ainda mais complicado. Apesar de o CP III ser considerado sempre o cimento mais ecoeficiente do mercado nacional, por apresentar os maiores percentuais de substituição de clínquer, nota-se que, mesmo sob uma mesma eficiência de dosagem (mesmo consumo de cimento), pode haver maior eficiência ambiental do CP II-E com relação ao CP III, já que o teor máximo de substituição possível daquele cimento é maior do que o teor mínimo de substituição do CP III. Na prática, este é um cenário pouco provável, mas demonstra a insuficiência da informação que o tipo de cimento proporciona. Considerando-se que ambos se utilizam da mesma adição mineral para ser produzidos (escória de alto-forno), essa constatação é extremamente relevante. De acordo com a demanda de produto e a oferta dos resíduos, pode-se facilmente transformar um cimento CP II-E em um CP III, sem modificação alguma na proporção clínquer-escória de alto-forno. Ao receber, assim, esse cimento o rótulo de CP III, sugere-se maior compromisso com aspectos de sustentabilidade.

Apesar de baixo se comparado aos teores permitidos por norma, esse teor é ainda alto perto da média mundial, que dificilmente ultrapassa os 10% (DAMINELI; JOHN, 2012). Se somente 10% do teor de cimento pode ser substituído por escória de alto-forno no Brasil, fica claro que a substituição máxima permitida por norma para o CP III, na prática, não ocorre. Se a escória for utilizada somente na região Sudeste, que, pela

proximidade das regiões produtoras de escória, possibilita minimizar a emissão de CO₂ pelo transporte, o máximo de substituição não ultrapassa 23%, ou seja, dificilmente o cimento CP III terá teor de substituição muito elevado, mesmo que seja utilizado somente nas regiões próximas à produção de escória. A tendência, segundo Daminieli e John (2012), é a diminuição do uso de carvão em termoelétricas, o que diminui a disponibilidade de escória. Da mesma forma, a estimativa da produção de cinza volante (HUMPHREYS; MAHASANAN, 2002) não é suficiente para sustentar o máximo de adição possível nos cimentos.

O aumento da demanda de cimento dos últimos anos não vem sendo acompanhado de um aumento na produção do ferro-gusa e de escória, o que resulta na necessidade de aumento da produção de clínquer. Diante desse cenário, quanto maior a demanda de cimento, maior será o teor de clínquer do cimento brasileiro, dado que as adições estão maximizadas. Assim, em termos de impacto global, não importa muito qual o tipo de cimento utilizado em um empreendimento em especial: caso este opte por um CP III para ser considerado mais sustentável, estará, em verdade, relegando aos empreendimentos vizinhos o rótulo de poluidores, pois não haverá escória suficiente para todos. Em outras palavras, por mais que um empreendimento se esforce por utilizar cimentos de menor impacto ambiental, a oferta de adições minerais, muito aquém das porcentagens possíveis por norma, sempre fará com que a soma final do

impacto nacional seja o mesmo, no caso da demanda nacional de cimento anual ser estável. Se a demanda de cimento aumentar, o impacto aumentará, independentemente do tipo de cimento. Isso faz com que as análises das Figuras 6 a 8 sejam muito importantes, pois, aliando-as ao conceito de disponibilidade nacional de escória, percebe-se que os teores mínimos de emissões de CO₂ por metro cúbico de concreto encontrados no gráfico são irreais em um contexto global; neste, as emissões reais tendem a algo próximo das médias – ou máximos – para cada classe de cimento. Dessa forma, confirma-se a importância da correta dosagem dos concretos tendo em vista o aumento da eficiência do uso dos ligantes, já que, avaliando as emissões dos concretos nas proximidades superiores dos quadrantes confeccionados para cada cimento, a variação do consumo de cimento passa a ter relevância muito superior a todas as outras variáveis neste artigo estudadas.

Conclusões

A determinação dos critérios de dosagem, embora regidos, prioritariamente por fatores técnicos e econômicos, também pode ser pensada sob o ponto de vista ambiental, desde que os fatores prioritários sejam respeitados.

Devido à limitação da disponibilidade de adições para abastecimento do mercado de cimento brasileiro, tanto por fatores geográficos que inviabilizem seu transporte quanto pela limitação de que sua produção não seja regida pela demanda de cimento, variações na demanda de cimento implicam variações na demanda de clínquer, que é o grande responsável pelos altos índices de emissões de CO₂ do material. Se a demanda aumenta, a produção de clínquer aumenta, e o teor de adições no clínquer diminui, dentro das extensas faixas permitidas pelas normas técnicas. O aumento do teor de adições em um tipo de cimento também pode ser realizado às custas da redução do teor de adições em outro tipo (por exemplo, o CPIIE e o CPIII utilizam exatamente a mesma adição, a escória de alto-forno, apenas com variação na faixa total de substituição possível). Assim, devido à extensão dessas faixas, um CPIII pode conter teores de escória muito próximos de um CPIIE, por exemplo. Isso, aliado ao fato de que o teor de escória é fixo, faz com que a seleção de um CPIII em detrimento de um CPIIE não seja uma ação tão importante do ponto de vista ambiental global; seu benefício em termos de certificação ambiental é superestimado.

Também foi visto que, com relação ao controle de qualidade do processo produtivo do concreto, sendo desconhecido o desvio padrão específico de

determinada obra ou concreteira, haverá aumento máximo de 13% no consumo total de cimento.

Quanto às variações do consumo de cimento relacionadas ao processo de dosagem do concreto, os números levantados, ainda que sobre dados de apenas uma central de concreto, demonstram potencial grandioso para a melhora – ou piora – da eficiência do uso dos ligantes. Dependendo da resistência de projeto e do tipo de cimento, as variações no IL_{rc} chegaram a até 86% para uma mesma fonte, no caso, dados da literatura. Incluindo nessa variação os dados da central de concreto, que apresentaram eficiência de dosagem significativamente melhor, esse número ultrapassa os 100%, o que significa dizer que, para as tecnologias usuais de dosagem, há concretos que utilizam mais do que o dobro de teor de ligantes do que outros de mesma resistência e tipo de cimento para ser produzidos – a eficiência de dosagem é menos da metade. Ainda deve ser considerado o efeito da dosagem na durabilidade. A influência do teor de cimento na durabilidade não é abordada neste artigo e deve ser levada em consideração.

Dessa forma, demonstra-se o grande potencial da melhoria dos processos de dosagem na mitigação das emissões de CO₂ da cadeia do concreto. Esse potencial é significativamente maior do que o potencial de reduções trazido pelas outras duas estratégias aqui estudadas.

Também se conclui, em termos gerais, que não é apropriado fundamentar as decisões acerca das emissões do concreto baseando-se apenas na resistência e no tipo de cimento utilizado, pois as variações são significativas. Através de uma Análise de Ciclo de Vida, por exemplo, é possível chegar à emissão específica de um concreto. Para os cimentos, especialmente o cimento CPIII, faixas menores de teor de clínquer – ou melhor, o teor específico de clínquer do cimento – podem trazer grandes benefícios para auxiliar a escolha pelo cimento com menores emissões.

Referências

- AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991b.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: concreto: preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: cimento Portland composto: especificação. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1999.
- BIRAT, J. P. The Sustainability Footprint of Steelmaking By-Products. **Steel Times International**, 2011. Disponível em: <http://www.steeltimesint.com/contentimages/features/Web_Birat.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2014.
- CAMARINI, G. **Desempenho de Misturas de Cimento Portland e Escória de Alto-Forno Submetidas à Cura Térmica**. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. **Cement Industry Energy and CO₂ Performance**: “Getting the Numbers Right”. World Business Council for Sustainable Development, 2009. Disponível em: <<http://www.wbcscement.org/pdf/CSI%20GNR%20Report%20final%2018%206%2009.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2011.
- CHEN, C. *et al.* Environmental Impact of Cement Production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 5, p. 478-485, mar. 2010.
- DAMINELI, B. L. *et al.* Measuring the Eco-Efficiency of Cement Use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555-562, 2010a.
- DAMINELI, B. L. *et al.* Avaliação do Impacto de Concretos Dosados em Central ao Aquecimento Global. In: CONGRESO HORMIGÓN PREMEZCLADO DE LAS AMÉRICAS; CONGRESO IBEROAMERICANO DEL HORMIGÓN PREMEZCLADO, 12.; CONGRESO INTERNACIONAL DE TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN, 4., Mar del Plata, 2010b.
- DAMINELI, B. L.; JOHN, V. M. Developing Low CO₂ Concretes: is clinker replacement sufficient? The need of cement use efficiency improvement. **Key Engineering Materials**, v. 517, p. 342-351, 2012.
- DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Eco-Efficiency of Binder Use. In: PACHECO-TORGAL, F. *et al.* **Eco-Efficient Concrete**. Cambridge, UK: Woodhead Publishing in Materials, 2013. v. 1, p. 26-44.
- HABERT, G. A Method For Allocation According to the Economic Behaviour in the EU-ETS For By-Products Used in Cement Industry. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 1, p. 113-126, jan. 2013.
- HOLCIM. **Corporate Sustainable Development Report 2009**. 2010. Disponível em: <http://www.holcim.com/uploads/CORP/SD_repo rt.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2011.
- HUMPHREYS, K.; MAHASENAN, M. **Climate Change**: toward a sustainable cement industry. Battelle - World Business Council of Sustainable Development, 2002. Disponível em: <<http://www.wbcscd.org/pages/edocument/edocumentdetails.aspx?id=148&nosearchcontextkey=true>>. Acesso em: 26 jul. 2014.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2013**. 2013. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/relatorio_sustentabilidade_2013v3.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2013.
- INTERCEMENT. Grupo Camargo Corrêa. **Relatório Anual 2010**. Grupo Camargo Corrêa, 2011. Disponível em: <http://www.intercement.com/RS2010/pt/download/Intercement_RA2010_26042011v2.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2011.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007**: the physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf>. Acesso em: 25 maio 2011.
- JOHN, V. M. Concreto Sustentável. In: ISAIA, G. C. **Concreto**: ciência e tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. v. 2.
- LIMA, J. A. R. DE. **Avaliação das Consequências da Produção de Concreto no Brasil Para as Mudanças Climáticas**. São Paulo, 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- LOTHENBACH, B. *et al.* Influence of Limestone on the Hydration of Portland Cements. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 6, p. 848-860, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Ibracon, 2008.

MENÉNDEZ, G.; BONAVENTI, V.; IRASSAR, E. F. Strength Development of Ternary Blended Cement With Limestone Filler and Blast-Furnace Slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 1, p. 61–67, 2003.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - Relatório de Referência - Produção de Cimento.** Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0215/215795.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2011.

RECENA, F. A. P.; PEREIRA, F. M. Produção e Controle de Concreto em Obras. In: ISAIA, G. **Concreto:** ciência e tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. v. 1.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Sobre Produção anual de cimento Portland.** 2010. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/snic-relatorio2010-11_web.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2013.

S

INDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual.** Disponível em: <http://www.snic.org.br/relatorio_anual_dinamico.asp>. Acesso em: 14 jul. 2014.

SOUZA, M. P. R. **Avaliação das Emissões de CO₂ Antrópico Associadas ao Processo de Produção e Concreto, Durante a Construção de Um Edifício Comercial, na Região Metropolitana de São Paulo.** São Paulo, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 2012.

VOTORANTIM INDUSTRIAL. **Relatório de Sustentabilidade 2010.** 2010. Disponível em: <http://www.votorantim.com.br/SiteCollectionDocuments/ri/VPAR_RelSus_2010_Port.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2011.

WORRELL, E. *et al.* Carbon Dioxide Emissions From the Global Cement Industry. **Annual Review of Energy and the Environment**, v. 26, n. 1, p. 303-329, nov. 2001.

Agradecimentos

À Capes, pela bolsa de estudo oferecida à primeira autora.

Vanessa Carina Heinrichs Chirico Oliveira

Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica | Universidade de São Paulo | Av. Almeida Prado, travessa 2, n. 87, Cidade Universitária | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-900 | Tel.: (11) 3091-5459 | E-mail: vanessa.oliveira@lme.pcc.usp.br

Bruno Luís Damineli

Escola Politécnica | Universidade de São Paulo | Tel.: (11) 3091-5382 | E-mail: bruno.damineli@lme.pcc.usp.br

Vahan Agopyan

Pró-Reitoria de Pós-Graduação | Universidade de São Paulo | Rua da Praça do Relógio 109, Cidade Universitária | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-050 | Tel.: (11) 3091-3266 | E-mail: vahan.agopyan@poli.usp.br

Vanderley Moacyr John

Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica | Universidade de São Paulo | Tel.: (11) 3091-5794 | E-mail: vmjohn@lme.pcc.usp.br

Revista Ambiente Construído

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
Fax: +55 (51) 3308-4054
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br