

1 Introdução

1.1. Considerações iniciais e objetivos

Um projetista deve lidar com a existência de incertezas nas variáveis de projeto de maneira que faça com que o desempenho do projeto, como esperado, seja seguro e confiável. Para este propósito dois métodos têm sido utilizados para quantificar as incertezas nas variáveis de projeto de engenharia e seus efeitos no nível de segurança do projeto. O primeiro é o projeto baseado no método semiprobabilístico. Nesse método os fatores parciais de segurança são utilizados sobre as resistências dos materiais e sobre as cargas aplicadas visando obter uma probabilidade de falha adequada. Esse método será aqui denominado de método determinístico (Deterministic Design Optimization, DDO), pois, uma vez que os fatores parciais de segurança são aplicados, as variáveis passam a serem tratadas como determinísticas. O segundo método é o projeto baseado em confiabilidade, no qual as propriedades estatísticas das variáveis envolvidas no projeto são utilizadas para se dimensionar a estrutura com um valor alvo de confiabilidade.

Na busca do projeto mais interessante (mais leve, mais barato,...) o emprego de técnicas de programação matemática tem se tornado muito populares tanto para os métodos determinísticos quanto para os baseados em confiabilidade.

No campo da otimização estrutural determinística, os projetistas não conhecem a probabilidade de falha que a solução encontrada pode oferecer. O objetivo da Otimização Baseada na Confiabilidade (Reliability-Based Design Optimization, RBDO) é projetar estruturas econômicas que apresentem probabilidades de falha menor ou igual a valores prescritos definidos pelo usuário.

Desta forma, busca-se neste trabalho conciliar a otimização determinística de pórticos planos de concreto armado com os conceitos de incertezas em relação: às dimensões nominais, às propriedades dos materiais envolvidos e às solicitações atuantes. Para a parte de otimização determinística de pórticos planos de concreto armado é usado o algoritmo implementado por Melo (2000b), que otimiza o custo

da função objetivo segundo os custos do volume de concreto, do aço e das fôrmas. Para a parte de confiabilidade utiliza-se o algoritmo do método de confiabilidade de 1ª ordem (FORM – first order reliability method), com as opções de enfoque pelo índice de confiabilidade (RIA – Reliability Index Approach) ou pela medida de desempenho (PMA – Performance Measure Approach).

A partir da realização de adaptações necessárias para a utilização conjunta dos dois algoritmos, Melo (2000b) e FORM, desenvolveu-se um programa de computador, na linguagem C, para o projeto ótimo de pórticos planos de concreto armado sujeitos também a restrições de confiabilidade. Inicialmente, pretende-se utilizar restrições associadas a duas funções de falha. A primeira, relativa ao estado limite de utilização, envolvendo restrição ao deslocamento e a segunda, relativa ao estado limite último, envolvendo a carga limite da estrutura. A análise proposta aplica-se a concretos com classes de resistência pertencente ao grupo I ($f_{ck} \leq C50$) sugerido pela NBR 8953 (ABNT, 1992).

Uma análise de confiabilidade da estrutura ótima obtida via DDO é realizada para se verificar se sua confiabilidade é comparável àquela prescrita no RBDO. A estrutura é discretizada pelo método dos elementos finitos e são consideradas as não-linearidades do material e geométrica.

As considerações sobre as distribuições e os parâmetros probabilísticos utilizados neste trabalho amparam-se no código de modelos probabilísticos do Comitê Internacional de Segurança de Estruturas (Joint Committee on Structural Safety, JCSS¹²³, 2000, 2001) e nas normas brasileiras NBR 6118 (ABNT, 2004) e NBR 6123 (ABNT, 1988). Neste trabalho são consideradas como variáveis aleatórias no processo de avaliação das restrições de confiabilidade: a resistência à compressão do concreto (f_c); a tensão de escoamento do aço (f_y); as cargas permanentes e as cargas variáveis (e.g., vento).

1.2. Histórico e revisão bibliográfica

1.2.1. Otimização via DDO (Deterministic Design Optimization)

Segundo Melo (2000b), o primeiro trabalho documentado sobre otimização estrutural foi o de Maxwell (1869) que buscava o projeto de treliças de peso mínimo.

Os primeiros trabalhos em programação linear (PL) surgiram na década de 30 do século XX. George Dantzig, em 1947, apresentou um método de PL que se designa método “simplex” e que se revelou bastante eficaz. Muitos métodos de programação matemática (PM) têm surgido desde então, para serem aplicados às diversas classes de problemas (lineares, não-lineares, restritos, irrestritos).

Com o decorrer dos últimos anos foram desenvolvidas inúmeras formas de avaliação do projeto ótimo determinístico de estruturas de concreto armado. A nível internacional pode-se citar os estudos de Friel (1974), Holzer e Solmers (1977), Kang et al. (1993), Balling e Yao (1997), Liang et al. (2000), Liang et al. (2002), Leps e Sejnoha (2003), enquanto no cenário nacional destacam-se os trabalhos de Horowitz (1988), Eboli (1989), Souza Jr. (1992), Urban (1992), Melo (2000a, 2000b), Melo et al. (2004), Almeida (2001), Almeida (2004) e Rodrigues Jr. (2005).

Em um dos trabalhos mais recentes, desenvolvido por Rodrigues Jr. (2005), é proposta uma formulação para o projeto ótimo de pilares de edifícios altos de concreto armado. As dimensões da seção transversal, a armadura longitudinal dos pilares e a resistência característica do concreto são variáveis de projeto. A estratégia utilizada é de solução em multinível, onde no problema global determinam-se as dimensões das seções transversais e a resistência do concreto, e nos subproblemas são determinadas apenas as armaduras longitudinais dos pilares. A função objetivo do problema de otimização é o custo total das colunas do edifício. Os edifícios são modelados como pórticos espaciais considerando a não-linearidade geométrica da estrutura.

1.2.2. Análise de confiabilidade

Dentre os métodos mais utilizados na análise de confiabilidade têm-se o método de simulação de Monte Carlo (MC) e o método analítico de primeira ordem (FORM). O método de MC surgiu oficialmente no ano de 1949 com o artigo *The Monte Carlo Method* de autoria dos matemáticos John Von Neumann e Stanislaw Marcin Ulam (Ulam, 2007). O método FORM faz parte do grupo dos chamados métodos do segundo momento que, segundo Melchers (2002), tiveram seus conceitos difundidos inicialmente por Mayer (1926), embora só tenham obtido uma maior aceitação com o trabalho de Cornell (1969).

Segundo Soares et al. (2002), o primeiro trabalho que aplica métodos de confiabilidade a estruturas de concreto armado data de 1947, quando Freudenthal publica seu trabalho sobre conceitos de confiabilidade aplicados a projetos de estruturas. Desde então, os principais códigos internacionais têm proposto incorporar esses conceitos.

Para melhor compreensão dos passos da pesquisa com relação à análise de estruturas de concreto armado considerando as incertezas que envolvem seus parâmetros, é traçado aqui um breve histórico de alguns trabalhos desenvolvidos.

Val et al. (1995) propõem um novo método de busca do ponto de projeto da análise de confiabilidade através do método das direções conjugadas. Além disso, o trabalho faz comparação da eficiência de convergência entre os principais algoritmos de otimização utilizados para a busca do ponto de projeto. Para esta comparação foi utilizado um pórtico de concreto armado, onde as variáveis aleatórias que descrevem o problema são: as cargas permanente e acidental; a resistência à compressão do concreto (f_c); a tensão de escoamento do aço (f_y); e as alturas das seções transversais (h). No cálculo dos gradientes, necessário nos métodos baseados em gradientes, foi utilizado o método das diferenças finitas centrais. Foi utilizado o método das direções conjugadas, que não necessita de avaliação dos gradientes da função de comportamento e mostrou-se mais estável que os outros métodos. Entretanto, este novo método mostrou-se menos eficiente no âmbito de tempo computacional requerido quando comparado com os métodos baseados em gradientes.

Frangopol et al. (1996) fizeram estudos sobre a confiabilidade de pilares de concreto armado esbeltos e curtos. As superfícies de falha foram geradas através

dos históricos de tensão e de deformação nas fibras extremas não sendo considerada a resistência à tração do concreto. A análise de confiabilidade foi feita através do método de simulação de MC. Foram feitas verificações de confiabilidade de pilares de concreto armado, com variação da seqüência de carregamento e de correlação entre as cargas. Foi constatado que, em alguns casos, a confiabilidade de pilares de concreto armado pode depender da seqüência de carregamento, e que depende da correlação entre os carregamentos. Nos casos onde as correlações são menores que a unidade ($\rho < 1,0$), elas se apresentaram conservativas para a maioria das regiões de falha por compressão. Entretanto, para as regiões de falha por tração, elas se mostraram não-conservativas. Sendo assim, a suposição de carregamento proporcional usada na maioria das normas de projeto para pilares de concreto armado pode não ser conservativa na região de falha por tração.

Em Real e Filho (2001) foram estudados os efeitos da variabilidade das dimensões geométricas e das propriedades dos materiais na análise de vigas e pilares de concreto armado. Foi constatado que a variabilidade das propriedades do concreto influenciam muito, tanto as flechas das vigas sob cargas de serviço quanto a carga de ruptura dos pilares sob flexo-compressão e com um determinado índice de esbeltez. Para os pilares estudados, a ruptura ocorreu devido ao esmagamento do concreto sem que o aço entrasse em escoamento. Para as vigas dúcteis, a aleatoriedade das propriedades mecânicas das armaduras influenciaram muito a aleatoriedade da carga de ruptura. Os efeitos das incertezas na resposta da estrutura foram avaliados empregando o método de Monte Carlo.

Outra metodologia é apresentada por Araújo e Real (2002) que verificaram a confiabilidade de vigas de concreto armado quanto aos estados limites últimos (modo de falha por flexão) e quanto aos modos de comportamento de utilização (por deformação excessiva e fissuração inaceitável). Nas aplicações estudadas foi constatado que o estado limite de deformações excessivas predomina com maior probabilidade de falha, pois o valor máximo permitido para a flecha é o que determina o cálculo da altura da viga. A confiabilidade da viga é avaliada através do método de Monte Carlo, que, dependendo do tamanho do problema, pode ser muito caro computacionalmente.

Soares et al. (2002) fizeram análises de confiabilidade de elementos de barras de concreto armado usando o método de superfície de resposta. Para a

análise da confiabilidade são empregados de forma acoplada um modelo de elementos finitos não-linear com o método de superfície de resposta e, para a determinação do índice de confiabilidade, β , o método FORM. A função de comportamento utilizada é representada pela diferença da carga última da estrutura pela carga real aplicada. Foram consideradas como aleatórias as seguintes variáveis: a resistência à compressão do concreto; a tensão de escoamento do aço; as cargas permanentes e acidentais. O modelo utilizado considera a não-linearidade dos materiais e a não-linearidade geométrica. Foram avaliados os índices de confiabilidade de estruturas de concreto armado, para a verificação da segurança obtida pelo uso dos fatores parciais de segurança, estabelecidos pelas principais normas internacionais. Segundo Soares et al. (2002), conclui-se o seguinte: o método empregado mostrou-se eficiente, reduzindo o custo computacional da análise da confiabilidade de elementos complexos de concreto armado; a não-linearidade das estruturas de concreto armado tem forte influência na determinação da confiabilidade; e, por último, os fatores parciais de segurança utilizados nas normas internacionais são adequados, embora, algumas vezes, possam ser excessivamente conservativos.

No estudo realizado por Gomes (2003), uma viga bi-apoiada de concreto armado foi analisada com ênfase nas incertezas da avaliação do comportamento estrutural. Foi desenvolvido um modelo para a geração de campos estocásticos multidimensionais não-Gaussianos. A análise da confiabilidade foi realizada utilizando-se o método FORM, assumindo como função de falha a flecha máxima na seção localizada no centro do vão, ou seja, o valor da flecha não deve ultrapassar um valor prescrito. O módulo de elasticidade do material é considerado como um campo estocástico.

Em Szerszen e Nowak (2005) foram desenvolvidas análises de confiabilidade de colunas de concreto armado sujeitas à carga excêntrica. As variáveis aleatórias foram as seguintes: a resistência à compressão do concreto (f_c); a tensão de escoamento do aço (f_y); as dimensões da seção transversal (b , h); e o diâmetro da barra de aço longitudinal (ϕ). A análise de confiabilidade foi feita utilizando as simulações de Monte Carlo. No estudo é proposto um novo modelo para o fator de redução de resistência dos pilares de concreto armado sujeitos à carga excêntrica.

Em Santos e Eboli (2006) foram feitas avaliações da confiabilidade estrutural com base nas normas da ABNT. Neste trabalho foram avaliadas as probabilidades de ruína de seções retangulares de concreto armado, dimensionadas à flexão composta reta, com armadura simétrica. O trabalho analisa diversas situações, variando-se as taxas de área de armadura longitudinal e as relações entre os valores de cargas permanentes e acidentais. As variáveis aleatórias consideradas no trabalho foram: a tensão de escoamento no aço (f_y); a tensão de compressão no concreto (f_c); a solicitação permanente (G); a solicitação acidental (Q); o fator de modelagem da resistência (m_R) e o fator de modelagem das ações (m_S). As principais considerações feitas a partir dos resultados foram que: os coeficientes parciais de segurança devem ser ajustados, a partir de um processo de análise crítica baseado na confiabilidade; os índices de confiabilidade foram maiores nos casos em que o percentual de carga permanente na carga total foi mais alto, devido à maior variabilidade das cargas acidentais; os índices de confiabilidade foram sempre maiores na região em que a resistência do concreto domina sobre a resistência do aço, o que sugere uma reavaliação dos valores numéricos dos coeficientes de minoração das resistências do aço e do concreto nas Normas Brasileiras.

Além destes trabalhos podem-se citar outros, que também envolvem análise de confiabilidade de estruturas de concreto armado, tais como: Ellingwood (1996, 2003), Araújo (2001), Diniz (2005), Lopes et al. (2006) e Neves et al. (2006). Dentre outras aplicações relevantes em confiabilidade podem-se citar os trabalhos a seguir: Ang e Cornell (1974), Hasofer e Lind (1974), Rackwitz e Fiessler (1978), Choudhori e Chokraborty (2005), Yang et al. (2006), Lee e Kwak (2006), Saleh e Morais (2006) e Choi et al. (2006).

1.2.3.

Otimização via RBDO

O objetivo do RBDO é desenvolver projetos econômicos e confiáveis, introduzindo critérios de confiabilidade no processo de otimização. Segundo Kharmanda et al. (2004) o primeiro trabalho que introduziu a idéia de análise de confiabilidade em conjunto com otimização de projeto foi desenvolvido por Stevenson em 1967.

Dos trabalhos desenvolvidos recentemente em RBDO, pode-se citar os seguintes: Wang e Grandhi (1993), Sepulveda e Epstein (1993), Enevoldsen (1993), Al-Harthy e Frangopol (1994), Moses (1997), Kleiber et al. (1999), Choi e Youn (2001), Youn et al. (2003, 2004), Müller et al. (2003), Eboli et al. (2004), Youn e Choi (2004), Eboli e Vaz (2005), Papadrakakis et al. (2005), Tsompankis et al. (2005), Nogueira (2005), Almeida et al. (2005), Youn et al. (2005), Almeida et al. (2006), Lagoros e Papadopoulos (2006), Zou e Mahadevan (2006) e Almeida et al. (2007).

Wang e Grandhi (1993) desenvolveram em seu trabalho, otimização de estruturas baseadas em confiabilidade, um novo algoritmo para a avaliação das restrições de confiabilidade. Este algoritmo, como demonstrado por eles, tem a vantagem de convergir com poucas iterações, mesmo para funções altamente não-lineares, o que muitas vezes não acontece com algoritmos mais usados tal como o HLRF (Hasofer e Lind, 1974; Rackwitz e Fiessler, 1978). Os exemplos analisados por eles incluem funções de alta não-linearidade numérica, para demonstrar a eficiência do algoritmo proposto, tais como, uma placa, uma turbina e uma estrutura plana de barras. Apesar dos inúmeros exemplos, o foco do trabalho é fazer uma comparação para comprovar a eficiência do algoritmo proposto, não apresentando os resultados das otimizações onde foram restritos os deslocamentos em nós de interesse. Nestes exemplos são considerados somente materiais com comportamento linear, sendo as características geométricas e físicas dos materiais consideradas como variáveis aleatórias.

Sepulveda e Epstein (1993) propuseram a minimização do peso de projetos de estruturas sujeitos a restrições de confiabilidade em condições de serviço (deslocamento restrito e tensões). São consideradas como variáveis aleatórias: as cargas e as tensões internas permitidas. Para a análise das restrições de confiabilidade é utilizado o método de simulação de Monte Carlo. Como exemplificação do método proposto, é determinado o projeto ótimo de uma treliça de alumínio plana de dez barras, minimizando o seu peso. Através dos exemplos o autor conclui que na maioria dos casos a otimização determinística conduz a resultados com baixos níveis de confiabilidade. O método de aproximação se mostrou eficiente em número de análises requeridas para convergência onde ele considera como restrição de serviço a limitação de deslocamento em um dos nós.

Al-Harthy e Frangopol (1994) apresentam um algoritmo para a obtenção do projeto ótimo baseado em confiabilidade de vigas pré-moldadas de concreto pré-tensionadas. A função objetivo busca minimizar a área de cordoalha de protensão e as restrições de confiabilidade verificam as tensões nas fases inicial, final e de estado limite último. Para a otimização do projeto é usado o algoritmo do método das direções viáveis. São tomadas como variáveis aleatórias: o carregamento; as propriedades dos materiais; os níveis de força para a pré-tensão; e alguns coeficientes necessários para o modelo estrutural nos estágios inicial, final e último. É utilizado o método do segundo momento para a avaliação da confiabilidade (Rackwitz and Fiessler, 1978).

Müller et al. (2003) implementaram otimização de estruturas reticuladas considerando incertezas, tais como pórticos e treliças. Para a otimização foi utilizado o algoritmo de pontos interiores e, para a determinação da resposta considerando as incertezas, foram utilizados os métodos de análise estatística linear e de simulação de Monte Carlo. Foram consideradas como variáveis aleatórias os parâmetros mecânicos, tais como: o módulo de elasticidade, a tensão de escoamento do material e as cargas atuantes. No problema de RBDO foi considerado o peso da estrutura como função objetivo sujeita a restrições de confiabilidade para os deslocamentos e as tensões. No trabalho foram analisados dois exemplos: o primeiro é um pórtico plano com três elementos e o segundo uma treliça plana de dez elementos. Através dos resultados obtidos no trabalho, os autores afirmam que a análise estatística linear é um bom método para a análise da resposta estatística de estruturas reticuladas planas de comportamento linear elástico. A utilização da simulação de Monte Carlo não é recomendável em problemas de otimização considerando incertezas, nos quais são utilizados métodos iterativos, o que conduziria a um número excessivo de análises, inviabilizando o processo.

Para a avaliação do RBDO deve-se trabalhar com restrições probabilísticas que podem ser formuladas ou pelo RIA ou pelo PMA (Choi e Youn, 2001). Destes dois, o RIA foi o primeiro a ser idealizado. Através de um processo iterativo procura-se determinar o índice de confiabilidade, β , para a função de falha estabelecida nesse enfoque. Contudo, muitas vezes sua convergência é lenta ou nem chega a acontecer (Youn et al., 2003). Para contornar esse problema, foi

proposto um método alternativo, o PMA, que se mostrou mais eficiente do que o RIA (Tu et al., 1999).

Mesmo o PMA quando utilizando o método AMV (Advanced Mean Value), mostrou-se instável em diversos casos nos quais a função avaliada era côncava. Por esse motivo foi proposto por Youn et al. (2004) um método híbrido (HMY-Hybrid Mean Value) que associa dois métodos (AMV e CMV- Conjugate Mean Value), resolvendo o problema tanto para funções côncavas quanto para as convexas.

Mesmo com o método HMY, o processo de RBDO pode não ser eficiente o bastante no caso de problemas com muitas variáveis aleatórias ou onde o cálculo da sensibilidade de projeto é inviável. Desta forma, para atender a estes requisitos foi proposta em Youn e Choi (2004) uma nova metodologia, onde o método HMY é integrado a um novo método, RSM (Response Surface Method), baseado no método dos mínimos quadrados. Este novo método, segundo o autor, diminui o esforço computacional mantendo uma boa precisão.

Desde o início da utilização da análise de confiabilidade como restrição em projetos ótimos (RBDO) muitas formulações diferentes vêm sendo propostas para melhorar o seu desempenho computacional garantindo a confiabilidade de seus resultados. Dentre estas destacam-se três: RBDO tradicional (ou Parallel-loop RBDO); serial-loop RBDO; e single-loop RBDO (Youn et al., 2005). Os métodos **parallel** e **serial loop** têm dupla iteração, na análise de confiabilidade e de otimização. Por outro lado, o método **single-loop** remove uma iteração no processo da análise de confiabilidade, mas pode causar problemas de perda de precisão e de instabilidade numérica no problema.

Youn et al. (2005) desenvolveram uma formulação (PMA+) que, segundo eles, mostrou-se mais eficiente computacionalmente na maioria dos casos, quando comparada com outros métodos de RBDO. Tal formulação destaca-se por três passos básicos: o processo do RBDO é iniciado tomando como ponto inicial o projeto obtido pela execução de uma otimização determinística; a verificação e utilização das restrições probabilísticas que estejam ativas; aproveitamento do projeto da iteração anterior, quando satisfeita a condição de proximidade, para que haja diminuição da quantidade de avaliações da função de falha.

Buscando também a diminuição do tempo computacional para análise de confiabilidade no método RBDO, Zou e Mahadevan (2006) propõem em seu

trabalho um algoritmo que se destaca pelos seguintes passos: utilização do DDO como ponto inicial, se for possível; identificação e utilização das restrições potencialmente ativas; construção de aproximações de primeira ordem em séries de Taylor para todas as restrições potencialmente ativas. No método, a análise de confiabilidade é desacoplada do processo de otimização, onde a análise de confiabilidade e as iterações de otimização são avaliadas sequencialmente até a convergência dos resultados da otimização. As propriedades estatísticas dos parâmetros mecânicos aleatórios são assumidas como variáveis de projeto. Segundo os autores o método mostra-se mais eficiente que o método RBDO tradicional e compara-se em eficiência com o método PMA desacoplado.

Eboli et al. (2004) apresentam em seu trabalho uma aplicação do parâmetro beta de confiabilidade em otimização de estruturas. Neste trabalho foi utilizado o método FORM para a avaliação da probabilidade de falha dos exemplos, em conjunto com um algoritmo de Programação Quadrática Sequencial (PQS) para a otimização. Foram analisados dois exemplos, sendo o primeiro um pórtico plano sob a ação de cargas verticais e vento, onde as variáveis aleatórias foram as propriedades mecânicas dos materiais, as cargas atuantes e os fatores de modelagem. Para este primeiro exemplo foi verificada a confiabilidade de uma determinada seção sujeita a restrições de deslocamento e tensões. O segundo exemplo faz uma comparação com a treliça de dez elementos utilizada em Müller et al. (2003), onde foram consideradas como variáveis aleatórias os módulos de elasticidade dos elementos e as tensões axiais de resistência. Através deste trabalho, conclui-se que, com a utilização do parâmetro beta e do método FORM, foi possível efetuar inúmeras análises para ambos os exemplos em um tempo bem inferior ao que seria necessário com a utilização da simulação de MC.

Nogueira (2005) apresenta um modelo de otimização acoplado à confiabilidade para a análise de estruturas de barras de concreto armado. O modelo mecânico utilizado leva em consideração a não-linearidade física dos materiais e os efeitos não-lineares geométricos. Com relação à modelagem mecânica, foi utilizado um modelo que busca representar o dano para o concreto. O problema de otimização considera como variáveis de projeto a altura do elemento, a armadura tracionada e a armadura comprimida. Para a análise mecânica é utilizado o Método dos Elementos Finitos onde se emprega o elemento de pórtico para a discretização, e na análise de confiabilidade é utilizado

o Método das Superfícies de Respostas com aproximação da função estado limite a partir de polinômios de segundo grau. As variáveis escolhidas para representar a aleatoriedade do problema foram a resistência média à compressão do concreto e a resistência média do aço. O modelo acoplado de otimização e confiabilidade é empregado para análise de vigas de concreto armado. O autor conclui que, ao se otimizar uma estrutura, a probabilidade de falha tende a aumentar, o que pode conduzir a estados contra a segurança em projetos. Salienta ainda que a confiabilidade também pode ser usada para avaliar a segurança de diversos sistemas estruturais, comparando sua eficiência, bem como para se determinar as variáveis que mais influenciam no comportamento global da estrutura.

Em Eboli (2005) foi realizada a otimização de uma treliça plana de 10 barras sujeita a restrições de confiabilidade. Essas restrições foram estabelecidas com relação ao deslocamento máximo e às tensões de resistência. A análise da confiabilidade foi realizada utilizando-se o método FORM. Foram analisados dois enfoques diferentes para a determinação do ponto de projeto, o RIA e o PMA. O RIA mostrou-se menos confiável do que o PMA, pois não apresentou convergência para determinadas situações, o que não acontece com o PMA. Além desta constatação, o trabalho forneceu uma interessante ferramenta para projetistas ao considerar as incertezas com relação aos módulos de elasticidade das barras e as tensões últimas de resistência.

Em Almeida et al. (2005, 2006) são otimizadas seções e pilares de concreto armado, respectivamente, considerando a aleatoriedade das propriedades dos materiais e das cargas atuantes. O FORM é utilizado para a análise da confiabilidade. Através de exemplos de aplicação, os autores concluem que o projeto convencional ou mesmo o DDO podem conduzir a projetos com níveis de confiabilidade inapropriados. Além do mais, ao se adotar o RBDO pode-se, também, calibrar os coeficientes parciais de segurança para um estado limite de uma estrutura específica e obter o fator de importância das variáveis aleatórias sem nenhum custo adicional para o processo, pois os mesmos são um subproduto do RBDO.

Pereira (2007) desenvolveu em seu trabalho um algoritmo para a otimização baseada em confiabilidade de treliças espaciais. As variáveis aleatórias e de projeto são as seções transversais, as coordenadas nodais, as propriedades dos materiais (módulo de elasticidade e tensão de escoamento) e os carregamentos. A

não-linearidade geométrica é considerada. Foram consideradas funções de comportamento para a análise de confiabilidade em relação aos deslocamentos e em relação às tensões.

1.3. Procedimento proposto neste trabalho

A partir da revisão bibliográfica citada nos itens anteriores, pode-se analisar a contribuição do presente trabalho na área de RBDO. Neste trabalho é utilizado o processo analítico (FORM) na análise de confiabilidade e algoritmos de PM na otimização do projeto. A estrutura é discretizada pelo método dos elementos finitos e são consideradas as não-linearidades do material e geométrica. Este trabalho visa apresentar uma comparação entre dois procedimentos para o projeto ótimo de pórticos planos de concreto armado (DDO x RBDO).

O primeiro procedimento (DDO) é na verdade um dimensionamento ótimo baseado no método semiprobabilístico, chamado aqui de determinístico, porque todas as variáveis são tratadas como se elas fossem determinísticas durante o processo de otimização. Nessa metodologia, o tratamento estatístico das variáveis aleatórias é feito “a priori”, antes da otimização e, por isso, é denominada método semiprobabilístico de projeto. O método é usado pela grande maioria das normas de projeto de vários países, inclusive as do Brasil. O segundo procedimento (RBDO) trata a aleatoriedade das variáveis durante a otimização, o que permite realizar uma análise de confiabilidade em cada iteração do processo de otimização e prescrever uma probabilidade de falha desejada para as restrições de projeto. O dimensionamento das armaduras da seção é feito com a hipótese de comportamento determinístico nas duas formulações. As restrições de confiabilidade no RBDO são associadas a duas funções de falha. A primeira é relativa ao estado limite de utilização, envolvendo restrição ao deslocamento e a segunda é relativa ao estado limite último, envolvendo a carga limite da estrutura.

Ao adotar a otimização via RBDO neste trabalho, espera-se obter um projeto confiável e econômico. Obtêm-se também os coeficientes parciais de segurança e o fator de importância de cada variável aleatória. Esse fator de importância auxilia na escolha da variável aleatória que necessita de um controle maior. Assim, caso não se obtenham índices de confiabilidade satisfatórios, os

parâmetros probabilísticos dessas variáveis de maior importância podem ser alterados.

Dentro do contexto da revisão bibliográfica, este trabalho é o primeiro a utilizar técnicas de programação matemática (e.g., SQP - Sequential Quadratic Programming, SLP - Sequential Linear Programming) para a obtenção do projeto ótimo de estruturas de pórtico plano de concreto armado sujeitas a restrições determinísticas e não-determinísticas considerando-se a não-linearidade física e geométrica do problema. As restrições não-determinísticas utilizam o método de segundo momento (FORM) com o enfoque da medida de desempenho (PMA). O procedimento adotado fornece como dados de saída para o projeto ótimo: as alturas das seções (h); as áreas de aço longitudinais (A_{ss} e A_{st}) e as áreas de aço transversais (A_{sw}).

1.4. Organização do trabalho

O capítulo 2 apresenta o conceito de RBDO, através de definições básicas e de um exemplo ilustrativo.

No capítulo 3 são apresentados os critérios e detalhes para a análise de pórticos planos de concreto armado, considerando a não-linearidade dos materiais e a não-linearidade geométrica.

No capítulo 4 são apresentados os conceitos básicos necessários para compreensão da análise de confiabilidade de estruturas. O capítulo inicia-se apresentando os conceitos dos parâmetros essenciais para o estudo da confiabilidade de estruturas e, em seguida, são descritos os estados limites e a função de comportamento. São introduzidos os conceitos de índice de confiabilidade e o método de confiabilidade de primeira ordem (FORM). O item 4.6 trata de confiabilidade de sistemas para o caso em que se têm mais de uma função de falha, verificando-se inicialmente se o caso é um sistema em série ou em paralelo. Em 4.7 são definidos os conceitos para a calibração de coeficientes parciais de segurança.

No capítulo 5 são descritos os detalhes necessários para compreensão do problema de otimização determinística (DDO) em seções de concreto armado submetidas à flexo-compressão, incluindo a forma de inicialização do parâmetro D .

No capítulo 6 é apresentada a metodologia para o projeto de otimização baseado em confiabilidade (RBDO), onde são expostos os dois tipos de enfoque para a avaliação da confiabilidade: o enfoque do índice de confiabilidade (RIA) e o enfoque da medida de desempenho (PMA). São também apresentadas as variáveis aleatórias do problema proposto.

No capítulo 7 são descritas as sensibilidades analíticas utilizadas no programa desenvolvido. Estas sensibilidades representam a variação de uma função devida à variação de uma variável.

No capítulo 8 são apresentados os exemplos de aplicação desenvolvidos.

Por fim, no capítulo 9 são apresentadas conclusões referentes aos exemplos de aplicação de RBDO em estruturas de concreto armado e as sugestões para trabalhos futuros. Nos apêndices A e B são apresentados alguns conceitos de análise de confiabilidade de sistemas e distribuições probabilística, respectivamente.