



SIMPÓSIO DE INTEGRAÇÃO, INOVAÇÃO E TECNOLOGIA

AUTOMATIZAÇÃO DO MÉTODO DE ESTACAS INCLINADAS DE SCHIEL COM INTERFACE GRÁFICA: Cálculo Matricial de Fundação

Gabriel Paulino de Melo Neto¹
Carlos Petrônio Leite da Silva²

RESUMO: Este trabalho teve como objetivo viabilizar a aplicação prática do Método de Estática dos Estaqueamentos, desenvolvido por Schiel, que utiliza cálculo matricial para analisar esforços em grupos de estacas inclinadas ou fora de locação, submetidas a cargas horizontais e momentos fletores. O projeto consistiu na automação dos cálculos por meio do desenvolvimento de um software em Python com interface gráfica, abrangendo a modelagem matemática, a discretização do problema e a construção de interface interativa. Destaca-se o estudo aprofundado sobre a formulação e adaptação da matriz de rigidez global, garantindo que esta reflita corretamente as direções de resistência dos elementos estruturais, aspecto essencial para a coerência dos resultados e estabilidade numérica. Foram obtidas ainda informações relevantes sobre inclinação de estacas e efeitos no dimensionamento. Os resultados validam o sistema com exemplos clássicos, demonstrando sua utilidade no meio acadêmico e profissional.

Palavras-chave: Método de Estática dos Estaqueamentos; Estacas Inclinadas; Método de Schiel.

ABSTRACT: This work aimed to enable the practical application of the Pile Static Method developed by Schiel, which uses matrix calculations to analyse forces in groups of inclined or misaligned piles subjected to horizontal loads and bending moments. The project involved automating calculations through the development of Python software with a graphical interface, covering mathematical modelling, problem discretisation, and interface construction. The study of the formulation and adaptation of the global stiffness matrix is highlighted, ensuring it accurately reflects the resistance directions of structural elements, which is essential for result consistency and numerical stability. Relevant information was also obtained on pile inclination options and their effects on design. Results validate the system with classic examples, demonstrating its usefulness in academic and professional environments.

Keywords: Pile Static Method; Inclined Piles; Schiel Method.

¹Graduando em Engenharia Civil, IFB – Instituto Federal de Brasília Campus Samambaia. E-mail: gabriel.neto1@estudante.ifb.edu.br

²Doutor em Geotecnia, IFB – Instituto Federal de Brasília Campus Samambaia. E-mail carlos.silva@ifb.edu.br

Introdução

O desenvolvimento das fundações acompanha a evolução histórica e tecnológica da engenharia civil, desde soluções empíricas aplicadas por civilizações antigas até métodos modernos fundamentados na mecânica dos solos, consolidada por Terzaghi no século XX (Hachich *et al.*, 1998; Das, 2016). A Geotecnia, enquanto ramo essencial da engenharia, estuda o comportamento dos solos como meio de suporte estrutural, permitindo o dimensionamento seguro e eficiente de fundações.

Entre os métodos disponíveis para análise de fundações profundas, destaca-se o Método de Estática dos Estaqueamentos, desenvolvido por Schiel em 1957, que utiliza cálculo matricial para determinar os esforços solicitantes em grupos de estacas, considerando diferenças de comprimento, inclinação, diâmetro e resistência do concreto. Apesar de sua fundamentação teórica consistente e de sua utilidade em sistemas com estacas inclinadas ou fora de locação, a aplicação manual desse método é extremamente trabalhosa e suscetível a erros, devido à necessidade de ajustes constantes de matrizes e ao elevado volume de cálculos, especialmente em fundações submetidas a esforços horizontais e momentos fletores.

Nesse contexto, justifica-se a necessidade de automatização do Método de Schiel, visando eliminar a suscetibilidade a erros operacionais e ampliar sua aplicabilidade prática. Além da automação, torna-se relevante o aprofundamento da fundamentação teórica do método, revisitando conceitos sobre o comportamento de estacas inclinadas e fora de locação, a fim de garantir maior confiabilidade e compreensão de seus resultados.

Com base nessas premissas, o presente estudo implementou o Método de Schiel em Python, desenvolveu uma interface gráfica intuitiva e realizou a validação dos resultados obtidos por meio de comparações com estudos de referência. Essa abordagem possibilitou a obtenção de resultados confiáveis em menor tempo, contribuindo para o dimensionamento seguro e econômico de fundações profundas, além de fornecer à engenharia geotécnica uma ferramenta analítica robusta para aplicação prática e pesquisas futuras.

Referencial Teórico

Conforme previamente contextualizado, o Método de Schiel determina esforços em grupos de estacas com inclinações, geometrias e resistências variadas. As hipóteses para utilização do método são:

- Rigidez do Bloco: Considera-se que o bloco que suporta as estacas é muito mais rígido do que as estacas, deformando-se como um corpo rígido. Isso implica que a rigidez das estacas é desprezível em relação à rigidez do bloco.
- Estacas Rotuladas: As estacas são consideradas como "rotuladas" no fundo do bloco, o que significa que elas transmitem apenas esforço axial, sem levar em consideração forças laterais.
- Material Linear Elástico: O material das estacas e do bloco é considerado linear elástico, ou seja, as deformações são diretamente proporcionais aos esforços aplicados.
- Proporcionalidade do Esforço Axial: O esforço axial em cada estaca é proporcional ao seu deslocamento.

O método apresenta um sistema fixo, dextrorso (segue a regra da mão direita), com origem em 0, com o eixo x orientado positivamente para baixo, com os vetores unitários \vec{i} , \vec{j} e \vec{k} dos eixos x, y e z, respectivamente.

Figura 1 – Sistema de coordenadas.

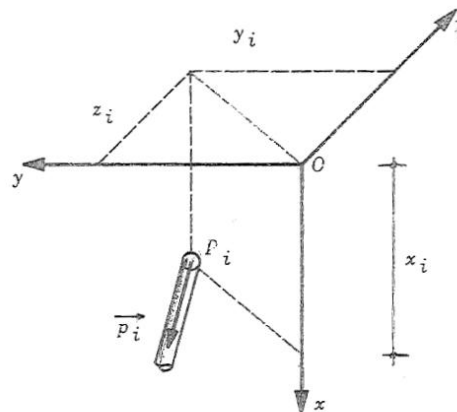


Fig.1 - Direção e posição da estaca

Fonte: Extraído de STAMATO (1971).

Utiliza-se coordenadas esféricas para representar a estaca a partir do vetor unitário \vec{p}_1 , sendo p_{x_i} , p_{y_i} e p_{z_i} componentes do vetor unitário \vec{p}_1 .

No método, devido as mudanças no sistema, temos:

$$\begin{cases} x = r * \cos(\alpha_i) \\ y = r * \sin(\alpha_i) * \cos(\omega_i) \\ z = r * \sin(\alpha_i) * \sin(\omega_i) \end{cases}$$

Dessa forma, é possível representar o vetor unitário \vec{p}_1 da seguinte maneira.

$$\vec{p}_1 = p_{x_i} * \vec{i} + p_{y_i} * \vec{j} + p_{z_i} * \vec{k} = (\cos(\alpha_i), \sin(\alpha_i) * \cos(\omega_i), \sin(\alpha_i) * \sin(\omega_i)) \quad \text{Eq. 1}$$

Onde \vec{p}_1 é o vetor unitário que representa a direção da estaca i; p_{x_i} é o componente 'x' do vetor unitário \vec{p}_1 da estaca i; p_{y_i} é o componente 'y' do vetor unitário \vec{p}_1 da estaca i; p_{z_i} é o

componente 'z' do vetor unitário \vec{p}_i da estaca i; α_i é o ângulo zenital da estaca i; ω_i é o ângulo azimute da estaca i.

Além disso, é possível representar o vetor posição da estaca através da subtração entre o ponto que representa a cabeça da estaca e o ponto 0 do sistema.

$$\vec{r} = (x_i - 0, y_i - 0, z_i - 0) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde \vec{r} é o vetor posição da estaca; x_i é a coordenada do eixo x do ponto P_i ; y_i é a coordenada do eixo y do ponto P_i ; z_i é a coordenada do eixo z do ponto P_i .

Assim, a partir do vetor posição e do vetor unitário da estaca i, através do produto vetorial obtém-se o momento geométrico da estaca i.

$$\vec{m}_i = \vec{r}_i \times \vec{p}_i = p_{a_i} * \vec{i} + p_{b_i} * \vec{j} + p_{c_i} * \vec{k} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde \vec{m}_i é o momento geométrico da estaca i; \vec{r}_i é o vetor posição da estaca i; \vec{p}_i é o vetor unitário que representa a direção da estaca i; p_{a_i} é o componente 'x' do momento geométrico da estaca i; p_{b_i} é o componente 'y' do momento geométrico da estaca i; p_{c_i} é o componente 'z' do momento geométrico da estaca i.

Os componentes do momento geométrico são facilmente expostos através do produto vetorial.

Decompõe-se a força, aplicada no ponto 0 do sistema, e o momento de uma força para cada eixo, assim tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{F} = R_x * \vec{i} + R_y * \vec{j} + R_z * \vec{k} \\ \vec{M} = R_a * \vec{i} + R_b * \vec{j} + R_c * \vec{k} \end{array} \right\} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde \vec{F} é o vetor força; R_x é o esforço horizontal no eixo 'x'; R_y é o esforço horizontal no eixo 'y'; R_z é o esforço horizontal no eixo 'z'; \vec{M} é o vetor momento de uma força; R_a é o momento de uma força no eixo 'x'; R_b é o momento de uma força no eixo 'y'; R_c é o momento de uma força no eixo 'z'.

O bloco possui um ponto móvel que coincide com o ponto 0, origem fixa do sistema. Após inserção das cargas o ponto móvel desloca-se para outra posição.

Define-se, portanto, o vetor translação.

$$\vec{t} = O_{b'} - O_b = v_x * \vec{i} + v_y * \vec{j} + v_z * \vec{k} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde \vec{t} é o vetor translação; O_b é o ponto móvel do bloco anterior à inserção das cargas; O_b' é o ponto móvel do bloco posterior à inserção das cargas; v_x é a coordenada do eixo x do ponto O_b' ; v_y é a coordenada do eixo y do ponto O_b' ; v_z é a coordenada do eixo z do ponto O_b' .

O bloco, após inserção das cargas, além de translação, sofrerá rotação, o giro independe da origem. Assim, atribui-se variáveis para o vetor rotação em cada eixo.

$$\vec{w} = v_a * \vec{i} + v_b * \vec{j} + v_c * \vec{k} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde \vec{w} é o vetor rotação; v_a é o componente 'x' do vetor \vec{w} ; v_b é a componente 'y' do vetor \vec{w} ; v_c é a componente 'z' do vetor \vec{w} .

Dessa forma, o método define o módulo da intensidade da força normal inserida para cada estaca do estaqueamento como N_i e a projeção do deslocamento da estaca na direção do versor \vec{p}_i como Δ_i .

A rigidez de cada estaca é obtida através da formulação abaixo.

$$S_i = \frac{E_i * A_i}{l_i} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde S_i é a rigidez da estaca i; E_i é o módulo de elasticidade do material constituinte da estaca i; A_i é a área da estaca i; l_i é o comprimento da estaca i.

O módulo da intensidade da força normal inserida para cada estaca do estaqueamento é obtido através da formulação abaixo.

$$N_i = S_i * \Delta_i \quad \text{Eq. 8}$$

Onde N_i é o módulo da intensidade da força normal da estaca i; S_i é a rigidez da estaca i; Δ_i é a projeção do deslocamento da estaca i na direção do versor \vec{p}_i .

O vetor \vec{v}_{p_i} representa o deslocamento absoluto do ponto P_i , enquanto Δ_i é a componente desse deslocamento na direção do versor \vec{p}_i , ou seja, o quanto o ponto se moveu na direção da estaca.

$$\vec{v}_{p_i} = \vec{t} + \vec{w} \times \vec{r} \quad \text{Eq. 9}$$

Onde \vec{v}_{p_i} é o vetor deslocamento da cabeça da estaca i; \vec{t} é o vetor translação; \vec{w} é o vetor rotação; \vec{r} é o vetor posição da estaca.

$$\Delta_{l_i} = \vec{v}_{p_i} * \vec{p}_i = \vec{t} * \vec{p}_i + \vec{w} * (\vec{r} \times \vec{p}_i) = \vec{t} * \vec{p}_i + \vec{w} * \vec{m}_i \quad \text{Eq.10}$$

Onde Δ_{l_i} é a projeção do deslocamento da estaca i na direção do versor \vec{p}_i ; \vec{v}_{p_i} é o vetor deslocamento da cabeça da estaca; \vec{p}_i é o vetor unitário que representa a direção da estaca i; \vec{t} é o vetor translação; \vec{w} é o vetor rotação; \vec{r} é o vetor posição da estaca; \vec{m}_i é o momento geométrico da estaca i.

A partir das formulações postas, é possível obter o equilíbrio de forças e momentos em relação a 0:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum N_i * \vec{p}_i = \vec{F} \\ \sum N_i * \vec{m}_i = \vec{M} \end{array} \right\} \quad \text{Eq. 11}$$

Onde N_i é o módulo da intensidade da força normal da estaca i; \vec{p}_i é o vetor unitário que representa a direção da estaca i; \vec{F} é o vetor força; \vec{m}_i é o momento geométrico da estaca i; \vec{M} é o vetor momento de uma força.

Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho baseou-se em uma abordagem teórica e computacional para o estudo e aplicação do Método de Schiel em estacas inclinadas. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica aprofundada sobre o método, com o objetivo de compreender seus fundamentos matemáticos, hipóteses e aplicações práticas, servindo de base para a formulação das equações necessárias à modelagem computacional do problema.

Com base nesse estudo, foram desenvolvidos e testados os primeiros algoritmos para automatizar os cálculos matriciais do método. A implementação foi realizada na linguagem Python, utilizando bibliotecas como NumPy, math, sqlite3, ReportLab e Tkinter, entre outras, que possibilitaram desde operações matemáticas e matriciais até a criação de interface gráfica, banco de dados e geração de relatórios em formato adequado para o usuário.

Na sequência, procedeu-se à integração entre os algoritmos de cálculo e a interface gráfica, permitindo que os usuários inserissem os parâmetros necessários de forma prática e obtivessem os resultados diretamente na aplicação. Durante essa fase, foram realizados diversos testes internos para verificar a consistência dos cálculos e a estabilidade do programa.

Em etapas posteriores, foram adicionadas funcionalidades visando aprimorar a experiência do usuário e a eficiência do processo, como a possibilidade de inserção de dados manualmente ou por meio de planilhas eletrônicas (.xlsx), a criação de um sistema de gestão de blocos que permite salvar e reutilizar configurações de estaqueamento no banco de dados, otimizando projetos com padrões repetitivos, além da geração automática de relatórios detalhados com as informações de entrada e resultados dos cálculos.

Foi investigada também a viabilidade de utilização de sistemas embarcados, como o Arduino, com a ideia inicial de testar a implementação do software em um sistema compacto e portátil. No entanto, considerando que o público-alvo principal do aplicativo é composto por projetistas que atuam em ambientes com computadores disponíveis, a implementação desta solução específica mostrou-se desnecessária dentro do escopo do projeto. Ainda assim, a experiência adquirida com sistemas embarcados permanece relevante para outras aplicações geotécnicas, como instrumentação de ensaios de laboratório ou medições de variáveis em campo.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos com o software desenvolvido foram comparados com exemplos clássicos da literatura, especialmente de Alonso (2019) e Stamato (1971). Foram testadas diversas configurações de estaqueamento, incluindo casos simétricos e não simétricos, com diferentes números de estacas e materiais, visando avaliar a precisão e flexibilidade do modelo computacional.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos casos analisados, evidenciando a alta concordância entre os resultados do software e os valores de referência. Destacam-se, por exemplo, a configuração não simétrica com 7 estacas, que apresentou equivalência média de 99,94% e desvio padrão de 0,04%, e a configuração simétrica com 12 estacas, com equivalência média de 99,04% e desvio padrão de 0,70%. Em outro caso relevante, a configuração simétrica com 6 estacas de materiais diferentes (metálicas e concreto armado) demonstrou equivalência média de 99,41%, indicando a capacidade do software em lidar com diferentes rigidezes de forma coerente. Os casos de cavalete simples apresentaram equivalência de 100%, confirmando a consistência do programa em reproduzir os resultados previstos pelas formulações teóricas. Os desvios padrão nulos observados nestes casos se justificam pelo fato de envolverem diretamente a postulação das equações, sem exemplos numéricos para comparação.

Tabela 1 – Comparação dos resultados obtidos no software com a literatura: porcentagem média de equivalência e desvio padrão.

Configuração	Equivalência média entre software e literatura	Desvio padrão dos resultados
Configuração não simétrica com 7 estacas	99,94%	0,04%
Configuração simétrica com 8 estacas	99,39%	0,44%
Configuração não simétrica com 8 estacas	96,58%	2,94%
Configuração simétrica com 12 estacas	99,04%	0,70%
Configuração simétrica com 22 estacas	95,75%	3,19%
Configuração simétrica com 6 estacas	99,41%	0,44%
Cavalete simples com ângulo constante	100,00%	0,00%
Cavalete simples com ângulos diferentes	100,00%	0,00%
Cavalete simples com estaca vertical	100,00%	0,00%

Fonte: Resultados da pesquisa.

Do ponto de vista conceitual, a formulação da matriz de rigidez global deve refletir com exatidão as direções nas quais há efetiva capacidade de resistência por parte dos elementos estruturais. O uso indiscriminado de todas as componentes de rigidez, sem considerar a configuração real do sistema, pode resultar em uma matriz global singular ou mal condicionada. Esse cenário ocorre quando os graus de liberdade do modelo excedem a capacidade real de reação das estacas, gerando uma representação matemática que não condiz com a realidade física do sistema. Nessas situações, a inversão da matriz de rigidez torna-se instável, podendo produzir deslocamentos excessivos ou esforços incompatíveis com o comportamento esperado da fundação. Para evitar tais distorções, é fundamental que a matriz de rigidez seja adaptada à geometria do estaqueamento e às direções em que há de fato rigidez.

Além disso, é necessário interpretar corretamente o tipo de resposta que o estaqueamento é capaz de fornecer frente ao carregamento imposto. Por exemplo, um estaqueamento puramente vertical apresenta rigidez axial apenas na direção do seu eixo quando submetido a uma força nesse mesmo eixo. Ele pode, eventualmente, apresentar rigidez nas direções transversais, associadas à presença de torques em torno dos eixos ortogonais, mas isso depende da configuração geométrica do grupo de estacas. Um exemplo clássico dessa abordagem encontra-se em Stamato (1971), ao modelar a matriz de rigidez de um cavalete plano, em que, embora efeitos secundários possam gerar pequenas rigidezes em direções não

principais, os deslocamentos correspondentes são usualmente considerados nulos, $v_z = v_a = v_b = v_c = 0$, simplificando a análise sem comprometer a precisão dos resultados.

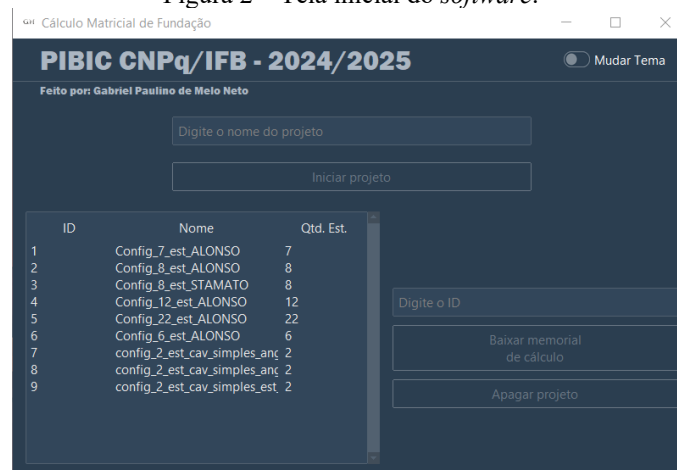
Em relação ao software desenvolvido, destaca-se que sua implementação totaliza cerca de 2800 linhas de código em Python. O programa possui interface gráfica com dois temas (claro e escuro) e realiza todos os cálculos matriciais necessários à aplicação do Método de Schiel. Além disso, armazena em banco de dados os projetos realizados, os relatórios gerados e os estaqueamentos criados, permitindo organização e rastreabilidade dos cálculos.

As etapas de cálculo computacional variam conforme o modo de utilização escolhido pelo projetista. Em síntese, o processo é iniciado com os inputs do usuário, onde são definidos os parâmetros fundamentais do estaqueamento, como quantidade de estacas, esforços aplicados e torques nos eixos X, Y e Z. Também é escolhida a unidade do carregamento (tf/tfm, kgf/kgfm ou kN/kN*m). Para cada estaca, são inseridas as posições nos eixos X, Y e Z, além das inclinações α e ω e propriedades mecânicas e geométricas, como fck do concreto, diâmetro e comprimento das estacas. Todo o sistema de coordenadas segue as convenções do método de Schiel.

Na etapa seguinte, são geradas a matriz de esforços externos e a matriz de coordenadas das estacas, seguidas da transposição da matriz de coordenadas e da obtenção da matriz de rigidez. Caso a matriz de rigidez seja invertível, sua inversão é realizada; caso contrário, o programa realiza ajustes para viabilizar a inversão. Em seguida, são determinadas as matrizes de deslocamento da cabeça das estacas e dos módulos de intensidade das forças normais nas estacas, finalizando o processamento. Por fim, os resultados dos cálculos são salvos, juntamente com o relatório do projeto no banco de dados, permitindo futuras análises.

A Figura 2 ilustra a interface gráfica do software e a Figura 3 ilustra um modelo de relatório gerado automaticamente.

Figura 2 – Tela inicial do *software*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3 – Resultados expostos no relatório gerado pelo software da configuração não simétrica com 7 estacas.

Prezados,

Abaixo, apresentam-se, respectivamente, a matriz de esforços externos, a matriz de coordenadas e a matriz do módulo da intensidade da força normal das estacas.

Matriz de Esforços Externos (R):

Esforço	Valor [kN kN'm]
FX	3500.0
FY	10.0
FZ	-30.0
MX	0.0
MY	-15.0
MZ	20.0

Matriz de Coordenadas (P):

Estaca	Pos. X [m]	Pos. Y [m]	Pos. Z [m]	Incl. α [°]	Incl. ω [°]
Estaca 1	0.9	1	0	10	30
Estaca 2	0.9	0.5	-1.5	0	0
Estaca 3	0.9	0.5	1.5	14	270
Estaca 4	0.9	0	0	0	0
Estaca 5	0.9	-0.5	-1.5	14	90
Estaca 6	0.9	-0.5	1.5	10	180
Estaca 7	0.9	-1	0	0	0

Matriz do módulo da intensidade da força normal das estacas (N):

Estaca	Carga final [kN]
Estaca 1	422.904
Estaca 2	599.562
Estaca 3	621.996
Estaca 4	531.471
Estaca 5	346.211
Estaca 6	308.658
Estaca 7	709.072

Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma geral, as discrepâncias observadas nos resultados foram mínimas e podem ser atribuídas a arredondamentos ou aproximações numéricas inerentes aos métodos matriciais ou ao processamento computacional, não comprometendo a confiabilidade do modelo desenvolvido. O software também reproduziu adequadamente cargas negativas (tração), evidenciando robustez e potencial de aplicação prática em projetos de fundações.

Além dos aspectos técnicos, destaca-se que o software *Cálculo Matricial de Fundação*, encontra-se atualmente em processo de registro junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), com o suporte técnico e financeiro do Núcleo de Inovação Tecnológica (NIT) do Instituto Federal de Brasília (IFB). O processo reforça a transparência e a relevância científica e tecnológica do trabalho, assegurando proteção à propriedade intelectual e possibilitando a futura transferência de tecnologia, conforme previsto na política institucional do IFB.

Conclusão

O presente trabalho focou-se no aprofundamento teórico e na desafiadora implementação computacional do Método de Schiel, um modelo matemático robusto e amplamente utilizado para analisar esforços em grupos de estacas, especialmente as inclinadas

ou fora de locação, submetidas a cargas horizontais e momentos fletores. Este projeto exigiu uma abordagem multifacetada e rigorosa, articulando-se diretamente com seus objetivos e com a metodologia aplicada.

A complexidade inerente ao Método de Schiel foi um dos pontos centrais do estudo, pois sua aplicação manual ou mesmo com planilhas eletrônicas é extremamente trabalhosa, requerendo constantes ajustes de matrizes e aumentando o risco de erros. O trabalho aprofundou-se em sua fundamentação matemática, abrangendo desde as particularidades do sistema de coordenadas (eixo x para baixo e ângulo azimute no sentido horário) até a derivação do vetor unitário e do vetor posição. Destaca-se também a interpretação do momento geométrico \vec{m}_1 , conceito crucial que representa a influência da orientação da estaca nos momentos gerados. Além disso, a elaboração das seis equações de equilíbrio de forças e momentos e a formulação matricial para rigidez, flexibilidade e deslocamentos evidenciam a profundidade teórica abordada.

Ainda sobre a complexidade do método, buscou-se aprimorar explicações claras para conceitos e operações, por exemplo, foi discutida a alteração dos eixos do sistema usual, no qual o eixo z é orientado positivamente para cima, enquanto no método o eixo x é orientado para baixo, além da mudança do eixo de origem e do sentido de aumento do ângulo azimute. Também foi abordada a interpretação física do produto vetorial utilizado na formulação, em que se obtém o vetor \vec{m}_1 . Adicionalmente, foram evidenciadas a utilização de propriedades como o uso da propriedade cíclica do produto misto, e esclarecidos termos fundamentais para facilitar o entendimento através de uma abordagem mais didática.

Foi fundamental, ainda, o estudo sobre a formulação e adaptação da matriz de rigidez global, que deve refletir com exatidão as direções nas quais há efetiva capacidade de resistência por parte dos elementos estruturais. Sem o entendimento completo dos processos físicos que fundamentam o método, sua simples aplicação computacional pode não gerar resultados coerentes ou sequer possibilitar o cálculo, devido à ocorrência de matrizes singulares ou mal condicionadas. Nessas situações, a inversão da matriz de rigidez torna-se instável, podendo produzir deslocamentos excessivos ou esforços incompatíveis com o comportamento esperado da fundação. Assim, o rigoroso estudo de adaptação da matriz realizado neste trabalho merece destaque como contribuição metodológica e prática para a Engenharia Geotécnica.

Além disso, este projeto trouxe informações relevantes e de difícil aquisição no meio técnico, relacionadas às opções de estacas passíveis de inclinação e aos efeitos sobre o cálculo de armadura e a capacidade de carga nestes casos.

Para viabilizar a aplicação prática deste método complexo, o projeto concentrou-se no desenvolvimento de um software robusto em Python, que totalizou cerca de 2800 linhas de código. A metodologia de desenvolvimento incluiu a utilização de bibliotecas especializadas como NumPy, para operações matriciais; Tkinter, para a interface gráfica; sqlite3, para gestão de bases de dados; e ReportLab, para geração de relatórios. A integração dos algoritmos de cálculo com uma interface gráfica intuitiva, projetada para engenheiros e pesquisadores, foi um passo essencial para simplificar a inserção de dados e a visualização dos resultados.

A profundidade do projeto evidencia-se também pelas funcionalidades avançadas implementadas com base no retorno da experiência de utilização, tais como:

- A possibilidade de inserir dados manualmente ou por planilhas eletrônicas (.xlsx), facilitando a gestão de grandes volumes de informações;
- Um sistema de gestão de blocos, permitindo ao usuário criar, salvar e reutilizar configurações de estaqueamento em uma base de dados, otimizando o tempo e aumentando a eficiência em projetos com padrões repetitivos;
- Geração automática de relatórios detalhados, contendo matrizes de cálculo e resultados finais;
- A exploração da viabilidade de sistemas embarcados (como Arduino) para aplicações em campo, embora não implementada no escopo final, demonstrou a amplitude da investigação e a busca por soluções inovadoras em geotecnia.

A validação do software foi uma etapa crítica e extensa, essencial para garantir a confiabilidade dos resultados. Foram realizados testes, comparando os resultados do programa com exemplos clássicos da literatura, incluindo configurações simétricas e não simétricas, com variados números de estacas (7, 8, 12 e 22 estacas) e materiais diferentes (concreto e metálicas). As comparações, com fontes como Alonso (2019) e Stamato (1971), demonstraram excelente concordância, apresentando discrepâncias mínimas atribuídas a arredondamentos ou aproximações numéricas. Notavelmente, em casos de estacas com rigidez relativa distinta, foi necessária a adaptação na entrada de dados, o que evidencia a flexibilidade e a capacidade de simulação do software. Para os exemplos de cavaletes simples, o modelo numérico reproduziu os resultados diretamente das formulações teóricas, confirmando sua precisão.

Em conclusão, este trabalho não se limitou à automatização de cálculos, mas sim ao desenvolvimento de uma ferramenta analítica robusta e abrangente, que torna o complexo Método de Schiel acessível e aplicável ao dia a dia do engenheiro. A profundidade da pesquisa teórica, a complexidade da implementação computacional, o estudo rigoroso de adaptação da

matriz de rigidez, a fase exaustiva de validação e a incorporação de funcionalidades que otimizam o fluxo de trabalho refletem a natureza desafiadora e o sucesso do projeto. O software desenvolvido representa um avanço significativo na engenharia geotécnica, promovendo ganhos substanciais em eficiência, precisão e segurança no dimensionamento de fundações profundas.

Referências

ALONSO, Urbano Rodriguez. **Dimensionamento de Fundações Profundas**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2019.

DAS, Braja M. **Princípios de Engenharia de Fundações**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

HACHICH, Waldemar *et al.* **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998.

MAZUTTI, Júlia Hein. **Fundação sobre estacas hélice contínua para aerogerador em Viamão/RS: análise de métodos de previsão de capacidade de carga axial a partir de dados do SPT e CPT**. 2015. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SANTA MARIA, Igor Cardoso de. **Comparação de modelos para avaliação de esforços em estacas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SCHIEL, F. **Estática de estaqueamentos**. 2. ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1957.

STAMATO, M. C. **Cálculo elástico de estaqueamentos**. 2. ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1971.