

## PROJETO ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO VISANDO A MINIMIZAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL

José Luís Tolotti Fraga (Universidade de Passo Fundo) jltfraga@gmail.com  
Moacir Kripka (Universidade de Passo Fundo) mkripka@upf.br

**Resumo:** Além da já conhecida necessidade da construção civil de projetar estruturas buscando reduzir o custo monetário das estruturas, é crescente a preocupação em minimizar o impacto que estas estruturas provocam no meio ambiente, especialmente as estruturas em concreto armado, fartamente empregadas no Brasil. Neste sentido, o presente trabalho objetiva a aplicação de técnica de otimização para avaliar os custos ambientais gerados por vigas de concreto armado, fornecendo subsídios para o projeto de estruturas de menor impacto ambiental. Através da análise e dimensionamento de vigas de concreto armado com vãos variáveis entre 1,5 e 10 metros, foi avaliado o custo monetário e ambiental necessário para a confecção das mesmas, empregando-se diversos parâmetros para a quantificação do impacto. A otimização das vigas foi realizada através de uma planilha do Microsoft Excel Solver, utilizando o método do Gradiente Reduzido Generalizado. Os estudos realizados indicam, entre outras conclusões, que o uso de concretos de menor resistência reduz o custo ambiental e monetário das vigas, independente do parâmetro considerado.

**Palavras-chave:** Otimização. Excel Solver. Concreto armado. Impacto Ambiental. Custos. Estruturas.

## STRUCTURAL DESIGN OF REINFORCED CONCRETE BEAMS AIMING THE ENVIRONMENTAL IMPACT MINIMIZATION

**Abstract:** Besides the necessity of design structures aiming to reduce their cost, it can be observed a growing concern about their environmental impact, specially reinforced concrete structures, which are widely used in Brazil. Based on this, the objective of this work consists in the application of optimization techniques to assess the environmental costs generated by reinforced concrete beams, aiming the obtention of subsidies to minimize their impact during the design phase. By the analysis and dimensioning of beams with span from 1.5 to 10 meters, both the environmental and monetary costs were evaluated by the usage of several parameters. The optimization was performed through a spreadsheet developed in Microsoft Excel Solver, using the Generalized Reduced Gradient method. The results obtained indicate, among other conclusions, that the utilization of concretes with minor strength reduces environmental and monetary costs, regardless the parameter considered.

**Keywords:** Optimization. Excel Solver. Reinforced Concrete. Environmental Impact. Costs. Structures.

### 1. INTRODUÇÃO

Usualmente, os elementos estruturais são pré-dimensionados através do conhecimento prévio do engenheiro projetista, refinando os resultados obtidos de forma iterativa, por tentativa e erro. No entanto, essa técnica dificilmente possibilita a determinação da melhor relação custo-benefício que essa peça pode atingir. A partir desse aspecto mostra-se útil a implementação de uma ferramenta matemática capaz de otimizar o elemento buscando a maior redução de peso ou o menor custo possível.

A otimização consiste na aplicação de técnicas que visam minimizar ou maximizar uma função, seja ela linear ou não-linear, através de escolhas sistemáticas de variáveis com valores contínuos ou discretos, dentro de um determinado conjunto. Para se aproximar da realidade, os projetos de otimização são submetidos a restrições, também descritas por funções. De acordo com as características tanto das funções como das variáveis do problema, será escolhida a técnica de otimização mais adequada.

De forma geral, um problema de otimização pode ser geralmente formulado como:

$$\text{Minimizar } f(x_i) \quad i = 1, n \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a } g_j(x_i) \leq 0 \quad j = 1, m \quad (2)$$

$$h_k(x_i) = 0 \quad k = 1, l \quad (3)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (4)$$

Onde  $f$  indica a função objetivo e  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  consiste no vetor das variáveis de projeto. Já as demais funções são denominadas restrições do problema (respectivamente, restrições de desigualdade  $g$ , de igualdade  $h$  e restrições laterais, ou canalizadas, com limite inferior  $l$  e limite superior  $u$ ).

Além da já conhecida necessidade de se projetar estruturas de concreto armado visando reduzir seu custo monetário, torna-se cada vez mais necessário minimizar os impactos gerados por esses elementos no meio ambiente, considerando os principais materiais necessários para a sua confecção: o aço, o concreto e a madeira das formas. Uma forma de se avaliar o impacto ambiental gerado por um elemento estrutural consiste no estudo da Análise do Ciclo de Vida (ACV), que contabiliza os impactos ambientais gerados ao longo de toda a vida útil dos materiais, considerando desde a extração da matéria-prima, passando pela fabricação, transporte, uso, manutenção, reaproveitamento (se possível) e deposição final após o término de vida útil.

O projeto de estruturas buscando a minimização do impacto consiste numa preocupação relativamente recente. Nas pesquisas desenvolvidas, as questões ambientais relacionadas aos elementos estruturais aplicados na engenharia civil podem ser estudadas de forma mais geral como foi feito por Kripka et. al. (2014), abordando a minimização do custo ambiental dos elementos estruturais de concreto armado segundo diversos indicadores de impacto, ou por Payá-Zaforteza et. al. (2009) que objetivou a redução da emissão de dióxido de carbono, ou  $CO_2$ , gerado pelas nas estruturas de concreto armado. Essas questões ambientais também podem ser estudadas de forma mais específica focando em apenas um elemento estrutural específico, como fez Yepes et. al. (2012) que estudou a minimização do impacto no projeto de muros de concreto armado, ou Medeiros e Kripka (2012) e Park et. al. (2014), que efetuaram a avaliação da influência dos diversos materiais nas emissões de  $CO_2$  no projeto de pilares de concreto armado.

O presente trabalho tem por objetivo determinar as dimensões ótimas de vigas de concreto armado de modo a encontrar a configuração mais econômica, diminuindo tanto os custos econômicos como os ambientais necessários para se confeccionar o elemento. Diversos critérios podem ser adotados para a determinação do impacto ambiental. Neste estudo, o impacto foi medido pelos seguintes indicadores: dióxido de carbono emitido ( $CO_2$ ), dióxido de carbono equivalente emitido ( $CO_2e$ ), Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential - GWP) e unidades de pontuação ambiental conhecidas como Eco-Indicadores.

Os itens seguintes deste trabalho descrevem a metodologia empregada no estudo, seguindo-se os resultados e as conclusões obtidas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Na formulação do problema, a altura da viga de concreto armado foi definida como sendo a variável a ser otimizada, uma vez que essa dimensão influencia diretamente na quantidade de cada material a ser empregado, o que acaba por determinar os custos econômico e ambiental da peça. Assim, o objetivo consiste em minimizar o custo total dos materiais empregados, quais sejam: o concreto, o aço e as formas. As restrições do problema são relacionadas aos Estados Limites Último e de Serviço, segundo a norma brasileira ABNT NBR6118/07, sendo que a não observação das mesmas pode gerar uma estrutura mais econômica, porém com a sua segurança ou durabilidade comprometidas.

Com o objetivo de determinar os custos econômicos e ambientais foram testadas diferentes vigas biapoiadas de concreto armado, onde foram variados o vão, o carregamento e a resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ). A largura das vigas biapoiadas foi fixada em 0,15 m, com vãos variáveis entre 1,5 e 10 m. Foi adotado aço CA-50 e a resistência do concreto ( $f_{ck}$ ) de 20, 25 e 35 MPa. A viga foi dimensionada para suportar dois tipos de carregamentos, um com carga permanente de 9,86 KN/m e carga acidental de 2 KN/m e outro com carga permanente de 16 KN/m e carga acidental de 7 KN/m, de modo a cobrir faixas usuais de carregamento.

Os custos monetários dos materiais foram retirados do Tabelas de Composição de Preços para Orçamentos (TCPO) 14 desenvolvido pela editora PINI. Já os valores dos custos ambientais de CO<sub>2</sub>, Eco-Indicadores e Potencial de Aquecimento Global (GWP) foram extraídos do trabalho de Medeiros (2012). Esses valores se aproximam mais da realidade europeia, no entanto ainda não se dispõe de nenhum banco de dados com custos ambientais de produção para esses materiais feito para a realidade brasileira.

Os valores utilizados para o custo econômico e ambiental das vigas estão representados na tabela 1, a seguir. Observa-se que o Eco-Indicador não considera o custo ambiental da forma. Isso se deve ao fato da forma não integrar a estrutura ao longo de sua vida útil, sendo empregada apenas na fase de pré-utilização.

Tabela 1 – Custo ambiental e econômico por unidade.

Custo	Aço (kg)	Concreto (m <sup>3</sup> )			Formas (m <sup>2</sup> )
		Fck 20 Mpa	Fck 25 Mpa	Fck 35 Mpa	
R\$	3,49	171,92	188,48	217,49	13,03
CO <sub>2</sub> (kg)	3,02	224,34	224,34	265,28	8,9
GWP (kg CO <sub>2</sub> e)	1,24	256,88	256,88	352,29	2,15
Eco-Indicadores	61,00	39100,00	39100,00	42000,00	-

A otimização das vigas foi realizada através de uma planilha do Microsoft Excel Solver desenvolvida por Pagnussat (2008). O solver possui como objetivo encontrar um valor ideal, seja de máximo ou de mínimo para uma fórmula em uma determinada célula, apresentando a opção de inserir restrições e limites que interferem diretamente no resultado final, essas restrições tornam o modelo proposto mais próximo da realidade. Para isso, utiliza o método de otimização Evolucionário e o método do Gradiente Reduzido Generalizado, ambos para a resolução de problemas de otimização não lineares. Pelas características do problema formulado, o método do Gradiente Reduzido Generalizado foi o adotado,

fornecendo a solução otimizada em um número reduzido de iterações, e independentemente do valor inicial adotado para a variável de projeto.

Originalmente a planilha foi utilizada por Pagnussat com a intenção de otimizar os custos monetários das vigas de concreto armado. No presente estudo, a planilha foi empregada também na minimização dos custos ambientais dos materiais. A figura 1 apresenta uma tela da planilha elaborada, a qual é dividida em duas partes principais, sendo elas a inserção dos dados de entrada e a geração dos resultados, o que possibilita vastas opções de configurações para o dimensionamento das vigas.

DADOS DE ENTRADA			
Altura da Viga ( m )	0,48411382	Fator Segurança conc.	1,4
Largura da Viga ( m )	0,15	Fator Segurança Cargas	1,4
Vão ( m )	5	Fator Segurança Aço	1,15
Fck (Mpa)	20	Limitação da Flecha	Efeitos Visuais
Cobrimento ( m )	0,04	Ângulo Estribos	90
Fyd ( Mpa )	500	Fyd Estribos (Mpa)	600
Es (Mpa)	210000	Carga permanente ( MN )	0,00986
Peso Específico Aço (kg/m3)	7850	Carga Acidental ( MN )	0,002
Preço Concreto / m3	R\$ 171,92	Preço Formas/ (m2)	R\$ 13,03
Preço Aço CA 50 / kg	R\$ 3,49	Preço Aço CA 60/ (kg)	R\$ 4,56
RESULTADOS			
As ( cm <sup>2</sup> )	3,411228287	Taxa de armadura	0,56
A's (cm <sup>2</sup> )	0,63000	Flecha total (mm)	20,00
Bielas Comprimidas	OK!!	Custo do Aço	R\$ 64,74
		Custo da Forma	R\$ 72,85
		Custo do Concreto	R\$ 62,42
Armadura Transversal (cm <sup>2</sup> /m)	0,552604725	valor total da peça	R\$ 200,01

Figura 1 – Planilha Microsoft Excel Solver utilizada como ferramenta de otimização.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 2 apresenta resultados obtidos a partir da análise de uma viga biapoiada para os carregamentos e vãos descritos no item anterior. A primeira diferença significativa notada através da comparação entre o carregamento máximo e mínimo é que a carga máxima apresentou variação na sua altura ótima, conforme era alterado o seu custo entre monetário e ambiental (CO2, GWP e Eco-Indicadores). Devido a essa variação, a relação vão/altura, a taxa de armadura e a flecha também variaram de acordo com o critério de custo utilizado. Porém, ainda para o carregamento máximo, nos testes para fck de 35 MPa a alteração dos custos entre monetários e ambientais não provocou variação da altura ótima, o mesmo se verificando para a carga mínima, sendo que para fck de 20 e 25 MPa também não houve alteração na a altura ótima para a carga mínima. A flecha foi uma restrição ativa para a altura ótima. Em cerca de 97% dos testes foi atingida a flecha limite, determinando a altura mínima admissível.

O aumento do fck nas peças proporcionou uma redução da altura ótima da viga. Essa variação não é linear pois, na comparação entre duas resistências características mais elevadas, a redução da altura ótima é menor que em comparação a duas resistências mais baixas. Em contrapartida, o aumento do fck elevou tanto os custos econômicos como os ambientais.

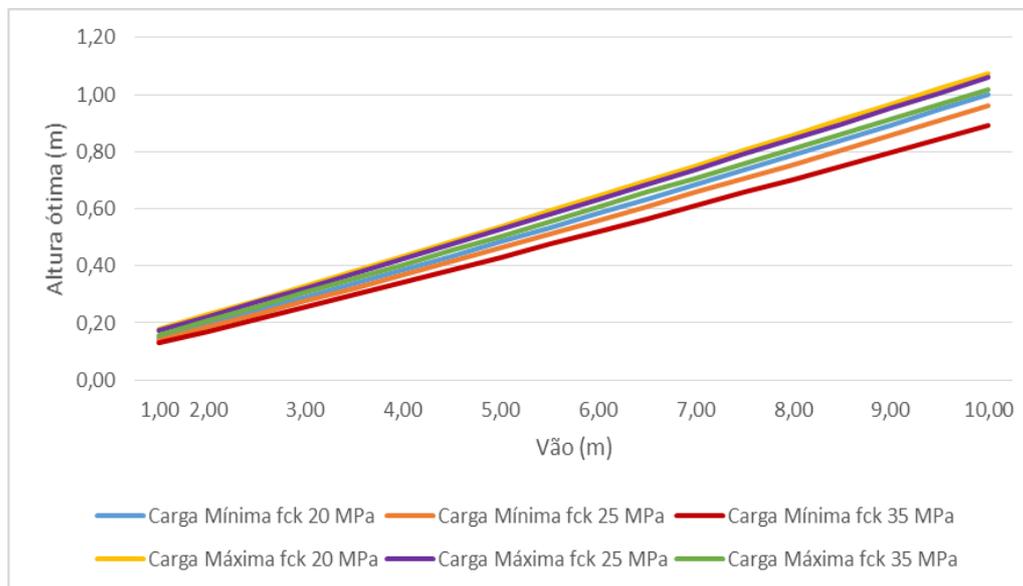


Figura 2 – Altura ótima para carregamentos mínimos e máximos.

A influência do fck mostrou-se significativa na variação do vão/altura nos exemplos testados, conforme pode ser visualizado na Figura 3. Para cargas mínimas, as relações otimizadas assumem uma proporção média de 10,23 para fck de 20 MPa, de 10,70 para o fck de 25 MPa e 11,52 para o fck de 35 MPa. Já nas cargas máximas a influência do fck não foi tão expressiva, pois não apresentou grande variação na relação média de vão/altura, que foi de 9,33 para fck de 20 MPa, de 9,37 para o fck de 25 MPa e 9,83 para o fck de 35 MPa. :

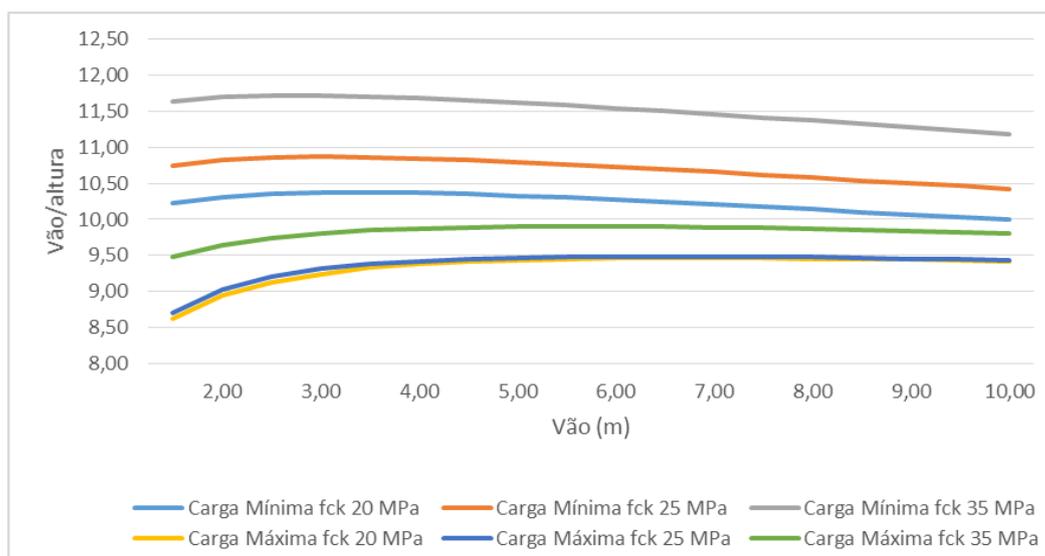


Figura 3 – Relação vão/altura para carregamentos mínimos e máximos.

Para os custos monetários o aço demonstrou ser o material de maior influência na composição do preço total da viga, exceto nos modelos de carga mínima para 20 e 25 MPa,

onde a forma foi o material que teve maior influência no custo. Já o concreto foi o material que apresentou menor porcentagem na composição do custo, com exceção dos casos para 35 MPa (tanto para carga mínima e máxima), onde a forma foi o material menos necessário para a confecção da viga.

Para os custos ambientais considerando os critérios de dióxido de carbono emitido (CO2), dióxido de carbono equivalente emitido (CO2 e), Potencial de Aquecimento Global (GWP) e Eco-Indicadores, o concreto foi o material que teve maior influência no custo ambiental da viga de concreto armado em todos os modelos estudados. Já as formas são o material que apresentam menor fração no custo da peça, lembrando que os Eco-indicadores não consideram o custo ambiental da forma, nesse caso o menor custo passa a ser o aço.

As figuras 4 a 6 ilustram a influência de cada material no custo ambiental e econômico para confecção das vigas de concreto armado, para o fck de 20, 25 e 35 MP, respectivamente.

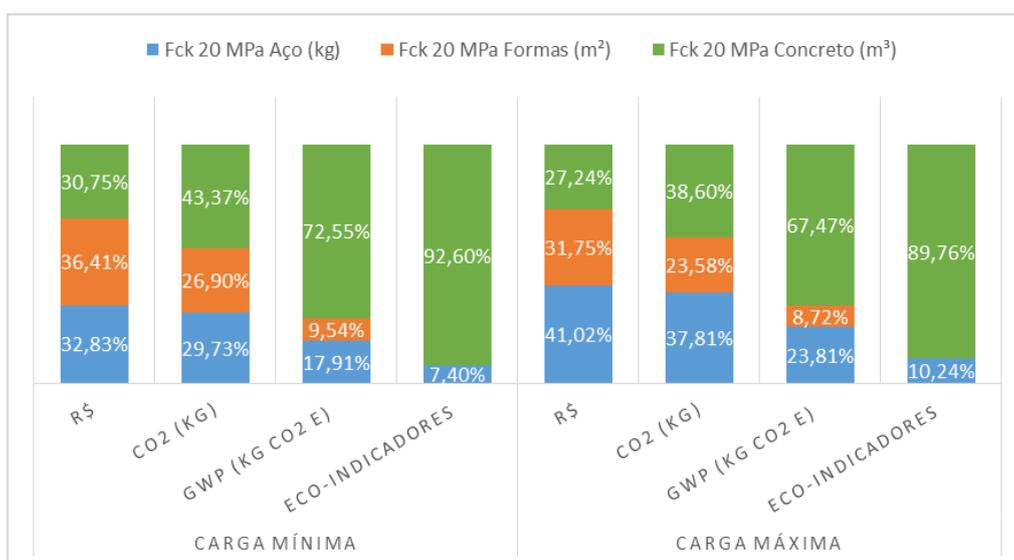


Figura 4 – Influencia do material no custo ambiental e econômico para confecção das vigas de concreto armado para o Fck de 20 MPa.

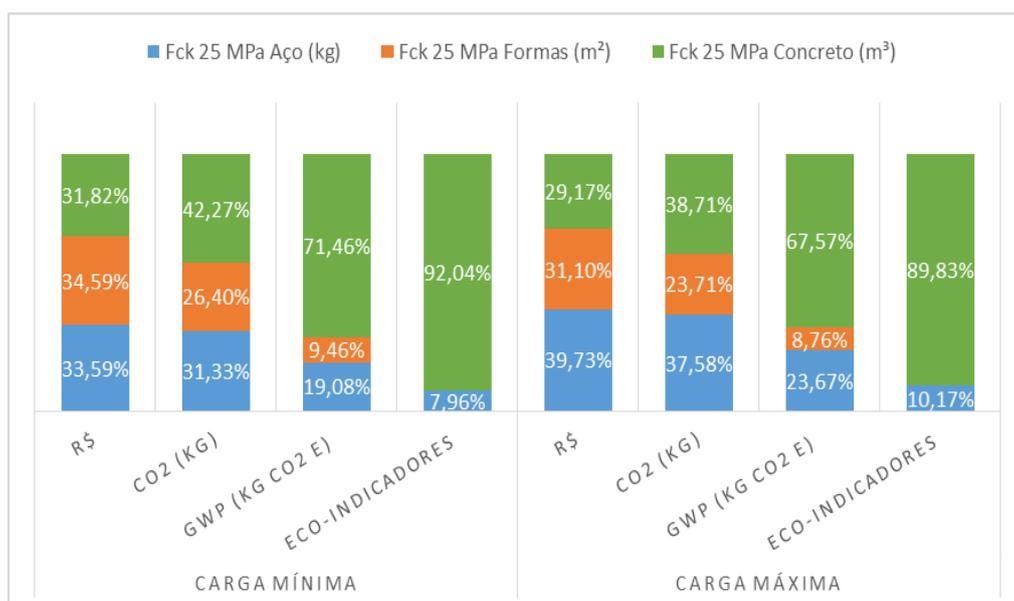


Figura 5 – Influencia do material no custo ambiental e econômico para confecção das vigas de concreto armado para o Fck de 25 MPa.

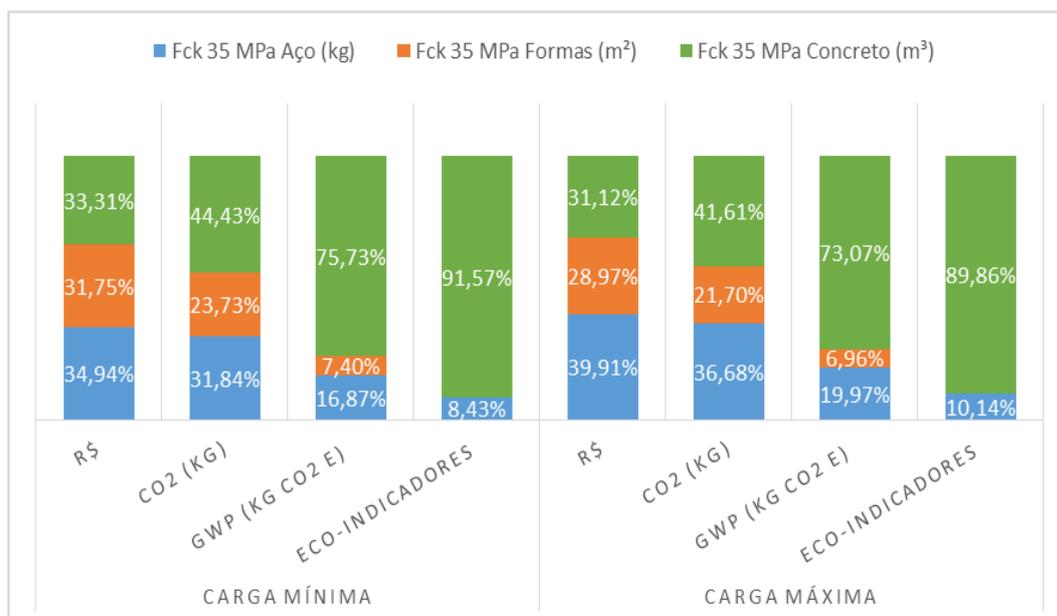


Figura 6 – Influencia do material no custo ambiental e econômico para confecção das vigas de concreto armado para o Fck de 35 MPa.

Das figuras anteriores observa-se nitidamente que, quanto maior o fck utilizado, maior será a porcentagem de concreto empregada na peça de acordo com o custo monetário. De acordo com os custos ambientais, no critério de dióxido de carbono emitido (CO2) também nota-se que quanto maior o fck empregado maior será a proporção de concreto empregada na peça, com exceção do modelo de carga mínima com fck de 25 MPa, que apresentou uma porcentagem de concreto menor que o fck de 20 MPa para carga mínima. Esse mesmo cenário aplica-se para o critério de dióxido de carbono equivalente emitido (CO2e) ou Potencial de Aquecimento Global (GWP). Por último nos Eco-indicadores a variação foi mínima, porém apresentou comportamento diferente para os carregamentos, uma vez que para carga mínima a parcela de concreto diminui conforme o aumento do fck, já para carga máxima a fração de concreto aumenta conforme diminui o fck.

#### 4. CONCLUSÕES

Nota-se nitidamente que a flecha limite foi o fator que teve maior influência na restrição da altura ótima das vigas de concreto armado. A variação da carga aplicada também influenciou significativamente a altura ótima da peça e, em consequencia, a relação vão/altura.

Observou-se ainda que quanto maior for o fck utilizado menor será a altura ótima da viga, porém maior será o valor total da peça, o que corresponde ao aumento da taxa de armadura e à diminuição da quantidade de concreto empregado. Assim, para vigas de concreto armado, os resultados obtidos indicam que não se justifica o uso de concreto de maiores resistências.

Para os modelos com cargas mínimas, as variações entre critérios econômico e ambientais não alteraram a altura ótima da peça. Já para o carregamento máximo a altura ótima da viga variou conforme o tipo de custo aplicado, sendo ele econômico ou ambiental, com exceção para os modelos com fck de 35 MPa. A variação da carga aplicada influencia significativamente na altura ótima da peça e na relação vão/altura

No custo econômico os materiais seguem uma ordem de mais influente para menos, sendo o aço o material mais influente, seguido por forma e concreto. Segundo os critérios

ambientais o concreto é o material que mais afeta o meio ambiente, sendo que o aumento do fck também aumenta o custo ambiental da viga. Já as formas são o material que causa o menor dano.

O Microsoft Excel Solver mostrou-se uma ferramenta eficaz nos estudos para se determinar o custo ótimo ambiental e econômico de se construir vigas de concreto armado. Revela-se cada vez mais necessário que sejam realizados estudos que levem em consideração os danos causados no meio ambiente pelos materiais empregados na construção civil, subsidiando a busca por materiais alternativos que apresentem menor impacto ambiental de acordo com as características de cada região do país.

Os valores dos custos ambientais foram retirados de estudos europeus, pois ainda não existem estudos específicos para a realidade brasileira. O levantamento dos impactos individuais dos insumos para o país proporcionará a obtenção de resultados mais confiáveis, uma vez que pode haver uma grande variação dos custos ambientais, conforme o sistema de produção e transporte de cada país. É de se supor ainda que, devido à grande extensão territorial do Brasil, haverá variação entre os custos ambientais também de uma região para outra.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), pela concessão de bolsa de iniciação científica ao primeiro autor.

## REFERÊNCIAS

**BREMNER, T.W., 2001.** *Environmental aspects of concrete: problems and solutions*. Em: Proceedings of First All- Russian Conference on Concrete and Reinforced Concrete, Moscow, Russia.

**KRIPKA, M.; MEDEIROS, G. F.; FRAGA, J. L. T.; MAROSIN P. R.** *Minimizing the environmental impact of R-C structural elements*. 2014. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2014.

**MEDEIROS, G. F.** *Método da busca harmônica aplicado na otimização de seções de pilares retangulares em concreto armado considerando custos econômicos e ambientais*. 2012. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura e Meio Ambiente) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2012.

**MICROSOFT.** *Definir e resolver um problema usando o Solver*. Disponível em <http://office.microsoft.com/pt-br/excel-help/definir-e-resolver-um-problema-usando-o-solver-HP010342416.aspx>. Acesso em: 14 de abril de 2014.

**PAGNUSSAT, R.** *Otimização dos custos de Vigas de Concreto Armado*. 2008. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2008.

**PARK, H. S.; LEE, H.; KIM, Y.; HONG, T.; CHOI, S. W.** *Evaluation of the influence of design factors on the CO<sub>2</sub> emissions and costs of reinforced concrete columns*. 2014. Energy and Buildings, Seoul, 2014.

**PAYÁ-ZAFORTEZA, I., YEPES, V., HOSPITALER, A., GONZÁLEZ-VIDOZA, F.,** 2009. *CO<sub>2</sub>-Optimization of Reinforced Concrete Frames by Simulated Annealing*. Engineering Structures; 31, p.1501-1508.

**PINI.** *Tabelas de Composição de Preços para Orçamentos*. 14<sup>a</sup> ed. São Paulo: Pini 2012.

**YEPES, V., GONZÁLEZ-VIDOZA, F., ALCARÁ, J., VILLALBA, P.,** 2012. *CO<sub>2</sub>-Optimization Design of Reinforced Concrete Retaining Walls Based on a VNS-Threshold Acceptance Strategy*. Journal of Computing in Civil Engineering; 26 (3), p. 378– 86.