

# OTIMIZAÇÃO DE PAVIMENTOS DE EDIFÍCIOS COM ESTRUTURAS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Augusto Teixeira de Albuquerque<sup>1</sup>, Mounir Khalil El Debs<sup>2</sup> & Antonio Macário Cartaxo de Melo<sup>3</sup>

## Resumo

*As estruturas de concreto pré-moldado tendem a ser mais moduladas e mais padronizadas do que as estruturas de concreto moldadas no local, logo as técnicas de otimização podem produzir mais benefícios econômicos devido à produção em escala. Entre as técnicas de otimização utilizadas em engenharia estrutural, os algoritmos genéticos têm sido reconhecidos como uma forte tendência devido à sua facilidade de implementação e os excelentes resultados obtidos. Este trabalho trata da otimização integrada de pavimentos de edifícios com estruturas de concreto pré-moldado utilizando algoritmos genéticos e minimizando os custos. O principal objetivo é apresentar uma formulação para a otimização do pavimento, baseado em restrições arquitetônicas; restrições estruturais e restrições construtivas. A função-objetivo contemplou não só o consumo de materiais, mas também os aspectos relativos à fabricação, transporte e montagem.*

*Palavras-chave: Pavimentos de concreto pré-moldado. Otimização e algoritmos genéticos.*

## PRECAST CONCRETE FLOOR BUILDING OPTIMIZATION USING GENETIC ALGORITHM

### Abstract

*The precast concrete structures have a trend to be more modular and standardised, therefore the optimization technique can produce more benefits due the mass production. Among the optimization techniques used in structural engineering, the GA have been recognized as an excellent tool, due the easy implementation and the good results obtained. This paper deal with an integrated optimization for multistory precast concrete building using GA and minimizing the cost function. The main goal is to present a formulation for the floor optimization based on the architectural, structural and construction requirements, considering all the aspect as manufacturing and assembly.*

*Keywords: Precast concrete. Genetic Algorithm. Artificial intelligence.*

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil, durante um longo período, se acomodou por acreditar tratar-se de uma atividade artesanal. Hoje, busca recuperar o atraso tecnológico, procura mais eficiência nos processos construtivos e minimiza os desperdícios. Para isso muitos conceitos da indústria tradicional foram incorporados, desde as técnicas gerenciais até a automação das etapas de fabricação. Dentro deste contexto, as estruturas pré-moldadas em concreto estrutural ganham espaço. Trata-se de um produto literalmente industrial, onde as peças

<sup>1</sup> Doutor em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, augustoa@sc.usp.br

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

<sup>3</sup> Professor do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil da UFC, macario@ufc.br

produzidas em linhas de montagem são transportadas e montadas no local da obra. Com isso, ganha-se em controle de qualidade, em redução da mão-de-obra, em tempo de execução, com maior precisão administrativa, com menor índice de acidentes de trabalho, com menor influência das condições climáticas, com maior preservação do meio ambiente, com maior resistência aos incêndios e com maior durabilidade, já que se trata de um concreto de melhor qualidade.

Um substancial aumento no volume de obras com estruturas pré-moldadas tem ocorrido, bem como uma diversificação das áreas de aplicação. Esse sistema, largamente utilizado na Europa e nos Estados Unidos, se firma no Brasil e há muito tempo várias universidades nacionais desenvolvem pesquisas na área.

Algumas destas pesquisas têm lidado com a aplicação de técnicas de otimização ao projeto de estruturas pré-moldadas, que é uma união bastante pertinente já que as estruturas pré-moldadas são mais moduladas e padronizadas e feitas em linha de produção. Este aspecto torna mais fácil a modelagem do problema de otimização e produz economia em escala quando os resultados ótimos são alcançados.

Em um problema de otimização buscam-se valores para as variáveis de projeto que maximizem ou minimizem uma função-objetivo, que é sujeita a restrições.

Dentre as várias técnicas de otimização, os algoritmos genéticos vêm-se destacando como uma excelente ferramenta e por isso será utilizada neste trabalho. O primeiro trabalho desenvolvido, utilizando algoritmos genéticos no âmbito da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), foi o doutorado de CASTILHO (2002).

Os algoritmos genéticos tratam-se de uma técnica heurística baseada na teoria da evolução natural, em que as variáveis de projeto vão sendo combinadas e alteradas por meio de operadores tais como seleção, cruzamento e mutação. A avaliação dos resultados se dá por uma função-aptidão que é a função-objetivo penalizada pelas restrições do problema.

Define-se concepção estrutural como a escolha do sistema estrutural seguido da definição do posicionamento dos elementos estruturais: vigas, lajes e pilares. Denomina-se, neste trabalho como configuração estrutural, a etapa de definição do posicionamento e da quantidade dos elementos estruturais.

Motivado pela difícil etapa de concepção da estrutura, e baseado nos bons resultados de CASTILHO (2002) e de vários outros autores, com a utilização dos algoritmos genéticos, desenvolve-se aqui a otimização do pavimento de edifício com estrutura de concreto pré-moldado. O pavimento é otimizado desde sua configuração até o detalhamento dos elementos, ou seja, é feita uma otimização integrada.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os métodos convencionais de otimização apresentam algumas limitações tais como dificuldade de identificar soluções ótimas globais, pois são dependentes do ponto de partida, dificuldade de trabalhar com variáveis discretas e dificuldade de operar com funções não diferenciáveis. Devido a isso, muitas pesquisas têm-se voltado para métodos mais flexíveis e simples como os heurísticos. Dentre os métodos heurísticos, os algoritmos genéticos têm-se destacado pela sua eficiência e simplicidade.

Nos trabalhos pesquisados são citadas como vantagens do método: ser considerado uma técnica robusta de encontrar mínimo global; não precisar de cálculo de gradientes; não ser limitado por restrições do espaço como continuidade e derivadas; ser robusto e poder rapidamente explorar um complexo espaço multidimensional; ser de fácil implementação; ser comprovadamente confiável e estável; funcionar bem em problemas discretos e não diferenciáveis em que o valor da função objetivo muda drasticamente na faixa das variáveis de projeto.

Conforme KICINGER et al. (2005), após o seu completo levantamento sobre algoritmos evolucionários aplicados à engenharia estrutural, uma das áreas de pesquisa mais promissoras, na computação evolucionária, é a otimização integrada da estrutura. A otimização integrada da estrutura, deve considerar, ao mesmo tempo, a

fase de criação da configuração estrutural e a fase de detalhamento dos elementos, ao contrário dos processos tradicionais que pouco, ou nada, consideram a interação entre essas fases. Cita-se, até, que a otimização integrada surgiu com a difusão dos algoritmos genéticos, já que os métodos clássicos de otimização têm dificuldade para tratar problemas com variáveis de natureza distinta.

Vários trabalhos foram encontrados na literatura abordando diretamente o tema otimização integrada ou fazendo comentários sobre sua necessidade e importância. Apresentam-se as descrições dos mais relevantes.

SARMA e ADELI (1998), ao fazerem uma revisão sobre trabalhos em otimização de estruturas em concreto, citam que muitos trabalhos têm sido feitos sobre otimização de elementos estruturais, mas, que, na época, registraram apenas dois trabalhos que consideravam a estrutura completa. Comentam, então, a importância de os trabalhos utilizarem um modelo que melhor representasse a realidade, que otimizem uma estrutura real com vários elementos onde a otimização pudesse apresentar ganhos consideráveis. Comentam, ainda, que o custo da estrutura, muitas vezes, é tratado de maneira simplificada e, que seria significativa a consideração de uma função-custo mais representativa, incluindo mão-de-obra, transporte, montagem e fabricação. Anos depois, os mesmos autores (SARMA & ADELI, 2005) apresentaram uma otimização de todos os elementos de edifícios em estrutura metálica, mas a partir de uma configuração estrutural já definida.

SAHAAB et al. (2005b) também comentam a carência de trabalhos de otimização que contemplem a estrutura globalmente e, não, apenas, a otimização de seus elementos. Baseados nesta premissa, desenvolveram um trabalho de otimização de um pavimento de laje lisa em concreto armado. Neste trabalho, variam o *layout* dos pilares e otimizam com AG a laje do pavimento, porém não fica claro como são geradas as alternativas de *layout* da estrutura. A otimização é dividida em três níveis, inicialmente, otimiza-se a localização dos pilares; depois as dimensões; e, por fim, otimizam-se as armaduras dos elementos. Após a otimização via AG, o resultado é refinado por meio da técnica de Hooke & Jeeves, de programação matemática. Salientam a importância do custo do pavimento no custo total da estrutura, e apresentam os valores percentuais de cada etapa no custo total.

MILES et al. (2001) apresentam uma formulação para a otimização via AG, da configuração estrutural de um edifício em aço, levando em consideração aspectos de arquitetura e de instalações. Justificam o trabalho, citando que 80% dos custos de construção ficam definidos ao final da fase de projetos e, que, a pressão pela velocidade de projetos impede a análise de várias alternativas antes da escolha da estrutura. O sistema desenvolvido foi avaliado por vários projetistas, e foi considerado como uma ferramenta viável para utilização em projetos por 68% deles.

PULLMANN et al. (2003) apresentam uma formulação para a otimização da configuração de edifícios altos em concreto armado. Comentam a importância de uma otimização integral, que otimize ao mesmo tempo a configuração e o detalhamento, e comentam que a fase de concepção estrutural (fase inicial dos projetos), muitas vezes, é definida pela sensibilidade e experiência do engenheiro. Acontece que esta etapa tem muitas variáveis, e algumas alternativas teriam de ser analisadas para se chegar ao projeto mais econômico, de forma que uma ferramenta, que auxiliasse na otimização do projeto integral, seria de bastante utilidade. Lembram ainda que as decisões tomadas na fase da concepção estrutural são muito mais importantes em termos de execução e de custos, da estrutura, do que a otimização dos elementos isoladamente.

O trabalho descrito, no parágrafo anterior, requer que o usuário indique os alinhamentos onde poderiam ser inseridos os pilares e as vigas (Figura 1), de forma que o programa não fique totalmente livre. Esse aspecto é necessário, devido ao sistema estrutural adotado ser em concreto armado, moldado no local, que geralmente permite uma arquitetura mais complexa.

RAFIQ et al. (2003) apresentam uma formulação para a otimização apenas do sistema estrutural. A partir de uma área necessária de edificação propõe várias alternativas estruturais: estrutura metálica, concreto pré-moldado, em concreto protendido etc. Essas alternativas são baseadas em um vasto banco de dados que contém informações sobre a capacidade resistente de cada sistema. Na realidade, seria uma ferramenta onde se define inicialmente a estrutura e então a arquitetura está determinada, já que a área e a quantidade dos pavimentos também são variáveis.

O trabalho descrito acima é de difícil aplicabilidade já que o procedimento natural seria desenvolver um projeto estrutural, a partir de um projeto arquitetônico definido. Fazer uma otimização da arquitetura é muito complexo, devido ao algoritmo precisar tomar decisões em cima de uma programação arquitetônica em função do

tipo de edificação. O algoritmo precisaria idealizar todos os ambientes, bem como suas divisões internas, e circulações para poder definir as dimensões horizontais e verticais do pavimento.

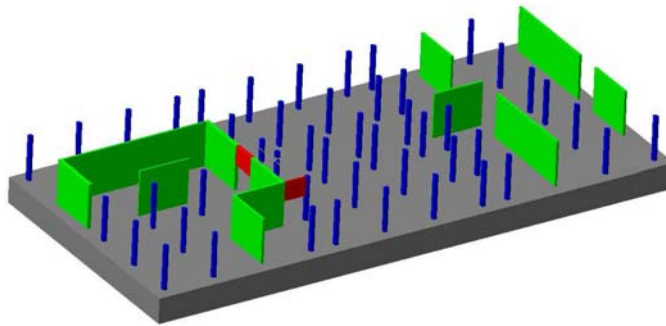


Figura 1 – Alternativas de posições para pilares e paredes. Fonte: PULMMANN *et al.* (2003).

GRIERSON *et al.* (2002), assim como RAFIQ *et al.* (2003), fazem uma otimização integrada superficial por considerarem a otimização desde a concepção arquitetônica até a escolha do sistema estrutural. Acredita-se que uma maneira mais factível seria, diante de um projeto arquitetônico, utilizar algoritmos que fizessem a otimização a partir da configuração estrutural até o detalhamento dos elementos. Esse algoritmo poderia ser personalizado para cada sistema estrutural separadamente para considerar todos os aspectos pertencentes aos sistemas. Dessa forma o edifício seria otimizado, para cada sistema separadamente, e depois os melhores resultados poderiam ser comparados.

KICINGER & ARCISZEWSKI (2004) apresentam uma otimização evolucionária integrada para estruturas metálicas de edifícios altos. Porém mantêm a posição dos pilares fixa, logo sobre a configuração estrutural a maior busca está nos elementos de contraventamento, já que a posição das vigas fica muito vinculada aos pilares.

Percebe-se, pelos trabalhos pesquisados, a grande potencialidade dos algoritmos genéticos como ferramenta de otimização em engenharia estrutural e também como ferramenta para criação de sistemas inteligentes.

Observa-se, porém, a inexistência de trabalhos de pesquisa em otimização estrutural integrada especificamente para edifícios em concreto pré-moldado, que sirvam de suporte ao projetista de estruturas no desenvolvimento específico do projeto estrutural, considerando todas as particularidades inerentes ao sistema estrutural tais como resistência, fabricação e montagem.

De acordo com o que foi exposto e comentado, o trabalho desenvolvido neste trabalho busca, a partir de uma arquitetura definida, uma otimização integrada em estruturas pré-moldadas desde a configuração estrutural até o completo detalhamento dos elementos (vigas e lajes). A configuração estrutural, o detalhamento das vigas e dos pilares, a fabricação, o transporte e a montagem são consideradas dentro de uma mesma rotina, já que são etapas muito dependentes.

### 3 SISTEMA ESTRUTURAL ADOTADO

A preocupação com o sistema estrutural se justifica devido ao fato de representar a maior parte dos custos e do peso de um edifício em concreto pré-moldado. Salieta-se que o item “custo da estrutura” compreende o custo do sistema estrutural em si e, também, os efeitos causados nas demais etapas da obra, como nas instalações e nos revestimentos.

Foi feita uma pesquisa junto aos fabricantes, no Brasil, para identificar os sistemas estruturais mais utilizados em concreto pré-moldado (ALBUQUERQUE, 2007). Baseado no levantamento realizado, adotou-se como alternativa estrutural, a ser utilizada no Sistema de Apoio à Tomada de

Decisão (SATD), uma estrutura composta por lajes alveolares apoiadas sobre vigas “T” invertidas (Figura 2). Este sistema, conforme os dados apresentados é prioritariamente o mais utilizado no Brasil.

Será adotada uma capa de concreto moldada no local de 5 cm em todo o pavimento. A capa de concreto, conforme os questionários dos projetistas de estruturas, é utilizada praticamente em todas as obras, além de melhorar o desempenho das peças (lajes e vigas) para a flexão como seções compostas, facilita as ligações e implementa o efeito do diafragma no pavimento (PCI, 2004).

Ainda conforme o levantamento sobre os sistemas utilizados no Brasil, os fabricantes esperam que as obras sejam planejadas, ou seja, que a arquitetura já contemple o uso do concreto pré-moldado. Logo, a modulação é fundamental. Diante disso o SATD, partindo de uma arquitetura definida de um pavimento retangular, faz uma busca por uma estrutura modulada que obtenha o melhor desempenho em termos de economia, obedecendo a todas as restrições arquitetônicas, de fabricação, de transporte, de montagem e técnicas.

Sobre a localização da escada e dos elevadores, admite-se que, a partir do pavimento modulado, respeitando-se os vãos mínimos exigidos pela arquitetura, pode ajustar-se o posicionamento dos vazios da escada e dos elevadores, a partir da inserção de algumas vigas extras para definição do contorno. Ressalta-se, ainda, que de acordo com KHAJEPOUR (2001), a área referente à região de escada e aos elevadores corresponde, em média, a apenas 20% do pavimento total.

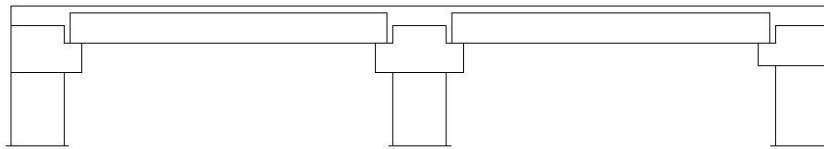


Figura 2 – Exemplo de Conventional System.

A adoção de um único sistema estrutural (lajes alveolares apoiadas em vigas “T”) deve-se às informações dos fabricantes que indicaram este sistema como sendo o preferencial para os edifícios residenciais, comerciais e hotéis.

### 3.1 Estrutura modulada

Com o intuito de atestar a representatividade de se adotar uma estrutura modulada, apresentam-se vários exemplos de sua aplicação, de forma que se constata ser uma prática corrente nos projetos.

Em PRIOR et al. (1993), para se fazerem comparações entre as estruturas catalogadas, utilizou-se uma estrutura modulada. Os exemplos apresentados no PCI (2004) também são de estruturas moduladas. Muitos dos projetos, a que se teve acesso pelo levantamento feito no Brasil, também apresentam estruturas moduladas.

Cita-se, ainda, que a hipótese da estrutura modulada foi assumida em vários trabalhos que otimizam a configuração estrutural. Entre esses trabalhos, estão GRIERSON et al. (2002), RAFIQ et al. (2003) e PULLMANN et al. (2003). Existem também vários projetos que, embora não sejam completamente modulados, apresentam uma área bastante representativa que o é.

### 3.2 Características dos elementos estruturais

A geometria das lajes e das vigas não pode assumir valores aleatórios, já que cada fabricante possui seus moldes. Assim, os formatos das lajes alveolares e as dimensões das vigas são variáveis

discretas. Diante disso, o SATD deve ser alimentado pelo fabricante com suas famílias de vigas e lajes, de forma que a busca seja feita entre opções disponíveis. Neste trabalho foram adotadas as peças disponíveis do fabricante T&A, mas a adaptação para quaisquer outras indústrias é perfeitamente viável, já que seria apenas uma mudança no banco de dados.

#### a) Lajes

Para cada tipo de laje foram adotadas alternativas de protensão, considerando quantidade e bitola de cordoalhas, em função dos padrões da indústria. Esses padrões são estabelecidos em função dos pentes metálicos que servem de guias para os fios na pista. Essas combinações, entre tipo de laje e armadura de protensão adotadas, produziram 32 opções de lajes.

#### b) Vigas

As vigas “T” invertidas são definidas a partir de sua largura e altura, adicionando-se à largura da viga os dentes necessários ao apoio das lajes (15 cm para cada lado, valor adotado em função da experiência do fabricante). As vigas podem ser produzidas com larguras ( $b_w$ ) entre 40 cm e 90 cm, variando em 10 cm, e alturas ( $h_v$ ) entre 20 cm e 40 cm, variando em 5 cm. Combinando-se largura e altura obtêm-se 32 opções de geometria de vigas. Salienta-se que para as vigas de borda a geometria seria a mesma da viga “T” sem um dos dentes para apoio das lajes.

Observa-se que a altura da base da viga ( $h_v$ ) é ainda acrescida da altura da laje alveolar e mais a capa de concreto (5 cm) e a altura total da viga pré-moldada é composta da altura da viga ( $h_v$ ) mais a altura da laje, subtraída de 5 cm, de forma que a seção moldada no local sobre a viga tem 10 cm de altura (Figura 4).

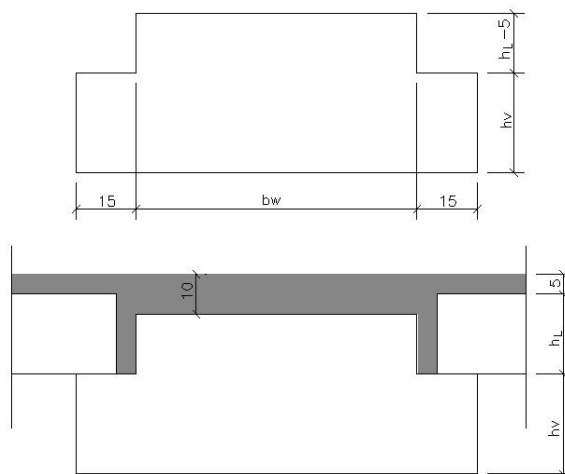


Figura 4 – Viga “T” invertida seção composta (unidades em “cm”).

#### c) Pilares

Segundo as informações de vários fabricantes consultados, as seções de pilares não variam muito entre os projetos de edifícios pré-moldados. A partir disso, assumiu-se, como simplificação, a utilização de uma tabela em função da capacidade de carga da seção do pilar. A tabela foi construída considerando-se uma resistência de 40 MPa para o concreto com uma taxa de aço de 3,0 % e uma distância de piso a piso de 4,0 m.

A partir de um levantamento realizado em vários projetos estruturais com concreto de resistência 40 MPa, observou-se que o consumo médio de aço nos pilares é de 100 kg/m<sup>3</sup> a 200 kg/m<sup>3</sup>, dependendo da altura do edifício. Logo se adotou uma tabela para contemplar a diferença de consumo de aço no pilar para resistências diferentes, a partir da faixa citada.

### 3.3 Resistência à compressão do concreto

Em função dos resultados encontrados no levantamento brasileiro, as resistências do concreto podem assumir (em MPa) os valores: 20, 25, 30 e 35 para o concreto moldado no local utilizado na capa ( $f_{ckml}$ ) e os valores: 35, 40, 45 e 50 para o concreto pré-moldado ( $f_{ckpm}$ ). Essas resistências ( $f_{ckpm}$  e  $f_{ckml}$ ) são variáveis de projeto e o custo, por volume (R\$/m<sup>3</sup>) de cada uma dessas resistências, deve ser informado pelo usuário, de acordo com os valores praticados em sua região.

### 3.4 Hipótese de cálculo adotado

Adotou-se como hipótese, simplificadora de cálculo, que as lajes são isostáticas e que as vigas também são, para o peso próprio, porém, são hiperestáticas para as cargas de pavimentação, de revestimento, de divisórias e a carga acidental.

## 4 SISTEMA DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO (SATD)

O SATD é um sistema de apoio à tomada de decisão, na busca da configuração estrutural ótima de edifícios de múltiplos pavimentos com planta retangular em concreto pré-moldado, utilizando-se a técnica dos algoritmos genéticos. O sistema fornece ao usuário quase todos os resultados necessários ao desenvolvimento de um projeto, desde a configuração estrutural até o detalhamento dos elementos. Maiores informações do SATD podem ser encontradas em ALBUQUERQUE (2007).

No processo tradicional, o projetista estrutural inicialmente adota algumas alternativas de concepção estrutural, que são os estudos preliminares, para fazer a escolha, entre as, que atendam a todos os critérios, da que apresente menor custo. Os critérios analisados são técnicos, construtivos e arquitetônicos. Sabe-se da dificuldade, por mais experiente que seja o projetista, de comparar os custos totais das estruturas entre as alternativas existentes, além do tempo demandado para fazer a análise de várias alternativas. Salienta-se ainda que essa análise deve ser realizada, não só por quem está projetando a estrutura, mas também por quem irá fabricar e executar a estrutura, ou seja, o fabricante e o montador.

Diante disso, enfatiza-se a importância de uma ferramenta que sirva de suporte ao projetista e, ao mesmo tempo, já tenha embutido as informações necessárias da indústria para aferir os custos, e fazer as comparações. Com isso, o projetista garante que suas comparações estariam levando em consideração custos baseados em dados mais representativos.

### 4.1 Diretrizes do programa SATD

As vigas e lajes são verificadas para todas as fases transitórias (armazenamento, transporte e montagem), estados limites de serviço e estados limites últimos. Para os estados limites de serviço, e últimos, são consideradas as seções compostas em função da capa existente de concreto moldado no local e verificadas segundo a NBR-6118 (2003).

Não se considerou para a otimização das vigas a verificação das armaduras de cisalhamento, porém foi computada uma armadura mínima de cisalhamento na composição dos custos. A consideração da armadura mínima, para as vigas, é necessária porque o SATD trata de uma otimização global, envolvendo, ao mesmo tempo, lajes, vigas e pilares, onde todos são computados em conjunto e por isso têm de estar quantificados por completo.

Segundo SAHAAB et al. (2005), pode-se desprezar a verificação da estabilidade global, sem prejudicar a otimização do pavimento, admitindo-se que os esforços laterais serão absorvidos por pilares paredes e núcleos, localizados nas caixas de escada e elevadores.

## 4.2 Dados de entrada

Na entrada de dados define-se o pavimento a ser otimizado, a geometria e os carregamentos, além de definir as restrições arquitetônicas que influem nos resultados. O usuário deverá informar ao sistema os seguintes dados de entrada:

- a) As dimensões do pavimento na direção X ( $l_x$ ) e na direção Y ( $l_y$ );
- b) As distâncias mínimas aceitáveis entre os eixos de pilares na direção X e na direção Y ( $d_{minx}$  e  $d_{miny}$ );
- c) Número total de pavimentos do edifício;
- d) A altura máxima que o pavimento pode ter;
- e) Largura máxima da alma da viga ( $b_{wmax}$ );
- f) Sobrecarga: carga acidental atuando no pavimento;
- g) Carga permanente adicional: carga de pavimentação e revestimento atuando no pavimento;
- h) Paredes sobre laje: carga distribuída de paredes atuando nas lajes;
- i) Número de indivíduos da população: número total de indivíduos que comporá cada geração;
- j) Número de indivíduos para o elitismo;
- k) Número total de gerações;
- l) Taxa de cruzamento;
- m) Taxa de mutação;

## 4.3 Resultados

O sistema fornece como resultados várias alternativas de projetos estruturais, enumeradas em ordem crescente em função do custo. Estas alternativas de projeto indicam a configuração estrutural, bem como o dimensionamento das vigas e lajes. A configuração estrutural é composta pelo posicionamento dos elementos estruturais, tais como lajes, vigas e pilares, e pela definição dos vãos das vigas e das lajes. O dimensionamento compreende a geometria e as armaduras das lajes e vigas. O item armaduras é composto pela quantidade e o diâmetro dos cabos de protensão e das barras de armadura.

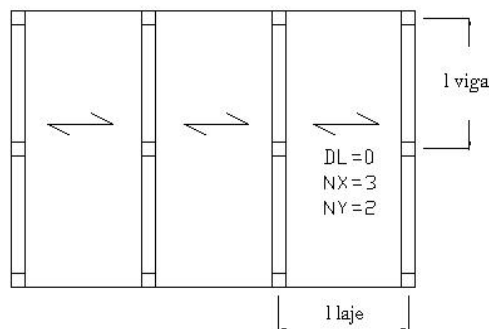


Figura 5 – Direção assumida pelas lajes e vãos (neste exemplo com 3 divisões na direção X e 2 divisões na direção Y).



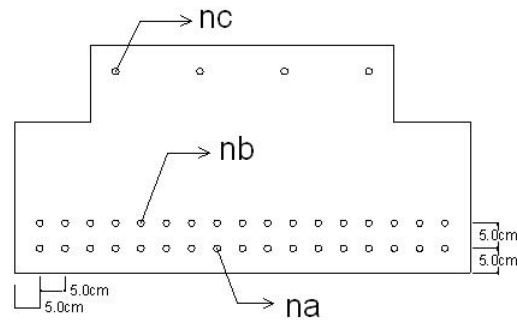


Figura 6 – Disposição dos cabos de protensão nas vigas.

Essas alternativas são chamadas de indivíduos, e alguns esclarecimentos são apresentados abaixo:

- a) Direção das lajes (DL) : As lajes podem ser disponibilizadas na direção X (DL=0) ou na direção Y (DL=1) (Figura 5);
- b)  $f_{ckml}$  e  $f_{ckpm}$  : Resistências à compressão características dos concretos utilizados, moldados no local (capa) e pré-moldados;
- c)  $h_{laje}$  : Altura da laje alveolar (Figura 4);
- d)  $l_{laje}$  : Vão da laje na direção determinada por DL (Figura 5);
- e)  $h_v$  : Altura da base da viga, isto é, a altura do dente que recebe a laje alveolar (Figura 4);
- f)  $b_w$  : Largura da alma da viga, exceto os dentes, 15 cm para cada lado sendo 30 cm no total (Figura 4);
- g)  $l_{viga}$  : Vão da viga na direção determinada por DL (Figura 5);
- h)  $n_A$  e  $n_B$ : Número de cabos de protensão em camadas nas vigas (Figura 6);
- i) NPT : Número de barras de armadura passiva, também nas vigas;
- j) VL : Tipo de laje, deve-se consultar a tabela que vincula ao valor de VL, a altura da laje ( $h_{laje}(VL)$ ) e a configuração da protensão que é definida por: quantidade de cabos (N), diâmetro dos cabos adotados (cordoalha), força de protensão ( $P_a(VL)$ ), área total de protensão ( $A_{pl}(VL)$ ) e o limite máximo da linha neutra ( $x_{máx}(VL)$ ). São disponibilizadas 32 combinações;
- k) VV : Tipo de viga, deve-se consultar a tabela que vincula, ao valor de VV, a altura da viga ( $h_v(VV)$ ), a largura da alma da viga ( $b_w(VV)$ ) e a quantidade máxima de cabos de protensão nessa viga, por camada ( $n_{máx}(VV)$ ). São disponibilizadas 32 combinações entre altura e base;

Com estes valores tem-se a configuração estrutural e o dimensionamento do pavimento. As listas com as possibilidades de vigas e lajes podem ser ampliadas ou reduzidas, de acordo com a necessidade do usuário e a disponibilidade do fabricante.

#### 4.4 Função-custo

O fabricante de pré-moldados entrega a estrutura montada no local, logo o SATD procura contemplar todos os custos efetivos, desde a fabricação até a montagem da estrutura pré-moldada. Esses custos se dividem em fabricação (insumos, mão-de-obra, custos indiretos, armazenamento, transporte interno), transporte externo, montagem, impostos e lucro.

Segundo PRIOR et al. (1993), um sistema eficiente deve procurar otimizar a capacidade do meio de transporte e a utilização do equipamento de montagem. Além disso, devem-se considerar as

diferenças entre as atividades, já que trabalhos distintos têm custos diferenciados. Cita-se, como exemplo, a fabricação da laje alveolar e da viga que utilizam procedimentos e equipamentos distintos.

Conforme o PCI (2004), um layout econômico deve contemplar a modulação das vigas em relação ao comprimento das pistas, para que se tenha um máximo de aproveitamento na produção, bem como uma análise dos equipamentos de transporte e montagem, de forma que todas as etapas sejam racionalizadas.

Observa-se que as considerações feitas nos dois parágrafos anteriores estão contempladas no SATD.

## 5 CARACTERÍSTICAS DO ALGORITMO GENÉTICO IMPLEMENTADO

Em CASTILHO (2002), foram feitos vários testes variando-se os operadores: seleção, cruzamento, mutação e restauro da população. Em todos os exemplos apresentados, foi utilizada uma alternativa denominada MGA1, baseando-se na seleção tipo RANK e implementada por CASTILHO (2002). Este algoritmo genético apresentou sempre excelentes resultados e por isso a maioria de seus operadores também foi implementada neste trabalho.

Partindo de uma população inicial, gerada aleatoriamente, faz-se a ordenação tipo RANK. A partir dessa ordenação, já se estabelecem quais os indivíduos que passam pelo elitismo, de acordo com os dados de entrada, e a quantidade de indivíduos que participarão do cruzamento, que é calculada multiplicando-se  $p$ , que é a probabilidade de cruzamento, pelo tamanho da população. Para completar a população, após o cruzamento, novos indivíduos são gerados randomicamente, e esta fase é chamada de restauro da população.

### 5.1 Tamanho da população

Existem algumas indicações na literatura sobre o tamanho da população inicial (KHAN (2002), GOLDBERG (1989) e CARROLL (1999)), mas observou-se que estas indicações forneciam populações iniciais muito pequenas e que os resultados não estavam satisfatórios. Diante disso, adotaram-se tamanhos de populações bem superiores nos exemplos testados, conforme LEMONGE (1999) que também usou populações bem superiores às preconizadas pelas equações abaixo.

Observa-se que, além do tamanho do cromossomo, os indicativos de tamanho da população deveriam considerar a quantidade e intensidade das restrições verificadas. Como esta informação é muito particular de cada problema, acredita-se que o mais razoável seria calibrar cada modelo em função do problema analisado. Determina-se assim o tamanho da população, a quantidade de gerações e os parâmetros do algoritmo genético (elitismo, probabilidade de cruzamento e mutação).

O tamanho da população influencia diretamente a sua diversidade. Adotou-se como estratégia a geração de uma população inicial bem maior, que é avaliada e ordenada. Dessa forma selecionam-se os melhores indivíduos para entrarem no ciclo evolucionário com uma população previamente selecionada. Optou-se por adotar uma população inicial dez vezes maior do que a população do ciclo geracional.

### 5.2 Variáveis de projeto

As variáveis de projeto são parâmetros variáveis que definem o problema, quando se caminha no espaço de busca. Os valores, alimentados aleatoriamente pelo sistema, permitem que seja calculada a função-aptidão de cada indivíduo. As variáveis de projeto são:

a) DL: Direção da laje;

- b)  $N_x$  e  $N_y$ : Números de vãos em que serão divididas as dimensões do pavimento. A partir desta informação e da direção da laje, pode-se calcular os vãos das lajes ( $l_{laje}$ ) e das vigas ( $l_{viga}$ ), que são variáveis dependentes;
- c) PM e CML: Variáveis auxiliares que vão determinar os valores das resistências do concreto moldado no local e do concreto pré-moldado em função das listas;
- d) ANPT e ABP: Variáveis auxiliares que vão determinar, em função das listas, a quantidade e a bitola da armadura passiva das vigas;
- e) ANA e ANB: Variáveis auxiliares que vão determinar, em função das listas, a quantidade de cordoalhas de protensão nas vigas;
- f) VL: Tipo de laje, definindo geometria e protensão;
- g) VV: Tipo de viga, definindo geometria.

Cada fabricante já possui as formas para as vigas, definindo suas possíveis variações de geometria, possui as máquinas para a confecção das lajes e as características da pista que definem as características da protensão. A partir disto tem-se que:

- a) A quantidade de barras de armaduras passivas NPT(i) pode assumir os valores: 0, 2, 4 e 6. Essas barras são posicionadas, na zona inferior da viga, para ajudar a resistir aos esforços de momentos fletores positivos;
- b) A área das bitolas de armaduras passivas BP(i) pode assumir os valores correspondentes às áreas das barras de 6,0 mm, 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm. Essas bitolas são utilizadas com a quantidade do item anterior;
- c) A quantidade de cordoalhas na primeira camada da viga  $n_A(i)$  pode ser: 3, 5, 6, 7, 8, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 e 23;
- d) A quantidade de cordoalhas na segunda camada da viga  $n_B(i)$  pode ser: 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 14;
- e) O número de divisões de vãos nas direções X e Y ( $N_x$  e  $N_y$ ) podem ser de 1 a 16. Considerando que a dimensão máxima do pavimento seja de 80 m, tem-se que 16 divisões proporcionariam um vão de 5,0 m, no mínimo, que é razoável;

### 5.3 Representação

Um aspecto importante da representação é dar a possibilidade de surgirem todas as soluções possíveis no domínio. Segundo MICHALEWICZ (1994), uma representação binária não seria eficiente para problemas com configuração em torno 100 variáveis de projeto e com domínio variando entre [-500:500], que não é o caso do problema em questão.

Por se tratar, em sua maioria, de variáveis que as regiões viáveis pertencem à indústria, ou seja, que têm suas possíveis geometrias e dimensões estabelecidas, são variáveis discretas e, por isso, adotou-se que todas as variáveis também seriam discretas. Desta forma uniformizou-se a representação das variáveis. Em se tratando de variáveis discretas adotou-se a representação binária que seria a mais indicada para a formação das listas.

## 5.4 Tamanho do cromossomo

O comprimento do cromossomo é variável em função dos dados de entrada, ou seja, se estipula o espaço de busca, baseado nas restrições arquitetônicas e com isso se fixa o tamanho do cromossomo. Isso não quer dizer que se tenha adotado tamanho de cromossomo variável, pois que, uma vez definido o tamanho do cromossomo, ele permanece constante até o fim do processamento.

Esta variação do cromossomo se dá por meio da redução do espaço de busca, ou seja, redução da lista. A quantidade máxima de bits que um indivíduo pode ter é 34, mas, em função de cada estrutura, pode diminuir até uma quantidade de 29 bits. Esta variação, no tamanho do cromossomo, se dá em função da distância mínima entre pilares e da largura máxima da viga.

Calcula-se a quantidade máxima de vãos que se pode ter em cada direção, utilizando-se os ajustes  $A_{jX}$  e  $A_{jY}$ , e, em função deste valor, diminui-se o tamanho da lista, já que os vãos poderiam ser divididos em até 16 partes ( $N_X$  e  $N_Y$ ). Desta forma evita-se que o sistema percorra um espaço que se sabe previamente ineficaz.

Em função da informação da largura máxima que a viga pode ter, fornecida nos dados de entrada, diminuem-se as opções da lista de vigas.

## 5.5 Função-objetivo penalizada (aptidão)

Adotou-se a mesma estratégia de penalidade utilizada em RAJEEV & KRISHNAMOORTHY (1992) e GOVINDARAJ & RAMASAMY (2005), que é interessante por levar em consideração a intensidade dela.

Seja  $g_j$  uma restrição genérica dada por: 
$$g_j = \frac{\sigma_{Calculado}}{\sigma_{Admissível}} - 1 \leq 0$$

E "C" dado por: 
$$C = \sum_{j=1}^m c_j \text{ e } c_j = \begin{cases} g_j \rightarrow g_j > 0 \\ 0 \rightarrow g_j \leq 0 \end{cases}$$

Tem-se então que a função aptidão é: 
$$\phi = f(x) \cdot (1 + KC)$$

Onde  $\sigma_{calculado}$  e  $\sigma_{admissível}$  são os valores calculados e admissíveis; m= quantidade de restrições;  $\phi$ = função-objetivo penalizada (função-aptidão); K= intensidade da penalização e g= restrições verificadas.

A função penalidade funciona no algoritmo genético da mesma forma que o meio ambiente funciona na evolução das espécies, ou seja, faz pressão sobre a população para extrair os melhores indivíduos. Contudo, é importante que se mantenha a diversidade da população.

## 5.6 Operadores genéticos

**Seleção:** Os indivíduos selecionam-se para o elitismo, cruzamento, e para serem descartados em função de uma seleção tipo RANK. Na seleção tipo RANK os indivíduos têm sua função-aptidão

calculada, e, em função desse valor, colocados em uma ordem crescente. Por se tratar de um problema de minimização, o primeiro indivíduo, que é o que tem a menor aptidão, é o melhor indivíduo.

Em função do RANK, são retirados os indivíduos que vão seguir intactos para a próxima geração, e, escolhidos os que vão para o cruzamento. Essas quantidades são definidas nos dados de entrada do SATD por meio do elitismo, da taxa de cruzamento e do tamanho da população. O restante é descartado, e geram-se novos indivíduos, aleatoriamente, para restaurar a população.

**Cruzamento:** Adotou-se o cruzamento uniforme que foi testado em vários trabalhos (SAHAAB (2005) e CASTILHO (2002), por exemplo) e se mostrou bastante eficiente. Esse tipo de cruzamento consiste em se adotar uma máscara, de mesmo tamanho do cromossomo, e, em função dos valores de cada bit da máscara, padroniza-se a formação dos filhos. Adotou-se que, para o bit da máscara igual a "1", o bit do primeiro filho seria o mesmo do pai e o bit do segundo filho o mesmo da mãe. Para o bit da máscara igual a "0" se faz o contrário.

Para cada nova geração é criada aleatoriamente uma nova máscara, que é válida para todos os cruzamentos dentro dessa geração.

**Mutação:** Exceto os indivíduos que passaram pelo elitismo, todos os outros podem sofrer mutação. Adotou-se, na maioria dos exemplos, uma mutação de 1%, valor utilizado em vários dos trabalhos da literatura. Esse valor foi verificado, também, mediante vários exemplos no SATD, como sendo uma boa recomendação.

Adotou-se no SATD que, para cada gene, seria gerado aleatoriamente um número real entre 0 e 100, e, sempre que esse número fosse menor ou igual a taxa de mutação, o valor do gene seria trocado.

## 5.7 Transgênicos

Trata-se de uma modificação artificial imposta ao genótipo para melhorar alguma manifestação da característica do indivíduo (fenótipo). Segundo o biólogo Cláudio Picanço<sup>3</sup>, pesquisador do INPI, produz-se um transgênico quando se insere um gene de interesse e, por isso, é uma modificação pontual. Diferente da genética clássica, em que as características aparecem em função da aleatoriedade do cruzamento entre indivíduos com características diferentes.

No caso, foi adotado para o número de cabos de protensão na viga, a fim de evitar que apareçam mais cabos na segunda camada do que na primeira, que é, previamente sabido, uma situação anti-econômica. O algoritmo sempre que decodifica uma situação dessa, automaticamente troca o valor de  $n_B$  por  $n_A$  e vice-versa, atribuindo o maior valor sempre a  $n_A$ .

Essa rotina é importante porque diminui a busca por alternativas que se sabe, previamente, não serem eficientes, e concentra a procura dentro de uma situação desejável. Para verificar a eficácia, foram feitos processamentos para dois exemplos, comparando os resultados sem a rotina dos transgênicos, implementada e com a rotina implementada.

Utilizou-se, como primeiro exemplo, um pavimento de 30 m por 15 m, com uma restrição de vão mínimo de 7,0 m, com altura máxima de 60 cm e largura máxima da viga de 80 cm. Para o segundo exemplo, repetiu-se o primeiro exemplo, alterando a restrição de vão mínimo para 5,0 m.

Observou-se, no primeiro exemplo, uma redução média no custo da estrutura de 0,57% e, no segundo, uma redução média de 0,42%. Além da redução do custo, observa-se que, na grande

---

<sup>3</sup> Correspondência eletrônica em maio de 2006

maioria dos processamentos com a rotina dos transgênicos, a convergência se deu antes em relação aos processamentos sem a rotina dos transgênicos. Com a implementação da rotina dos transgênicos a convergência passou a se dá, em média, na geração 1065 enquanto antes da implementação a convergência se dava, em média, na geração 1682.

Ressalta-se ainda que o SATD está parametrizado de forma que existem 16 opções de quantidades de cabos, na primeira camada, e, apenas 8 opções para a segunda camada, de forma que naturalmente já existem mais opções com mais quantidade na primeira camada. Então para testar o desempenho da rotina alterou-se esta parametrização para que se tivessem as mesmas 16 possibilidades na segunda camada e observou-se que a redução média nos custos da estrutura passou a ser de 0,61%.

## 5.8 Rotina dos gêmeos

Observou-se que, em alguns processamentos, os indivíduos da elite eram iguais, e então se inseriu uma rotina que verifica se os integrantes da elite são gêmeos (iguais). Caso a verificação seja positiva, um gêmeo é colocado para o cruzamento, e o primeiro indivíduo, que faria parte do cruzamento, entra no lugar deixado pelo gêmeo. A partir dessa implementação, foram refeitos exemplos em que apareciam gêmeos e obteve-se como resultado a inserção de novos indivíduos, sem se perder o melhor resultado que já havia sido encontrado. A partir do exemplo 1 fizeram-se novos processamentos, sem a rotina dos gêmeos, e chegou-se a uma redução média na melhor aptidão de 0,3%, inclusive. De forma que houve uma melhoria na diversidade da população, além da melhoria na aptidão do melhor indivíduo.

## 6 EXEMPLO WALL MART

Inicialmente foram feitos vários processamentos, baseados em dois exemplos, com o intuito de calibrar o SATD e verificar sua consistência. Posteriormente, foram utilizados 2 projetos como *benchmark* para validar os resultados do SATD e o exemplo do Wal Mart é apresentado a seguir.

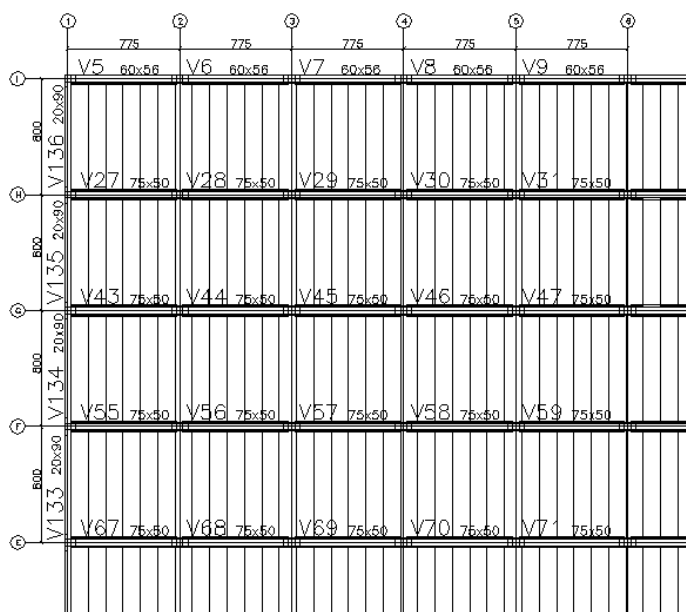


Figura 7 – Região modulada do pavimento do Wal Mart – Bonocô (medidas em “cm”).

O edifício Wall Mart – Bonocô é um supermercado com 3 pavimentos projetado para ser construído em Salvador/BA. Uma parcela significativa do pavimento é modulada ( $l_x=46,5$  m e  $l_y=48,0$  m), conforme a Figura 7, e existia, na região modulada, uma restrição arquitetônica para que os vãos livres de pilares fossem de 7,0 m. Forneceu-se ao SATD essa restrição de vão mínimo, a altura máxima que o pavimento poderia assumir, de 60 cm, e o carregamento de 8 kN/m<sup>2</sup>. No carregamento, estão incluídos pavimentação, revestimento, divisórias e carga acidental.

Tabela 4 – Tabela comparativa entre o projeto e os resultados do SATD

Dados	Projeto	SATD (1)	SATD (2)	SATD (3)	SATD (4)
Configuração (N <sub>v</sub> /N <sub>w</sub> /DI)	6/6/1	6/6/1	6/6/0	6/6/1	6/6/1
$f_{ckml}$	25	25	20	20	30
$f_{ckPM}$	40	40	40	40	40
$h_L$	20	21	20	20	20
$h_V$	30	30	30	25	25
$b_w$	60	50	60	70	60
$l_{viga}$	7,75	7,75	8,0	7,75	7,75
$l_{laje}$	8,0	8,0	7,75	8,0	8,0
Custo (R\$/m <sup>2</sup> )	-	215,6	216,3	216,2	212,5

Observa-se que o SATD indicou várias soluções (Tabela 4) e, que duas delas (SATD 1 e SATD 4) são bastante próximas da estrutura concebida pelo projeto original. As informações de armadura não foram apresentadas em função desse projeto está em fase preliminar, sem detalhamento.

Observa-se também que existem outras alternativas, com praticamente o mesmo custo, como a solução em que as lajes e vigas mudam de direção assumindo nova configuração (SATD 2, Figura 8) e a solução em que a viga é mais chata e o pavimento fica mais baixo (SATD 3, Figura 9). Dessa forma, o projetista tem alternativas com o mesmo desempenho para fazer a escolha.

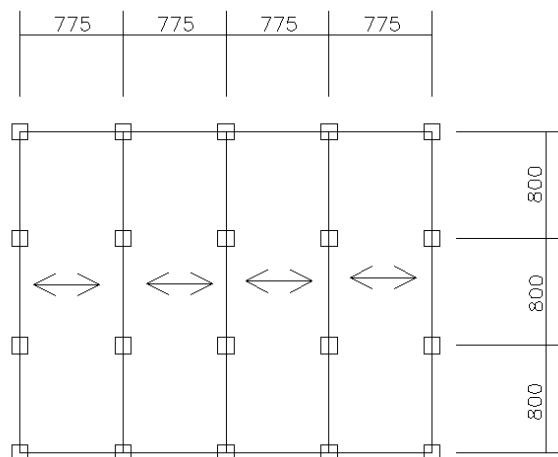


Figura 8 – Configuração estrutural da alternativa 2 (medidas em “cm”).

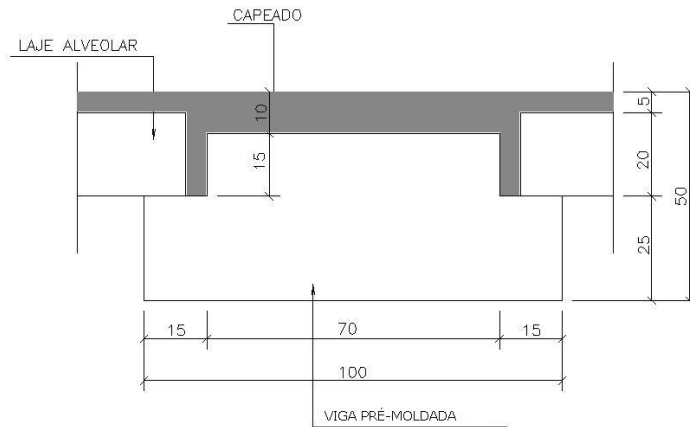


Figura 9 – Seção de viga da alternativa 3 (medidas em “cm”).

Desses resultados, constata-se ainda que os custos são consistentes, porque, segundo informações do fabricante T&A, os custos dos edifícios pré-moldados variam entre R\$ 200,00 / m<sup>2</sup> e R\$ 300,00 / m<sup>2</sup>, e que a participação das etapas fabricação, transporte e montagem, na composição de custos, também confere com os dados médios do fabricante.

## 7 CONCLUSÕES

Os resultados apresentam bastante consistência e coerência, já que a grande maioria dos processamentos indicaram a mesma resistência para o concreto pré-moldado adotada pela T&A ( $f_{ckPM}=40$  MPa), bem como as resistências mais usuais para o concreto moldado no local. Esses valores também coincidem com a maioria das obras catalogadas no banco de dados.

A diversidade de alternativas apresentadas comprova um dos aspectos ressaltados nos algoritmos genéticos, que é a obtenção de uma população de resultados e, não, de apenas um resultado para cada processamento. Outro aspecto importante é o fato de apresentar resultados com aptidões muito próximas, mas com variáveis de projeto bem distintas. Fato justificável por se tratar de um problema de otimização combinatória em que não se evidencia uma vizinhança para os resultados.

Observou-se a mesma participação no custo total das atividades de fabricação, transporte e montagem nos resultados do SATD e nos valores informados pelo fabricante.

Salienta-se, ainda, que os custos finais encontrados conferem com a faixa de valores praticados e fornecidos também pela T&A, que é de R\$ 200,00 a R\$ 300,00 /m<sup>2</sup>. Isso reflete a representatividade da função-objetivo, que foi adotada de acordo com as informações do fabricante.

O SATD indica que pode ser uma boa ferramenta de apoio ao desenvolvimento de projetos, realizando as comparações entre estudos preliminares, e deixando para o Engenheiro a tarefa de refinar e determinar particularidades para cada obra, baseado em um pré-projeto já dimensionado e otimizado. Verificou-se uma grande coincidência entre os projetos adotados na prática e os resultados fornecidos pelo SATD.

## 8 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES e à FUNCAP pelo apoio financeiro, sem o qual esta pesquisa não poderia ter sido realizada.



## 9 REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building code requirements for structural concrete**. Farmington Hills, 1995. (ACI-318M).
- CARROLL, D. L. **Fortran GA driver**: Manual of program. CU aerospace, Champaign, Illinois: 1999.
- ALBUQUERQUE, A. T. **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, 2002.
- GRIERSON, D. E. *et al.* Method for conceptual design applied to office buildings. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 16, n. 2, Apr., 2002.
- GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning**. U.S.A.: Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- GOVINDARAJ, V.; RAMASAMY, J. V. Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using Genetic Algorithms. **Computers & Structures**, n. 84, p. 34-48, 2005.
- KHAJEHPOUR, S. **Optimal conceptual design of high-rise office buildings**. Tese (Doutorado) – University of Waterloo, 2001.
- KICINGER, R. *et al.* Evolutionary computation and structural design: A survey of the state of art. **Computers & Structures**, n. 83, p. 1943-1978, 2005.
- KICINGER, R.; ARCISZEWSKI, T. Multiobjective Evolutionary Design of Steel Structures in Tall Buildings. In: INTELLIGENT SYSTEMS TECHNICAL CONFERENCE, 1., Chicago, IL, 2004. **Proceedings...** 2004.
- MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + data structures = evolution programs**. Berlim: Springer-Verlag, 1996.
- MILES, J. C. *et al.* The conceptual design of commercial buildings using a genetic algorithm. **Computers & Structures**, n. 79, p. 1583-1592, 2001.
- PCI. **Design Handbook**. 6 ed., Chicago, Illinois: 2004.
- PRAKASH, A.; AGARWALA, S. K.; SINGER, K. K. Optimum design of reinforced concrete sections. **Computers & Structures**. v. 30, n. 4, p. 1009-1011, 1988.
- PRIOR, R.; PESSIKI, S.; SAUSE, R.; SLAUGHTER, S.; van ZYVERDEN, W. **Identification and preliminary assessment of existing precast concrete floor framing systems**. Bethlehem, Lehigh University, 1993. (ATLSS Report 93-07).
- PULLMANN, T. *et al.* **Structural design of reinforced concrete tall buildings: Evolutionary computation approach using fuzzy sets**. In: INTERNATIONAL WORKSHOP OF THE EUROPEAN GROUP FOR INTELLIGENT COMPUTING ENGINEERING, 10., **Proceedings...** Delft, Netherlands, p. 53-61, 2003.
- RAFIQ, M. Y. *et al.* Conceptual Building Design – Evolutionary Approach. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 17, n. 3, July, 2003

RAJEV, S.; KRISHNAMOORTHY, C. S. (1992). Discrete optimization of structures using Genetic Algorithm. **Journal of Structural Engineering**, ASCE, v. 118, n. 5, p. 1233-1250.

SAHAB, M. G. *et al.* A hybrid genetic algorithm for reinforced concrete flat slab buildings. **Computers & Structures**, 83, p. 551-559, 2005a.

SAHAB, M. G. *et al.* Cost optimization of reinforced concrete flat slab buildings. **Engineering Structures**, v. 27, p. 313-322, 2005b.

SARMA, K. C.; ADEL, H. Cost optimization of concrete structures. **Journal of Structural Engineering**, ASCE, v. 124, n. 5, p. 570-578, May, 1998.

SARMA, K. C.; ADELI, H. Comparative study of optimum designs of steel high rise building structures using allowable stress design and load and resistance factor design codes. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, ASCE, v. 10, n. 1, Feb., 2005.