

Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso

Environmental and economic perspectives of concrete with high mineral addition content: a case study

Geraldo Cechella Isaia
Antonio Luiz Guerra Gastaldini

Resumo

O concreto, material de construção mais consumido no mundo, requer elevada quantidade de recursos naturais, e sua produção contribui para o aumento do efeito estufa. Cinza volante e escória granulada de alto-forno são resíduos industriais com grande disponibilidade, podendo substituir o cimento em altos teores com significativas vantagens. Este trabalho apresenta estudo de caso demonstrando que a substituição do cimento pelas duas adições, em até 90%, acarretou diminuição de 5% no custo, 58% no consumo de energia, 81% na emissão de CO₂ e aumentou em 34% o índice médio de durabilidade. A simulação do emprego do traço com 90% de adições minerais em 5,4% (351 Mm³) da produção mundial de concreto, a partir de 2005, economizaria 78 Mt de cimento, mantendo a produção atual de cimento no patamar de 1,78 Mt/ano, sem acréscimos futuros. Anualmente, deixariam de ser extraídas 130 Mt de matéria-prima, seriam economizados 0,40 EJ de energia, quantidade igual à consumida pela Dinamarca, e haveria ganho financeiro de 8,7% sobre o custo de produção do concreto com 90% de cinza volante e escória comparado ao concreto com cimento Portland comum.

Palavras-Chave: concreto com adições minerais, altos teores, custo, energia, emissão CO₂, efeito estufa

Abstract

Concrete, the most consumed building material in the world, requires a large amount of natural resources, and its production has a strong impact on the increase of the greenhouse effect. Fly ash and ground granulated blast-furnace slag are highly available industrial by-products, which can replace cement in high contents with significant advantages. This paper presents a case study in which the replacement of cement in 90% by those two mineral additions has reduced costs in 5% in costs, energy consumption in 58%, and CO₂ emission in 81%, and increased the durability mean index in 34%. The use of 90% mineral additions in 5.4% (351 Mm³) of the world's concrete production, from 2005, could save 78Mt of cement, resulting in the maintenance of world cement production at the level of 1.78 Mt/year, without future increases. There would be an annual reduction of 130 Mt on the extraction of raw materials, an economy of 0.4 EJ in energy - the same consumed by Denmark - and a 8.7% reduction of production costs of concrete with 90% of fly ash and blast-furnace slag, compared to conventional Portland cement concrete..

Keywords: Concrete with mineral additions; high content; costs, energy; CO₂ emission; greenhouse effect

Geraldo Cechella Isaia
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa
Maria
Campus Universitário
CEP 97105-900 - Santa Maria, RS
Brasil
Tel.: (55) 221 4417
E-mail: gisaia@terra.com.br

**Antonio Luiz Guerra
Gastaldini**
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa
Maria
Tel.: (55) 220 8837
E-mail: gastaldn@ct.ufsm.br

Recebido em 15/03/04
Aceito em 21/08/04

Introdução

A questão ambiental

O crescimento da população mundial, conjugado com o avanço do conhecimento, trouxe conseqüências comportamentais importantes para a humanidade, modificando aspectos socioculturais até então não observados. Hoje, os 6,3 bilhões de habitantes do mundo demandam por bens e serviços crescentes para suprir suas necessidades, satisfeitas na única fonte abastecedora de materiais e recursos para suprir tal demanda: o planeta Terra.

Para mover esta engrenagem, em crescimento espiral, é incessante a busca por fontes de energia, tradicionais ou novas, para movimentar indústrias e suprir as necessidades básicas, de bem-estar e de lazer da sociedade. A exploração predatória dos recursos naturais não renováveis e a desconsideração dos efeitos colaterais da intensa atividade industrial, como a deposição de resíduos tóxicos e a poluição de mananciais aquíferos e do ar, mostram a outra face da era do desenvolvimento a qualquer custo.

A partir dos anos 80 do século passado, o clamor da sociedade e de entidades não-governamentais chegou até autoridades políticas mundiais, que se mobilizaram para regulamentar as atividades industriais, diante de seu crescimento intenso e sem regras definidas. Assim, aconteceu no Rio de Janeiro a Reunião de Cúpula da Terra (ECO-92) e, em Quioto, a Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças no Clima, que gerou um Protocolo em que foram estabelecidos os princípios para reduzir ou limitar a emissão de poluentes, arrefecer o crescimento do efeito estufa e promover manejos sustentáveis do solo e dos recursos naturais.

O efeito estufa é a questão que mais preocupa a humanidade por seus reflexos sobre o clima, como o aquecimento global devido ao aumento da concentração de gases na atmosfera, principalmente CO₂, CH₄ e N₂O, expressos geralmente sob a forma de CO_{2eq}. A concentração deste gás, que era de 365 ppm¹ em 1995, está prevista para aumentar para 385 ppm¹ em 2005, com incremento de 1,4 °C na temperatura terrestre. A emissão mundial de CO₂ em 1995 foi de 25,1 Gt¹, com previsão de aumento para 30 Gt em 2005. As atividades industriais e dos meios de transporte são os maiores responsáveis pelo

incremento do teor de CO₂ na atmosfera devido uso de energia fóssil e de outras fontes, que, em 1995, consumiram em todo o mundo 383 EJ¹ (10¹⁸J), com aumento previsto de 24%, 476 EJ, para 2005.

Em razão desses números preocupantes e de suas conseqüências sobre o futuro da humanidade, graças à ação de instituições transnacionais e regionais e, principalmente, pela pressão de grupos da sociedade, grande parte das indústrias está adotando, por força legal ou voluntária, medidas para diminuir esses impactos. Temas como sustentabilidade, reciclagem, utilização de resíduos, etc., estão sendo levados em consideração no planejamento, construção, operação e manutenção de novas plantas ou para readequação das existentes, para se inserir no princípio sustentável de que nosso planeta é único e deve preservar seus recursos naturais para muitas gerações futuras.

A questão financeira

O Protocolo de Quioto estabeleceu que os países signatários devem assegurar emissões de CO_{2eq} que não excedam às quantidades a eles atribuídas, com vistas a reduzir suas emissões totais em pelo menos 5% dos níveis de 1990, no período de compromisso de 2008 a 2012. Para a União Européia foi estabelecida redução de 8%.

No artigo 12 deste Protocolo foi instituído um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (CDM) para possibilitar que os países não signatários atinjam o desenvolvimento sustentável e cumpram os compromissos de limitação e redução de emissões. Os novos projetos industriais, ou as expansões existentes, devem estar inseridos nesse procedimento para conseguir unidades de Certificados de Redução de Emissão (CER) na quantia desejada para cumprir com as reduções de emissão relacionadas com o efeito estufa. Dessa forma, as indústrias que excederem suas cotas de emissão poderão adquirir permissões extras de empresas que ficaram aquém das quantias estipuladas para emissão do gás. A unidade dos certificados é a tonelada de CO_{2eq} (LUZ, 2004).

Assim, o mercado de CERs se desenvolveu rapidamente, tendo sido fechadas, até 2003, transações correspondentes a 250 Mt CO_{2eq}, ao preço médio de US\$ 5,00/t, para entrega no ano de 2010 (CO2e.com, 2002). A Bolsa de Mercadorias e Futuros do Rio de Janeiro deve concentrar as negociações brasileiras, a partir de 2004,

¹ Dados de Energy Information Administration (EIA) - World energy projections: resources, consumption and CO₂ emission. Disponível em: <<http://www.geocities.com/combase>>.

principalmente para os projetos de reflorestamento que emitem certificados que são comprados pelas empresas que necessitam cumprir com suas cotas (VIEIRA, 2003). Já houve negociação entre nove empresas brasileiras para venda de créditos ao governo italiano, na quantia de 1 Mt CO_{2eq}, no valor de US\$ 5,6 milhões (PORTAL EXPORTNEWS, 2004).

Portanto, a partir do Protocolo de Quioto, a emissão dos gases responsáveis pelo aquecimento da Terra passou a ser monitorada nos países signatários e, do enfoque de poluidores, transformou-se em oportunidade de negócio para as empresas que seqüestram ou emanam quantidade inferior à permitida, ou para aquelas que necessitam emitir maior quantidade de CO₂ que a regulada.

A questão industrial

Entre os setores industriais, a construção civil consome grande parte dos recursos naturais extraídos no planeta, sendo o concreto o maior responsável por essa utilização, pois é o segundo material mais consumido pela humanidade, depois da água. Klee (2003) informa que a produção de cimento cresceu nos últimos 70 anos, em média, à taxa de 4,4% ao ano, tendo sido, em 2002, de 1,56 Gt, com projeção de 1,78 Gt para 2005. Malhotra (1999) informa que a projeção da produção mundial de concreto, para o ano 2000, era de 12,6 Gt² (5,25 Gm³), com projeção de 15,6 Gt para 2005 (6,51 Gm³). O concreto representa o dobro da produção mundial de todos os demais materiais de construção, equivalendo ao consumo de 2,4 t por habitante/ano (previsão para 2005).

O cimento, material básico para a produção do concreto, consome 5,5 GJ de energia e libera, aproximadamente, 1 t de CO₂ por cada tonelada produzida, o que corresponde, anualmente, ao consumo de 8,8.10¹²J de energia (2% do consumo mundial) e emissão de 1,8 Gt de CO₂, 6% da emissão total, para dados de 2005. Considerando que cada tonelada de cimento requer 1,65 t de matéria-prima, a prospecção de 2,9 Gt desta para o cimento, somada à mineração de 12,5 Gt de agregados para a confecção do concreto, mostra a magnitude do problema. Esses números evidenciam o intenso uso de recursos naturais e a significativa contribuição de emissão de gases

para o aquecimento global, a partir da indústria do cimento e concreto.

Para diminuir o impacto ambiental do cimento, desde a segunda metade do século XX, parte do cimento tem sido substituída por uma ou mais adições minerais, geralmente subprodutos industriais inicialmente depositados como rejeito, cujo conhecimento, domínio da tecnologia e utilização se aprimoraram ao longo desse período, sendo hoje bastante utilizadas nos mais diversos tipos de estruturas de concreto. As vantagens dessa substituição são muito significativas, não só no âmbito técnico como no econômico e, principalmente, ambiental, pois a redução de emissão de CO₂, de consumo de energia e, muitas vezes, de custo é proporcional à quantidade de adição mineral utilizada na mistura em substituição ao cimento.

Com o objetivo de mostrar as vantagens do uso de altos teores de adições minerais no concreto, o presente trabalho apresenta estudo de caso em que foram investigados concretos cujas misturas continham entre 50% e 90% de cinza volante e escória de alto-forno, em misturas binárias e ternárias. Para cada mistura foram calculados os custos dos materiais, a emissão de CO₂, o consumo de energia e os parâmetros de durabilidade do concreto que influem na corrosão da armadura. Os resultados encontrados mostram que, à medida que diminuiu o teor de cimento na mistura, decresceram o custo, a emissão de CO₂ e a energia consumida, e aumentou a durabilidade, sendo, portanto, viável e vantajosa, sob todos os aspectos analisados, a substituição de cimento por altos teores de adições minerais.

As adições minerais no concreto

O cimento Portland, constituído de silicatos, aluminatos e ferro-aluminatos de cálcio, possui composição similar às adições minerais constituídas de compostos sílico-cálcico-aluminosos, podendo substituir parte do cimento se apresentarem, preferencialmente, estrutura vítrea. São mais utilizadas as pozolanas, que reagem com a cal proveniente das reações de hidratação, ou a escória básica granulada de alto-forno, que, devido ao alto teor de cálcio, possui propriedades pozolânicas e cimentícias.

As adições minerais mais empregadas, em função da disponibilidade e do custo, são a cinza volante e a escória de alto-forno. Malhotra (1999) afirma que a produção mundial de cinza volante em 2000 era 660 Mt, enquanto Mehta (1998) previu a produção de 100 Mt para a escória, embora,

² O autor não explicita, embora esteja subentendido que a produção global do cimento não se destina apenas à confecção de concreto, mas também à de argamassa e pasta, razão pela qual o valor indicado deva ser a massa (ou volume) equivalente de concreto (t_{eq}, m³_{eq}).

atualmente, deva ser mais elevada, considerando-se que a produção de ferro gusa mundial, em 2003, foi de 649 Mt, (GALBRAITH'S LIMITED, 2004), projetando estimativa de 736 Mt, o que corresponde a 220 Mt de escória para 2005.

Os fabricantes de cimento, por razões financeiras e políticas, desejam vender clínquer, que possui maior valor agregado, apesar de algumas empresas, principalmente brasileiras, comercializarem cimento Portland comum (CP I) ao mesmo preço do cimento com adições (CP III e IV). Nos Estados Unidos, um dos maiores produtores de carvão e de ferro gusa do mundo, mais de 90% do cimento produzido é do tipo Portland comum, sem adições, o que demonstra o espaço ainda disponível para o emprego das adições minerais com o cimento.

São bem conhecidas as vantagens técnicas e econômicas que as adições minerais aportam para as estruturas de concreto, especialmente para a durabilidade. Pesquisadores como Mehta, Swamy, Malhotra, Dhir, entre outros, expuseram com ênfase as vantagens que adições como cinza volante e escória de alto-forno trazem para as propriedades do concreto fresco e endurecido porque, devido ao refinamento dos poros e grãos, apresentam microestrutura mais fina e homogênea, obstruindo a percolação de fluidos pelos poros. A partir de 1990, muitos trabalhos foram publicados com altos teores ($\geq 50\%$ de substituição em massa) de adições minerais ao cimento ou concreto mostrando a viabilidade da diminuição do teor de clínquer e aumento das adições, como apropriadamente enfatiza Mehta (1997, p. 63):

“Devido à grande pozolanicidade e propriedades cimentícias, cinza volante e escória podem ser empregadas em grandes quantidades como materiais substitutos do cimento no concreto. De fato, concretos com 60 a 70% de cinza volante ou escória na massa do material cimentício total tem mostrado alta resistência e durabilidade a idades relativamente precoces. Esta demonstração tem removido uma das maiores objeções para o emprego de altos teores de cinza volante e escória [...]”.

Nesse contexto, este trabalho procura demonstrar, por meio de estudo de caso, a viabilidade e as vantagens técnica (durabilidade), econômica (custo) e ambientais (emissão de gases poluentes, consumo e energia), quando são utilizados altos teores de cinza volante e/ou escória de alto-forno em concreto estrutural, além dos possíveis ganhos financeiros.

Estudo de caso

Objetivo

O estudo de caso descrito a seguir resulta de um projeto de pesquisa desenvolvido no Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, na linha de investigação de adições minerais em concreto estrutural. O objetivo do projeto foi estudar a durabilidade do concreto com altos teores de adições minerais, com e sem adição de cal hidratada, para verificar a viabilidade de reposição da reserva de hidróxido de cálcio resultante da diminuição do teor de cimento nas misturas. Neste trabalho são apresentados resultados apenas dos traços sem cal hidratada, os usuais nas construções atuais.

O estudo abrangeu a dosagem de traços com a substituição de cimento, em massa, por 50% de cinza volante (CV), 70% de escória de alto-forno (E), em traços binários, e 20% de cinza volante (20%) com 70% escória de alto-forno (ECV), em traço ternário. Foi empregado cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI), cinza volante oriunda da usina termelétrica de Candiota (RS), escória de alto-forno da Siderúrgica Tubarão (CST), areia natural da região, pedra britada diorítica de Itaára e, quando necessário, aditivo superplastificante Glenium (MBT). Os traços foram dosados para obtenção da mesma trabalhabilidade (60 mm \pm 20 mm).

Foram realizados diversos ensaios de durabilidade, sendo apresentados neste trabalho somente os relacionados com a corrosão das armaduras: carbonatação, penetração de cloretos (ASTM C1202, 1997), teor total de cloretos retidos e relação iônica Cl⁻/OH⁻, todos em igualdade de resistência de 40 MPa, para representar concretos com $f_{ck} \approx 30$ MPa ($f_{c91} \approx 40$ MPa). Maior descrição dos materiais, procedimentos e resultados dos ensaios são encontrados em Dal Ri (2002) e Stump (2003).

O objetivo deste estudo de caso é demonstrar que não apenas a durabilidade do concreto apresenta melhor desempenho, à medida que aumenta o teor de adições minerais, mas também a emissão de gases poluentes e o consumo de energia decrescem na mesma proporção da diminuição do teor de cimento na mistura, conforme mostrado por Carvalho (2002) para cimentos brasileiros com adições. Além das vantagens ambientais da utilização de altos teores de cinza volante e escória de alto-forno no concreto, é mostrado que realizar obras de concreto com essas adições

também pode se constituir em fonte de faturamento extra para as empresas, no futuro, por emitir menos CO_{2eq} e, conseqüentemente, poder transacionar parte de suas cotas de emissão do gás no mercado.

A Tabela 1 mostra as quantidades de materiais por m³ de concreto, observando-se que, enquanto o consumo de cimento diminui, o teor de materiais cimentícios aumenta, causado pelo decréscimo da relação a/mc para atingir a resistência de 40 MPa, sendo essa relação tanto menor quanto maior for o teor de adições na mistura. Isso ocorre porque, segundo Isaia et al. (2003), para atingir dada resistência, deve haver uma quantidade mínima de C-S-H (efeito químico) ou maior aproximação dos grãos da pasta (efeito físico). Como a eficiência das adições minerais é menor que a do cimento, é necessária maior quantidade de material cimentício para contrabalançar a substituição da massa de cimento.

A quantidade de água aumentou e o teor de aditivo diminuiu à medida que cresceu o teor de adições na mistura, para manter a mesma trabalhabilidade dos traços, devido à presença da escória, que melhora a reologia do concreto fresco, quando se encontra em teores elevados, ao contrário da cinza volante.

A Tabela 2 apresenta os coeficientes para cálculo do custo (US\$/t), do consumo de energia (MJ/t) e das emissões de CO_{2eq} (kg/t). A distância de transporte dos materiais foi arbitrada para cidades de porte médio, simulando uma obra realizada em um centro urbano real.

Os coeficientes se referem aos materiais e ao seu transporte até a obra, sem considerar mistura, transporte e colocação do concreto. Os custos unitários foram levantados na região ou obtidos junto aos fornecedores do material (escória e aditivo). Os cálculos do consumo unitário de energia foram realizados conforme as fontes informadas abaixo da tabela ou arbitrados a partir de dados comparativos com

materiais similares. Os coeficientes e emissão de CO₂ dos materiais não agregam outros gases poluentes, a não ser para o cimento, que foi considerada a emissão de NO_x de 1,85 kg/t (CARVALHO, 2002), pois, para os demais materiais, a participação dos outros gases tem representação não significativa ante a ordem de grandeza das emanações do cimento.

Em face da dificuldade de calcular a energia consumida e o CO₂ emitido pelo aditivo, adotaram-se os valores da sua matéria-prima, nafta, considerando-se que a sua composição possui ao redor de 30% de sólidos (polímeros) e 70% de líquidos. Igualmente para a água, o consumo de energia foi calculado a partir do recalque de uma bomba para uma vazão arbitrada, tendo em vista a indisponibilidade de dados, e, para a emissão de CO₂, foi considerado valor em coerência com os demais materiais.

Resultados das variáveis custo, energia consumida e emissão de CO₂

O produto do consumo de materiais da Tabela 1 pelos coeficientes da Tabela 2 forneceu os valores de custo, energia consumida e emissão de CO₂ das tabelas abaixo, em que constam ainda os percentuais da contribuição de cada material no total da variável e os índices desta, tomando-se como I = 100 os valores do concreto de referência, sem adições minerais.

Análise dos custos

A Tabela 3 mostra que o cimento tem a maior participação no custo do m³ para o traço de referência, enquanto, à medida que o teor de adições se eleva até 90%, os agregados são os materiais de custo preponderante, maior do que o da adição mineral. No custo total, o traço de referência tem o valor mais baixo, com exceção da misturas com 90 ECV, porque, para as demais, o preço elevado do aditivo aumentou em até 11% o custo do m³ de concreto. A única mistura com custo abaixo da referência é 90 ECV, em 5%.

Traços	% CP ⁵	Quantidade de materiais – kg/m ³						
		CP	CV	E	Areia	Brita	Água	Adit. ⁶
REF ¹	100	269			918	1.015	165	
50 CV ²	50	217	217		616	1.015	179	3,1
70 E ³	30	122		285	699	1.015	177	1,8
90 ECV ⁴	10	47	95	333	600	1.015	182	1,3

Notas:

¹ concreto de referência; ² 50% de cinza volante; ³ 70% de escória alto-forno;

⁴ 90% de E + CV ⁵ cimento Portland; ⁶ aditivo superplastificante

Tabela 1 - Quantidade de materiais dos traços para resistência de 40 Mpa

Materiais	Transporte² km	Custo³ US\$t	Consumo de Energia – MJt	Emissão de CO₂ – kg.t
Cimento	200	120,00	5.780 ⁴	1.090 ⁵ + 574 ⁶
Areia	60	13,00	90 ⁷	3 ⁸
Brita	60	20,00	140 ⁷	4 ⁸
Cinza volante	200	20,00	300 ⁹	10 ¹⁰
Escória	200	60,00	310 ⁹	10 ¹⁰
Aditivo superp.	200	4.050,00	15.030 ¹¹	94 ¹¹
Água	-	0,75	1.130 ¹²	5 ¹³

Notas:

¹ Todos os valores de custo, energia e emissão de CO₂ incluem frete na distância indicada

² Distâncias arbitradas, ida e volta. Custo médio regional: US\$ 0,02/t.km⁻¹; Consumo de Energia: 1,4 MJ/t. km⁻¹ (BUCHER, 1986); Emissão de CO₂: 0,045 kg/t.km⁻¹ (CO₂ CEMENT, 2003)

³ Custos médios regionais, CIF, vigência fevereiro de 2004. Taxa de câmbio: R\$ 2,95/US\$

⁴ Consumo médio de energia em fornos via seca e úmida (INDUSTRY CANADA, 2004)

⁵ Emissão média de CO₂ do calcário, do combustível e da eletricidade (CEMBUREAU, 2004)

⁶ Parcela de NO_x (= 1,85 kg/t, CARVALHO, 2002) multiplicada pelo fator potencial de equivalência global (GWP) igual a 310 (EPA, 2002) para obtenção de emissão de CO_{2eq} = 1,85.310 = 574 kg/t

⁷ Areia somente extração - Brita: extração e beneficiamento (BUCHER, 1986)

⁸ Valor arbitrado para extração: 0,1 kg de CO₂ por hora

⁹ Energia consumida para coleta e deposição (BUCHER, 1986)

¹⁰ Emissão de CO₂ devida à coleta e deposição (arbitrada): 1 kg/t

¹¹ 70% da energia consumida ou de CO₂ emitido para obtenção de 0,3 tonelada de nafta (ASSOCIATION OF PLASTICS MANUFACTURERS IN EUROPE, 2004)

¹² Valor calculado com base no transporte por bomba de 5 HP e vazão de 12 m³/h

¹³ Valor estimado para captação, transporte, tratamento e armazenamento.

Tabela 2 - Coeficientes unitários de custo, energia e emissão de CO₂, por tonelada¹

Traço	Cimento		Adição Mineral		Agregados		Aditivo + água		Custo Total	
	Custo	%	Custo	%	Custo	%	Custo	%	Custo	I
REF	32,16	50			32,23	50	0,12		64,51	100
50 CV	26,04	36	4,34	6	28,31	40	12,69	18	71,38	111
70 E	14,64	21	17,10	25	29,39	43	7,42	11	68,55	106
90 ECV	5,64	9	21,88	36	28,10	46	5,41	9	61,03	95

Tabela 3 - Custo dos materiais dos traços (US\$/m³) para resistência de 40 Mpa

Análise do consumo de energia

Observa-se na Tabela 4 que o concreto sem adições acumula 79% da energia total no cimento, decrescendo à medida que os teores de AM aumentam, até 33% para as misturas 90 ECV. Para o traço de referência, a água e o aditivo respondem por 10% do total, subindo até 27% para as misturas 90 ECV. O decréscimo de energia total embutida nos traços com AM varia de 10% até 58%, entre 50 CV e 90 ECV. Para este último, a energia total é distribuída em três partes aproximadamente semelhantes entre cimento, adições mais agregados e água mais aditivos.

Análise da emissão de CO₂

Os valores da Tabela 5 evidenciam que existe significativo ganho ambiental ao substituir-se cimento por AM, pois 98% das emanações de CO₂ do concreto de referência e entre 97% e 87% dos traços com AM são devidas ao CP, restando para as adições minerais apenas 1% para 50 CV e 70 E, e 5% para 90 ECV. Este último traço apresenta 81% menos CO₂, enquanto o 50 CV apenas 19%, devido ao pequeno decréscimo do consumo de cimento deste em relação à referência.

Resultados das variáveis de durabilidade

Os resultados dos ensaios de durabilidade diante da corrosão na Tabela 6 mostram que quase todas as variáveis apresentaram melhor desempenho à medida que se aumentou o teor de AM na mistura.

A carbonatação acelerada mostrou coeficientes mais elevados para 50 CV (+7%), enquanto 70 E e 90 ECV tiveram decréscimos respectivos de 2% e 10%.

A penetração de cloretos teve significativo decréscimo com o aumento do teor de AM, confirmando resultados publicados na literatura, tendo sido tão mais elevado quanto menor o teor de cimento na mistura, atingindo decréscimo de 86% na passagem de coulombs para o traço com

90% de AM. O refinamento dos poros e dos grãos e a microestrutura mais fina e homogênea, que obstruem a passagem de fluidos, são as razões principais para esse comportamento. Segundo a ASTM C1202 (1997), concretos com valores inferiores a 1.000 C são classificados como de penetração baixa, na qual todos os traços com AM estão enquadrados, enquanto o 90 ECV apresentou penetração inferior a 500 C. O concreto de referência se classificou como de penetração moderada (2.000-4.000 C). A retenção de cloretos também foi beneficiada pelo teor crescente de AM, com exceção do traço 70 E, com decréscimos de até 32% para 90 ECV. Esse comportamento está relacionado com o teor de alumina e ferro da adição mineral, beneficiando mais a cinza volante do que a escória, pois a primeira contém maior teor desses dois componentes.

Traço	Cimento		Adição Mineral		Agregados		Aditivo + água		Energia Total	
	Energia	%	Energia	%	Energia	%	Energia	%	Energia	I
REF	1.555	79			225	11	186	10	1.966	100
50 CV	1.254	71	65	4	197	11	248	14	1.764	90
70 E	705	58	88	7	205	17	227	18	1.225	62
90 ECV	272	33	132	16	196	24	226	27	826	42

Tabela 4 - Consumo de energia dos materiais dos traços (MJ.m⁻³) para resistência de 40 MPa

Traço	Cimento		Adição Mineral		Agregados		Aditivo + água		Emissão total	
	CO ₂	%	CO ₂	%	CO ₂	%	CO ₂	%	CO ₂	I
REF	446	98			7	1	1	1	454	100
50 CV	361	97	2	1	6	1	1	1	370	81
70 E	204	95	3	1	6	3	1	1	214	47
90 ECV	73	87	4	5	6	7	1	1	84	19

Tabela 5 - Emissão de CO₂ dos materiais (kgm) para resistência de 40 MPa

Traço	Coef. Carb. Acelerada ¹		Penetração de Cl ⁻²		Retenção de Cl ^{- totais} ³		Relação Cl ⁻ /OH ⁻ ⁴		Índice Médio Total
	mm.s ^{-0,5}	I	Coul.	I	mmol por l	I	Cl ⁻ /OH ⁻	I	
REF	6,0	100	3.360	100	32,9	100	1,6	100	100
50 CV	6,4	107	886	26	24,9	76	1,1	69	70
70 E	5,9	98	990	29	38,0	116	0,6	38	70
90 ECV	5,4	90	487	14	25,8	78	1,3	81	66

Notas:

¹ Coeficiente de carbonatação acelerada: mm.semana^{-0,5};

² Penetração de Cloretos: coulombs (ASTM C1202, 1997);

³ Retenção de cloretos totais: mmol/l;

⁴ Relação iônica Cl⁻/OH⁻: relação molar

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de durabilidade para resistência de 40 Mpa

Análise conjunta dos resultados

Na Tabela 7 estão apresentados os índices médios dos quatro parâmetros analisados, custo, consumo de energia, emissão de CO₂ e durabilidade, que se mostraram decrescentes com o aumento do teor de AM nas misturas, atingindo decréscimo de até 44% para a mistura 90 ECV.

Para cálculo das relações entre custo e benefício ambiental (média dos índices de energia e CO₂) e de durabilidade, foram tomados os inversos do índice de cada variável, para considerar os ganhos, e não os decréscimos.

As relações entre custo e benefício ambiental, para as misturas com AM, foram decrescentes, atingindo para a mistura 90 ECV decréscimo de 71%, a mais vantajosa de todas. Quanto à relação entre custo e benefício da durabilidade, novamente, a mais benéfica foi para a mistura 90 ECV, com redução de 37%.

Para complementar a análise e apresentar as variações observadas em verdadeira grandeza, a Tabela 8 mostra as diferenças entre os valores de cada variável dos traços de referência e dos com adições minerais. Introduziu-se a variável cimento como termo de comparação, por ser a que mais influi nas demais, observando-se que os decréscimos de consumo foram proporcionais ao teor de AM, chegando a 83% para o traço 90 ECV. Para o custo houve acréscimos nos teores 50% e 70% de AM (entre 6% e 15%), enquanto, para 90%, decréscimo de 5%.

Após o cimento, as variáveis que mais decresceram foram o consumo de energia e emissão de CO₂, com maior diminuição de 58% para a primeira e 81% para a segunda, esta última com teor próximo ao do cimento, pois praticamente todo CO₂ emitido pelo concreto é devido a ele próprio. Para a durabilidade, as variações se situaram entre 30% e 34%, descolando seu comportamento do consumo de cimento, porque os mecanismos que governam o processo de corrosão dependem de outros parâmetros do material cimentício (refinamento dos poros e dos grãos) que não somente do cimento.

Realizando-se regressão linear entre o teor de AM e o valor das reduções do consumo de cimento, de energia e emissão de CO₂, obtiveram-se equações com coeficientes de determinação $r^2 \geq 0,99$, mostrando que existe correlação linear muito forte entre o teor da adição e as reduções das respectivas variáveis.

Essas evidências numéricas demonstram que a sustentabilidade das estruturas de concreto está relacionada, na razão direta, com a substituição de cimento por adições minerais. Quanto menos cimento contiver o concreto, menor será o consumo de energia e a emissão de CO₂. Essa conclusão é, *a priori*, intuitiva sob o aspecto qualitativo, entretanto neste estudo de caso foi quantificada a proporção dos decréscimos e as relações entre custo e benefício.

Traços	Índices médios de desempenho	Relação Custo/benefício Ambiental	Relação Custo/benefício Durabilidade
REF	100	1,00	1,00
50 CV	88	0,95	0,78
70 E	71	0,58	0,74
90 ECV	56	0,29	0,63

Tabela 7 - Índices médios de desempenho e relações entre custo e benefício para resistência 40 MPa

Traço	Cimento		Custo		Energia		CO ₂		Durabilidade	
	Δ kg/m ³	%	Δ US\$/m ³	%	Δ MJ/m ³	%	Δ kg/m ³	%	Δ Índice	%
50 CV	52	19	- 6,87	- 11	202	10	84	19	30	30
70 E	147	55	- 4,04	- 6	741	38	240	53	30	30
90 ECV	222	83	3,48	5	1.140	58	370	81	34	34

Tabela 8 - Diferenças entre os valores dos traços REF e AM para resistência de 40 MPa

Aplicação dos resultados do estudo de caso: simulação dos ganhos potenciais

Para simular os resultados deste estudo de caso e inferir o impacto potencial ante a produção mundial de cimento e concreto, escolheu-se o traço 90 ECV, por ter sido o que apresentou melhor índice médio global e menor relação entre custo e benefício, tanto ambiental quanto para a durabilidade.

As Tabelas 1 e 8 mostraram que, para a mistura 90 ECV, com 70% (333 kg/m³) de escória de alto-forno e 20% (95 kg/m³) de cinza volante, os decréscimos em relação ao REF foram: 222 kg/m³ de cimento, US\$ 3,48/m³ no custo, 1.140 MJ/m³ no consumo de energia e 370 kg/m³ na emissão de CO₂. O índice médio de desempenho desse concreto foi 44% melhor e a relação entre custo e benefício ambiental e de durabilidade 3,5 e 1,6 vezes menores, respectivamente, do que o REF.

Sendo a produção mundial de cimento prevista para 2005 de 1,78 Gt (6,51 Gm³ de concreto) e a maior parte do concreto fabricada com cimento Portland comum, com crescimento à taxa anual de 4,4%, é necessário acréscimo de produção de 78 Mt/ano (285 Mm³ de concreto) para suprir a demanda. A produção de ferro gusa cresce, em média, 6,5% ao ano (GALBRAITH'S LIMITED, 2004), podendo-se inferir que a escória básica (220 Mt/ano, 2005) cresça na mesma proporção. Parte dessa escória já é utilizada na produção de cimento como adição ou diretamente no próprio concreto, e o restante, segundo Mehta (1998), cerca de 90%, é descartado ou utilizado em aplicações de baixo valor. Portanto, estarão disponíveis no mercado mundial, potencialmente, 200 Mt de escória básica para uso em cimento ou concreto.

Simulando-se que o acréscimo anual de produção de concreto tivesse que ser suprido pelo uso do traço escolhido neste trabalho (90 ECV), seria necessária a produção de $78 \text{ Mt} / 0,222 \text{ t.m}^{-3} = 351 \text{ Mm}^3$ de concreto, ou seja, além do aumento da demanda anual de 285 Mm³, deveriam ser produzidos mais 66 Mm³ para que o consumo de cimento permanecesse constante em 1,78 Gt/ano. Para fabricar essa quantidade de concreto, seriam necessárias $351 \text{ Mm}^3 \cdot 0,333 \text{ t/m}^3 = 117 \text{ Mt}$ de escória, pouco mais da metade da disponibilidade em 2005 e, adicionalmente, $351 \cdot 0,095 = 33 \text{ Mt}$ de cinza volante. Se deste ano para frente fosse mantida a taxa de crescimento na produção de concreto em $0,351/6,51 = 0,054$, isto é, que 5,4% de produção mundial do concreto fosse realizada com o traço do estudo de caso, não seria necessário

fabricar nenhuma tonelada adicional de cimento, pois a demanda adicional seria suprida pela escória e cinza volante, visto que o acréscimo da taxa de produção da escória é superior em 2,1% à do cimento (concreto). Quanto à cinza volante, o valor necessário é de apenas 5% da produção mundial, não havendo problema na sua disponibilidade. Os cálculos a seguir estão baseados nas premissas anteriores.

Ganhos ambientais potenciais

Produzindo-se 351 Mm³ de concreto com o traço 90 ECV, deixariam de ser emanadas para a atmosfera $351 \text{ Mm}^3 \cdot 0,37 \text{ t/m}^3 = 130 \text{ Mt}$ de CO_{2eq}, ou 0,43% da emissão mundial, diminuindo a participação das emissões poluentes do cimento, no contexto global, de 6% para 5,5%, um decréscimo de 9%. Pode não parecer muito, mas é um passo significativo para a manter as emissões ao nível atual e contribuir para o arrefecimento do aquecimento global.

O decréscimo do consumo de energia seria $351 \text{ Mm}^3 \cdot 1.140 \text{ MJ} = 0,40 \text{ EJ}$, o que corresponderia apenas a 0,08% do total da energia consumida no planeta, o que também parece pouco, mas se se considerar que cada habitante da Terra consome ao ano, em média, 75 GJ, isso corresponderia ao consumo de energia de uma população de 5,3 milhões de habitantes, igual à da Dinamarca.

Se, para cada tonelada de cimento, são necessárias 1,65 t de matéria-prima, a diminuição de produção de 78 Mt corresponderia a 0,13 Gt de calcário, argila e gesso, que deixariam de ser minerados anualmente.

Esses números revelam quão benéficos são os efeitos das adições minerais ao concreto sobre os ganhos ambientais, que são diretamente proporcionais ao teor das adições utilizadas.

Ganhos financeiros

O menor custo do concreto com 90% de adições minerais poderia trazer economia de $351 \text{ Mm}^3 \cdot \text{US\$}3,48/\text{m}^3 = \text{US\$} 1,22 \text{ bilhão}$ ou 0,3% do custo da produção global de concreto com cimento comum ou, ainda, o equivalente ao custo de 20 Mm³ de concreto com 90% de adições minerais.

Como existe um mercado mundial transações de CO_{2eq}, as empresas certificadas que deixarem de emanar, total ou parcialmente, esses gases poluentes poderão transacionar nas bolsas a quantidade que deixarem de emitir, vendendo suas cotas para outras indústrias ou países que ainda não atualizaram suas plantas industriais para se enquadrar nos níveis estabelecidos pelo Protocolo

de Quioto. Nesta simulação, os ganhos potenciais seriam de 130 Mt_{CO₂eq}. US\$5,00/t = US\$ 0,65 bilhão. Considerando que até o presente momento já foram transacionadas, aproximadamente, 250 Mt de CO₂eq, a soma desses montantes corresponderia ao aumento de 52% do mercado atual.

Os ganhos totais com o uso de traço com 90% de AM somariam US\$ 1,87 bilhão de dólares para a produção de 351 Mm³ de concreto, ao custo total de US\$ 21,4 bilhões, o que representaria um ganho de 8,7% sobre o concreto produzido com cimento Portland comum. Considerando as taxas de juros vigentes no mercado internacional, esse seria um bom retorno financeiro, bastante atrativo para induzir empresários do setor a produzir concreto com altos teores de adições minerais.

Considerações finais

O concreto utilizado nas construções é um material que consome 15,4 Gt de recursos naturais relativos ao cimento e agregados, o que representa 2,4 t/habitante, segundo colocado entre os materiais mais consumidos pela humanidade, depois da água.

Essa exploração intensiva contribui com 6% das emissões de gases poluentes da atmosfera, colaborando para o aumento do efeito estufa. O advento do Protocolo de Quioto, pelas limitações e regulamentações impostas às emissões nocivas, tornou o CO₂eq uma commodity que é transacionada no mercado internacional.

A cinza volante e a escória básica de alto-forno são resíduos da queima do carvão e da fabricação de ferro gusa, com produção de 660 Mt e 220 Mt (previsão para 2005), respectivamente, podendo substituir grande parte do cimento na produção do concreto e contribuindo para diminuir os efeitos nocivos sobre o meio ambiente.

O estudo de caso mostrou que os ganhos ambientais, técnicos e econômicos são proporcionais ao teor de cimento substituído pela adição mineral. A mistura com 70% de escória e 20% de cinza volante, traço de melhor desempenho, apresentou reduções de 5% no custo, 58% no consumo de energia, 81% na emissão de CO₂ e aumento de 34% no índice de durabilidade, em relação ao concreto de cimento Portland, com relações entre custo e benefício ambiental e de durabilidade, respectivamente, 3,4 e 1,6 vezes menores.

A taxa de aumento na produção anual de cimento, igual a 4,4%, representa acréscimo anual de 78 Mt. Se fosse fabricado com o traço 90 ECV do estudo

de caso, para 40 MPa de resistência à compressão, seriam produzidas 351 Mm³ com a utilização da metade da produção mundial da escória disponível e 5% da de cinza volante. As emissões de CO₂eq diminuíram em 0,43%, o que reduziu para 5,5% a contribuição do setor, e a economia de energia poderia prover, durante um ano, as necessidades de população equivalente à da Dinamarca. Os ganhos financeiros devidos ao menor custo do concreto e da emissão de CO₂eq contribuiriam com ganho adicional de 8,7% sobre o custo do concreto produzido com cimento Portland comum.

Os ganhos desta simulação não seriam difíceis de ser implementados, apesar da resistência natural da indústria do cimento, bastando que sociedade e governos fossem esclarecidos e tivessem força de pressão e vontade política, porque por parte dos empresários da construção certamente não haveria oposição diante dos ganhos econômicos evidentes. Existe conhecimento técnico, viabilidade econômica e disponibilidade de meios para que esse objetivo seja alcançado.

Assim, a partir de 2005, se 5,4% da produção mundial de concreto utilizar o traço com 70% de escória de alto-forno e 20% de cinza volante deste estudo de caso, não se aumentará a produção de clínquer além da que existe hoje, coincidindo com a opinião de Mehta (1998):

“Seria óbvio que, se encontrássemos meios para utilizar toda ou a maior parte da cinza volante e escória granulada de alto forno, seja sob a forma de cimento com adições ou como material cimentício no concreto, poderíamos suprir a demanda de cimento no ano 2005 sem nenhum acréscimo na capacidade atual de produção de clínquer, assegurando, assim, o desenvolvimento sustentável da indústria do cimento e concreto [...] (p. 4). O desenvolvimento removeu as maiores objeções para aplicação de altos teores de cinza volante e escória. É óbvio que a reposição de cimento por larga escala de resíduos industriais será altamente vantajosa sob o ponto de vista de custo econômico, eficiência energética, durabilidade e, sobretudo, perfil ecológico do concreto. No mundo industrial será difícil encontrar melhor exemplo de excelente casamento entre dois componentes de um sistema, um dos quais parece ser resíduo industrial. Portanto, no futuro, o uso de resíduos cimentícios complementares deve se tornar mandatário” (p. 16).

Conclui-se, a partir dos resultados do estudo de caso, pela ratificação e quantificação do que o Prof. Mehta, com sua clarividência privilegiada, afirmou há seis anos.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **Standard Test Method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration**. ASTM C 1202-97. West Conshohocken: American Society for Testing Materials, 1997.

ASSOCIATION OF PLASTICS MANUFACTURERS IN EUROPE (APME). **Basic chemicals – Naphtha**. LCA-reports. Disponível em: <http://www.apme.org/dashboard/business_layer/template.asp?url=http://www.apme.org/media/public_documents/20010821_120531/55.pdf&title=LCA%2Dreports%2C+Basic+chemicals+%2D+Naphta&keuze1=&keuze2=&keuze3=&invulstrook=ecoprofile+AND+plastics+AND+related+AND+intermediates>. Acesso em: 30 jun. 2004.

BUCHER, H. R. E. Agregados para concreto. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 1986.

CARVALHO, J. **Análise do ciclo de vida ambiental aplicada à construção civil**: estudo de caso: comparação entre cimentos portland com adição de resíduos. 2002. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CEMBUREAU. **Cement industry's efforts to reduce CO₂ emissions**. Disponível em: <http://www.cembureau.be/default.asp?p=Key_09.asp>. Acesso em: 30 jun. 2004.

CO₂Cement. **CO₂ Emission Scenarios**. 2003. Disponível em: <<http://www.co2cement.com/english/scenarios.cfm>> Acesso em: 3 fev. 2004.

CO₂e.com. THE GLOBAL HUB FOR CARBON COMMERCE. **Market overview 2002**. Disponível em: <<http://www.co2e.com/trading/MarketHistory.asp>>. Acesso em: 1 fev. 2004.

DAL RI, M. **Efeitos da adição de cal hidratada em concreto com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

GALBRAITH'S LIMITED. **World crude steel and pig iron production**. 21 jan. 2004. Disponível em:

<<http://www.galbraiths.co.uk/pdf/SteelProd.pdf>>. Acesso em: 29 fev. 2004.

INDUSTRY CANADA. **Energy consumption guide**: cement clinker production. 24 mar. 2004. Disponível em: <<http://strategis.ic.gc.ca/epic/internet/inggeb-aceges.nsf/en/ge00109e.html>>. Acesso em: 30 jun. 2004.

ISAIA, G.; GASTALDINI, A.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement Concrete and Composites**, v. 25, n. 1, p. 69-76, 2003.

KLEE, H. **Summary of International Cement Industry Structure and Practice**. Draft, 18 mar. 2003. 12 p. Disponível em: <<http://www.wbcds.ch/plugins/DocSearch/details.asp?type=DocDet&DocId=MTgyNQ>>. Acesso em: 30 jun. 2004.

LUZ, V. O mercado do CO₂. **Jornal Zero Hora**, Porto Alegre, 29 fev. 2004. Caderno Ambiente, p. 6.

MALHOTRA, V. M. Making concrete "greener" with fly ash. **Concrete International**, Farmington Hills, v. 21, n. 5, p. 61-66, 1999.

MEHTA, P. K. Bringing the concrete industry into a new era of sustainable development. In: MARIO COLLEPARDI SYMPOSIUM ON ADVANCES IN CONCRETE SCIENCE AND TECHNOLOGY, 1997, Farmington Hills. **Proceedings...** Farmington Hills: American Concrete Institute, 1997. p. 49-68.

MEHTA, P. K. Role of pozzolanic and cementitious material in sustainable development of concrete industry. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS, 6., 1998, Farmington Hills. **Proceedings...** Farmington Hills: American Concrete Institute, 1998. p. 1-20.

PORTAL EXPORT NEWS. **Itália compra US\$ 5,6 milhões em créditos de carbono do Brasil**. Carbono Brasil. 19 fev. 2004. Disponível em: <<http://www.carbonobrasil.com/noticias.asp?iNoticia=2226&iTipo=7&page=3&idioma=1>>. Acesso em: 30 jun. 2004.

STUMPP, M. J. **Carbonatação de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). OFFICE OF ATMOSPHERIC PROGRAMS. U.S. GREENHOUSE GAS INVENTORY PROGRAM. **Greenhouse gases and global warming potential values**: excerpt from the inventory of U.S. Greenhouse. April 2002. 16 p. Disponível em: <yosemite.epa.gov/oar/globalwarming.nsf/UniqueKeyLookup/SHSU5BUM9T/\$File/ghg_gwp.pdf>. Acesso em: 29 fev. 2004.

VIEIRA, C. **Carbono e energia no pregão da BVRJ**. Carbono Brasil. 12 dez. 2004. Disponível em: <<http://www.carbonobrasil.com/noticias.asp?iNoticia=2006&iTipo=7&page=3&idioma=1>>. Acesso em: 30 jun. 2004.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, pelo apoio financeiro para a pesquisa, à FAPERGS e CNPq, pelas bolsas de iniciação científica, e à Companhia Siderúrgica Tubarão, MBT do Brasil e Prontomix, pelos materiais ofertados