

USO DE ELEMENTOS DE INTERFACE NA MODELAGEM NUMÉRICA DA CRAVAÇÃO EM ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DO CONE (CPT)

USE OF INTERFACE ELEMENTS IN NUMERICAL MODELING OF DRIVEN CONE PENETRATION TESTS (CPT)

Gabriela C. Honorato^{a,b}, Carlos A. Lauro^{a,c}, Lucas P. da Silva^{a,d} e Renato R. Angelim^{a,e}

^a*Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil,*
<https://www.eec.ufg.br/>

^bgabrielacastilho@discente.ufg.br ^ccarloslauro@ufg.br ^dpinheiropinheiro@discente.ufg.br

^eangelim@ufg.br

Palavras-chave: CPT, Método das Diferenças Finitas, elementos de interface.

Resumo A realização de ensaios geotécnicos em campo nem sempre é possível, devido a fatores como a heterogeneidade do solo ou sua alta deformabilidade. Nesse sentido, o desenvolvimento de métodos de simulação desses testes, como o ensaio de penetração de cone (CPT), é importante. Hoje, um dos principais desafios para a simulação numérica do CPT é a interação solo-cone, que exige a inserção de elementos de interface no modelo. O presente trabalho estuda como pode ser simulada a cravação do cone metálico do ensaio CPT usando o Método das Diferenças Finitas. Foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre ensaios CPT *in situ* e temas correlacionados. Os parâmetros de caracterização e resistência do cone e do solo foram extraídos do trabalho de Salles (2013). A cravação foi feita sob velocidade constante, o que exigiu o uso de amortecimento da energia cinética do sistema. Foi atingida a meta de simular a cravação do equipamento no maciço e foram obtidas as tensões na interface solo-cone usada. Em futuros trabalhos, será usada esta metodologia para comparar com ensaios de campo.

Keywords: CPT, Finite Difference Method, interface elements.

Abstract Geotechnical field testings are not always possible, due to factors such as soil heterogeneity or its high deformability. So, the development of simulation methods for these tests, such as the cone penetration test (CPT), is important. Nowadays, one of the main challenges of CPT's numerical simulation is the soil-cone interaction, as it requires the insertion of interface elements in the model. This article presents a study about how the metal cone setting of the CPT is simulated using Finite Difference Method. A bibliographic research on CPT *in situ* essays and correlated themes was carried out. Cone's e soils' characterisation and resistance parameters were extracted from Salles (2013) essay. The numerical process of setting the CPT with constant speed required damping the kinetic energy of the system. The goal of simulating the embedding of the equipment in the massif was achieved and the stresses at the soil-cone interface used were obtained. In future works, this methodology will be used to compare its results with field trials'.

1 INTRODUÇÃO

O ensaio de penetração do cone (CPT – *Cone Penetration Test*) é feito a partir da cravação de um cone metálico no maciço de solo e não permite a retirada de amostras. Seus resultados básicos são a resistência de ponta e o atrito lateral em diferentes profundidades, sendo assim relevante para a determinação da resistência do solo ensaiado ao cisalhamento.

A interpretação de ensaios CPT em meios heterogêneos, anisotrópicos, descontínuos e não lineares é ainda um desafio com o uso das formulações analíticas até agora existentes. Nesse sentido, surge como uma alternativa o uso de simulações numéricas que considerem estas características dos solos heterogêneos e assim torne possível encontrar parâmetros representativos dos solos testados com o CPT.

O objetivo central deste trabalho é realizar a simulação da cravação do cone metálico do CPT em um solo escolhido a partir pesquisas bibliográficas; sendo para tal utilizado o *software* FLAC 2D (ITASCA Consulting Group Inc., 2012), que trabalha o método das diferenças finitas explícito. O principal desafio, nesse sentido, será montar a interface solo-cone, caracterizá-la corretamente e retirar dela as informações necessárias para a obtenção dos resultados naturais do ensaio CPT: resistência de ponta e atrito lateral.

A seguir será apresentada a revisão e metodologia usada para o desenvolvimento deste trabalho e por fim as considerações finais do estudo.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Para a realização deste estudo foram necessárias pesquisas sobre temas relacionados a ele. Breves resumos sobre cada um desses temas estão apresentados a seguir.

2.1 Estado de tensões do solo e sua resistência ao cisalhamento

Segundo Pinto (2006), as rupturas causadas por tensões normais são raras e, portanto, a resistência do solo deve ser definida por sua resistência ao cisalhamento.

A representação matemática da envoltória de Coulomb está apresentada na Eq. (1), onde a tensão cisalhante efetiva (τ') é apresentada como resultado da interação entre a coesão efetiva do solo (c'), a tensão normal efetiva (σ') e o ângulo de atrito efetivo do solo (ϕ').

$$\tau' = c' + \sigma'[\text{tg}(\phi')] \quad (1)$$

2.2 Ensaio CPT

As primeiras referências ao ensaio de penetração do cone (CPT) são datadas de 1932, na Holanda, por Barentsen (Lunne et al. (1997)). Nessa versão inicial do teste - segundo Lunne et al. (1997) - o único parâmetro aferido era a resistência de ponta. Além disso, o equipamento pioneiro conseguia atingir apenas uma profundidade de 12 metros. A possibilidade de medição do atrito lateral surgiu com Begemann, já no final da década de 50, na mesma época em que o ensaio se consolidava mundialmente e surgia no Brasil. O ensaio é regulamentado por normas técnicas, sendo a principal regulamentação adotada a norma americana ASTM D-344, com o título *Standard test method for deep quasi-static, cone and friction-cone penetration tests of soils* (Furtado, 2018).

O ensaio consiste na cravação de uma ponta de cone metálica a uma velocidade constante de $20 \text{ mm/s} \pm 5 \text{ mm/s}$. O cone pode ser mecânico, elétrico ou um piezocone e precisa aferir, no mínimo, a resistência de ponta (q_c - tensão normal à ponta do cone) e o atrito lateral do solo (f_s - tensão cisalhante à lateral do cone). Entretanto, existe a possibilidade do acoplamento de módulos à sonda, sendo assim verificadas outras propriedades. Esse ensaio não permite a retirada de amostras do solo, o que é positivo do ponto de vista ambiental, mas negativo por

não permitir, diferentemente de outros ensaios geotécnicos de campo, a extração de material para a realização de ensaios complementares em laboratório.

Os elementos centrais do ensaio CPT são a luva, o filtro e o cone; dispostos em um sistema vertical onde a base é o cone e o topo, a luva. O filtro pode ficar entre o cone e a luva, no final da luva ou no cone. Na Tabela 1(Schnaid e Odebrecht (2012)), tem-se as dimensões mais comuns desses três elementos.

	Luva	Filtro	Cone
diâmetro (mm)	$36,1 > d > d_{\text{cone}}$	$d_{\text{cone}} - 2$	35,3 a 36
rugosidade da superfície (μm)	$< 0,4 \pm 0,25$	-	< 5

Tabela 1: Diâmetro e rugosidade de elementos do cone (Schnaid e Odebrecht (2012) - adaptada).

Além disso, segundo Schnaid e Odebrecht (2012), a angulação da ponta cônica deve ser de $60^\circ \pm 5^\circ$, a permeabilidade do filtro deve ficar entre as ordens de 10^{-5} a 10^{-4} m/s e a abertura de seus poros deve ser entre 20 e 200 microns. A Figura 1 (Lunne et al. (1997)) traz a posição usual e o nome dos elementos do cone utilizado no CPT.

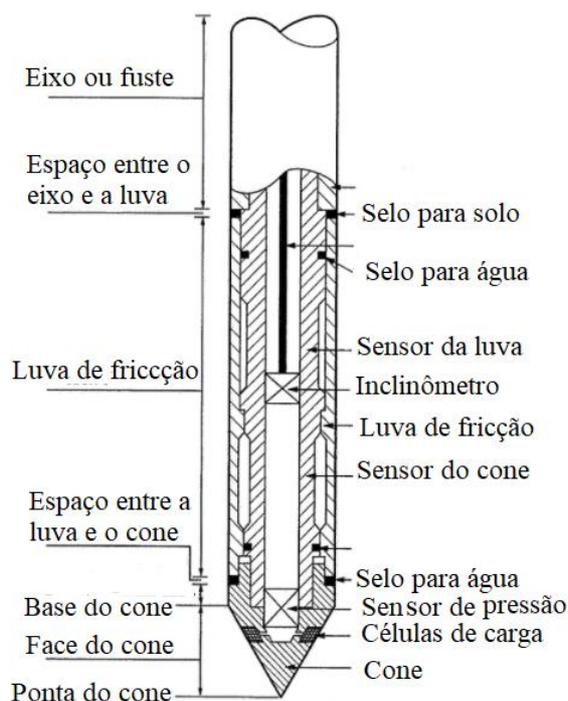
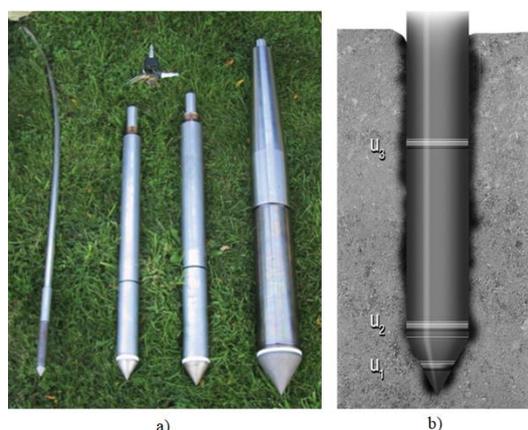


Figura 1: Elementos Principais do Cone (Lunne et al. (1997) - traduzida).

A estrutura que possibilita a cravação do cone geralmente é composta por um pistão acionado por uma bomba hidráulica, sendo a velocidade de cravação mantida constante por conta da presença de uma válvula reguladora de vazão.

A ponteira (Figura 2a) é parte do cone responsável por literalmente perfurar o solo. Pode ser alimentada por pilha, bateria ou fonte externa. Abriga as células de carga, filtro e é coberta por um sistema poroso. A presença de um elemento filtrante entre a ponteira e a luva também é muito recomendada (Figura 2b). Acima da ponteira há uma barreira selante para que não entre água ou solo dentro do equipamento.

São as células de carga que registram a resistência de ponta e o atrito lateral do solo.



Figuras 2: a) Diferentes dimensões do cone (Schnaid e Odebrecht (2012)); b) Diferentes posições em que podem vir os elementos filtrantes (Schnaid e Odebrecht (2012)).

Quando a dimensão do cone exigir, é necessário inserir redutores de atrito entre o topo do cone e a luva, para aumentar a seção de contato com o solo e evitar erros. O inclinômetro precisa estar presente em toda configuração, especialmente nas que visam uma cravação profunda, para evitar erros de captação de dados e danos no equipamento.

Levando em consideração a sensibilidade alta do metal às condições do ambiente, a calibração do equipamento deve ser feita nas mesmas condições de temperatura atmosférica que o ambiente de onde o ensaio será feito apresenta.

A continuidade do ensaio é recomendada para que a poropressão do solo não se esvaia nos intervalos que o ensaio estiver parado: pelo mesmo motivo a velocidade de cravação do cone não pode ultrapassar ou ser inferior ao recomendado. A medição de dados não pode ser feita em um intervalo maior que 20 cm. O intervalo entre medições de resistência de ponta e atrito lateral precisa necessariamente estar alinhado com o intervalo de medição da profundidade atingida pelo sistema.

A manutenção deve ser feita antes e depois de cada ensaio, e devem ser anotadas as observações feitas nesse processo. As dimensões de todos os elementos envolvidos precisam estar dentro do esperado e as regiões que servem para impedir a entrada de água e solo no interior do cone devem estar devidamente seladas.

Quanto às leituras que podem ser feitas, a partir do quociente entre o atrito lateral e a resistência de ponta é calculada a razão de atrito (R_f), expressa em porcentagem. Como resultado principal do ensaio, esses 3 parâmetros são exibidos em gráficos separados em que eles ficam em função da profundidade do solo.

Foram desenvolvidas ao longo do tempo equações para a correção de erros na captação dos dados de resistência de ponta e atrito lateral.

2.3 Método das diferenças finitas explícito - FLAC

O *software* FLAC trabalha com o Método das Diferenças Finitas Explícito, permitindo aplicação de carga nos nós da malha formada e o estabelecimento de uma relação de um nó com seus vizinhos. O FLAC também permite a análise dinâmica, trabalhos com grandes deformações e elementos de interface, além da implementação de novos modelos constitutivos de interesse do usuário. O programa faz análise dinâmica e, para simular problemas estáticos, aplica um amortecimento (ou relaxação dinâmica) ao sistema de modo a reduzir a energia cinética.

O processo iterativo que o FLAC usa está resumido na Figura 4. Primeiro, as equações de movimento são utilizadas para serem calculados velocidades e deslocamentos. Em seguida,

são obtidas as forças e as tensões a partir do uso das leis constitutivas do material analisado. Esta sequência de cálculo representa um passo (*step*) e estes passos são repetidos até que haja uma convergência aceitável, que nunca é de 100%.

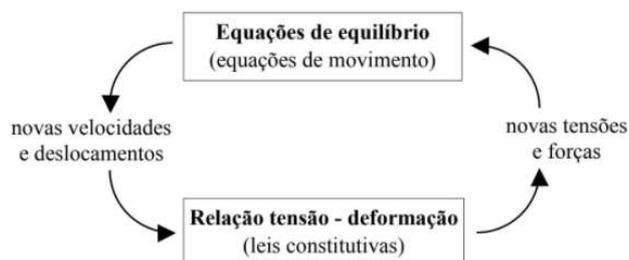


Figura 4: Processo iterativo utilizado no *Software* FLAC (ITASCA Consulting Group Inc., 2012 - adaptada).

2.4 Modelo constitutivo do solo

Na simulação do perfil do solo no FLAC, ele pode ser subdividido em regiões e cada uma delas pode assumir um modelo constitutivo específico para o solo. Para o estudo que se apresenta neste texto, o solo foi simulado como material elástico linear. Este modelo constitutivo requer a densidade do material (ρ) e duas propriedades de deformabilidade: módulo de compressibilidade volumétrica (K , ver Eq. 2) e módulo cisalhante (G , ver Eq. 3), que têm relação direta com o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν) do solo.

$$K = E/(3(1-2\nu)) \quad (2)$$

$$G = E/(2(1+\nu)) \quad (3)$$

2.5 Modelo constitutivo da interface

Interfaces podem ser necessárias por diferentes motivos, como para gerar a interação entre dois materiais distintos inseridos na malha. Isso porque para a definição desses materiais diferentes, a malha precisou ser inicialmente dividida.

O FLAC oferece três modelos de interface, como o de Mohr-Coulomb (Figura 5). Para inserir uma interface é necessário indicar quais nós farão parte de cada lado dela. A seguir são indicadas as propriedades de deformabilidade da interface, como rigidez normal (kn), cisalhante (ks), do ângulo de atrito ($fric$) e da coesão (coh).

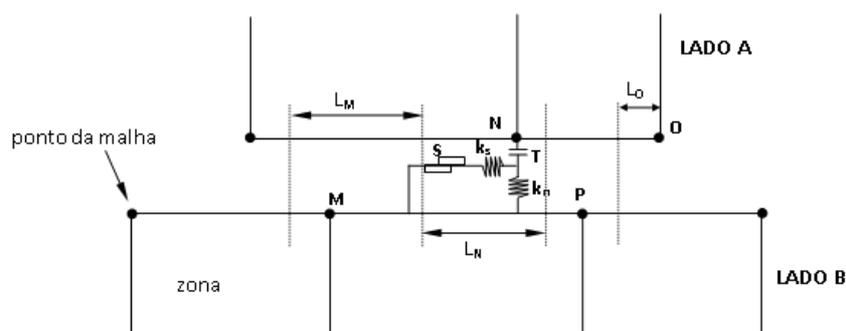


Figura 5: Interface representada pelos lados a e b, ligada pelas rigidezes cisalhante, ks e normal, kn (ITASCA Consulting Group Inc., 2012).

Os parâmetros de deformabilidade e resistência da interface solo-cone montada neste

estudo tem relação direta com o material mais deformável que ela intermeia, ou seja, com os parâmetros do solo. Serão utilizadas as Eq. 4, 5, 6 e 7 como estimativa inicial dos parâmetros da interface.

$$k_n = E/d_{50} \quad (4)$$

$$k_s = G/d_{50} \quad (5)$$

$$c_{oh} = c/2 \quad (6)$$

$$f_{ric} = 2\phi/3 \quad (7)$$

onde d_{50} é o diâmetro aproximado para 50% de material passante no solo; c_{oh} e f_{ric} são a coesão e ângulo de atrito da interface solo-cone, respectivamente; e c e ϕ são a coesão e o ângulo de atrito no solo.

2.6 Ensaios de campo encontrados na literatura

Santos (2017) escreveu sobre correlações entre ensaios de campo distintos em solos arenosos. No primeiro grupo de solo por ela encontrado (BDi-i.1), o equipamento utilizado para o CPT foi um cone holandês e as leituras foram feitas a cada 25 cm penetrados. O solo em questão era original de Vitória (ES). Sua camada mais superficial era composta de argila, seguida de areia e, por fim, argila marinha. Houve a realização de ensaio CPT em seis pontos distintos da área escolhida, cada um em dois momentos. No primeiro, o solo estava com um aterro de 4 metros de altura sobre ele. No segundo momento o aterro já havia sido retirado há 90 dias, permitindo o sobreadensamento do solo. Os resultados mínimo, médio e máximo de resistência de ponta por profundidade encontrados condisseram com o esperado, apresentando uma resistência maior no caso do solo sobreadensado.

Um outro trabalho estudado foi o de Salles (2013), onde o objetivo do autor era encontrar módulos de deformabilidade através de ensaios com cone elétrico feitos em pontos distribuídos entre 2 áreas existentes no campus experimental da Unesp de Bauru. Como este foi o texto escolhido pelos autores para fornecer os parâmetros do solo e a caracterização do cone simulados no *software* FLAC, o trabalho de Salles (2013) será melhor apresentado na seção seguinte, relativa à metodologia adotada para o desenvolvimento do presente artigo.

3 METODOLOGIA

3.1 Estudo de caso

O trabalho de Salles (2013) apresenta a determinação do módulo de deformabilidade do solo através de Provas de Carga no Cone Elétrico. Este foi o material utilizado para a obtenção dos dados de campo e laboratoriais necessários para a simulação desejada no presente artigo.

O solo estudado por Salles (2013) encontrava-se em duas áreas distintas do Campo Experimental da Unesp de Bauru (SP). Na primeira área foram feitos os testes denominados CPT 1, 2, 3 e 5; enquanto na segunda foram feitos os ensaios CPT 4, 6 e 7. Salles (2013) afirma que a região das áreas estudadas apresenta um solo definido como areia fina pouco argilosa, porosa, colapsível e com compactidade aumentando conforme a profundidade cresce. Ainda, ele afirma que na área 1 o solo é laterítico e estruturado.

A Tabela 2 traz os índices físicos da área 2, os quais foram obtidos por Peixoto (2001; apud SALLES, 2013). Da mesma forma, a Tabela 3 apresenta parâmetros de resistência do solo, como a coesão e ângulo de atrito observados a cada metro de profundidade.

Profundidade (m)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	e	n (%)	Sr (%)
1	15,0	26,6	13,7	9,1	0,94	48	26
2	15,4	26,9	14,0	10,3	0,93	48	30
3	15,7	26,8	14,2	10,4	0,88	47	32
4	16,3	26,5	15,0	9,0	0,77	44	30
5	16,5	26,5	14,9	10,7	0,78	44	36
6	16,4	26,6	14,6	12,3	0,82	45	40
7	16,5	26,7	14,8	11,5	0,80	44	38

Tabela 2: Índices físicos do solo da área 2 (Peixoto, 2001; apud SALLES, 2013).

Local	Profundidade (m)	c (kPa)	Φ (°)	Rc (kPa)
1	1,5	-	32	13
2	2,5	14	31	23
3	3,5	22	20	56
1	4,5	24	28	15
2	5,5	14	29	80
1	7,5	20	29	87
3	7,5	-	32	107

Tabela 3: Parâmetros de resistência do solo (Peixoto, 2001).

A partir do ensaio CLT (prova de carga no CPT) realizado por Salles (2013), foram obtidos valores para o módulo de elasticidade. Foi adotado um coeficiente de Poisson de 0,33 e calculado o módulo de deformação cisalhante do solo, resultados estes que foram essenciais para a caracterização do solo e da interface na simulação. A Tabela 4 apresenta esses resultados de campo para o furo 7 (área 2 da região estudada por Salles (2013)). Com todos esses parâmetros foi possível calcular o módulo de deformação volumétrica do solo (Eq. 2) e outros parâmetros relevantes (Eq. 4, 5, 6 e 7) na caracterização do maciço e da interface.

Ensaio	Profundidade (m)	E _{clt} (MPa)	G _{clt} (MPa)	G _{clt} /G _{máx} (%)
CPT7	2	6,5	2,4	2,4
	3	6,5	2,5	2,1
	4	10,6	4,0	3,2
	5	6,0	2,2	1,7
	6	12,4	4,7	3,2
	7	16,9	6,3	4,0

Tabela 4: Resultados do ensaio de prova de carga do cone – CLT (Salles, 2013).

O cone utilizado por Salles (Figura 6) foi um piezocone com ponteira metálica contendo uma pedra porosa, 36,4 mm de diâmetro e ponta com angulação de 60°. A partir desses dados tem-se que a altura do cone era de 31,52 mm. Seu comprimento era de algo em torno de 150 mm. O sistema de cravação escolhido foi o do modelo TG63-150, da marca Pagani Geotechnical Equipment. Segundo a fabricante, as hastes de cravação desse equipamento cujo diâmetro é o mesmo da ponteira tem um comprimento de 1 metro.



Figura 6: Piezocone utilizado (Salles, 2013).

Quanto aos resultados do CPT, Salles (2013) os organizou em gráficos acompanhados do perfil estratigráfico obtido no ensaio SPT de Peixoto (2001). Na Figura 7 foram apresentados os resultados de resistência de ponta, atrito lateral e razão de atrito (essa última, calculada) para cada um dos 7 furos realizados. Uma camada superficial mais resistente pode ser percebida nesses ensaios no primeiro metro cravado. Isso era previsto e pode ser explicado, segundo o autor, pelo tráfego constante de veículos pela região, o que contribuiu para a compactação maior da superfície do terreno. De modo a não danificar o equipamento de cravação, foi feito então um pré-furo nos primeiros 0,5 m do solo.

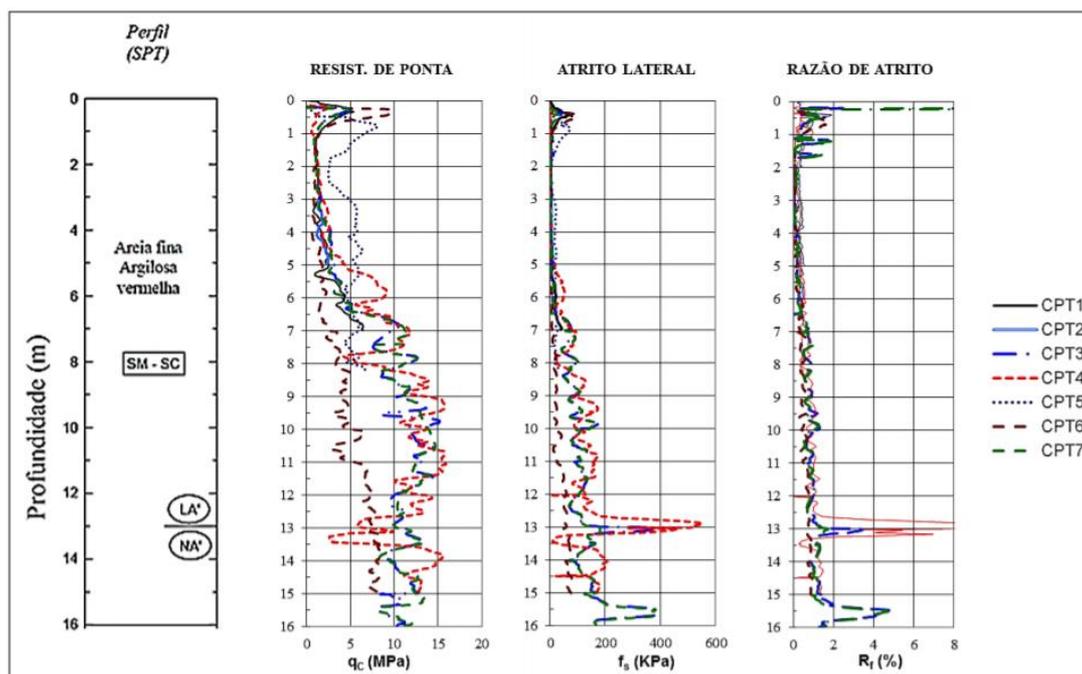


Figura 7: Resultados do ensaio CPT para cada um dos 7 furos (Salles, 2013).

3.2 Simulação da cravação

A simulação numérica foi realizada no *software* FLAC, como já mencionado. A cravação do CPT foi realizada usando o modelo axissimétrico e a simulação numérica foi feita de uma maneira simplificada. Foi simulada a cravação de um cone de 100 mm de raio e 150 mm de altura em um maciço que representava uma porção de 1x7m do solo.

Para a simulação simplificada foi construída uma malha de 10x70 elementos para o solo e de 2x70 elementos para o cone. O modelo constitutivo do solo e do cone metálico foi o elástico linear. Já o modelo constitutivo da interface solo-cone foi o elasto-plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Foi gerada uma região a parte na primeira coluna de elementos da região do solo para

representar um pré-furo. Este pré-furo permite a cravação do cone no eixo axissimétrico da malha, ou seja, permite que o eixo axissimétrico se desloque na horizontal, permitindo a cravação real de Salles (2013).

A definição das propriedades inerentes ao modelo elástico adotado para o solo e para o cone foi o passo seguinte. Foi preciso definir o módulo de compressibilidade volumétrica (K), de deformação cisalhante (G) e a densidade dos dois materiais: o solo estudado por Salles (2013) e o metal que constitui o cone. Para a simulação da cravação simplificada foram usados os parâmetros apresentados na Tabela 5, sendo a caracterização do solo apenas influenciada pela apresentada por Salles (2013). Já para a definição das propriedades do cone metálico, foram utilizados os valores apresentados na ABNT NBR 8800. Essa norma trata de projetos de estruturas de aço e, portanto, traz os valores padrão a serem considerados para algumas propriedades do aço.

Material	Densidade (kg/m ³)	Deformabilidade 1	Deformabilidade 2	Resistência
Solo	1600	E = 10 MPa ν = 0,3333	K = 10 MPa G = 5 MPa	-
Cone	2000	E = 200 GPa ν = 0,333	K = 200 GPa G = 75 GPa	-
Interface solo-cone	-	-	kn = 10 GPa/m ks = 5 MPa/m	Coh = 1 kPa Fric = 30°

Tabela 5: Parâmetros adotados para o solo, o cone e a interface na simulação simplificada da cravação.

A seguir, foram geradas as tensões iniciais no solo fixando horizontalmente suas duas laterais, verticalmente sua base (limite inferior) e acionando a gravidade (10 m/s²). O modelo foi então estabilizado. Os deslocamentos gerados nesta etapa foram zerados e a malha do cone foi fixada na horizontal e vertical, para evitar que a cravação começasse antes de finalizada esta etapa inicial.

Em seguida, foi escavado o pré-furo até a profundidade aproximada de 4m, o que alterou muito pouco as tensões iniciais antes geradas. A escavação do pré-furo foi necessária para permitir a cravação do cone, para criar a interface solo-cone, definir sua localização e seus parâmetros de deformabilidade e resistência. A Tabela 5 apresenta os parâmetros da interface adotados e calculados com as Eq. 4, 5, 6 e 7. Para os cálculos de kn e ks, foi considerado o d50 de (1x10⁻³)m. Os valores dos módulos de compressibilidade volumétrica (K) e de deformação cisalhante (G) utilizados nessas equações foram os correspondentes aos adotados para o solo, isso porque a ruptura na interface acontece em função do material mais fraco.

Foi então acionada a teoria das grandes deformações no programa, permitindo grandes deslocamentos. Também foi liberado o deslocamento vertical no contorno da malha do cone, para aplicar a velocidade de cravação do equipamento.

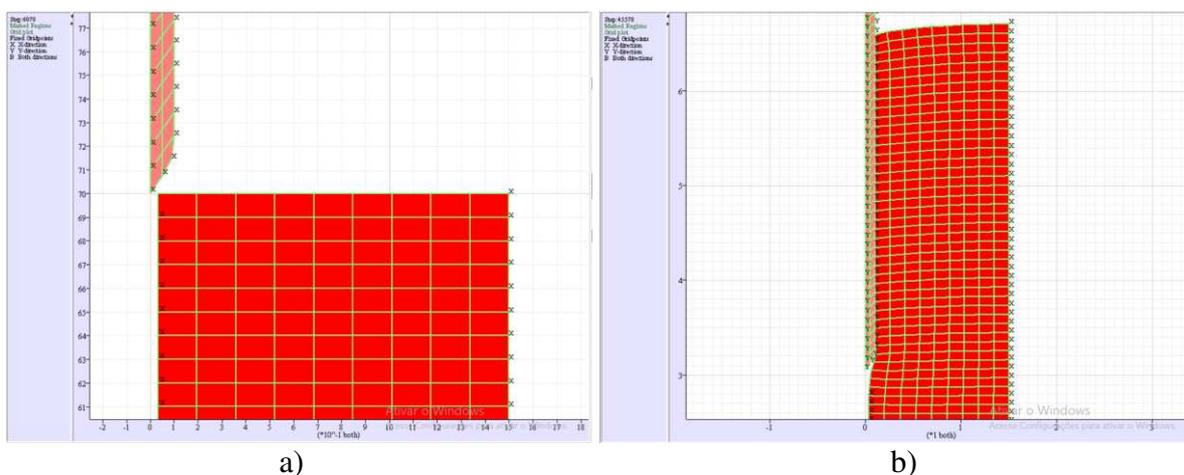
Para simular a cravação foi aplicada uma velocidade vertical constante de (-1x10⁻⁴ m/s) em todos os nós da malha do cone e aplicados 1000 passos (*steps*) no modelo, para que o cone se deslocasse verticalmente e assim se aproximasse da posição vertical média do segundo elemento do pré-furo. Após os 1000 passos iniciais, foi feita a liberação do deslocamento horizontal do contorno do pré-furo e foram aplicados mais 1000 passos. Este procedimento (liberar os deslocamentos horizontais e acrescentar mais 1000 passos à cravação) foi repetido até se atingir a profundidade aproximada de 4m para a cravação.

Foram obtidos os resultados de tensões normal e cisalhante nas interfaces a cada 1000 passos rodados no *software*, o que correspondia a uma profundidade de 0,25m do maciço. Elas foram retiradas para verificar se estavam representando a cravação do cone corretamente

e permitindo a correta interação entre os dois materiais. Foi feita uma média ponderada pelo comprimento de influência dos nós para serem obtidos os valores de q_c e f_s da simulação numérica e esses resultados foram então comparados com os de campo de modo a verificar a tendência de crescimento da resistência com a profundidade.

4 RESULTADOS

A Figura 8a apresenta a malha axissimétrica com as condições de contorno para o modelo simplificado. A Figura 8b apresenta o início da cravação do CPT, além da escavação do pré-furo.



Figuras 8: Modelo simplificado malha de diferenças finitas a) Condições de contorno e condições iniciais; b) Fim da cravação do CPT.

Nas Figuras 9 e 10 estão apresentados gráficos comparando os resultados de q_c e f_s obtidos a partir da simulação numérica (no modelo simplificado) com os resultados aferidos por Salles (2013). Percebe-se, na Figura 9, que os valores de q_c foram diferentes, mas a tendência de crescimento da resistência com a profundidade foi verificada em ambos. Já na Figura 10, verifica-se que os valores de f_s aferidos em campo são praticamente nulos, enquanto os resultantes da simulação numérica não o são. Mas, novamente, é verificada a tendência de crescimento da resistência com a profundidade.

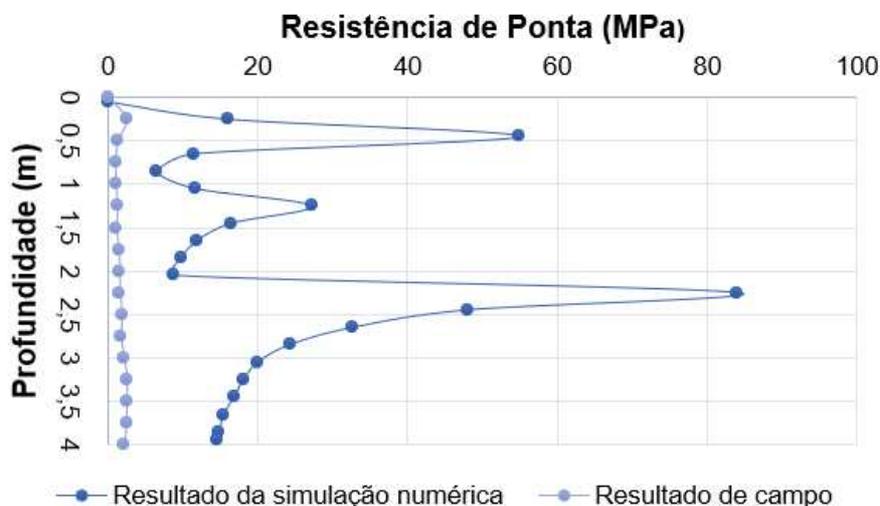


Figura 9: Gráfico comparando os resultados da simulação numérica simplificada com os de campo

para qc.

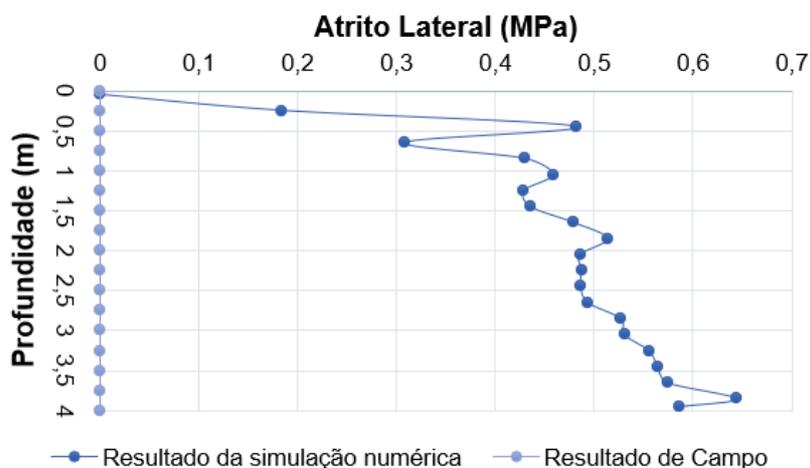


Figura 10: Gráfico comparando os resultados da simulação numérica simplificada com os de campo para fs.

5 CONCLUSÕES

O Método das Diferenças Finitas se mostrou uma ferramenta capaz de simular problemas axissimétricos em meios descontínuos, com o uso de elementos de interface e utilizando a teoria de grandes deformações para simular a cravação do CPT.

O modelo simplificado conseguiu reproduzir o processo de cravação do CPT no terreno, obtendo as tensões normal e cisalhante médias nas interfaces solo-ponta do CPT e solo-lateral do CPT para obtenção da qc e do fs do ensaio. Foi possível montar gráficos comparando os resultados de campo com os da simulação numérica e foi verificada a tendência de crescimento da resistência com a profundidade, apesar de qc e fs da simulação serem significativamente maiores que os de campo e da existência de picos nos gráficos. Essas duas falhas podem ser explicadas pelo fato de que foram utilizadas dimensões maiores que as descritas por Salles (2013) para o cone e da liberação tardia dos deslocamentos horizontais dos nós da lateral esquerda do maciço (levando a um acúmulo de tensões).

Uma simulação envolvendo um modelo detalhado está em fase de conclusão e, mesmo assim, apresenta resultados preliminares com tendência similar ao resultado observado no ensaio de CPT.

Por tais motivos, tudo vai levar a concluir que é possível usar a metodologia proposta neste trabalho para interpretação de ensaios de CPT em campo e assim obter parâmetros representativos dos solos ensaiados.

Os autores agradecem à EECA-UFG pelo apoio oferecido durante o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 8800:2008, Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios.
- Furtado, D., Métodos diretos de investigação do subsolo – CPT e CPTu. Disponível em: <<http://www.archus.com/dynamiccad/site/2018/06/06/metodos-diretos-de-investigacao-do-subsolo-cpt-e-cptu/>>. Acesso em: 20/fev/2021.
- ITASCA Consulting Group Inc., FLAC Fast Lagrangian Analysis of Continua Online Manual Table of Contents, 2012.
- Lunne, T., Robertson, P. K., Powell, J.J.M., *Cone Penetration Test in Geotechnical Practice*.

- Chapman & Hall, 1997.
- Peixoto, A.S.P., Estudo do Ensaio SPT-T e sua Aplicação na Prática de Engenharia de Fundações. *Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Agrícola*, 2001.
- Pinto, C.S., *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. Oficina de Textos, 2006.
- Salles, J.C., Determinação de Módulos de Deformabilidade através de Provas de Carga no Cone Elétrico. *Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Geotecnia*, 2013.
- Santos, M.D., Correlações entre Sondagens de Simples Reconhecimento e Resultados de Ensaios de Campo (SPT, CPT, DP) para Diferentes Subsolos Arenosos. *Universidade Federal do Espírito Santo – Centro Tecnológico – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil*, 2017.
- Schnaid, F., Odebretch, E., Ensaios de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações. Oficina de Textos, 2012.
- TG-63-150. Disponível em: < Cone Penetration Test. Disponível em: < <http://www.geotechdata.info/geotest/cone-penetration-test> >. Acesso em: 18/mai/2021.
- Vargas, C.A.L., Aplicação do Programa de Diferenças Finitas, FLAC 2D, a Programas Geotécnicos (Curso Básico). *Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil – Pós-Graduação em Geotecnia*, 1998.