

DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DA ESTRUTURA DE UM EDIFÍCIO EM CONCRETO ARMADO: VALIDAÇÃO ATRAVÉS DE SOFTWARE COMERCIAL

Lucas Henrique Reginato (Mestre em engenharia civil) E-mail: lucasreginat@hotmail.com
Moacir Kripka (Doutor em engenharia civil, Professor Titular da Universidade de Passo Fundo)

Resumo: A evolução tecnológica está intimamente ligada à evolução da Engenharia de Estruturas. Desde os primeiros modelos estruturais simplificados até atualmente, na elaboração de modelos mais complexos, se torna imprescindível a utilização de ferramentas computacionais para agilizar e obter resultados mais precisos, ocasionando projetos econômicos e sustentáveis. Do mesmo modo, a busca por projetos ditos ótimos na engenharia, procurando equilibrar grandes construções com os impactos ambientais gerados, faz com que o engenheiro civil, cada vez mais, busque novos métodos de economizar e preservar os recursos naturais disponíveis. Assim sendo, este trabalho procurou utilizar softwares de cálculo estrutural para dimensionar e otimizar estruturas em concreto armado. O software de otimização, desenvolvido pelo segundo autor do presente estudo, associa o método dos deslocamentos com o método Simulated Annealing, com o objetivo de determinar as seções das vigas do pavimento que conduzam ao menor custo total. Como o software de otimização utiliza algumas simplificações no detalhamento dos elementos, foi também utilizado o software Eberick V6, desenvolvido pela AltoQi, para verificar a influência das simplificações nos resultados obtidos a partir da otimização. Com esse objetivo, duas estruturas foram analisadas por ambos os softwares, confrontando os resultados obtidos em relação ao custo final das vigas, considerando a contribuição do concreto, armaduras e fôrmas. Para os exemplos analisados, constatou-se que a ferramenta de otimização desenvolvida é capaz de gerar economias expressivas, e que as simplificações consideradas no cálculo não alteram de forma significativa os custos finais nem invalidam as conclusões obtidas.

Palavras-chave: Otimização; dimensionamento; concreto armado; minimização de custos; Simulated Annealing.

OPTIMUM STRUCTURE DESIGN OF A REINFORCED CONCRETE BUILDING: VALIDATION BY THE USAGE OF A COMMERCIAL SOFTWARE

Abstract: Technological evolution is closely linked to the evolution of Structural Engineering. Since the first structural simplified models until now, by the development of complex models, more efficient computational tools are needed in order to obtain faster and more accurate results, generating economic and sustainable projects. Likewise, the search for optimum designs, seeking to balance large buildings and their environmental impacts, causes civil engineer, more and more, search for new methods to save and conserve natural resources. This study sought to use structural design software to size and optimize reinforced concrete structures. The optimization software, developed by the second author of this work, was generated by combining the Simulated Annealing method and grillage structural model. Since it considers some simplifications regarding dimensioning and detailing, a commercial software (Eberick) was also used, in order to verify if these simplifications generate great influence on final results. To achieve these objectives two building were analyzed, and the costs obtained by the softwares were compared, considering the amounts of steel, concrete and formworks. To the examples studied, it was observed that the simplifications don't affect the final results. In addition, remarkable savings can be achieved.

Keywords: optimization; sizing; reinforced concrete; costs minimization. Simulated Annealing.

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento convencional de estruturas de concreto armado visa obter um detalhamento da seção cujos esforços resistentes sejam capazes de suportar com a devida segurança os esforços atuantes, e que, ao mesmo tempo, satisfaça aos requisitos e prescrições de norma. Todavia, para um mesmo carregamento atuante, existem diversas configurações possíveis que

satisfazem a tais requisitos. Por conseguinte, muitas soluções são consideradas aceitáveis (BASTOS, 2004).

De acordo com Nina (2006), os métodos de otimização em projetos de estruturas podem proporcionar a automatização do pré-dimensionamento e trazer vários benefícios econômicos, tanto para o projetista, que terá o seu tempo poupado contando com um auxílio matemático para encontrar a estrutura mais econômica com a certeza de estar atendendo às condições arquitetônicas, de segurança e construtivas, quanto para o construtor, que terá menos gastos para executar a estrutura.

Partindo da constatação de Silva (2001), na qual a otimização de estruturas com adequação às características práticas de projeto é algo com um grande potencial para ser aplicado nos escritórios de cálculo, fica evidente que o projetista estrutural, para a obtenção do projeto ótimo, deve aprimorar seus conhecimentos na área de otimização para conseguir se manter ativo no atual mercado de trabalho.

Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo efetuar o dimensionamento de estruturas de edifícios em concreto armado com a utilização de software de otimização, procurando validá-los com um software comercial, buscando aperfeiçoar os conhecimentos na busca de estruturas de custo mínimo, além de verificar a influência de simplificações impostas ao modelo, nos resultados obtidos.

Buscando atingir os objetivos propostos, o artigo está estruturado da seguinte maneira: no segundo item é apresentada uma breve revisão bibliográfica descrevendo os softwares utilizados; no terceiro item é detalhada a metodologia empregada no trabalho, descrevendo as estruturas analisadas e suas características; no quarto item são apresentados os resultados obtidos; por fim, o quinto item lista as conclusões obtidas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Software de Otimização de Grelhas em Concreto Armado

O software de otimização, desenvolvido pelo segundo autor do presente trabalho, objetiva a minimização do custo de estruturas em concreto armado considerando as parcelas de concreto, aço e fôrmas, tendo como variáveis de projeto as alturas das vigas do pavimento. Foi escrito em linguagem Fortran, e utiliza análise matricial de estruturas, através do método dos deslocamentos, para a determinação dos esforços e deslocamentos segundo o modelo de grelha. O software é capaz de dimensionar vigas à flexão, ao cisalhamento, à torção, além de efetuar verificação da abertura de fissuras e dimensionamento da armadura de pele, de acordo com a NBR 6118/2014. O cálculo da armadura é efetuado para a seção mais solicitada de cada elemento, se obtendo somente a área de aço, não sendo feito o detalhamento da estrutura nem a transformação para bitolas comerciais. De forma simplificada, apenas o maior esforço cortante no elemento é utilizado para o dimensionamento dos estribos, o mesmo ocorrendo para o maior momento fletor com relação à armadura longitudinal.

O processo de otimização é efetuado através do método heurístico Simulated Annealing, adotado no presente trabalho pelo fato de diversos outros estudos já terem sido efetuados com o emprego deste método, evidenciado grande economia proporcionada a partir da formulação desenvolvida (KRIPKA, 2003 e MEDEIROS e KRIPKA, 2013).

O Simulated Annealing (SA) é um método heurístico baseado na mecânica estatística. A rigor, um algoritmo heurístico não é um algoritmo que tem a garantia de encontrar uma solução ótima, porém, tem a capacidade de encontrar soluções quase ótimas ou ótimas de forma rápida

quando comparado a métodos de busca exaustiva. Estes métodos são utilizados quando os algoritmos clássicos, baseados em programação matemática, não apresentam bom desempenho, principalmente pelo fato de ficar presos em mínimos locais, já que utilizam procedimentos baseado em gradientes ou aproximações deste (FERREIRA, 2008).

Segundo Kripka (2003), o Método Simulated Annealing utiliza uma estratégia diferente da convencional, tentando evitar a convergência para um mínimo local aceitando também, a partir de um determinado critério, soluções que incrementem o valor da função. O Método do Simulated Annealing é reconhecido como um método para a obtenção de boas soluções para problemas de otimização de difícil resolução, desenvolvido em analogia ao processo de recozimento de um sólido, quando se pretende alcançar seu estado de mínima energia.

Segundo Metrópolis et al. (1953) apud Kripka (2003), a probabilidade de mudança na energia do sistema é dada pela equação (1).

$$p(\Delta E) = \exp(-\Delta EK/T) \quad (1)$$

onde ΔE é a variação de energia no sistema, T é a temperatura e K é a constante de Boltzmann, sem equivalência no processo de otimização. Ainda segundo Kripka (2003), à semelhança do método original de recozimento na termodinâmica, o processo inicia com um alto valor de T , para o qual uma nova solução é gerada. O aceite desta nova solução se dará automaticamente caso acarrete em redução no valor da função. Sendo o novo valor da função maior que o anterior, o aceite se dará por um critério probabilístico, sendo a função de aceite dada pela equação (2).

$$p = \exp(\Delta f/T) \quad (2)$$

A nova solução é aceita se p for maior que um número entre zero e um, gerado aleatoriamente. Enquanto T é alto, a maioria das soluções é aceita, sendo T reduzido gradativamente a cada série de tentativas de obtenção de uma melhor solução, nas vizinhanças da solução corrente. O Simulated Annealing utiliza uma estratégia diferente da convencional, tentando evitar a convergência para um mínimo local aceitando também, a partir do critério descrito, soluções que incrementem o valor da função.

2.2 Software Eberick V6

Segundo AltoQi, o Eberick V6 é um software para projeto estrutural em concreto armado, englobando as etapas de lançamento e análise da estrutura, dimensionamento e detalhamento dos elementos, de acordo com a NBR 6118. As lajes são calculadas no modelo de grelha 3D, onde se considera a rigidez real das vigas e sendo que as reações de apoio são transferidas na forma de cargas concentradas para o modelo do pórtico, ou seja, as reações de apoio das lajes são transferidas ao pórtico e as barras da grelha contidas na seção do pilar são transmitidas diretamente a esses, sem gerar reações de apoio nas vigas. No Eberick o modelo de pórtico espacial é composto pelas vigas e pilares da edificação, sendo que é possível visualizar diretamente todos os esforços e deslocamentos que são utilizados para o dimensionamento dos elementos estruturais em um pórtico unifilar.

3. MÉTODO DA PESQUISA

3.1 Considerações Iniciais

Para a minimização do custo de vigas de concreto armado considerou-se a contribuição do concreto, armaduras e fôrmas na composição dos gastos com materiais, sendo as armaduras divididas em longitudinais e transversais. Como já mencionado, a altura da seção transversal

das vigas foi a principal variável de projeto, pois tanto a armadura como as fôrmas podem ser obtidas diretamente do conhecimento dessa dimensão. O projeto arquitetônico é fator decisivo na determinação das dimensões da estrutura. Em geral, as larguras das vigas são limitadas pelas espessuras das alvenarias de vedação e por isso não foram consideradas como uma variável a ser otimizada. Já as alturas máximas das vigas são limitadas por portas, janelas, descontinuidade das alvenarias de vedação, etc., sendo assim bastante flexíveis suas variações.

Na elaboração do estudo foram utilizados dois exemplos de estruturas, a primeira uma estrutura hipotética com dois eixos de simetria e a segunda um pavimento tipo de um edifício. Ambas as estruturas foram dimensionadas no Eberick. A estrutura hipotética foi analisada pelo modelo de grelha. Para a obtenção do pavimento tipo, primeiramente foi dimensionado um edifício em concreto armado, com base em planta de fôrmas de um edifício existente. Na análise e dimensionamento do edifício no software Eberick a estrutura foi modelada através de um pórtico espacial composto pelas vigas e pilares da edificação, constituindo de carregamentos horizontais e verticais. Com a intenção de isolar o primeiro pavimento tipo do edifício inicialmente dimensionado para utilizá-lo nos estudos de otimização, algumas adaptações tiveram de ser feitas, já que o software de otimização de estruturas baseia-se no modelo de grelha comportando, portanto, somente carregamentos verticais.

Após o dimensionamento inicial das estruturas com a ajuda do Eberick, com o software de otimização, suas vigas foram otimizadas, sendo após relançadas no Eberick como dados de entrada, com a finalidade de comparar a funcionalidade do software de otimização com o Eberick, bem como a praticidade da simplificação em relação ao detalhamento das armaduras.

Os preços para cada material foram definidos com base nas composições indicadas na Tabela de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO 13ª edição - 2010) da Editora Pini e nos valores dos insumos para o estado do Rio Grande do Sul, indicados no relatório de insumos de agosto de 2013 do Sinapi/Caixa.

3.1.1 Parâmetros de Análise e Dimensionamento Utilizados nos Softwares

Aqui serão descritos os principais parâmetros de análise utilizados nos softwares para ambos os exemplos.

- **Classe de Agressividade Ambiental:**

A classe de agressividade ambiental foi admitida seguindo o exposto no item 6.4 da NBR 6118/2014. Para os exemplos estudados adotou-se classe de agressividade I.

- **Cobrimento Nominal:**

Para a adoção do cobrimento nominal, foi obedecido o exposto no item 7.4, tabela 7.2, da NBR 6118/2014, que relaciona o cobrimento nominal com a classe de agressividade ambiental adotada. Assim sendo, foi adotado cobrimento nominal de 25 mm para os exemplos estudados.

- **Deslocamentos Limites:**

O valor da flecha foi baseado do exposto na tabela 13.3 do item 13.3 da NBR 6118/2014. Tomando como referência o valor de 1/250 do vão, que está relacionado com a sensibilidade sensorial.

- **Redução da Rigidez à Torção das Vigas:**

Segundo o item 14.6.6.2 da NBR 6118/2014, de maneira aproximada, nas grelhas e nos pórticos espaciais, pode-se reduzir a rigidez à torção das vigas por fissuração utilizando-se 15%

da rigidez elástica, exceto para os elementos estruturais com protensão limitada ou completa. Deste modo, foi utilizada redução da rigidez à torção das vigas igual a 85%. Além disso, a NBR 6118/2014, em seu item 17.5.1.2, permite desprezar os esforços de torção atuantes em um elemento quando este não for essencial ao equilíbrio da estrutura e tenha adequada capacidade de adaptação plástica, calculando os demais elementos sem considerar os efeitos provocados pela torção a ser desprezada. Essa colocação tenta diferenciar a torção de equilíbrio da torção de compatibilidade. Enquanto a primeira é essencial ao equilíbrio da estrutura, a segunda é oriunda apenas da compatibilidade entre as deformações dos elementos e, portanto, pode ser redistribuída pela estrutura sem prejuízo do equilíbrio estático.

3.1.2 Pavimento Composto por Dez Vigas

As primeiras simulações consistiram na análise de uma estrutura que apresenta dois eixos de simetria, composta por dez vigas ou quarenta elementos (Figura 1) e foi baseada nos estudos de Kripka (2003).

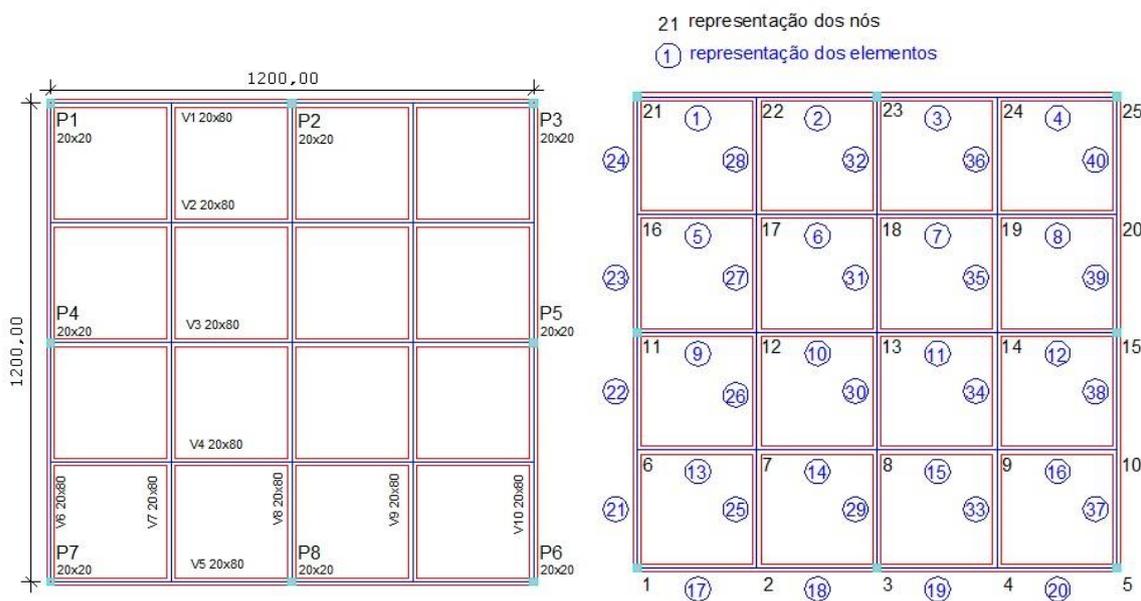


Figura 1 – Pavimento composto por dez vigas (dimensões em cm).

Os nós 1, 3, 5, 11, 15, 21, 23 e 25 foram considerados simplesmente apoiados. As cargas lançadas sobre os elementos estão listadas na Tabela 1. O peso próprio das vigas foi computado de forma automática pelos softwares. Foi adotado fck do concreto de 20 MPa.

Tabela 1 – Definição das cargas dos elementos.

Número do elemento	Carga permanente (kN/m)	Carga acidental (kN/m)
1;4;17;20;21;24;37;40	5,25	0,82
2;3;18;19;22;23;38;39	4,87	0,64
5;8;13;16;25;28;33;36	5,59	2,79
6;7;10;11;14;15;26;27;30;31;34;35	4,51	2,25
9;12;29;32;	5,47	2,73

No caso denominado A-1, a largura foi fixada em 20 cm e, partindo de altura inicial de 80 cm, todas as vigas foram limitadas a uma mesma altura de seção transversal, constituindo, portanto, um problema com uma única variável. No caso denominado B-1, a estrutura foi

dividida em dois grupos, sendo vigas externas com altura h_1 e vigas internas com altura h_2 , com duas variáveis de projeto. No caso C-1, a estrutura foi dividida em três grupos, de modo que as vigas V1, V5, V6 e V10 com altura h_1 , as vigas V2, V4, V7 e V9 com altura h_2 e as vigas V3 e V8 com altura h_3 , com três variáveis de projeto.

Inicialmente utilizaram-se apenas os custos dos materiais, sem a consideração da mão de obra. Após, procurou-se verificar a influência da inclusão dos custos da mão de obra nos resultados, repetindo a análise e designando os casos respectivamente como citados acima em A-2, B-2 e C-2.

Os custos da estrutura inicial foram elaborados através do resumo de materiais obtidos no software de otimização e no software Eberick. É relevante informar que para a obtenção das quantidades de área de aço no software Eberick, foram consideradas as configurações padrão de bitolas fornecidas pelo software.

3.1.3 Pavimento Tipo de Um Edifício

As próximas simulações consistiram na análise de uma estrutura de um edifício de 8 pavimentos, sendo a altura das faces entre as lajes de 2,88 m, composta por 28 vigas, 22 pilares e 21 lajes. O projeto está ilustrado na Figura 2.

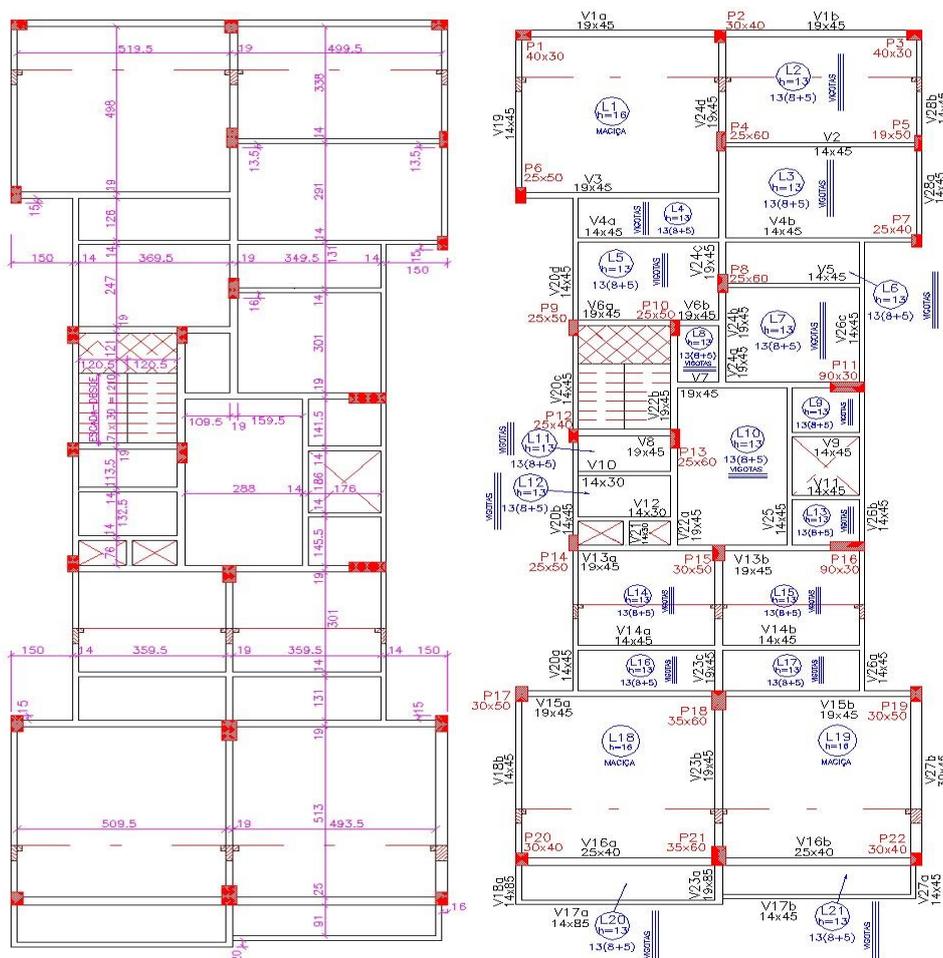


Figura 2 – Pavimento tipo empregado (dimensões em cm).

Primeiramente, a planta de fôrmas foi adotada como base para o dimensionamento do edifício no software Eberick V6. Os passos para o cálculo estão descritos a seguir.

3.1.3.1 Carregamentos Verticais

Tomando como base a NBR 6120/1980, de forma que todos os elementos estruturais do edifício analisado são em concreto armado, utilizou-se o peso específico aparente de 25 kN/m^3 . Com base neste valor, o software Eberick calculou o peso próprio de cada elemento conforme suas dimensões.

As lajes maciças foram lançadas com espessura de 16 cm. No caso das lajes pré-moldadas, utilizou-se lajota cerâmica (bloco B8/30/20) como material de enchimento. O peso específico aparente das lajotas cerâmicas, conforme NBR 6120/1980, é de $18,00 \text{ kN/m}^3$. A espessura da capa de concreto foi considerada de 5 cm e a largura das nervuras foi considerada de 9 cm.

Tomando como base a NBR 6120/1980, como se trata de um edifício residencial, para a cobertura utilizou-se um carregamento acidental de $0,50 \text{ kN/m}^2$ e para os demais pavimentos utilizou-se um carregamento acidental de $1,50 \text{ kN/m}^2$. De modo simplificado, utilizou-se carregamento de revestimento de $1,00 \text{ kN/m}^2$.

A escada foi lançada com 12 cm de espessura, piso de 30 cm e espelho de 18 cm. Com base na NBR 6120/1980, foi considerado uma carga acidental de $2,50 \text{ kN/m}^2$ e a carga de revestimento foi lançada com $2,46 \text{ kN/m}^2$, padrão do software.

Quanto às cargas de parede, no pavimento da cobertura foram lançados carregamentos somentes nas vigas das periferias. De modo simplificado a espessura foi fixada em 15 cm e a altura em 120 cm, considerando, segundo a NBR 6120/1980, o peso específico aparente do tijolo furado de 13 kN/m^3 , resultou-se em um carregamento de $2,34 \text{ kN/m}$.

Nos demais pavimentos, foram lançados carregamentos em todas as vigas. A espessura foi fixada em 15 cm, já a altura foi a diferença entre o pé direito do pavimento (2,88 m) e a altura da viga localizada acima da viga em questão. Considerou-se, segundo a NBR 6120/1980, o peso específico aparente do tijolo furado de 13 kN/m^3 . Houve uma variação somente nos carregamentos das vigas da sacada, o qual foi lançado com altura de 85 cm, considerado como peitoril. **3.1.3.2 Carregamentos Horizontais**

Os dados de entrada para os carregamentos horizontais ocasionados pelo vento estão demonstrados na Figura 3.

Velocidade 42 m/s Mapa...

Edificação
Maior dimensão horizontal ou vertical Entre 20 e 50 m
Rugosidade do terreno Categoria IV

Aplicação do Vento
 Direção X
 Direção Y
Ângulo 0
Forças...

Topografia
 Encostas e cristas de morros em que ocorre aceleração do vento. Vales com efeito de afunilamento (S1 = 1.1)
 Vales profundos, protegidos de todos os ventos (S1 = 0.9)
 Demais casos (S1 = 1.0)

Fator Estatístico S3
 Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicações, etc.): 1.10
 Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação: 1.00
 Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.): 0.95

Figura 3 – Dados de entrada para obtenção das forças devidas ao vento no software Eberick V6

3.1.3.3 Parâmetros de Análise e Materiais

Os painéis das lajes maciças do projeto em questão foram configurados para serem modelados como grelhas isoladas com espaçamento das faixas de 50 cm, com no mínimo 4 faixas em cada direção e considerando uma redução na torção de 40%. Para lajes pré-moldadas, as barras da grelha são discretizadas de modo que coincidam com a posição das nervuras definidas no croqui. Foi considerado continuidade entre as lajes maciças.

Segundo AltoQi, as lajes pré-moldadas adjacentes cujas vigotas de ambas as lajes sejam perpendiculares à viga sob a qual se apoiam e alinhadas entre si, o engastamento é perfeitamente possível, mas em lajes pré-moldadas cujas vigotas de ambas as lajes adjacentes não se encontrem perfeitamente perpendiculares à viga sob a qual se dá a continuidade, não existe a possibilidade direta de engastamento. Isso se deve ao fato de que, nessa posição, a laje não possui massa para absorver esforços de compressão oriundos dos momentos negativos. Como o enchimento é considerado um material inerte (despreza-se sua resistência), não existe nada suportando a compressão. Ainda segundo AltoQi, deve-se procurar utilizar engastamento somente quando o dimensionamento de alguma laje incorrer em problemas (por seção insuficiente, flecha, etc), evitando o engastamento entre lajes pré-moldadas. Deste modo não foi considerado continuidade entre as lajes pré-moldadas.

Através da análise e dimensionamento do edifício com a utilização do software Eberick, considerando os parâmetros descritos acima, obtiveram-se as mesmas seções para os elementos do pavimento modelo analisado, variando somente a seção da viga V5 (antes 14x45 – agora 14x60).

Como originalmente o edifício foi dimensionado com outro software comercial, o TQS, podendo ter considerações distintas no cálculo e dimensionamento. O aumento na seção da viga V5 teve de ser realizado devido à consideração do cálculo da flecha considerada pelo software Eberick V6, que computa a flecha de um elemento, somando os deslocamentos em seus apoios, contrariando o que está descrito na nota 01 da Tabela 13.3 da NBR 6118:2014, que indica que todos os valores limites de deslocamentos supõem elementos de vão λ suportados em ambas as extremidades por apoios que não se movem.

Após o cálculo do edifício com a ajuda do software Eberick, o pavimento tipo 1 foi isolado, de modo a ser utilizado nos estudos de otimização da estrutura através do software de grelha.

4. RESULTADOS

É relevante informar que para a obtenção das quantidades de área de aço no software Eberick foram consideradas as configurações padrão de bitolas fornecidas pelo software.

4.1 Pavimento Composto por Dez Vigas

4.1.1 Caso A-1 e A-2

Partindo-se de uma altura de 80 cm para as vigas e mantendo-se a mesma seção transversal para os elementos, obteve-se a altura ótima de 77 cm, com e sem a consideração da mão de obra.

4.1.2 Caso B-1 e B-2

Dividindo a estrutura em dois grupos, sendo vigas de periferia com altura h_1 e vigas internas com altura h_2 , obteve-se, desconsiderando-se a mão de obra, altura das vigas de periferia $h_1=44$ cm e vigas internas $h_2=79$ cm. Quando considerado a mão de obra obteve-se a altura das vigas de periferia $h_1=51$ cm e vigas internas $h_2=77$ cm.

4.1.3 Caso C-1 e C-2

Dividindo-se a estrutura em três grupos, sem considerar a mão de obra, para as vigas V1, V5, V6 e V10 foi obtida altura h1=34 cm, as vigas V2, V4, V7 e V9 obtida altura h2=25 cm e as vigas V3 e V8 obtida altura h3=90 cm. Quando considerado a mão de obra, para as vigas V1, V5, V6 e V10 foi obtida altura h1=34 cm, as vigas V2, V4, V7 e V9 obtida altura h2=33 cm e as vigas V3 e V8 obtida altura h3=128 cm.

4.1.4 Análise dos Resultados Obtidos

Para facilitar a compreensão da análise dos resultados obtidos para o pavimento composto por dez vigas, são apresentados, através da Figura 4, gráficos e tabelas de comparação.

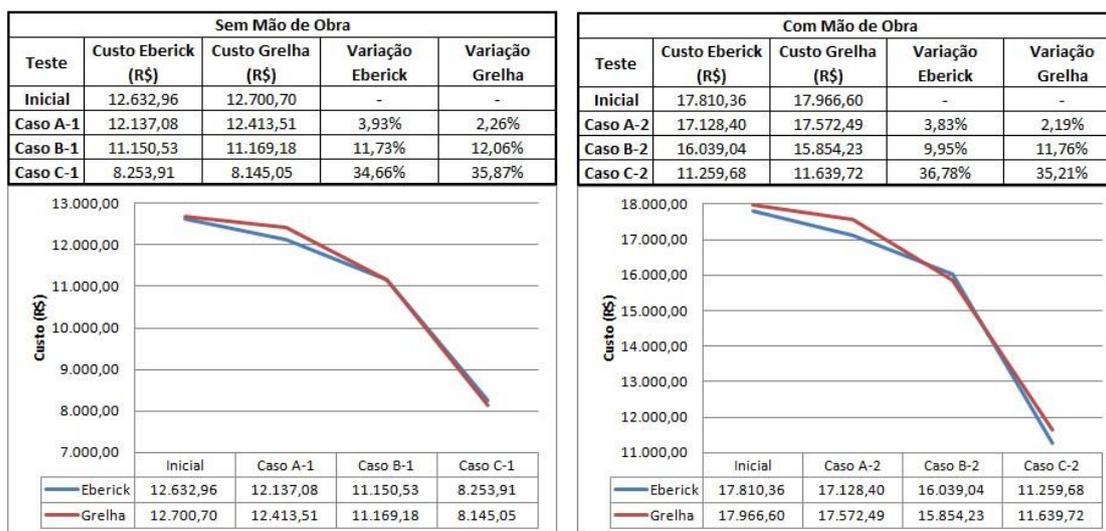


Figura 4 – Comparativo entre softwares.

A partir dos resultados apresentados é possível concluir, para a estrutura analisada, que o programa de otimização desenvolvido a partir da formulação proposta pelo método Simulated Annealing pode constituir-se em uma valiosa ferramenta de auxílio na etapa de otimização das estruturas em concreto armado.

Observa-se que a partir de uma solução inicial, descrita no item 4.1.2, mantendo-se a mesma seção transversal para os elementos, é possível alcançar uma redução no custo total, das vigas da estrutura, de 2,26% quando não levado em consideração a mão de obra e, de 2,19% quando levado em consideração a mão de obra, já, quando dividida em dois grupos a estrutura, sendo vigas de periferia com altura h1 e vigas internas com altura h2, alcançou-se uma redução no custo total, das vigas da estrutura, de 12,06% não levando em consideração a mão de obra e, de 11,76% quando levado em consideração a mão de obra. Ainda, dividindo a estrutura em três grupos, obteve-se uma redução no custo total, das vigas da estrutura, de 35,87% não levando em consideração a mão de obra e, de 35,21% quando levado em consideração a mão de obra, de modo que este resultado torna-se muito satisfatório já que a divisão da estrutura em três alturas diferentes de vigas não implica em maiores dificuldades construtivas levando-se em consideração a montagem das fôrmas na execução da construção.

Ainda, é admissível concluir, para a estrutura analisada, que em comparação entre o software Eberick, que faz o detalhamento da área de aço quanto as bitolas utilizadas, e o software de otimização, que determina apenas as áreas de armadura, este detalhamento não se mostra relevante, pois a diferença do percentual de redução do custo entre um software e outro

não ultrapassa 2%. Deste modo pode-se concluir que fazer com que o software de otimização descreva as bitolas utilizadas torna-se desnecessário, por se tratar de uma tarefa complexa e de pouca variação em relação à determinação do custo ótimo final.

Também, é plausível apontar, para a estrutura analisada, que a consideração ou não da mão de obra na elaboração dos resultados de otimização, resulta em uma variação não maior que 2,50% em comparação aos custos sem a consideração da mão de obra, afetando o custo final, mas tornando a inserção ou não da mão de obra na elaboração da otimização irrelevante.

4.2 Pavimento Tipo de Um Edifício

Como o edifício foi dimensionado por meio do Eberick, sendo a estrutura modelada através de um pórtico espacial composto pelas vigas e pilares da edificação, constituindo de carregamentos horizontais e verticais, e, já que o software de otimização de estruturas baseia-se na analogia de grelhas, comportando somente carregamentos verticais, para a utilização do pavimento tipo nos estudos de otimização algumas adaptações tiveram de ser feitas, a fim de aproximar as comparações entre os dois softwares.

Para considerar a existente rigidez a rotação dos pilares (k_j), e obter os momentos negativos nos apoios de extremidades, é recomendado utilizar molas de rigidez rotacional (ARAÚJO, 2009). Para isso é necessário conhecer o módulo de elasticidade secante do concreto, E_{cs} , a inércia do pilar no eixo considerado, no pavimento superior e inferior, I_{sup} e I_{inf} , e a respectiva altura do pavimento inferior e superior, l_{inf} e l_{sup} , dadas por (3):

$$k_j = E_{cs} \times \left[\left(\frac{6 \times I_{sup}}{l_{sup}} \right) + \left(\frac{6 \times I_{inf}}{l_{inf}} \right) \right] \quad (3)$$

Como a análise foi feita para o pavimento tipo, os comprimentos dos pilares e suas inércias superiores e inferiores não se alteram, podendo simplificar a fórmula para (4):

$$k_j = E_{cs} \times \left[\left(\frac{12 \times I_{sup}}{l_{sup}} \right) \right] \quad (4)$$

Sendo que o módulo de elasticidade secante do concreto é dado pela equação (5), constituindo f_{ck} a resistência característica à compressão do concreto, e a inércia do pilar dada pela equação (6), sendo b a largura e h a altura da viga:

$$E_{cs} = 0,85 \times 5.600 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (5)$$

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad (6)$$

De acordo com Fontes (2005), em estruturas reticuladas, ou seja, naquelas compostas por elementos lineares, é comum ter interseções dos eixos de dois ou mais elementos, representadas por nós. No entanto, há casos em que as dimensões das ligações entre os elementos não são desprezíveis, quando comparadas com vãos e pés-direitos. Costuma-se modelar esses nós de dimensões finitas como elementos infinitamente rígidos, ou elementos de rigidez significativamente maior que a dos demais, o que garante uma idealização mais realista do comportamento de edifícios. Esses trechos rígidos são também chamados de “offsets” e são determinados pelas dimensões dos elementos, relativas a cada direção, a partir do nó que representa a ligação. Em edifícios de concreto armado, no caso de apoios de vigas em pilares, é mais comum considerar os trechos rígidos nas vigas que nos pilares, dada as dimensões usuais das peças. Corrêa (1991) afirma que essa adoção está de acordo com a hipótese de manutenção da seção plana do pilar, e incorpora a consideração de excentricidades na aplicação de forças no pilar. No entanto, nem todo o trecho de interseção deve ser considerado como trecho rígido.

Sendo a parcela que deve ser tomada como trecho rígido indicada pela NBR 6118:2014 no item 14.6.2.1.

De acordo com a AltoQi, o Eberick cria automaticamente os trechos rígidos no interior dos pilares, segundo os procedimentos estabelecidos na NBR 6118:2014.

Como o software de otimização não faz tais considerações descritas acima, se optou por diminuir as seções dos pilares, com a intenção de diminuir os efeitos na análise, ocasionado pela inserção de trechos rígidos.

Assim, depois de feitas tais adaptações, o pavimento utilizado nos estudos de otimização ficou conforme Figura 5. Pode-se notar que as vigas V7, V21 e V26 tiveram suas dimensões alteradas após os ajustes efetuados.

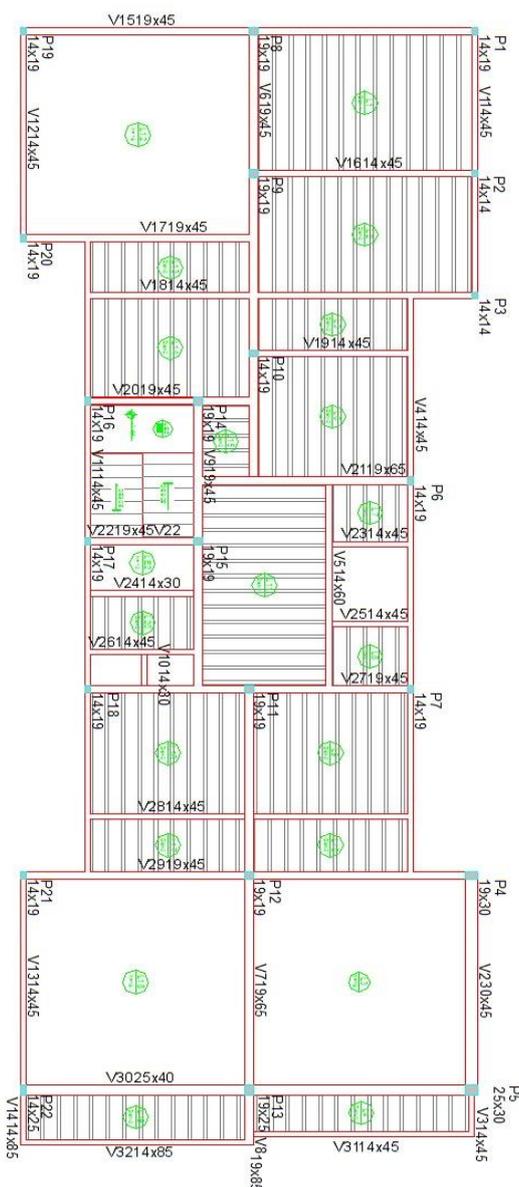


Figura 5 – Pavimento tipo a ser otimizado.

A estrutura foi dividida em 53 nós e 77 elementos (Figura 6). Primeiramente o pavimento foi dividido em 30 grupos, discretizando cada viga em um grupo, com exceção das vigas V3 e

V31 e as vigas V14 e V32, consideradas em um mesmo grupo. Em seguida o pavimento foi elaborado nos 9 grupos iniciais (Figura 6).

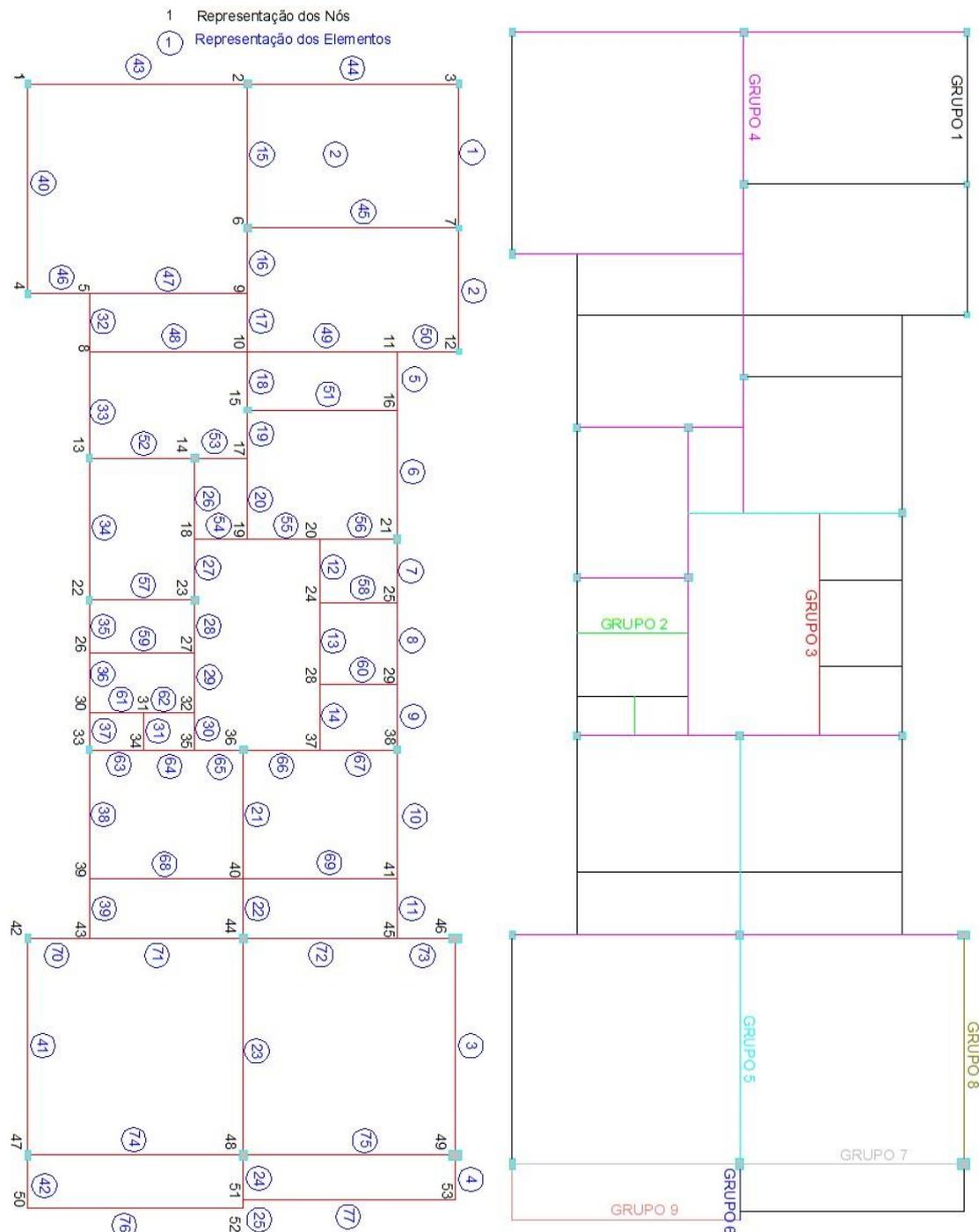


Figura 6 – Divisão dos nós, elementos e grupos do pavimento tipo.

Foi considerado engastamento elástico nos pilares. Utilizaram-se apenas os custos dos materiais, sem a consideração da mão de obra, pois como demonstrado em 5.1.4 a influência da inclusão dos custos da mão de obra nos resultados é desprezível. Os custos da estrutura inicial foram elaborados através do resumo de materiais obtidos no software de otimização e no software Eberick. É relevante informar que para a obtenção das quantidades de área de aço no software Eberick, foram consideradas as configurações padrão de bitolas fornecidas pelo software.

Com a finalidade de descobrir se a variação do f_{ck} do concreto tornaria a estrutura mais econômica, a estrutura definida em 9 grupos foi simulada com 25, 30 e 35 MPa. Para isso, os valores das molas de rigidez rotacional tiveram de ser calculados novamente.

4.2.1 Análise dos Resultados Obtidos

Para facilitar a compreensão da análise dos resultados obtidos para o pavimento tipo, são apresentados, através das Figuras 7 e 8, gráficos e tabelas de comparação.

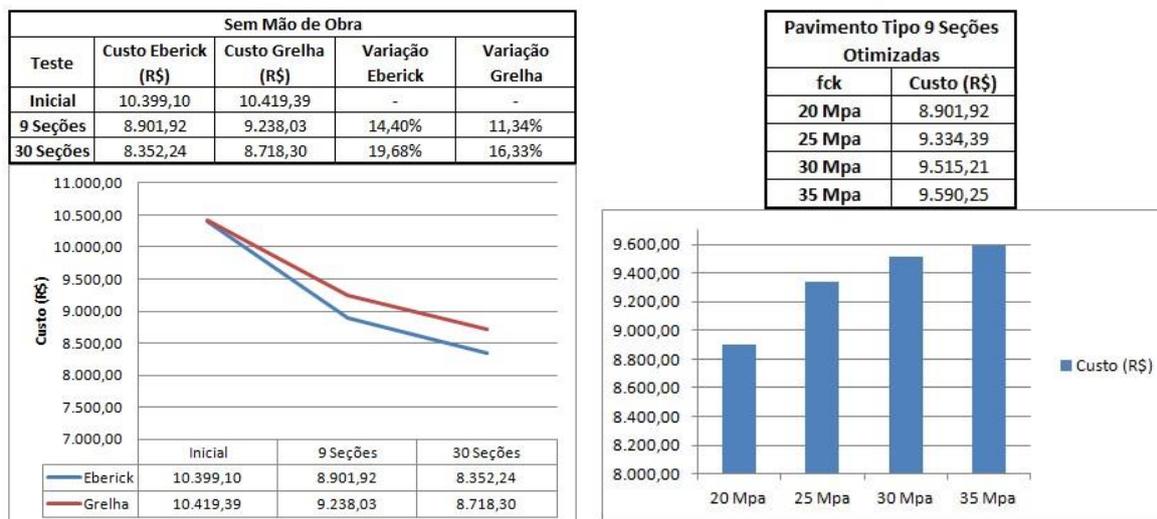


Figura 7 – Comparativo entre softwares para o pavimento tipo.

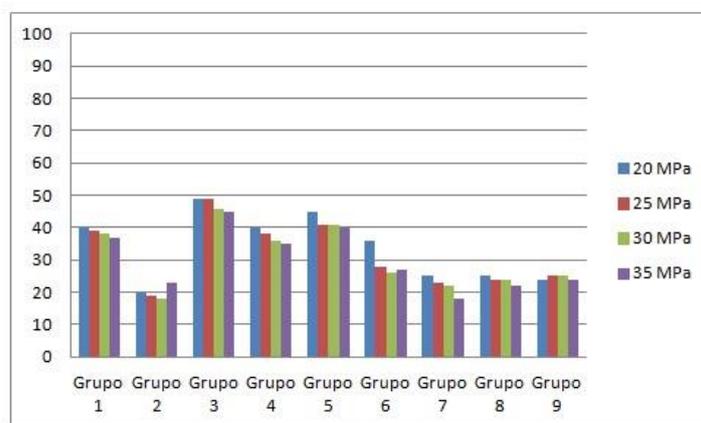


Figura 8 – Comparativo entre as alturas de vigas para diferentes classes de resistência do concreto.

A partir dos resultados apresentados é possível concluir, para a estrutura analisada, de forma semelhante ao exemplo anterior, que o programa de otimização desenvolvido a partir da formulação proposta pelo método Simulated Annealing pode conduzir a reduções significativas no custo total da estrutura. Observa-se que a partir de uma solução inicial, se obteve uma redução de 16,33% no custo final, quando a estrutura foi dividida em 30 grupos de seções de vigas e se obteve uma redução de 11,34% no custo final, de modo que a estrutura foi mantida conforme solução inicial, com 9 grupos de seções de vigas.

Ainda, é admissível concluir, para a estrutura analisada, de forma semelhante ao exemplo anterior, que em comparação entre software Eberick, que faz o detalhamento da área de aço quanto as bitolas utilizadas, e o software de otimização, que determina apenas as áreas de

armadura, este detalhamento não se mostra relevante, pois a diferença do percentual de redução do custo entre um software e outro não ultrapassa cerca de 3,35%. Deste modo pode-se concluir que fazer com que o software de otimização descreva as bitolas utilizadas torna-se desnecessário, por se tratar de uma tarefa complexa e de pouca variação em relação à determinação do custo ótimo final.

Também é plausível admitir que, para a estrutura analisada, poderíamos obter um melhor custo final se utilizássemos um concreto com f_{ck} de 20 MPa. Podemos perceber que as vigas teriam suas alturas diminuídas, mas não ao ponto de compensar a diferença unitária de material.

5. CONCLUSÕES

Ao final deste trabalho é possível afirmar que o programa de otimização desenvolvido a partir da formulação proposta pelo método Simulated Annealing pode constituir-se em uma valiosa ferramenta de auxílio na etapa de otimização das estruturas em concreto armado.

Nota-se que quanto maior o número de grupos de vigas, ou seja, quanto menos restrições de altura é feita para a estrutura, menor é o custo obtido, mas deve-se observar que muitos grupos de vigas ocasionariam dificuldades práticas de execução, devendo o projetista encontrar o equilíbrio entre as variações de seção transversal e a aplicabilidade em obra, de modo que mesmo mantendo um número reduzido de grupos de vigas, como no caso do pavimento tipo estudado, no qual mantiveram-se os 9 grupos iniciais, foi possível a redução do custo em cerca de 13%, de modo a considerar os resultados obtidos satisfatórios. Uma alternativa para minimizar a influência da determinação, por parte do calculista, do agrupamento dos elementos em um número reduzido de distintas seções transversais consiste na implementação do agrupamento otimizado, através das chamadas restrições de cardinalidade (KRIPKA, MEDEIROS E LEMONGE, 2015).

A comparação feita entre os softwares mostra, para ambas as estruturas analisadas, de diferentes complexidades, que detalhar as bitolas utilizadas torna-se desnecessário para os estudos de otimização, por se tratar de uma tarefa complexa e de pouca influência em relação à determinação do custo ótimo final. Deste modo, a falta de necessidade de detalhamento se deve exclusivamente como simplificação para a formulação do problema de otimização, devendo a estrutura real ser detalhada. Assim sendo, os custos obtidos no Eberick tenderam a ser menores que os apresentados no software de otimização, pela diminuição da área de aço devido ao detalhamento, mas essa diminuição resultou em pequenas diferenças, não maiores que cerca de 3,5%, tornando o software de otimização uma ferramenta útil para se encontrar as alturas ótimas, e logo após, lançá-las em um software que faça tal detalhamento, para a utilização prática.

Também é plausível concluir que, para o pavimento tipo analisado, o custo final ótimo se dá quando utilizado um concreto de f_{ck} 20 MPa, pois se percebeu que utilizando valores de resistência característica maiores, como 25MPa, 30MPa e 35MPa, as vigas tiveram suas alturas diminuídas, mas não ao ponto de compensar a diferença unitária de material.

Ficou evidente na elaboração do trabalho, que a maior dificuldade de se comparar softwares de cálculo e dimensionamento diferentes, é a tentativa de aproximar as diversas considerações feitas pelos mesmos, já que tais considerações podem acarretar a vários resultados possíveis.

REFERÊNCIAS

ALTOQI. *Eberick* V6. Disponível em: <<http://www.altoqi.com.br/software/projetoestrutural/eberick-v6>>. Acesso em: 24 abril 2013.

ARAÚJO, José Milton de. *Projeto Estrutural de Edifícios de Concreto Armado*. 2. ed. Rio Grande: Dunas, 2009. 224p.

BASTOS, E. A. *Otimização de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexocompressão oblíqua utilizando algoritmos genéticos*. 2004. Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

CORRÊA, M. R. S. *Aperfeiçoamento de modelos usualmente empregados no projeto de sistemas estruturais de edifícios*. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FERREIRA, F. de S. *Uma abordagem numérico-experimental para a identificação de dano estrutural utilizando o método Simulated Annealing*. 2008. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FONTES, F. F. *Análise Estrutural de Elementos Lineares Segundo a NBR 6118:2003*. 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MEDEIROS, G.F., KRIPKA, M., *Structural optimization and proposition of pre-sizing parameters for beams in reinforced concrete buildings*. Computers and Concrete, an International Journal (Print), v. 11, p. 253-270, 2013.

KRIPKA, M. *Otimização do custo de estruturas de concreto armado analisadas pelo modelo de grelha*. In: V Simpósio EPUSP Sobre Estruturas de Concreto, 2003, São Paulo. Anais do V Simpósio EPUSP Sobre Estruturas de Concreto, 2003.

KRIPKA, M. ; MEDEIROS, G.F. , LEMONGE, A. C. C. *Use of optimization for automatic grouping of beam cross-section dimensions in reinforced concrete building structures*. Engineering Structures v. 99, p. 311-318, 2015.

_____. **NBR 6118.** *Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – Procedimento*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1980.

_____. **NBR 6120.** *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

NINA, T. C. *Otimização de seções transversais de concreto armado: aplicação a pórticos planos*. 2006. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SINAPI. *Índices da Construção Civil. Preço de Insumos de Agosto de 2013*. Porto Alegre. Caixa, 2013.

SILVA, E. E. da. *Otimização de estruturas de concreto armado utilizando algoritmos genéticos.* 2001. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

TCPO. *Tabelas de composições de preços para orçamentos. 13ª ed. São Paulo.* Pini, 2010.