

## REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DE UM EDIFÍCIO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO POR ALGORITMOS GENÉTICOS

André de Araújo Vieira<sup>1</sup> & Ana Lúcia H. de C. El Debs<sup>2</sup>

### Resumo

*A sustentabilidade é um tema de atual foco na sociedade, e conseguir mensurá-la é de extrema importância para se conseguir controlá-la. Em relação à estrutura, é possível ter um controle de qualidade maior com o concreto pré-moldado, o qual é produzido como numa linha de montagem e cada etapa é executada com mais cuidado do que outras soluções estruturais presentes na construção civil. Uma das maneiras de se reduzir o impacto ambiental de algo é otimizar os seus componentes e seus processos. Uma ferramenta computacional de otimização que tem se apresentado útil à engenharia de estruturas é o método dos algoritmos genéticos. Assim, o foco deste trabalho é otimizar, com auxílio dos algoritmos genéticos, as estruturas em concreto pré-moldado de edifícios comuns de até 6 pavimentos em relação à sustentabilidade, de modo específico em relação à emissão de CO<sub>2</sub>, que se apresenta em destaque como agente impactante ao ambiente.*

*Palavras-chave: Impacto Ambiental. Concreto Pré-Moldado. Emissão de CO<sub>2</sub>. Otimização. Algoritmos Genéticos.*

## CO<sub>2</sub> EMISSION REDUCTION OF A BUILDING IN PRECAST CONCRETE USING OPTIMIZATION BY GENETIC ALGORITHM

### Abstract

*Sustainability is an actual theme in focus on society and measure it is of extreme importance for control it. Related to the structure, is possible to have a better quality control using precast concrete, which is produced as an assembly line and each stage is executed with more careful than others solutions present on civil construction. One way to reduce the environmental impact of something is optimize its components and its process. One computational tool of optimization that is being useful to structural engineering is the method of genetic algorithms. Thus, the focus of this document is optimize, with genetic algorithms, the precast concrete structures of usual buildings, with up to 6 floors, in relation to sustainability. In a more specific way in relation to a CO<sub>2</sub> emission, which is on emphasis as an environmental impacting agent.*

*Keywords: Sustainability. Precast Concrete. CO<sub>2</sub> Emission. Optimization. Genetic Algorithm.*

---

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, andre.engc@gmail.com

<sup>2</sup> Professora do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, analucia@sc.usp.br

# 1 INTRODUÇÃO

O mundo vem tomando consciência da importância da preservação do meio ambiente já há alguns anos. Ao redor do globo, cada vez mais são expostas tecnologias que são o mínimo prejudiciais ao ambiente o possível, e que não deixam de ser, por causa disso, úteis às necessidades do homem.

Na construção civil esta preocupação já ganha espaço, e meios de manter o ritmo e a qualidade da construção sem prejudicar o ambiente já vêm sendo estudados e aplicados no ramo. Um exemplo disso são as obras que reutilizam resíduos, gerados durante a construção da própria obra, para confecção de novos materiais. Isso torna a obra mais sustentável, como também reduz desperdícios e gera economia de custos.

A execução de uma obra é dividida em diversas partes, e dentre elas encontra-se a etapa de execução da estrutura. Este é o ponto ao qual este artigo se foca. De modo mais específico será dada atenção às estruturas de concreto pré-moldado e, se aprofundando neste tema, serão estudados os edifícios de múltiplos pavimentos em concreto pré-moldado.

Como mencionado, uma das etapas da execução de uma obra é a estrutura. Esta pode ser feita de algumas formas: concreto pré-moldado; concreto moldado no local; estruturas metálicas; estruturas de madeira; estruturas mistas de aço e concreto; etc. Cada uma com suas características que são adequadas a necessidades distintas.

Se o objetivo é aproveitar a melhor performance da estrutura, em diversos aspectos, deve-se escolher aquele tipo que melhor atenda a estes diversos quesitos. A solução estrutural mais utilizada no mundo atualmente é o concreto, por ser mais barata, não exigir mão de obra tão qualificada, poder ser moldado a qualquer forma que se deseje, apresentar boa resistência ao fogo, trabalhar bem em conjunto com o aço, etc.

Adentrando no campo do concreto, encontram-se ao menos dois modos de preparo deste: o concreto moldado no local; e o concreto pré-moldado. Este último apresenta, além das qualidades expostas anteriormente, algumas outras, quando comparado ao concreto moldado no local, a exemplo disso está: melhoria na produtividade da obra; racionalização do canteiro de obras; redução do desperdício, entre outras. Uma qualidade adicional, em relação ao concreto moldado no local, que se pode ter ao utilizar o concreto pré-moldado é a redução do impacto ambiental associada ao uso do concreto como solução.

Para alcançar a sustentabilidade na estrutura, de modo mensurável e que se possa ter controle, é de grande valia que sejam utilizados métodos que permitam este controle. O concreto pré-moldado possui um controle de qualidade maior na sua confecção que o concreto moldado no local, como também é produzido como numa linha de montagem, podendo ser executadas várias peças com as mesmas características. Pode-se até dizer que o concreto pré-moldado é a industrialização do concreto como solução estrutural.

Tirando proveito desta industrialização a que o concreto pré-moldado permite, e do controle de qualidade de execução, podem ser encontrados padrões nas quantidades de materiais utilizados, bem como nas dimensões das peças da obra. Para encontrar estes padrões e permitir que a estrutura trabalhe sob a sua melhor performance, sem que seja prejudicada a funcionalidade estrutural, as peças podem ser otimizadas em diversos aspectos. Um exemplo de otimização é encontrado em Albuquerque (2007), onde um edifício de pavimentos em concreto pré-moldado é otimizado em relação ao custo.

Este trabalho apresenta uma otimização feita no mesmo tipo de edificação que a apresentada em Albuquerque (2007), entretanto tendo como objetivo a sustentabilidade. Para alcançar o ótimo da estrutura em relação à sustentabilidade foi utilizado o método dos algoritmos genéticos, com auxílio da linguagem de programação FORTRAN.

## 2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foi feita uma revisão bibliográfica sobre os temas componentes, para que então pudesse ser feito o código utilizado para otimização de sustentabilidade. O código que foi utilizado para processamento dos exemplos foi o mesmo de Albuquerque (2007), entretanto foram feitas as adaptações necessárias para que o objetivo fosse a sustentabilidade, mais especificamente a emissão de CO<sub>2</sub>, do concreto pré-moldado.

Ao iniciar o processamento de qualquer exemplo no código são requisitados dados de entrada. Dado isto, foram feitas modificações nos dados de entrada para saber as implicações destas variações na emissão de CO<sub>2</sub> da estrutura. À medida que são feitas as variações nos dados de entrada, foram feitas as análises destas alterações.

Ao término foram apresentadas as conclusões e as referências bibliográficas.

## 3 SUSTENTABILIDADE E OTIMIZAÇÃO

A sustentabilidade é, de certo modo, um tema de recente preocupação no mundo, principalmente na construção civil. Pesquisas estão se concentrando cada vez mais neste campo do conhecimento. A preocupação com o desenvolvimento sustentável vem ganhando espaço e se apresenta como um ponto positivo, aos olhos da população, àquelas empresas que adotarem ela na sua política de trabalho. Consequentemente, acaba se tornando, infelizmente, objeto de marketing de outras empresas interessadas apenas em ganhar clientes, fazendo política de 'bom moço'.

Para que o controle sobre os pontos que caracterizam algo como mais sustentável se torne melhor, e se possa distinguir quem de fato está preocupado com o tema, é necessário se quantificar a sustentabilidade, o que vem sendo feito através de pesquisas ao redor do mundo.

Metha e Monteiro (2008) apresentam um gráfico com a previsão da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera ao longo do século 21, bem como da mesma concentração nos séculos passados, Figura 1.

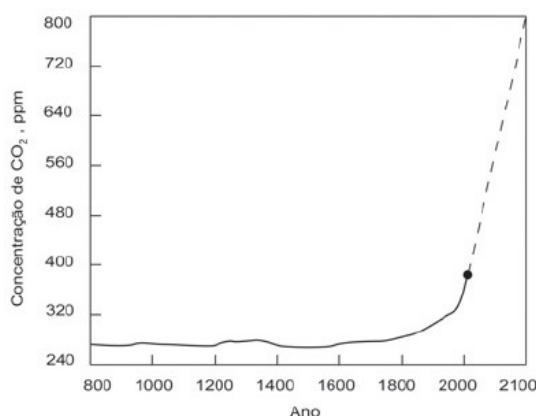


Figura 1 – Concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Fonte: METHA E MONTEIRO (2008).

Na construção civil, um grande responsável por causar danos ao ambiente é o concreto, o qual tem componentes que emitem CO<sub>2</sub> no processo de confecção, além de causar outros tipos de danos. Dentre os componentes está o cimento, que vem sendo estudado com o propósito de se

reduzir este dano ao ambiente. O panorama de utilização do cimento em 2010 é apresentado por Helene (2013) como mostra a figura a seguir.

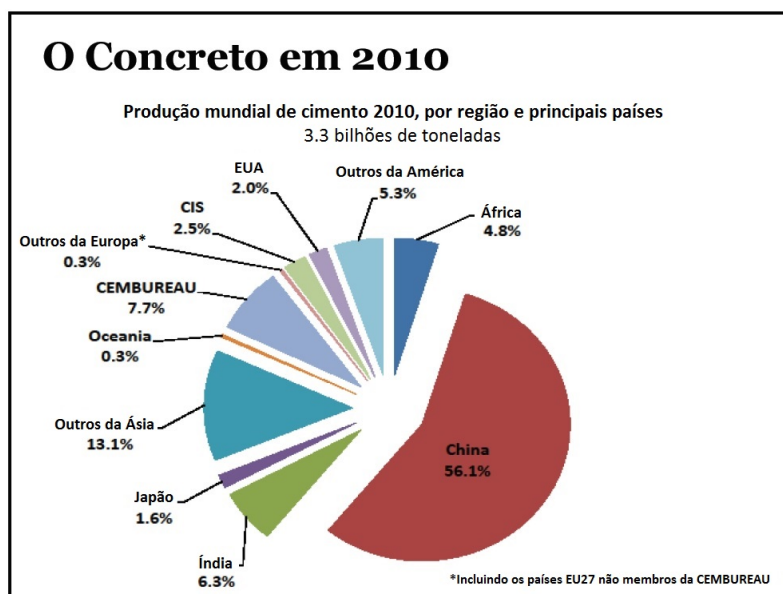


Figura 2 – Produção mundial de cimento. (Adaptada). Fonte: HELENE (2013).

De acordo com Metha e Monteiro (2008), se forem adotadas práticas sustentáveis na indústria da construção civil estima-se que a emissão de CO<sub>2</sub> diminua a partir de 2050, como pode ser visto na Figura 3.

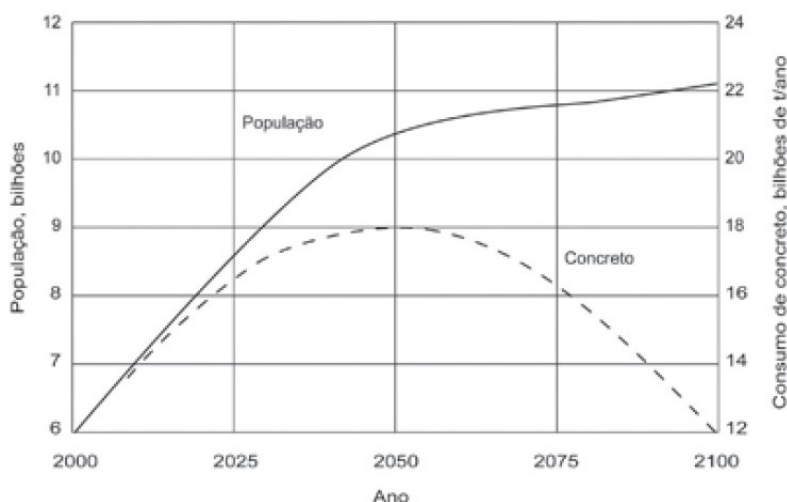


Figura 3 – Previsão da variação da população e do consumo de cimento ao longo dos próximos anos. Fonte: METHA E MONTEIRO (2008).

Yepes et al. (2012) otimizaram o custo e a emissão de CO<sub>2</sub> de uma parede de contenção em concreto armado. Os autores concluíram que o custo e a emissão de CO<sub>2</sub> de uma estrutura estão fortemente relacionados e que as soluções que sejam mais sustentáveis no lugar das mais baratas apresentam um acréscimo de apenas 1,28% no custo da estrutura. Ainda concluíram que otimizar o

custo da estrutura em 1 Euro representa uma redução de 2,28% na emissão de CO<sub>2</sub> total da mesma estrutura.

Na escolha da solução estrutural de um edifício, uma solução que se apresenta adequada para fornecer um maior controle sobre a sustentabilidade é a solução em concreto pré-moldado. Esta solução tem diversas aplicações no ramo da construção civil e é executada com uma mão-de-obra mais qualificada que a solução estrutural em concreto usual, o concreto moldado no local, além de prover outros benefícios para a obra. Um destes benefícios é melhor observado em estruturas com uma padronização dos elementos estruturais. Uma estrutura com uma configuração padronizada permite que as peças sejam executadas como numa linha de montagem, de modo padronizado, e assim reduza o tempo de confecção destas. Estudos em otimização de estruturas tiram proveito desta característica para o desenvolvimento de códigos computacionais que forneçam a melhor configuração estrutural, tendo como foco determinado objetivo.

De acordo com Castilho (2003) atualmente existem muitas pesquisas de otimização, principalmente na área de engenharia de estruturas. Dentre os métodos de otimização, um que tem se destacado na engenharia de estruturas, segundo Albuquerque (2007), é o método dos algoritmos genéticos.

Este método tem se destacado por apresentar alguns benefícios, frente aos demais, que são citados aqui de acordo com Lemonge (1999):

- Este tipo de algoritmo não requer que as funções-objetivo sejam contínuas ou diferenciáveis;
- Em geral, não requerem formulações ou reformulações complexas para os problemas;
- Não necessitam de estudos preliminares para determinar pontos de partida, factíveis ou não, no espaço de busca;
- São de natureza intrinsecamente paralela;
- Permitem alteração da função objetivo sem necessidade de recodificações extensas.

Encontra-se também em Goldberg (1989) algumas características dos algoritmos genéticos que se destacam em relação aos demais métodos de otimização:

- Os AGs trabalham com codificação do conjunto de parâmetros, não com os parâmetros em si;
- Os AGs buscam por uma população de pontos, não um único ponto;
- Os AGs usam a informação da função objetivo, e não derivadas ou outros conhecimentos auxiliares;
- Os AGs utilizam regras de transação probabilísticas, e não determinísticas.

Este é um método categorizado como probabilístico, onde ao final é apresentada uma família de resultados ótimos, não apenas um, como nos métodos determinísticos. Deriva da teoria da evolução de Charles Darwin, e foi desenvolvido por John Holland em 1975. Nele, há uma população de soluções, gerada aleatoriamente, assim como na natureza. Nesta população é feita uma avaliação dos seres que são mais aptos, que se destacam frente aos demais seres. Os indivíduos são selecionados e organizados de acordo com sua aptidão, do mais apto para o menos apto. Então são feitas operações de cruzamento, mutação e elitismo, para criação de uma nova população. O ciclo se repete até um critério de parada estabelecido, e ao final a população é organizada mais uma vez de acordo com a aptidão, e daí é apresentada a saída de dados.

No presente trabalho foi avaliada uma estrutura de um edifício comum, de até 6 pavimentos, em concreto pré-moldado, com o método dos algoritmos genéticos e auxílio da linguagem de programação Fortran. As características do edifício estudado, e do código utilizado são apresentadas adiante e, após, são apresentados os exemplos processados, com as respectivas análises.

## 4 CONSIDERAÇÕES DO CÓDIGO

Albuquerque (2007) fez um estudo dos tipos de soluções estruturais, em concreto pré-moldado, utilizados no mundo, bem como das características mais utilizadas em projetos no Brasil. A conclusão que se chegou para a configuração estrutural adequada para o tipo de obra que se pretendeu avaliar, e que foi a mesma do presente trabalho, foi um sistema estrutural de lajes alveolares apoiadas sobre vigas “T” invertidas, que por sua vez estão apoiadas sobre pilares de seções: 40 m x 40 m; 50 m x 50 m; ou 60 m x 60 m. Além disso, há uma capa de concreto moldado no local, de 5 cm em todo pavimento. As vigas “T” invertidas possuem dentes de 15 cm para cada lado, com a finalidade de apoiar as lajes, com exceção das vigas de borda que têm o dente de um lado só apenas, chamadas de vigas “L”. Foram considerados 32 tipos de lajes, variando o tipo de protensão e altura da laje. As Figuras 4, 5 e 6 servem para elucidar o exposto.

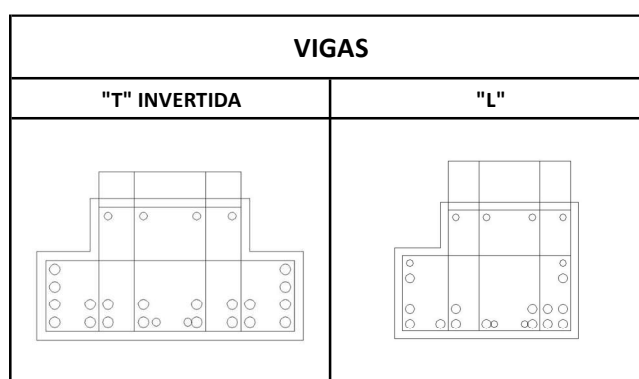


Figura 4 – Viga “T” invertida; Viga “L”. Fonte: ALBUQUERQUE (2007).

| LAJES                                                                                                                                    |                                                                                                                                           |                                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| h = 9 cm                                                                                                                                 | h = 13 cm                                                                                                                                 | h = 17 cm                                                                                                                                  |
| LAJE DE 9cm<br>CONSUMO: 0,0643 m <sup>3</sup> /m<br>  | LAJE DE 13cm<br>CONSUMO: 0,0880 m <sup>3</sup> /m<br> | LAJE DE 17cm<br>CONSUMO: 0,1083 m <sup>3</sup> /m<br> |
| h = 20 cm                                                                                                                                | h = 21 cm                                                                                                                                 | h = 26 cm                                                                                                                                  |
| LAJE DE 20cm<br>CONSUMO: 0,1194 m <sup>3</sup> /m<br> | LAJE DE 21cm<br>CONSUMO: 0,1279 m <sup>3</sup> /m<br> | LAJE DE 26cm<br>CONSUMO: 0,1728 m <sup>3</sup> /m<br> |

Figura 5 – Lajes. Fonte: ALBUQUERQUE (2007).

O momento de cálculo para as lajes foi de  $ql^2/8$ , pois foi adotada a hipótese de lajes simplesmente apoiadas sobre as vigas. Para as vigas foi considerado que estão bi-apoiadas para as cargas antes da solidarização com a capa de concreto, apresentando, portanto, um momento positivo de  $ql^2/8$ . Para a situação após a solidarização com a capa de concreto foi considerado haver continuidade para todo o carregamento. Para esta situação Albuquerque (2007) utilizou o item 8.3 do ACI-318 (1995), o qual recomenda um momento positivo de  $ql^2/16$  e um momento negativo de  $ql^2/10$ .

São utilizados cabos de protensão e armadura passiva na armação positiva e armadura passiva na armação negativa. Para os pilares foram considerados os seguintes consumos médios de aço, Tabela 1.

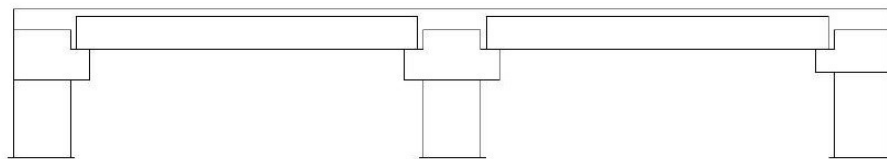


Figura 6 – Lajes alveolares apoiadas sobre vigas “T” invertidas. Fonte: ALBUQUERQUE (2007).

Tabela 1 – Consumo médio de aço do pilar. Fonte: ALBUQUERQUE (2007).

| $f_{ck}$ | kg/m <sup>3</sup> |
|----------|-------------------|
| 35       | 150               |
| 40       | 120               |
| 45       | 90                |
| 50       | 60                |

Avaliando o processo que envolve o concreto pré-moldado como solução, foram analisados os pontos do processo produtivo e execução, de onde podem se extrair variáveis para se compor a função objetivo. Os pontos estudados revelaram que pode ser considerada a emissão de CO<sub>2</sub>: do concreto pré-moldado e do concreto moldado no local; do transporte das peças de concreto pré-moldado; da montagem destas peças; bem como a do aço utilizado nestas peças. Deste modo, foi composta a função objetivo a ser otimizada pelo algoritmo genético da seguinte forma.

$$F_{(Emissão\ de\ CO_2)} = f_{1(Concreto)} + f_{2(Aço)} + f_{3(Transporte)} + f_{4(Montagem)} \quad (1)$$

Para o concreto, foi considerado que 1 Ton. de cimento emite aproximadamente 1 Ton. de CO<sub>2</sub>, de acordo com o *United States Green Concrete Council* (2010), e com Metha e Monteiro (2008). Segundo *American Institute of Steel Construction* (2013), ao produzir o aço estrutural é emitido, a cada tonelada de aço produzido, valores em torno de 0,73 e 0,89 toneladas de CO<sub>2</sub>. Além disso foram consideradas os valores de consumo de cimento encontradas em Damineli (2010), Figura 7.

No transporte de cargas são utilizados basicamente dois tipos de caminhão, o de carreta normal e o de carreta extensiva, e de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética [20--], a emissão de CO<sub>2</sub> pela queima de diesel é de aproximadamente 2,7 kg/L. Contatos foram feitos com concessionárias autorizadas das fabricantes de caminhões Mercedes Benz e Volvo, e encontrou-se a valores médios de consumo de combustível, para as carretas normais completamente cheias, de 2 km/L, já para as carretas extensivas completamente cheias, este valor foi de 1,4 km/L. Para as carretas completamente vazias o consumo foi aproximadamente o mesmo para os dois tipos de carreta, de 3,4 km/L. Foi deixada a ressalva pelas concessionárias que estes valores dependem de muitos fatores e, portanto, podem variar muito, fatores como: condições da pista; habilidade do motorista; peso bruto do veículo; topografia; clima; etc.

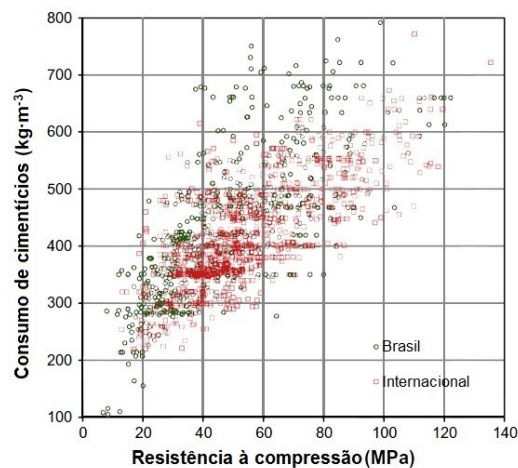


Figura 7 – Consumo de cimento de acordo com a resistência. (Adaptada) Fonte: DAMINELI (2010).

Foi considerado que para a montagem seria utilizada a autogrua com lança telescópica, após contato feito com a PREFAC, fábrica de pré-moldados situada na Bahia. Adotou-se um tipo de autogrua que tem como consumo de combustível diesel 3,73 L/(hora de trabalho), segundo contato feito com o Eng. Thiago Brunos dos Reis, especialista no ramo de movimentação de cargas. Como foi considerada uma jornada de 8 horas diárias de trabalho, a emissão diária ficou em 80,57 kg/dia.

Para finalizar a apresentação do código, foram consideradas penalizações para a função objetivo, que nada mais são do que restrições estruturais aplicadas às soluções propostas. Se forem atendidas todas as restrições estruturais por uma solução qualquer, ela não sofrerá penalização no seu valor, e assim não terá modificação no seu valor de aptidão. À medida que restrições não são atendidas a função objetivo é penalizada, o valor de aptidão do indivíduo é alterado e assim o indivíduo fica mais “fraco” em meio à população de soluções, no sentido de se reproduzir e gerar descendentes. Albuquerque (2007), realizou ao todo 20 restrições para vigas e 17 restrições para lajes, e lá são descritas detalhadamente.

## 5 AVALIAÇÃO DE EXEMPLOS

Foi implementado no código uma rotina para ler arquivos de entrada externos. Deste modo podem ser criados tantos arquivos quanto se deseje, bastando apenas digitar o nome deste arquivo no código quando for solicitado. Caso não tenham sido criados arquivos de entrada, ou se deseje introduzir os dados iniciais manualmente, é possível introduzi-los assim. Estes arquivos de entrada contêm os nomes das variáveis requisitadas pelo código antes do processamento, e a dimensão adotada para esta variável. Como exemplo disso têm-se DFAB10, que trata da variável ‘distância da fábrica à obra’ e tem a dimensão de 10 km.

Foram variados os dados de entrada para ser analisada a influência de cada mudança na emissão de CO<sub>2</sub> total e por m<sup>2</sup> do edifício. No total foram criados 45 arquivos de entrada, o que correspondem a 45 variações nos dados de entrada. Entretanto, para poderem ser melhor analisados os dados de saída, foi criado um edifício padrão, e os demais exemplos foram comparados a este para dar melhor noção às medidas. Os dados requisitados na entrada, como também os valores adotados para cada dado no edifício padrão são:

- NUMPAV (Numero de Pavimentos) – 4 ;
- DMINX (Distância mínima entre pilares na direção x) – 7.5 m;

- DMINY (Distância mínima entre pilares na direção y) – 7.5 m;
- LX (Dimensão do pavimento na direção x) – 30 m;
- LY (Dimensão do pavimento na direção y) – 30 m;
- HMAX (Altura máxima do pavimento – Laje + Viga) – 0,7 m;
- BMAX (Largura máxima da viga) – 0,8 m;
- Q (Sobrecarga) – 0,2 tf/m<sup>2</sup>;
- GPR (Carga permanente) – 0,15 tf/m<sup>2</sup>;
- GPL (Parede sobre laje) – 0,15 tf/m<sup>2</sup>;
- DFAB (Distância da fábrica à obra) – 20 Km;
- NUMIND (Número de indivíduos da população) – 700;
- ELIT (Número de indivíduos para elitismo) – 3;
- MAXGER (Número de gerações ou ciclos desejados) – 3000;
- CRUZ (Taxa de cruzamento) – 80 %;
- PMUT (Taxa de mutação) – 1 %.

Para os exemplos processados no código utilizado foram variados os dados de entrada um a um, e os arquivos criados foram os seguintes. Variando o número de pavimentos: NUMPAV3; NUMPAV4; NUMPAV5; e NUMPAV6. Variando as dimensões mínimas entre pilares: DMINX4DMINY4; DMINX5DMINY4; DMINX8DMINY4; DMINX10DMINY10; DMINX15DMINY8; DMINX15DMINY15. Variando as dimensões máximas do edifício em planta: LX40LY30; LX50LY30; LX60LY30; LX60LY40; LX60LY50; LX60LY60; LX100LY100. Variando as alturas máximas de viga: HMAX50; HMAX60; HMAX80. Variando as larguras máximas das vigas: BMAX40; BMAX50; BMAX90. Variando as cargas atuantes. Q2GPR1GPL1; Q3GPR2GPL2; Q6GPR15GPL15 (Como exemplo, 2 = 0,2 tf/m<sup>2</sup> e 15 = 0,15 tf/m<sup>2</sup>). Variando a distância da fábrica à obra: DFAB5; DFAB10; DFAB50; DFAB100. Variando o número de indivíduos da população: NUMIND100; NUMIND500; NUMIND1000. Variando o número de indivíduos para elitismo: ELIT5; ELIT10. Variando o número máximo de gerações: MAXGER500; MAXGER1000; MAXGER2000; MAXGER10000. Variando a taxa de cruzamento: CRUZ20; CRUZ50; CRUZ90. Variando a taxa de mutação: PMUT5; PMUT10; PMUT30.

Primeiramente foi processado o edifício padrão, NUMPAV4, para dar noção do comportamento da saída de dados. O que pode ser acompanhado na Figura 8.

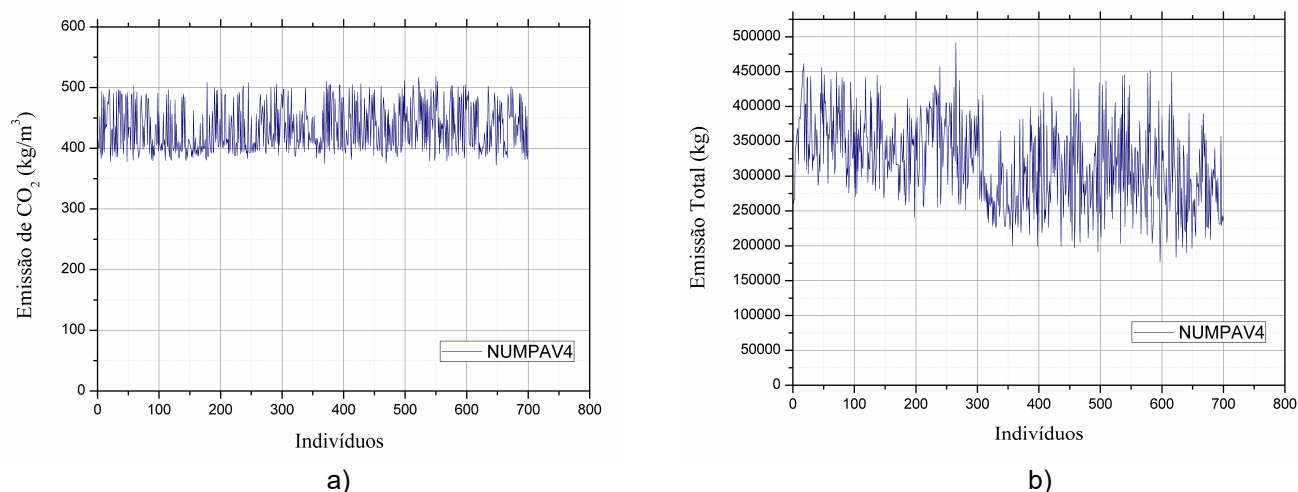


Figura 8 – Edifício padrão: a) Emissão de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de concreto pré-moldado; b) Emissão total.

Na figura acima é possível observar que a cada indivíduo o resultado oscila. Isso se deve ao fato de ser introduzida a aleatoriedade, em primeiro lugar, através da população inicial, gerada aleatoriamente, e depois por causa da mutação imposta a cada geração. Esta oscilação ocorre em torno de um valor médio, que para a emissão de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> é 433 kg/m<sup>3</sup> e para emissão total é de 319.357 kg.

Em seguida foram processados dez exemplos do mesmo arquivo de entrada, para atestar se haveria modificação significativa em torno da média de um processamento para o outro. Este processamento pode ser visto na Figura 9.

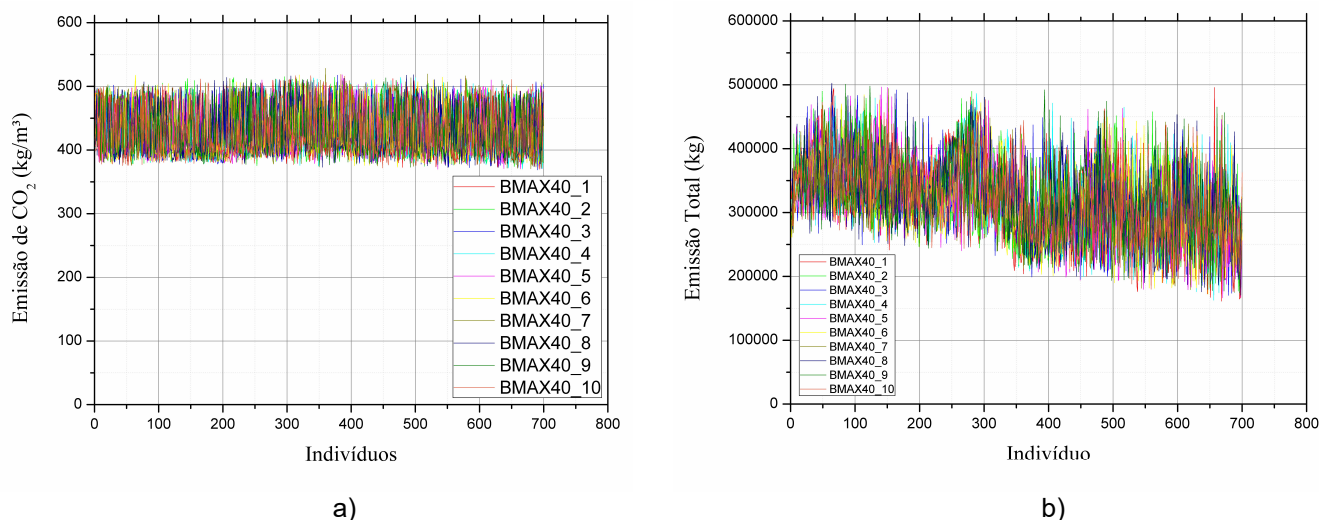


Figura 9 – Processamento do mesmo exemplo: a) Emissão de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de concreto pré-moldado; b) Emissão total.

Como se desejava atestar, não houve variação significativa entre os processamentos, o que indica que, apesar da característica aleatória do algoritmo, os resultados estão convergindo para os mesmos valores, ou seja, o algoritmo está alcançando o ótimo global.

Os gráficos referentes aos processamentos de cada um dos 45 arquivos de entrada citados anteriormente se assemelham esteticamente aos apresentados na Figura 9. Entretanto, cada processamento apresenta uma variação em relação ao edifício padrão da Figura 8. Uma tabela com os resultados de cada processamento e sua variação em relação ao edifício padrão é apresentada a seguir.

Como pode ser observado, cada variação de dado gera uma mudança no valor de emissão total, e de modo não tão significativo na emissão por m<sup>3</sup>. Alguns exemplos apresentam variações maiores do que outros, e isso se deve à natureza da variável. Há variáveis que não são tão influentes ao serem modificadas, do mesmo modo há aquelas que influenciam bastante.

Os dados que se mostraram mais influentes na emissão total de CO<sub>2</sub> foram o número de pavimentos e as dimensões totais da obra. Isso já era de se supor, já que é um acréscimo de área construída e, conseqüentemente, uma acréscimo que não se pode compensar tão facilmente com redução de dimensões de peças ou aumento de taxa de aço, por exemplo. Partindo de um edifício de 30 m x 30 m, por exemplo, ao serem adicionados 10 m em uma das direções, o acréscimo é de aproximadamente 30% de emissão total.

Nos demais exemplos, a variação na emissão total não se mostra tão grande quanto as anteriores, pois uma modificação numa variável acaba sendo compensada por uma alteração numa outra. Isso não quer dizer que as modificações destas variáveis não representem grandes valores. Variando a dimensão mínima entre pilares, o exemplo que mais se distancia do edifício padrão, o faz

em 11%, que no caso representa 38.178 Kg de CO<sub>2</sub>. Ao ser alterada a altura máxima da viga, o valor mais distante do edifício padrão é de aproximadamente 2%. Para a variação na base máxima, este valor é de 5%. Ao serem modificadas as cargas atuantes, o valor mais distante do edifício padrão é de 2%. Para a distância da fábrica à obra esse valor é de 3%; para o número de indivíduos da população, 1%; para o número de indivíduos para elitismo, quase não há alteração, se aproximando de zero; para o número máximo de gerações, este valor é de 2%; para variação na taxa de cruzamento, 5%; e para variação na taxa de mutação, este valor é de no máximo 8%.

Para a emissão de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> os resultados convergiram para o mesmo valor, aproximadamente 430 kg<sub>CO2</sub>/m<sup>3</sup>, o que se apresentou como um ótimo global. Apenas em dois exemplos extremos este valor variou de modo destacável, aqueles nos quais foram variadas as dimensões totais da obra para 60 m x 60 m, e 100 m x 100 m, e onde o valor de emissão por m<sup>3</sup> alterou-se em 5% e 10% respectivamente.

Tabela 2 – Resultado dos processamentos dos arquivos de entrada.

| ARQUIVO DE ENTRADA | Emissão Total (kg) | % EM RELAÇÃO AO NUNPAV4 | DESVIO PADRÃO | Emissão em kg/m <sup>3</sup> | % EM RELAÇÃO AO NUNPAV4 | DESVIO PADRÃO | ARQUIVO DE ENTRADA | Emissão Total (kg) | % EM RELAÇÃO AO NUNPAV4 | DESVIO PADRÃO | Emissão em kg/m <sup>3</sup> | % EM RELAÇÃO AO NUNPAV4 | DESVIO PADRÃO |
|--------------------|--------------------|-------------------------|---------------|------------------------------|-------------------------|---------------|--------------------|--------------------|-------------------------|---------------|------------------------------|-------------------------|---------------|
| NUNPAV4            | 319357             | 100%                    | 19%           | 432,8                        | 100%                    | 9%            | NUNPAV4            | 319357             | 100%                    | 19%           | 432,8                        | 100%                    | 9%            |
| NUNPAV 3           | 243661             | 76%                     | 18%           | 432,9                        | 100%                    | 9%            | Q2GPR1GPL1         | 320346             | 100%                    | 19%           | 431,7                        | 100%                    | 9%            |
| NUNPAV 5           | 402664             | 126%                    | 19%           | 429,7                        | 99%                     | 9%            | Q3GPR2GPL2         | 324655             | 102%                    | 19%           | 433,5                        | 100%                    | 9%            |
| NUNPAV 6           | 490461             | 154%                    | 19%           | 432,4                        | 100%                    | 9%            | Q6GPR15GPL15       | 324499             | 102%                    | 19%           | 431,2                        | 100%                    | 9%            |
| DMINX4DMINY4       | 338487             | 106%                    | 22%           | 433,3                        | 100%                    | 9%            | DFAB5              | 317592             | 99%                     | 18%           | 423,9                        | 98%                     | 9%            |
| DMINX5DMINY4       | 338867             | 106%                    | 23%           | 433,7                        | 100%                    | 9%            | DFAB10             | 319913             | 100%                    | 18%           | 428,8                        | 99%                     | 9%            |
| DMINX8DMINY4       | 330138             | 103%                    | 20%           | 432,1                        | 100%                    | 9%            | DFAB50             | 328468             | 103%                    | 18%           | 437,5                        | 101%                    | 9%            |
| DMINX10DMINY10     | 290612             | 91%                     | 19%           | 423,8                        | 98%                     | 9%            | DFAB100            | 332534             | 104%                    | 19%           | 447,5                        | 103%                    | 8%            |
| DMINX15DMINY8      | 302675             | 95%                     | 18%           | 423,9                        | 98%                     | 9%            | NUMIND100          | 317487             | 99%                     | 20%           | 421,7                        | 97%                     | 9%            |
| DMINX15DMINY15     | 283178             | 89%                     | 19%           | 424,6                        | 98%                     | 9%            | NUMIND500          | 323728             | 101%                    | 18%           | 433,5                        | 100%                    | 9%            |
| LX40LY30           | 405366             | 127%                    | 19%           | 428,1                        | 99%                     | 9%            | NUMIND1000         | 321426             | 101%                    | 19%           | 430,7                        | 100%                    | 9%            |
| LX50LY30           | 508452             | 156%                    | 19%           | 430,0                        | 99%                     | 9%            | ELIT5              | 320159             | 100%                    | 19%           | 431,0                        | 100%                    | 9%            |
| LX60LY30           | 615567             | 193%                    | 20%           | 429,7                        | 99%                     | 9%            | ELIT10             | 319029             | 100%                    | 18%           | 427,4                        | 99%                     | 9%            |
| LX60LY40           | 785454             | 246%                    | 19%           | 428,1                        | 99%                     | 9%            | MAXGER500          | 319441             | 100%                    | 19%           | 431,2                        | 100%                    | 9%            |
| LX60LY50           | 996005             | 312%                    | 19%           | 426,5                        | 99%                     | 9%            | MAXGER1000         | 321195             | 101%                    | 20%           | 432,5                        | 100%                    | 9%            |
| LX60LY60           | 1190498            | 373%                    | 19%           | 410,7                        | 95%                     | 9%            | MAXGER2000         | 325428             | 102%                    | 19%           | 430,7                        | 100%                    | 9%            |
| LX100LY100         | 3028992            | 948%                    | 20%           | 391,5                        | 90%                     | 10%           | MAXGER10000        | 323355             | 101%                    | 18%           | 432,4                        | 100%                    | 9%            |
| HMAX50             | 320924             | 100%                    | 19%           | 430,1                        | 99%                     | 9%            | CRUZ20             | 304657             | 95%                     | 20%           | 432,1                        | 100%                    | 9%            |
| HMAX60             | 324928             | 102%                    | 19%           | 431,9                        | 100%                    | 9%            | CRUZ50             | 308969             | 97%                     | 20%           | 429,8                        | 99%                     | 9%            |
| HMAX80             | 323941             | 101%                    | 19%           | 428,3                        | 99%                     | 9%            | CRUZ90             | 318143             | 100%                    | 19%           | 429,1                        | 99%                     | 9%            |
| BMAX40             | 319280             | 100%                    | 19%           | 428,7                        | 99%                     | 9%            | PMUT5              | 310787             | 97%                     | 19%           | 433,1                        | 100%                    | 9%            |
| BMAX50             | 308534             | 97%                     | 19%           | 433,5                        | 100%                    | 9%            | PMUT10             | 299224             | 94%                     | 19%           | 431,0                        | 100%                    | 9%            |
| BMAX90             | 334812             | 105%                    | 19%           | 430,0                        | 99%                     | 9%            | PMUT30             | 295306             | 92%                     | 19%           | 429,8                        | 99%                     | 9%            |

Na saída de dados do programa são apresentadas todas as características estruturais de cada indivíduo (solução) e é possível notar que não existe uma única solução possível, mas sim uma família de resultados com combinações estruturais diversas que permitem ao usuário escolher qual melhor se adequa às suas necessidades. Deste modo, deixa-se ciente aqui que os valores da Tabela 2 são os valores médios dos indivíduos. Na Tabela 3 é apresentada uma parte da saída de dados do programa, com a ressalva que os dados não saem desta forma, mas foram expostos assim para melhor visualização.

Tabela 3 – Dados de saída do edifício padrão NUMPAV4.

| INDIVÍDUO | NumGen | NX | NY | DL | FCK CML | FCK CPM | HL   | LLJ | HV   | BV  | LLV | NA | NB | NPT |
|-----------|--------|----|----|----|---------|---------|------|-----|------|-----|-----|----|----|-----|
| 1         | 30     | 4  | 4  | 1  | 20      | 40      | 0.13 | 7.5 | 0.25 | 0.8 | 7.5 | 14 | 7  | 2   |
| 2         | 30     | 4  | 4  | 0  | 25      | 40      | 0.13 | 7.5 | 0.25 | 0.8 | 7.5 | 16 | 4  | 2   |
| 3         | 30     | 4  | 4  | 0  | 20      | 35      | 0.13 | 7.5 | 0.3  | 0.8 | 7.5 | 17 | 0  | 2   |
| 4         | 30     | 4  | 4  | 1  | 25      | 35      | 0.21 | 7.5 | 0.35 | 0.6 | 7.5 | 16 | 0  | 4   |
| 5         | 30     | 4  | 4  | 1  | 35      | 35      | 0.21 | 7.5 | 0.35 | 0.5 | 7.5 | 8  | 7  | 4   |
| 6         | 30     | 4  | 4  | 0  | 25      | 35      | 0.17 | 7.5 | 0.4  | 0.8 | 7.5 | 10 | 5  | 4   |
| 7         | 30     | 4  | 4  | 1  | 35      | 35      | 0.17 | 7.5 | 0.4  | 0.7 | 7.5 | 12 | 7  | 0   |
| 8         | 30     | 4  | 4  | 0  | 35      | 40      | 0.2  | 7.5 | 0.3  | 0.8 | 7.5 | 10 | 7  | 0   |
| 9         | 30     | 4  | 4  | 0  | 20      | 40      | 0.21 | 7.5 | 0.4  | 0.7 | 7.5 | 14 | 0  | 4   |
| 10        | 30     | 4  | 4  | 0  | 20      | 50      | 0.2  | 7.5 | 0.25 | 0.8 | 7.5 | 12 | 7  | 4   |
| 11        | 30     | 4  | 4  | 1  | 30      | 45      | 0.21 | 7.5 | 0.25 | 0.8 | 7.5 | 21 | 0  | 0   |
| 12        | 30     | 4  | 3  | 0  | 30      | 45      | 0.2  | 7.5 | 0.35 | 0.8 | 10  | 19 | 10 | 6   |
| 13        | 30     | 4  | 4  | 0  | 25      | 50      | 0.13 | 7.5 | 0.25 | 0.8 | 7.5 | 21 | 4  | 2   |
| 14        | 30     | 4  | 4  | 0  | 25      | 50      | 0.21 | 7.5 | 0.4  | 0.5 | 7.5 | 8  | 8  | 6   |
| 15        | 30     | 4  | 4  | 1  | 30      | 45      | 0.21 | 7.5 | 0.3  | 0.8 | 7.5 | 15 | 14 | 6   |
| 16        | 30     | 4  | 4  | 1  | 35      | 45      | 0.21 | 7.5 | 0.35 | 0.8 | 7.5 | 16 | 8  | 6   |
| 17        | 30     | 4  | 4  | 1  | 30      | 50      | 0.21 | 7.5 | 0.35 | 0.8 | 7.5 | 14 | 6  | 2   |
| 18        | 30     | 4  | 4  | 0  | 20      | 50      | 0.26 | 7.5 | 0.3  | 0.6 | 7.5 | 14 | 6  | 6   |
| 19        | 30     | 4  | 4  | 0  | 30      | 50      | 0.26 | 7.5 | 0.2  | 0.8 | 7.5 | 17 | 8  | 4   |
| 20        | 30     | 4  | 4  | 1  | 20      | 50      | 0.26 | 7.5 | 0.35 | 0.7 | 7.5 | 8  | 8  | 6   |
| 21        | 30     | 4  | 4  | 0  | 20      | 40      | 0.26 | 7.5 | 0.4  | 0.6 | 7.5 | 17 | 0  | 6   |
| 22        | 30     | 4  | 4  | 1  | 25      | 50      | 0.26 | 7.5 | 0.35 | 0.8 | 7.5 | 14 | 7  | 2   |
| 23        | 30     | 4  | 4  | 1  | 30      | 50      | 0.26 | 7.5 | 0.35 | 0.8 | 7.5 | 16 | 6  | 0   |
| 24        | 30     | 4  | 4  | 0  | 35      | 50      | 0.26 | 7.5 | 0.35 | 0.8 | 7.5 | 16 | 8  | 0   |
| 25        | 30     | 4  | 4  | 0  | 25      | 40      | 0.26 | 7.5 | 0.4  | 0.8 | 7.5 | 10 | 6  | 2   |
| 26        | 30     | 4  | 4  | 1  | 20      | 45      | 0.26 | 7.5 | 0.4  | 0.8 | 7.5 | 17 | 4  | 4   |
| 27        | 30     | 4  | 4  | 0  | 35      | 45      | 0.26 | 7.5 | 0.4  | 0.7 | 7.5 | 8  | 6  | 0   |
| 28        | 30     | 4  | 4  | 0  | 35      | 50      | 0.26 | 7.5 | 0.2  | 0.8 | 7.5 | 20 | 2  | 2   |
| 29        | 30     | 4  | 4  | 1  | 35      | 45      | 0.21 | 7.5 | 0.35 | 0.8 | 7.5 | 19 | 6  | 0   |
| 30        | 30     | 4  | 4  | 0  | 25      | 35      | 0.26 | 7.5 | 0.4  | 0.8 | 7.5 | 15 | 10 | 0   |
| 31        | 30     | 4  | 4  | 0  | 35      | 50      | 0.26 | 7.5 | 0.4  | 0.7 | 7.5 | 19 | 4  | 0   |
| 32        | 30     | 4  | 4  | 0  | 30      | 50      | 0.26 | 7.5 | 0.4  | 0.6 | 7.5 | 14 | 8  | 2   |
| 33        | 30     | 4  | 4  | 1  | 35      | 45      | 0.2  | 7.5 | 0.2  | 0.8 | 7.5 | 18 | 6  | 6   |
| 34        | 30     | 4  | 4  | 1  | 30      | 50      | 0.26 | 7.5 | 0.3  | 0.7 | 7.5 | 19 | 4  | 0   |
| 35        | 30     | 4  | 4  | 0  | 35      | 50      | 0.2  | 7.5 | 0.3  | 0.7 | 7.5 | 16 | 12 | 4   |

Na Tabela 3: NumGen, é o número de gerações que se deseja haver; NX e NY, são o número de vãos da obra; DL, é a direção da laje, que pode ser 1 para direção Y, e 0 para a direção X; FCK CML e FCK CPM, são, respectivamente, as resistências à compressão do concreto moldado no local e do concreto pré-moldado; HL e LLJ são a altura e o vão da laje, respectivamente; HV, BV e LLV, são a altura, base a vão da viga, respectivamente; NA, número de cabos de protensão na camada A (mais próxima da base da viga); NB, número de cabos de protensão na camada B (camada seguinte à camada A); NPT, número de barras de aço passivo.

Numa outra parte da saída de dados é possível observar os dados de emissão de CO<sub>2</sub> de cada parcela componente do concreto pré-moldado, bem como das etapas de transporte e montagem deste. Na Tabela 4 é possível averiguar esta saída de dados de alguns dos indivíduos do edifício padrão, NUMPAV4.

Tabela 4 – Dados de saída de emissão do edifício padrão NUMPAV4.

| INDIVIDUAL | EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> |                       |                  |                 |               |                       |                            |             |           | Total (kg) | Emissão kg/m <sup>3</sup> |
|------------|----------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-------------|-----------|------------|---------------------------|
|            | Concreto (kg)              | Aço de Protensão (kg) | Aço Passivo (kg) | Transporte (kg) | Montagem (kg) | %Concreto Pré-Moldado | %Concreto Moldado no Local | %Transporte | %Montagem |            |                           |
| 1          | 175247                     | 11560                 | 5809             | 1630            | 1692          | 78,20                 | 20,10                      | 0,83        | 0,86      | 195938     | 415                       |
| 2          | 178276                     | 11280                 | 5689             | 1630            | 1692          | 77,00                 | 21,40                      | 0,82        | 0,85      | 198571     | 414                       |
| 3          | 175665                     | 10450                 | 9410             | 1730            | 1692          | 78,50                 | 19,80                      | 0,87        | 0,85      | 198952     | 398                       |
| 4          | 212457                     | 9388                  | 8381             | 2180            | 1692          | 80,70                 | 17,60                      | 0,93        | 0,72      | 234093     | 383                       |
| 5          | 214558                     | 10160                 | 8393             | 2100            | 1692          | 77,60                 | 20,80                      | 0,89        | 0,71      | 236899     | 386                       |
| 6          | 214125                     | 9900                  | 10930            | 2180            | 1692          | 80,60                 | 17,80                      | 0,91        | 0,71      | 238825     | 389                       |
| 7          | 216114                     | 10150                 | 8844             | 2100            | 1692          | 77,20                 | 21,20                      | 0,88        | 0,71      | 238897     | 387                       |
| 8          | 229631                     | 9521                  | 5694             | 2140            | 1692          | 77,80                 | 20,70                      | 0,86        | 0,68      | 248676     | 398                       |
| 9          | 234167                     | 8763                  | 5583             | 2340            | 1692          | 83,00                 | 15,40                      | 0,93        | 0,67      | 252549     | 394                       |
| 10         | 246794                     | 10070                 | 6893             | 2040            | 1692          | 83,90                 | 14,70                      | 0,76        | 0,63      | 267489     | 484                       |
| 11         | 245314                     | 11560                 | 5538             | 2130            | 1692          | 80,40                 | 18,20                      | 0,80        | 0,64      | 266230     | 442                       |
| 12         | 253231                     | 12950                 | 6249             | 2210            | 1611          | 81,00                 | 17,60                      | 0,80        | 0,58      | 276255     | 445                       |
| 13         | 208470                     | 12670                 | 5971             | 1630            | 1692          | 80,20                 | 18,40                      | 0,71        | 0,73      | 230430     | 498                       |
| 14         | 261953                     | 9460                  | 4514             | 2170            | 1692          | 84,10                 | 14,50                      | 0,78        | 0,61      | 279791     | 475                       |
| 15         | 254686                     | 13770                 | 6149             | 2230            | 1692          | 81,20                 | 17,40                      | 0,80        | 0,61      | 278528     | 446                       |
| 16         | 267087                     | 11460                 | 6306             | 2330            | 1692          | 80,80                 | 17,80                      | 0,81        | 0,59      | 288871     | 440                       |
| 17         | 285618                     | 10350                 | 6528             | 2330            | 1692          | 82,90                 | 15,80                      | 0,76        | 0,55      | 306517     | 479                       |
| 18         | 299148                     | 10490                 | 6428             | 2560            | 1692          | 86,70                 | 11,90                      | 0,80        | 0,53      | 320324     | 476                       |
| 19         | 303048                     | 12670                 | 5685             | 2500            | 1692          | 83,80                 | 14,90                      | 0,77        | 0,52      | 325591     | 479                       |
| 20         | 316236                     | 8448                  | 5956             | 2720            | 1692          | 87,10                 | 11,60                      | 0,81        | 0,51      | 335056     | 470                       |
| 21         | 265518                     | 10620                 | 6663             | 2730            | 1692          | 85,10                 | 13,30                      | 0,95        | 0,59      | 287224     | 394                       |
| 22         | 327918                     | 10630                 | 6122             | 2800            | 1692          | 86,60                 | 12,10                      | 0,80        | 0,49      | 349162     | 473                       |
| 23         | 333976                     | 10050                 | 5851             | 2800            | 1692          | 85,10                 | 13,70                      | 0,79        | 0,48      | 354371     | 471                       |
| 24         | 337005                     | 12390                 | 5851             | 2800            | 1692          | 84,40                 | 14,30                      | 0,78        | 0,47      | 359740     | 475                       |
| 25         | 284441                     | 10180                 | 6159             | 2900            | 1692          | 84,60                 | 13,90                      | 0,95        | 0,55      | 305373     | 391                       |
| 26         | 308306                     | 10630                 | 6311             | 2900            | 1692          | 86,70                 | 11,90                      | 0,88        | 0,51      | 329840     | 432                       |
| 27         | 311481                     | 9709                  | 5279             | 2820            | 1692          | 83,30                 | 15,30                      | 0,85        | 0,51      | 330977     | 430                       |
| 28         | 306077                     | 11840                 | 5815             | 2500            | 1692          | 83,00                 | 15,70                      | 0,76        | 0,52      | 327920     | 478                       |
| 29         | 267087                     | 10880                 | 5851             | 2330            | 1692          | 80,70                 | 17,90                      | 0,81        | 0,59      | 287837     | 438                       |
| 30         | 270995                     | 12670                 | 9572             | 2900            | 1692          | 84,20                 | 14,20                      | 0,98        | 0,57      | 297829     | 380                       |
| 31         | 337553                     | 10390                 | 8844             | 2820            | 1692          | 84,70                 | 14,10                      | 0,78        | 0,47      | 361290     | 476                       |
| 32         | 324848                     | 10170                 | 8466             | 2730            | 1692          | 85,20                 | 13,50                      | 0,78        | 0,49      | 347900     | 477                       |
| 33         | 230681                     | 10600                 | 9401             | 1940            | 1692          | 78,30                 | 20,20                      | 0,76        | 0,67      | 254311     | 453                       |
| 34         | 315823                     | 12200                 | 8570             | 2630            | 1692          | 84,70                 | 14,00                      | 0,77        | 0,50      | 340915     | 481                       |
| 35         | 261733                     | 12640                 | 8874             | 2070            | 1692          | 81,00                 | 17,70                      | 0,72        | 0,59      | 287005     | 493                       |

Como é possível notar, os resultados de emissão variam entre si. Isso se deve ao fato de o método partir de uma população inicial aleatória, bem como de a aleatoriedade ser imposta ao longo do processamento, através da mutação. Isso permite que o espaço de busca seja maior, mas não pode comprometer a convergência, e no caso é possível ver que, de fato, não está sendo comprometida.

Foi possível com estas análises ver o comportamento da emissão de CO<sub>2</sub> da estrutura de um edifício comum frente a alterações em diversas variáveis envolvidas na solução. Como também foi possível destacar aquelas variáveis que mais influenciam na emissão do edifício. Claro que destaca-se aqui que estes resultados são para um edifício que possua as mesmas características estruturais do edifício estudado aqui.

## 6 CONCLUSÕES

Pôde ser observado que o método dos algoritmos genéticos é uma ferramenta que atende bem à engenharia de estruturas. Apesar de ser um método heurístico, apresentou resultados satisfatórios de emissão de CO<sub>2</sub>. Para atestar o valor encontrado cita-se (WRIGHT, 2011), que fez uma análise com 8 amostras de concreto utilizados usualmente e constatou que a emissão de CO<sub>2</sub>e (CO<sub>2</sub> equivalente) varia entre 215 kg/m<sup>3</sup> a 501,8 kg/m<sup>3</sup>. A emissão encontrada foi de aproximadamente 430 kg/m<sup>3</sup>, portanto encontra-se dentro da média. A medida de Wright (2011) é em CO<sub>2</sub> equivalente, o que significa que são considerados os diversos gases do efeito estufa e comparados com a quantidade de CO<sub>2</sub> que teria o mesmo potencial de aquecimento global. Deste modo os valores achados por Wright (2011) são mais altos do que se fosse considerado apenas o CO<sub>2</sub>, entretanto o

CO<sub>2</sub> é o gás com mais destaque entre os demais no concreto. Isso pode ser visto em (PAYA-ZAFORTEZA et al., 2009), (LOMBERA e APREA, 2010), (*CONSTRUCTION RESEARCH CONGRESS*, 2010), (PONS e WADEL, 2011), entre outros.

Notou-se também que os exemplos que mais influenciam na emissão de CO<sub>2</sub> foram o número de pavimento e as dimensões totais da obra, apresentando aproximadamente 30% de diferença em relação ao edifício padrão utilizado. Dentre os demais, o qual apresentou a maior variação em relação ao edifício padrão foi aquele que tinha a dimensão mínima entre pilares as mais distantes do padrão utilizado, mostrando uma diferença de 11%. As outras variáveis se alteram pouco em relação ao edifício padrão. Isso mostra a importância de cada uma em relação à emissão de CO<sub>2</sub> de um edifício em concreto pré-moldado.

Por fim foi observado que a sustentabilidade é um tema em foco atualmente e que é válido encontrar meios de torná-la mensurável, para que se possa exercer um controle maior sobre a mesma.

## 7 REFERÊNCIAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION **Structural Steel: An Industry Overview**. Chicago, 2013.

ALBUQUERQUE, A. T. DE **Otimização de Pavimentos de Edifícios com Estruturas de Concreto Pré-Moldado Utilizando Algoritmos Genéticos**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

CASTILHO, V. C. **Otimização de Componentes de Concreto Pré-Moldado Protendidos Mediante Algoritmos Genéticos**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

CONSTRUCTION RESEARCH CONGRESS, 2010, [S.l.]: **Carbon Footprints Analysis for Tunnel Construction Processes in the Preplanning Using Collaborative Simulation**. [S.l.]: 2010.

DAMINELLI, B. L. et al. Measuring the Eco-Efficiency of Cement Use. **Journal of Cement and Concrete Composites**. 32, 2010, p. 555-562.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA **Potencial de Redução de Emissões de CO<sub>2</sub> em Projetos de Produção e Uso de Biocombustíveis**. Rio de Janeiro, [20--].

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1989.

HELENE, P. Concreto, Sustentabilidade e Pré-Moldado. In: ENCONTRO NACIONAL DE PROJETO-PESQUISA-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO. 3., 2013, São Carlos. Tópico Temático. São Paulo. 2013.

LEMONGE, A. C. C. **Aplicação de Algoritmos Genéticos em Otimização Estrutural**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 1999.

LOMBERA, J. S; APREA, I. G. **A System Approach to the Environmental Analysis of Industrial Buildings**. Bilbao, n. 45, 2010. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/buildenv](http://www.elsevier.com/locate/buildenv)> Acesso em: 12 nov. 2012.

METHA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. Tradução: Cristina Borba. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

PAYA-ZAFORTEZA, I. et al. **CO<sub>2</sub>-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing**. Valencia, n. 31, mar. 2009. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/engstruct](http://www.elsevier.com/locate/engstruct)> Acesso em: 12 nov. 2012.

PONS, O.; WADEL, G. **Environmental impacts of prefabricated school buildings in Catalonia**. Barcelona, n. 35, 2011. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/habitatint](http://www.elsevier.com/locate/habitatint)> Acesso em: 12 nov. 2012.

UNITED STATES GREEN CONCRETE COUNCIL **The Sustainable Concrete Guide: Strategies and Examples**. 2 ed. [S.I.], 2010.

WRIGHT, M. A. **Carbone Dioxide Equivalent Emissions from the Manufacture of Concrete in South Africa**. Dissertação (Mestrado) – Faculty of Science, University of Witwatersrand, Johannesburg, 2011.

YEPES, V. et al. CO<sub>2</sub>-Optimiation Design of Reinforced Concrete Retaining Walls Based on a VNS-Threshold Acceptance Strategy. **Journal of Computing in Civil Engineering**, [Valência]: 1 mai. 2012. Vol.26, No.3.