

# Concreto de alto desempenho utilizado para Redução do Impacto Ambiental e Aumento da Sustentabilidade

A preocupação com o esgotamento dos recursos naturais e a poluição ambiental é crescente no setor da construção civil. Paradoxalmente, a sociedade e as principais organizações de controle de índices de sustentabilidade na construção civil tem dado pouca importância ao concreto, que é o produto industrializado mais utilizado no planeta, para melhoria da qualidade de vida da sociedade. Apesar das estruturas de concreto serem pouco consideradas nos programas consagrados de sustentabilidade na construção civil, diversos estudos vem sendo desenvolvidos com o intuito de quantificar e minimizar seus impactos ao meio ambiente, os quais estão relacionados com o projeto estrutural e com as propriedades físicas e mecânicas do material concreto. Neste contexto, este artigo recorda alguns conceitos de gestão ambiental e propõe, com exemplos contundentes, a observação de novos e interessantes critérios de sustentabilidade no uso do concreto estrutural, demonstrando a vantagem do emprego de concretos de alta resistência.

■ J. Pacheco, L. Doniak and M. Carvalho, PhD Engenharia, São Paulo, Brasil  
P. Helene, Universidade de São Paulo and PhD Engenharia, São Paulo, Brasil ■

Os atuais modelos de desenvolvimento social, econômico e industrial, baseado no crescente e veloz consumo de recursos naturais, quando mal administrado, pode ter como consequência a degradação e a poluição ambiental. Segundo Metha & Monteiro (2014), decisões visando exclusivamente resultados a curto prazo e objetivos simplistas estão contribuindo para agravar ainda mais a situação mundial.

Por outro lado, nas últimas décadas, percebeu-se uma crescente conscientização da sociedade com relação à limitação dos recursos naturais, e a necessidade de se adotar práticas de menor impacto ambiental e a busca por um modelo de desenvolvimento que seja ainda mais sustentável.

O desenvolvimento sustentável deve atuar em três dimensões (CIB; UNEP-IETC, 2002), como se ilustra na Fig. 1:

1. ambiental: no intuito de encontrar um equilíbrio entre proteger o ambiente físico e seus recursos e utilizar estes recursos de modo que o planeta continue provendo uma qualidade de vida aceitável aos seres humanos;
2. econômica: requerendo o desenvolvimento de um sistema econômico que facilite o acesso de todos aos recursos e às oportunidades, promovendo a prosperidade dentro do que é ecologicamente possível e sem violar direitos humanos básicos;
3. social: buscando o desenvolvimento de sociedades justas, que permitam o desenvolvimento humano e garantam oportunidades de aperfeiçoamento pessoal e qualidade de vida aceitável.

Na indústria da construção civil, setor que, segundo Valdés (2015), emprega 7% da população mundial, que usa 2/5 de toda a energia produzida no mundo e consome 50% do total de recursos naturais da crosta terrestre, o concreto é o material que ocupa a posição de maior destaque, sendo o produto industrializado mais utilizado pela sociedade, com consumo atual mundial estimado em 19

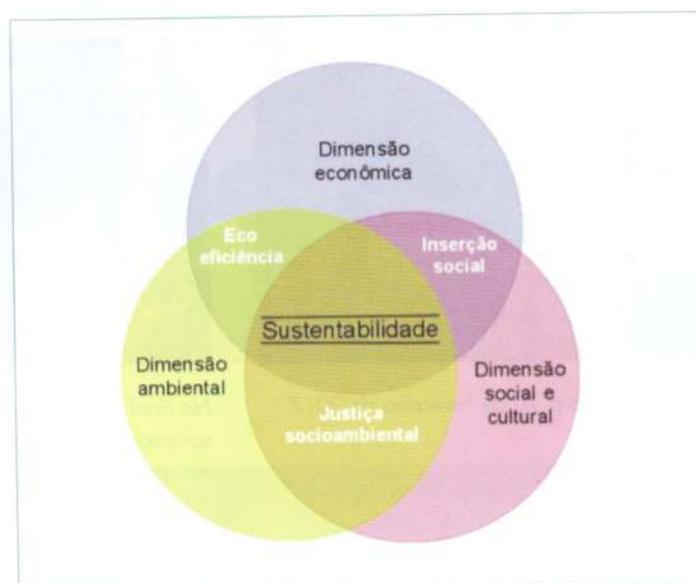


Figura 1: Dimensões da Sustentabilidade (ELKINGTON, 1994).

bilhões de toneladas ao ano (MEHTA & MONTEIRO, 2014). Os autores ressaltam que, com exceção da água, não há outro material consumido em tamanha quantidade per capita.

Portanto, o estudo do concreto no âmbito da construção sustentável torna-se a cada dia, mais primordial. Este artigo recupera conceitos de gestão ambiental e propõe a observação de novos critérios de sustentabilidade no projeto e construção das estruturas de concreto armado, empregando, paradoxalmente, concreto de alta resistência com elevados consumos de cimento.

## Gestão ambiental

Quando a busca pelo desenvolvimento econômico passou a comprometer seriamente os ecossistemas e a saúde humana, por meio da poluição e do esgotamento de recursos naturais, a questão da sustentabilidade veio à tona. A partir de então, diversas conferências com enfoque neste tema ocorreram, no intuito de elaborar prescrições normativas, iniciando-se em 1992 com a conferência RIO-92.



■ Jéssika Pacheco é engenheira na PhD Engenharia Ltda. e trabalha nas áreas de reforço estrutural e controle tecnológico do concreto. Ela participou em projetos de pesquisa de materiais de construção, sustentabilidade e acreditação de laboratórios. Atualmente, ela é coordenadora do Comitê CT 801 – o Comitê de Atividades Estudantis do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON). Obteve sua graduação em engenharia civil pela Universidade Presbiteriana Mackenzie.



■ Lígia Doniak é estudante de engenharia civil na Universidade Presbiteriana Mackenzie, onde foi monitora da disciplina de materiais de construção. Ela já trabalhou com tecnologia de concreto e reforço estrutural como estagiária na PhD Engenharia. Também é membro na categoria estudante do IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto) e fib (Federação Internacional do Concreto Estrutural).  
lodoniak@gmail.com



■ Mariana Carvalho é engenheira civil formada na Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Ela tem experiência no setor de construção, nas disciplinas de projetos, orçamentos, fornecimentos e planejamento, incluindo design e compatibilidade de projetos que envolvem o conceito BIM. Obteve o 5.º lugar no Prêmio OAS/Mackenzie – Inovação, Produtividade e Empreendedorismo na Engenharia Civil (edição 2013), com o artigo “Degradação de gases poluentes por meio de revestimentos com dióxido de titânio em argamassas e concretos”. Ela tem trabalhado nas áreas de tecnologia de materiais, sistemas, inspeções e diagnósticos de manifestações patológicas em estruturas de concreto, focando-se em estudos, diagnósticos, relatórios e opiniões técnicas.



■ Paulo Helene é mestre, doutor e professor titular na Universidade de São Paulo, no Brasil, e diretor da PhD Engenharia. Ele é membro da ACI desde 1992 e coeditor da ACI SP 187/1999, da ACI SP 207/2003 e da ACI SP/229/2005, todas sobre concreto de alto desempenho. Ele trabalha há mais de trinta anos em educação, pesquisa e consultoria sobre materiais e estruturas de concreto. Helene também é: ex-presidente e conselheiro permanente do IBRACON Instituto Brasileiro do Concreto; foi presidente-adjunto da fib (CEB-FIP) Comissão 5, “Aspectos da Vida Útil de Estruturas”; é presidente honorário da ALCONPAT Int., uma Rede Ibero-americana para a Reabilitação de Estruturas de Concreto; e membro de outras associações de concreto como ASTM, NACE e IABSE.  
paulo.helene@concretophd.com.br

Como resposta a esta demanda mundial por uma gestão ambiental mais confiável, justa e consciente, a Comissão Técnica 207 da ISO (TC 207), em 1994, desenvolveu a série de normas ISO 14000, que propôs o conceito de Avaliação do Ciclo de Vida Life Cycle Assessment – LCA. Este conceito envolve a análise e determinação dos impactos ambientais de produtos ou serviços em todas as fases de seu ciclo de vida: aquisição de matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final deste produto ou de resíduos resultantes do serviço.

Através da Avaliação do Ciclo de Vida é também possível produzir a Declaração Ambiental de Produto (Environmental Product Declaration – EPD), considerada uma das melhores e mais completas referências de sustentabilidade nos dias atuais.

A EN 15804:2012 estabelece três tipos de EPD, descritos a seguir, com base nos estágios do ciclo de vida abordados no estudo de cada produto ou serviço (Fig. 2):

1. cradle to gate (“do berço ao portão”): obrigatória, aborda apenas o estágio de produção (suprimento de materiais, transporte, manufatura e processos associados);
2. cradle to gate with options: opcional, aborda o estágio de produção e outros estágios adicionais, de escolha do fornecedor do produto ou serviço;
3. cradle to grave (“do berço ao túmulo”): opcional, envolve os processos de produção, instalação, uso, manutenção, reparo ou substituição, demolição, tratamento para reuso, reconstituição, reciclagem e disposição final, considerada a opção mais correta porém mais trabalhosa de análise.



**Soluções integrais**  
de high-Tec e de alta precisão



## PRENSAS VIBROCOMPRESSORAS PARA PREFABRICADOS DE CONCRETO

Instalações completas, com misturadores de concreto, manuseio e empacoteamento.

Grande gama de máquinas para blocos de concreto, trabalhando com painéis de suporte em madeira e também em aço de tamanhos diferentes, conforme os requisitos de cada projeto.

Processos de acabamento: Dividir, envelhecer blocos de calçada, calibragem de blocos...



ESTÁGIO DE PRODUÇÃO	ESTÁGIO DE PROCESSO DE CONSTRUÇÃO	ESTÁGIO DE USO	ESTÁGIO DE FIM DE VIDA	INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES (além do ciclo de vida da construção)
A1 Fornecimento de matéria prima	A4 Transporte	B1 Uso	C1 Desconstrução Demolição	D Benefícios e cargas além dos limites do sistema Potencial de reuso, reciclagem e recuperação
A2 Transporte	A5 Processo de construção e instalação	B2 Manutenção	C2 Transporte	
A3 Manufatura		B3 Reparo	C3 Processamento de resíduos	
<i>Cradle to gate</i>		B4 Substituição	C4 Disposição final	
		B5 Renovação		
		B6 Uso operacional de energia		
		B7 Uso operacional de água		
<i>Cradle to grave</i>				

Figura 2: Estágios do ciclo de vida de um produto ou serviço (traduzido e adaptado de EN 15804:2012).

Ainda, segundo a EN 15804:2012, os indicadores de impacto ambiental, quantificados em diferentes categorias em cada estágio das EPDs, envolvem a análise dos parâmetros elencados a seguir:

- potencial de aquecimento global, em kg de CO<sub>2</sub> equivalente;
- potencial de esgotamento da camada de ozônio estratosférico, em kg de CFC 11 equivalente;
- potencial de acidificação do solo e da água, em kg de SO<sub>2</sub> equivalente;
- potencial de eutrofização, em kg de (PO<sub>4</sub>)<sup>3-</sup> equivalente;
- potencial de formação de ozônio troposférico, em kg de etileno equivalente;
- potencial de esgotamento de recursos abióticos (elementos), em kg de Sb equivalente;
- potencial de esgotamento de recursos abióticos (combustíveis fósseis), em MJ.

Além desses indicadores de impacto ambiental, a mesma norma também expõe parâmetros que descrevem a utilização de recursos naturais (renováveis ou não), energia e água.

As EPDs são válidas por 5 anos e, após este período, devem ser revisadas e verificadas. Não se faz necessário recalculá-las se as informações subjacentes não apresentarem modificações substanciais. Se algum dos parâmetros indicadores de impacto ambiental sofrer alteração de, no mínimo, 10% (para mais ou para menos), a EPD deve ser atualizada.

Ainda no contexto de construções sustentáveis, diversas entidades internacionais, visando incentivar este segmento de construção,

criaram certificações para valorizar e orientar a transformação de projetos convencionais em projetos ecologicamente corretos. Dentre estas certificações, pode-se destacar o LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), Selo Casa Azul (Sistema de certificação brasileiro desenvolvido pela Caixa Econômica Federal), HQE (Haute Qualité Environnementale), BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) e DGNB (German Sustainable Building Council).

Entretanto, os critérios de avaliação destas certificações, equivocadamente, não contempla o emprego de concretos de alta resistência na composição positiva das pontuações.

Apesar de parecer um paradoxo, ao longo deste artigo, serão apresentadas as diversas vantagens envolvidas na adoção deste tipo de concreto, visando fundamentar a proposta de sua inclusão nos sistemas de certificação.

### Concreto sustentável?

Conforme já abordado, o concreto é o material de construção mais amplamente utilizado no mundo, devido, principalmente, à sua resistência, flexibilidade, durabilidade, facilidade de execução e baixo preço. Entretanto, como em qualquer outro produto a ser utilizado na construção, a produção do concreto e de seus componentes (em especial, do cimento) requer energia, consome água e resulta na geração CO<sub>2</sub> (NRMCA, 2012).

Segundo Isaia e Gastaldini (2004), a produção do cimento consome 5,5GJ de energia e libera em torno de 1tonelada de CO<sub>2</sub> por

tonelada de clínquer. Levy (2005) destaca que a produção de cimento é responsável por cerca de 6% a 7% das emissões totais de CO<sub>2</sub> no mundo. O Brasil, com produção anual de 40 milhões de toneladas de cimento e cerca de 16 milhões de clínquer, contribui com cerca de 1% a 2% do total de emissões de carbono do Brasil.

O impacto ambiental do concreto, entretanto, não é causado apenas pelo cimento. Para a produção do concreto, são também utilizados materiais e recursos naturais não renováveis como a areia e a brita, beirando o montante de consumo de 12 bilhões de toneladas anuais. Considerando o impacto da exploração, o processamento e o transporte dessa matéria prima, observa-se que todo processo de produção do concreto parece afetar desfavoravelmente o ambiente (KLEIN, 2008), apesar de serem fundamentais para a melhoria da qualidade de vida da humanidade através da construção de casas, pontes, estradas, viadutos, portos, estações de tratamento de água e de esgoto, escolas, hospitais, etc.

A indústria do concreto utiliza também grande quantidade de água potável, cerca de 1 trilhão de litros a cada ano, só como água de amassamento, à qual ainda se somam grandes parcelas de água de lavagem das betoneiras e equipamentos e água de cura do concreto (LARANJEIRAS, 2002).

Assim, no intuito de reduzir o consumo de água potável, recursos naturais e energia, diminuindo o impacto ambiental, há a necessidade de considerar a vida útil, a durabilidade e a resistência das estruturas de concreto, levando em conta o longo prazo (mais de 50 anos) das construções em concreto.

Entretanto, ocorre que, segundo a EN 15804:2012, apenas a análise cradle to gate do ciclo de vida é, atualmente recomendável e até obrigatória em certas circunstâncias. Assim, as empresas de serviços de concretagem, por exemplo, estão se concentrando em realizá-la, desestimulando, equivocadamente, a utilização de concretos de alta resistência. Correspondente a esta visão equivocada, os impactos ambientais expostos Tab. 1 que se referem somente à produção do concreto usinado.

Entretanto, esta análise incompleta e equivocada não transparece os impactos ambientais globais de uma estrutura de concreto. Contrariando esta visão, Levy (2005) explica que os concretos de alto desempenho (HPC High Performance Concrete) possuem uma estrutura de poros mais compacta e, em sua formulação, aditivos superplastificantes e adições minerais que reagem com a cal livre e melhoram a resistência. Assim, nesses HPCs, a relação água/cimento é inferior à de um concreto convencional, o que eleva suas propriedades mecânicas e sua durabilidade.

O comportamento mecânico superior dos HPCs permite, ainda, reduções expressivas de seções estruturais, gerando grande economia de cimento, de aço, de água e de agregados, além de eventual ganho econômico por aumento de áreas úteis para uso, locação e estacionamentos em empreendimentos.

Um exemplo importante da aplicação deste conceito no Brasil é o HPC colorido com fck de 80MPa, utilizado no Edifício e-Tower em São Paulo, que permitiu redução significativa da área ocupada por pilares do estacionamento (HELENE & HARTMANN, 2003), conforme se observa na fig. 3.

Essa modificação (redução da dimensão dos pilares) tornou o projeto compatível com os requisitos da arquitetura e possibilitou atender aos critérios de uma estrutura sustentável. Sob o ponto de vista de vida útil e sustentabilidade, um dos principais mecanismos deletérios de uma estrutura de concreto é a corrosão do aço, fenômeno muito pouco provável em estruturas construídas com concretos de alta resistência.

## MANN FORMEN

Vasos · Balaustradas · Fontes  
Bancos · Urnas · Paredes de contenção



Moldes feitos sob medida para meios-fios, cabeços de amarração, esferas, moldes matriz para blocos de pavimentação



MANN Modell & Formenbau  
Albiger Straße 53 - 55 · 55232 Alzey, Alemanha  
T +49 6731 7087 · F +49 6731 6542  
office@mann-formen.de

## Os sensores de umidade Hydronix são os melhores do mundo



Hydro-Probe



Hydro-Mix

Com 35 anos de experiência e mais de 65 000 unidades vendidas, pode ter certeza que nossos sensores fornecerão resultados exatos e uma fiabilidade imbatível.

- Medição exata e consistente da umidade em tempo real
- Tecnologia digital com desempenho linear preciso
- Fácil de integrar em sistemas novos ou existentes
- Calibração e configuração remota
- Temperatura estável
- Apoio e serviço local

enquiries@hydronix.com  
www.hydronix.pt

  
Hydronix

Tabela 1: Impactos ambientais para 1m<sup>3</sup> de concreto usinado produzido pela empresa de serviços de concretagem Allied Concrete (traduzido de ALLIED CONCRETE, 2014).

Parâmetro	Impacto/m <sup>3</sup>						
Resistência à compressão (MPa)	20	25	30	35	40	45	50
Potencial de esgotamento da camada de ozônio estratosférico (kg CO <sub>2</sub> eq)	333	366	395	445	513	539	609
Potencial de acidificação do solo e da água (kg CFC 11 eq 10 <sup>-5</sup> )	1,10	1,19	1,26	1,39	1,57	1,56	1,83
Potencial de acidificação do solo e da água (kg SO <sub>2</sub> eq)	1,42	1,56	1,68	1,89	2,18	2,29	2,60
Potencial de eutrofização (kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq)	0,339	0,372	0,402	0,451	0,519	0,548	0,620
Potencial de formação de ozônio troposférico (kg etileno eq)	0,0688	0,0756	0,0818	0,092	0,106	0,112	0,127
Potencial de esgotamento de recursos não fósseis (kg Sb eq 10 <sup>-4</sup> )	1,10	1,18	1,25	1,41	1,44	1,49	1,83
Potencial de esgotamento de recursos fósseis (MJ)	3080	3390	3650	4090	4700	4900	5570

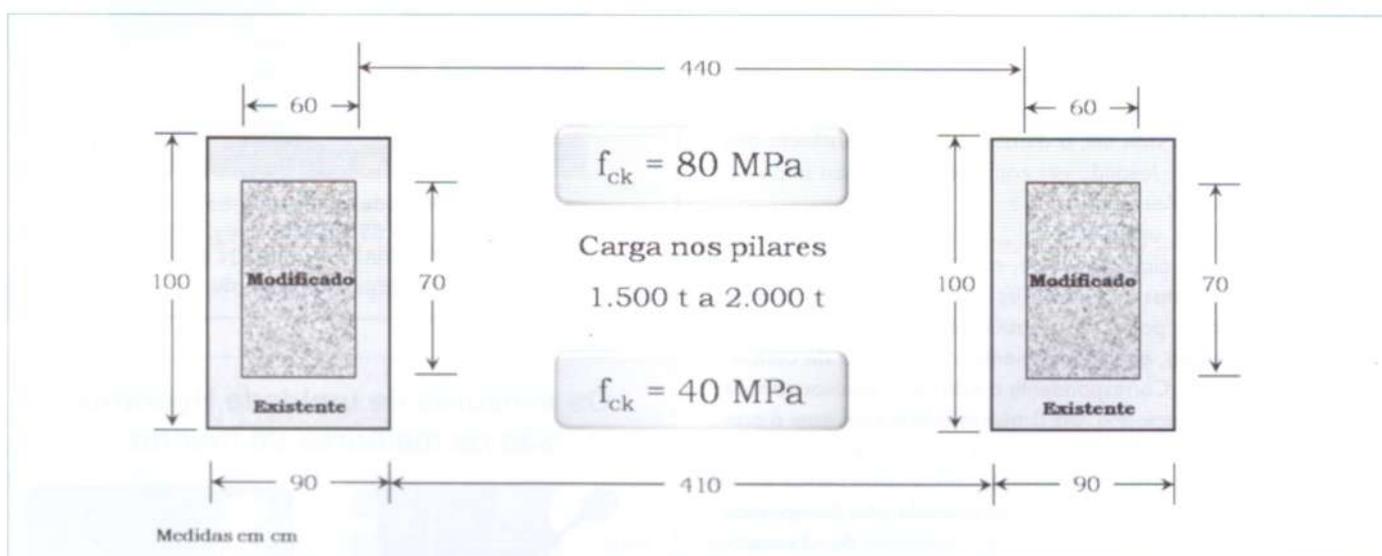


Figura 3: Concepção de projeto do e-Tower: pilares existentes no projeto original com  $f_{ck}$  de 40MPa (90cm x 100cm) e pilares modificados com  $f_{ck}$  de 80MPa (60cm x 70cm).

Todo aço carbono é protegido eternamente por um ambiente de elevada alcalinidade com pH superior a 11,5. Essa constatação é reconhecidamente observada no caso das estruturas de concreto de cimento Portland sem cloretos, pois os produtos de hidratação das reações de endurecimento entre os grãos anidros de cimento e da água liberam grande quantidade de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NaOH}$  e  $\text{KOH}$ , que são bases fortes (HELENE, 1986), capazes de proteger química e efetivamente as armaduras da corrosão deletéria.

Essa capacidade de proteção por passivação pode ser perdida com o tempo em função de várias ações das quais as principais são a penetração de cloretos e a reação do gás carbônico  $\text{CO}_2$  com esses álcalis dos produtos de hidratação, resultando sais de baixa alcalinidade, fenômeno este conhecido por carbonatação do concreto.

Com o aumento da resistência do concreto, há uma redução importante do risco associado à corrosão de armadura, dado a elevada dificuldade de penetração dos agentes agressivos. Segundo Levy (2005), com poros menores e sem conexão entre si, o concreto de alta resistência está menos sujeito à ação de agentes agressivos

presentes na atmosfera e na água, que faz aumentar sua durabilidade e conseqüentemente a vida útil de projeto da estrutura.

Do ponto de vista do conceito de construção sustentável, alguns parâmetros importantes foram alcançados com essa modificação de projeto: a elevação da vida útil, a redução do uso de recursos naturais, de impactos ambientais, de energia e do volume total de concreto da obra (mesmo com um consumo de cimento por metro cúbico de concreto superior ao concreto do projeto original - com  $f_{ck}$  de 40MPa).

Especificamente sobre a elevação da vida útil, foram adotados alguns valores padronizados de bibliografias consagradas<sup>1</sup> para exemplificar a magnitude do crescimento, conforme exposto na Tabela 2, onde é possível constatar um crescimento de dez vezes na vida útil de projeto.

Quanto à economia de recursos naturais, apurou-se que houve uma redução considerável de todos os materiais utilizados na composição do concreto e na concepção dos pilares com  $f_{ck}$  de 80MPa, comparado aos de  $f_{ck}$  = 40MPa. O volume dos agregados foi reduzido em 70%, enquanto o do cimento em 20%, conforme Tabela 3.

Tabela 2: Dados levantados no estudo de caso realizado sobre os pilares de concreto de alta resistência do edifício e-Tower, referentes ao crescimento da vida útil

Elemento	Cobrimento característico <sup>(1)</sup> de projeto (cm)	Constante de carbonatação adotada <sup>(2)</sup> : $k_{CO_2}$ (mm/ano <sup>1/2</sup> )	Vida útil de projeto estimada (anos)
Pilar estrutural (90 cm x 100 cm) com $f_{ck} = 40$ MPa	3,0	2,45	150
Pilar estrutural (60 cm x 70 cm) com $f_{ck} = 80$ MPa	3,0	0,77	1500

<sup>(1)</sup> Considerou-se como característico o cobrimento de projeto dentro da tolerância da ABNT NBR 6118:2014, ou seja: o cobrimento mínimo admitido.

<sup>(2)</sup> Este valor foi adotado em função da Prática Recomendada do IBRACON somente para efeito de demonstrar que a vida útil da estrutura aumenta em dez vezes quando da mudança da resistência do concreto. Destaca-se, no entanto, que estes coeficientes foram estimados.

Tabela 3: Dados apurados no estudo realizado sobre os pilares de concreto de alta resistência do edifício e-Tower, referentes às reduções dos materiais isolados e do concreto global.

Material	Redução
Areia	70%
Brita	70%
Cimento	20%
Água	53%
Aço	43%
Fôrma	31%
Concreto	53 %

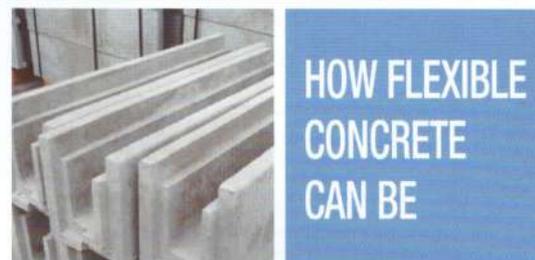
Corroborando este ponto de vista, estudos de Couto (2009) mostram que a concepção de edifícios de 41 pavimentos com concretos de alta resistência é vantajosa, tanto do ponto de vista econômico quanto sustentável, comparados com aqueles concebidos com concretos convencionais. Observou-se que é possível obter uma redução de, aproximadamente, 11% no custo global da estrutura, ao passar de um  $f_{ck}$  de 25MPa para um  $f_{ck}$  de 50MPa. Assim, com visão holística e de longo prazo, é preciso que a análise do ciclo de vida do concreto seja realizada levando em conta todo o ciclo de vida desse material e não somente do "berço ao portão".

Bento e Rossignolo (2015) demonstram em sua pesquisa de doutorado a importância de uma visão holística fruto de uma análise cradle to grave (do berço ao túmulo) de um edifício residencial hipoteticamente projetado, composto por oito pavimentos tipo e um pavimento térreo. Foram analisadas nesse estudo as classes de resistência com  $f_{ck}$  de 25MPa, 30MPa, 35MPa, 40MPa, 45MPa e 50MPa, como se expõe na Tab. 4.

Neste estudo se considerou a redução de seção em dois momentos, na classe C35 e na classe C45. Concluiu-se que para este caso a classe de resistência com menor impacto ambiental seria a C40. A partir desse momento, o aumento de resistência não resultaria em uma diminuição significativa de seção resistente das peças fletidas e não seria vantajosa para o carregamento determinado inicialmente.

O estudo de Schmidt e Teichmann (2007), visando à construção de uma ponte com estrutura treliçada em concreto protendido (obra de arte), também concluíram que o concreto de ultra alto desempenho (UHPC), com  $f_{ck}$  de 200MPa, demonstra ser muito mais sustentável que o concreto convencional, resultando em um menor consumo de insumos e de energia, conforme se observa na Tab. 5.

<sup>(1)</sup> O valor do coeficiente de carbonatação foi estimado com base na literatura: Prática recomendada IBRACON - Comentários Técnicos NB-1, produzida em 2003. O modelo adotado foi simplificado com base no mecanismo de deterioração por carbonatação da estrutura, através da fórmula:  $e = k_{CO_2} \cdot \sqrt{t}$ , sendo  $e$  o cobrimento de concreto em cm,  $k_{CO_2}$  a constante de carbonatação em cm/ano<sup>1/2</sup> e  $t$  em anos.



- Sistemas de fabrico semiautomáticos ou totalmente automáticos, tanto para produtos de betão moldados a seco como a húmido
- Moldes moldados a seco e a húmido para a indústria de pré-fabricados

Tabela 4: Balanço geral das categorias de impacto com resultados obtidos para cada resistência da estrutura (BENTO & ROSSIGNOLO, 2015).

Categoria de impacto	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Eutrofização (g NO <sub>3</sub> )	(2,33 · 10 <sup>2</sup> )	Maior (2,43 · 10 <sup>2</sup> )	(2,15 · 10 <sup>2</sup> )	Menor (2,09 · 10 <sup>2</sup> )	(2,10 · 10 <sup>2</sup> )	(2,13 · 10 <sup>2</sup> )
Formação de ozônio fotoquímico (g C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Äq)	(4,03 · 10 <sup>4</sup> )	Maior (4,10 · 10 <sup>4</sup> )	(3,83 · 10 <sup>4</sup> )	Menor (3,55 · 10 <sup>4</sup> )	(3,61 · 10 <sup>4</sup> )	(3,72 · 10 <sup>4</sup> )
Consumo de recursos materiais (kg)	Maior (6,93 · 10 <sup>2</sup> )	(6,56 · 10 <sup>2</sup> )	(5,43 · 10 <sup>2</sup> )	(5,00 · 10 <sup>2</sup> )	Menor (4,95 · 10 <sup>2</sup> )	(4,90 · 10 <sup>2</sup> )
Consumo de recursos energéticos (kWh)	(4,20 · 10 <sup>1</sup> )	Maior (4,30 · 10 <sup>1</sup> )	(4,01 · 10 <sup>1</sup> )	Menor (2,17 · 10 <sup>1</sup> )	(2,20 · 10 <sup>1</sup> )	(2,26 · 10 <sup>1</sup> )
Ecotoxicidade (m <sup>3</sup> do compartimento)	(2,54 · 10 <sup>2</sup> )	Maior (2,64 · 10 <sup>2</sup> )	(2,20 · 10 <sup>2</sup> )	Menor (2,10 · 10 <sup>2</sup> )	Menor (2,10 · 10 <sup>2</sup> )	Menor (2,10 · 10 <sup>2</sup> )
Aquecimento global (g CO <sub>2</sub> eq)	Maior (6,75 · 10 <sup>3</sup> )	(6,67 · 10 <sup>3</sup> )	(6,12 · 10 <sup>3</sup> )	(5,74 · 10 <sup>3</sup> )	Menor (5,71 · 10 <sup>3</sup> )	Médio (5,67 · 10 <sup>3</sup> )
Toxicidade humana (m <sup>3</sup> do compartimento)	Maior (1,80 · 10 <sup>8</sup> )	(1,78 · 10 <sup>8</sup> )	Menor (1,68 · 10 <sup>8</sup> )	(1,76 · 10 <sup>8</sup> )	(1,76 · 10 <sup>8</sup> )	(1,76 · 10 <sup>8</sup> )
Acidificação (g SO <sub>2</sub> eq)	(9,52 · 10 <sup>1</sup> )	Maior (1,00 · 10 <sup>2</sup> )	(9,19 · 10 <sup>1</sup> )	Menor (8,90 · 10 <sup>1</sup> )	(9,03 · 10 <sup>1</sup> )	(9,23 · 10 <sup>1</sup> )
Resíduos (kg)	Maior (2,30 · 10 <sup>1</sup> )	Maior (2,30 · 10 <sup>1</sup> )	(1,90 · 10 <sup>1</sup> )	(1,70 · 10 <sup>1</sup> )	Menor (1,68 · 10 <sup>1</sup> )	Menor (1,68 · 10 <sup>1</sup> )

Tabela 5: Demanda de materiais (em toneladas) e de energia (em MJ) para a para construção de ponte com estrutura treliçada de concreto convencional e concreto de alto desempenho (SCHMIDT & TEICHMANN, 2007).

Material	C25/C30	Alto Desempenho f <sub>ck</sub> 200 MPa
Cimento	120	98
Agregados	620	170
Água	60	21
Sílica ativa	-	18
Aço (armadura passiva)	70	22
Fibras de aço	-	10
Aço (armadura ativa)	10	12
Energia total (MJ)	2.050.256	1.148.517

Com efeito, percebe-se que a utilização dos concretos de alto desempenho (paradoxalmente, com maiores consumos de cimento por metro cúbico) traz expressivas vantagens, não apenas com relação às propriedades mecânicas, mas também no aspecto ambiental e sustentável. Entretanto, como já exposto, estas vantagens aparecem apenas no longo prazo e ao longo de uma análise da vida útil do material, quando é realizada uma análise completa do tipo cradle to grave.

Além da importância das altas resistências na redução da demanda total de insumos, é importante investigar também as emissões pontuais pelas empresas de serviços de concretagem no m<sup>3</sup> de produto fornecido. Os concretos, em geral, apresentam emissões de CO<sub>2</sub> em torno de 7% a 15% do valor da massa de concreto produzida (NRMCA, 2012), dependendo do traço concebido.

Estes valores estão muito relacionados à clínquerização do cimento utilizado, à otimização do processo produtivo das usinas e também à quantidade de cimento por m<sup>3</sup> calculada para os traços de concreto. Juntamente com a análise da energia total gasta para toda a estrutura, um estudo adequado e a otimização nos insumos do m<sup>3</sup> de concreto também pode ajudar a mitigar seu impacto ambiental.

No caso da análise simplista de 1m<sup>3</sup> de concreto isoladamente, pode-se avaliar o impacto ambiental através do conceito de rendimento, expresso pela relação resistência à compressão (MPa) / consumo de cimento (C<sub>cim</sub>). Fica evidente o fato da eficiência de um concreto estar intimamente ligada à quantidade de cimento necessária para se atingir as resistências desejadas. Para Helene e

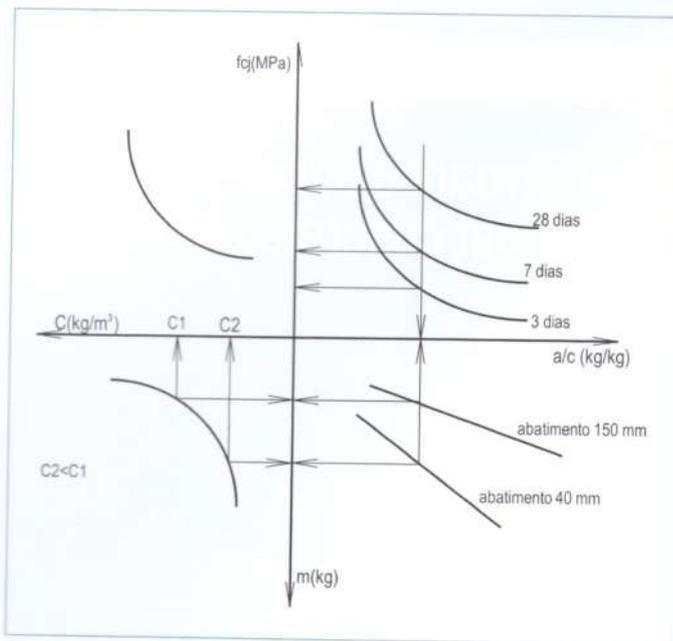


Figura 4: Diagrama de dosagem dos concretos de cimento Portland.

Tutikian (2011), o rendimento tem um ponto ótimo máximo para cada traço e deve ser estudado através do diagrama de dosagem, com o intuito de se obter o concreto mais sustentável, devendo esta também ser uma solução viável economicamente.

Isto posto, os estudos de Boggio (2000) trazem uma avaliação do fator de eficiência ou rendimento do concreto, calculado para concretos com resistências entre 20MPa e 40MPa, dosados segundo o método IBRACON (tabela 6).

Dada a importância do concreto na cadeia construtiva e no desenvolvimento de uma nação e tendo em vista os benefícios do emprego do concreto de alta resistência, é paradoxal utilizar o consumo de cimento como índice de degradação do meio ambiente, pois o correto seria pensar no ciclo de vida da construção com uma visão global e holística, e não somente no consumo de cimento deste material.

### Considerações finais

Como demonstrado, ainda que apresente um maior consumo de cimento por  $m^3$ , e, por consequência, maior quantidade de emissões de  $CO_2$  por  $m^3$ , a redução no volume de concreto e o aumento considerável de vida útil justificam o uso dos concretos de alta resistência do ponto de vista da sustentabilidade. Como destacam

Tabela 6: Avaliação do fator de eficiência ou rendimento do concreto para diferentes resistências (adaptado de BOGGIO, 2000).

Resistências $f_{c28}$ (MPa)	Fator de eficiência $f_{c28}/C_{cim}$ $\times (MPa \div kg/m^3)$	$C_{cim}/f_{c28}$ $\times (kg/m^3 \div MPa)$
20	0,082	12,20
25	0,091	10,93
30	0,099	10,10
35	0,109	9,18
40	0,109	9,14
80*	0,174	5,75

\* Dados apurados no estudo realizado sobre os pilares de concreto de alta resistência do edifício e-Tower.

Hajek, Fiala e Novotna (2014), utilizar materiais com melhores características físicas e mecânicas é um meio realista de alcançar vantagens substanciais do ponto de vista de economia de materiais e energia, permitindo, no caso do concreto, a elaboração de projetos com seções otimizadas, maior durabilidade e resistência e, por fim, a geração de menores impactos ambientais. Neste contexto, sugere-se que a utilização de concretos de alta resistência também componha a pontuação dos selos para construção sustentável existentes, tais como LEED, Selo Casa Azul, HQE, BREEAM e DGNB, tendo em vista que seu emprego oferece alto desempenho em qualidade ambiental, produtividade, economia global de materiais e recursos.

### Referências

- [1] Mehta, P. Kumar; Monteiro, Paulo J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. Cap. 14. p. 729-742.
- [2] CIB - International Council for Research and Innovation in Building and Construction - United Nations Environment Programme International Environmental Technology Centre UNEP-IETC. Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries: A discussion document. Bourek Report N. Bou/EO204, Pretória, CIB/UNEP-IETC. 2002.
- [3] Elkington, J. Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development. California Management Review 36, 2, 90-100, 1994.
- [4] Valdés, Adriana. De cara al siglo XXI: la arquitectura y el concreto. Construcción y Tecnología En Concreto, Cal. Flórida, v. 4, n. 10, p.16-23, 2015.
- [5] Comité Européen De Normalisation. EN 15804: Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. Brussels: CEN, 2012.
- [6] National Ready Mixed Concrete Association. Concrete FL Fact Sheet. Silver Spring, 2012.
- [7] Isaia, G.; Gastaldini A. Concreto "verde" com teores muito elevados de adições minerais: um estudo de sustentabilidade. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente construído, 2004, São Paulo, SP. Anais... CD-ROM.
- [8] Levy, S. Sustentabilidade na Construção Civil: A Contribuição do Concreto. In: Isaia, G. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, 2005. Volume 2, Capítulo 50, p. 1551-1579.
- [9] Klein, C. H. Concreto e sustentabilidade. São Paulo, SP. 2008. Disponível em: <http://www.institutoSdejunho.blogspot.com>. Acesso em: 01 de maio 2009.
- [10] Laranjeiras, A.C.R.; Palestra: Estruturas de Concreto Duráveis: Uma chave para o sucesso do Desenvolvimento Sustentável, Simpósio Comemorativo IBRACON 30 anos, 2002.
- [11] Allied Concrete Limited. Environmental Product Declaration: Ready Mixed Concrete Using Holcim Manufactured Cement. Registration N. S-P-00555. Invercargill, 2014.
- [12] Helene, Paulo; Hartmann, Carine T. Edifício e-Tower: Record mundial en el uso de hormigón coloreado de altas prestaciones. Ingeniería Estructural. 2003. v.11, p.11 - 18.
- [13] Helene, P. R. L. Corrosão em armaduras para concreto armado. 1.ed. São Paulo: PINI: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986 - Publicação IPT nº 1636. 47p.
- [14] Couto, Douglas de Andreza. Projeto de estruturas de edifícios altos com utilização de concreto de alto desempenho. 2009. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de Piracicaba, Piracicaba, 2009.
- [15] Bento, R. C.; Rossignol, J. A.. Avaliação ambiental comparativa de estruturas de concreto armado com a variação da classe de resistência do concreto. In: CONPAT - XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção - XV Congresso de Controle de Qualidade na Construção - Congresso Luso-Africano da Construção, 2015, Lisboa. Anais. Lisboa: ALCONPAT, 2015.
- [16] Schmidt; Michael; Teichmann, Thomas. Ultra-high-performance concrete: Basis for sustainable structures. 2007. Trabalho apresentado ao Central Europe towards Sustainable Building Prague, Alemanha, 2007.
- [17] Helene, P.; Tutikian, B. F. Concreto de Alto e Ultra Alto Desempenho. In: ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, Cap 36, 2011.
- [18] Boggio, Aldo J.. Estudo comparativo de métodos de dosagem de concreto de cimento Portland. 2000. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- [19] Hajek, P.; Fiala, C.; Novotna, M. Sustainable Concrete: on the way towards sustainable building. Trabalho apresentado ao World SB 14, Barcelona, 2014.

### MAIS INFORMAÇÕES

PhD Engenharia  
www.phd.eng.br

Universidade de São Paulo  
www.poli.usp.br