

FERRAMENTA DE INTEGRAÇÃO NUMÉRICA : QUADRATURA DE GAUSS

Selênio Feio da Silva*

Keuller Almeida Magalhães**

RESUMO: Este trabalho mostra o uso de uma ferramenta computacional capaz de resolver integrais definidas de funções polinomiais, utilizando o método da Quadratura de Gauss, Integração Numérica [1].

1- INTRODUÇÃO

A idéia principal deste trabalho é apresentar uma ferramenta computacional denominada *TOOL GAUSS*, que permite resolver problemas de Integração Numérica.

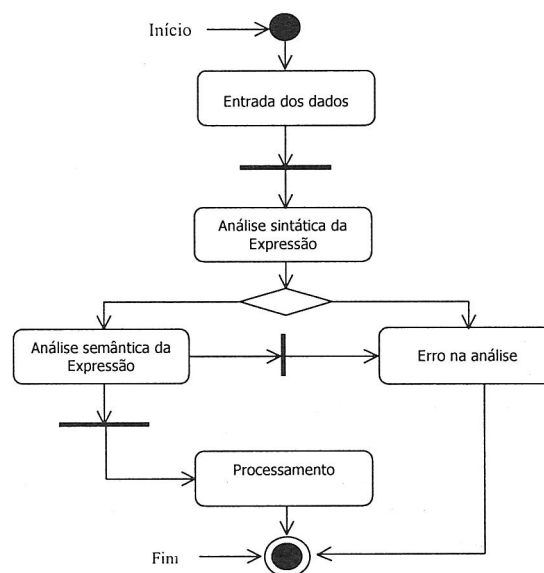
Esta ferramenta permite ao usuário, construir uma função polinomial dentro do seu próprio ambiente, onde, também, será informado o número de pontos de integração. Baseado na tabela de Coordenadas e Pesos [1], a ferramenta efetua os cálculos de integração, informando os valores obtidos para os pontos de integração e calculando o erro absoluto.

Neste ambiente podemos definir alguns parâmetros, de acordo com a acurácia desejada para a solução, como por exemplo: definir o número de casas decimais para os resultados obtidos e acrescentar ou alterar os valores da tabela de Coordenadas e Pesos.

2- ESPECIFICAÇÃO

Esta ferramenta permite resolver problemas de Integração Numérica, utilizando o método de Gauss. De acordo

com o método da Quadratura Gaussiana, devemos substituir a soma integral por uma soma discreta, surgindo assim uma função denominada de função Peso [1], pois o seu valor pontual é uma variável a ser calculada. Utilizando a tabela das Abscissas e Pesos [2], a ferramenta permite efetuar o cálculo de acordo com o número de pontos que queremos integrar. Abaixo temos o diagrama de atividades da ferramenta, segundo a *UML* [3], de acordo com suas fases:



* Graduado em Engenharia Civil – UFPa; Mestrado em Estruturas – UnB; Professor Adjunto-II dos cursos de Engenharia Civil, Tecnologia em Processamento de Dados e Bacharelado em Ciência da Computação – UNAMA.

** Aluno de Graduação do curso Bacharelado em Ciência da Computação – UNAMA.

✓ **Entrada dos Dados:**

Nesta atividade a ferramenta estará recebendo como entrada de dados a expressão que corresponde à função polinomial, juntamente com o número de ponto de integração que o usuário deseje calcular.

✓ **Análise sintática da expressão:**

Esta atividade válida sintaticamente se a expressão passada como função é válida à ferramenta, e caso a expressão não seja uma função válida à ferramenta passa o controle de execução para a atividade **Erro na análise**.

✓ **Análise semântica da expressão:**

Esta atividade válida semanticamente se a expressão que representa a função polinomial, faz parte do conjunto de função que a ferramenta poderá calcular.

✓ **Erro na análise:**

Esta atividade é executada quando ocorre uma exceção dentro do ambiente, seja quando a expressão não é válida sintaticamente, seja quando a expressão não é válida semanticamente, finalizando assim a execução da ferramenta.

✓ **Processamento:**

Esta atividade é responsável pelo processamento e cálculo da expressão polinomial, devendo informar ao usuário os valores de resposta ao cálculo.

3 - APLICAÇÕES

Serão apresentados dois exemplos de integrais definidas [1], no qual serão submetidos ao teste de nossa ferramenta. Abaixo estão as interfaces da ferramenta *TOOL GAUSS*:

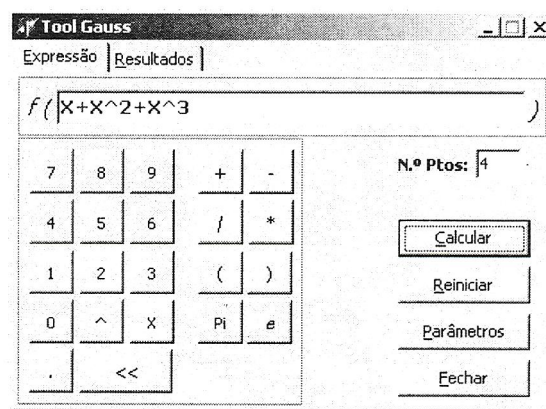


Figura 1 – Interface de entrada de dados

Ponto Integração	Resultado	Erro Absoluto
1	0,00000	-0,66665
2	0,66667	0,00002
3	0,66666	0,00001
4	0,66665	0,00000

Figura 2 – Interface de exibição dos resultados

Ponto	Coordenada	Peso
1	0	2
2	0,57735	1
3	0	0,88889
3	0,77459	0,55556
4	0,33998	0,65214
4	0,86113	0,34785
5	0	0,56889
5	0,53846	0,47862
5	0,90617	0,23692

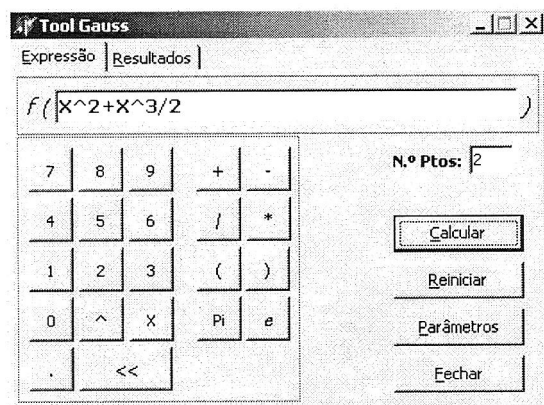
Figura 3 – Parâmetros da ferramenta

- ✓ **Calcular:** efetua o cálculo da expressão polinomial, descrita na caixa de texto acima.
- ✓ **Reiniciar:** reinicia o processo de construção da expressão polinomial, ou seja, limpa todos os registros anteriores possibilitando a construção de uma nova expressão.
- ✓ **Parâmetros:** define os parâmetros da ferramenta.
- ✓ **Fechar:** fecha a ferramenta Tool Gauss.

Exemplo 1:

Calcular a integral: $\int_{-1}^{+1} (X^2 + \frac{X^3}{2}) dX$,

utilizando 2 (dois) pontos de integração para que o resultado fornecido pela Quadratura de Gauss seja exato [2].

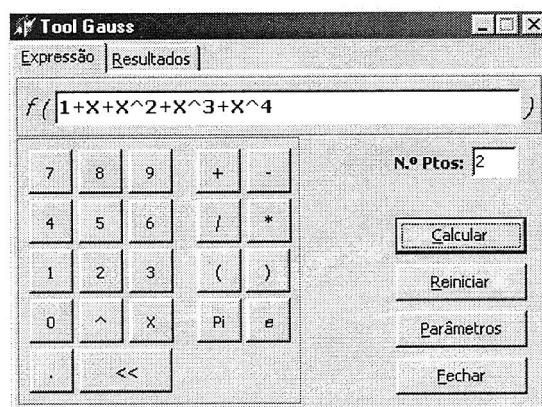


The screenshot shows the 'Resultados' tab of the 'Tool Gauss' window. It displays a table with the following data:

Ponto Integração	Resultado	Erro Absoluto
1	0,00000	-0,6567
2	0,66667	0,00000

Exemplo 2: Seja a função polinomial $F(X) = 1 + X + X^2 + X^3 + X^4$; fazer o cálculo numérico da integral de $F(X)$ entre os limites $-1 \leq X \leq 1$, utilizando a Quadratura de Gauss com $n = 2$, $n = 3$ e $n = 4$ pontos de integração.

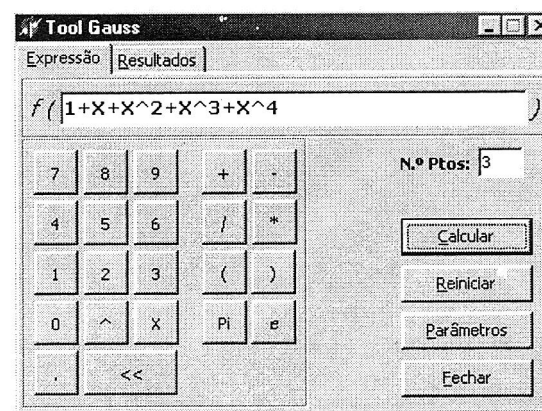
a) Dois pontos de integração: $n = 2$

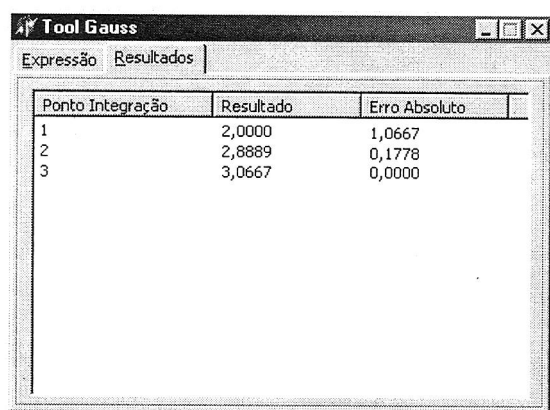


The screenshot shows the 'Resultados' tab of the 'Tool Gauss' window. It displays a table with the following data:

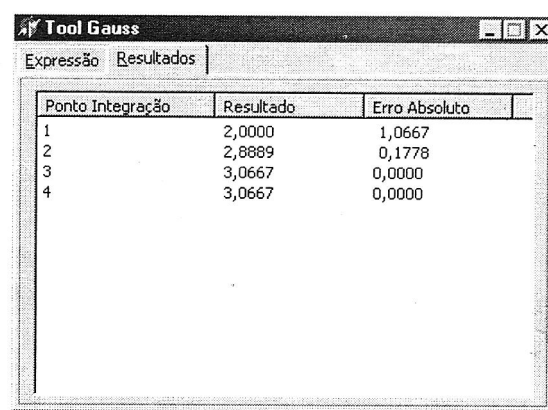
Ponto Integração	Resultado	Erro Absoluto
1	2,0000	1,0667
2	2,8889	0,1778

b) Três pontos de integração: $n = 3$



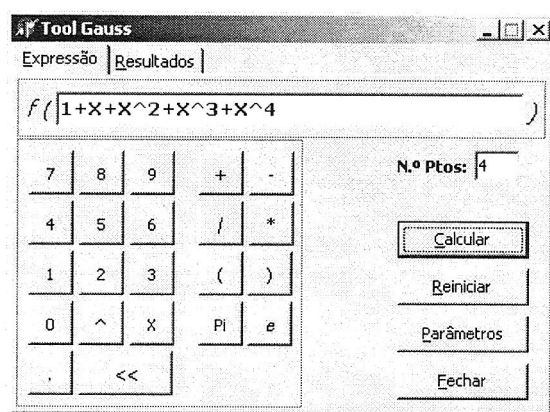


Ponto Integração	Resultado	Erro Absoluto
1	2,0000	1,0667
2	2,8889	0,1778
3	3,0667	0,0000



Ponto Integração	Resultado	Erro Absoluto
1	2,0000	1,0667
2	2,8889	0,1778
3	3,0667	0,0000
4	3,0667	0,0000

c) Quatro pontos de integração: $n = 4$



Expressão | Resultados

$f(1+X+X^2+X^3+X^4)$

N.º Ptos: 4

Calcular

Reiniciar

Parâmetros

Fechar

4- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SILVA, S. F., Integração Numérica: Quadratura de Gauss. **Revista Traços**, Belém, v.3, n. 6, pág. 75-80, 2000.

CLÁUDIO, Dalcídio Moraes, **Cálculo Numérico Computacional** – Teoria e Prática. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

FLOWER, Martin; SCOTT, Kendal, **UML Essencial**, : um breve guia para a linguagem - padrão de modelagem de objetos. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2000.

PROJETO INTEGRADO PARA FUNDAÇÕES EM ESTACAS

Alexandre D. Gusmão

Ivaldy H. Calado Jr.

Wandemyr M. S. Filho

RESUMO: A realização de tarefas repetitivas na engenharia e que demandam muito tempo quando executadas da forma tradicional, estão sendo cada vez mais realizadas com o auxílio dos softwares. Este artigo apresenta as etapas de desenvolvimento de um software (SACE – Sistema de Análise de Capacidade de Carga de Estacas), que auxilia a concepção e dimensionamento de um projeto de fundações em estacas. O SACE é um programa destinado a auxiliar todas as etapas do projeto de fundações profundas de edificações verticais convencionais, sendo concebido em três módulos integrados. O primeiro módulo permite a determinação da capacidade de carga de qualquer tipo de estaca através de diversos métodos que fazem uso de correlações com o SPT. O segundo módulo auxilia no projeto do estaqueamento de edificações sujeitas a diversos cenários de carregamento. O terceiro módulo permite a verificação e/ou o dimensionamento estrutural das estacas sujeitas a carregamentos transversais na superfície.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações, Estacas, Projetos, SACE.

1. INTRODUÇÃO

Os serviços de engenharia civil, a exemplo de outros setores produtivos, têm se tornado nos últimos anos um campo extremamente competitivo. Com o objetivo de se reduzir custos, é observada como prática freqüente nos escritórios, a tentativa de redução do tempo de execução de tarefas. Sobressaindo-se como ferramenta mais eficiente nesta tarefa, o computador tem sido cada vez mais empregado. Desta maneira, a realização de tarefas repetitivas, e que demandam muito tempo quando executadas da forma tradicional, estão sendo cada vez mais realizadas com o auxílio dos softwares.

Na engenharia geotécnica, há uma grande dificuldade de serem encontrados disponíveis no mercado, programas computacionais que sejam adequados às demandas observadas no dia-a-dia dos escritórios de consultoria e projetos. Os programas existentes são escassos, e em sua maioria, importados.

No caso específico dos projetos de fundações profundas, as opções são ainda mais restritas. Tendo em vista a carência de programas adequados ao projeto de fundações profundas, iniciou-se o desenvolvimento de um software simples, que pudesse auxiliar o engenheiro no desenvolvimento deste tipo de projeto de modo mais flexível. O projeto integrado é

denominado de SACE – Sistema de Análise de Capacidade de Carga de Estacas.

O SACE é um programa de computador destinado a auxiliar todas as etapas do projeto de fundações profundas de edificações verticais convencionais, sendo concebido em três módulos integrados. O primeiro módulo permite a determinação da capacidade de carga de qualquer tipo de estaca (pré-moldada de concreto e aço, tipo Franki, hélice contínua, etc), através de diversos métodos que fazem uso de correlações com o Ensaio SPT, como os métodos propostos por Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978), Antunes e Cabral (1996), entre outros.

O segundo módulo auxilia no cálculo do estaqueamento de edificações sujeitas a diversos cenários de carregamento (permanente, ação do vento, etc). Para isto, fez-se uso de metodologia baseada na Formulação de Schiel (1957).

O terceiro módulo, ainda em desenvolvimento, permite a verificação e/ou o dimensionamento estrutural das estacas sujeitas a carregamentos transversais na superfície.

Desenvolvido por engenheiros com experiência no projeto de fundações e especialistas em computação, o SACE é um programa adequado ao uso prático, tendo sido desenvolvido em Linguagem Visual Basic para ambiente Windows.

2 PROJETO DE FUNDAÇÕES PROFUNDAS

Classicamente as fundações são divididas em dois grandes grupos: fundações superficiais e profundas, cuja aplicação depende, entre outros aspectos, das características do terreno de fundação, bem como do carregamento da estrutura.

A crescente densificação populacional dos grandes centros urbanos tem provocado

uma verticalização das edificações, gerando na fundação carregamentos de elevada magnitude, dificultando a sua compatibilização com as deformações do terreno de fundação. Desta forma, tem sido crescente também o emprego de fundações profundas nos edifícios.

Os tipos mais conhecidos de *fundações profundas* são os *tubulões*, os *caixões* e as *estacas*, sendo estas últimas as mais comumente empregadas. Há uma grande variedade de tipos de estacas, favorecendo seu emprego em casos distintos. No entanto, o projeto de fundação em estacas segue normalmente uma mesma sequência de análise:

- Escolha do tipo de estaca a ser empregada;
- Estudo da capacidade de carga das estacas e fixação da carga admissível;
- Cálculo do estaqueamento;
- Comparação entre as cargas atuantes e admissíveis;
- Estimativa dos movimentos da fundação e sua influência na estrutura;
- Avaliação, adequação e correção do projeto quando necessário;
- Levantamento quantitativo e orçamentário;
- Confecção de plantas e relatórios.

A escolha do tipo de fundação, bem como a avaliação final do projeto, são tarefas inerentes ao engenheiro, que leva em consideração fatores técnicos e por vezes subjetivos, tais como a disponibilidade de equipamentos, vizinhança da obra, tempo disponível, características do solo de fundação, dentre outros.

Os demais procedimentos, entretanto, são constituídos em sua maioria por procedimentos de cálculo, e que, portanto, podem ser sistematizados em forma de softwares.

3. LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO

A pequena base de equipamentos com sistema operacional Unix e compatíveis no mercado corporativo brasileiro, restringe a adoção de softwares elaborados para estes sistemas operacionais.

Buscando obter um sistema de alta compatibilidade e de uso intuitivo por parte do usuário, adotou-se inicialmente para o projeto do SACE o sistema operacional Windows, da Microsoft Corporation, por ser este o sistema mais amplamente utilizado.

A linguagem de programação adotada foi o Visual Basic versão 6.0, também de propriedade da Microsoft. A escolha desta linguagem permitiu o rápido desenvolvimento do software, bem como a obtenção de um produto de fácil operacionalização, estabilidade e de agradável interface.

Embora a Linguagem Basic seja um tanto limitada em recursos quando comparada com outras linguagens, tais como o C++, ela permite uma grande flexibilidade durante o desenvolvimento do software, acelerando o processo de programação e permitindo a obtenção de aplicativos de interface familiar à maioria dos usuários, fazendo com que os resultados obtidos fossem bastante satisfatórios.

A versão atual do software, ainda em desenvolvimento, é constituída de cerca de 13.500 linhas de código, e faz extensivo uso de banco de dados em seus procedimentos de cálculo.

4 MÓDULO DE CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS

O primeiro módulo do programa destina-se ao cálculo da capacidade de carga das estacas, com o objetivo de se estabelecer as suas cargas admissíveis. Inicialmente

optou-se pelo uso de métodos semi-empíricos baseados apenas em correlações com o ensaio de SPT, tais como os Métodos de Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978), dentre outros. Posteriormente serão implementados métodos baseados em outros tipos de ensaios (CPT, piezocone, etc).

Os métodos empregados, expostos adiante, efetuam correlações com o valor obtido no ensaio de SPT, bem como o tipo de solo, caracterizado pela sua textura, e características do elemento da estaca em estudo.

Desta forma, duas etapas de entrada de dados devem ser cumpridas para fornecer ao programa as informações necessárias ao cálculo da capacidade de carga das estacas: (i) características do terreno de fundação; (ii) características do elemento de fundação.

4.1 TERRENO DE FUNDAÇÃO

A sondagem de reconhecimento a percussão (SPT) é o ensaio de prospecção comumente realizado quando do projeto de fundações de edificações, e por muitas vezes, é o único ensaio de campo disponível.

As informações obtidas pelo ensaio SPT são tratadas como dados de entrada necessários ao cálculo da capacidade de carga das estacas. Duas informações básicas devem ser fornecidas ao programa: (i) classificação do solo quanto à textura; (ii) resistência à penetração (N_{SPT}).

Normalmente as informações obtidas pelas sondagens não são contínuas ao longo da profundidade. Para adequar a continuidade das informações aos métodos de cálculo empregados, e também facilitar a entrada de dados pelo usuário, as informações do terreno de fundação são fornecidas ao software por meio de uma planilha, cujas informações contidas em cada linha devem ser representativas segundo trechos de um metro de comprimento.

Embora a obtenção da amostra deformada pelo amostrador do ensaio permita uma classificação do tipo de solo encontrado, os métodos de cálculo de capacidade de carga de estacas normalmente consideram apenas as duas principais frações granulométricas do solo.

No SACE, foram consideradas 10 possibilidades de classificações granulométricas para o solo: areia com pedregulho; areia; areia siltosa; areia argilosa; silte; silte arenoso; silte argiloso; argila; argila siltosa; e argila arenosa. O valor do N_{SPT} deve ser fornecido como um número racional, devendo ter valor maior ou igual a zero.

4.2 ELEMENTO DE FUNDAÇÃO

A segunda série de parâmetros que devem ser fornecidos ao programa, refere-se às características do elemento de fundação, ou seja, as características geométricas das estacas escolhidas a priori.

Inicialmente é necessário fornecer ao programa o tipo de estaca que se pretende calcular a capacidade de carga. Atualmente os seguintes tipos de estacas são suportados pelo software:

- Pré-moldadas de concreto armado centrifugado (seção circular);
- Pré-moldadas de concreto armado vibrado (seção quadrada ou circular);
- Estacas tipo Franki;
- Estacas em perfil metálico (seção qualquer);
- Estacas raiz;
- Estacas tipo hélice contínua;
- Estacas escavadas.

Como dados de entrada, também devem ser fornecidas as demais características das estacas, tais como diâmetro ou lado, área da seção transversal,

perímetro equivalente, pressão de injeção do concreto, cota de arrasamento, carga de trabalho, capacidade de carga do elemento estrutural, etc. As informações necessárias dependem do tipo de estaca escolhida.

4.3 MÉTODOS DE CÁLCULO

O SACE faz uso de diversos métodos semi-empíricos para o cálculo da capacidade de carga das estacas, de acordo com a sua aplicabilidade.

Os métodos semi-empíricos atualmente incluídos são os propostos por Aoki e Velloso (1975 e 1988), Décourt e Quaresma (1978), Antunes e Cabral (1996), Alonso (1996). Também foram implementados os métodos para estacas raiz propostos pela Brasfond e Fundesp.

Estes métodos têm mostrado boa confiabilidade de resultados, sendo bastante difundidos no meio técnico. Maiores informações sobre cada método podem ser encontradas nos trabalhos originais de seus respectivos autores.

4.4 FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE

O funcionamento básico de qualquer software consiste em três etapas: (i) aquisição dos dados de entrada; (ii) processamento das informações; (iii) e apresentação dos resultados.

A sequência de funcionamento deste módulo do programa é bastante simples. Utilizando-se os métodos adequados ao tipo escolhido de estaca, é calculada para cada metro de profundidade, a resistência por atrito lateral, ponta, e total da estaca, além do fator de segurança global para a carga de trabalho.

Ao se efetuar o cálculo, obtêm-se os resultados para todos os métodos cadastrados aplicados ao tipo de estaca selecionada, bem como a obtenção de médias entre os métodos a escolha do usuário.

O processo de aquisição de dados do programa é facilitado pela existência de um banco de dados, que permite cadastrar as estacas comercialmente disponíveis no mercado. Este banco de dados possui um poderoso sistema de busca, facilitando a localização através de diversos parâmetros (tipo, seção, carga máxima de trabalho, fabricante, etc).

4.5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O SACE fornece diversos formatos de planilhas detalhadas, com os resultados dos cálculos a cada metro de profundidade. É possível obter também os gráficos de resistência (total, ponta e/ou atrito lateral), e visualizá-los na tela ou impressora, permitindo uma avaliação gráfica do comportamento do terreno de fundação (Fig. 1).

Existe ainda a opção de exportar estas planilhas em forma de arquivos textos, ou texto separados por caracteres, o que permite o seu uso em softwares de planilha eletrônica, tais como o Excel.

5 MÓDULO DE CÁLCULO DO ESTAQUEAMENTO

Após a determinação da carga admissível das estacas que serão empregadas na obra, parte-se para o cálculo do estaqueamento. O SACE possibilita este cálculo para edificações submetidas a vários cenários de carregamento (permanente, ação do vento, etc).

5.1 CARREGAMENTO DOS PILARES

Antes de iniciar o cálculo do estaqueamento, deve-se fornecer ao SACE os dados referentes ao carregamento dos pilares (cargas verticais e horizontais, e momentos estáticos). Também devem ser

informadas os tipos de estacas a serem empregadas no estaqueamento, bem como as suas informações (carga admissível a compressão e tração, espaçamento, custos unitários, etc), como mostra a Figura 2.

O SACE trabalha com o conceito de cenários de carregamento. Uma edificação pode estar sujeita a inúmeros cenários de carregamento, que não agem simultaneamente, mas que solicitam os pilares de forma diferente em tempos diferentes.

Como exemplo, pode-se imaginar uma edificação que sofra a ação do vento em duas direções ortogonais, e em cada direção o vento possa estar agindo em dois diferentes sentidos. Neste caso, devido às diferentes atuações do vento, teríamos a edificação sujeita a quatro cenários de carregamento, além de um cenário em que não houvesse a atuação do vento.

Como os cenários de carregamento não atuam simultaneamente, a solução de estaqueamento adotada deve ser capaz de absorver os esforços de todos os cenários.

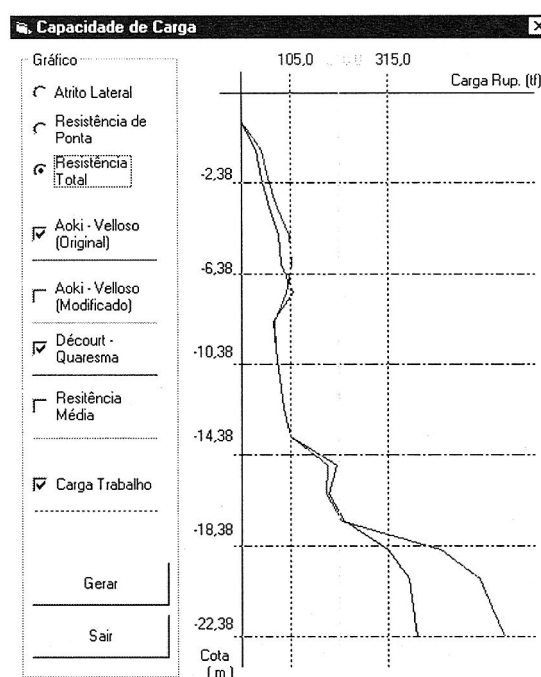


Figura 1. Gráfico de Capacidade de Carga Versus Profundidade.

Capacidade de Carga de Estacas - EDF. ADERBAL JUREMA - [Carregamento dos Pilares]

Arquivo Dados da Obra Opções Ajuda

Carregamento dos Pilares

Cenário de Carregamento: **dead**

Adicionar Excluir

☐ Editar coordenadas do centro de gravidade dos pilares

Trocar Sinal da Coluna

Adicionar Pilar

Excluir Pilar

Orden	Ref. Pila	V (tf)	DV (tf)	Hx (tf)	Hy (tf)	Mx (tf.m)	My (tf.m)
P 1	P1	593,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P 2	P2	690,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P 3	P3	544,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P 4	P4	922,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P 5	P5	1207,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P 6	P6	2013,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P 7	P7	841,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P 8	P8	1377,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P 9	P9	1052,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P 10	P10+11	1143,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P 11	P11	541,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P 12	P12	1256,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Estacas para Cálculo

Referencia da Estaca: **H600**

Adicionar Excluir

☒ Aplicar esforço total como 30% maior que o permanente

Estaqueamento

Espaçamento entre as estacas (m): **1.5**

Diâmetro equivalente (mm): **600**

Normal admissível de compressão (tf):

Permanente: **170**

Total: **221**

Normal admissível de tração (tf):

Permanente: **0**

Total: **0**

Orçamento

Comp. Médio (m): **0**

Preço (R\$/m): **0**

Figura 2. Carregamento dos Pilares.

O SACE é capaz de automaticamente encontrar a solução mais econômica para o estaqueamento, em um bloco, que atenda de forma estável a todas as solicitações impostas pelos diferentes cenários.

O SACE tem, também, a capacidade de cruzar as informações entre blocos e estacas, encontrando o conjunto mais econômico. Assim, pode-se fornecer diversas estacas, e este encontrará a configuração mais adequada. Ressalta-se que não são misturadas em um mesmo pilar estacas diferentes, mas o programa admite para pilares diferentes em uma mesma edificação, usar blocos com estacas diferentes seções.

Não há uma obrigatoriedade quanto ao número de cenários atuantes, devendo haver ao menos um cenário para cada pilar. Da mesma forma, o número de estacas que se inclui é flexível, devendo haver ao menos

uma estaca na entrada de dados.

O software não considera nos cálculos a existência de obstáculos à execução dos blocos, tais como o limite do terreno. Nos casos em que não seja possível a execução de um bloco sobre o centro de carga do pilar, deve-se corrigir o carregamento antes de inseri-lo no programa, para que sejam considerados efeitos tais como o acréscimo de carga devido a vigas de equilíbrio.

5.2 MÉTODOS DE CÁLCULO

O bloco de coroamento tem como função transferir os esforços atuantes nos pilares às estacas. Para um bloco com um determinado número de estacas, pode haver mais de uma configuração. As estacas de um bloco podem ser dispostas de formas diversas. A quantidade de estacas de um

bloco, associada a sua distribuição, posicionamento e eventuais inclinações em relação aos eixos verticais, determinam a capacidade do bloco em absorver os esforços a ele aplicados.

A distribuição das estacas é comumente denominada de estaqueamento. O estaqueamento de um pilar deve ser tal que absorva simultaneamente todas as condições de carregamento a que pode estar sujeito o pilar.

O estaqueamento pode conter estacas cravadas verticalmente, ou cravadas com determinada inclinação, a fim de absorver os esforços horizontais impostos pelas condições de carregamento.

Para o cálculo do estaqueamento, foi adotado o método proposto por Schiel (1957), comumente utilizado no Brasil.

Este método de cálculo não considera a contenção horizontal do solo, sendo a toda a reação das estacas normal ao seu eixo. Assim, os momentos estáticos aplicados nos blocos são combatidos por binários de reação das estacas, enquanto os esforços horizontais são absorvidos apenas por estacas inclinadas.

Em edificações convencionais, os estaqueamentos são quase sempre constituídos apenas por estacas verticais. Desta forma, os esforços horizontais provenientes da ação do vento devem ser calculados em separado, sendo absorvidos por meio de flexão composta das estacas.

O terceiro módulo, atualmente em desenvolvimento, tem como objetivo fazer uma avaliação destes esforços de flexo-compressão nas estacas.

6 FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE

Ao utilizar o SACE para o cálculo do estaqueamento da obra, o usuário tem três opções básicas: (i) deixar que o software encontre automaticamente uma solução para

o estaqueamento, usando os blocos constantes em seu banco de dados; (ii) especificar que um determinado bloco do banco seja utilizado; (iii) criar um novo bloco para ser utilizado.

Estas opções fazem com que o projetista tenha total controle na determinação do projeto de estaqueamento da obra.

6.1 BANCO DE DADOS DE BLOCOS

Para o projeto de estaqueamento de uma edificação convencional, algumas configurações de bloco são usadas com muita frequência. Em condições normais de projeto, em uma edificação a ser construída nos centros urbanos para uso residencial ou comercial, as estacas dos blocos são geralmente verticais, devido à pequena parcela dos esforços horizontais comparada com o carregamento vertical.

Desta forma, é possível que seja criado um banco de dados de configurações, usando-se sempre as mesmas disposições relativas entre as estacas para os blocos de coroamento, onde sua posição absoluta em relação ao centro de gravidade do estaqueamento é função direta do espaçamento a ser obedecido entre as estacas. Este espaçamento está relacionado com as dimensões e tipo da estaca a ser executada.

Assim é possível representar as coordenadas do topo de uma estaca em função de seu espaçamento (Figura 3). As constantes que multiplicam o espaçamento para determinar a posição correta de cada estaca podem então ser armazenadas em um banco de dados.

Além da posição de cada estaca, o banco de dados armazena outra série de informações relevantes, tais como constantes para o cálculo do volume do bloco, estimativa de altura, entre outras.

Atualmente o software conta com um banco de dados com 55 configurações diferentes, tipicamente usadas em projetos de fundações de edifícios, com opções variando entre 1 e 20 estacas.

6.2 TRANSLAÇÃO DOS CARREGAMENTOS

Normalmente os esforços dos pilares constantes na planta de locação e cargas nos pilares são obtidos no nível de cintas. O SACE possui algumas opções que permitem a translação dos esforços aplicados para a cota de arrasamento estipulada a priori.

Também é possível adicionar ao carregamento vertical a parcela referente ao peso próprio do bloco. Para isto foi implantada uma rotina que permite estimar a altura e volume do bloco antes de seu cálculo.

Sendo os blocos prismas regulares, seu volume pode ser tomado como o produto entre a área de base e sua altura. Para o cálculo da área da base dos blocos no banco de dados, a Equação 1 foi tomada, a partir de equações geométricas simples.

$$A_B = \frac{L_x \cdot L_y \cdot N}{4 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{N}\right)} + \frac{N_c (B\phi + H \cdot e)^2 \cdot \sqrt{3}}{4} \quad (1)$$

onde:

$$L_x = C_x \cdot e_x + \frac{\phi + CB}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi \cdot (N-2)}{2 \cdot N}\right)} \quad (2)$$

$$L_y = C_y \cdot e_y + \frac{\phi + CB}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi \cdot (N-2)}{2 \cdot N}\right)} \quad (3)$$

sendo: ϕ = diâmetro da estaca; e_x , e_y = espaçamento entre os eixos das estacas na

direção x e y, respectivamente; e = maior espaçamento; CB = recobrimento das estacas no bloco; N, N_c , C_x , C_y , B, H = parâmetros de ajuste de cada bloco constantes no banco de dados.

A altura do bloco para o cálculo de seu peso foi tomado como o produto de uma constante do bloco, também armazenada no banco de dados, e o maior espaçamento entre as estacas. Este ajuste se fez necessário, pois a altura real do bloco só pode ser corretamente dimensionada após o cálculo do estaqueamento, ou seja, uma estimativa do peso do bloco deve ser efetuada a priori. O programa não efetua o cálculo da armadura dos blocos.

Como o Método de Schiel (1957) não considera a contenção lateral do solo, nesta etapa os esforços horizontais são usados apenas para compor os momentos atuantes na base do bloco, e posteriormente são desprezados.

6.3 CÁLCULO DOS BLOCOS

Após o fornecimento dos dados necessários, prossegue-se com o cálculo automático dos blocos. O procedimento para o cálculo dos blocos faz uso de cerca de 800 linhas de comando, seguindo-se mais de 500 linhas de comando para filtragem e exibição dos resultados, envolvendo cerca de 60 variáveis e vetores locais e 10 variáveis globais.

O procedimento para determinação do projeto de estaqueamento da edificação é basicamente um processo de tentativas associadas a processos de comparação sequencial. A sequência básica do processo é apresentada na Figura 4 em forma de fluxograma.

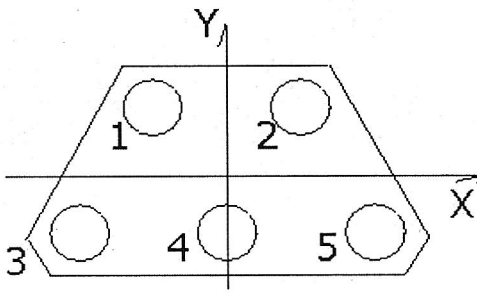
Resumo (Cálculo Automático)	Detalhes (Cálculo Manual)	Estadísticas e Impressão																								
P2 dead H600 Calcular Cálculo Forçado Tornar Preferencial Espaçamento entre as estacas X: 1.50 Y: 1.50 Valor padrão da estaca Sobre o Bloco atual Ref. Pilar: P2 Bloco: 5 - 1 Volume: 8,058m³ Altura: 1,13m Bloco Preferencial: NÃO	Bloco  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Estac</th> <th>Coord X</th> <th>Coord Y</th> <th>Carga</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>-0,75</td> <td>0,78</td> <td>138,00</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,75</td> <td>0,78</td> <td>138,00</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>-1,50</td> <td>-0,52</td> <td>138,00</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0,00</td> <td>-0,52</td> <td>138,00</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>1,50</td> <td>-0,52</td> <td>138,00</td> </tr> </tbody> </table>	Estac	Coord X	Coord Y	Carga	1	-0,75	0,78	138,00	2	0,75	0,78	138,00	3	-1,50	-0,52	138,00	4	0,00	-0,52	138,00	5	1,50	-0,52	138,00	
Estac	Coord X	Coord Y	Carga																							
1	-0,75	0,78	138,00																							
2	0,75	0,78	138,00																							
3	-1,50	-0,52	138,00																							
4	0,00	-0,52	138,00																							
5	1,50	-0,52	138,00																							

Figura 3. Detalhamento do Bloco de Coroamento.

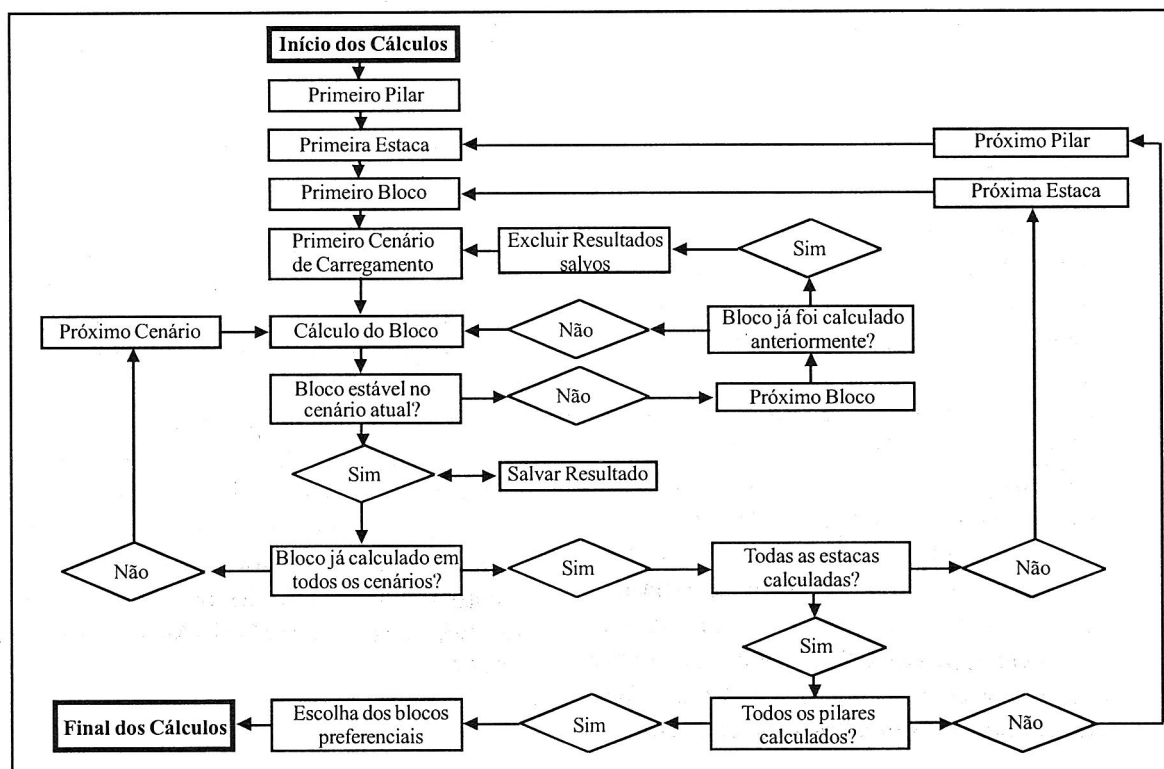


Figura 4. Fluxograma do Cálculo do Bloco de Coroamento.

O fluxograma apresenta as etapas básicas do procedimento de cálculo de forma simplificada. Alguns passos como as transferências dos esforços e estimativa das alturas não estão representados.

A idéia básica consiste em calcular todas as combinações entre estacas, blocos e cenários, determinando uma solução estável para cada combinação. Os resultados são todos salvos em banco de dados e, sendo todas as soluções encontradas estáveis, parte-se para a escolha da solução mais econômica, em um processo denominado “escolha de blocos preferenciais”.

Uma das características do programa que permite este cálculo é justamente a forma de indexação dos blocos no banco de dados, ordenados por número de estacas e volume de concreto, entre outros.

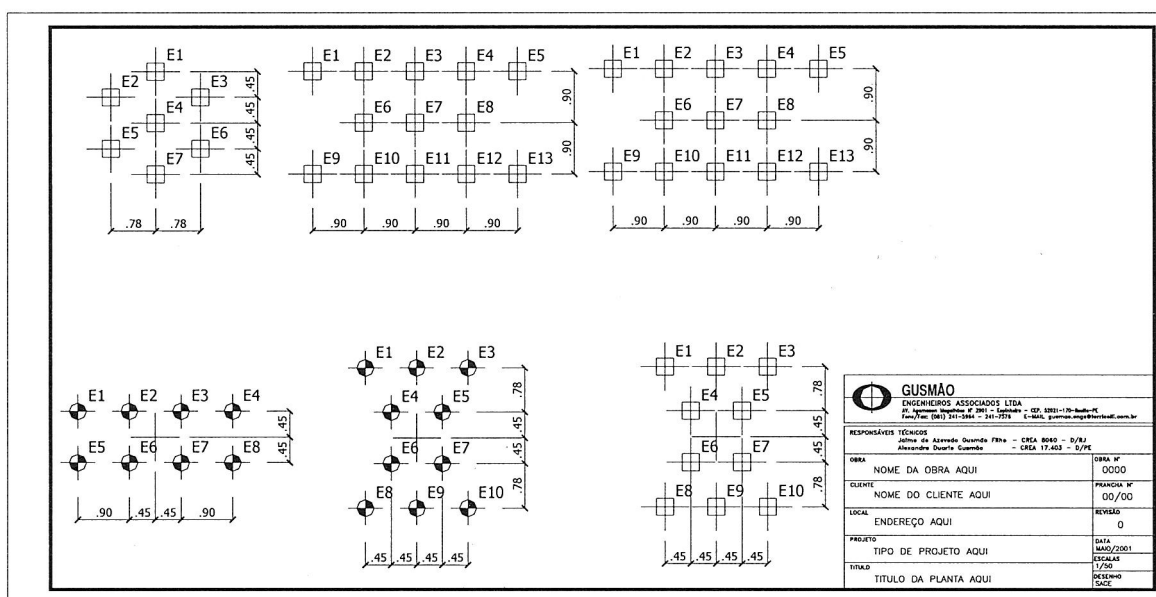
O SACE determina automaticamente qual a configuração do bloco a ser empregado e com qual estaca a ser adotada. Estes blocos escolhidos pelo SACE são denominados Blocos Preferenciais. O SACE escolhe qual o bloco preferencial seguindo a seguinte metodologia:

- Para cada estaca, é verificada a estabilidade dos blocos na memória do SACE de forma sequencial, ordenados em volume crescente de concreto.
- Ao encontrar um bloco estável, o programa cessa a busca, e recomeça com a próxima estaca.
- Para cada estaca, será determinado um bloco estável. Este bloco pode ser o mesmo para todos os cenários, ou haver blocos estáveis independentemente para cada cenário, dependendo das opções usadas nos cálculos. Recomenda-se, portanto, que a opção que habilita a verificação de estabilidade de um bloco em todos os cenários esteja ativa, salvo na análise de cenários independentes.

- Os blocos ditos estáveis para cada opção de estacas são comparados entre si.
- O bloco com menor número de estacas é dito preferencial.
- Se houver dois blocos diferentes com o mesmo número de estacas, é escolhido como bloco preferencial aquele que aparecer primeiro na ordem de volume de concreto.
- Caso os dois blocos sigam a mesma variação, é escolhido como preferencial aquele que for constituído de menor diâmetro equivalente.
- Caso as estacas apresentem mesmo diâmetro equivalente, é escolhido como preferencial aquele cujas estacas usem menor espaçamento.
- Caso as estacas apresentem mesmo espaçamento, é escolhido como preferencial o bloco que faça uso da estaca que foi primeiramente adicionada como opção de cálculo.

O SACE ainda não efetua verificações quanto a interferências entre blocos. Também não faz verificações quanto à existência de obstáculos, tais como o poço de elevador ou o limite do terreno. Por estes motivos, o projetista deve interagir com o SACE, corrigindo eventuais inadequações. Em alguns casos será necessário modificar os resultados do cálculo automático através de um processo denominado de “cálculo forçado”.

Além da biblioteca de blocos incorporada ao SACE, é também possível trabalhar com blocos criados pelo próprio usuário, que podem ser não simétricos ou até mesmo possuindo estacas inclinadas. Neste caso, o cálculo do estaqueamento também é feito através do Método de Schiel (1957).



7 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Há uma grande variedade de formatos de saída dos resultados obtidos pelo programa. É possível imprimir planilhas resumidas de esforços, planilhas completas, orçamentos, quantitativos, entre outros.

Também é possível exportar a planta de estaqueamento totalmente pronta em formato compatível com o Autocad (Figura 5). A exportação em outros formatos está atualmente em desenvolvimento.

8 CONCLUSÕES

O programa SACE permite o completo desenvolvimento de projetos de fundações em estacas para edifícios, permitindo um considerável aumento de produtividade para o projetista. Além dos aspectos técnicos do dimensionamento (capacidade de carga, cálculo do estaqueamento, verificação do carregamento transversal das estacas), o programa também possibilita a obtenção de orçamentos estimativos, bastante úteis para

formulação de propostas técnicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U.R. **Estaca Hélice Contínua com Monitoração Eletrônica** – Previsão da Capacidade de Carga Através do Ensaio SPTT, SEFE III, São Paulo, v.2, p.141-151. 1996.
- Antunes, W.R e Cabral, D.A. **Capacidade de Carga de Estacas Hélice Contínua Monitorada**, SEFE III, São Paulo, v.2, p.105-108. 1996.
- Aoki, N. e Velloso, D.A. **An Approximated Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles**, V PCSMFE, Buenos Aires, v.1, p.367-376. 1975.
- Calado Jr, I.H. , **Sace – Manual do Usuário** - Versão Beta 1, Recife. 2001.
- Décourt, L. e Quaresma, A.R. **Capacidade de Carga de Estacas a Partir de Valores do SPT**, VI COBRAMSEF, Rio de Janeiro, v.1, p.45-53. 1978.
- Schiel, F. **Estática dos Estaqueamentos**, n.10, Escola de Engenharia de São Carlos-USP. 1957.