

Repensando a Ligação Estaca Metálica-Bloco de Coroamento: O Que os Modelos Não Lineares Revelam?

Tiago de Jesus Souza

Eng. D.Sc., **Strageo Engenharia e Consultoria Geotécnica**, Jundiaí, São Paulo, tiago.souza@strageo.com.br

RESUMO: A ligação entre estacas metálicas e blocos de concreto representa um desafio significativo tanto na prática de engenharia quanto no meio acadêmico, dada a escassez de estudos de caso documentados. Este trabalho apresenta uma investigação numérica tridimensional da interação estaca-bloco por meio do software ATENA, utilizando modelos constitutivos não lineares. A modelagem do concreto baseou-se na abordagem de fissuração distribuída (“Smeared Crack Models”), permitindo a representação de diversos fenômenos associados ao comportamento do material. Foram considerados na análise aspectos como a não linearidade em compressão, critérios de ruptura biaxial, fratura em tração com base na mecânica da fratura não linear, degradação da resistência à compressão após fissuração, efeito de enrijecimento à tração e retenção de cisalhamento dependente da abertura das fissuras. O estudo baseia-se em um caso real localizado em uma região litorânea do estado de São Paulo. A previsão numérica realizada ficou aderente ao ensaio contribuindo para o entendimento mais aprofundado do comportamento desse tipo de conexão e para a prevenção de falhas em aplicações futuras com o uso de modelos não lineares.

PALAVRAS-CHAVE: Estaca metálica, Bloco de concreto, Modelagem numérica, Interação estaca-bloco, Mecânica da fratura.

ABSTRACT: The connection between steel piles and concrete caps represents a significant challenge both in engineering practice and in academic research, due to the scarcity of documented case studies. This work presents a three-dimensional numerical investigation of the pile-cap interaction using the ATENA software, applying nonlinear constitutive models. The concrete modeling was based on the smeared crack approach, allowing the representation of various phenomena associated with material behavior. The analysis considered aspects such as compressive nonlinearity, biaxial failure criteria, tensile fracture based on nonlinear fracture mechanics, compressive strength degradation after cracking, tension stiffening effect, and shear retention dependent on crack opening. The study is based on a real case located in a coastal region of the state of São Paulo. The numerical prediction aligned well with the test results, contributing to a deeper understanding of the behavior of this type of connection and to the prevention of failures in future applications through the use of nonlinear models.

KEYWORDS: Steel pile, Concrete cap, Numerical modeling, Pile-cap interaction, Fracture mechanics.

1 Introdução

A conexão entre estacas metálicas e blocos de concreto é um elemento crítico no desempenho de fundações profundas, especialmente em obras que demandam alta capacidade de carga e controle rigoroso de deformações. Apesar de sua relevância prática, esse tipo de ligação ainda carece de estudos sistemáticos e aprofundados na literatura técnica, sobretudo no que diz respeito ao comportamento não linear e tridimensional da interface estaca-bloco. Do ponto de vista da engenharia de fundações, compreender a transferência de



esforços nessa interface é fundamental para garantir a integridade estrutural do sistema e a segurança global da obra. No entanto, os modelos simplificados e lineares comumente utilizados em projeto muitas vezes não capturam adequadamente os fenômenos envolvidos, como fissuração do concreto, redistribuição de tensões, punção localizada e os efeitos de rigidez diferencial entre os materiais. Essa lacuna evidencia a necessidade de investigações mais detalhadas, que considerem o comportamento real dos materiais e das interfaces envolvidas.

Adicionalmente, a escassez de casos documentados e estudos experimentais sobre o tema limita a consolidação de diretrizes normativas e práticas de projeto específicas para essa situação. Assim, o presente trabalho busca contribuir para esse campo por meio de uma abordagem numérica avançada, utilizando o software ATENA com modelos constitutivos não lineares que permitem simular os principais mecanismos físicos que governam a interação entre estaca metálica e bloco de concreto. A motivação deste artigo está ancorada tanto na demanda prática por soluções mais seguras e otimizadas, quanto na carência de modelos representativos que reproduzam com maior fidelidade o comportamento desse tipo de ligação estrutural. Ao investigar numericamente os efeitos da fissuração, da não linearidade e das propriedades específicas do concreto e do aço, pretende-se oferecer subsídios técnicos que possam orientar tanto a análise quanto o projeto de fundações compostas por estacas metálicas conectadas a blocos de concreto. É muito comum nas hipóteses de cálculo definir a transferência de esforços de compressão entre o bloco de concreto e a estaca metálica definindo assim a capacidade de carga resistente do sistema bloco-estaca.

Nessa perspectiva o objetivo desse artigo é apresentar uma análise numérica estrutural não-linear pelo Método dos Elementos Finitos. Tal análise visa investigar a capacidade de carga do sistema bloco-estaca metálica de forma mais realista fundamentada em modelos constitutivos dos materiais concreto e aço que não dependa da premissa de dimensionamento que é ponto divergente entre as duas empresas. Tal estimativa da capacidade de carga oferece, portanto, uma análise de engenharia que contribui para uma visão mais realista das prováveis causas da ruptura dos blocos de coroamento.

2 Revisão da Literatura técnica com Ensaios Experimentais

Um dos estudos mais antigos e extensos de base experimental da ligação comprimida das estacas de perfis H com os blocos de concreto, que se tornou referência internacional, foi conduzido no Departamento de Estradas de Rodagem do estado de Ohio, EUA, nos idos de 1947 (Shaffer e Williams, 1947).

Nesse estudo, foram ensaiadas em laboratório 47 ligações estaca-bloco, utilizando perfis H de 150mm e H 250 mm com penetrações no bloco variando de 15 cm a 47 cm, perfis sem qualquer dispositivo complementar, perfis com chapas soldadas em sua extremidade no bloco, com cintamento, com diferentes classes de resistência do concreto e com diferentes condições de contorno/suporte. O objetivo principal desse estudo foi o de verificar a real necessidade de se utilizar placas metálicas soldadas na cabeça da estaca com o objetivo de distribuir as tensões em uma área maior do que a área do perfil metálico limitando assim as tensões de compressão a um determinado limite adotado na época. A conclusão desse estudo foi sumária e é traduzida abaixo:

“...a evidência que se acredita ser conclusiva é que se o topo de uma estaca metálica perfil H está envolvida pelo concreto em um bloco ou sapata, e se a estaca tem seção adequada e o bloco tem dimensões adequadas e armação apropriadamente dimensionada e disposta para as forças nas estacas, não há necessidade de preocupar-se com a resistência da ligação para forças de compressão, e é desnecessário prover placas metálicas ou outro dispositivo auxiliar de transferência de carga ao topo da estaca”

Essa conclusão deu margem a interpretação no meio técnico de que, se a placa metálica que cobria a cabeça da estaca era desnecessária, seria então possível assumir que a área reduzida contribuinte a resistência ao esmagamento, seria ao menos aquela do perfil metálico somada a área do concreto confinado entre as abas da estaca.

Um dos estudos experimentais de blocos de coroamento sobre estacas metálicas disponíveis na literatura técnica Brasileira que também contribui à interpretação acima é aquele apresentado por Tomaz (2018).



3. MODELOS NÃO LINEARES

O comportamento à compressão é representado por um modelo de plasticidade, que utiliza os três parâmetros de superfície de Menetrey & Willam (1995) (Figura) e o amolecimento de endurecimento é definido de acordo com as leis descritas nas

Figura e Figura . O amolecimento na tensão e compressão é ajustado usando uma abordagem de banda de fissura de Bazant & Oh (1983). A banda de fissura L_t e o tamanho da banda de esmagamento L_c são ajustados em relação à abordagem de orientação da fissura proposta por Červenka et al (1995). Esse método está representado na Figura .

Através da superfície plástica proposta por Menetrey e Willam (1995) é também possível obter o comportamento uniaxial do concreto como apresentado na Figura . Neste caso, a equação não linear de tensão deformação à compressão obtida é a mesma daquela apresentada na

Figura da Seção 8.2.10.1 da NBR 6118:2023. No entanto a relação à tração apresentada pela NBR 6118:2023 é truncada na deformação correspondente à resistência à tração de pico (Figura da Seção 8.2.10.2) enquanto a relação adotada neste modelo representa o comportamento completo, incluindo o amolecimento pós pico. Esse adicional é necessário para capturar o processo de fissuração do concreto e, portanto, o correto efeito não linear como requerido pela NBR 6118. O modelo constitutivo adotado para a armadura, segue a mesma relação de tensão-deformação, resistência ao escoamento e à tração como aquela apresentada na Seção 8.3.6 da NBR 6118:2023.

Os efeitos do confinamento biaxial ou estado de tensões multiaxiais são considerados com base na relação apresentada por Kupfer et al. (1969) como ilustrada em Figura que é equivalente aquela recomendada na Seção 8.2.6 da NBR 6118:2023.

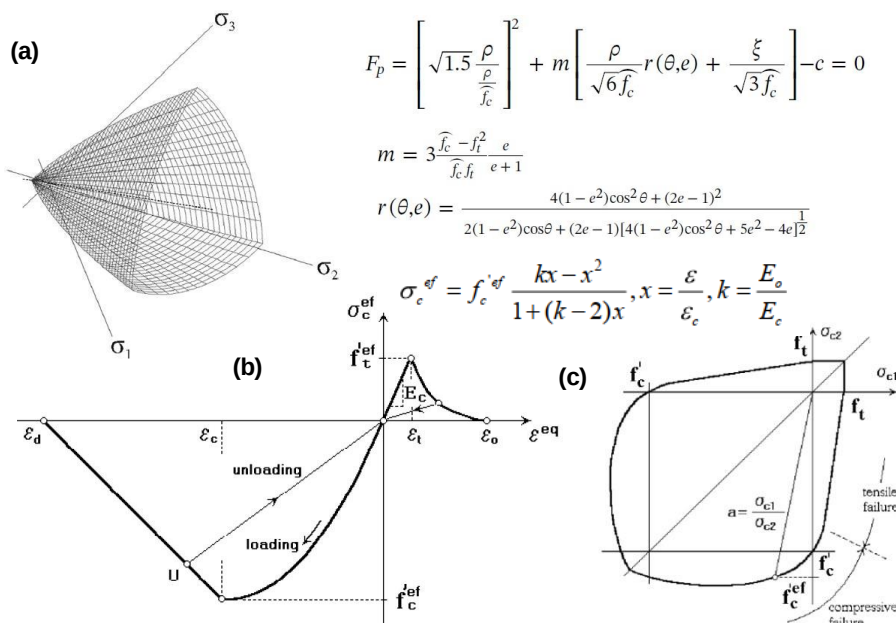


Figura 1 -Relações constitutivas do modelo de concreto adotado no programa ATENA: (a) Envoltoria de Menetrey e Willam (1995); (b) comportamento uniaxial e (c) efeito de confinamento biaxial baseado em Kupfer (1969).



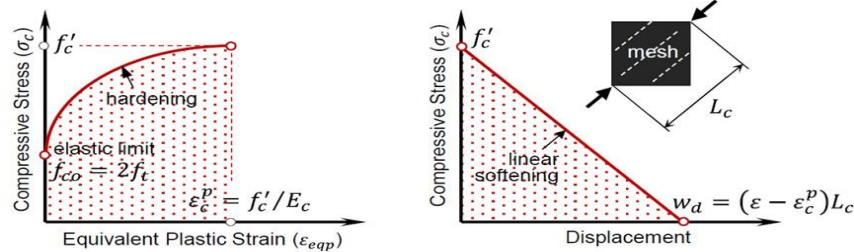


Figura 2 - Leis de endurecimento e amolecimento à compressão do modelo constitutivo do concreto.

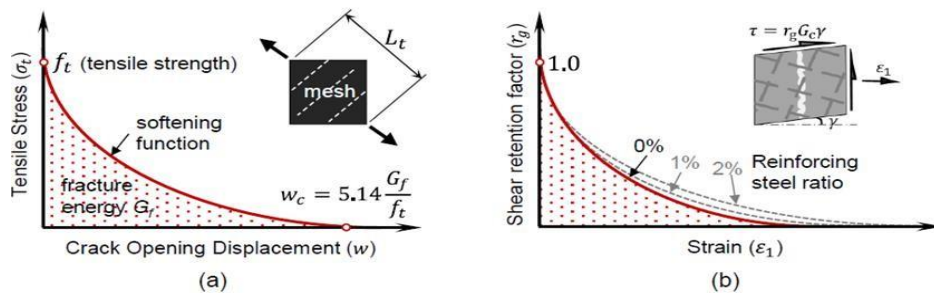


Figura 3 - Leis de abertura de fissuras à tração (banda de fratura L_t) e retenção de resistência ao cisalhamento versus deformação do modelo constitutivo do concreto.

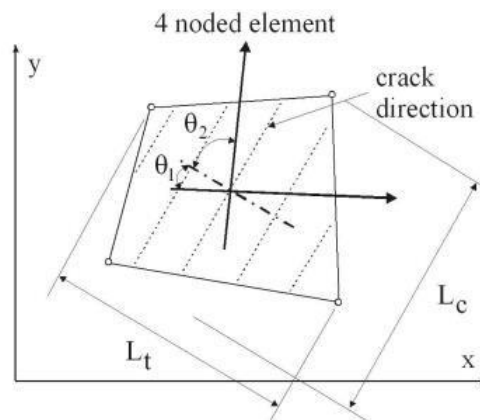


Figura 4 - Ajuste do tamanho da banda de fissuramento baseado na orientação da direção da fissura.

Souza e Oliveira (2024) realizaram um estudo de túnel na Austrália com modelagem não linear em concreto reforçado com fibras de aço, validada por ensaios físicos. Os resultados mostraram que o reforço convencional seria desnecessário, ao contrário da análise elástica linear. A capacidade resistente das fibras foi 4 a 5 vezes superior à prevista inicialmente.



3 Materiais e Métodos

3.1 Considerações Gerais

A fundação da estrutura é composta por 608 unidades de perfis metálicos tipo H, de bitolas W 310x117, com níveis de carregamento de até 250. O comprimento estimado dos perfis metálicos pela projetista foi de aproximadamente, 42,00 metros. A seguir se apresenta um registro fotográfico das inspeções técnicas de campo em obra na região litorânea de São Paulo, com destaque às fundações avaliadas na inspeção. A abertura de poços de inspeção junto aos apoios revelou um esmagamento nas estacas quase na totalidade dos blocos de concreto da fundação (sob essas vigas).

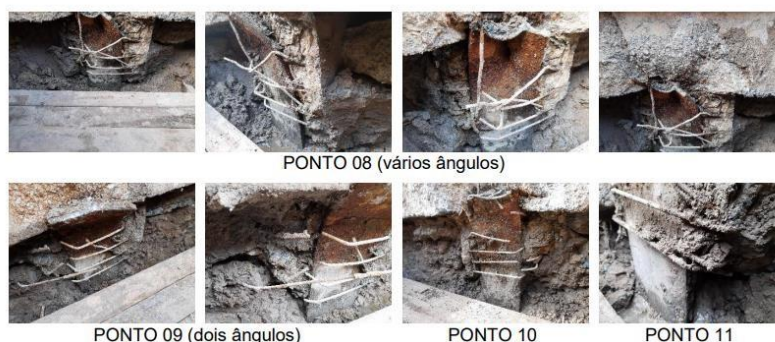


Figura 5- Registros fotográficos de alguns blocos rompidos ilustrando, na qual se nota excentricidades entre estacas e blocos.

O mesmo ocorreu em um bloco e capitel de estaca no interior de outra estrutura, ilustrado na sequência de registro fotográfico.

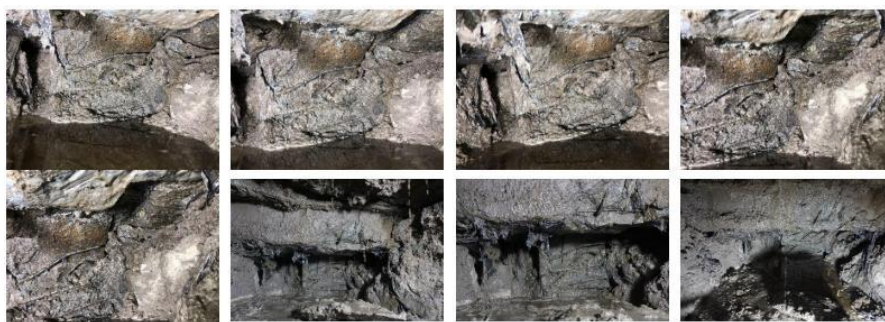


Figura 6 – Registros fotográficos do bloco interno (capitel) a outra estrutura

Salienta-se que o desempenho dessas estruturas depende de uma série de fatores, como: Projeto Executivo sequência construtiva empregada (podendo ser diferente), da implantação das fundações (com seus respectivos controles tecnológicos de execução das estacas e solos), dos comprimentos das estacas, dos demais materiais empregados, como por exemplo, dos concretos (com os seus respectivos controle tecnológicos) e por fim históricos de carregamentos, que certamente podem ocorrer de forma distinta. As manifestações patológicas evoluíram ao longo do tempo. Visando entender as causas da patologia elencada nas imagens anteriores que podem ocorrer desde concepção de projeto até erros de execução, buscou-se retroanalisar o caso através de uma modelagem tridimensional não linear.



3.2 Software Utilizado

O programa selecionado para a realização das análises foi o programa ATENA - Advanced Tool for Engineering Nonlinear Analysis (Červenka et al., 2009) que utiliza o Método de Elementos Finitos (MEF). ATENA pertence à categoria de programas de análises avançadas como ABAQUS ou ANSYS, mas se concentra em estruturas de concreto armado e materiais frágeis. Com o ATENA é possível simular o comportamento real de estruturas de concreto armado, incluindo fissuração, esmagamento, fendilhamento e escoamento de armaduras. O processo de fissuração é baseado em conceitos da mecânica da fratura resolvidos de forma implícita nos elementos finitos.

Essa representação implícita do comportamento reológico do concreto é baseada em um Modelo de Fissuração Distribuída (Smeared Crack Model) ao contrário de Modelos de Fissuras Discretas que tem o comportamento das fissuras explicitamente discretizado, requerendo um constante atualização da malha de elementos finitos com significativo custo computacional.

Para capturar de forma mais eficiente o efeito das fissuras no “amolecimento” da resistência do concreto de forma implícita, sem grande influência do tamanho dos elementos finitos, i.e., efeitos de malhas, é adotada a abordagem da banda de fraturamento ou de fissuramento proposta por Bažant e Oh (1983) para remediar a convergência à dissipação de energia ao valor zero. Červenka (1995) demonstrou que a formulação adequada do tamanho da banda de fissura pode reduzir severamente também o viés de dependência de malha nas abordagens de Modelo de Fissuração Distribuída.

3.3 Descrição do Modelo

O modelo foi discretizado com base na geometria de projeto como apenas um quadrante considerando os planos de simetria existentes (

Figura). As armaduras consistem em barras de diâmetro $\phi = 10$ mm seguindo a distribuição espacial conforme o projeto estrutural.

A carga é aplicada gradualmente no topo do bloco com a base da estaca fixa na direção da carga. Essa prova de carga virtual é levada até sua ruptura através da aplicação de deslocamentos no topo do bloco com monitoramento das forças de reação e deslocamentos

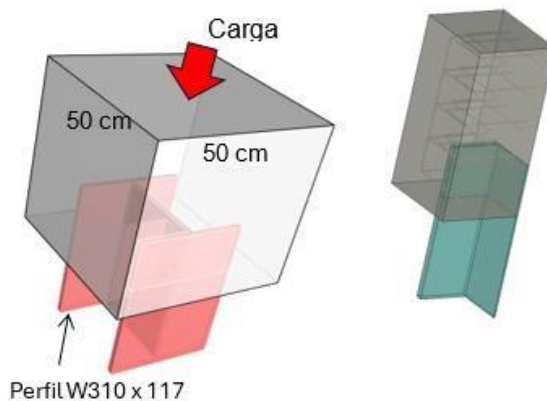


Figura 7 -Visão geral da geometria e quadrante usado no modelo numérico.



3.4 Modelos Constitutivos e Parâmetros

A estaca é modelada com elementos sólidos usando o modelo elástico-plástico de Von Mises com critério de escoamento de 345 MPa, módulo de Young $E = 200$ GPa e coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$. A interface entre a estaca e o concreto é modelada com elementos de contato somente com coeficiente de atrito de 0,36 sem qualquer coesão ou aderência.

O concreto foi discretizado com elementos sólidos com o Modelo de Fissuração Distribuída (Smeared Crack Model) usado no ATENA com base no modelo combinado de fratura-plasticidade de Červenka & Papanikolaou (2008).

O concreto foi discretizado com resistência à compressão dada com $f_{ck} = 39$ MPa, resistência à tração dada por $f_{tk} = 3,45$ MPa, módulo de Young $E = 32$ GPa, coeficiente de Poisson de $\nu = 0,2$, energia de fratura $G_f = 141 \times 10^{-6}$ MN/m, limite elástico à compressão $f_{co} = 7.24$ MPa, deslocamento crítico à compressão $w_d = 0.5$ mm e deformação plástica de pico à compressão de $\epsilon_{cp} = 0,0013$.

Os parâmetros adotados são baseados no valor médio da resistência a compressão simples do concreto obtidos durante o controle de qualidade da obra, sem a aplicação de coeficientes de redução de resistência, visto o modelo considerar uma prova de carga que define a resistência real (numérica) que pode posteriormente ter fatores de redução aplicados.

4 Resultados e Discussão

A Figura apresenta a curva carga-deslocamento observado no modelo numérico da prova de carga virtual. O bloco somente rompe ao chegar a uma carga de aproximadamente 390 tf. Desta forma a análise numérica também confirma que a área de atuação das forças de esmagamento é maior do que somente a área do perfil. Considerando esta capacidade de carga de 390 tf contra o valor da solicitação característica de estimada 250 tf pela projetista, obtém-se um fator de segurança global equivalente de $FS = 1,56$.

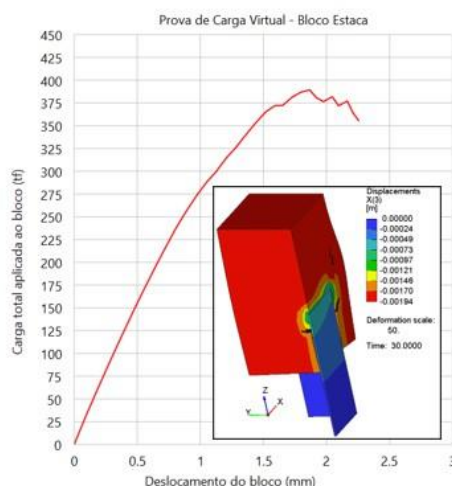


Figura 8 - Prova de carga virtual: bloco com armadura.



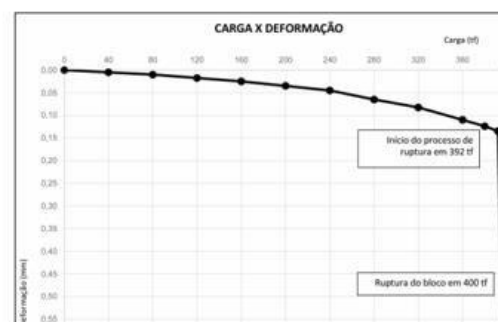
Posteriormente a execução da modelagem (realização em 2024) foi realizado uma prova de carga (realização em Junho de 2025). As características da prova de carga é apresentada na Figura 9 e na figura 10 a vista geral da prova de carga com o resultado.

TIPO DO ELEMENTO TESTE	BLOCO DE CONCRETO + PERFIL METÁLICO
MATERIAL	CONCRETO FCK 40MPA
TIPO DE TESTE	EXPERIMENTAL
DIMENSÕES DO BLOCO - CM	50X50
ALTURA DO BLOCO - CM	50
PERFIL METÁLICO	W310X117
CARGA NOMINAL - tf	250,00
CARGA MÁXIMA DE ENSAIO - tf	400,00
ESTRUTURA DE APOIO	PÓRTICO METÁLICO
DATA REALIZAÇÃO DO ENSAIO	13/06/2025
ESTRUTURA DA PROVA DE CARGA	
SISTEMA DE ANCORAGEM	MONOBARRAS ESPECIAIS
ÁREA MAC. HIDRÁULICO - cm²	587,00
ESTRUTURA DA PROVA DE CARGA	PÓRTICO + VIGAS METÁLICAS

Figura 9- Características da Prova de carga



(a)



(b)

Figura 10- Vista geral da montagem do ensaio (a) e Resultado da curva carga versus recalque da prova de carga realizada (b)

A figura 11 mostra o comparativo da modelagem numérica (com modelos não lineares) executada versus a prova de carga realizada. Percebe-se uma boa aderência entre as curvas. O modelo previa 390kN e o ensaio deu 392kN.

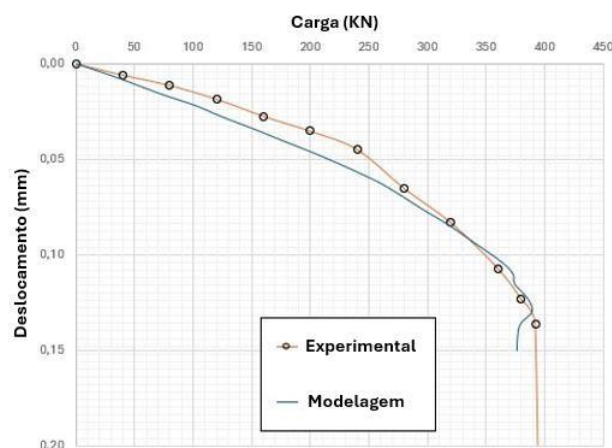


Figura 11- Avaliação comparativa do modelo numérico versus prova de carga realizada recentemente

5 Conclusões

O presente estudo demonstrou que a modelagem numérica tridimensional, com consideração da não linearidades materiais e geométricas, apresentou excelente aderência aos resultados obtidos na prova de carga, validando a abordagem adotada. A interação entre estacas metálicas e blocos de coroamento em concreto revelou-se mais complexa do que o geralmente assumido nas práticas convencionais de dimensionamento, exigindo uma análise mais refinada.

A utilização do software ATENA possibilitou a simulação realista do comportamento do sistema, incorporando aspectos relevantes da mecânica da fratura, como o amolecimento pós-pico, a fissuração distribuída e o confinamento multiaxial do concreto.

Com isso, o trabalho não apenas contribui para um entendimento mais profundo da ligação estaca-bloco sob compressão, mas também reforça a importância da adoção de modelos numéricos avançados na prática de projeto. Os resultados obtidos indicam a necessidade de revisões conceituais nas abordagens usuais e nas normas técnicas vigentes. A metodologia aqui apresentada mostra-se como uma ferramenta robusta de apoio à engenharia, tanto na análise de casos reais quanto na proposição de critérios de dimensionamento mais consistentes e fundamentados tecnicamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bažant, Z.P., Oh, B.H., (1983). *Crack band theory for fracture of concrete*. *Materials and Structures*, RILEM 16 (3), 155–177.
2. Červenka, V., Pukl, R., Ozbolt, J., and Eligehausen, R. (1995). *Mesh Sensitivity Effects in Smeared Finite Element Analysis of Concrete Fracture*, Proc. Fracture Mechanics of Concrete Structure II, Vol. II, ISBN 3-905088-12-6, pp. 1387-1396.
3. Červenka, J., Papanikolaou, V. 2008. *Three-dimensional combined fracture-plastic material model for concrete*. *Int. J. of Plasticity*, Vol. 24, 12, 2008, ISSN 0749-6419, pp. 2192-2220.
4. Červenka, J., Jendele, L., Červenka, V. 2009. *ATENA Program documentation*. Cervenka Consulting, www.cervenka.cz.
5. Kupfer, H; Hilsdorf, H. K. and Rusch, H. (1969). *Behavior of Concrete under Biaxial Stresses*. *ACI Materials Journal*, Vol. 66, pp. 656-666.
6. Menetrey, P. & Willam, K.J. (1995). *Triaxial Failure Criterion for Concrete and its Generalization*. *ACI Structural Journal*. 1995; 92:311-8.
7. Shaffer, M. D. and Williams, F. M. (1947). *Investigation of the Strength of the Connection between a Concrete Cap and the Embedded End of a Steel H-Pile*. Reserch Report No. 1. Department of Highways – State of Ohio.
8. Souza, T; OLIVEIRA, D. Modelagem Não Linear de Fibras de Alto Desempenho em Concreto em Túneis: Avaliação via Ensaios de campo e Laboratório. In: XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2024, Balneário Camboriú (SC).

