

ESTUDO DE IMPACTO ECONÔMICO E AMBIENTAL DEVIDO AO AUMENTO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO NA PRODUÇÃO DE PILARES SUBMETIDOS A PEQUENAS CARGAS DE COMPRESSÃO

ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL IMPACT STUDY DUE TO INCREASED STRENGTH OF CONCRETE IN COLUMNS PRODUCTION SUBJECT TO SMALL LOADS OF COMPRESSION

Hugo Sefrian Peinado¹, Romel Dias Vanderlei², José Luiz Miotto³, Willian Wagner de Freitas Santos⁴, Marisa Fujiko Nagano⁵

^{1,5}Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana da Universidade Estadual de Maringá, PR, Brasil

¹E-mail: hspeinado@gmail.com

⁵E-mail: nfmarisa@hotmail.com

^{2,3,4}Universidade Estadual de Maringá, PR, Brasil

²E-mail: rdvanderlei@uem.br

³E-mail: jlmiotto@uem.br

⁴E-mail: willian.wwfs@gmail.com

RESUMO

O emprego de concretos com maiores resistências possibilita a construção de elementos estruturais com maior durabilidade em função de suas características. Desta forma, o presente trabalho objetiva avaliar os impactos econômicos e ambientais devido ao aumento da resistência do concreto no dimensionamento e execução de pilares submetidos a pequenas cargas de compressão. Para tanto, foram dimensionados pilares com carregamento padrão de 1000 kN, altura de 3,2 metros e seção transversal quadrada. Foi analisado o dimensionamento dessa seção, custo de execução para concretos com f_{ck} variando de 20 MPa a 50 MPa, consumo de cimento e emissões de CO₂ associadas ao consumo de cimento e aço por elemento estrutural. Os resultados mostraram que, tomando-se como referência o pilar dimensionado com concreto C25, com o aumento da resistência à compressão do concreto, é possível obter pilares com redução de até 45% da área ocupada, custos decrescentes em até 18% e, ainda, reduzindo os danos causados ao meio ambiente no que se refere ao consumo de cimento e aço, uma vez que os pilares dimensionados com concretos de elevadas resistências até o C45 apresentaram menor emissão de CO₂ associadas ao cimento e ao aço por elemento estrutural que aqueles dimensionados com o concreto de referência.

Palavras-Chave: viabilidade econômica, ganho de área útil, durabilidade, sustentabilidade.

ABSTRACT

The use of concrete with strengths up to conventional allows the construction of structural elements with greater durability due to their characteristics. Therefore, the purpose of this research is to evaluate the economic and environmental impacts due to increased strength of concrete in the design and execution of columns subject to small loads of compression. Thus, the columns were dimensioned with 1000 kN loading pattern, 3.2 meters height and square cross section. It was analyzed the design of this section, execution cost for concrete with compression strength of the concrete (f_{ck}) ranging from 20 MPa to 50 MPa, cement consumption and CO₂ emission associated with cement and steel consumption per structural element. The results showed that, taking the dimensioned column with C25 concrete as a reference, with increasing compressive strength of the concrete column, is possible to gain a reduction of the area occupied up to 45%, decreasing costs by up to 18% and reducing damage caused to the environment related to the consumption of cement and steel, because the columns dimensioned with concrete with strengths up to conventional until C45 had lower CO₂ emission associated with cement and steel per structural element than those with the scaled reference concrete.

Keywords: economic viability, useful area gain, durability, sustainability.

1 – INTRODUÇÃO

O estudo de implantação de novas tecnologias ou da utilização de alternativas tecnológicas já existentes, no entanto pouco empregadas, visando à sustentabilidade na construção de edificações, questões ambientais e a diminuição do consumo dos recursos terrestres têm permeado discussões técnicas nas últimas décadas. No entanto, o processo de inovação na construção, além de ser bastante diferente quando comparado às outras indústrias, apresenta entraves relacionados à natureza física da construção, à organização econômica, social e ao contexto

cultural na qual está inserida e, portanto, para que haja a efetiva implantação destas inovações visando à sustentabilidade, faz-se necessária a incorporação de mudanças em todas as atividades relacionadas à construção (WHARTON; PAYNE, 2003; ISOLDI *et al.*, 2006; AGOPYAN; JOHN, 2011).

No contexto do desenvolvimento tecnológico, a temática da sustentabilidade é apontada como uma iniciativa em produzir bens que gerem a menor carga ambiental possível, no intuito de preservar o ambiente de degradações futuras. Assim, para a obtenção do desenvolvimento sustentável, é indispensável fazer a

dissociação entre o desenvolvimento tecnológico e a carga ambiental, ou seja, deve-se procurar obter o mesmo desempenho com consumos menores de recursos, reduzindo, dessa forma, a extração de materiais da natureza e a produção de resíduos e poluentes (JOHN *et al.*, 2002).

Uma das proposições que visa estabelecer um vínculo entre o desenvolvimento tecnológico e a redução do consumo de materiais é o aumento da durabilidade dos elementos estruturais produzidos que, por sua vez, resulta em maior vida útil para a edificação, desde que as atividades de manutenção previstas sejam executadas (JOHN *et al.*, 2002; MENDES, 2002; BORGES, 2008). Ainda, no tocante à temática de sustentabilidade nas edificações, os custos de manutenção no pós-obra, o nível de patologias e defeitos aceitáveis, dentre outras questões, devem compor o arcabouço desta discussão (BORGES, 2008).

Dessa forma, a durabilidade não deve ser entendida como uma característica intrínseca a um material, ou seja, alterações em detalhes (de projeto e execução) que propiciem maior proteção ao componente contra agentes de degradação podem aumentar a sua vida útil sem, contudo, alterar substancialmente a carga ambiental total (JOHN *et al.*, 2002).

1.1 Concreto de alto desempenho, alta resistência e de elevadas resistências

O desenvolvimento tecnológico aliado à evolução do conhecimento tem exigido do concreto um crescente desempenho estrutural. Assim, conforme destaca Vanderlei (1999), os progressos observados nas técnicas de elaboração de projetos estruturais, assim como o maior entendimento do comportamento mecânico do concreto e do aço, tem resultado em estruturas arrojadas em concreto armado e protendido submetidas a tensões elevadas, o que justifica o desenvolvimento de estudos técnicos e científicos que permitam à estrutura atender tais solicitações.

Apesar de não haver um consenso no meio técnico em relação aos significados dos termos Concreto de Alta Resistência (CAR) e Concreto de Alto Desempenho (CAD), admite-se que o CAD apresenta maior abrangência que o CAR devido às outras características verificadas no material além de sua resistência à compressão.

Em uma das definições constantes na literatura apresentadas por Mendes (2002) e Mehta e Monteiro (2008), Concreto de Alta Resistência é considerado aquele que possui resistência superior a 40 MPa, apresentando maior controle de qualidade e cuidados na seleção e dosagem dos materiais constituintes. Ainda, existem estudos experimentais que evidenciam que concretos com resistência superior a 40 MPa apresentam microestrutura e propriedades diferentes dos concretos convencionais (20 a 40 MPa) (MENDES, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

No entanto, como o termo CAR é adotado, no contexto brasileiro, apenas para concretos com resistência à compressão superiores a 55 MPa, conforme destaca a ABNT NBR 8953:2011, adota-se, para este estudo, a

expressão concreto de elevadas resistências para concretos com resistência igual ou superior a 40 MPa, nos quais o consumo de cimento se mostre gradativamente maior conforme aumenta-se a classe de resistência do concreto.

Concretos de elevadas resistências têm se constituído uma alternativa tecnológica visando maior durabilidade dos elementos estruturais de uma edificação, principalmente quando submetidos à ação de agentes agressivos (MENDES, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2008; BARATA, 1998; EUROCODE 2, 2004). A ABNT NBR 12655:2006 corrobora tal prerrogativa ao especificar que, para estruturas em concreto submetidas a condições especiais, como exposição ao processo de congelamento e descongelamento, exposição a soluções contendo sulfato ou exposição a cloretos proveniente de agentes químicos de diversas origens, devem ser usados concretos com valor mínimo do f_{ck} de 40 MPa para a primeira e segunda situações e 45 MPa para a terceira, uma vez que, combinando a resistência à máxima relação água/cimento apontada, obtêm-se os requisitos mínimos exigidos para elementos estruturais com a durabilidade requerida.

Mendes (2002) expõe que, no que se refere aos concretos de elevada resistência, principalmente aqueles com superplastificante e sílica ativa, há um aumento da resistência associado a uma microestrutura mais densa e com menor quantidade de vazios, desde que haja um acréscimo no consumo de cimento em função do acréscimo de resistência. Esses aspectos garantem aos elementos moldados com este concreto não apenas resistência à compressão, como também baixa permeabilidade, alta estabilidade dimensional, alta resistência à abrasão e ao ataque de agentes agressivos, ou seja, maior durabilidade.

No Brasil, a utilização de concretos de elevadas resistências ainda é restrita, conforme destaca Mendes (2002), em função de um desconhecimento das características, dos benefícios e dos custos de utilização do material. No entanto, uma série de pesquisas sobre a utilização desse tipo de concreto em pilares tem sido desenvolvida no país, das quais se destacam Agostini (1992), Paiva (1994), Lima (1997), Vanderlei (1999), Guimarães (1999), Queiroga (1999), Torrico (2010), dentre outras. Ainda, algumas obras têm sido realizadas com o emprego de concretos de elevadas resistências em pilares, demonstrando o interesse na aplicação desse material e em seu desenvolvimento. Conforme mostra Leal (2004), um exemplo foi a construção da Torre Norte do Centro Empresarial Nações Unidas na cidade de São Paulo (SP), com 158 metros de altura (35 pavimentos), no qual houve aplicação de concreto com f_{ck} de 50 MPa nos pilares da edificação. Outro exemplo a ser destacado é a construção do Estádio Nacional Mané Garrincha, em Brasília, DF, com pilares circulares em concreto com f_{ck} de 60 MPa, conforme destaca Sachs (2013).

Por fim, conforme expõem Hegger (1996) e Vanderlei (1999), quando o uso do concreto de elevadas resistências/CAR é feito em elementos submetidos a tensões normais de compressão (utilizados para transportar as ações dos pavimentos das estruturas para as fundações), esta tecnologia torna-se viável economicamente, ou seja,

com o emprego do concreto de elevadas resistências/CAR, é possível obter elementos de menores dimensões que otimizem o espaço arquitetônico com menor custo quando comparado aos elementos executados com concretos convencionais.

1.2 Consumo de cimento em concretos, aço em estruturas de concreto armado e a sustentabilidade

O desenvolvimento de atividades na indústria da construção exige altos consumos de materiais e é responsável pela geração de muitos resíduos. Desta forma, o foco no desenvolvimento sustentável no intuito de reduzir a carga ambiental deve permear a etapa de projeto, de construção, de manutenção e de demolição da edificação (TAE *et al.*, 2011).

Os países em desenvolvimento tem experimentado um crescimento econômico acompanhado da necessidade de investimentos em infraestrutura, no setor habitacional, dentre outros, gerando um aquecimento no mercado da construção civil. Conforme aponta Rebmann (2011), por ser o principal material de construção empregado no Brasil, o aumento do consumo de cimento é proporcional ao aquecimento da economia. Dados apresentados pelo último relatório do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2010) expõem que o consumo de cimento no país atingiu um total de 60 milhões de toneladas no ano de 2009, representando um aumento de 46% quando comparado a 2006 e, no ano de 2010, esse aumento foi de 15,6%, o que mantém o Brasil entre os maiores consumidores de cimento no mundo.

Uma série de relatórios, segundo apresenta Rebmann (2011), estima que haverá um aumento do consumo considerável de cimento para as próximas décadas. Isso, ainda segundo o autor, traz grandes impactos ambientais, uma vez que uma das principais consequências do aumento do consumo de cimento é o crescimento no consumo de energia para a produção e também a emissão de CO₂ na atmosfera, além da necessidade de instalação de novas unidades industriais, dentre outros aspectos.

Dados apresentados por Barbosa e Bastos (2008) e Costa (2012) destacam que, na composição do concreto (cimento, areia, britas, água e aditivos), o cimento é o material que apresenta a maior taxa de emissão de CO₂ dentre os materiais considerados, chegando a representar até 70% das emissões de CO₂ totais associadas à produção do concreto.

A produção de cimento é um processo altamente energético e, conforme destaca IEA (2007 *apud* REBMANN, 2011), gera entre 650 a 900 kg de CO₂ por tonelada de cimento, sendo que a média ponderada dá-se em 830 kg de CO₂ por tonelada de cimento. Esses valores se aproximam a todos os outros mencionados por Rebmann (2011), os quais variam entre 700 kg a 930 kg, dependendo do teor de clínquer utilizado na produção.

O aumento nos níveis de CO₂ associado ao aquecimento global aumenta a probabilidade de carbonatação e, por conseguinte, da corrosão da armadura presente nas estruturas. Portanto, observa-se que o impacto do crescente lançamento de CO₂ na atmosfera e das

alterações climáticas na infraestrutura é considerável, uma vez que o processo de corrosão é destrutivo para a sociedade e oneroso para reparação (STEWART *et al.*, 2011).

Outro material de grande consumo em estruturas em concreto armado é o aço, o qual apresenta uma elevada carga ambiental no que se refere à emissão de CO₂ na atmosfera, sendo superior às emissões associadas à produção de cimento, por tonelada de cada material produzido. Dados de Costa (2012) apresentam que a emissão média de CO₂ na produção do aço no contexto da pesquisa é de 1845,2 kg por tonelada de aço produzido.

Com base nos pressupostos, evidencia-se a necessidade de medidas de redução do consumo de cimento em concretos e, ainda, a elaboração de estudos técnicos que verifiquem qual a classe de resistência mais viável para o dimensionamento de cada tipo de estrutura que possibilite o menor consumo de cimento e de aço por estrutura/elemento estrutural, principalmente em função de aspectos ambientais.

2 – JUSTIFICATIVA

Apesar da utilização do concreto com elevadas resistências ser uma tecnologia bem difundida em países mais desenvolvidos em relação ao concreto convencional, conforme destaca Mendes (2002), a realidade brasileira tem se mostrado diferente, sendo que a utilização desses concretos tem sido restrita a algumas aplicações apenas em grandes centros urbanos como Rio de Janeiro, Niterói, São Paulo e Brasília. Conforme já destacado, isso se dá em virtude de um desconhecimento das características, dos benefícios e dos custos de utilização dessa tecnologia em várias regiões do país. Com isso, estudos de viabilidade econômica tornam-se fundamentais no intuito de desmistificar o uso desse material. O elevado custo por m³ de concretos de elevadas resistências deve ser confrontado com os seus pontos positivos: o aumento da vida útil dos elementos estruturais; a possibilidade de construção de pilares de seção menores; aumento da área útil da edificação; estruturas com menor peso próprio e; diminuição da carga nas fundações. Essas vantagens podem culminar em economia na produção da edificação.

Outro aspecto que corrobora o estudo deste material é a questão ambiental. Segundo Rebmann (2011) e Costa (2012), o crescimento econômico experimentado pelos países em desenvolvimento tem aumentado gradualmente o consumo mundial de cimento e aço, materiais cuja produção está associada ao lançamento de enormes quantidades de CO₂ na atmosfera. Já que a aplicação de concretos de elevadas resistências resulta em pilares mais esbeltos, o que culmina em um menor consumo de concreto, há a possibilidade de um menor consumo de cimento por elemento estrutural, mesmo que o consumo de cimento/m³ de concreto aumente conforme se dá o incremento na resistência do concreto. O mesmo pode ocorrer com o consumo de aço em estruturas em função do incremento de resistência à compressão no concreto.

3 – OBJETIVO

Constituiu-se como objetivo do presente trabalho avaliar impactos econômicos e ambientais devido ao aumento da resistência à compressão do concreto no dimensionamento e execução de pilares submetidos a pequenas cargas de compressão em edificações residenciais ou comerciais.

4 – LIMITES DO ESTUDO

O estudo se limita à avaliação dos concretos com resistência à compressão classificados no Grupo 1, conforme a ABNT NBR 8953:2011, sendo composto pelos concretos C20, C25, C30, C35, C40, C45 e C50, uma vez que a ABNT NBR 6118:2007 restringe o dimensionamento para estruturas com concretos de resistência superior a 50 MPa (C50).

5 – MÉTODO

Para a elaboração do presente estudo, procedeu-se às seguintes etapas metodológicas:

- Dimensionamento de um pilar com altura fixa de 3,20 m e seção quadrada variável, para as seguintes classes de resistência à compressão do concreto: C20, C25, C30, C35, C40, C45 e C50, sendo submetido à carga de 1000 kN.
- Avaliação da capacidade resistente da seção transversal do pilar baseada nas recomendações da ABNT NBR 6118:2007 e com a utilização do programa computacional *Oblíqua 1.0* (OLIVEIRA *et al.*, 2000).
- Levantamento dos custos por m³ de concreto e do consumo de cimento por m³ para cada uma das classes de resistência especificadas junto ao setor comercial e ao laboratório de empresa idônea fornecedora de concreto;
- Levantamento dos quantitativos de insumos necessários à produção desse pilar a partir das dimensões obtidas por meio do cálculo estrutural;
- Levantamento dos custos unitários de material e mão de obra, praticados na cidade de Maringá, PR, necessários à produção desses pilares;
- Estruturação das composições para obtenção dos custos parciais dos materiais e mão de obra de cada etapa referente à produção dos pilares (fôrmas, aço e concreto);
- Levantamento do consumo de cimento/pilar fazendo uso dos dados de consumo de concreto/pilar e do consumo de cimento/m³ de concreto, em função das diversas classes de resistência;
- Levantamento das taxas de emissão de CO₂ associadas ao consumo de cimento e ao consumo de aço em cada pilar dimensionado;
- Comparação dos resultados de custos de execução obtidos para os diversos pilares em função da classe de resistência do concreto;

- Comparação dos resultados de consumo de cimento/pilar obtidos para os diversos pilares em função da classe de resistência do concreto;
- Comparação dos resultados de emissão de CO₂ associados à produção dos diversos pilares no que se refere ao cimento e ao aço em função da classe de resistência do concreto.

6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os critérios de dimensionamento para o elemento estrutural, as dimensões e armaduras obtidas a partir do dimensionamento para cada um dos pilares, os custos envolvendo o consumo de aço, concreto e formas, avaliação dos custos totais de produção de cada pilar, avaliação do consumo de cimento por elemento estrutural e avaliação das emissões de CO₂ associadas à produção de cimento e aço.

6.1 Critérios de dimensionamento do elemento estrutural

Os critérios de dimensionamento para os pilares do presente estudo seguem as prerrogativas dispostas pela ABNT NBR 6118:2007. Admitiu-se, para tanto, classe de agressividade ambiental II (moderada), a qual corresponde a um cobrimento de 30 mm para pilares e f_{ck} maior ou igual a 25 MPa, conforme exigido por essa norma. Mesmo a resistência do concreto sendo limitada a 25 MPa, no presente estudo, foram realizados os cálculos também para pilar com concreto de f_{ck} igual a 20 MPa por critérios de análise e comparação de valores, sendo, desta forma, um cálculo para referência.

Neste trabalho procurou-se trabalhar com pilares curtos ($\lambda \leq \lambda_1$), uma vez que seu cálculo é mais simplificado e os momentos de primeira ordem são significativamente maiores que os de segunda ordem, conforme destaca a ABNT NBR 6118:2007. A partir do pilar dimensionado com concreto C35 foram obtidos pilares medianamente esbeltos ($\lambda \leq 90$) devido ao aumento da resistência do concreto e consequente redução das dimensões dos pilares, sendo, nestes casos, necessário considerar os efeitos de segunda ordem para estes pilares, adotando, para isso, o método do pilar padrão com rigidez κ aproximada.

Em posse das solicitações foi utilizado o programa *Oblíqua* versão 1.0, desenvolvido por Oliveira *et al.* (2000) para o dimensionamento da armadura e verificação da segurança do elemento estrutural. Os resultados desse dimensionamento são apresentados na seção 6.2.

É válido salientar que todas as considerações tomadas para o cálculo dos pilares são fruto de um estudo generalista, sendo, assim, desconsiderada a presença de momentos maiores que os mínimos, bem como a influência da estabilidade global da edificação na determinação das solicitações ou das dimensões das peças.

6.2 Resultados do dimensionamento do pilar

A partir do dimensionamento dos pilares de seção quadrada, com lado igual a "b", com carga de 1.000 kN, para cada uma das classes de concreto consideradas, foram obtidos os seguintes resultados quanto à quantidade e distribuição do aço e da seção de concreto, conforme apresentado na Tabela 1. O arranjo da armadura longitudinal foi fixado para todas as classes de concreto em 4 barras posicionadas nos cantos da seção transversal, conforme apresentado na Figura 1.

Observa-se, na Tabela 1, a relação de ganho de área útil percentual por meio da divisão do valor referente à área da seção transversal do pilar dimensionado para as diversas classes de resistência em relação ao pilar dimensionado com concreto de referência (C25: concreto

especificado para esse pilar no projeto estrutural de referência).

Figura 1 – Detalhe da distribuição da armadura na seção transversal do pilar

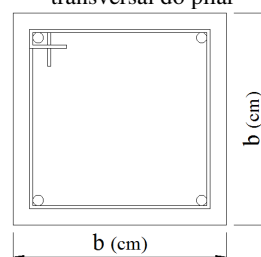


Tabela 1 – Dimensões dos pilares e armaduras longitudinal e transversal

Classe de Resistência do Concreto	Largura "b" do pilar (cm)	Área da seção transversal (cm ²)	Relação A_c/A_{c25}	Armadura Longitudinal	Armadura Transversal (Estribos)
C20	36,0	1296,00	1,19	4Ø12,5mm c = 3,75m	23Ø6,3mm c/15cm c = 1,34m
C25	33,0	1089,00	1,00	4Ø12,5mm c = 3,70m	23Ø6,3mm c/15cm c = 1,22m
C30	32,0	1024,00	0,94	4Ø12,5mm c = 3,65m	23Ø6,3mm c/15cm c = 1,18m
C35	30,0	900,00	0,83	4Ø12,5mm c = 3,60m	23Ø6,3mm c/15cm c = 1,10m
C40	28,0	784,00	0,72	4Ø12,5mm c = 3,55m	23Ø6,3mm c/15cm c = 1,02m
C45	26,0	676,00	0,62	4Ø16mm c = 3,65m	18Ø6,3mm c/19cm c = 0,94m
C50	24,5	600,25	0,55	4Ø20mm c = 3,70m	17Ø6,3mm c/20cm c = 0,88m

6.3 Dados de custo e do consumo de cimento por m³ de concreto

Os custos por m³ de concreto (R\$/m³) e o consumo de cimento por m³ de concreto (kg/m³), para cada uma das classes de resistência especificadas, foram fornecidos pela empresa fornecedora de concreto e são expressos na Tabela 2. É importante mencionar que, apesar da ABNT NBR 12655:2006 destacar que o consumo mínimo de

cimento por m³ de concreto deverá ser igual ou superior a 260 kg/m³ para a classe de agressiva I (fraca), na qual o risco de deterioração da estrutura é considerado insignificante, e 280 kg/m³ para a classe adotada de agressiva II é possível verificar que, segundo o consumo fornecido, este quesito não é obedecido pela classe de concreto C20.

Tabela 2 – Custo e consumo de cimento por m³ de concreto para cada classe de resistência

Classe de Resistência do Concreto	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Custo (R\$/m ³ de concreto)	237,83	253,03	268,23	271,49	287,78	312,00	337,00
Consumo de cimento (kg)/m ³ de concreto	258,00	282,00	301,00	322,00	350,00	365,00	385,00

Nota: Os valores mencionados na tabela se referem a concreto usinado com abatimento 10±2, Brita 0/1, com emprego de cimento CP II-E-32, com mês de referência Março/2014.

6.4 Quantitativos e custos parciais de insumos utilizados na produção dos elementos estruturais

Os quantitativos e custos envolvidos na produção dos elementos estruturais relacionados ao concreto, aço e formas são apresentados nesse tópico.

6.4.1 Custos e insumos envolvendo o concreto

Os valores obtidos do custo do concreto (R\$/m³) junto aos custos de bombeamento (R\$/m³) e mão de obra empreitada (R\$/m³) resultaram no custo do concreto utilizado por m³ para cada uma das classes de resistência, como se relaciona na Tabela 3. A partir das dimensões dos pilares, expressas

na Tabela 1, foi possível determinar o volume de concreto necessário à produção de cada um dos pilares e, por fim, o custo de cada um desses pilares no que se refere ao concreto (material e mão de obra), como consta na Tabela 3. Importa destacar que o custo para mão de obra empreitada de execução de fôrmas, cimbramento, concretagem e desforma é de R\$ 363,00/m³ de concreto lançado, sendo que, deste valor, 10% é destinado ao serviço de concretagem (item 3 na Tabela 3). Observa-se, na Tabela 3, a relação de custos entre o concreto de referência necessário à produção do pilar e as outras classes de resistência do concreto.

Tabela 3 – Levantamento de custos e insumos envolvendo a produção do concreto

Resistência do Concreto	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Custo R\$/m ³ de concreto (1)	237,83	253,03	268,23	271,49	287,78	312,00	337,00
Bombeamento (R\$/m ³) (2)	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
Mão de obra empreitada R\$/m ³ de concreto (3)	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
Custo (com mão de obra) R\$/m³ de concreto (1+2+3) = (4)	312,83	328,03	343,23	346,49	362,78	387,00	412,00
Volume de concreto (m ³) (considerando altura de 3,2 metros) (5)	0,41	0,35	0,33	0,29	0,25	0,22	0,19
Custo (com mão de obra) do concreto utilizado em cada pilar (R\$) (4x5)	128,26	114,81	113,27	100,48	90,70	85,14	78,28
Relação (concreto de referência C25)	1,12	1,00	0,99	0,88	0,79	0,74	0,68

6.4.2 Custos e insumos envolvendo as fôrmas

Considerando as dimensões dos pilares obtidas no cálculo estrutural, calculou-se a área de fôrmas de cada pilar (m²), conforme critério da TCPO 14 (PINI, 2011). Com a composição proposta pela TCPO 14 para fabricação, montagem e desmontagem e com os custos dos produtos, foram obtidos os custos de materiais envolvendo a produção de fôrmas. Os custos com mão de obra para execução dos serviços de fôrmas, cimbramento e desfôrma pós concretagem equivalem a 90% do valor cobrado pela empreiteira, resultando no custo/m³ de concreto lançado destacado em (3). Multiplicando o custo da mão de

obra/m³ de concreto lançado pelo volume de concreto utilizado em cada pilar (5) da Tabela 3, obteve-se o custo da mão de obra empregada na produção de fôrmas de cada pilar (4). Assim, multiplicando-se a área de fôrmas (1) (m²) pelos custos dos materiais empregados nas fôrmas (2) (R\$/m²) e somando aos custos de mão de obra por pilar (R\$/pilar), foram obtidos os custos dos materiais e mão de obra que envolvem a produção de fôrmas (5). Os dados destacados são apresentados na Tabela 4. Observa-se, na Tabela 4, a relação de custos entre as fôrmas necessárias ao pilar do concreto de referência (C25) com as fôrmas dos outros pilares em estudo.

Tabela 4 – Levantamento de custos e insumos envolvendo a produção de fôrmas

Resistência do Concreto	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Área de fôrmas (m ²) (1)	4,61	4,22	4,10	3,84	3,58	3,33	3,14
Custo (materiais) por m ² de forma (R\$/m ²) (2)	50,60	50,60	50,60	50,60	50,60	50,60	50,60
Custo (mão de obra de execução de fôrmas e cimbramento) por m ³ de concreto lançado (R\$/m ³) (3)	360,00	360,00	360,00	360,00	360,00	360,00	360,00
Custo (mão de obra) por pilar em função do volume de concreto (R\$/pilar) (3x5 Tabela 3) = (4)	147,60	126,00	118,80	104,40	90,00	79,20	68,40
Custo (materiais e mão de obra) de fôrmas (R\$/pilar) (1x2+4) = (5)	380,74	339,71	326,04	298,69	271,33	247,58	227,07
Relação (C25)	1,12	1,00	0,96	0,88	0,80	0,73	0,67

Nota: Para a composição do custo dos materiais (2) foram utilizados apenas os materiais que compõem as composições de Fabricação e Montagem das fôrmas dos pilares presentes na TCPO 14 (PINI, 2011), uma vez que, no serviço de desmontagem, não há o emprego de materiais, apenas de mão de obra. Os custos com mão de obra de fabricação, montagem e desmontagem de fôrmas foi considerado empreitado e corresponde ao valor destacado em (3). Os valores utilizados são de março de 2014.

6.4.3 Custos e insumos envolvendo as armaduras

A partir dos dados apresentados na Tabela 1 no que se refere às armaduras dos pilares, foi possível calcular os custos de aço necessários à execução de cada pilar (2), os quais, somados com os gastos de mão de obra (3x1), resultam no custo com mão de obra por pilar no que se refere às armaduras (material e mão de obra), conforme Tabela 5. Ainda, nessa tabela, verifica-se a relação de custos entre a armadura necessária ao pilar do concreto de referência (C25) com a armadura dos outros pilares do estudo.

Tabela 5 – Levantamento de custos e insumos envolvendo a produção de armaduras

Resistência do Concreto	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Consumo de aço/pilar (kg) (1)	22,00	21,13	20,71	20,07	19,42	27,18	40,16
Custo do Aço por pilar (R\$) (2)	74,85	71,78	70,33	68,08	65,82	90,95	133,63
Mão de obra empreitada (R\$/kg aço) (3)	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45
Custo (material e mão de obra) do aço utilizado para cada pilar (R\$) (2+3x1) = (4)	106,75	102,42	100,36	97,17	93,98	130,37	191,87
Relação (C25 – concreto de referência)	1,04	1,00	0,98	0,95	0,92	1,27	1,87

Nota: Os custos utilizados para cada bitola de aço se referem às peças de aço cortado e dobrado em fábrica, sem perdas que onerem a produção do elemento estrutural, sendo estes valores adotados conforme segue: $\phi 6,3$ – R\$3,60/kg; $\phi 12,5$ – R\$3,30/kg; $\phi 16$ – R\$3,30/kg; $\phi 20$ – R\$3,30/kg, valores de referência de Março/2014. Além disso, importa destacar que a conversão do aço de metros para quilogramas se deu com os valores de conversão estabelecidos pela ABNT NBR 7480:2007.

6.5 Avaliação de custos (R\$) e do consumo de cimento (kg) por pilar

Somando-se os valores resultantes das Tabelas 3, 4 e 5, no que se refere à produção do concreto, das fôrmas e da armadura, respectivamente, obtêm-se os custos totais para

execução (material e mão de obra) de cada um dos pilares dimensionados, os quais se encontram relacionados na Tabela 6, junto à relação de custo entre o pilar de referência e os outros pilares em estudo.

Tabela 6 – Custos totais de execução de cada pilar

Classe de Resistência do Concreto	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Custo Total de cada pilar (considerando material e mão-de-obra na produção do concreto, aço e fôrmas) (R\$/pilar)	615,75	556,94	539,67	496,34	456,01	463,09	497,22
Relação (C25 – concreto de referência)	1,11	1,00	0,97	0,89	0,82	0,83	0,89

Além disso, a partir do consumo de cimento por m³ de concreto (kg/m³) observado na Tabela 2 e com o volume de concreto necessário a cada pilar dimensionado (Tabela

3), é possível obter o consumo de cimento por elemento estrutural (kg/pilar), conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Consumo de cimento por pilar (kg/pilar)

Classe de Resistência do Concreto	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Consumo de cimento por pilar (kg/pilar)	105,78	98,70	99,33	93,38	87,50	80,30	73,15
Relação (C25 – concreto de referência)	1,07	1,00	1,01	0,95	0,89	0,81	0,74

Dessa forma, os gráficos que sintetizam as informações de custos (R\$/pilar) e do consumo de cimento

por pilar (kg/pilar) apresentadas nas Tabelas 6 e 7 são expressos na Figura 2 e na Figura 3, respectivamente.

Figura 2 – Custo (R\$/pilar)

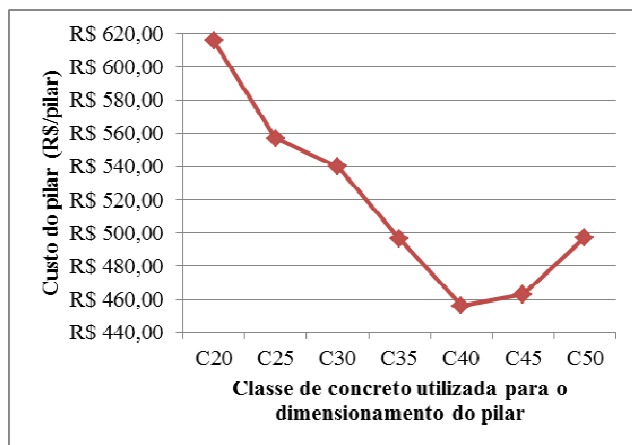
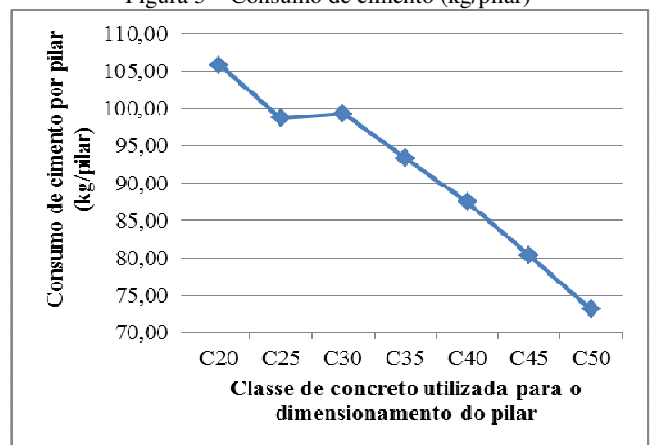


Figura 3 – Consumo de cimento (kg/pilar)



6.6 Avaliação das emissões de CO₂ associadas à produção de cimento e aço por pilar

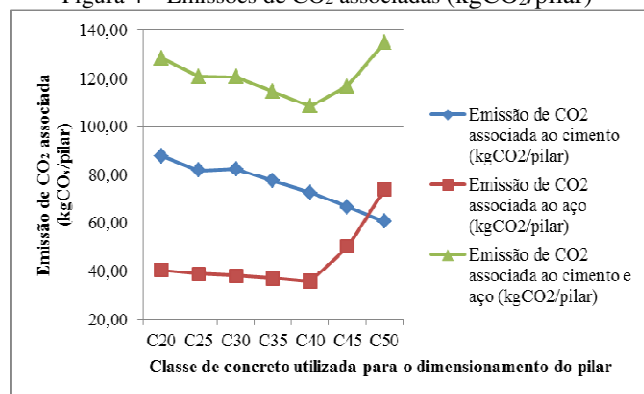
A partir dos consumos de cimento por pilar observados na Tabela 7, multiplicando-os pelo valor médio de 830 kgCO₂/tcimento apontado por Rebmann (2011) e, ainda, a

partir dos consumos de aço para cada pilar verificados na Tabela 5, multiplicando-os por 1845,2 kgCO₂/taço conforme ressalta Costa (2012), obtêm-se a emissão de CO₂ associadas ao cimento e ao aço (kgCO₂/pilar) observadas na Tabela 8 e sintetizadas na Figura 4.

Tabela 8 – Emissões de CO₂ associadas ao cimento e ao aço por pilar (kgCO₂/pilar)

Classe de Resistência do Concreto	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Emissão de CO ₂ associada ao cimento (kgCO ₂ /pilar)	87,80	81,92	82,44	77,51	72,63	66,65	60,71
Emissão de CO ₂ associada ao aço (kgCO ₂ /pilar)	40,59	38,98	38,21	37,03	35,84	50,16	74,11
Emissão de CO ₂ associada ao cimento e aço (kgCO ₂ /pilar)	128,39	120,90	120,65	114,54	108,47	116,81	134,82
Relação (C25 – concreto de referência)	1,06	1,00	1,00	0,95	0,90	0,97	1,12

Figura 4 – Emissões de CO₂ associadas (kgCO₂/pilar)



Foi verificado, com base nos dados apresentados nas Tabela 8 e Figura 4, que o pilar dimensionado com C40 apresentou o menor valor de emissão de CO₂ associada ao cimento e ao aço. Destaca-se também que, apesar de o valor de emissão de CO₂ do pilar dimensionado com C45 ser maior que aquele dimensionado com C40, ainda é menor que o valor relacionado ao C25 (referência).

Ressalta-se, que não foram consideradas no cálculo as emissões de CO₂ associadas aos agregados e aditivos que compõem o concreto, em função de participarem com um pequeno percentual de significância nas emissões totais de CO₂ associados à produção da estrutura em concreto armado.

Acredita-se, ainda, que mesmo não tratando das emissões de CO₂ associadas à produção de compensados plastificados e de madeiras, há diminuição da emissão de CO₂ conforme se aumenta a resistência à compressão do concreto para o pilar, uma vez que há diminuição do consumo de fôrmas.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados, é possível verificar que o custo do concreto e das fôrmas para os pilares em estudo decresce com o aumento da resistência do concreto, como esperado. No entanto, o aço teve um comportamento diferente, sendo que houve pequena diminuição do consumo de aço até o

pilar calculado com concreto C40 e, com os pilares calculados com os concretos C45 e C50, por serem medianamente esbeltos, houve um acréscimo no consumo de aço.

Dessa forma, a partir da soma dos valores, resultando no custo total da produção de cada pilar (Tabela 6), verifica-se que, conforme se dá o aumento de resistência, até o pilar com concreto C40, há um decréscimo do custo/pilar, chegando a um custo até 18% menor que o do pilar dimensionado com concreto de referência, o que evidencia sua viabilidade econômica nesse caso. Ainda, os pilares dimensionados com concreto C45 e C50 apresentaram custo de execução inferior aos pilares dimensionados com os concretos C20, C25 (referência) e C30, o que resulta na premissa de que, para esse caso, ainda é interessante fazer uso do concreto C45 ou do C50 no que se refere ao aspecto econômico, uma vez que o custo de produção é menor e, além disso, há um aumento significativo na durabilidade do elemento estrutural, conforme destaca a literatura.

Com o acréscimo da resistência, a área da seção do pilar é reduzida, conforme se observa na Tabela 1. Assim, ao tomar-se como referência a seção do pilar C25, há uma redução de seção de 28%, 38% e 45% para os pilares dimensionados com C40, C45 e C50, respectivamente, o que resulta em aumento de área útil para o pavimento.

A partir da análise do consumo de cimento por pilar (kg/pilar), conforme se observa na Tabela 7, é possível verificar que, para as condições deste estudo, conforme se aumenta a resistência do concreto há a diminuição do volume de concreto por pilar, resultando na diminuição do consumo de cimento por pilar, o que culmina em resultados satisfatórios no quesito ambiental no que se refere ao consumo de cimento, uma vez que há a diminuição da emissão de CO₂ associadas ao cimento na atmosfera.

No entanto, ainda na avaliação quanto ao aspecto ambiental, os dados apresentados na Tabela 8 evidenciam que, para o pilar dimensionado com C50, a emissão de CO₂ associada ao cimento, que foi a menor observada no estudo, fica encoberta pelo aumento significativo da emissão de CO₂ associada ao aço. Portanto, no que se

refere aos impactos relacionados à emissão de CO₂ associados ao cimento e ao aço, para o presente estudo, os pilares dimensionados com C40, C35 e C45, respectivamente, apresentaram o melhor desempenho ambiental.

Assim sendo, mesmo considerando que o modelo adotado para o dimensionamento dos elementos estruturais interfere diretamente no estudo de viabilidade econômica e de consumo de materiais, com o estudo realizado foi possível verificar que, com a utilização de concretos de elevadas resistências e com aumento do consumo de cimento/m³ de concreto conforme se dá o incremento de resistência, além de todas as características apresentadas pela literatura –dentre estas a alta durabilidade das peças estruturais–, é possível obter pilares mais esbeltos. Com isso, é proporcionado maior aproveitamento dos espaços (principalmente com a preocupação cada vez maior a respeito de vagas de garagens em subsolos de edifícios residenciais e comerciais), com custo inferior ao de uma peça em concreto convencional e, ainda, reduzindo os danos causados ao meio ambiente no que se refere às emissões de CO₂ associadas ao consumo de cimento e aço.

REFERÊNCIAS

- AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. v. 5. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.
- AGOSTINI, L. R. S. **Pilares de concreto de alta resistência**. 1992. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **ABNT NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **ABNT NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificações. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **ABNT NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2011.
- BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará**: estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém por meio do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim. 1998. 188 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- BARBOSA, M. R.; BASTOS, P. S. S. Traços de concreto para obras de pequeno porte. **Concreto e Construção**, v. 36, p. 32-36, 2008.
- BORGES, C. A. M. **O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil**. São Paulo: EPUSP, 2008. 19 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/515).
- COSTA, B. L. D. C. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. 2012. 208 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- EUROCODE 2. **Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings**, Final draft, British Standards Institution, UK, 2004.
- GUIMARÃES, A. E. P. **Análise de pilares de concreto de alta resistência com adição de fibras metálicas submetidos à compressão centrada**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- HEGGER, J. High-strength concrete for a 186 m high office building in Frankfurt, Germany. **Engineering Structures**, v. 18, n. 11, p. 850-854, 1996. [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(95\)00159-X](https://doi.org/10.1016/0141-0296(95)00159-X).
- ISOLDI, R. A.; SATTTLER, M. A.; GUTIERREZ, E. Tecnologias inovadoras visando a sustentabilidade: um estudo sobre inovação, técnica, tecnologia e sustentabilidade em arquitetura e construção. In: Seminário Internacional sobre inovações tecnológicas e sustentabilidade, 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo: FAU/USP, 2006.
- JOHN, V. M.; SJÖSTRÖM, C.; AGOPYAN, V. Durability in the built environment and sustainability in developing countries. In: International Conference on Durability of Building Materials and Components, 9., 2002, Brisbane – 9th DBMC. **Proceedings...** Melbourne: CSIRO, p. 1-7, 2002.
- LEAL, U. Concreto de Auto Desempenho: a construção da torre mais alta do Brasil. **Revista Techne**, São Paulo, n. 82, jan. 2004.
- LIMA, F. B. **Pilares de concreto de alto desempenho: fundamentos e experimentação**. Tese (Doutorado em estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- MENDES, S. E. D. S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. 2002. 163p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.
- OLIVEIRA, M. F. F. D.; ZANDONÁ, C. A. W.; MARINO, M. A.; SCHEER, S. **Oblíqua 1.0: Flexão Composta**. CESEC: UFPR, Curitiba, 2000. Disponível em: <<http://www.cesec.ufpr.br/concretoarmado/normal2.htm>>. Acesso em: 2 ago. 2012.
- PAIVA, N. M. B. **Pilares de concreto de alta resistência com seção transversal retangular solicitados à**

compressão simples. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

PINI. **TCPO** – Tabela de Composição de Preços para Orçamentos. São Paulo: PINI, 2011.

QUEIROGA, M. V. M. **Análise experimental de pilares de concreto de alto desempenho submetidos à compressão simples.** Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência.** 2011. 213 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SACHS, A. Calor sob controle. **Revista Techne**, São Paulo, n. 190, p. 30-35, jan. 2013.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório anual 2010.** Rio de Janeiro: SNIC, 2010. 118p. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/snic-relatorio2010-11_web.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2012.

STEWART M. G.; WANG X.; NGUYEN M. N. Climate change impact and risks of concrete infrastructure deterioration. **Engineering Structures**, v. 33, n. 4, p. 1326-1337, April, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.01.010>.

TAE, S.; BAEK, C; SHIN, S. Life cycle CO2 evaluation on reinforced concrete structures with high-strength concrete. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 31, n. 3, p. 253-260, April, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2010.07.002>.

TORRICO, F. A. **Análise teórica e experimental do comportamento de modelos de pilares esbeltos de concreto de alta resistência, considerando a ductilidade.** Tese (Doutorado em Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental de pilares de concreto armado de alta resistência sob flexo compressão reta.** 1999. 183 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

WHARTON, A.; PAYNE, D. Promoting innovation in construction SMEs: an EU case study. **Sustainable building and construction**, v. 26, n. 2-3, p. 76-79, apr./sept. 2003.