

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO DE CAMPO CPT COM USO DE MODELO AXISSIMÉTRICO E ELEMENTOS DE INTERFACE

NUMERICAL SIMULATION OF THE CPT FIELD TEST WITH THE USE OF AXISIMMETRIC MODEL AND INTERFACE ELEMENTS

Larissa F. Alves, Carlos A. L. Vargas e Celso F. de Faria Júnior

*Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil,
larissafe@egresso.ufg.br, carloslauro@ufg.br, celsofrancisco@discente.ufg.br,
<https://www.eeca.ufg.br/>*

RESUMO. O ensaio de penetração de cone, CPT, é um ensaio de campo utilizado para estimar parâmetros de resistência para projetos de fundações ou estabilidade de taludes. É possível simular numericamente os ensaios de campo CPT e retroanalisar os parâmetros dos materiais envolvidos com a profundidade, obtendo assim parâmetros para cada camada de solo. Para realizar a simulação numérica do ensaio CPT é necessário aplicar a teoria de grandes deformações e usar elementos de interface no contato SOLO-CPT que permita simular o deslizamento do contato, ou seja, com modelo elástico perfeitamente plástico do contato SOLO-CPT. O presente estudo tem como objetivo realizar a simulação numérica de ensaios CPT, já executados em campo, e propor um processo numérico para simulação da cravação e prova de carga (CLT) no ensaio de campo CPT, para posteriormente obter parâmetros geotécnicos do perfil do solo estudado, considerando elementos de interface. A simulação numérica de ensaios CPT foi realizada com um modelo axissimétrico, aplicando velocidade constante e com o uso de elementos de interface SOLO-CPT já implementado no método das diferenças finitas explícito Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC). Os resultados obtidos numericamente, tanto do CPT quanto do CLT, apresentaram a mesma tendência de comportamento dos ensaios de campo, demonstrando que este novo processo numérico de cravação do cone foi satisfatório.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação Numérica, Ensaio de CPT, Elementos de Interface, Método das Diferenças Finitas.

ABSTRACT. The cone penetration test, CPT, is a field test used to estimate strength parameters for foundation designs or slope stability. It is possible to numerically simulate the CPT field tests and back-analyze the parameters of the materials involved with the depth, thus obtaining parameters for each layer of soil. To perform the numerical simulation of the CPT test, it is necessary to apply the theory of large deformations and use interface elements in the SOLO-CPT contact that allow simulating the contact slip, that is, with a perfectly plastic elastic model of the SOLO-CPT contact. The present study aims to perform the numerical simulation of CPT tests, already performed in the field, and to propose a numerical process to simulate the driving and load test (CLT) in the CPT field test, to later obtain geotechnical parameters of the soil profile. studied, considering interface elements. Numerical simulation of CPT tests was performed with an axisymmetric model, applying constant velocity and using SOLO-CPT interface elements already implemented in the explicit finite difference method Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC). The results obtained numerically, both from the CPT and the CLT, showed the same trend of behavior of the field tests, demonstrating that this new numerical process of driving the cone was satisfactory..

KEYWORDS: Numerical Simulation, CPT test, Interface Elements, Finite Difference Methods.

1 INTRODUÇÃO

A investigação do solo tem como objetivos determinar: a natureza e sequência das camadas subsuperficiais, considerando o regime geológico; as condições de águas subterrâneas; e as propriedades físicas e mecânicas das camadas do subsolo (ROBERTSON; CABAL, 2012). O ensaio de penetração de cone, ou CPT (*Cone Penetration Test*), é um ensaio de campo caracterizado como uma das mais importantes ferramentas de prospecção geotécnica, cujos resultados podem ser empregados para estimar parâmetros geotécnicos (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). O ensaio consiste na cravação, no terreno, de uma ponteira cônica metálica, com 60° de ápice, a uma velocidade constante de 20 mm/s \pm 5 mm/s. As grandezas medidas no ensaio são a resistência de ponta (q_c) e o atrito lateral (f_s) (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). A obtenção de parâmetros geotécnicos a partir de ensaios de campo é mais complexa uma vez que não existe formulação analítica que permita obter parâmetros para meios heterogêneos e em condições externas variáveis (CÂNDIDO, 2016). Nesse sentido, com o avanço das ferramentas numéricas e os modelos constitutivos, é possível simular numericamente os ensaios de campo e retroanalisar os parâmetros dos materiais envolvidos com a profundidade, obtendo assim parâmetros para cada camada de solo envolvido (BAROTH; MALECOT, 2010). Com parâmetros de deformação e resistência do solo é possível simular numericamente o comportamento de obras geotécnicas. Para simular numericamente o ensaio CPT é necessário aplicar a teoria de grandes deformações e usar elementos de interface no contato SOLO-CONE que permitam simular o deslizamento do contato, ou seja, utilizando o modelo elástico perfeitamente plástico do contato SOLO-CONE.

Este trabalho propõe uma nova metodologia numérica para a simulação do ensaio CPT com base na pesquisa desenvolvida por Honorato e Vargas (2021), que tinham, inicialmente, como objetivo simular a cravação de cone e realizar a retroanálise numérica do ensaio de campo feito por Salles (2013), através da ferramenta numérica FLAC (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*) de resolução de equações diferenciais parciais (ITASCA, 2011). O FLAC é um programa bidimensional que utiliza como base o Método das Diferenças Finitas, simulando o comportamento de estruturas compostas por solo, rocha ou materiais que apresentem plastificação quando seus critérios de ruptura são atingidos. Os materiais são representados por elementos que formam uma malha que é ajustada pelo usuário para que possuam a geometria do problema a ser modelado. O programa utiliza a formulação lagrangeana, que adiciona incrementos de deslocamentos às coordenadas da malha, sendo as movimentações e deformações regidas pelo comportamento do material. O FLAC contém diversos recursos, incluindo os elementos de interface. Pode-se definir uma interface como uma conexão entre malhas que podem se separar, deslizar ou abrir, ou seja, representando uma descontinuidade física. As interfaces no FLAC são caracterizadas por deslocamento ou separação por tração, regidos pela teoria de Coulomb, e apresentam propriedades de rigidez normal e ao cisalhamento, atrito, coesão, dilatação, e resistência à tração. Através do FLAC pode-se modelar a distribuição de tensões em sólidos axissimétricos. Estes apresentam uma seção transversal que contém um eixo de revolução, logo, podem ser obtidos pela rotação de 360° da seção transversal em relação a este eixo.

O cone utilizado por Salles (2013) era composto por uma ponta cônica, uma luva de atrito lateral e uma pedra porosa para a medição das poro-pressões, possuía um diâmetro de 36,4 mm e um ângulo de ponta de 60°. Contudo, os resultados de Honorato e Vargas (2021) apresentam uma malha ainda grosseira a fim de permitir a realização do procedimento numérico adequado para a cravação. Honorato e Vargas (2021) aplicaram uma primeira metodologia numérica com o uso do modelo axissimétrico e de interface SOLO-CONE. Nesta metodologia, foram inicialmente fixados na direção horizontal (em x) os nós do eixo de simetria, que constituíam o

eixo de simetria do solo e depois do CPT. A partir de um critério de máxima reação de tração no eixo de simetria na direção x o programador liberava o deslocamento dos nós em x à medida que o cone era cravado no solo (método que depende do programador). Salles (2013) também realizou a prova de carga no cone, CLT, ou seja, uma prova de carga incorporada ao ensaio CPT tradicional. Neste ensaio, o conjunto hastes-ponteira é tratado como uma estaca cravada e sobre ele são efetuadas provas de carga para obtenção do módulo de deformabilidade, que de acordo com Reiffsteck *et al.* (2009) é o coeficiente angular do trecho elástico linear inicial da curva tensão-deslocamento.

Dessa forma, objetiva-se realizar o refinamento da malha e configurar a geometria do cone de modo a possuir as mesmas dimensões do cone utilizado por Salles (2013), aplicando-se, uma segunda metodologia numérica de cravação do ensaio CPT com uso do modelo axissimétrico e com o uso de novas interfaces, denominadas nesta pesquisa por interfaces SOLO-CONE, SOLO-SOLO e SOLO-EIXO DE SIMETRIA. Esta última interface permite a cravação do CPT, sem a interferência do programador, à medida que a cravação ocorre, quando o estado de tensões na interface SOLO-EIXO DE SIMETRIA atinge a resistência máxima, aquela interface separa-se permitindo a entrada do CPT naquela profundidade (método que não depende do programador). Também como, objetiva-se avaliar a possibilidade de simular a prova de carga no cone ao fim de uma sequência de cravação, utilizando também o programa FLAC. Para a simulação, considerou-se um modelo axissimétrico, aplicando velocidade constante com o uso de elementos de interface já implementados no método das diferenças finitas explícito FLAC, e utilizou-se os resultados das tensões obtidos no programa para retroanalisar os parâmetros da interface, calibrando o modelo.

2 METODOLOGIA

Quanto às etapas da nova metodologia, inicialmente, gerou-se a malha subdividida em três regiões e, em seguida, definiu-se o modelo constitutivo da região 3 do solo e da região 2 do cone (Figura 1a e 1b), sendo a ambos atribuído o modelo elástico-linear, no qual é necessário definir a densidade (ρ) e os dois módulos de deformabilidade (Equações 1 e 2).

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2)$$

Onde G , K , E e ν são os módulos de deformabilidade cisalhante e volumétrica do solo e cone, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do solo e cone, respectivamente. A malha foi composta por 150 elementos na horizontal e 600 elementos na vertical, totalizando 90000 elementos. Em seguida, dividiu-se a malha em três regiões distintas, de modo que: a primeira faixa, denominada faixa de simetria, representa o eixo de simetria da cravação (Figura 1 e 2), gerada de forma a apresentar dimensões de 1mm x 4,0 m; a segunda faixa foi modelada conforme dimensões do cone de penetração (Figura 1 e 2), com 18 mm de raio e 31 mm de altura e ângulo de ponta de 60°, ou seja, mantendo as medidas reais do cone utilizado por Salles (2013) no ensaio de campo; e a terceira faixa foi configurada de modo a simular uma porção de 2,0x4,0 m de um maciço de solo (Figura 1 e 2). Definiu-se a geometria do modelo de forma que o maciço de solo possuísse uma abertura no eixo de simetria da malha. A geometria final do modelo é apresentada na Figura 1b. Concluída a geometria da malha, utilizou-se o comando *fix* para fixar os deslocamentos dos nós do cone metálico nas duas direções (x e y) (região 2 Figura 1b), assim como, os contornos laterais do solo na direção horizontal e o contorno inferior na direção vertical (região 3 Figura 1b). Fixou-se, também, os contornos laterais da faixa de simetria na direção horizontal e sua base na direção vertical (região 1 Figura 1b).

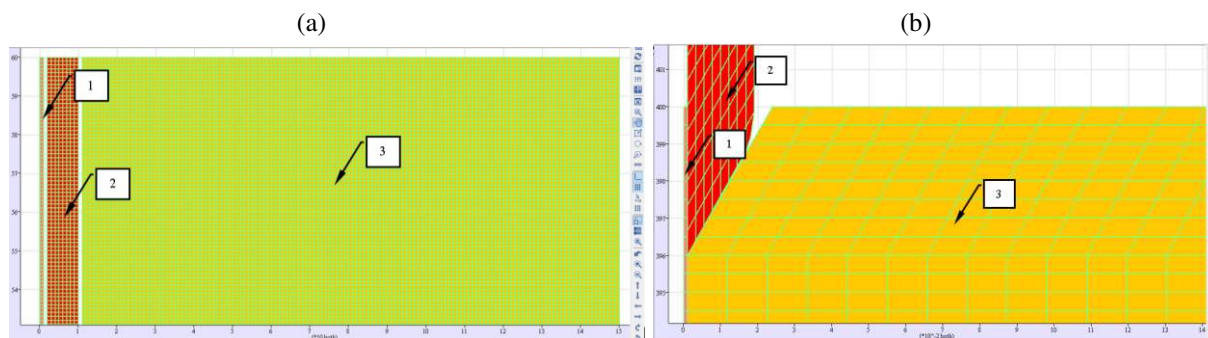


Figura 1. (a) Separação da malha; (b) Faixa de simetria (região 1), cone (região 2) e maciço de solo (região 3).

Em sequência, definiu-se as propriedades associadas a cada faixa da malha cujos valores estão apresentados na Tabela 1. Os parâmetros de deformabilidade e resistência do solo foram definidos considerando-se os parâmetros do solo da região de Bauru, onde Salles (2013) realizou os ensaios de campo. Esta região é constituída, predominantemente, por sedimentos do Grupo Bauru oriundos da Formação Marília que constitui uma primeira camada de 52 m da Formação Marília, seguida de 98 m da Formação Adamantina. A Formação Marília é constituída de arenitos, conglomerados e lamitos (PEIXOTO, 2001). A caracterização dos parâmetros de deformação do cone metálico seguiu o recomendado pela norma da ABNT NBR 8800. Seguidamente, foram geradas as tensões iniciais, para isso: acionou-se a gravidade através do comando *set grav* e estabilizou-se o modelo utilizando o comando *solve*. Após estabilização do modelo, foram obtidas as tensões iniciais do maciço, e os deslocamentos foram zerados nas direções horizontal e vertical, deslocamentos que já aconteceram em tempo geológico anterior. Após a geração das tensões iniciais, iniciou-se a cravação do cone, com o modelo estabilizado, liberou-se na direção vertical todos os nós do cone (região 2 Figura 1b) e todos os nós que compõem a lateral esquerda do maciço de solo (região 3 Figura 1b). Em seguida, realizou-se a criação das interfaces e definição de suas propriedades. As interfaces foram criadas utilizando o modelo elástico perfeitamente plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb, que consiste em um modelo simples que pode aproximar razoavelmente o comportamento da areia, o qual requer parâmetros de deformação como a rigidez normal e cisalhante, além de, parâmetros de resistência como a coesão e o ângulo de atrito (Tabela 1). A resistência ao cisalhamento de Coulomb tem a seguinte relação:

$$FS_{m\acute{a}x} = cL + \tan\phi Fn \quad (3)$$

Onde, $FS_{m\acute{a}x}$, F_n , c , L e ϕ são, respectivamente, a força cisalhante máxima, a força normal, a coesão, o comprimento do contato efetivo entre os nós das interfaces e o ângulo de atrito da superfície da interface. Utilizou-se quatro interfaces distintas: a interface 1 (Figura 2a), entre a ponteira cônica e o solo; a interface 2 (Figura 2b), entre a lateral do cone e o solo, separando bem as regiões que registrariam a resistência de ponta e o atrito lateral. A interface 3 (Figura 2c), entre a faixa que representava o eixo de simetria e a lateral esquerda do maciço de solo; e a interface 4 (Figura 2d), entre a faixa de simetria e o eixo do cone, representado pela lateral esquerda do cone. As interfaces 1 e 2 ocorrem fisicamente e foram criadas para representar os planos de deslizamento que ocorrem entre o solo e o cone durante a cravação. Foi necessário a criação da interface 3, pois ela permite o início da cravação da ponta do cone no solo. A interface 4 não está ocorrendo fisicamente, mas é necessária para simular o problema como axissimétrico. Portanto, nessa interface a tensão cisalhante deve ser nula, a tensão normal é diferente de zero, devido à cravação do cone, e não oferece resistência ao deslizamento, ou seja, resistência ao cisalhamento nula, com coesão e ângulo de atrito igual a zero.

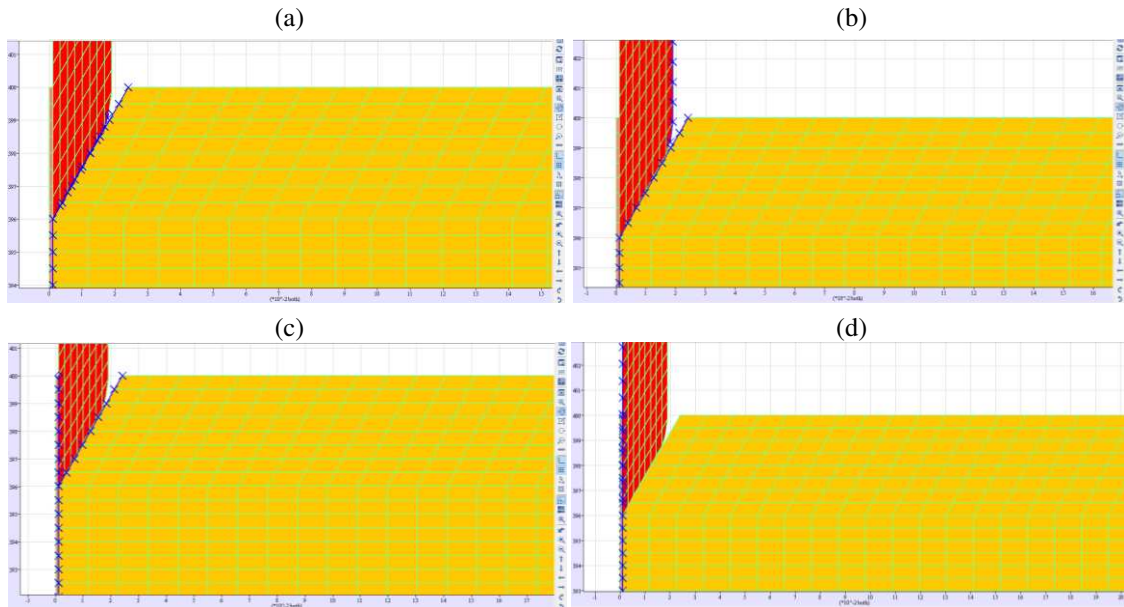


Figura 2. (a) Interface 1; (b) Interface 2; (c) Interface 3; e (d) Interface 4.

As interfaces foram caracterizadas conforme os parâmetros apresentados na Tabela 1. As propriedades de uma interface são convencionalmente obtidas a partir de ensaios de laboratórios em discontinuidades reais. De acordo com Itasca (2011) para simulara uma fratura de um maciço rochoso, pode-se calcular os valores aproximados da rigidez normal k_n a partir de informações sobre a deformabilidade e a estrutura da fratura no maciço rochoso, podendo-se aplicar a seguinte relação:

$$k_n = \frac{E E_r}{s(E_r - E)} \quad (4)$$

Onde k_n , E , E_r e s são, respectivamente, rigidez normal da fratura, o módulo de elasticidade do maciço rochoso, o módulo de elasticidade da rocha intacta e o espaçamento da interface. Uma expressão semelhante pode ser derivada para rigidez cisalhante da interface, k_s :

$$k_s = \frac{G G_r}{s(G_r - G)} \quad (5)$$

Onde k_s , G e G_r são, respectivamente, rigidez cisalhante da fratura, o módulo cisalhante do maciço rochoso, o módulo cisalhante da rocha intacta. Com base nessas equações e considerando contato solo-cone, foram estimadas alguns valores iniciais para as interfaces, apresentadas na Tabela 1. À medida que foram realizadas as simulações, os parâmetros das interfaces (rigidezes, coesão e ângulo de atrito) foram sendo ajustados de modo a se obter os resultados de resistência de ponta e atrito lateral mais próximos dos valores de campo.

Material ou Elemento	Densidade (kg/m ³)	Deformabilidade 1	Deformabilidade 2	Resistência
Solo	1600	E = 2,5 Mpa; ν = 0,3	K = 2 MPa; G = 1 MPa	Coh = 20 kPa Fric = 26°
Cone	2000	E = 200 Gpa; ν = 0,3	K = 200 GPa; G = 75 GPa	-
Faixa de simetria	2000	E = 200 Gpa; ν = 0,3	K = 200 GPa; G = 75 GPa	-

Interface 1	-	-	Ks = 1 MPa; Kn = 10 GPa	Coh = 0,5e2 kPa Fric = 10°
Interface 2	-	-	Ks = 1 MPa; Kn = 10 GPa	Coh = 0,5e2 kPa Fric = 10°
Interface 3	-	-	Ks = 5 MPa; Kn = 10 GPa	Coh = 15kPa Fric = 30°
Interface 4	-	-	Ks = 1e3 Mpa; Kn = 10 GPa	Coh = 0 Fric = 0

Legenda: E – Módulo de elasticidade; ν – Coeficiente de Poisson; G – Módulo Cisalhante; K- Módulo Volumétrico; kn – Rigidez normal; ks – Rigidez Cisalhante.

Tabela 1. Parâmetros adotados para o solo, o cone e a interface na simulação da cravação.

Aplicou-se ao cone uma velocidade vertical descendente igual a 2×10^{-5} m/s (amortecimento de 99% da velocidade real para dissipar qualquer energia cinética do problema), e em seguida, realizada a estabilização com a solicitação de 500 passos, que corresponde 10 mm de cravação do cone (Figura 3a). A partir desse ponto, prosseguiu-se a cravação do cone a cada 1000 passos solicitados ou 20 mm de cravação do cone. A cada 100 mm cravados, foram extraídas a posição da ponta do cone e as respectivas tensões atuantes nas interfaces. Assim, esse procedimento foi realizado até serem cravados os primeiros 2 m do maciço (Figura 3b).

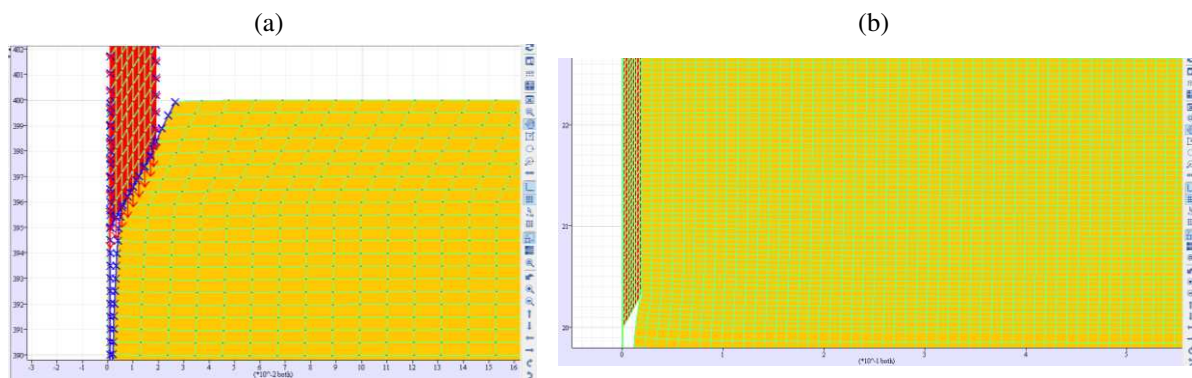


Figura 3. (a) Início da cravação do cone; (b) Cravação do cone aos 2 metros de profundidade.

Os resultados da simulação envolviam a tensão normal (σ) e a cisalhante (τ) registradas no lado A das duas interfaces (interface 1 resistência de ponta e interface 2 resistência lateral), referente ao cone, além do comprimento de influência (L) de cada nó da interface. A partir desses dados, construiu-se uma tabela com os resultados médios de resistência de ponta (Equação 6) e de atrito lateral (Equação 7) verificados durante a simulação.

$$q_c = \frac{\sum \sigma \cdot L}{\sum L} \quad (6)$$

$$f_s = \frac{\sum \tau \cdot L}{\sum L} \quad (7)$$

Onde, q_c , f_s , σ , τ e L são, respectivamente, a resistência de ponta e o atrito lateral, as tensões normal e cisalhante da interface, e o comprimento de influência normal por nó de interface.

Após atingida a profundidade de cravação igual a 2 m, foi iniciada a simulação do ensaio de prova de carga no cone (CLT). Assim como na pesquisa de Salles (2013), foram realizados n incrementos de carga, de tal maneira que cada incremento possuía magnitude de q_c/n . O valor de q_c adotado na simulação foi o correspondente ao resultado de resistência de ponta obtido na simulação numérica aos 2 m de profundidade. O valor de n adotado na simulação do CLT foi o mesmo valor utilizado por Salles (2013), portanto, n foi igual a 10. Entretanto, observou-se a

necessidade de realizar dois incrementos de carga adicionais, a fim de ser obter com mais clareza o momento da ruptura. Portanto, foram realizados doze incrementos de cargas de magnitude igual a $q_c/10$. As cargas foram aplicadas na extremidade superior da haste do cone. Na simulação do CLT foram removidas as velocidades da cravação (zerados os deslocamentos e velocidades internas) e aplicada a carga no topo da haste do cone. Em seguida, estabilizou-se o modelo com o comando *solve*. Antes da aplicação do primeiro incremento de carga iniciou-se em zero todos os deslocamentos. O comando *history* faz com que seja feito um registro das alterações em uma variável à medida que o passo de tempo prossegue. Os gráficos resultantes permitem identificar quando uma condição de estado estacionário é atingida. Assim, ao fim da aplicação de cada incremento foram plotados os gráficos de *history*. O deslocamento vertical da ponta do cone foi solicitado após concluído o tempo de aplicação de cada incremento. Esses procedimentos foram realizados até completar as doze incrementações de carga.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados obtidos numericamente para a resistência de ponta (q_c) e atrito lateral do solo (f_s). A Tabela 3 traz uma aproximação dos resultados de resistência de ponta (q_c) e atrito lateral (f_s) obtidos por Salles (2013) para os primeiros 2 m do CPT realizado no furo 4 (CPT4) da área 2 de seu estudo. Os resultados são aproximados porque foram registrados por Salles (2013) em um diagrama e transformados em tabela pelos autores.

Tabela 2. Resistência de ponta e atrito lateral obtidos numericamente.

Profundidade (m)	Resistência de Ponta (Mpa)	Atrito Lateral (MPa)	Profundidade (m)	Resistência de Ponta (Mpa)	Atrito Lateral (MPa)
0,00	0,0000	0,0000	1,10	4,5940	0,0120
0,10	3,6460	0,0116	1,20	4,4780	0,0122
0,20	4,3300	0,0259	1,30	4,2930	0,0123
0,30	4,0420	0,0169	1,40	12,2100	0,0123
0,40	3,8590	0,0134	1,50	9,8010	0,0125
0,50	3,5290	0,0113	1,60	8,1450	0,0123
0,60	3,1650	0,0104	1,70	7,1290	0,0126
0,70	2,9300	0,0107	1,80	6,3070	0,0128
0,80	3,0780	0,0110	1,90	5,5340	0,0127
0,90	4,5880	0,0114	2,00	4,7340	0,0128
1,00	4,4850	0,0117			

Tabela 3. Resistência de ponta e atrito lateral obtidos em campo. Fonte: (SALLES, 2013 – adaptado).

Profundidade (m)	Resistência de Ponta (Mpa)	Atrito Lateral (MPa)	Profundidade (m)	Resistência de Ponta (Mpa)	Atrito Lateral (MPa)
0,00	0,0000	0,0000	1,10	0,9989	0,0031
0,10	0,4877	0,0042	1,20	1,1175	0,0031
0,20	2,2739	0,0095	1,30	1,1175	0,0031
0,30	2,1653	0,0095	1,40	1,1175	0,0031
0,40	1,2945	0,0095	1,50	1,0079	0,0031
0,50	1,0598	0,0048	1,60	1,0207	0,0031
0,60	1,0796	0,0048	1,70	1,1599	0,0031
0,70	0,9501	0,0027	1,80	1,2948	0,0031

0,80	0,7340	0,0026	1,90	1,3383	0,0031
0,90	0,6296	0,0031	2,00	1,3804	0,0031
1,00	0,7323	0,0031			

Como mencionado, os resultados numéricos da resistência de ponta e atrito lateral foram obtidos através da Equação 6 e Equação 7, respectivamente. As tensões normais utilizadas para a obtenção da resistência de ponta foram obtidas da interface 1 (entre a ponta do cone e o solo), enquanto as tensões cisalhantes utilizadas para cálculo do atrito lateral foram obtidas da interface 2 (entre a luva do cone e o solo). A Figura 4 apresenta os gráficos dos resultados de resistência de ponta (Figura 4a) e atrito lateral (Figura 4b) obtidos numericamente. Os resultados de resistência de ponta apresentaram diversos picos de resistência ao longo da profundidade nas primeiras simulações de cravação. Conforme foi sendo realizada a retroanálise dos parâmetros das interfaces, observou-se uma redução significativa dos picos de resistência, embora, ainda ocorra um pico de tensão elevada na profundidade de 1,4 metros (Figura 4a). Isso mostra que ainda são necessários ajustes nos parâmetros das interfaces.

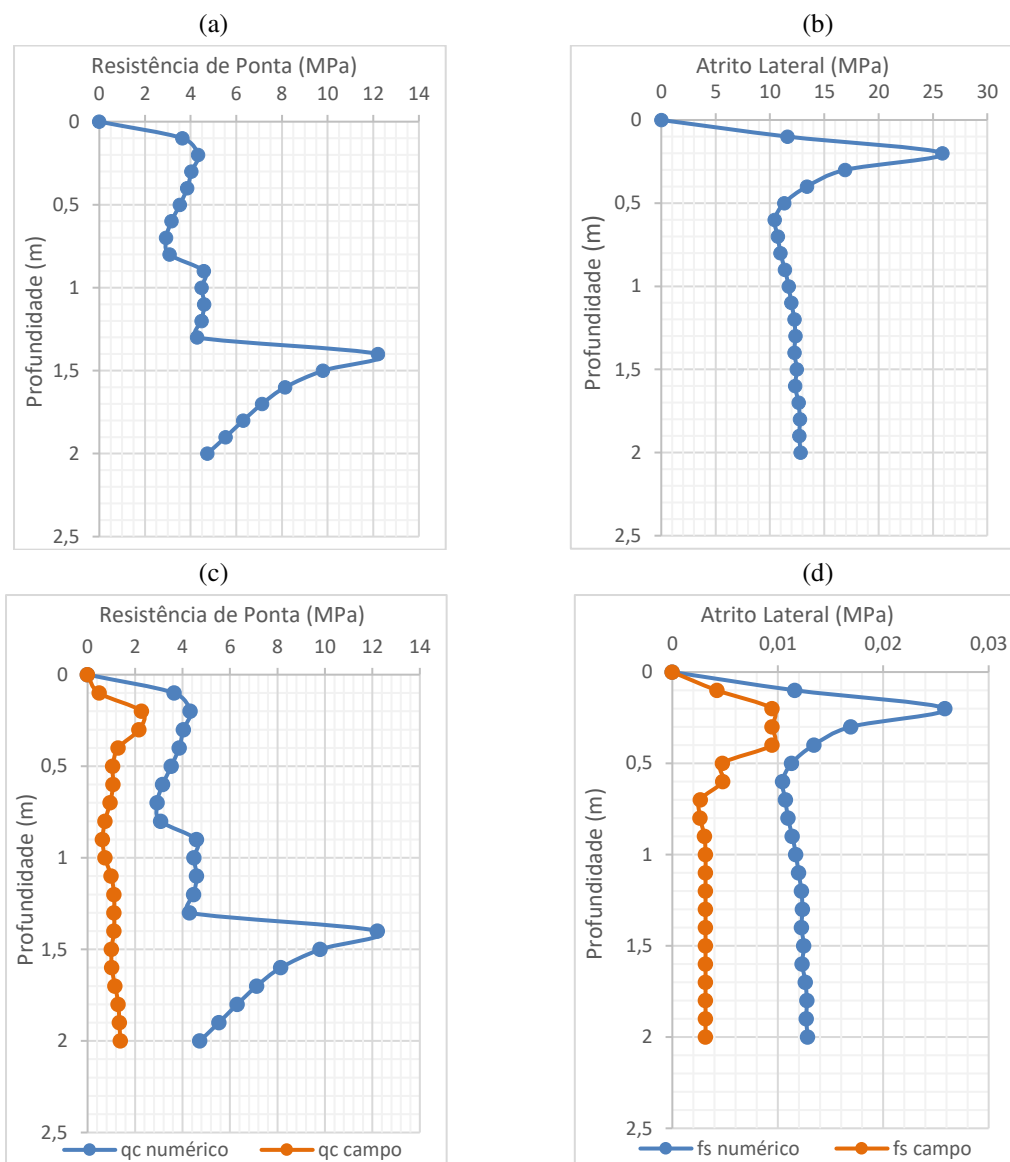


Figura 4. Gráficos: (a) resistência de ponta numérica; (b) atrito lateral numérico; (c) comparação entre resistência de ponta numérica e de campo obtida por Salles (2013); (d) atrito Lateral obtido numericamente e de campo obtida por Salles (2013).

Conforme Figura 4b, o gráfico do atrito lateral segue um perfil de aumento da resistência mais uniforme ao longo da profundidade, apresentando apenas um pico de tensão na profundidade de 20 cm. De maneira geral, observou-se que há um elevação, tanto da resistência de ponta quanto do atrito lateral, com o aumento da profundidade, resultado este coerente com o esperado. As Figuras 4c e 4d trazem gráficos que comparam, respectivamente, a resistência de ponta e o atrito lateral obtidos numericamente com os respectivos resultados de campo obtidos por Salles (2013). Observa-se que em ambos os gráficos os valores numéricos são superiores aos valores de campo. Embora, os resultados numéricos sejam maiores, verifica-se claramente a semelhança entre a tendência de crescimento, com alguns decréscimos também previstos, de ambos os resultados numéricos em comparação com os resultados de campo ao longo da profundidade de cravação.

A prova de carga no cone é feita simultaneamente ao ensaio de cravação de cone, sendo que o ensaio CPT gera resultados sobre o comportamento do solo enquanto o ensaio CLT produz informações sobre os parâmetros de deformabilidade do solo. Conforme o procedimento descrito na metodologia, foi possível realizar a simulação do ensaio CLT aos 2 m de profundidade. Com os deslocamentos obtidos a partir da simulação numérica da prova de carga no cone foi possível gerar um gráfico com valores da carga q_c versus deslocamento, Δh . O deslocamento corresponde a posição da ponta do cone. A Figura 5a apresenta a curva gerada com os resultados da prova de carga numérica enquanto a Figura 5b ilustra a prova de carga realizada por Salles (2013) na região do CPT4.

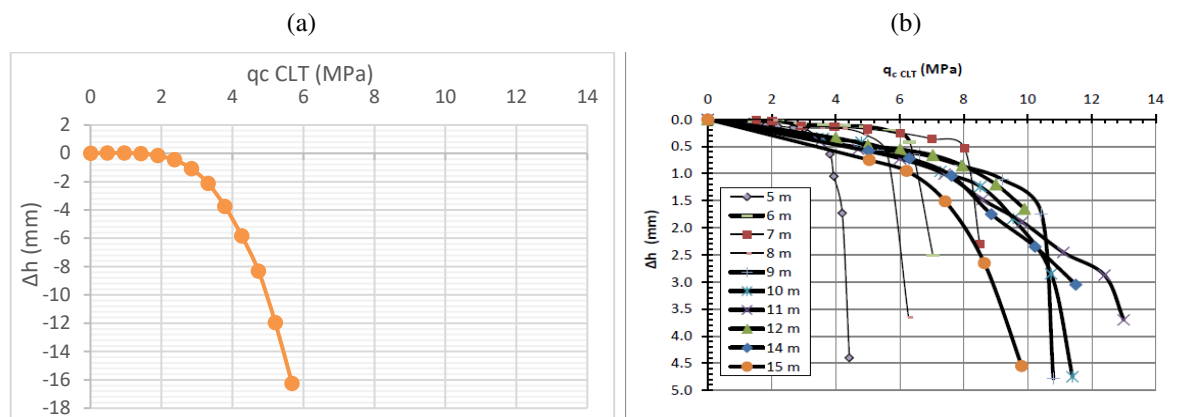


Figura 5. Gráficos: (a) Prova de Carga Numérica; (b) Prova de Carga de Campo CPT4. Fonte: (SALLES, 2013).

Tendo em vista que Salles (2013) não apresentou a curva tensão-deslocamento para a profundidade de 2 m, a comparação foi feita em relação a profundidade mais próxima, aos 5 m. Assim, observa-se que a curva numérica apresenta uma configuração típica de uma curva resultante de ensaio CLT, apresentando um aumento do deslocamento à medida que são realizados os incrementos de carga. Observa-se na curva do CLT de campo que na região plástica, onde já ocorreu a ruptura do solo, a curva tende a ser assintótica com o eixo do deslocamento vertical. Já no gráfico do ensaio numérico, não se percebe claramente que a curva tende a ser assintótica. Portanto, supõe-se que, provavelmente, sejam necessários mais acréscimos de carga para que seja possível observar tal comportamento. No entanto, na curva numérica, assim como na curva de campo, observa-se uma nítida transição para o estado plástico. Assim como na pesquisa de Salles (2013), o conceito de linearidade no trecho inicial da curva não pode ser aplicado porque não se observou um trecho linear definido. Portanto, a simulação da prova de carga apresentou um resultado satisfatório e coerente com o esperado.

4 CONCLUSÕES

O programa FLAC foi capaz de simular a cravação do cone no solo utilizando o modelo axissimétrico, velocidade constante e com o uso de elementos de interface, apresentando-se, portanto, como uma metodologia coerente para obtenção de parâmetros geotécnicos do perfil do solo obtidos por simulação numérica de ensaios CPT em solos homogêneos. O modelo exigiu diversos ajustes, ao longo do desenvolvimento da metodologia, até se alcançar a geometria empregada, que visou representar o comportamento do solo durante a cravação o mais próximo possível do comportamento real, de campo. Comparando-se os resultados de campo obtidos por Salle (2013) com os valores obtidos numericamente, observou-se claramente a mesma tendência de crescimento e decréscimo da resistência de ponta (q_c) e do atrito lateral (f_s) ao longo da profundidade de cravação. Também como, foi possível realizar a simulação numérica da prova de carga no cone, obtendo-se uma curva tensão-deslocamento com a mesma forma das curvas resultantes de ensaios de campo, mostrando que o resultado foi satisfatório.

Dessa forma, foi possível obter, através da simulação do ensaio de campo, os parâmetros geotécnicos de deformabilidade e resistência que geraram os valores de resistência de ponta e atrito lateral que seguem a mesma tendência dos resultados de campo, assim como, a simulação do ensaio CLT. Logo, uma segunda metodologia numérica de cravação do CPT foi proposta, na qual a cravação do CPT é realizada com o uso do modelo axissimétrico, somado ao uso de interfaces, e que não depende do operador para ser acionada e que apresentou o desempenho esperado na simulação numérica.

Os autores agradecem à Escola de Engenharia Civil da UFG pelo apoio necessário ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Baroth, J.; Malecot, Y. Probabilistic analysis of the inverse analysis of an excavation problem. *Computers and Geotechnics*, v. 37, n. 3, p. 391-398, 2010.
- Cândido, E. S. Análise inversa do ensaio pressiométrico utilizando o modelo hiperbólico. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, p. 177f (2016).
- Honorato C. G., Vargas C. A. L., Retroanálise Numérica de Ensaio de Penetração de Cone (CPT) com aplicação de velocidade constante, *CONPEEX 2021*, UFG, 2021.
- Itasca. "Fast Lagrangian Analysis of Continua FLAC: User's Guide, Online Manual FLAC version 7". *Itasca Consulting Group Inc.*, 2011.
- Peixoto, A.S.P. "Estudo do ensaio SPT-T e sua aplicação na prática de engenharia de fundações". Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2001.
- Reiffsteck, P. *et al.* Measurements of soil deformation by means of cone penetrometer. *Soils and Foundations*, v.49, n.3, p.397-408, 2009.
- Robertson, P. K., Cabal, K. L. Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. Ed. 5., Gregg Drilling & Testing, Inc., California, 2012.
- Salles, J.C. "Determinação de módulos de deformabilidade através de provas de carga no cone elétrico". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2013.
- Schnaid, F., Odebretch, E. "Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações". São Paulo: *Oficina de Textos*, 2012.