6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O trabalho de pesquisa realizado permite a elaboração de algumas conclusões. Uma delas é a de que a carga de colapso obtida para os modelos de bielas e tirantes depende diretamente do tipo de modo de falha envolvido. Modelos frágeis têm o valor de sua carga de colapso dependente apenas da resistência característica do concreto enquanto que modelos dúcteis ou com modo de falha dúctil têm seu valor de carga de colapso associado apenas à resistência característica do aço. Assim sendo, para avaliação correta do desempenho de um determinado modelo topológico é necessário definir qual tipo de modo de falha será dominante dependendo das características geométricas, propriedades físicas e carregamentos envolvidos.

A utilização da análise limite conjuntamente ou não com a análise de confiabilidade mostrou ser uma ferramenta bastante poderosa na avaliação do desempenho dos modelos topológicos considerados neste trabalho de pesquisa. Essa opção é totalmente fundamentada no Teorema do Limite Inferior da plasticidade e coerente com a concepção inicial dos modelos de bielas e tirantes. Os modelos finais que apresentaram melhor desempenho e que foram obtidos desta maneira contrapõem a literatura técnica do assunto. Isso acontece uma vez que a literatura técnica existente se baseia nos campos de deformações elásticas dos modelos de treliça. Uma vez que o modelo de treliça idealizado representa um limite inferior do modelo real no colapso através de um campo tensões estaticamente admissível e que atenda os limites de resistência aplicados aos materiais da estrutura, a utilização de modelos elásticos é questionável.

A solução de mínima norma Euclidiana utilizada para obtenção dos esforços das barras dos modelos hiperestáticos sem a necessidade de consideração das propriedades geométricas ou mesmo módulo de elasticidade do material foi bastante satisfatória. Isso permite ao projetista idealizar modelos de várias maneiras diferentes aumentando em muito o leque das opções a serem utilizadas.

Um aspecto interessante é que a solução de mínima norma na verdade é uma solução muito similar à solução elástica tendo, entretanto, um fator de ponderação menor. Isso implica que as equações de equilíbrio são todas cumpridas tendo apenas seus valores alterados conforme a geometria envolvida (matriz de equilíbrio).

A utilização de métodos de otimização topológica na obtenção de modelos de bielas e tirantes é justificada uma vez que possibilita ao projetista uma aproximação inicial bastante realista. No entanto, conforme foi observado nos exemplos apresentados, situações de projeto que envolvam considerações relacionadas a tecnologias construtivas do tipo barras retas e limitações de ângulos deverão ser observadas pelo projetista, após o resultado final da otimização topológica. Uma opção bastante interessante é o uso dos elementos indutores conforme exemplificado no capítulo 3. Entretanto, mesmo com a utilização desta técnica pode ser necessária a intervenção do projetista para obtenção de um modelo topológico ótimo que cumpra todos os requisitos de resistência, equilíbrio, restrições construtivas e de custos, etc. Vale também observar a não necessidade de cumprir totalmente os caminhos de carga mostrados na otimização topológica. Isso pode ser observado nos exemplos apresentados no capítulo 3 e 5 via modificação do raio mínimo ou desconsideração de regiões com pouco material, que levam a uma modificação na solução topológica final.

Apesar da topologia obtida pela otimização topológica não garantir ainda um modelo final realístico, sua aplicação esclarece muito o funcionamento do modelo analisado, sendo assim um ponto inicial bastante interessante para definição do modelo topológico desejado. Um procedimento interessante e que foi utilizado neste trabalho foi a execução de uma rodada inicial do processo de otimização topológica seguida por uma avaliação cuidadosa do resultado pelo projetista. Posteriormente, a técnica dos elementos indutores poderia ser utilizada ou mesmo o modelo ser modificado graficamente pelo projetista, levando a um modelo que cumpra minimamente os requisitos exigidos. Também a opção de utilização de uma envoltória topológica na concepção de um modelo que cumpra uma topologia geral para o caso de carregamentos independentes com muita variação de valores mostrou ser eficiente.

O critério de desempenho relacionado com nível de segurança para avaliação do desempenho dos modelos topológicos neste trabalho utilizou um abordagem probabilística. A análise de confiabilidade foi feita via métodos de Monte Carlo e FORM. Sua utilização permitiu a definição do nível de segurança relativo aos modelos topológicos considerados além de mostrar quais as principais modos de falha envolvidos no problema e determinar uma localização aproximada para o ponto de transição entre os diferentes tipos de falha com a variação da resistência característica do concreto.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

É importante salientar que este trabalho agrupa várias linhas de pesquisas existentes na PUC-Rio. As linhas de pesquisas abordadas são: aplicação e técnicas de otimização, a análise de confiabilidade estrutural, computação gráfica aplicada e estruturas de concreto armado e protendido. Sendo assim, todas as metodologias propostas e desenvolvidas nesta pesquisa servem de base para inúmeras aplicações práticas e futuras investigações no sentido de generalizar sua aplicabilidade em modelos reais de engenharia, calibrar e confirmar os resultados demonstrados.

Uma série de melhoramentos pode ser sugerida neste trabalho, sendo a maior parte relacionada com a extensão dos códigos desenvolvidos, execução de programas experimentais associados aos conceitos propostos e investigações teóricas, sendo alguns deles descritos a seguir:

6.1.1 Análise estrutural e modelos de bielas e tirantes

- Estender a aplicação da solução de mínima norma Euclidiana a modelos hiperestáticos. Problemas utilizando modelos hiperestáticos podem ser testados e seu desempenho avaliado, principalmente em casos envolvendo geometrias complexas onde a aplicação de modelos isostáticos normalmente não apresentam bons resultados.

- Estudar outros critérios existentes para avaliação do desempenho estrutural dos modelos de bielas e tirantes em estruturas de concreto armado e comparar com o critério via confiabilidade e análise limite verificando as principais limitações e inconsistência de aplicação de cada um deles.
- Propor um programa experimental que utilize o critério de desempenho proposto na concepção dos modelos de bielas e tirantes e estude as principais limitações de metodologia relacionadas com definição da ductilidade e o nível de segurança do modelo.

6.1.2

Otimização topológica

- Desenvolvimento de uma ferramenta gráfica que possibilite a geração automática de malha refinadas, com vários tipos de elementos planos, como também a posterior inclusão gráfica de elementos indutores de barras no interior da malha antes do processo de otimização. Isso permitiria ao projetista estrutural interceder no processo de otimização topológica gerando inúmeros novos modelos possíveis de serem utilizados como solução.
- Desenvolver o conceito da envoltória de topologia de modo a torná-lo aplicável a casos de carregamentos mais abrangentes com maiores quantidades de carregamentos e com combinações que possam ser não lineares verificando suas principais implicações práticas e limitações.
- Aplicar o conceito de otimização topológica em estrutura planas de concreto armado existentes onde haja a necessidade da aplicação de reforço estrutural. Em casos desse tipo o algoritmo de otimização aplicaria a definição dos elementos indutores para estrutura já existente e determinaria o melhor encaminhamento de cargas ou posicionamento para aplicação do reforço.

6.1.3

Análise de confiabilidade

- Incluir dentro da avaliação de desempenho dos modelos topológicos uma variável de custo associada aos diferentes modos de falha (frágil e dúctil) envolvidos no problema. Com isso a busca do modelo topológico com

desempenho ótimo consideraria automaticamente o custo das consequências relacionadas com os diferentes tipos de modos de falha do problema passando a ser considerada como uma análise de risco.

- Utilizar técnicas do tipo Monte Carlo por amostragem por pontos de importância (IS – *Importance Sampling*) na análise de desempenho dos modelos considerados. Isso implicaria numa redução do tempo de execução de cada análise com diminuição no número de simulações necessário, além de uma maior precisão comparada com o método analítico FORM.