MODELAGEM NUMÉRICA DE ESTACA ESCAVADA COMPOSTA DE SOLO-CIMENTO E RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE PEDRAS PRECIOSAS

Paulo Roberto Ebone Marosin
Acadêmico da Universidade de Passo Fundo - UPF
Faculdade de Arquitetura e Engenharia (FEAR) – Passo Fundo - RS
109701@upf.br

Gregório Rigo Garbin
Acadêmico da Universidade de Passo Fundo - UPF
Faculdade de Arquitetura e Engenharia (FEAR) – Passo Fundo - RS
120355@upf.br

Mateus Forcelini
Acadêmico da Universidade de Passo Fundo - UPF
Faculdade de Arquitetura e Engenharia (FEAR) – Passo Fundo - RS
mateusforcelini@yahoo.com.br

Antonio Thomé
Orientador/Doutor do Programa de Pós Graduação em Engenharia e Meio Ambiente
Faculdade de Arquitetura e Engenharia (FEAR) – Passo Fundo - RS
thome@upf.br

Resumo. *Este trabalho tem por objetivo realizar a modelagem numérica de uma estaca escavada, composta de solo-cimento e resíduos de beneficiamento de pedras preciosas e comparar os resultados de prova de carga obtidos por EDLER (2008), com os obtidos por este modelo. Para tanto será utilizado o software ABAQUS/CAE®, de elementos finitos para modelar o problema e realizar a análise final dos resultados.*

Palavras-chave: *Modelagem numérica, estaca escavada, elementos finitos.*

1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

EDLER (2008), realizou provas de carga em estacas e verificou a viabilidade de estacas escavadas compostas de solo-cimento e resíduo de pedras preciosas.

As estacas tinham um total de 3 m, onde a parte superior, composta de concreto convencional, no traço 1:2,06:2,94 (cim.: areia: brita), teor de argamassa 51% e relação a/c 0,53, preenchia os 0,50 m superiores, os outros 2,50 m restantes foram preenchido por solo-cimento, de composição 50% solo, 50% resíduo e 10% de teor de cimento Portland, como pode ser observado na Fig. 1.

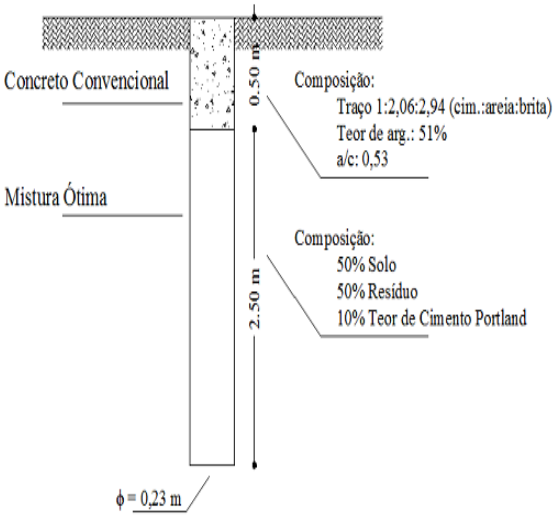

Figura 1: Esquema do modelo (EDLER 2011)

Foram realizadas 3 provas de carga estática em campo. Os resultados são apresentados na Fig. 2.

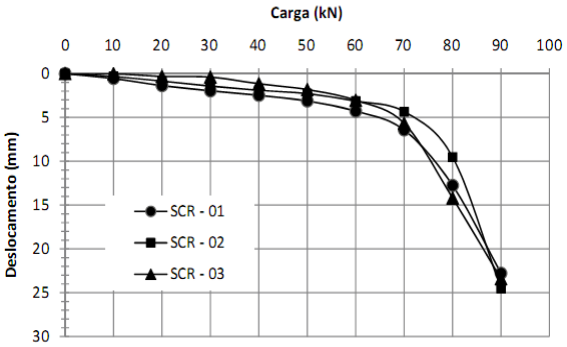

Figura 2: Curvas carga x deslocamento das provas de carga.

2. MODELAÇÃO NUMÉRICA

Para a modelação numérica foi utilizado o ABAQUS/CAE® (Complite ABAQUS Enviroment), que é um software de simulação numérica de comportamento de materiais usando o método de elementos finitos.

Para fazer a modelação, inicialmente é necessário desenhar as partes constituintes do modelo, no caso são 3 partes, o solo natural, o concreto convencional e o solo- cimento. Para cada uma destas partes necessita-se atribuir características dos materiais utilizados.

Inicialmente foi utilizado os parâmetros apresentados no trabalho de WILLIG (2011), onde o mesmo realizou a mesma análise, porém utilizando outro software e fazendo uma análise em 2 dimensões (Fig.3).

Material	*Parâmetros - Tipo*	*Parâmetros*	*Valor*
Solo	Elásticos	E (MPa)	25
		ν	0,3
	Inelásticos (Drucker-Prager)	c' (kPa)	7
		ϕ (°)	24
		Ψ (°)	zero
Mistura: Solo+resíduo+cimento	Elásticos	E (MPa)	1000
		ν	0,3
	Inelásticos (Drucker-Prager)	c' (kPa)	100
		ϕ (°)	45
		Ψ (°)	15
Concreto	Elásticos	E (MPa)	25000
		ν	0,3

Sendo:
E = módulo de elasticidade
ν = Coeficiente de Poisson
c' = coesão efetiva
ϕ = ângulo de atrito
Ψ = ângulo de dilatância

Figura 3: Parâmetros iniciais utilizados na análise.

Posteriormente foram juntadas as duas partes de solo , no caso, o solo natural e o solo-cimento, com comportamentos semelhantes, porém com propriedades dos materiais diferentes, bem como a parte com o concreto convencional, como mostrado na Fig. 4.

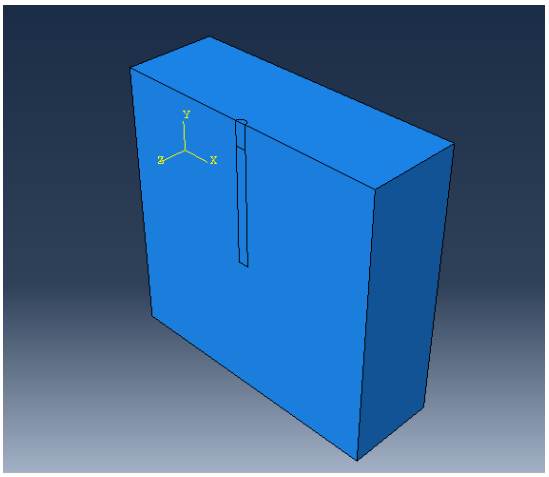

Figura 4: Montagem das partes

Em seguida, são criadas as etapas de cálculo, no modelo foram criadas duas etapas, contato e carregamento e mudado definições padrão de cálculo para melhor precisão e convergência dos resultados.

Uma atenção especial, principalmente neste tipo de modelação deve ser tomada na hora de atribuir as propriedades de contato e a interação dos materiais. Segundo FARO (2011), deve-se definir uma superfície mestre e outra escrava, onde a superfície mestre irá ditar o comportamento da superfície escrava durante a interação do solo. As propriedades de contato utilizadas foram *tangencial behavior e normal behavior*.

Então foram aplicadas as condições de contorno no modelo, na superfície inferior do bloco foram aplicadas restrições totais de deslocamentos e rotação, nas superfícies laterais externas foram permitidas somente translações em y, na parte frontal (plano de simetria do modelo) foram permitidos movimentos em x e y e rotação em z. Ao invés de definir um carregamento foi utilizado um deslocamento na cabeça da estaca de 0,024 m, que foi o deslocamento máximo atingido nas provas de carga, para posteriormente, ver qual a reação nos nós e definir a carga a que estavam submetidos em determinado período.

Em seguia é definido e aplicada a malha ao modelo, para o solo natural e solo-cimento foram utilizados elementos tetraédricos, já para o concreto convencional foram utilizados elementos hexadricos, como recomendado por LAUTENSCHLÄGER (2010). Na hora de fazer a malha é importante que esteja mais discretizada na região onde serão obtidas as maiores informações do modelo (Fig 5.). Por último define-se o tipo de cálculo que se deseja, de acordo com o processador existente e faz-se a análise, para posteriormente tirar os resultados e plotar num gráfico ou visualizar diretamente no programa (Fig. 6).

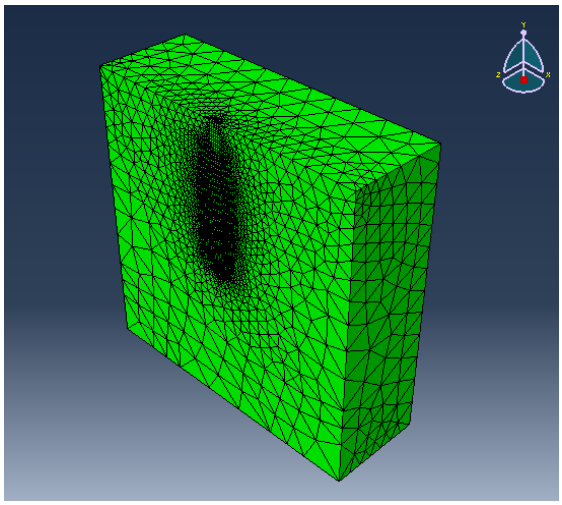

Figura 5: Malha utilizada na modelação.

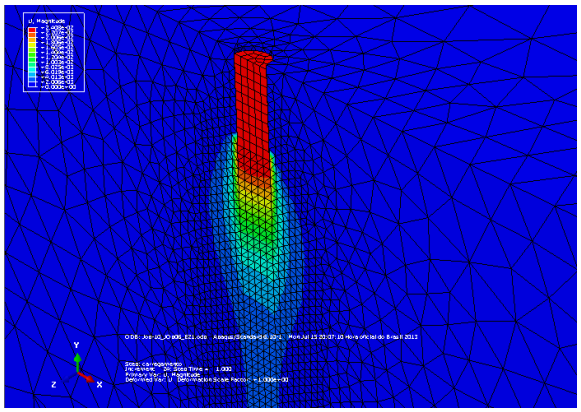

Figura 6: Magnitude de deslocamentos.

3. RESULTADOS

Inicialmente foi plotado, o resultado das provas de carga realizadas por EDLER (2008), bem como a primeira análise utilizando os parâmetros inicias utilizados por WILLIG (2011). Posteriormente para melhor entender a influência dos diferentes parâmetros no modelo, manteve-se os parâmetros iniciais e mudou-se apenas um parâmetro (Tab. 1), os resultados são mostrados na Fig. 7. Como os parâmetros mais incertos diziam respeito ao solo-cimento, os quais foram inferidos por WILLIG (2011), procurou-se inicialmente manter os outros e mudar somente estes, porém à medida que a curva não convergia para o resultado de campo, os outros começaram a ser mudados para ver se chegava a melhores resultados.

Tabela 1: Parâmetros alterados.

Análise	Parâmetro Alterado	Novo Valor
1	Prova de carga	xxx
2	Parâmetro iniciais	xxx
3	E solo natural	15000 Kpa
4	Φ solo natural	30°
5	C' solo natural	10 Kpa
6	E solo-cimento	600000 Kpa
7	Φ e Ψ solo-cimento	35° e 11,67°
8	C' solo-cimento	115 Kpa

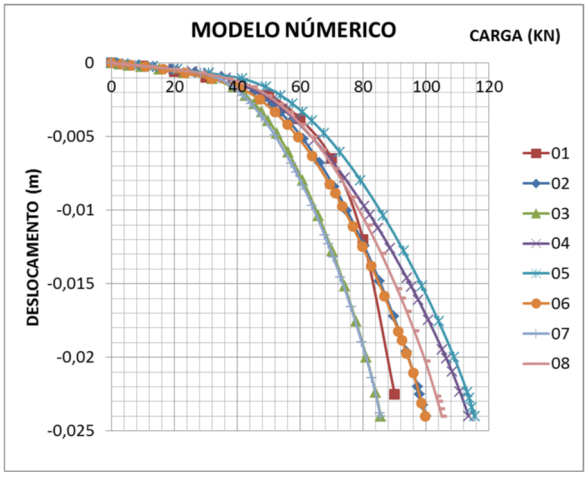

Figura 7: Resultado da modelação mudando apenas um parâmetro.

Em seguida mudou-se dois parâmetros de cada material, somente do solo natural e somente do solo-cimento, em seguida, dois parâmetros de um, com um parâmetro de outro, observado na Tab. 2.

Tabela 2: Parâmetros alterados.

Análise	Parâmetro Alterado	Novo Valor
9	C' solo natural	10 Kpa
	E solo natural	21000 Kpa
10	Φ e Ψ solo-cimento	35° e 11,67°
	C' solo-cimento	115 Kpa
11	Φ e Ψ solo-cimento	40° e 13,33°
	C' solo-cimento	115 Kpa
12	Φ e Ψ solo-cimento	35° e 11,67°
	C' solo-cimento	115 Kpa
	C' solo natural	10 Kpa

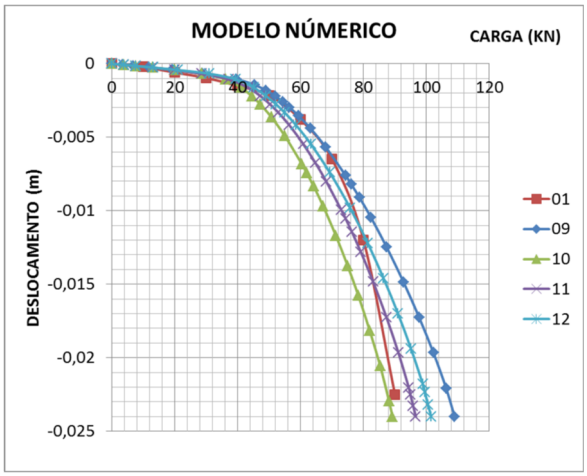

Figura 8: Resultado da modelação mudando vários parâmetros.

4. CONCLUSÃO

A curva que melhor se ajustou aos resultados encontrados em campo, foi a representada pelo número 09, onde foram mudados a coesão e o módulo de elasticidade do solo natural, isto considerando os valores de carga para até aproximadamente 70 KN, após esta carga o modelo numérico distanciou-se do que foi encontrado em campo, evidenciando uma maior rigidez do modelo, isto se deve ao fato de que no modelo os materiais são perfeitamente homogêneos e se comportam perfeitamente como caracterizados, ao passo que sabemos que o solo é um material, na realidade heterogêneo que não se comporta exatamente desta maneira.

Agradecimentos

Aos professores Antônio Thomé e Moacir Kripka pelas oportunidades acadêmicas. Vitor Pereira Faro, pelos ensinamentos, Mateus, Gregório e Igor pela companhia e ao pessoal do CETEC pela cordialidade, Juliana, Leunir, Amilton, Nilton, Yuna, Elouise e Lucas.

REFERÊNCIAS

EDLER, Patrícia. **Comportamento de estacas broca compostas de solo-cimento e resíduo de beneficiamento de pedras preciosas a partir de provas de carga estática**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia/ Infraestrutura e Meio-Ambiente) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2008.

LAUTENSCHLÄGER, C. E. R. et al. **Modelagem Numérica do Comportamento CargaDeflexão de Fundações Profundas Submetidas a Carregamentos Laterais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil/ Geotecnia) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010, p 94-113.

FARO, Vitor P. **Estudo de Fundações Profundas em Solo Tratado Submetidas a Carregamentos Horizontais**. Qualificação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para posterior obtenção do título de doutor em engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011, p 72-86.

WILLIG, M. **Aplicação do método dos elementos finitos à engenharia geotécnica**. Relatório final do trabalho de conclusão do curso. Universidade de Passo Fundo, 2011, p 49-85.