

# CORRELAÇÃO ENTRE EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> E PARÂMETROS DE PROJETO ESTRUTURAL PARA UM EDIFÍCIO EM CONCRETO ARMADO

Ana Rosa Domingos (Fundação Hermínio Ometto - FHO) E-mail: [anarosadomingos@gmail.com](mailto:anarosadomingos@gmail.com)

Daiane Campiol Mandaio (Fundação Hermínio Ometto - FHO) E-mail: [campiol.d@gmail.com](mailto:campiol.d@gmail.com)

Msc. Gustavo de Miranda Saleme Gidrao (Fundação Hermínio Ometto - FHO) E-mail: [gustavo.gidrao@gmail.com](mailto:gustavo.gidrao@gmail.com)

**Resumo:** A indústria de construção civil tem gerado grande montante de gases de efeito estufa, sendo este setor o responsável por 7% das emissões globais de CO<sub>2</sub>. Dado este contexto, existe a latente necessidade de criar projetos eficientes com menores impactos ambientais. O presente trabalho reporta o estudo paramétrico sobre o impacto ambiental de um edifício em concreto armado usual de 7 andares, sujeito a carregamentos de vento, sobrecarga de utilização e peso próprio, com variações de seção transversal dos pilares e fck (i.e., resistência de compressão característica do concreto). Simulações de grelhas 3D foram feitas no software comercial Eberick, o que permitiu correlacionar o quantitativo de material (i.e., concreto e aço) com a emissão de CO<sub>2</sub> para cada situação de interesse. Verificou-se que existe clara correlação entre o montante de CO<sub>2</sub> emitido à fatores usuais de avaliação da deslocabilidade de estruturas reticuladas usuais (i.e., gama-z < 1,10 e deslocamento de topo). Para o caso estudado, foi obtido um ponto de equilíbrio entre a emissão de CO<sub>2</sub> e deslocabilidade do edifício. A metodologia proposta no presente artigo pode ser utilizada em situações de projeto de edifícios de concreto, objetivando uma configuração sustentável e equilibrada entre deslocabilidade e emissão do CO<sub>2</sub>.

**Palavras-chave:** Emissão de CO<sub>2</sub>, Aquecimento global, Gama-Z.

## CORRELATION BETWEEN CO<sub>2</sub> EMISSION AND DESIGN PARAMETERS FOR A CONCRETE BUILDING

**Abstract:** The civil engineering industry generates a large amount of the greenhouse gases, which is responsible for 7% of the global CO<sub>2</sub> emissions. Given this context, there is a need to predict these environmental impacts. This paper reports the parametric study of evaluation of a 7-story building floor subjected to dead load, wind loading and overload, regarding variations of beam column dimensions and concrete strength. Simulations of 3D elements were done in Eberick software, which allowed to correlate the material quantitative (i.e., concrete and steel amounts) with a CO<sub>2</sub> emission for each situation of interest. Besides, CO<sub>2</sub> emission index was correlated to global design factors (ie gamma-z <1.10 and top displacement). An equilibrium point was obtained between the CO<sub>2</sub> emission and the displacement of the building, attempted the structural safety and sustainability.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> emissions, Global warming, Gama-Z.

### 1. Introdução

O consumo desenfreado de recursos naturais e emissão de gases tóxicos elevam rapidamente a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) (MCTIC, 2013). Desde o período da revolução industrial, a temperatura média mundial já subiu 1°C, valor aparentemente pequeno, mas que gera impactos colossais, como degelo das regiões polares, aumento das marés e desertificação (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2012). Se as emissões de GEE continuarem nessas proporções esse aumento da temperatura poderá variar de 1,4°C a 5,8°C nos próximos anos (IPCC, 2001).

A indústria de construção civil vem utilizando quantidades exorbitantes de matéria prima e gerando, conseqüentemente, CO<sub>2</sub> (MCTIC, 2009). Basicamente, todos os processos utilizados nessa indústria têm um alto impacto ambiental, principalmente quando se trata de emissão de gases de efeito estufa, seja através da mineração dos produtos, na produção ou queima desses

materiais até o transporte e manutenção de estruturas (PINTO *et al*, 2009). Segundo uma série de estudos realizados por Presco (1999), aproximadamente 30% das emissões totais de CO<sub>2</sub> na Europa derivam dessa indústria.

As produtoras de cimento utilizam da queima de combustíveis fósseis para efetuar a calcinação do calcário e consequente produção do clínquer, o que produz altos montantes de CO<sub>2</sub> (LIMA, 2010). Portanto, levando em conta que o concreto é o segundo material mais utilizado no mundo, perdendo somente para a água (ABCP, 2013), é vital quantificar e reduzir o consumo excessivo de emissão de gases estufa, sobretudo o CO<sub>2</sub>, estimando este impacto já na fase de projeto, concebendo estruturas que demandem menos matéria prima e continuem eficientes.

Assim, o presente trabalho endereça a investigação do comportamento de emissão de dióxido de carbono frente à parâmetros usuais de deslocabilidade utilizados em cálculo estrutural, tais como o (i) deslocamento de topo e o (ii) valor de estabilidade global:  $\gamma_z$ . Com a estimativa de produção de CO<sub>2</sub> e estes parâmetros de deslocabilidade, é possível analisar quais dimensões das estruturas são mais eficientes e geram o menor impacto ambiental possível. É necessário salientar que a metodologia apresentada no presente artigo poderá ser utilizada com sucesso em outras estruturas reticuladas de concreto armado e protendido.

## 2. Estado da arte

### 2.1 Emissão na produção do concreto armado

É possível quantificar a emissão de CO<sub>2</sub> proveniente da produção de concreto armado compondo a emissão individual de cada material utilizado na mistura. De acordo com John (2000), dos recursos utilizados na construção civil, todos os materiais utilizados na produção de concreto (i.e., areia, brita, cimento, aço e transporte) têm notável contribuição para a emissões de dióxido de carbono.

De acordo com John (2000) o grande “vilão” de emissão de CO<sub>2</sub> na produção do concreto é o cimento, devido ao grande volume utilizado nas peças. De acordo com IPCC (2006), as emissões colossais de CO<sub>2</sub> que são geradas na fabricação do cimento se dão basicamente devido à produção de clínquer, um material granular derivado da queima de calcário, que quando moído e misturado com gesso gera o Cimento Portland Comum, ou se agregado com outros aditivos como, por exemplo, escória de alto forno, é produzido o Cimento Composto.

Ao longo do processo de produção do clínquer, tem-se o calcário (CaCO<sub>3</sub>) que é calcinado, ou seja, aquecido, produzindo cal (CaO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), como é demonstrado na equação 1. A cal que foi produzida pela calcinação, entra em reação com outros minerais que compõem essa matéria-prima – sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – e assim, é obtido o clínquer (COSTA, 2012).



Segundo Costa (2012), a grande quantidade das emissões provenientes do aço vem da transformação do óxido de ferro (minério) em ferro, havendo grande liberação de CO<sub>2</sub>, conforme a Equação 2:



Para os agregados graúdos, não se observa grande liberação de CO<sub>2</sub> em sua produção (NAZARI; SANJAYAN, 2017). Entretanto, é importante salientar que os maiores impactos ambientais causados pela extração desses materiais é a grande degradação do ambiente de onde são retirados, onde há desmatamento das áreas em questão e consequentemente perda da biodiversidade local e assoreamento de rios e lagos. Além disso, os equipamentos utilizados

nesses processos são movidos a diesel, que quando queimado gera grande montante de CO<sub>2</sub> (NAZARI; SANJAYAN, 2017; COSTA, 2012).

## 2.2 Quantificação de emissão

O método de quantificação de gases de efeito estufa adotado no presente artigo foi similar ao adotado por Costa (2012). Assim é possível se utilizar de uma equação proposta pelo autor que “consiste na multiplicação da quantidade de produto utilizado na obra pelo fator de perda e pelo somatório das emissões geradas pelo consumo de energia e pelo transporte” (COSTA, 2012), dada pela Equação 3:

$$Emissões MT_j = QT_j \times FP_j \times FEP_j \quad (Eq. 3)$$

Onde:

$QT_j$  = Quantidade de produto  $j$  necessária na obra, em toneladas;

$FP_j$  = Fator de perda do produto  $j$ , adimensional;

$FEP_j$  = Fator de emissão de CO<sub>2</sub> devido a utilização do produto  $j$  em edificações, em toneladas de CO<sub>2</sub> / tonelada de produto acabado.

Ambas variáveis,  $FP_j$  e  $FEP_j$ , dos produtos que são utilizados na produção de concreto, são dadas pelas Tabela 1 e Tabela 2, respectivamente. Também é necessário salientar que as perdas de transportes foram desprezadas por simplificação. Entretanto, estas emissões são decisivas para a degradação nos ambientes, devendo ser consideradas em estudos posteriores.

Tabela 1 – Indicadores globais de perdas, por materiais, em %

| Identificação | Média | Mínimo |
|---------------|-------|--------|
| Cimento       | 95    | 6      |
| Areia         | 76    | 7      |
| Brita         | 75    | 9      |
| Aço           | 10    | 4      |

Fonte: Adaptado de Costa (2012, p. 74)

Tabela 2 – Fatores de emissão de CO<sub>2</sub>, em tCO<sub>2</sub> / t produto

| Identificação           | Valor                              |
|-------------------------|------------------------------------|
| Cimento                 | 0,652 tCO <sub>2</sub> / t cimento |
| Agregado Miúdo - Areia  | 0,086 tCO <sub>2</sub> / t areia   |
| Agregado Graúdo - Brita | 0,086 tCO <sub>2</sub> / t brita   |
| Aço                     | 1,845 tCO <sub>2</sub> / t aço     |

Fonte: Adaptado de Costa (2012, p. 163)

## 3. Estabilidade global de edifícios

Quando se trata de projetar altos edifícios de concreto armado, a estabilidade global é um importante requisito para manter a segurança e bom funcionamento da estrutura em questão. De acordo com Moncayo (2011), para se estabelecer os parâmetros de estabilidade global deve-se quantificar o grau de não linearidade da estrutura.

De uma maneira geral, é possível conceituar análise linear como sendo o deslocamento resultante proporcional à aplicação de cargas, no entanto essa hipótese difere do que

realmente acontece com uma estrutura de concreto (KIMURA, 2007).

Segundo Kimura (2007), fazendo análises não-lineares estima-se valores e reações muito mais próximas da realidade, sendo possível adotar elementos estruturais mais esbeltos, além de economizar matéria-prima e tempo. Portanto na análise não-linear é visto que as ações verticais e horizontais que são solicitadas simultaneamente na estrutura geram acréscimos de esforços, tensões ou deslocamentos. O comportamento não linear pode ser manifestado por Não Linearidade Física (NLF) e geométrica (NLG) (REAL, 2000). A NLF consiste no comportamento não linear do material, devido à efeitos de fissuração, plasticidade, dano e escoamento das armaduras, fatores que desviam o diagrama de tensão-deformação de uma previsão linear. Por outro lado, a NLG surge da variação geométrica da estrutura causada pelo equilíbrio da mesma na posição deslocada (PINTO, 1997).

Segundo a ABNT NBR 6118:2003, os efeitos de segunda ordem “podem ser desprezados sempre que não representem acréscimo superior a 10% nas reações e nas solicitações relevantes da estrutura” (NBR 6118, 2003, item 15.2, p. 89). Neste caso as estruturas são denominadas de nós fixos e sua estabilidade global é garantida com folga.

Uma das formas de se quantificar o nível de não-linearidade de uma estrutura (e consequente, sua estabilidade global) é segundo o coeficiente  $\gamma_z$ , criado pelos engenheiros brasileiros Franco e Vasconcelos (1991). O método surgiu da necessidade de identificar se uma estrutura é classificada como instável ( $1,2 < \gamma_z \leq 1,3$ ), de nós móveis ( $1,1 < \gamma_z \leq 1,2$ ) ou nós fixos ( $\gamma_z \leq 1,1$ ), sem se efetuar uma análise de não linearidade geométrica de segunda ordem (CARMO, 1995).

Para esse parâmetro foi estabelecido pela ABNT NBR 6118 (2003) valores maiores que 1,00 e menores que 1,30, sendo que as estruturas com  $\gamma_z$  superiores à 1,30 possuem um alto grau de instabilidade (NBR 6118, 2003, item 15.7.2, p. 94). Assim, segundo a NBR 6118 (2003), obtém-se o valor de  $\gamma_z$ , pela seguinte equação:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde,

$\Delta M_{tot,d}$  é a somatória dos produtos de todas as forças verticais que atuam na estrutura, com seus valores de cálculo, pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos da análise de 1ª ordem;

$M_{1,tot,d}$  é o momento de tombamento causado pelas forças horizontais.

É necessário salientar que o presente trabalho focou nos casos de estruturas de nós fixos, onde não existe grande comportamento não linear e comprovada estabilidade, ou seja,  $\gamma_z < 1,1$ .

#### 4. Descrição do estudo de caso

O presente trabalho avalia um edifício composto por 7 andares, com pilares quadrados dispostos ao longo da estrutura, conforme a Figura 1.a e b:

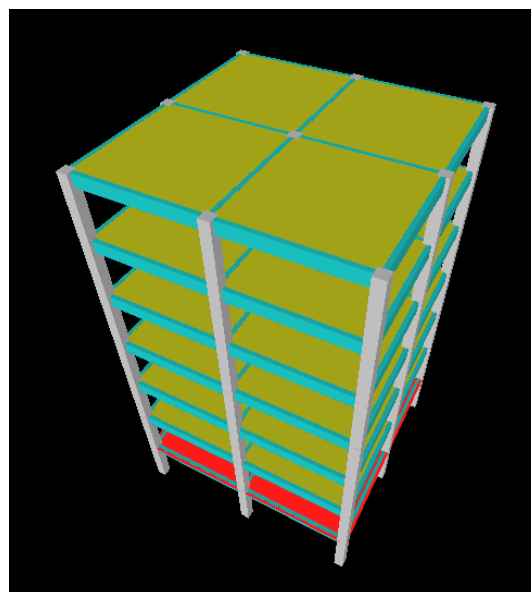
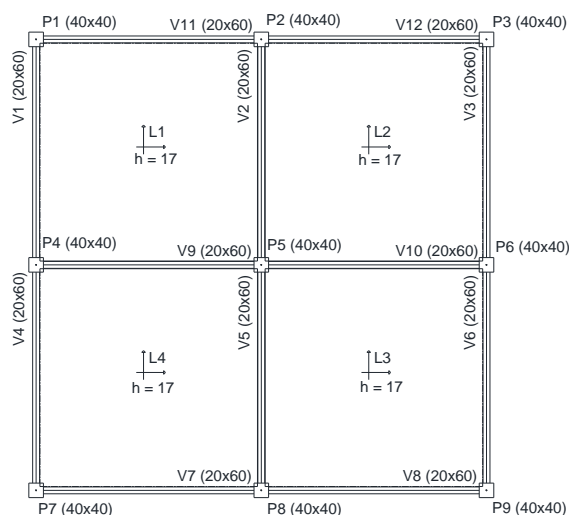


Figura 1 – Edifício estudado. (a) Planta baixa (b) Modelo 3D. Fonte: autor.

Com o auxílio do software Altoqi Eberick, a estrutura foi dimensionada para ações de vento horizontal, sobrecarga de utilização e peso próprio. Os parâmetros de vento são conforme a Tabela 3, calculados conforme as prescrições da ABNT NBR 6123:1988. O peso específico do concreto armado foi estimado como sendo  $25 \text{ kN/m}^3$ , conforme prescrições da ABNT NBR 6120:1980. A sobrecarga foi para todas as lajes de  $2,0 \text{ kN/m}^2$ , caso residencial conforme a ABNT NBR 6120:1980. As lajes tiveram espessura constante de  $17 \text{ cm}$ , vigas constantes de  $20 \times 60 \text{ cm}$ , vãos constantes de  $600 \text{ cm}$  e pilares com dimensões variáveis. Foi gerada uma gelha 3D e calculados os parâmetros de estabilidade global (i.e., gama-z) e deslocamento horizontal de topo na combinação de vento horizontal. Os valores foram analisados de forma a se respeitar o Estado Limite de Serviço (ELS) e o Estado Limite Último (ELU). Os parâmetros de estabilidade global foram obtidos diversas vezes em função da análise paramétrica das dimensões dos pilares e os valores de  $f_{ck}$ . Cabe salientar que o valor de  $\gamma_z$  foi limitado à  $1,10$ , para não induzir efeitos de não linearidade geométrica.

Tabela 3 – Parâmetros de entrada do vento

| Parâmetro                                    | Valor |
|--|-------|
| Fator de rajada – Fr                         | 1,0   |
| Correção da classe da edificação – b         | 0,86  |
| Parâmetro meteorológico – p                  | 0,12  |
| Velocidade básica (m/s) – $V_0$              | 45    |
| Coefficiente de arrasto (direção x e y) - Ca | 1,12  |
| Fator topográfico – S1                       | 1,0   |
| Fator estatístico – S3                       | 1,0   |

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6123:1988

Objetivando a composição de emissões de  $\text{CO}_2$ , é necessário se estabelecer uma correlação entre o traço em massa e o  $f_{ck}$  das estruturas estudadas. Neste sentido, a Tabela 4 apresenta estes valores para concretos usuais de cimento Portland, estimados conforme estudos experimentais de traços apresentados por Gidrão (2015):

Tabela 4 – Traço do concreto

| Fck | Traço do concreto |
|-----|-------------------|
| 50  | 1:2:3:0.4         |
| 35  | 1:2:3:0.5         |
| 20  | 1:2:3:0.7         |

Fonte: Autor

## 5. Resultados

A Tabela 5 apresenta os resultados de deslocamento de topo e gama-z obtidos variando-se as dimensões (50x50cm até 30x30cm) e  $f_{ck}$  (20 MPa até 50 MPa). As colunas com “x” demonstram os casos nos quais se violou os Estados limites de serviço e/ou último, onde foram automaticamente descartados da análise (i.e., casos 9, 12, 13, 14 e 15).

Tabela 5 – Parâmetros de Estabilidade Global

| Caso | $f_{ck}$<br>(MPa) | Dimensões<br>Pilares (cm) | Dimensões<br>Vigas (cm) | Dimensões<br>Laje (cm) | Deslocamento<br>de topo<br>frequente (cm) | $\gamma_z$ | Violação<br>ELS | Violação<br>ELU |
|------|-------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|---|------------|-----------------|-----------------|
| 1    | 50                | 50 x 50                   | 20 x 60                 | 17                     | 0,42                                      | 1,04       |                 |                 |
| 2    | 35                | 50 x 50                   | 20 x 60                 | 17                     | 0,5                                       | 1,04       |                 |                 |
| 3    | 20                | 50 x 50                   | 20 x 60                 | 17                     | 0,68                                      | 1,06       |                 |                 |
| 4    | 50                | 40 x 40                   | 20 x 60                 | 17                     | 0,56                                      | 1,05       |                 |                 |
| 5    | 35                | 40 x 40                   | 20 x 60                 | 17                     | 0,68                                      | 1,06       |                 |                 |
| 6    | 20                | 40 x 40                   | 20 x 60                 | 17                     | 0,91                                      | 1,08       |                 |                 |
| 7    | 50                | 37 x 37                   | 20 x 60                 | 17                     | 0,63                                      | 1,06       |                 |                 |
| 8    | 35                | 37 x 37                   | 20 x 60                 | 17                     | 0,77                                      | 1,07       |                 |                 |
| 9    | 20                | 37 x 37                   | 20 x 60                 | 17                     | 1,04                                      | 1,09       |                 | x               |
| 10   | 50                | 35 x 35                   | 20 x 60                 | 17                     | 0,7                                       | 1,06       |                 |                 |
| 11   | 35                | 35 x 35                   | 20 x 60                 | 17                     | 0,84                                      | 1,07       |                 |                 |
| 12   | 20                | 35 x 35                   | 20 x 60                 | 17                     | 1,14                                      | 1,10       |                 | x               |
| 13   | 50                | 30 x 30                   | 20 x 60                 | 17                     | 0,95                                      | 1,08       |                 | x               |
| 14   | 35                | 30 x 30                   | 20 x 60                 | 17                     | 1,15                                      | 1,10       |                 | x               |
| 15   | 20                | 30 x 30                   | 20 x 60                 | 17                     | 1,58                                      | 1,14       | x               | x               |

Fonte: Autor

Para cada caso de análise da Tabela 5, foram gerados os quantitativos de material necessário apresentados na Tabela 6. Utilizando-se da metodologia de Costa (2012), exposto no item 3.3, para cada caso de interesse foi estimada a taxa de emissão de CO<sub>2</sub> conforme a Tabela 7.

Tabela 6 – Quantitativos de materiais necessários

| Caso | F <sub>ck</sub> (MPa) | Dimensões Pilares (cm) | Cimento (kg) | Areia (kg)  | Brita (kg)  | Aço + 10% (kg) |
|------|-----------------------|------------------------|--------------|-------------|-------------|----------------|
| 1    | 50                    | 50 x 50                | 92887,5      | 185775      | 278662,5    | 16884,9        |
| 2    | 35                    | 50 x 50                | 91458,46154  | 182916,9231 | 274375,3846 | 16810,5        |
| 3    | 20                    | 50 x 50                | 88728,35821  | 177456,7164 | 266185,0746 | 17486,1        |
| 4    | 50                    | 40 x 40                | 86287,5      | 172575      | 258862,5    | 16086,4        |
| 5    | 35                    | 40 x 40                | 84960        | 169920      | 254880      | 15952,9        |
| 6    | 20                    | 40 x 40                | 82423,8806   | 164847,7612 | 247271,6418 | 17648,8        |
| 7    | 50                    | 37 x 37                | 84562,5      | 169125      | 253687,5    | 16008,8        |
| 8    | 35                    | 37 x 37                | 83261,53846  | 166523,0769 | 249784,6154 | 16203,1        |
| 9    | 20                    | 37 x 37                | -            | -           | -           | -              |
| 10   | 50                    | 35 x 35                | 83475        | 166950      | 250425      | 15691          |
| 11   | 35                    | 35 x 35                | 82190,76923  | 164381,5385 | 246572,3077 | 15891,5        |
| 12   | 20                    | 35 x 35                | -            | -           | -           | -              |
| 13   | 50                    | 30 x 30                | -            | -           | -           | -              |
| 14   | 35                    | 30 x 30                | -            | -           | -           | -              |
| 15   | 20                    | 30 x 30                | -            | -           | -           | -              |

Fonte: Autor

Tabela 7 – Toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas por toneladas de produto consumido

| Caso | t CO <sub>2</sub> / t cimento | t CO <sub>2</sub> / t areia | t CO <sub>2</sub> /t brita | t CO <sub>2</sub> / t aço |
|------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 1    | 57,53                         | 12,14                       | 17,97                      | 3,12                      |
| 2    | 56,65                         | 11,96                       | 17,70                      | 3,10                      |
| 3    | 54,96                         | 11,60                       | 17,17                      | 3,23                      |
| 4    | 53,45                         | 11,28                       | 16,70                      | 2,97                      |
| 5    | 52,62                         | 11,11                       | 16,44                      | 2,94                      |
| 6    | 51,05                         | 10,77                       | 15,95                      | 3,26                      |
| 7    | 52,38                         | 11,05                       | 16,36                      | 2,95                      |
| 8    | 51,57                         | 10,88                       | 16,11                      | 2,99                      |
| 10   | 51,70                         | 10,91                       | 16,15                      | 2,89                      |
| 11   | 50,91                         | 10,74                       | 15,90                      | 2,93                      |

Fonte: Autor

O somatório das emissões individuais é apresentado graficamente pela Figura 2.a, b e c, respectivamente para  $f_{ck}$  de 50 MPa, 35 MPa e 20 MPa. Nota-se que o aumento na dimensão dos pilares gera um aumento de até 9 toneladas na emissão de CO<sub>2</sub>, devido ao aumento do consumo de concreto, e conseqüentemente, cimento. A Figura 2.d apresenta o comportamento de emissão de CO<sub>2</sub> em função do  $f_{ck}$ , onde para uma dimensão de pilar fixa em  $b = h = 40$  cm nota-se o aumento de emissão de CO<sub>2</sub> em até 4 toneladas. Este fenômeno ocorre devido ao aumento de consumo de cimento para a produção de concretos com  $f_{ck}$  elevados.

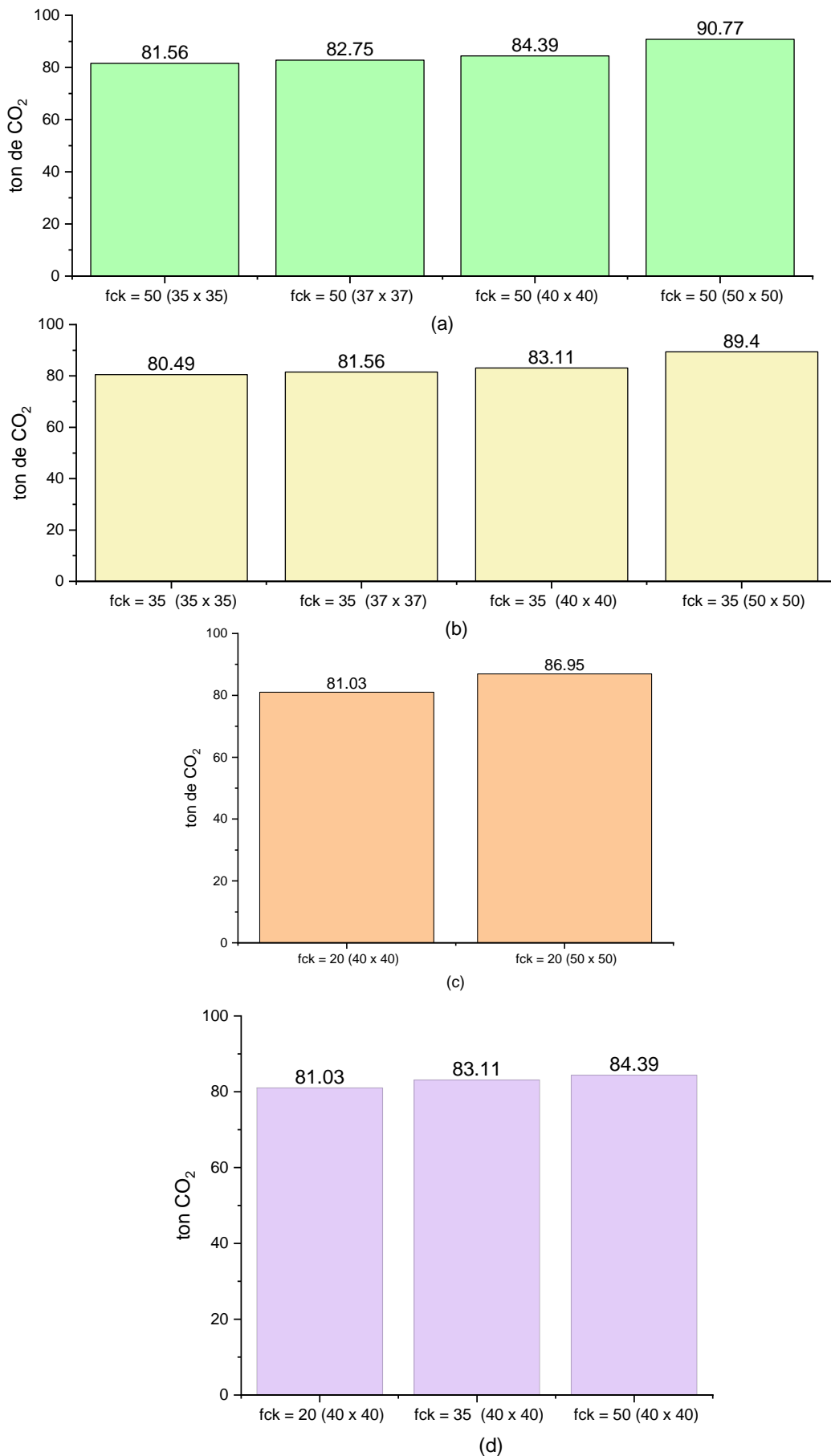


Figura 2 – Toneladas de CO<sub>2</sub> emitida de acordo com a dimensão e  $f_{ck}$ . Fonte: autor



Portanto e de acordo com os resultados apresentados, é óbvio que do ponto de vista de sustentabilidade a configuração ideal seria adotar a dimensão que menos produz CO<sub>2</sub> (i.e., sendo 35 x 35 cm com  $f_{ck}$  35MPa, que produz 80,49 toneladas de gás carbônico).

Entretanto, quando se analisa o comportamento estrutural do edifício do ponto de vista de deslocamento de topo e parâmetro  $\gamma_z$  (Figuras 3 e 4), nota-se sistematicamente um ponto único de intersecção com a curva de consumo de CO<sub>2</sub>, onde se configura um ponto de equilíbrio entre os parâmetros de consumo de CO<sub>2</sub>, deslocabilidade de topo e estabilidade global. Desta forma, as melhores configurações de estruturas com  $f_{ck}$  de 50 e 35 MPa seriam aquelas com dimensões menores que  $b = h = 40$  cm e maiores que  $b = h = 37$  cm, i.e., pontos próximos ao “equilíbrio” entre as duas funções. A redução de dimensão de pilar de 50 cm para 37 cm pouparia a emissão de 6 toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera, havendo um aumento de 33% na deslocabilidade do edifício, estando ainda dentro dos padrões da ABNT NBR 6118:2014 sobre gama-z, deslocabilidade e ELU. Quando a resistência do concreto foi mais baixa (de  $f_{ck} = 20$  MPa), a melhor opção continuou sendo 50 cm de dimensão para o pilar.

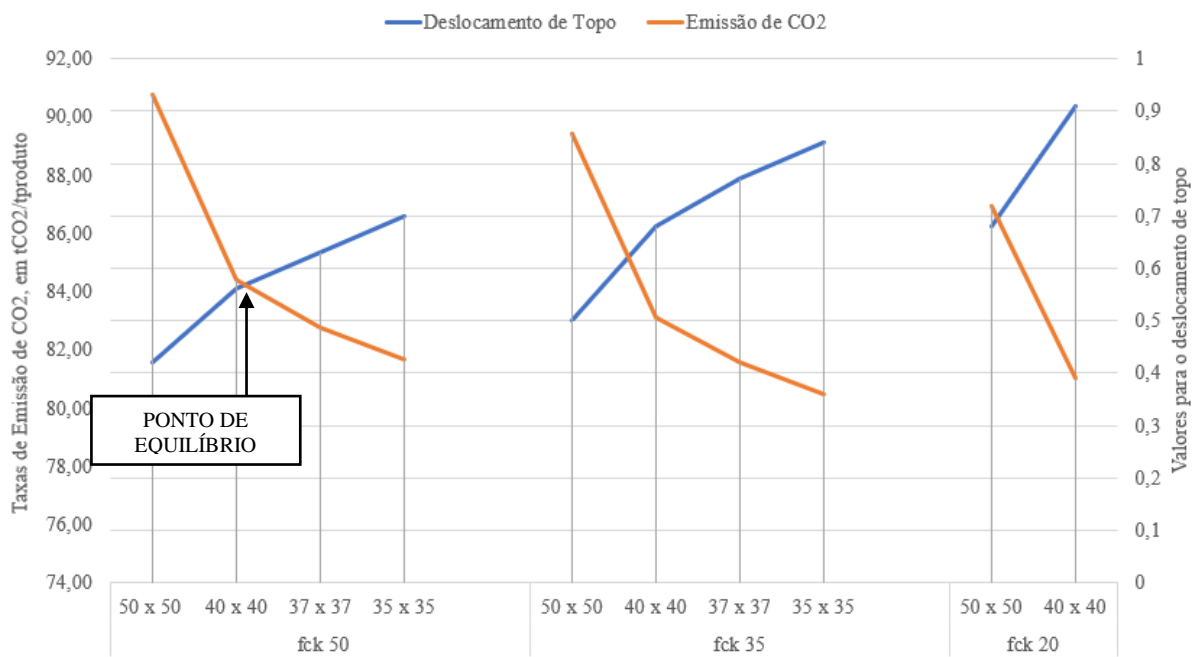


Figura 3 – Deslocamento de topo e emissões de CO<sub>2</sub>. Fonte: autor

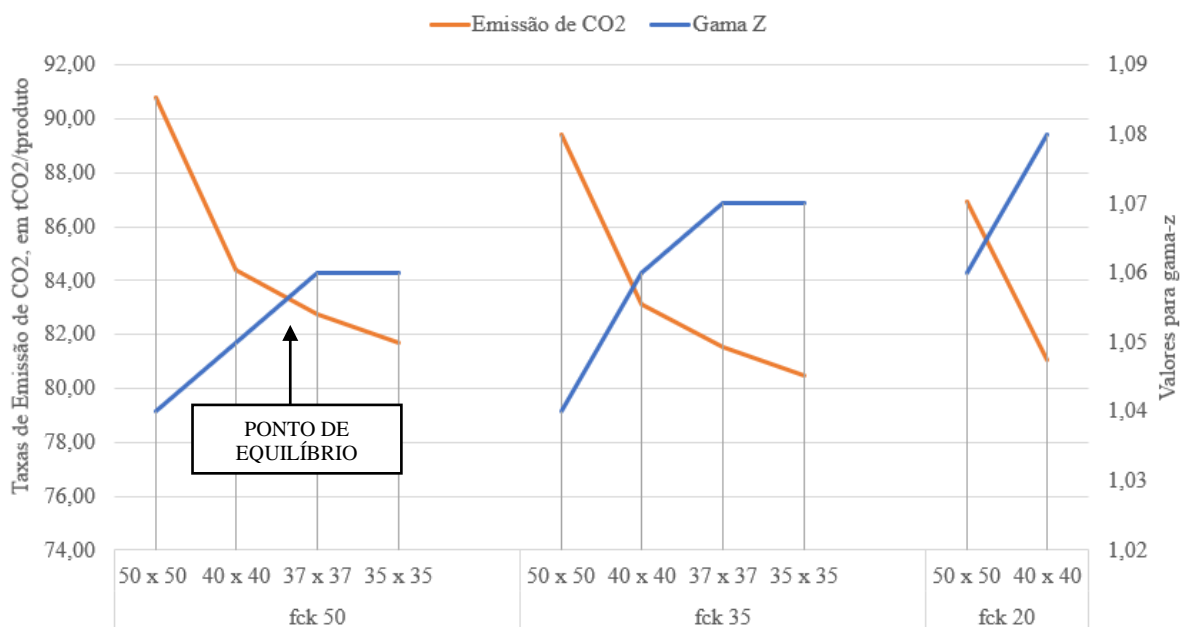


Figura 4 – Gama -z e emissões de CO<sub>2</sub>. Fonte: autor

## 5. Conclusões

O presente artigo desenvolveu um estudo do quantitativo de emissão de gás carbônico na produção de concreto armado de um edifício de 7 andares, e relacionou estas emissões à parâmetros usuais de cálculo de concreto, tais como  $\gamma_z$  e deslocamento de topo. Em vista disso os seguintes pontos podem ser destacados:

- Foi confirmado que o Cimento Portland é o grande responsável pela emissão de CO<sub>2</sub>, uma vez que o mesmo apresenta combinação de grande utilização em volume e grande emissão específica de CO<sub>2</sub>/ton;
- Foi apresentada uma metodologia simples para se estimar as configurações equilibradas de consumo de CO<sub>2</sub> em relação aos parâmetros de cálculo usuais como gama-z e deslocamento de topo
- Ainda que a geometria da edificação seja simples e bem-comportada, esta metodologia pode ser utilizada na fase de projeto e anteprojeto, a fim de se obter as condições equilibradas de emissão de CO<sub>2</sub> garantindo simultaneamente a sustentabilidade, segurança e conforto de edificações;
- Do ponto de vista de deslocamento de topo, os pilares com dimensões menores que 40 x 40 cm e maiores que 37 x 37 cm foram melhores para o caso de  $f_{ck}$  igual a 50 MPa. Já para o caso de  $f_{ck} = 35$  MPa, o caso equilibrado foi ligeiramente maior que 40 cm. Para valores de  $f_{ck} = 20$  MPa os pilares próximos à 50 x 50 cm foram as melhores configurações. Conclusões semelhantes foram observadas para o parâmetro gama-z;
- Ao fim do estudo, foi possível verificar que se esta metodologia fosse adotada, a estrutura se manteria estável quanto aos esforços horizontais e seriam poupadas por volta de 6 toneladas de CO<sub>2</sub> emitidos na atmosfera;
- É importante salientar que nesta análise não foi considerado o quantitativo de fôrmas e transporte, podendo ser abordados em futuros estudos;

Destaca-se que estudos de quantitativos de emissões de CO<sub>2</sub> são recentes e ainda precisam ser melhor desenvolvidos para que tenham maior precisão. Além disso, com o decorrer dos anos e com o avanço da tecnologia dos concretos verdes e soluções alternativas tornam-se cada vez mais eficientes para reduzir consumo de concreto em projetos de engenharia civil. Entretanto, também é possível racionalizar e diminuir o impacto ambiental dos materiais correntes da indústria, sendo possível conceber estruturas mais esbeltas sem diminuir significativamente a estabilidade do edifício, reduzindo o consumo de concreto e a taxa de emissões de gases na atmosfera.

### Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP).** *Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto.* 2013. Disponível em: <<https://www.abcp.org.br/cms/imprensa/noticias/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto/>>. Acesso em: 25 de maio de 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento.* p. 22. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 6120 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.* Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações.* Rio de Janeiro, 1988.
- CARMO, R. M. S.** *Efeitos de segunda ordem em edifícios usuais de concreto armado.* São Carlos, 1995.
- COSTA, B. L. C.** *Quantificação das Emissões de CO<sub>2</sub> geradas na produção de materiais utilizados na construção civil.* Rio de Janeiro, 2012.
- GIDRÃO, G. M. S.** *Propriedades Dinâmicas do Concreto e Relações com sua Macroestrutura.* Dissertação de Mestrado, USP. São Carlos, 2015.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC.** *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme,* Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). 2006.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC.** *Climate Change 2001 - Mitigation. The Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* B. Metz, O. Davidson, R. Swart, and J. Pan (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2001.
- JOHN, V. M.** *Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento.* São Paulo, 2000.
- KIMURA, A.** *Informática Aplicada em Estruturas de Concreto Armado.* São Paulo: Pini, 2007.
- LIMA, A. R.** *Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas.* Tese Doutorado, USP. São Paulo, 2010.
- MCTIC - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E COMUNICAÇÕES.** *Inventário Brasileiro das Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa.* Brasil, 2009.
- MCTIC - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E COMUNICAÇÕES.** *Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil.* Brasil, 2013.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE.** *Mudanças Climáticas.* Brasil. 2012.
- MONCAYO, W. J. Z.** *Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado.* Dissertação de Mestrado, USP. São Carlos, 2011.
- NAZARI, A. & SANJAYAN, J. G.** *Handbook of Low Carbon Concrete.* 2017.
- PINTO, E. P. P.; MOUTINHO, P.; RODRIGUES, L.; FRANÇA, F. G. O.; MOREIRA, P. F. & DIETZSCH, L.** *Perguntas e respostas sobre aquecimento global.* Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia - IPAM, v. 4a ed, Belém/PA, 2009.

**PINTO, R. S.** *Não-Linearidade Física e Geométrica no Projeto De Edifícios Usuais de Concreto Armado.* Dissertação de Mestrado, USP. São Carlos, 1997.

**PRESCO.** *Energy, Environmental and Sustainable Development. European Thematic Network na Pratical Recommendations for Sustanaible Construntion.* EC 5° Framework Programme, 1999.

**REAL, M. V.** *Análise Probabilística de Estruturas de Concreto, Sob Estado Plano de Tensão, Através do Método dos Elementos Finitos.* Tese de Doutorado, UFRS. Porto Alegre, 2000.