XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/12

Análise de Redistribuição de Esforços em Fundação de Dolfins

William Hideki Ito
Engenheiro, Transpetro, São Caetano do Sul, Brasil, william.ito@transpetro.com.br

Vagner Martins Pontes
Engenheiro, Transpetro, Rio de Janeiro, Brasil, vagner.pontes@transpetro.com.br

Caroline Tomazoni Santos
Professora, UFPR, Curitiba, Brasil, caroline.tomazoni@ufpr.br

Talita Scussiato
Engenheira, Autônoma, São Paulo, Brasil, talita.scussiato@gmail.com

Paulo Ivo Braga de Queiroz
Professor, ITA, São José dos Campos, Brasil, pi@ita.br
Consultor, Reconverte Planejamento e Projetos, São Paulo, Brasil, pi@ita.br

RESUMO: A análise de fundação de dolfins, seja de amarração ou de atracação, é considerado um desafio em razão das condições dinâmicas impostas pelo movimento dos navios, pelas cargas de correnteza, pelas variações nas propriedades do solo e diversos outros fatores. Condições operacionais podem tornar o cenário ainda mais complexo quando há, por exemplo, perda de integridade de uma das peças estruturais que compõem a fundação. Com o avanço de recursos tecnológicos, sobretudo computacionais, recursos numéricos cada vez mais complexos têm sido empregados no dimensionamento deste tipo de estrutura, aproximando cada vez mais as condições modeladas às de campo. Contudo, a interface *user friendly* dos softwares atuais tem direcionado uma parte dos profissionais a confiarem cegamente no *output* da modelagem sem avaliação crítica do resultado. Visando reforçar a necessidade de avaliação crítica do uso destes recursos, o presente trabalho apresenta uma análise comparativa entre resultados de modelagens numéricas por elementos finitos com resultados fornecidos por métodos analíticos consagrados de avaliação de esforços em blocos com estacas inclinadas, como o Método de Schiel, para o dimensionamento de fundações de dolfins. As cargas solicitantes empregadas nos modelos para estimar a resposta da fundação serão decorrentes daquelas geradas pela amarração de um navio 25.000 TPB. Além do cenário na condição normal de operação, são avaliados cenários mais críticos, notadamente a perda de integridade de um dos elementos de fundação, avaliando a condição de redistribuição de carga nas demais estacas. O artigo ainda apresenta como contribuição uma proposta de inserção da plasticidade no Método de Schiel, cuja formulação considera um comportamento elástico linear.

PALAVRAS-CHAVE: fundações offshore, dimensionamento de fundação de dolfins, Método de Schiel, soluções analíticas, modelagem numérica.

ABSTRACT: The foundation analysis of dolphins, whether mooring or berthing dolphins, is considered a challenge due to the dynamic conditions imposed by vessel motions, current loads, variations in soil properties, and several other factors. Operational conditions may further increase the complexity of the scenario, for instance, in the event of loss of integrity of one of the structural components comprising the foundation system. With the advancement of technological resources, particularly computational tools, increasingly sophisticated numerical approaches have been

employed in the design of this type of structure, enabling modeled conditions to more closely represent field behavior. However, the user-friendly interfaces of current software packages have led some professionals to rely blindly on modeling outputs without a critical assessment of the results. In order to emphasize the need for critical evaluation when using such tools, the present study provides a comparative analysis between numerical modeling results obtained through the finite element method and results derived from well-established analytical methods for load assessment in pile groups with inclined piles, such as the Schiel method, applied to the design of dolphin foundations. The design loads adopted in the models to estimate the foundation response are derived from those generated by mooring of a 25,000 DWT vessel. In addition to the normal operating condition scenario, more critical scenarios are evaluated, particularly the loss of integrity of one foundation element, assessing the load redistribution among the remaining piles. The paper also presents, as a contribution, a proposal for incorporating plasticity into the Schiel Method, whose original formulation assumes linear elastic behavior.

KEYWORDS: offshore foundation, dolphin foundation design, Schiel Method, analytical approaches, numerical solutions

1 INTRODUÇÃO

A análise e o dimensionamento de fundações para estruturas marítimas, como os dolfins de amarração e atracação, representam grandes desafios para a engenharia portuária e offshore. Essas estruturas, fundamentais para a operação segura de terminais marítimos, estão sujeitas a um conjunto de solicitações dinâmicas e estáticas que incluem não apenas as forças provenientes do movimento dos navios, mas também as cargas induzidas por correntezas, vento e, sobretudo, pelas características geotécnicas do subsolo. A complexidade do cenário se intensifica diante das incertezas inerentes às propriedades do solo, da interação solo-estrutura e das condições operacionais, como a eventual perda de integridade de um ou mais elementos estruturais da fundação.

O avanço das ferramentas computacionais e dos métodos numéricos, especialmente a modelagem por elementos finitos, tem permitido a simulação de cenários cada vez mais próximos da realidade, incorporando não linearidades geométricas e de material, bem como a consideração de diferentes mecanismos de falha. No entanto, a facilidade de uso proporcionada pelas interfaces gráficas dos softwares modernos pode induzir a uma confiança excessiva nos resultados obtidos, muitas vezes sem a devida análise crítica ou validação por métodos alternativos. Tal postura pode comprometer a segurança e a eficiência do projeto, especialmente em situações-limite ou em cenários de falha parcial, como a perda de uma estaca ou bloco de fundação.

Nesse contexto, a utilização de métodos analíticos consagrados permanece fundamental como ferramenta de verificação e validação dos resultados numéricos. Entre esses métodos, destaca-se o Método de Schiel, amplamente empregado no Brasil para o dimensionamento de estacas em fundações profundas. Desenvolvido a partir de relações de equilíbrio, o Método de Schiel permite a estimativa da distribuição de cargas nas estacas do bloco. Dentre as hipóteses básicas do modelo estão a consideração de um bloco infinitamente rígido e as estacas são rotuladas no topo e na base. Sua aplicação é especialmente relevante em projetos de fundações sujeitas a grandes esforços horizontais e momentos fletores, como é o caso dos dolfins, onde a distribuição das cargas entre as estacas e a avaliação da segurança global da estrutura dependem de uma correta estimativa da capacidade resistente de cada elemento. Além do método de Schiel, outros procedimentos analíticos, como o método de Nokkentved, podem ser empregados para a avaliação dos esforços em blocos com estacas inclinadas, sendo este último, porém, mais indicado para estacas simétricas. A combinação desses métodos analíticos com a modelagem numérica por elementos finitos oferece uma abordagem robusta

para a análise de fundações de dolfins, possibilitando a comparação entre os resultados obtidos por diferentes técnicas e a identificação de eventuais inconsistências ou limitações dos modelos adotados.

Destarte, o presente estudo propõe uma abordagem integrada para a avaliação de fundações de dolfins de amarração, combinando o método analítico de Schiel com a modelagem numérica por elementos finitos. As cargas solicitantes consideradas nos modelos são aquelas geradas durante a amarração de um navio de 25.000 TPB (considerando traveses com solicitação máxima de 1.000kN), representando um dos cenários operacionais críticos para a estrutura. Além da análise na condição normal de operação, são investigados cenários de plastificação do elemento de fundação, com o objetivo de avaliar a redistribuição de cargas entre as estacas remanescentes e a capacidade de suporte da estrutura em situações de falha parcial. Ao adotar essa abordagem, o estudo busca não apenas reforçar a importância da avaliação crítica dos resultados de modelagem numérica, mas também contribuir para o desenvolvimento de práticas mais seguras e eficientes no dimensionamento de fundações para estruturas marítimas. A integração entre métodos analíticos e numéricos, aliada à consideração de cenários de falha, permite uma compreensão mais abrangente do comportamento estrutural dos dolfins, subsidiando decisões técnicas fundamentadas e promovendo a segurança das operações portuárias.

2 CONCEITOS BÁSICOS E DEFINIÇÕES

2.1 Esforços em dolfins de amarração

Dolfins, sejam de amarração ou de atracação, são estruturas posicionadas estrategicamente em áreas portuárias para receber e resistir aos esforços transmitidos pelos navios durante as operações de acostagem (atracação) e permanência (notadamente as de amarração), conforme exemplo apresentado na Figura 1. São bastante frequentes em terminais de granéis sólidos minérios, mas também podem ser encontrados em terminais diversos e estaleiros (Alfredini e Arasaki, 2009). Estas estruturas são geralmente construídas por um bloco de concreto armado apoiado sobre estacas metálicas ou de concreto. Durante a atracação as defensas amortecem o impacto e transmitem aos dolfins de atracação. Posteriormente, são lançados os cabos para amarração nos dolfins de amarração.

A amarração é realizada com três cabos principais, a saber: os espringues (3) são responsáveis por estabilizar longitudinalmente as embarcações, os traveses (2) combatem esforços transversais e os lançantes (1) complementam a atuação dos espringues e traveses.

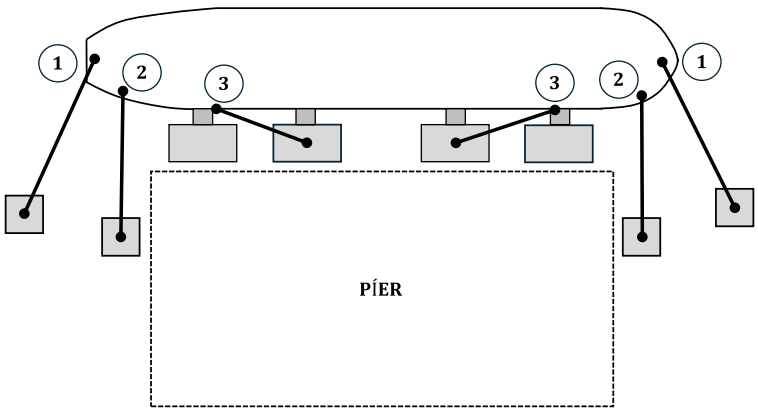


Figura 1. Representação esquemática da atracação de navios.

Além das ações atuantes sobre o navio, como vento, correnteza e ondas, o dimensionamento dos dolfins deve contemplar também as solicitações incidentes diretamente sobre a estrutura, incluindo sobrecargas e esforços de correnteza aplicados às estacas.

Dessa forma, a análise estrutural dos dolfins requer abordagem criteriosa, considerando fatores como o tipo de solo, diferentes combinações de carregamento, profundidade das fundações e a possibilidade de impactos acidentais, de modo a garantir a segurança e a integridade da estrutura ao longo de sua vida útil.

2.2 Modelos, solicitações e carregamentos

As ações relevantes incluem principalmente as forças horizontais provenientes das linhas de amarração, transmitidas pelos cabos do navio aos cabeços ou ganchos da estrutura, além das ações permanentes (peso próprio da estrutura e equipamentos) e das ações ambientais, como vento e corrente marítima. Essas ações devem ser consideradas conforme sua natureza - permanentes, variáveis ou excepcionais - e combinadas de acordo com os estados limites definidos na norma, conforme estabelecido na norma brasileira NBR 8681.

De acordo com o modelo estrutural adotado podem ser obtidos esforços distintos nos elementos estruturais. Via de regra os blocos das estacas são rígidos, visando distribuir os esforços (especialmente os horizontais) nos elementos de fundação. Porém, o modelo de análise da interação solo-estrutura pode variar (WEGMANN *et al*, 2024; BOWLES, 1997; ARAUJO *et al*, 2021 e outros).

3 ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DE SCHIEL

O método de Schiel, desenvolvido pelo Prof Frederico Schiel em 1957 na publicação n.10 da Escola de Engenharia de São Carlos sob o título “Estática dos Estaqueamentos” (Alonso, 2012), constitui uma abordagem consolidada para o dimensionamento da distribuição de cargas em blocos sobre estacas. Este método tem como premissa básica desprezar a interação solo-estaca, simplificação que implica em adotar as estacas como elementos birotulados, ou seja, capazes de resistir apenas a esforços paralelos ao seu eixo longitudinal já que as extremidades não resistem a momentos fletores. O método admite ainda que as cargas transmitidas pelo bloco são distribuídas entre as estacas de acordo com sua posição e rigidez relativa, facilitando a análise do sistema estrutural.

Apesar da simplicidade das hipóteses de análise, o método apresenta resultados satisfatórios desde que as premissas adotadas sejam respeitadas, como a predominância de esforços axiais e a rigidez suficiente do bloco para garantir a distribuição adequada das cargas como uma estrutura rígida. Ademais, a vantagem do método reside no fato de o mesmo utilizar o cálculo matricial, e, portanto, facilitar a programação automática (Alonso, 2012).

Contudo, nos casos em que a interação solo-estaca ou a presença de momentos fletores nas estacas seja significativa, se faz necessária a utilização de métodos mais sofisticados ou complementação com modelagem numérica para uma avaliação mais precisa do comportamento da fundação.

3.1 Apresentação do modelo original

Sintetizamos a seguir o Modelo de Schiel, conforme exposto por Mason (1977). O modelo considera que cada estaca pode ser representada pela sua rigidez e por sua orientação espacial: distâncias em relação a um referencial (centro de gravidade do bloco, por exemplo) e os respectivos cossenos diretores. Assim, as reações das estacas ($\vec{N}$) podem ser descritas a partir da matriz de cossenos diretores ($\boldsymbol{p}$) e dos esforços solicitantes no bloco ($\vec{R}$):

$$\vec{R} = \boldsymbol{p} \cdot \vec{N} \qquad (1)$$

porém, as reações $\vec{N}$ podem ser reescritas a partir da rigidez de cada estaca, da matriz de cossenos diretores ($\boldsymbol{p}$) e dos deslocamentos no topo das estacas ($\vec{v}$),

$$\vec{N} = \left(\frac{E_i \cdot A_i}{L_i}\right) \boldsymbol{p} \cdot \vec{v} \tag{2}$$

substituindo (2) em (1) tem-se a matriz de rigidez ($\boldsymbol{K_e}$) para as condições elásticas,

$$\vec{R} = \boldsymbol{p} \left(\frac{E_i \cdot A_i}{L_i}\right) \boldsymbol{p^T} \cdot \vec{v} = \boldsymbol{K_e} \cdot \vec{v} \tag{3}$$

portanto,

$$\vec{v} = \boldsymbol{K_e^{-1}} \cdot \vec{R} \tag{4}$$

substituindo (4) em (2), obtêm-se as reações $\vec{N}$ a partir das solicitações $\vec{R}$,

$$\vec{N} = \left(\frac{E_i \cdot A_i}{L_i}\right) \boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{K_e^{-1}} \cdot \vec{R} \tag{5}$$

3.2 Proposta de inserção da plasticidade no modelo de Schiel

Assim como aludido pelos autores mencionados (Manson 1977, Alonso 2012), o modelo de Schiel é amplamente utilizado em etapas de projeto preliminares para avaliação da capacidade de carga em blocos de estacas. Sua utilização *a posteriori*, ou seja, na avaliação de esforços em elementos já construídos é pouco usual. A principal limitação se deve ao fato da consideração de modelo elástico linear das estacas, isto é, efeitos da plastificação das estacas após atingir a carga de ruptura não podem ser previstos.

Uma forma de incluir a plasticidade no modelo seria considerar um comportamento elástico perfeitamente plástico das estacas (Figura 2). Neste caso o topo das estacas continuaria a apresentar o deslocamento ($\vec{v}$) no regime elástico, e, na ruptura, seja a tração ou a compressão, passaria a se deformar sem contribuir com a resistência de novos esforços no bloco.

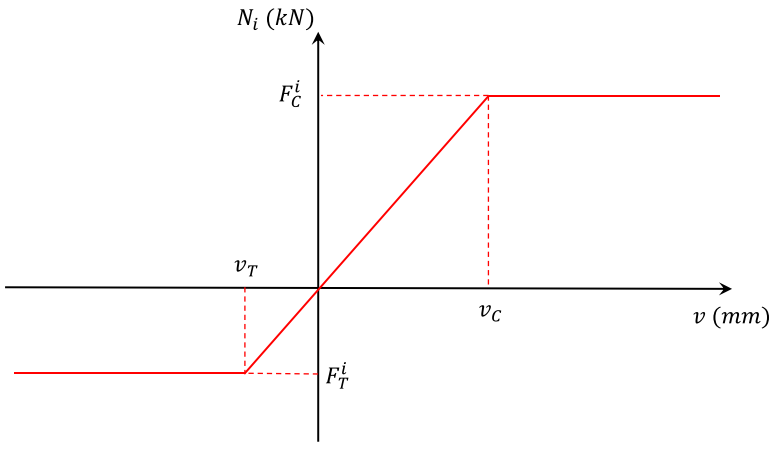


Figura 2. Modelo elástico perfeitamente plástico.

Desta forma o modelo elastoplástico pode ser adaptado mantendo-se inicialmente a estrutura original. Porém, após a primeira iteração elástica (5) deve-se verificar se a carga na estaca se encontra no regime elástico:

$$F_T^i \leq N_i \leq F_C^i \tag{6}$$

caso o carregamento na estaca supere as cargas admissíveis (tração ou compressão), deve-se restringir a componente N_i à resistência de ruptura (7), reduzir a rigidez do elemento (8) e computar novamente as reações nas estacas (9). A iteração deve ser finalizada quando a plastificação provocar redistribuição dos esforços nas demais estacas e estas conseguirem equacionar as

$$N_i^{rupt} = \{F_T^i \mid F_C^i\} \tag{7}$$

$$\frac{E_i \cdot A_i}{L_i} \to 0 \tag{8}$$

$$\vec{N} = \left(\frac{E_i \cdot A_i}{L_i}\right) \boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{K_e^{-1}} \cdot \left(\vec{R} - N_i^{rupt}\right) \tag{9}$$

4 ANALISE COMPARATIVA ENTRE O MODELO ANALÍTICO DE SCHIEL E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS BASEADAS EM MEF

Para as análises considerou-se um dolfim de amarração hipotético composto por um bloco com 1,5m de espessura apoiado em 8 estacas pré-moldadas de concreto inclinadas (1V:4H) com 38m de comprimento cada em lâmina d'água de 12 m, conforme ilustrado na Figura 3. O cabeço de amarração, ponto de concentração da carga de amarração, foi adotado a 0,44m acima do bloco. O modelo numérico considerou ainda estacas engastadas no bloco e coeficiente de reação horizontal médio da ordem de 7.000 kN/m³.

As solicitações foram consideradas conforme descrito no item 2.2, sendo avaliadas 62 combinações diferentes de carregamento considerando variações no ângulo de amarração, direção do vento e das correntes marítimas.

Considerando os valores máximos e mínimos obtidos para as 62 combinações de carregamentos chegou-se a solicitações axiais das estacas da ordem de:

- Modelo de Schiel: 147 tf a compressão e 60 tf a tração.
- Modelo numérico (estaca birotulada): 150 tf a compressão e 65 tf a tração.
- Modelo numérico (estaca engastada no bloco): 143 tf a compressão e 97 tf a tração.

É possível notar a boa aderência do modelo analítico e o numérico, principalmente se forem mantidas as hipóteses básicas do modelo. Contudo, ao se incluir complexidades como a interação solo-estaca ou ainda esforços fletores no topo é possível notar ligeira divergência entre as análises.

Importante observar que a própria concepção estrutural com estacas inclinadas objetiva minimizar os esforços que não sejam os axiais. Tanto que a modelagem numérica, realizada com o auxílio do programa SAP2000, com a estaca engastada no bloco, que considera a interação solo-estrutura ao longo do trecho enterrado através de molas no plano horizontal (Figura 3), não apresentou divergência apreciável na carga de compressão.

Uma análise adicional foi realizada utilizando o modelo elastoplástico aqui proposto, considerando inicialmente um carregamento isolado de amarração de 100 tf na direção horizontal. Em seguida, foi avaliado o comportamento do sistema com a majoração desse carregamento em 10%. Para o dimensionamento, foram consideradas estacas com capacidade de resistência à compressão de 150 tf e à tração equivalente a 70% desse valor, ou seja, 105 tf.

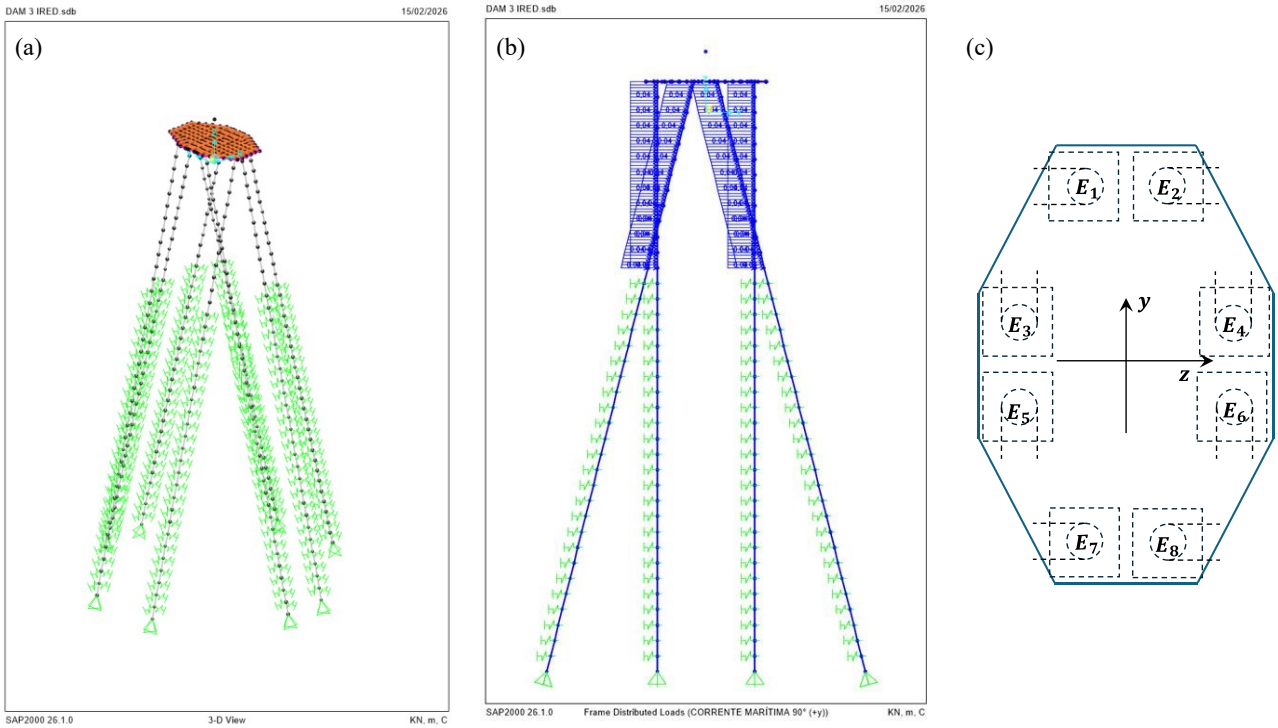


Figura 3. Dolfim de amarração. (a) vista isométrica (b) seção transversal (c) numeração das estacas

Na primeira etapa da análise, com o carregamento de 100 tf, observou-se que as estacas E3 e E4 atingiram cargas máximas de compressão de 103 tf, enquanto as estacas E5 e E6 apresentaram cargas máximas de tração também de 103 tf, valores próximos ao limite de resistência à tração das estacas. Ao se aplicar a majoração de 10% na carga de amarração, constatou-se a plastificação das estacas E5 e E6, indicando que essas estacas ultrapassaram sua capacidade resistente à tração. Além disso, as estacas E3 e E4 apresentaram um incremento de aproximadamente 20 tf nas cargas de compressão, evidenciando um aumento significativo nas solicitações dessas estacas devido à majoração do carregamento, conforme apresentado na Figura 4. A análise convergiu após uma iteração, visto que a redistribuição de esforços não gerou plastificação de outros elementos.

Esses resultados demonstram a importância de se considerar adequadamente os fatores de ponderação de carga no dimensionamento das estacas, uma vez que podem levar a condições de plastificação, e, consequentemente, à perda de capacidade estrutural de parte do sistema de fundação.

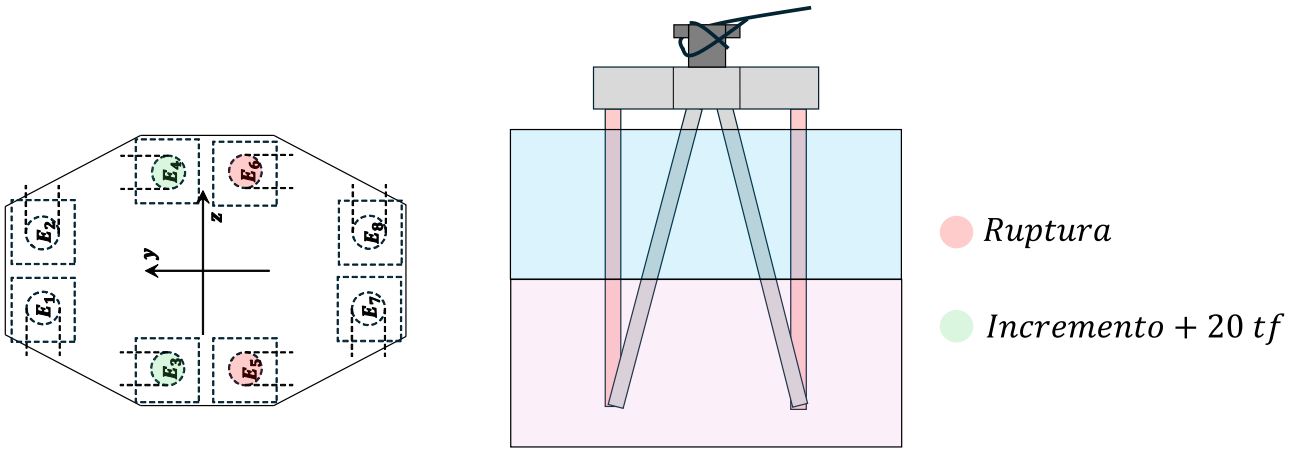


Figura 4. Redistribuição de esforços na estrutura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propõe uma adaptação do modelo de Schiel para a avaliação da redistribuição dos esforços em grupos de estacas incorporando a consideração do comportamento elástico perfeitamente plástico. A adoção desse modelo mostra-se pertinente, uma vez que, em determinadas situações de projeto é necessário verificar o potencial de aumento da capacidade de carga das fundações por meio do uso otimizado de recursos, como o reforço localizado de estacas. Ao permitir a análise do comportamento não linear do sistema, a abordagem elástica perfeitamente plástica possibilita identificar o ponto em que determinadas estacas atingem sua capacidade máxima, promovendo a redistribuição dos esforços para os demais elementos do grupo.

Essa adaptação do modelo de Schiel contribui para uma avaliação mais realista do desempenho das fundações, especialmente em cenários onde a solicitação das estacas pode variar significativamente devido a heterogeneidades do solo, excentricidades de carregamento ou modificações estruturais. Além disso, a metodologia proposta permite explorar alternativas de reforço e otimização do arranjo das estacas, visando maximizar a eficiência estrutural e a segurança global do sistema de fundação, sem a necessidade de intervenções excessivas ou superdimensionamento. A análise fundamenta-se em bases teóricas consolidadas, aliadas à modelagem do comportamento limite das estacas, e pode ser implementada com o simples auxílio de planilhas eletrônicas sem a necessidade de softwares mais sofisticados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Petrobras Transporte, a Universidade Federal do Paraná e ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica pelo apoio e promoção de troca de experiências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alfredini, P., Arasaki, E (2009). *Engenharia Portuária*, 2ª ed., Ed. Blucher, São Paulo, Brasil, 776 p.

Alonso, U.R. (2012). *Dimensionamento de fundações profundas*, 2ª ed., Ed. Blucher, São Paulo, Brasil, 157 p.

Araujo, K.Y.M., Barros, M., Nascimento Neto, J.A. (2021) Análise estrutural de blocos sobre estacas como fundação para aerogerador onshore. *Revista IBRACON*, 14 (5), p.1-12.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 8681. *Ações e segurança nas estruturas – Procedimento*. Rio de Janeiro.

Bowles, J.E. (1997) *Foundation Analysis and Design*, 5th ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 1168 p.

Mason, J. *Pontes em concreto armado e protendido: princípios do projeto e calculo*. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1977. 320 p.

Wegmann, M.D., Real, M.V., Alves, A.M.L (2024) Análise de interação solo-estrutura em dolfins de amarração e atracação. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, 16 (1), p.1-12.