

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Introdução e objetivos

O projeto de estruturas de concreto armado bi e tridimensionais em regiões com descontinuidade geométrica ou estática é um assunto ainda bastante pesquisado. Elementos estruturais de concreto armado com problemas dessa natureza, para os quais não são válidas as hipóteses de Bernoulli, frequentemente são detalhados via regras práticas. Os projetos estruturais concebidos dessa forma são, frequentemente, alvo de crítica.

Um método bastante interessante a ser aplicado nesse caso é o método das bielas e tirantes. A metodologia utilizada por esse método aprimora a concepção do projeto de elementos estruturais de concreto armado com descontinuidades. A maior vantagem na sua aplicação é a forma coerente e rigorosa com que o tema é tratado. Isso permite que toda a estrutura seja dimensionada de uma forma teoricamente coerente.

Segundo o método de bielas e tirantes, uma estrutura pode ser dividida em dois tipos de regiões. Regiões B (Bernoulli) são aquelas partes da estrutura nas quais a hipótese de que as seções planas permanecem planas é válida. Assim, uma distribuição linear de deformações ao longo da altura da seção é admitida. Essas regiões podem ser projetadas através das teorias clássicas de cisalhamento, flexão, torção e forças axiais e das orientações normativas presentes nas correspondentes normas existentes. Regiões D (Discontinuity) ou regiões de St. Venant são aquelas partes da estrutura nas quais há um campo não linear de deformações e deslocamentos devido às descontinuidades geométricas ou estáticas, sendo estas as representadas pela concentração de tensões devido a carregamentos concentrados ou apoios.

Uma estrutura treliçada é então idealizada no interior da região D de modo a representar o fluxo de forças através dessa região. O conceito de projeto utilizado pelo modelo de bielas e tirantes baseia-se no teorema do limite inferior da plasticidade. Assim, a carga de projeto utilizando o modelo de bielas e tirantes, é apenas um limite inferior da carga de colapso da estrutura. Uma hipótese básica assumida é que, a região D projetada segundo as orientações do modelo de bielas e tirantes, seja suficientemente dúctil de modo a possibilitar a redistribuição de esforços e a formação do mecanismo da estrutura treliçada. Vários programas experimentais têm sido conduzidos no sentido de aprimorar a aplicabilidade desse tipo de enfoque em projetos. Os resultados desses testes também ilustram deficiências no desempenho das regiões D sobre cargas de serviço e em específicas situações para cargas últimas de projeto.

A aplicabilidade do método de bielas e tirantes também é bastante reduzida em escritório de projetos em função da dificuldade apresentada pela metodologia. A não unicidade de modelo topológico, a necessidade de compatibilização geométrica entre os fluxos de cargas internos nos pontos de carregamentos e apoios, as imprecisões inerentes aos materiais utilizados e a imprecisão relativa à modelagem são algumas dificuldades a serem ultrapassadas.

O objetivo principal deste trabalho é estabelecer uma metodologia para o projeto e/ou avaliação da segurança de estruturas planas de concreto armado com descontinuidades (Regiões D) com base no modelo de bielas e tirantes que utilize as formulações de otimização topológica e análise de confiabilidade. A utilização dessas técnicas avançadas permite uma melhora substancial no entendimento do funcionamento do modelo e também uma maior interação entre o projetista estrutural e o processo de concepção, resultando num modelo final mais compatível e confiável. A geração automática da topologia do modelo, a determinação do modo de falha dominante e valor da probabilidade de falha do modelo são exemplos bastante claros de como algumas etapas necessárias na aplicação dos modelos de bielas e tirantes podem ser melhoradas.

É importante destacar que o presente trabalho é parte integrante de algumas linhas de pesquisas do DEC/PUC-Rio. São elas ‘Técnicas de Otimização Aplicadas’, ‘Análise de Confiabilidade’ e ‘Estruturas de Concreto Armado’.

## 1.2 Principais Contribuições

O presente trabalho envolve três linhas de pesquisa totalmente independentes, assim, as contribuições feitas por essa pesquisa, serão apresentadas de forma separada. Isso significa que essas contribuições poderão ser aplicadas em problemas de naturezas diversas, tanto semelhantes como diferentes dos problemas aqui apresentados. Essa generalidade, presente nas contribuições propostas, está estritamente relacionada com a própria abrangência dos temas referentes a modelos de bielas e tirantes, otimização e análise de confiabilidade. São elas:

➤ Contribuições para o modelo de bielas e tirantes:

A possibilidade de obtenção de esforços estaticamente admissíveis em modelos hiperestáticos via Mínima Norma Euclidiana é uma opção bastante interessante. Apesar de já ter sido aplicada a problemas de modelos de bielas e tirantes, uma metodologia com sua aplicação acoplada a uma análise da ductilidade do modelo, conforme proposto por esse trabalho, permite validar o uso de modelos hiperestáticos no método das bielas e tirantes.

➤ Contribuições para geração de topologias via otimização topológica:

Uma técnica que introduz elementos indutores no processo de otimização topológica é utilizada para a geração de modelos de bielas e tirantes realistas. Isso permite que o modelo topológico final seja influenciado pelo projetista da estrutura. Assim, é possível verificar qual a influencia de um elemento previamente concebido na topologia final do modelo como também como obter modelos mais realistas do ponto de vista prático.

Também uma metodologia que utiliza uma envoltória topológica via otimização multiobjetivo é apresentada. Isso permite uma maior generalização da concepção dos modelos de bielas e tirantes para casos

específicos de carregamentos independentes onde haja grande variabilidade de valores.

- Contribuições para avaliação de segurança via análise de confiabilidade:

Uma técnica de calibração de incertezas epistêmicas via resultados experimentais é mostrada e seus resultados utilizados nos exemplos.

É proposta uma técnica para obtenção e avaliação dos valores de importância relativa dos modos de falha via análise de confiabilidade. Isso permite ao projetista estrutural avaliar e aplicar modificações que direcionem o modelo para um tipo de falha específico.

Também uma formulação que avalie o índice de confiabilidade global de modelos de bielas e tirante com base na análise de confiabilidade acoplada a um subproblema de análise limite é descrita. Esse critério possibilita avaliar o desempenho global de cada modelo segundo sua carga de colapso. Isso permite a adoção de um critério realista e compatível com modelo dessa natureza uma vez que apenas o campo de tensões e as resistências são avaliadas.

### **1.3 Organização do Trabalho**

Uma vez que as referências bibliográficas correspondentes a modelos de bielas e tirantes, otimização topológica e análise de confiabilidade possuem uma independência relativamente grande entre si e na falta de uma literatura específica que englobe conjuntamente os três temas, uma revisão bibliográfica específica sobre cada assunto será apresentada no início de cada capítulo situando a mesma no contexto do trabalho.

O segundo capítulo iniciará com uma descrição do método das bielas e tirantes com enfoque principal na concepção topológica e detalhamento dos modelos adotados. Os principais processos de concepção dos modelos topológicos são apresentados e uma formulação automática via otimização topológica sucintamente descrita. Para o detalhamento do modelo, os conceitos fundamentais

de plasticidade aplicados a estruturas de concreto serão descritos e uma solução via análise limite formulada. Posteriormente, as principais orientações normativas de projeto selecionadas para aplicação no presente trabalho são descritas e uma solução possível, para aplicação em modelos topológicos hiperestáticos, apresentada. Uma descrição dos principais problemas enfrentados na aplicação do método é feita.

O terceiro capítulo discutirá a aplicação da técnica de otimização topológica na geração automática de topologias para os modelos de bielas e tirantes. Uma formulação conceitual clássica do problema é feita e um processo de relaxação do problema apresentado. A solução do problema via relaxação como um problema de otimização é feita via modelo SIMP. Os principais problemas numéricos envolvidos em problemas dessa natureza são apresentados e uma solução numérica via filtro de sensibilidade descrita. Duas possíveis soluções para busca de topologias ótimas utilizadas neste trabalho são descritas e o cálculo das sensibilidades do problema apresentado. Uma proposta para indução do processo de otimização do problema com objetivo de obter modelos topológicos mais realistas é feita, bem como uma envoltória de topologia baseada numa otimização do tipo multiobjetivo é descrita para consideração de casos específicos de carregamentos.

No quarto capítulo são estudados os principais aspectos relativos à avaliação da segurança dos modelos de bielas e tirantes com a consideração das incertezas. As principais etapas para avaliação de um problema estrutural com base na análise de confiabilidade são descritas e os tipos de incertezas existentes mostrados. Uma apresentação genérica das principais funções de falha envolvidas no problema é feita e os conceitos de probabilidade de falha e índice de confiabilidade apresentados. Os métodos de simulação de Monte Carlo e analítico FORM são descritos e o cálculo da probabilidade de falha de um sistema em série mostrado. Um processo de calibração dos coeficientes parciais de segurança com uso de uma superfície de resposta é apresentado. Um aspecto de projeto relacionado à obtenção das importâncias relativas dos modos de falha baseado no uso da análise de confiabilidade é proposto. Também é proposta uma formulação para obtenção de um índice de confiabilidade global de um modelo de bielas e tirantes baseada

na solução de um problema de confiabilidade que tem como subproblema uma análise limite.

No quinto capítulo são apresentados quatro exemplos relativos a projetos de engenharia envolvendo estruturas planas de concreto armado via modelos de bielas e tirantes. O primeiro exemplo apresentado é uma viga parede simplesmente apoiada e com uma carga no meio do vão, o segundo exemplo uma transversina de ponte, o terceiro exemplo uma viga parede com balanço e o quarto uma estrutura com geometria complexa. Para os três primeiros a obtenção de um modelo topológico obtido via otimização topológica é feita e seu desempenho medido com relação a outros modelos topológicos existentes na literatura. No quarto exemplo uma envoltória topológica é gerada e duas possíveis soluções para modelos de bielas e tirantes são mostradas.

Aspectos relativos aos tipos de avaliações de segurança e os resultados de desempenho obtidos em cada um dos exemplos são apresentados.

No sexto capítulo estão as conclusões e sugestões para trabalhos futuros dentro desta linha de pesquisa.