



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Análise Tridimensional Automática de Blocos de Coroamento

Sandro Martins Gomes¹, Ricardo Valeriano Alves², Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro³

¹ Beton Stahl Engenharia / sandro.gomes@poli.ufrj.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro / Escola Politécnica / valeriano@poli.ufrj.br

³ Universidade Federal Fluminense / Escola de Engenharia / mayra@vm.uff.br

Resumo

O presente trabalho trata da automatização da modelagem e análise de blocos de coroamento rígidos, apoiados em estacas verticais, pelo método das bielas e tirantes. Desenvolveu-se um programa de computador com as seguintes etapas principais: análise do estaqueamento – determinação das cargas absorvidas por cada estaca – geração automática de modelo de treliça espacial respeitando os critérios do método das bielas e tirantes; análise dos diversos modelos estruturais pertinentes. As solicitações nas bielas e tirantes são determinadas, permitindo a verificação automática do concreto comprimido e o dimensionamento das áreas de aço necessárias em cada direção. A energia de deformação de cada modelo é ainda determinada de forma a indicar a definição do arranjo mais adequado de bielas e tirantes. Para validação do programa, apresenta-se um exemplo de solução conhecida, comparando-se os resultados com as respostas fornecidos pelo programa. Finalmente, apresenta-se um estudo de sensibilidade às inevitáveis imperfeições geométricas de um estaqueamento real.

Palavras-chave

Biela e tirante; bloco de coroamento; concreto armado.

Introdução

Preferencialmente, os blocos de coroamento são idealizados como rígidos, sem dimensões preponderantes, sendo analisados como uma região de descontinuidade, não sendo válidas as hipóteses de Bernoulli. A norma brasileira NBR6118:2014 recomenda que esse tipo de estrutura deva ser dimensionada pelo método das bielas e tirantes. Além disso, estudos mostraram que esse método leva a resultados mais próximos aos obtidos em ensaios físicos (ADEBAR e ZHOU (1996)), se comparado com dimensionamento por esforços seccionais. Por essa razão, o método de bielas e tirantes foi escolhido para este trabalho.

Uma primeira motivação para a automatização, aqui proposta, é auxiliar o engenheiro na modelagem e análise, pelo método das bielas e tirantes de blocos com configuração mais complexa. Dependendo do estaqueamento, ou da presença de mais de um pilar, uma abordagem computacional pode ser de grande auxílio. Além disso, após finalizado o estaqueamento, é usual a necessidade de se verificar os efeitos dos inevitáveis desvios geométricos em algumas estacas. Na prática esta verificação de excentricidades ocorre durante a execução, entre a armação e concretagem do bloco. Dispondo-se de rotina automática o processo de verificação pode ser concluído com muito mais rapidez.

Este trabalho é consequência do Projeto de Graduação do primeiro autor, GOMES (2015).



Análise do estaqueamento

Para elaboração de um modelo de bielas e tirantes, devem-se conhecer previamente todas as forças externas ao elemento estrutural estudado, sendo essa, uma condição de contorno básica. No caso de um bloco de coroamento essas forças externas são as solicitações seccionais na base do pilar, decompostas em forças e momentos, e as reações das estacas.

Com isso, a primeira das etapas principais da automatização deve ser a de análise do estaqueamento. Para os casos aqui estudados, foram aceitas certas simplificações que são usualmente adotadas na prática: o bloco de coroamento é considerado infinitamente rígido, as estacas são adotadas como bi-rotuladas, o comportamento do sistema é elástico-linear e ignora-se o confinamento do solo tanto no bloco como nas estacas.

Definição dos nós do modelo espacial

A definição do modelo estrutural em bielas e tirantes é um processo que requer sensibilidade e experiência. Dada uma região de descontinuidade com certo conjunto de cargas externas, é necessário determinar um arranjo de elementos de treliça posicionados de forma a representar as principais trajetórias de forças internas. Esse arranjo deve ser inspirado no campo de tensões, obtido, por exemplo, em uma análise elástica do meio contínuo. Além disso, os elementos tracionados devem estar concebidos de forma a permitir uma disposição viável das armaduras.

Essa compatibilização de condições faz com que o processo não seja de fácil automatização, ainda mais quando se trata de uma estrutura com dimensões consideráveis nas três direções. Porém, no caso de blocos de coroamento, é possível assumir que todos os nós do modelo estão situados em dois planos: no fundo e no topo do bloco.

Para blocos suficientemente rígidos, nos quais a biela de compressão possa chegar à estaca mais distante sem ter que ser suspensa, os nós do modelo são prontamente definidos. No plano do fundo do bloco, tem-se para cada estaca, sempre, um nó. No plano de topo do bloco, são considerados tantos nós quantos necessários para decompor as ações da base do pilar em forças verticais. Além desses nós pré-estabelecidos, o programa deve gerar nós para transferência de carga na face oposta a cargas externas de tração, simulando a “suspensão da carga”.

Matriz de conexão de nós

A partir da definição dos nós, deve-se determinar os elementos que representam as bielas e tirantes do modelo. Para sintetizar todas as possibilidades de elementos foi idealizada uma “matriz de conexão de nós”. Essa matriz é a base da concepção da metodologia de automatização proposta e se encontra ilustrada na Figura 1.

A matriz divide essas conexões em dois grupos: ligações em elementos intraplanos ou ligações interplanos. A princípio, não há restrições para os elementos do primeiro grupo e o número de conexões possíveis é a combinação simples do número de nós na base de dois em



dois mais a combinação simples do número de nós do topo de dois em dois. Esses são os elementos do tipo 3 (em verde) da matriz da Figura 1.

Porém para o segundo grupo, a definição dos elementos varia conforme a carga aplicada aos nós. Caso um nó esteja com solicitação de tração, um único tirante é formado para transferir essa carga até o plano oposto, chamando esse elemento de tirante obrigatório. Esses tirantes estão ilustrados, na matriz, pelo tipo 1 (em magenta).

Além dos tirantes obrigatórios, os nós podem se conectar a qualquer nó do plano oposto por bielas (elementos do tipo 2, representados em amarelo).

Combinações de elementos

Mesmo não sendo uma obrigação, é altamente aconselhável que a treliça escolhida como modelo de bielas e tirantes seja isostática. Caso contrário, a distribuição de forças entre os elementos dependerá das propriedades físicas e geométricas de cada um, levando a um complexo processo iterativo para construção do modelo.

Por essa razão, o próximo passo da automatização é a definição de todas as combinações de elementos que levem a uma treliça espacial isostática:

$$\text{elementos} = 3 \times (\text{nós}) - 6 \quad (1)$$

A quantidade de elementos definida acima é uma condição necessária, mas não suficiente. Com a quantidade de elementos correta, pode-se ter muitas barras ligadas a um nó enquanto outro fica sem elementos suficientes para garantir o equilíbrio. Para garantir o equilíbrio do sistema, cada nó da treliça deve ligar, no mínimo, três elementos com direções não coplanares.

Após a definição de todas as combinações de elementos que formam as treliças espaciais isostáticas, uma rotina padrão de análise pelo método dos deslocamentos deve ser implementada. A solicitação axial em cada barra de cada modelo é determinada e armazenada.

Restrições

Para que uma treliça espacial possa representar um modelo de bielas e tirantes, algumas regras devem ser respeitadas. Todas as treliças formadas, mesmo que isostáticas, que não atendam a essas restrições devem ser descartadas.

Uma primeira regra, de caráter conceitual, é a reprovação do cruzamento de bielas fora dos nós. Caso isso ocorra, existirão na região de cruzamento, tensões que não serão bem definidas.

Além disso, a inclinação entre bielas e tirantes nos nós é limitada para não provocar problemas de compatibilidade de deslocamentos entre regiões próximas, nem abertura



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

excessiva de fissuras. Os limites variam segundo cada norma. A NBR6118:2014 restringe a tangente desse ângulo entre 0,57 e 2,0.

Existe, também, uma restrição construtiva que deve ser aplicada ao método das bielas e tirantes. Os tirantes do modelo serão materializados por armaduras na estrutura a ser construída. Então, para o caso de blocos de coroamento, é desejável que os tirantes estejam sempre nos planos do topo ou fundo do bloco ou ainda na vertical para transferência de carga, mas nunca inclinados.

Podem ser consideradas, ainda, outras restrições teóricas ou construtivas pré-definidas pelo engenheiro. Por exemplo, pode ser informado de antemão ao programa, posições onde se tem certeza que se deseja colocar armaduras, assim, o programa cria tirantes obrigatórios. Com isso, o número de modelos, dentre os quais o usuário deve escolher, diminui.

Escolha do modelo

Dependendo da quantidade de estacas, da decomposição das ações do pilar e das restrições de escolhas impostas, o número de modelos possíveis pode atingir milhares. Segundo SCHLAICH (1987), uma das maneiras de escolher o melhor modelo de bielas e tirantes é o critério de energia de deformação. A magnitude da energia de deformação pode ser avaliada pelo somatório dos produtos da força de tração e comprimento de cada tirante.

Para facilitar a escolha do modelo pelo usuário, a automatização determina a energia de deformação de cada caso e apresenta os resultados ordenando pelo arranjo de elementos mais eficiente (com menor energia) e indo até o modelo com maior energia.

Para uma dada estrutura, um conjunto de cargas externas e certas condições de apoio, não existe um único modelo correto de bielas e tirantes. A modelagem é algo que depende muito da interferência do engenheiro. Então é inevitável a interferência do usuário, que deve escolher o sistema mais adequado dentre todos os possíveis gerados automaticamente pelo programa.

Fluxograma geral

O fluxograma da Figura 2 sintetiza as etapas descritas anteriormente, propostas para a automatização da modelagem e análise de blocos de coroamento por bielas e tirantes.

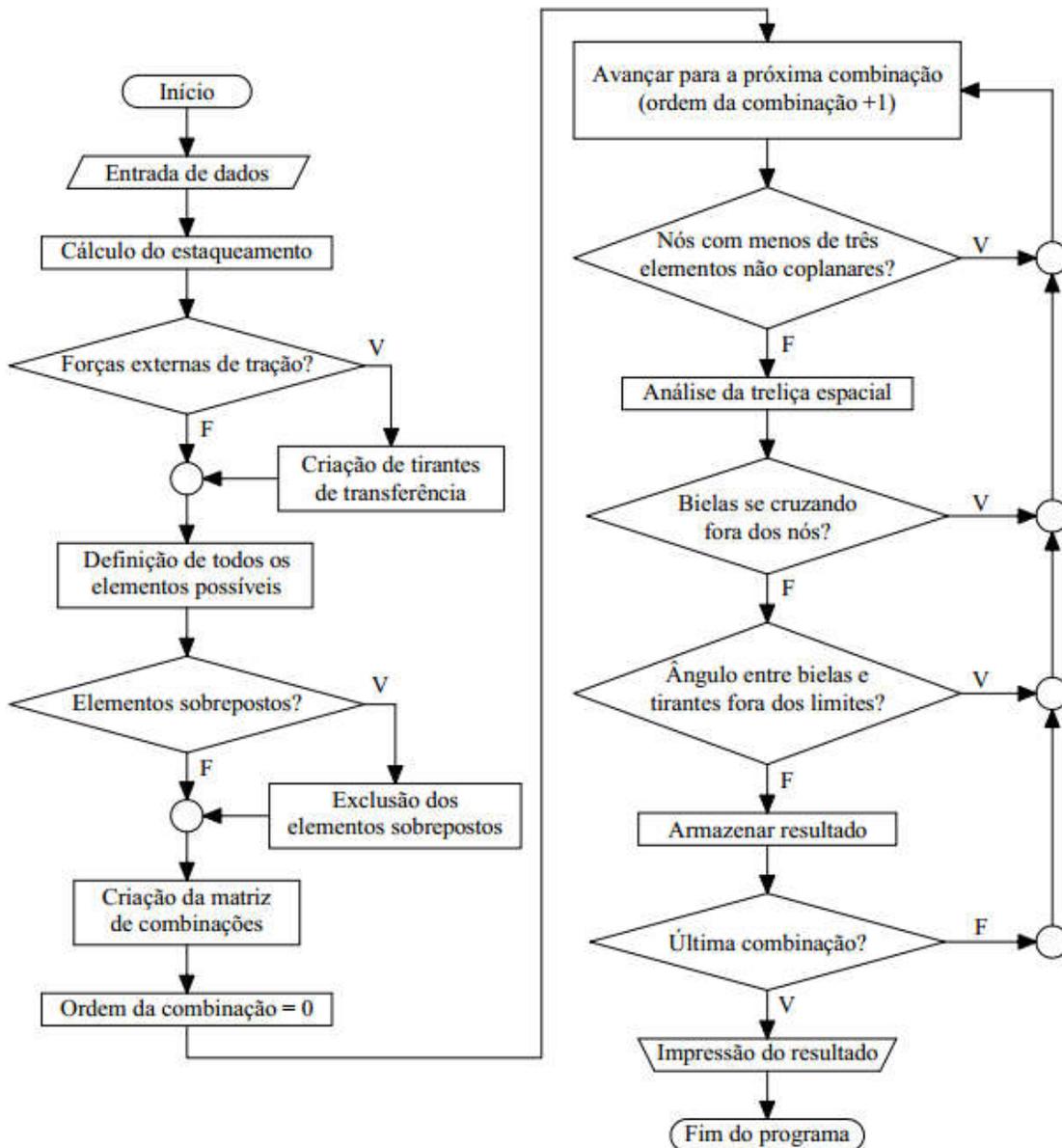


Figura 2 - Fluxograma da automatização.

Variação da energia de deformação

Uma das mais interessantes aplicações do programa desenvolvido é o estudo de sensibilidade do bloco de coroamento aos inevitáveis desvios geométricos (excentricidades) ocorridos durante a execução do estaqueamento. Como a energia de deformação é uma grandeza diretamente ligada à quantidade de aço necessária para a armadura do bloco, ao estudar como essa energia varia com a imposição de imperfeições geométricas, tem-se as eventuais consequências dessas imperfeições na armadura.

Com este propósito apresenta-se um estudo de sensibilidade de imperfeições, aplicado ao bloco de coroamento descrito na Figura 3. São consideradas excentricidades construtivas, definidas aleatoriamente, a cada uma das estacas. Os efeitos dessas excentricidades, avaliados por meio de variações na energia de deformação de cada modelo possível, são apresentados a seguir.

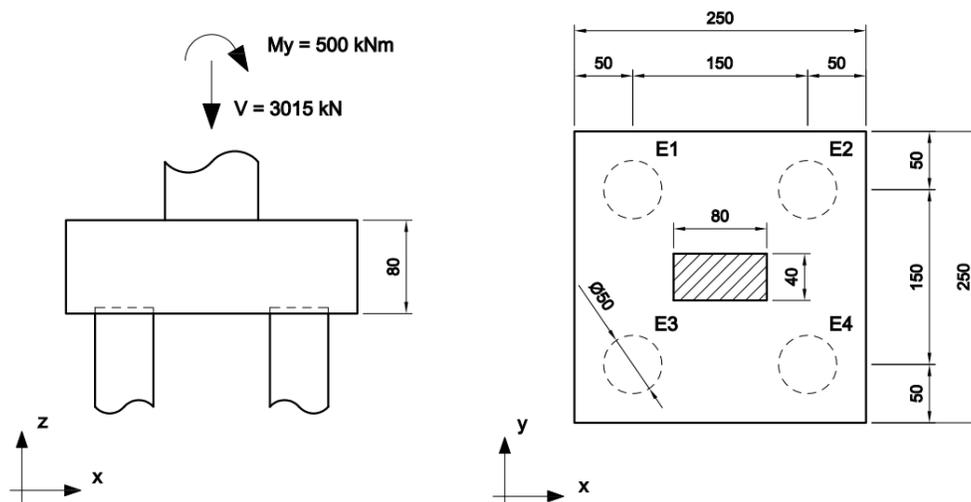
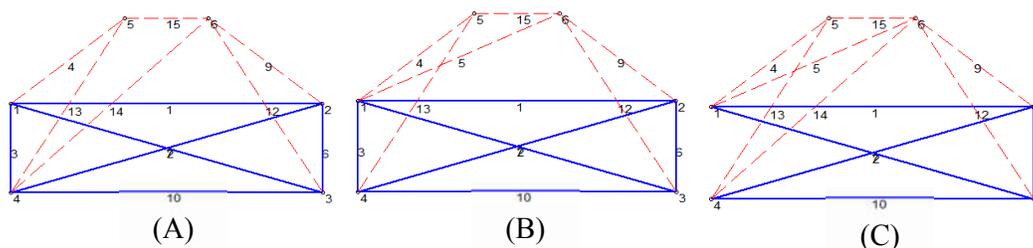


Figura 3 - Bloco exemplo

Para esse caso, o programa retornou oito modelos de treliças isostáticas que atendem a todas as verificações. Essas treliças serão designadas por letras, de “A” a “H”, em ordem crescente tomando por base a energia de deformação do estaqueamento *perfeito* (sem deslocamentos nas estacas). A Figura 4 mostra os oito modelos possíveis para o bloco em estudo e que são utilizadas para a análise da sensibilidade a imperfeições.



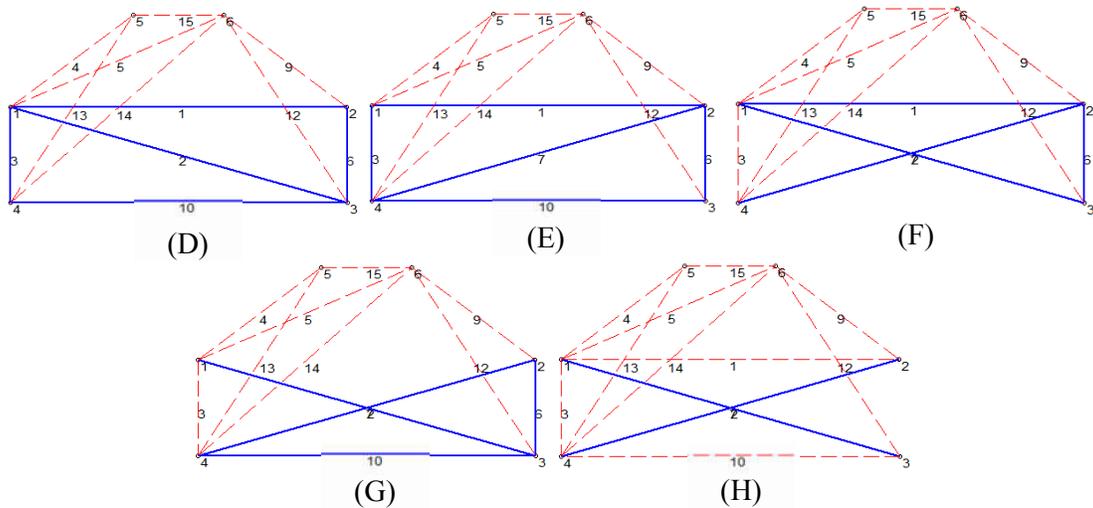


Figura 4 - Arranjos de elementos possíveis para modelos do bloco do exemplo de validação.

A Figura 5 mostra os deslocamentos que foram impostos a estaca 1, levando as configurações que são aqui chamadas de estaqueamentos *imperfeitos*.

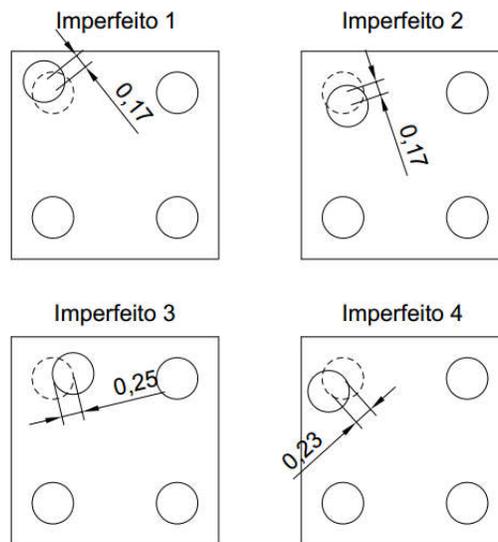


Figura 5 - Imperfeições impostas à estaca E1.

A partir da avaliação da energia de deformação de cada modelo imperfeito é possível visualizar a sensibilidade a deslocamentos a partir do gráfico ilustrado na Figura 6. As setas, em cinza, mostram a energia de deformação máxima e mínima obtida para cada modelo, enquanto o traço horizontal corresponde à energia do estaqueamento perfeito.

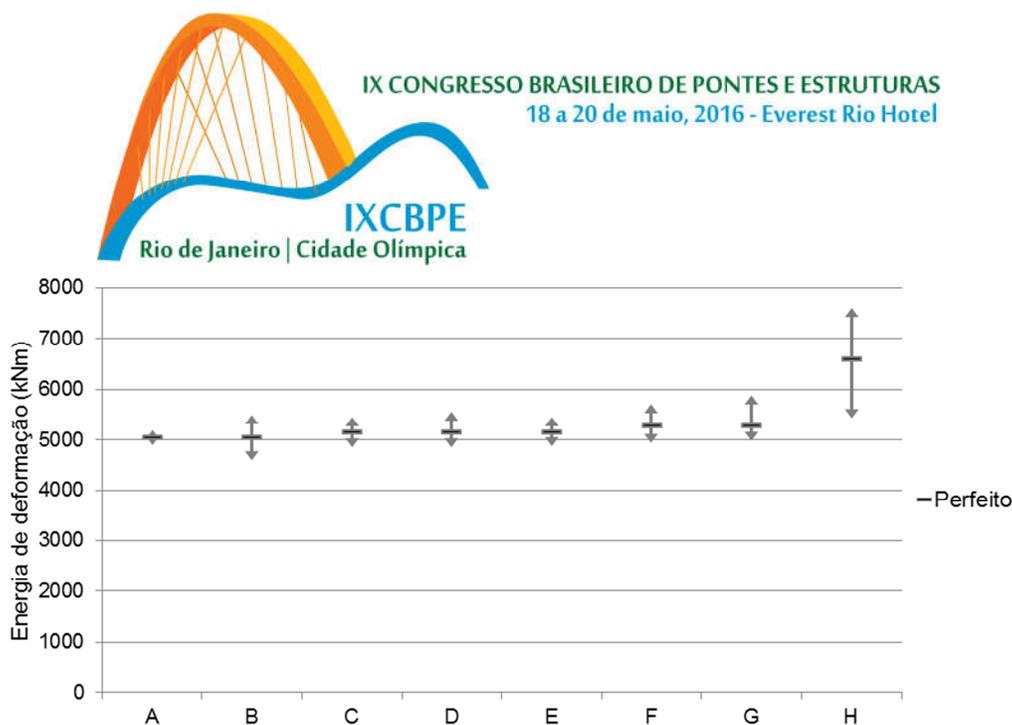


Figura 6 - Sensibilidade de cada modelo a imperfeições geométricas.

Como pode ser visto, o modelo “H”, além de requerer uma energia de deformação muito maior que os outros modelos para a situação ideal, também tem uma sensibilidade a deslocamentos excessiva. Com isso, a análise de sensibilidade indica que a armação em cruz para blocos de quatro estacas apresenta desempenho inferior se comparada com a armação pelas arestas ou uma combinação das duas.

Conclusões

A rotina proposta, baseada no conceito de matriz de conexão de nós, mostrou-se capaz de automatizar a modelagem e análise de um bloco de coroamento pelo método das bielas e tirantes. A partir dos dados de geometria, do bloco e das estacas, e ações na base do pilar, o programa executa automaticamente a análise do estaqueamento, verifica a necessidade da transferência de cargas aplicadas de tração, forma todos os modelos de bielas e tirantes possíveis e determina as solicitações nos elementos de treliça.

O programa fornece elementos que permitem ao usuário definir o modelo final para detalhamento das armaduras. Deve-se escolher o modelo mais adequado não só dentre aqueles que respeitam os requisitos definidos, mas também os critérios práticos de detalhamento. A decisão final deve sempre ser de responsabilidade de engenheiro experiente, sendo o programa uma ferramenta confiável para análise de diversos modelos possíveis.

Conforme o número de estacas e pontos de introdução de carga aumenta, tem-se um número expressivo de treliças a serem analisadas. Por isso, devem-se impor restrições ao programa para reduzir ao máximo o número de opções de modelos para escolha feita pelo usuário. Na rotina elaborada, foram feitas restrições conceituais como a obrigatoriedade de a treliça ser isostática, do não cruzamento de bielas e da limitação do ângulo entre bielas e tirantes. Além disso, uma restrição prática foi imposta, não permitindo a existência de tirantes não verticais, ligando a base e o topo do bloco.



Outras restrições podem ser adicionadas ao programa. Como por exemplo, o usuário pode informar, de antemão, nós que a serem conectados por tirantes no fundo do bloco, criando assim, tirantes obrigatórios que reduzem o número de resultados expostos ao final. Como um dos interesses primários deste trabalho é o estudo dos resultados que podem ser obtidos, restrições opcionais foram evitadas e a única adotada foi a descrita no parágrafo anterior.

Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318-14, Building Code Requirements for Structural Concrete. 2014.
- ADEBAR, P.; ZHOU, L. Design of deep pile caps by strut-and-tie models. *ACI Structural Journal*, v. 32, n. 4. 1996.
- ALVES, R. L. Fundações profundas, Notas de aula do curso de Estruturas de Fundações. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118:2014, Projeto de estruturas de concreto armado – procedimento. 3 ed, 2014.
- BLÉVOT, J. L.; FRÉMY, R. Semelles sur pieux. *Institute Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, v. 20, n. 230, pp. 223-295, 1967.
- CHANTELOT, G.; MATHERN, A. Strut-and-tie modeling of reinforced concrete pile caps. M.Sc. thesis, Chalmers University of Technology, 2010.
- GOMES, S. Análise tridimensional automática de blocos de coroamento. Projeto de Graduação, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015.
- KLEIN, G. J. Pile Cap. In: Examples for the design of structural concrete with strut-and-tie model, SP208, American Concrete Institute, pp. 213-224, 2002.
- POULOS, H. G.; DAVIS E. H. Pile foundations analysis and design. 1 ed. John Wiley and Sons Inc, 1980.
- SANTOS, S. H. C. Detalhamento de estruturas de concreto armado. Notas de aula do curso, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014
- SCHLAICH, J.; SCHÄFER, K.; JENNEWEIN, M. Toward a consistent design of structural concrete. *PCI Journal*, v. 32, n. 3 (maio-junho), pp. 74-150, 1987.
- SORIANO, H. L. Análise de estruturas – formulação matricial e implementação computacional. 1 ed. Editora Ciência Moderna Ltda, 2005.
- SÜSSEKIND, J. C. Curso de análise estrutural – v. 1, Estruturas isostáticas. 11 ed, Editora Globo S.A, 1991.
- VELLOSO, D. A, LOPES, F. R. Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. 1 ed., Oficina de Textos, 2010.
- WIGHT, J. K.; MACGREGOR, J. G. Reinforced concrete: mechanics and design. 6 ed., Person Education, 2012.