

1 **Introdução**

1.1 **Considerações Gerais**

O desejo de se obter o projeto ideal, considerando aspectos relacionados ao consumo dos materiais, desempenho ou eficiência, sempre foi um dos principais objetivos da engenharia estrutural. Tarefa esta tornada cada vez mais difícil frente aos projetos atuais, com estruturas cada vez mais esbeltas e complexas, onde apenas a experiência e o bom senso do projetista já não permitem mais alcançá-la.

Paralelamente, o surgimento dos micro-computadores e de modernos programas de análise estrutural, capazes de analisar em alguns segundos sistemas complexos, estáticos ou dinâmicos, considerando ou não as não-linearidades, proporcionaram à engenharia estrutural um grande avanço na busca por sistemas estruturais mais eficientes e de baixo consumo. Com estas ferramentas, passou-se a investigar dezenas de modelos estruturais, analisando a estrutura como um todo, até obter-se aquela considerada a melhor opção para o projeto.

Nessa busca, o projetista procura, freqüentemente, apenas ajustar as dimensões dos elementos estruturais, de modo a garantir o atendimento aos estados limites, sem considerar se a configuração geométrica final poderia, ou o quanto poderia, ser melhorada. Tal conduta se deve quase que exclusivamente às limitações impostas ao engenheiro pelo processo de projeto tradicional, pois a busca do projeto ótimo, mesmo partindo de um modelo estrutural pré-estabelecido, à base de tentativa e erro, é certamente uma tarefa inviável.

Com o objetivo de transpor as barreiras, impostas pelo processo de projeto tradicional na busca pelo projeto ótimo, é que as técnicas de otimização mostraram-se como ferramentas extremamente valiosas. Colocadas à disposição do projetista estrutural, com o objetivo de suprir não as suas deficiências mas sim suas naturais limitações, inerentes aos projetos estruturais, frente a modelos cada vez mais complexos.

Matematicamente, um problema de otimização pode ser enunciado como:

$$\begin{array}{lll}
\text{Minimizar} & f(x) & \\
\text{sujeito a} & c_i(x) = 0 & i = 1 \dots l \\
& c_i(x) \leq 0 & i = l + 1 \dots m \\
& x_i^l \leq x_i \leq x_i^u & i = 1 \dots n
\end{array} \quad (1.1)$$

onde x representa o vetor de variáveis, reais ou discretas, sobre o qual são impostos os limites mínimos e máximos (restrições laterais), $f(x)$ representa a função objetivo, adotada como medida quantitativa do desempenho do sistema analisado, a ser minimizada e as funções $c_i(x)$ representam as restrições de igualdade e desigualdade impostas ao sistema. Em geral, $f(x)$ e $c_i(x)$ são funções não-lineares e implícitas das variáveis (x) que definem o problema.

Os algoritmos usados para a solução de um problema de otimização podem ser, basicamente, determinísticos ou probabilísticos. Os métodos de otimização determinísticos, também denominados métodos clássicos, nos quais incluem-se os métodos de programação matemática, em geral são baseados nos cálculos de derivadas de primeira ordem ou no cálculo de derivadas parciais de segunda ordem. Por trabalharem com o cálculo de derivadas são denominados algoritmos de ordem n , onde n é a maior derivada utilizada. Enquanto isso, os métodos baseados nos algoritmos probabilísticos introduzem no processo de otimização dados e parâmetros estocásticos resolvendo o problema do ponto de vista probabilístico.

Os métodos clássicos de programação matemática são geralmente baseados em estratégias descendentes. Nestas, a partir de uma solução inicial, denominada solução básica, e com base no cálculo de derivadas para indicar a direção na qual se deve caminhar uma nova solução é gerada. O processo é então repetido até que nenhuma melhora seja verificada no valor da função objetivo.

São algoritmos considerados rápidos e eficientes. A solução encontrada é, contudo, extremamente dependente do ponto de inicial de partida. Podendo, dependendo das características do problema, conduzir a obtenção de uma melhor solução nas vizinhanças da solução inicial, mas não necessariamente a solução ótima global. A estratégia usual para melhorar a solução obtida consiste na análise do problema a partir de diversas soluções iniciais. Adicionalmente, estes métodos têm dificuldade de analisar problemas quando estes envolvem variáveis discretas.

Os métodos probabilísticos, nos quais se incluem os algoritmos genéticos e *simulated annealing* (recozimento simulado), entre outros, por não empregarem o cálculo de derivadas, mas sim atuarem diretamente na busca das soluções no espaço viável, são classificados como métodos de ordem zero. Além disso, estes métodos trabalham adequadamente, tanto com parâmetros contínuos, como discretos, ou ainda com uma combinação deles.

Os métodos probabilísticos não se prendem tão facilmente a extremos locais, uma vez que a busca é realizada dentro de toda a região viável disponível, sendo, por esta razão, considerados algoritmos de otimização global. Estes métodos, entretanto, exigem um grande número de avaliações do valor da função objetivo e das restrições, sendo considerados métodos computacionalmente caros caso a avaliação da função objetivo e das restrições demandem um tempo computacional considerável.

Existem diversos tipos de algoritmos, cada um com suas particularidades, de modo que a escolha de um único algoritmo universal de otimização é totalmente impossível. Cada problema possui características próprias que devem ser analisadas para uma boa escolha do algoritmo ou método adequado.

Neste trabalho são utilizados algoritmos de programação matemática para a solução do problema de otimização. A programação matemática é abordada de forma mais detalhada no capítulo 5 deste trabalho. Quanto aos métodos probabilísticos, maiores detalhes podem ser encontrados em Silva (2001), Kripka (2003) e Bastos (2004).

1.2

Revisão Bibliográfica

O primeiro trabalho documentado sobre otimização estrutural foi escrito por Maxwell em 1869, cujo interesse era a obtenção do projeto de treliças de peso mínimo. Já trabalhos envolvendo concreto armado, são bem mais recentes, sendo o estudo de Langendonck, em 1950, sobre o dimensionamento econômico de seções retangulares submetidas à flexão normal simples, um dos pioneiros nessa área (Macário, 2000). Segundo Kripka (2003), a utilização de técnicas de otimização aplicadas à análise e ao dimensionamento de estruturas foi impulsionada principalmente pelo trabalho apresentado por Schmit, em 1960, no

qual técnicas de programação matemática foram utilizadas com o objetivo de minimizar o peso de uma treliça.

Entre os trabalhos aplicados a otimização às seções isoladas de concreto armado, encontram-se, entre outros, os trabalhos desenvolvidos por Éboli (1989) e Horowitz (1991), ambos aplicados ao dimensionamento ótimo de seções quaisquer de concreto armado submetidas à flexão composta oblíqua. Nestes, cada barra de aço constitui uma variável independente, e tem posicionamento pré-definido. Com exceção de umas poucas barras de aço, dispostas em pontos específicos, é permitido que as barras de aço venham a apresentar valores de área iguais a zero. A função objetivo é constituída pela área total de aço na seção. Como diferença entre os dois trabalhos, tem-se o emprego por Horowitz (1991) da estratégia da solução em multinível e o emprego do parâmetro D para definir a deformada da seção correspondente ao estado limite último por Éboli (1989).

Nesta mesma classe de problema incluem-se ainda trabalhos bem mais recentes como o desenvolvido por Bastos (2004), no qual o autor emprega o método dos algoritmos genéticos para otimizar seções retangulares de concreto armado submetidas a flexão composta oblíqua. As variáveis de projeto assumem valores discretos, e não mais valores reais. Base e altura da seção, dentro de limite estabelecido, assumem apenas dimensões múltiplas de 5 cm. A armadura deixa de ser uma variável simples, passando a ser caracterizada pelo diâmetro, número e distribuição das barras na seção.

Seguindo uma evolução natural, surgiram ao longo do tempo, aplicações da teoria da otimização a elementos individuais, como os trabalhos de Chakrabarty (1992) e Sousa Junior *et al* (1993).

Chakrabarty (1992) propõe formulação para otimização de vigas de concreto armado de seção retangular por unidade de comprimento. São variáveis de projeto a base, a altura útil e a armadura longitudinal da seção transversal, adotando-se custos diferenciados para as formas laterais e de fundo. Variações no peso próprio da viga, ao longo do processo, são levadas em conta na determinação do momento fletor. As restrições impostas referem-se ao equilíbrio nas seções e dimensões mínimas. A técnica de programação geométrica é empregada para resolver o problema.

Sousa Júnior (1993) propõe duas formulações para projeto ótimo de colunas de concreto armado considerando os efeitos de 2ª ordem. A primeira formulação

obtem uma configuração deformada da coluna por meio da integração numérica das curvaturas, enquanto que a segunda formulação admite a hipótese usual de curvatura senoidal. A seção transversal pode ser qualquer. As barras de aço são posicionadas em postos fixos e admitidas constantes ao longo do comprimento da coluna. Estas podem ser consideradas variáveis ponto a ponto ou com uma percentagem fixa da armadura total. A função objetivo é representada pela área total de aço. São consideradas restrições relativas à resistência (flexão composta oblíqua) e à armadura máxima.

Nesta mesma linha de trabalho, incluem-se formulações de projeto ótimo de vigas contínuas com armadura simples, como os apresentados por Kirsch (1983), baseado em uma análise elástica, e Urban (1992), baseado no teorema do limite inferior da plasticidade. São variáveis de projeto os momentos solicitantes, as alturas das seções transversais e as armaduras longitudinais e transversais. São impostas restrições relativas à resistência (momento e cortante), às deflexões e ao limite máximo permitido às armaduras longitudinais e transversais.

Adicionalmente, Urban (1992) impõe restrições às condições de equilíbrio e limitação da configuração deformada nos domínios de deformação 2 e 3, a fim de evitar seções superarmadas. Enquanto Kirsch (1983) impõe restrições limitando a redistribuição máxima do momento fletor elástico. Uma outra diferença entre os dois modelos está na utilização por Kirsch (1983) da estratégia da otimização em multinível, decompondo o problema em 3 diferentes níveis.

Cita-se ainda o trabalho de Andrade (1992), no qual o custo da viga é admitido proporcional a área do momento fletor resistente. Desta forma tem-se com objetivo minimizar a área deste diagrama. As variáveis de projeto são os momentos fletores resistentes e solicitantes, determinados a partir de análise limite baseada no teorema do limite inferior. As dimensões da viga são admitidas fixas. O problema de otimização é resolvido a partir de um algoritmo de programação linear.

Uma visão histórica mais detalhada a respeito da aplicação de técnicas de otimização ao dimensionamento de seções e elementos isolados de concreto armado podem ser encontradas em Bastos (2003).

Formulações aplicadas a otimização de pavimentos de concreto armado, considerando a não-linearidade física com inércia flexional determinada a partir

da expressão proposta por BRANSON, são propostas por Soares e El Debs (1999) e Kripka (2003).

Na proposta de Soares e El Debs (1999), a análise é desenvolvida pelo método dos elementos finitos. São variáveis de projeto as alturas e as armaduras longitudinais, de tração e compressão, das vigas. São impostas restrições relativas à taxa geométrica da armadura de tração e à taxa geométrica de compressão em relação a de tração. Quanto ao deslocamento máximo permitido, este é verificado somente após a determinação das alturas e armaduras ótimas das vigas. Caso a flecha limite não seja atendida, são dados incrementos até que a viga alcance a rigidez necessária. A função objetivo, constituída pelo custo do concreto, aço e forma, é aplicada a cada viga isoladamente. Parte-se do princípio de que a minimização de um conjunto de vigas equivale a minimização da grelha como um todo, sendo a interação entre as vigas da estrutura feita por processo iterativo. A solução ótima do problema é obtida pelo método das aproximações combinadas.

Na proposta de Kripka (2003) a análise é desenvolvida pelo modelo de grelhas. Ao contrário do modelo de Soares e El Debs (1999), no trabalho de Kripka, a estrutura é otimizada como um todo. As variáveis e restrições são as mesmas empregadas no modelo anterior. Com o objetivo de evitar a convergência para um mínimo local, o método *simulated annealing*, um algoritmo de busca exaustiva, é empregado. Apesar de ser um método adequado ao tratamento de variáveis discretas, estas foram assumidas contínuas. Segundo o autor, o número de cálculos do valor da função objetivo, necessário até alcançar a convergência, é bastante elevado se comparado ao obtido com a utilização de métodos de programação matemática, sendo este método indicado, especialmente, para problemas nos quais as técnicas usuais não são eficientes. O autor observa ainda que, para apenas 3 variáveis, o número de análises necessárias seria superior a 129 milhões, caso se desejasse investigar a resposta a cada uma das possíveis combinações, considerando apenas alturas múltiplas de 5 cm e permitindo-as variar de 20 cm a 100 cm. Entre as conclusões apresentadas, destaca-se ainda a constatação de que o projeto ótimo de estruturas simétrica, com carregamento igualmente simétrico, não conduz a seções iguais para todos os elementos. Estudos anteriores desenvolvidos pelo autor, em 2002, abordando a minimização do peso de grelhas, constataam que seções transversais idênticas correspondem à situação de menor inércia possível.

Estudos tratando da otimização das estruturas por inteiro, e não apenas de um elemento, como os aplicados a pavimentos de estruturas de concreto armado, são considerados de extrema importância por estarem mais próximos dos modelos estruturais empregados nos projetos de estruturas de edifícios de concreto armado.

Adiciona-se a esta classe de problemas, com igual ou maior importância, as formulações aplicadas a pórticos planos e espaciais por permitirem incorporar ao problema, não apenas restrições relativas à resistência da estrutura, mas também, restrições associadas à rigidez da estrutura como um todo, com influência direta na estabilidade global e na capacidade de contraventamento do sistema estrutural. Restrições relativas a rigidez do sistema estrutural são, geralmente, aplicadas na forma de limitação ao deslocamento lateral da estrutural, limitações à frequência natural e relativas a carga crítica de instabilidade.

Entre outros trabalhos, cita-se as formulações aplicadas a pórticos planos apresentadas por Gerlein (1979), Spires e Arora (1990), Moharrami e Grierson (1993), Macário (2000) e Silva (2001); e o trabalho de Balling e Yao (1997), aplicado a pórticos espaciais.

O trabalho de Gerlein (1979) é baseado na teoria do colapso plástico rígido. Aproximações do teorema do limite superior da plasticidade, onde os mecanismos de colapsos básicos são combinados na busca da melhor estimativa do limite superior, é utilizada. No projeto, a formação de rótulas plásticas é limitada às vigas. A soma da capacidade plástica dos pilares em um nó da estrutura é admitida ao menos igual a soma da capacidade das vigas nesse nó. São considerados mecanismos de barra, para as cargas verticais, mecanismos de pórtico, para as cargas horizontais, e um mecanismo combinado. Nenhuma limitação é imposta às rotações plásticas. O efeito $P-\Delta$ e a deformação axial dos pilares são desprezados. Os momentos plásticos resistentes são aproximados por funções lineares da área de aço. São variáveis de projeto apenas a armadura das vigas. As dimensões da seção transversal das vigas e pilares são fixas. A função objetivo a ser minimizada é composta pela soma dos momentos resistentes plástico de cada uma das barra da estrutura multiplicados pelo comprimento assumido para as armaduras. Todas as restrições são definidas em termos do momento plástico resistente.

No trabalho de Spires e Arora (1990), a análise é desenvolvida pelo método dos elementos finitos, sendo os efeitos globais de 2ª ordem avaliados por um método iterativo aproximado. No exemplo estudado, a estrutura de interesse,

originalmente tridimensional, é substituída por um pórtico plano equivalente. São consideradas cargas gravitacionais e laterais. A função objetivo é constituída pelo custo do concreto, forma e aço das vigas e pilares, sendo adotado diferentes custos para o concreto de vigas e pilares. Desta forma, são variáveis de projeto as dimensões da seção transversal das vigas e colunas, admitidas retangulares, e as correspondentes armaduras longitudinais, dispostas de forma simétrica e em posições predefinidas nas seções transversais desses elementos. A cada pavimento é assumido que vigas e pilares apresentam a mesma dimensão. As restrições impostas são o deslocamento lateral, a frequência natural da estrutura, bem como as restrições limitantes das dimensões da seção transversal das vigas e pilares. Quanto ao estado limite último este é verificado segundo ACI 318-83.

A formulação proposta por Moharrami e Grierson (1993), para a otimização de pórticos planos, emprega um critério de optimalidade. Uma análise elástica é desenvolvida a partir do método dos deslocamentos. Cargas gravitacionais, incluindo o peso próprio, e cargas horizontais, a partir das quais sete casos de carga são gerados, são considerados na análise. Dois são relativos ao estado limite de serviço e cinco associadas ao estado limite último. Adicionalmente uma análise $P-\Delta$ é conduzida para a avaliação dos efeitos de 2ª ordem nas extremidades das colunas. São variáveis de projeto as dimensões da seção transversal e as armaduras longitudinais das vigas e pilares. São impostas restrições relativas às resistências (compressão, flexão e cisalhamento) e aos deslocamentos verticais das vigas e laterais da estrutura.

No trabalho de Macário (2000), também aplicado à otimização de pórticos planos de concreto armado, uma análise mais refinada é desenvolvida através do método dos elementos finitos. A não linearidade física e a geométrica são consideradas como decorrência das relações tensão-deformação dos materiais e da hipótese de rotações moderadas, respectivamente. As condições de equilíbrio são abordadas implicitamente, na forma de programação matemática. Além das restrições relativas à resistência e ao deslocamento, é incluída uma restrição relativa a carga crítica de instabilidade da estrutura, e outra, ainda que de forma simplificada, relativa à fissuração. O critério de resistência é tratado na forma de restrições nas forças normais e nas excentricidades solicitantes. São consideradas variáveis de projeto a altura da seção transversal bem como as armaduras superior

e inferior dos elementos que compõe o pórtico. Apesar da altura dos elementos variar ao longo do processo, o peso próprio da estrutura é admitido constante.

Segundo o autor, os resultados do trabalho sugerem que a restrição relativa ao estado limite de deformação excessiva é sempre limitante, atuando como um freio na perda de estabilidade da estrutura, enquanto que as restrições associadas à abertura de fissura para cargas de serviço mostraram-se inativas na solução ótima.

No trabalho desenvolvido por Silva (2001) para a otimização de pórticos planos, assim como no trabalho de Macário (2000), são consideradas variáveis de projeto a altura da seção transversal bem como as armaduras superior e inferior dos elementos que compõe o pórtico. O método de otimização utilizado é o método dos algoritmos genéticos, e não mais a programação matemática. As variáveis de projeto passam a ser discretas. A armadura deixa de ser uma variável simples, passando a ser caracterizada pelo diâmetro, número e distribuição das barras na seção. A altura das vigas e pilares assumem apenas valores múltiplos de 5cm. O processo é desenvolvido em duas etapas. Inicialmente, faz-se a otimização das dimensões como variáveis discretas e das áreas de aço como variáveis contínuas, para em seguida se adaptar as áreas de aço às bitolas comerciais.

Uma análise linear elástica é desenvolvida através dos métodos dos elementos finitos. São consideradas restrições relativas à resistência, ao deslocamento, relativas às dimensões máximas e mínimas das seções transversais dos elementos, além de restrições associadas ao espaçamento entre as barras de aço, tanto nas vigas quanto nos pilares.

Os estudos desenvolvidos por Balling e Yao (1997) são considerados de grande importância para o presente trabalho. Primeiro, por empregar um modelo de pórtico espacial utilizado na quase totalidade dos edifícios atualmente projetados. Segundo, por realizar um estudo comparativo entre métodos clássicos de programação matemática e métodos não determinísticos; e adicionalmente, pela proposição de um modelo de baixo custo computacional, denominado método Simplificado.

No modelo de Balling e Yao (1997) são variáveis de projeto as dimensões da seção transversal ($b's$ e $h's$) dos membros, todos retangulares, e a armadura total (A_s) dos referidos membros. São admitidas cargas permanentes devido às lajes. O peso próprio das vigas e pilares não é considerado. Incluem-se ainda cargas acidentais verticais e de vento. Uma análise linear elástica é desenvolvida

para o pórtico espacial. Os efeitos de 2ª ordem não são considerados. A função a ser otimizada é constituída pelo custo do concreto, armação e forma das vigas e pilares.

Adicionalmente, um modelo de otimização em multinível é aplicado. O problema de otimização é subdividido em um sistema de otimização e problemas de otimização individuais. No sistema de otimização são determinadas as dimensões da seção transversal (b 's e h 's) de todos os elementos do pórtico, enquanto que nos problemas de otimização individual dos membros, admitindo as dimensões da seção, b e h , e as forças internas como parâmetros constantes, são determinadas as armaduras de cada membro.

A fim de efetuar as análise comparativas, um mesmo problema é resolvido por três diferentes modelos de otimização a saber: no primeiro, denominado método Multinível, a variável A_s passa a ser caracterizada pelo diâmetro, número e distribuição das barras na seção, sendo utilizado o método probabilístico *simulated annealing* na determinação dos parâmetros relativos à armadura; no segundo, denominado método Tradicional, o problema de otimização é formulado em um único nível, não havendo portanto decomposição de variáveis. A_s é tratada como variável simples, sendo o posicionamento das barras de aço na seção transversal pré-fixado; e no terceiro, denominado método Simplificado, a estratégia de multinível volta a ser aplicada. A armadura, contudo, é mantida como variável simples, assim como no método Tradicional.

Ao final do processo, os autores concluíram que os valores ótimos das dimensões da seção transversal (b 's e h 's) são insensíveis ao número, diâmetro e distribuição das barras de aço na seção, pois, a consideração de A_s tanto como variável simples quanto como variável discreta (diâmetro, número e distribuição das barras na seção) pouco influencia no valor da função objetivo na solução ótima. As diferenças observadas foram inferiores a 5%. E, além de não promover soluções melhores, a utilização do método *simulated annealing*, por requerer um grande número de chamadas para avaliar a função de custo e restrições para tratar A_s como variável discreta, conduziu a um tempo de processamento de até 165 vezes maior que o tempo de processamento necessário para resolver o mesmo problema pelo método Tradicional, razão pela qual, o método Multinível, só pode ser realisticamente aplicado a pequenos pórticos.

Com respeito ao método Simplificado, este mostrou-se duas vezes mais rápido que o método tradicional quando aplicado a pórticos de pequeno porte e diversas vezes mais rápido para pórticos de grande porte.

A estratégia de solução em multinível tem sido utilizada por diversos outros pesquisadores com o objetivo de reduzir o tempo de processamento. Entre os trabalhos que empregam esta técnica incluem-se: Kirsch (1983), que para o projeto ótimo de vigas contínuas decompôs o problema em três níveis, sendo que no primeiro os momentos de projeto são otimizados, no segundo as dimensões de cada elemento são otimizadas, e, finalmente, no terceiro nível são determinadas as armaduras ótimas; Horowitz (1991), subdividiu o problema de dimensionamento ótimo de colunas em dois níveis, um para determinar a configuração deformada da seção que corresponda à menor área de aço possível e outro para determinar a armadura ótima, vindo a reduzir, em aproximadamente dois terços, o esforço computacional envolvido no problema.

Apesar da grande diversidade de métodos e modelos desenvolvidos e adaptados à otimização, Cohn *et al* (1994) enfatiza, com base em mais de 500 exemplos retirados de artigos e livros, a grande preocupação dos trabalhos com os aspectos matemáticos, sendo a maioria destes de interesse puramente acadêmico.

1.3 **Objetivos e Justificativas**

O presente trabalho apresenta uma formulação para minimizar o custo de pilares de edifícios altos de concreto armado modelados como pórticos espaciais. A escolha desta classe de problema está associada ao emprego do modelo de pórtico espacial na quase totalidade dos projetos de edifícios altos de concreto armado atualmente desenvolvidos. O objetivo final do trabalho é o desenvolvimento de um produto de aplicação prática a partir da implementação da formulação proposta, que seja realmente capaz de auxiliar os projetistas na busca por estruturas de edifícios altos de concreto armado mais eficientes.

Seguindo a linha de pesquisa, Aplicação de Técnicas de Otimização, desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, o problema de otimização proposto é resolvido empregando-se técnicas de programação matemática. Dando-se, desta forma, continuidade aos diversos trabalhos afins já desenvolvidos na instituição.

A dificuldade desses métodos em lidar com variáveis discretas não pode ser considerada restrição a sua aplicação à problemas práticos. A consideração das dimensões dos pilares como variáveis reais, e não discretas, é perfeitamente aceitável e consistente, deixando-se os ajustes das dimensões dos pilares para valores usuais a cargo do projetista. Poder-se-ia, ainda, construir um processo de ajuste em duas etapas, efetuando ajustes iniciais em apenas uma das dimensões do pilares, tornando-as assim constantes de projeto. Em seguida, o novo problema seria resolvido, com número reduzido de variáveis, para ao término do processo se efetuar os ajustes finais. Cabe frisar que, se for considerada a utilização apenas de valores múltiplos de 5 cm, os ajustes promovidos pelo engenheiro serão inferiores a 2,5 cm. Mesmo repetindo-se o processo duas ou três vezes, o esforço computacional certamente seria diversas vezes inferior ao exigido se métodos probabilísticos, como o método dos algoritmos genéticos e o *simulated annealing*, fossem empregados.

Quanto a armadura, a utilização desta como variável simples, e não como variável discreta, encontra-se amparada pela constatação feita por Balling e Yao (1997) de que os valores ótimos das dimensões da seção transversal (b 's e h 's) são insensíveis ao número, diâmetro e distribuição das barras de aço na seção transversal.

Face ao exposto, considera-se que a dificuldade dos métodos de programação matemática em tratar variáveis discretas não deve ser caracterizada como desvantagem, mas apenas como uma característica desses métodos, que em pouco prejudica a qualidade dos resultados obtidos.

Não constitui objetivo do presente trabalho realizar análises comparativas entre os métodos clássicos de programação matemática e métodos probabilísticos. Busca-se apenas justificar, de forma sucinta, a escolha de métodos clássicos, apesar das dificuldade que esses métodos apresentam em tratar as variáveis de projeto como discreta, forma como estas variáveis realmente se apresentam na prática.

Deve-se, contudo, enfatizar que a observação feita nos parágrafos anteriores referem-se a classe de problema tratada no presente trabalho. Em estudos como o realizado por Olivieri (2004), tratando da otimização do projeto de pontes pré-moldadas protendidas, no qual tem-se como variáveis de projeto um grupo de seções em perfis tipo I padronizados, além do número de longarinas a ser utilizado

no tabuleiro da ponte, entre outras variáveis, métodos probabilísticos mostram-se porém, certamente, mais atrativos. O método dos algoritmos genéticos é utilizado na solução do problema.

O presente trabalho segue, em linhas gerais, o modelo proposto por Balling e Yao (1997). A estrutura de decomposição é mantida. A armadura distribui-se de forma uniforme e contínua ao longo do perímetro da seção, e não mais como pontos discretos. Acredita-se assim, que a distribuição de A_s na seção transversal pode adaptar-se de forma mais consistente às mudanças sofridas pela geometria dos pilares ao longo do processo de otimização. Inclui-se, ainda, a resistência característica à compressão do concreto, f_{ck} , até o limite de 50 MPa, limite das classes de resistência do grupo I, como variável de projeto. Seções transversais do tipo “U”, “L” e circulares passam a ser admissíveis para os pilares. As vigas são admitidas com dimensões fixas. A variação nos custos das vigas, decorrentes das variações nos esforços solicitantes ao longo do processo de otimização, não é aqui considerada. São consideradas cargas devidas ao peso próprio da estrutura, cargas acidentais verticais e de vento. Adicionalmente, a fim de incorporar os efeitos globais de 2ª ordem, a análise torna-se não-linear geométrica. A não-linearidade física é tratada de forma aproximada, segundo critérios estabelecidos pela NBR 6118 (2003), o que na prática não incorpora não linearidade na análise da estrutura devido à não linearidade física.

Esta tese é parte integrante de duas linhas de pesquisa do DEC/PUC-Rio: a de Aplicação de Técnicas de Otimização e a de Estruturas de Concreto Armado e Protendido. O trabalho de Eboli (1989), tratando do dimensionamento ótimo de seções de concreto à flexão composta oblíqua, é precursor nestas duas linhas de pesquisa. Seguindo neste caminho, têm-se os trabalhos de Sousa Junior (1992) aplicado ao projeto ótimo de pilares, e Urban (1992), Silva (1994) e Santos (2003) aplicados ao projeto ótimo de vigas de concreto armado.

Na solução do problema de projeto ótimo proposto emprega-se o algoritmo de otimização de Han-Powell, proposto por Han (1976) e (1977) e por Powell (1978), implementado e aplicado a problemas de Engenharia Estrutural no DEC/PUC-Rio por Eboli (1989), Parente (1995,2000) e Farfán (2000), e o algoritmo de Pontos Interiores, implementado e aplicado a problemas de

Engenharia Estrutural no DEC/PUC-Rio por Parente (2000). Ambos os algoritmos utilizam os gradientes da função objetivo e das restrições impostas ao problema.

1.4

Escopo do trabalho

Para facilitar o entendimento, a tese foi dividida em diversos capítulos, cujo conteúdo é apresentado a seguir.

No capítulo 2 são apresentados conceitos e parâmetros normativos a partir dos quais um sistema de contraventamento é caracterizado. Adicionalmente, é realizada uma breve discussão a respeito da aplicação de processos de projeto tradicionais e ótimos na busca por sistemas de contraventamento eficientes e econômicos.

No capítulo 3 trata-se das definições do modelo e da análise estrutural considerada no presente trabalho. Descrevem-se as combinações e fatores de ponderação das ações para a definição dos carregamentos atuantes na estrutura. Mostra-se a hipótese de lajes como pavimento rígido e, por fim, apresenta-se a estratégia de solução adotada para solução da análise não linear geométrica da estrutura.

No capítulo 4 são apresentados conceitos básicos referentes ao dimensionamento de seções de concreto armado à flexão composta oblíqua e ao dimensionamento de pilares segundo a NBR 6118 (2003).

No capítulo 5 são apresentados os conceitos gerais de programação matemática e os algoritmos utilizados neste trabalho. O capítulo mostra quais as informações necessárias para os algoritmos de otimização, com o objetivo de facilitar o entendimento da organização do sistema computacional implementado.

No Capítulo 6 é apresentada a formulação do modelo de otimização de dimensões proposto para edifícios de concreto armado modelados como pórtico espacial. A estratégia de decomposição do problema em multiníveis é empregada. O modelo proposto inclui restrições sobre os deslocamentos laterais do topo do edifício, restrições sobre a resistência e limites de armadura dos pilares. São também consideradas restrições laterais, a fim de estabelecer os limites máximos e mínimos às variáveis de projeto, bem como restrições laterais relativas, que visam garantir que, nos casos em que ocorram reduções nas seções dos pilares ao longo

da altura, os lances superiores não venham apresentar dimensões maiores que as dos lances inferiores.

No Capítulo 7 são apresentadas as expressões relativas à análise de sensibilidade, necessárias dentro do modelo de otimização proposto, e que foram implementadas no presente trabalho.

No Capítulo 8 são descritos os algoritmos implementados para compor, juntamente com os algoritmos de otimização de Han-Powell, o processo de otimização como um todo. Adicionalmente, exemplos idealizados, empregando a formulação proposta, são apresentados.

Finalmente, no Capítulo 9 são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.