

## SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO PRESSIOMÉTRICO EXECUTADO EM CAMPO

### NUMERICAL SIMULATION OF THE PRESSIOMETRIC TEST PERFORMED IN THE FIELD

Igor S. Cena<sup>a,b</sup>, Carlos A. Lauro<sup>b</sup>, Lucas P. da Silva<sup>b</sup> e Renato R. Angelim<sup>a</sup>

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

<sup>b</sup>*igorscena@discente.ufg.br* <sup>c</sup>*carloslauro@ufg.br* <sup>d</sup>*pinheiropinheiro@discente.ufg.br*

<sup>e</sup>*angelim@ufg.br*

**Palavras-chave:** Retroanálise numérica, ensaio PMT, Método das diferenças finitas, Ensaios de campo.

**Resumo.** O ensaio pressiométrico (PMT) fornece dados de tensão e deformação referentes a aplicação de cargas radiais nas paredes de uma cavidade cilíndrica. O PMT possibilita a estimativa de parâmetros de deformabilidade e resistência, informações fundamentais para elaboração de projetos geotécnicos. Sua utilização enfrenta barreiras em virtude da dificuldade de interpretação e heterogeneidade do material ensaiado. O objetivo deste trabalho é reproduzir numericamente o ensaio pressiométrico e obter parâmetros de deformabilidade e resistência do solo. A retroanálise foi realizada com o auxílio do software FLAC-2D utilizando os resultados do ensaio de campo realizado por Cândido (2016). Para os parâmetros de deformabilidade a variação numérica e de laboratório foi próxima de 30%, e nos parâmetros de resistência a variação foi menor do que 15%. O uso de ferramentas numéricas para simular o ensaio PMT se apresentou como um mecanismo promissor na determinação de parâmetros de deformabilidade e resistência do solo.

**Keywords:** Back analysis, PMT test, Finite difference method, field tests.

**Abstract.** The pressureometric test (PMT) provides stress and strain data related to the application of radial loads on the walls of a cylindrical cavity. The PMT allows the estimation of deformability and strength parameters, fundamental information for the elaboration of geotechnical projects. Its use faces barriers due to the difficulty of interpretation and the heterogeneity of the tested material. The objective of this work is to numerically reproduce the pressureometric test and obtain parameters of deformability and soil strength. The retro-analysis was carried out with the aid of the FLAC-2D software using the results of the field test carried out by Cândido (2016). For the deformability parameters, the numerical and laboratory variation was close to 30%, and for the strength parameters the variation was less than 15%. The use of numerical tools to simulate the PMT test has been shown to be a promising mechanism for determining soil deformability and strength parameters.

## 1 INTRODUÇÃO

O PMT (*PressureMeter Test*) é um ensaio geotécnico de campo que consiste na aplicação de pressão radial nas paredes de uma cavidade cilíndrica escavada no solo. Para a interpretação deste ensaio são necessárias formulações analíticas que são limitadas para meios homogêneos e isotrópicos, situação pouco frequente em campo. No entanto, o uso de ferramentas numéricas para simular ensaios de campo como PMT se apresentam como uma solução promissora para estimativa de parâmetros representativos de deformabilidade e resistência do solo com a profundidade.

O objetivo geral deste trabalho é retroanalisar numericamente os resultados do ensaio pressiométrico realizado por Cândido (2016) para obter parâmetros representativos do solo em análise.

## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

### 2.1 O ensaio pressiométrico em Pré-Furo (PMT)

O ensaio pressiométrico mais conhecido é o de pré-furo ou também chamado de pressiômetro de Ménard, onde um furo de sondagem deve ser utilizado para introdução da sonda e aplicação de pressão radial nas paredes da cavidade. Este modelo de pressiômetro é constituído por três células de expansão, onde as duas células das extremidades forçam a célula central a se expandir somente na direção radial.

O ensaio é realizado posicionando a sonda no pré-furo até a profundidade de interesse aplicando-se incrementos de pressão. Em cada incremento são feitas leituras até a estabilização das deformações radiais. O resultado do ensaio PMT é a curva pressão *versus* volume do líquido injetado (Figura 1). A curva obtida no ensaio pressiométrico necessita ser corrigida após obter as curvas de calibração da sonda. Essa calibração pode ser realizada em tubo rígido e ao ar livre, sendo que as pressões obtidas durante o ensaio devem ser descontadas por aquelas obtidas na calibração. Caso o ensaio tenha sido bem executado, o resultado da correção é uma curva pressiométrica com três trechos bem definidos (Figura 1) (Imamuara, 2017).

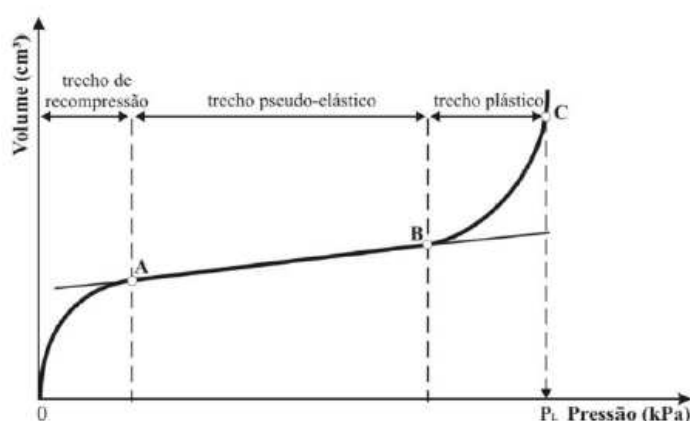


Figura 1 - Curva pressiométrica – Fonte: Imamuara (2017)

O trecho inicial da curva é denominado trecho de recompressão que corresponde ao início do ensaio. Neste trecho a sonda se expande até entrar em contato com as paredes da escavação e reestabelece as condições de repouso. O trecho pseudo-elástico representa o comportamento

elástico do solo, onde o solo se deforma proporcionalmente a pressão aplicada pela sonda. Já o trecho plástico é quando o solo se deforma de maneira considerável e as deformações deixam de ser proporcionais as pressões aplicadas (as deformações radiais são obtidas da variação volumétrica medida em campo).

## 2.2 Teoria da expansão da cavidade cilíndrica

A teoria da expansão da cavidade cilíndrica diz respeito a expansão de uma cavidade com comprimento infinito em um meio isotrópico e homogêneo. Em um modelo axissimétrico, com solo homogêneo e isotrópico o problema pode ser tratado como unidimensional, visto que a análise em uma direção pode ser realizada ao redor de todo o furo. Silva (2016) ressalta que as análises geralmente são realizadas com auxílio de coordenadas cilíndricas  $(r, \varphi)$  de forma a simplificar as equações.

A relação direta entre a teoria da expansão da cavidade cilíndrica e o ensaio pressiométrico permite ajustar as curvas pressão *versus* volume injetado com os parâmetros geotécnicos. No início do ensaio pressiométrico o solo se comporta de maneira elástica. A pressão crescente da cavidade resulta em deformações sucessivas da cavidade fazendo com que o solo exiba variações volumétricas (Schnaid e Odebrecht, 2000). Com a expansão e retração do pressiômetro durante o ensaio pode-se determinar as regiões onde o solo responde elasticamente e plasticamente. Esta teoria está apresentada na Figura 2 onde a sonda possui raio  $r_0$  e se expandirá até o raio  $r$ , aplicando pressões na parede da cavidade.

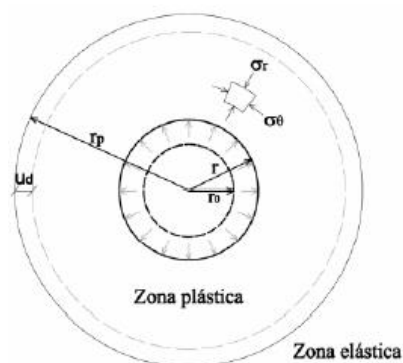


Figura 2 - Ilustração da teoria da expansão da cavidade cilíndrica - Fonte: (Silva, 2016)

## 2.3 Método das diferenças finitas – FLAC 2D

O FLAC (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*) é um programa bidimensional baseado no método de diferenças finitas que simula o comportamento de materiais contínuos podendo resolver problemas complexos de engenharia. Os materiais são representados por elementos formando uma malha computacional de diferenças finitas que podem ser ajustados de forma a modelar a estrutura de interesse, sendo possível utilizar diversos modelos constitutivo do solo. Além disso, o programa analisa condições bidimensionais de deformação plana, tensão plana e axissimétrica. Esta última configuração representa o ensaio PMT.

O programa se baseia em um esquema de cálculo Lagrangiano, adequado para modelar problemas que envolvem grandes deformações e colapso de materiais (ITASTA, 2011). Com essa formulação os deslocamentos são acrescentados as coordenadas da malha que se deforma seguindo o comportamento de cada material.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Dados do ensaio pressiométrico de estudo

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados resultados de um ensaio pressiométrico realizado por Cândido (2016) na área externa do Laboratório de Mecânica dos Resíduos da Universidade Federal de Viçosa, na cidade de Viçosa em Minas Gerais, Brasil. Em seu trabalho o autor realiza 5 ensaios pressiométricos e um furo de sondagem para a caracterização do solo local. Todos os ensaios foram realizados a uma profundidade de 1,5m a partir do nível do terreno. A Figura 3 mostra o local de execução dos ensaios PMT e SPT.

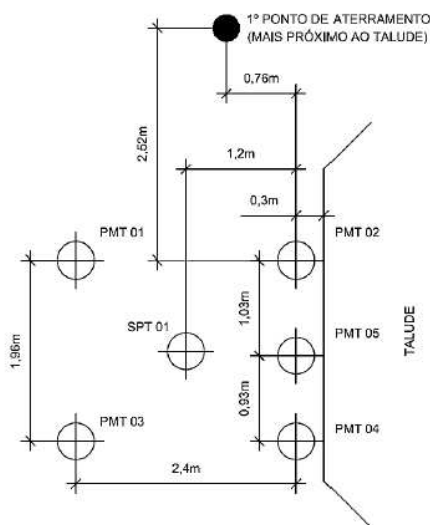


Figura 3 - Localização dos ensaios realizados in situ. Fonte: (Cândido, 2016)

A sonda utilizada no ensaio possui diâmetro de 63mm. A célula central da sonda pressiométrica utilizada no ensaio possui 20,5cm. As células das extremidades possuem 19,5cm. Foram aplicados 17 incrementos de pressão em cada furo. No ensaio retroanalísado (PMT01) a pressão mínima aplicada na parede da cavidade foi de 14,7 kPa e a pressão máxima de 384,5 kPa. Os valores de pressão e deslocamento radial para os 5 ensaios executados são apresentados na Figura 4.

PMT01		PMT02		PMT03		PMT04		PMT05	
$\Delta P$ (kPa)	$\Delta_r$ (cm)	$\Delta P$ (kPa)	$\Delta_r$ (cm)	$\Delta P$ (kPa)	$\Delta_r$ (cm)	$\Delta P$ (kPa)	$\Delta_r$ (cm)	$\Delta P$ (kPa)	$\Delta_r$ (cm)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14,712	0,007	0,595	0,007	4,212	0,002	2,512	0,002	11,480	0,005
62,026	0,030	7,072	0,036	51,257	0,027	49,530	0,027	57,987	0,034
109,053	0,055	12,473	0,074	98,824	0,048	95,204	0,063	103,928	0,068
155,259	0,086	15,269	0,133	145,030	0,079	137,481	0,126	146,896	0,126
199,053	0,137	12,146	0,245	189,627	0,124	174,668	0,235	183,799	0,235
240,877	0,205	26,186	0,398	230,636	0,198	204,488	0,436	217,079	0,386
277,391	0,321	29,109	0,620	267,583	0,311	238,396	0,671	247,817	0,613
314,245	0,451	22,774	0,911	303,558	0,448	268,879	0,980	283,057	0,876
348,226	0,661			338,079	0,651				
384,454	0,912			375,131	0,888				

Figura 4 - Cargas e deslocamentos ensaio pressiométrico - Fonte: (Cândido, 2016)

## 3.2 Retroanálise numérica do ensaio PMT

### 3.2.1 Tamanho da malha

Para a retroanálise foi utilizado um modelo axissimétrico, em que a malha computacional é espelhada em  $360^\circ$  em torno de seu eixo de simetria ( $x=0$ ) como pode ser observado na [Figura 5](#). A malha desenvolvida conta com 30 elementos dispostos na vertical e na horizontal, resultando em um total de 900 elementos.

As dimensões e quantidade de elementos da malha foram escolhidas de modo a obter parâmetros representativos da região em estudo e minimizar os efeitos das condições de contorno na região do ensaio. A profundidade da escavação e aplicação das cargas pressiométricas foram as mesmas utilizadas no ensaio de campo.

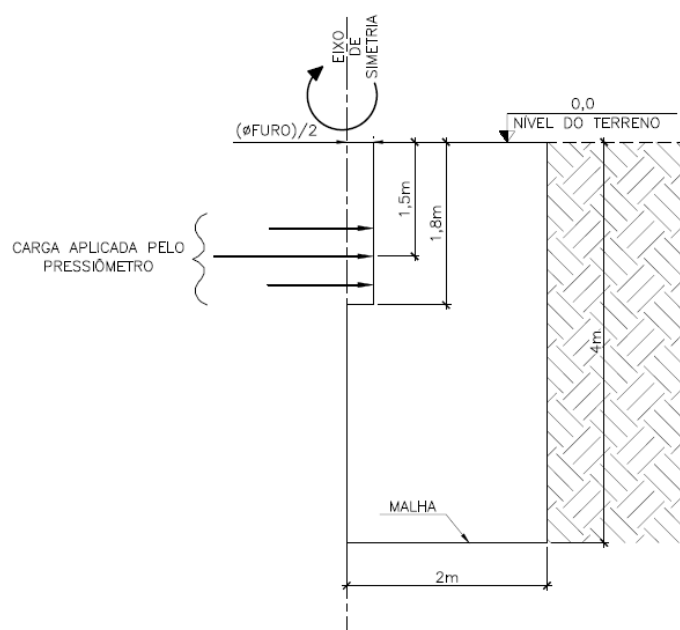


Figura 5 – Croqui do domínio da malha e aplicação de pressão na parede da cavidade – Fonte: Autor

### 3.2.2 Condições de contorno

A malha foi fixada em suas laterais e em sua base, conforme indica a [Figura 6](#). Nas laterais a malha será fixada na direção  $x$  para restringir a região de análise. A lateral não foi fixada na direção  $y$  de modo a permitir o adensamento uniforme do solo com a aplicação da gravidade. A base da malha foi fixada na direção  $y$  para restringir a região de análise do problema.

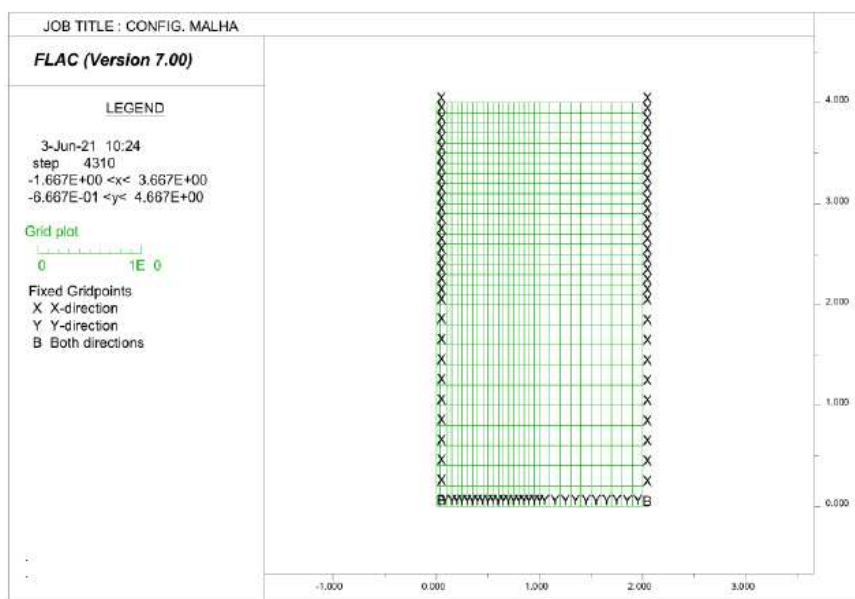


Figura 6 - Malha de diferenças finitas e condições de contorno – Fonte: Autor

### 3.2.3 Escavação do furo de sondagem e aplicação de pressão pelo PMT

As figuras a seguir (Figuras 7, 8 e 9) mostram a realização do furo e aplicação das cargas pressiométricas.

O modelo para o solo utilizado foi o elástico perfeitamente plástico com critério de ruptura de Mohr Coulomb. Inicialmente a gravidade foi ativada e os deslocamentos estabilizados, gerando tensões e deformações. As tensões geradas correspondem as tensões in situ (antes do furo) e os deslocamento foram zerados pois já ocorreram durante a formação do solo (Figura 7).

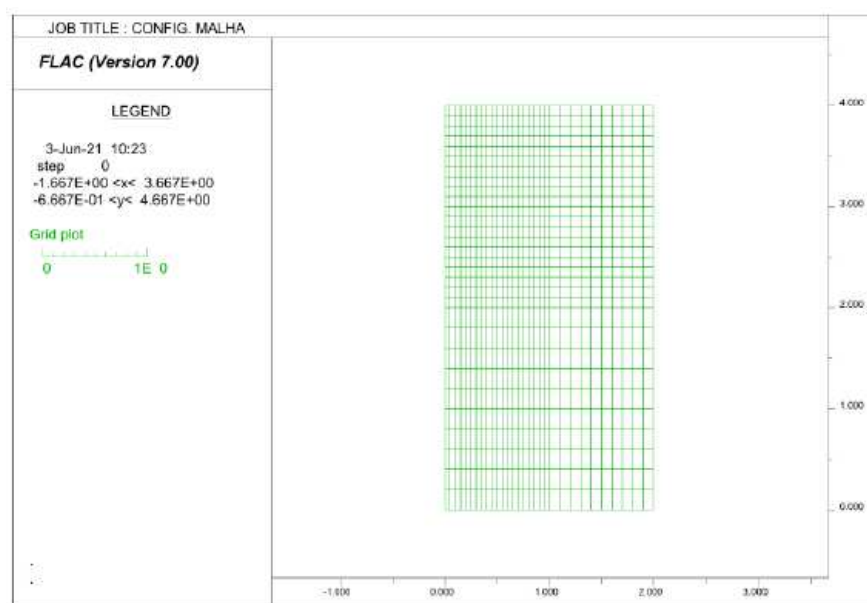


Figura 7 - Geração da malha e inserção dos parâmetros - Fonte: Autor

A seguir foi realizada a escavação do furo de sondagem com 7cm de diâmetro até a

profundidade de 1,8m com o modelo nulo dos elementos correspondentes e estabilizada a malha, como mostra a [Figura 8](#).

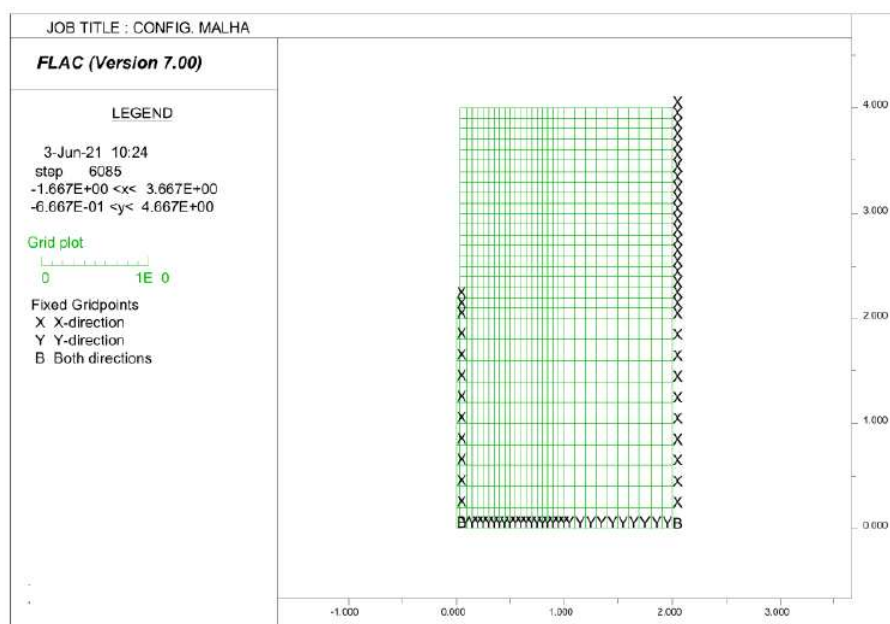


Figura 8 - Escavação do furo na malha - Fonte: Autor

Os deslocamentos gerados na escavação do furo foram monitorados e os resultados foram posteriormente tratados para a obtenção da deformação gerada pela carga aplicada.

A seguir foram aplicados os incrementos de pressão na mesma profundidade do ensaio realizado em campo, conforme a [Figura 9](#).

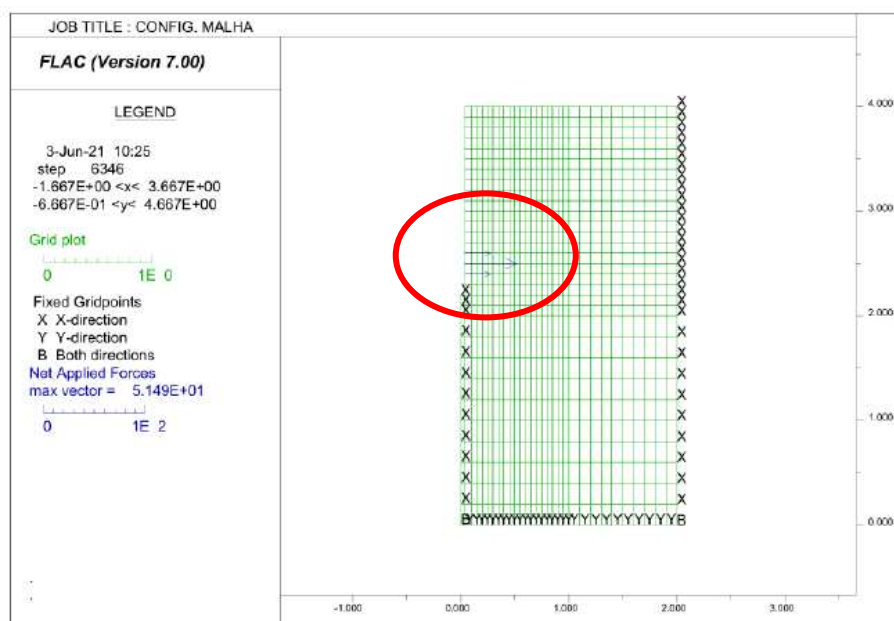


Figura 9 - Aplicação de pressão na malha - Fonte: Autor

Os deslocamentos nas regiões solicitadas foram obtidos e os resultados analisados. Este procedimento foi repetido para as demais cargas do ensaio.



### 3.2.4 Retroanálise dos parâmetros de deformabilidade e resistência

A retroanálise numérica foi dividida em duas etapas. A primeira etapa da retroanálise teve como objetivo calibrar os parâmetros de deformabilidade (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson). Foi adotado um valor inicial para módulo de elasticidade e um valor fixo para o coeficiente de Poisson de 0.3, escolhido de acordo com o tipo de solo encontrado na etapa de sondagem e com os ensaios laboratoriais executados por Cândido (2016). Após a inserção dos primeiros dados o as cargas foram aplicadas e as deformações geradas foram observadas. Nesta etapa, apenas as deformações geradas pelas pressões iniciais do ensaio que envolvem o trecho inicial linear da curva (comportamento elástico) foram analisadas e comparadas com os resultados do ensaio PMT executado *in situ*. A partir daí foi verificada a necessidade do aumento ou diminuição do módulo de elasticidade nas próximas interações para que as deformações geradas pelo programa se aproximem das deformações reais encontradas no ensaio PMT. As diferenças entre essas deformações foram observadas para as diversas cargas do trecho linear até a obtenção de valores de deformabilidade representativos do ensaio.

A segunda etapa da retroanálise teve como finalidade a calibração dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito). Os valores iniciais desses parâmetros foram estimados de acordo com os resultados observados em laboratório. Uma série de combinações entre os valores de ângulo de atrito e coesão foram realizadas visando a melhor aproximação dos resultados com as deformações plásticas obtidas em campo, mantendo-se fixos os parâmetros de deformabilidade já encontrados na etapa anterior. Nesta etapa, apenas as deformações plásticas geradas por pressões fora do trecho elástico foram analisadas. O processo foi encerrado seguindo os mesmos critérios da metodologia apresentada anteriormente. Ao final, os parâmetros obtidos de coesão, ângulo de atrito, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson foram comparados com aqueles obtidos em laboratório para verificar a concordância entre os resultados.

## 4 RESULTADOS

Para a primeira retroanálise foram determinados os deslocamentos das quatro primeiras cargas que formam o trecho elástico da curva pressiométrica. Três módulos de elasticidade (7,5 Mpa, 10 Mpa, 12,5 Mpa) foram testados com o intuito aproximar o trecho linear da curva gerada pelos deslocamentos oriundos do FLAC com o trecho linear da curva obtida no ensaio. O módulo de elasticidade que fez a curva se aproximar mais da curva do ensaio possui valor de 7,5 Mpa. O resultado desta interação é mostrado na [Figura 10](#).



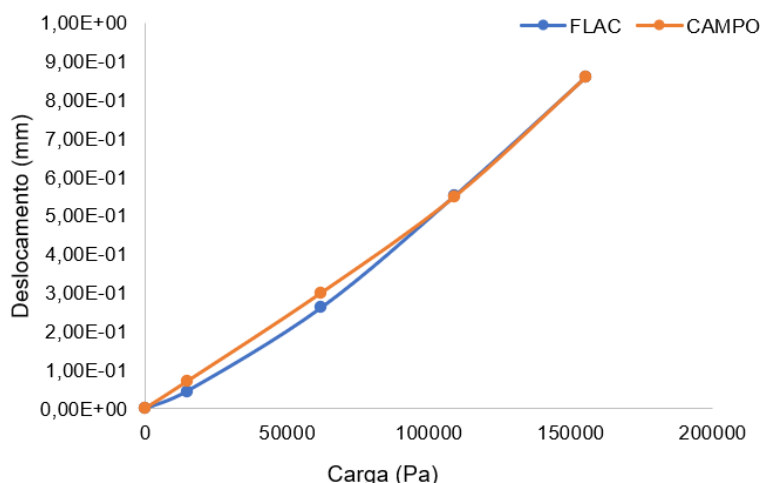


Figura 10 - Curva pressiométrica Carga versus deslocamento para o trecho elástico - Fonte: Autor

Os valores de coesão utilizados variaram de 5 até 28 kPa com incrementos de 2 kPa e foram combinados com os valores de ângulo de atrito que variaram de 20 até 40° com incrementos de 2°. Os valores mínimos de coesão e ângulo de atrito foram determinados a partir do valor dos valores obtidos por Cândido (2016). Já os valores máximos desses parâmetros foram determinados ao observar uma divergência crescente da curva gerada pelos deslocamentos do FLAC com aqueles obtidos em campo. A interação que mais se aproximou dos resultados obtidos em campo possui coesão de 20 kPa e ângulo de atrito de 28°. A curva obtida é mostrada na Figura 11.

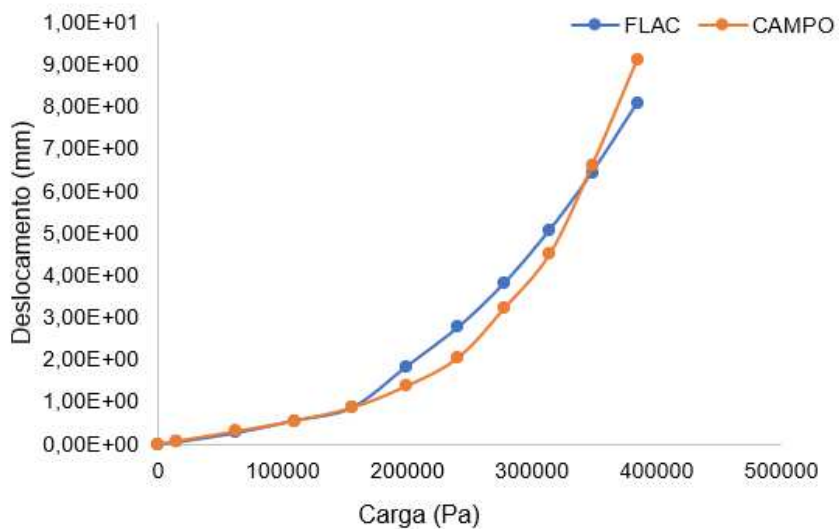


Figura 11 - Curva pressiométrica (trecho elástico + trecho plástico) – Fonte: Autor

## 5 CONCLUSÕES

A ferramenta numérica utilizada (FLAC 2D) foi capaz de retroanalisar o ensaio de campo (PMT) um estado axissimétrico.

Por meio deste mecanismo foi possível simular o ensaio pressiométrico obtendo parâmetros representativos de um volume maior de solo, sendo inclusive mais representativo que os ensaios de laboratório, onde a amostra é retirada de um único ponto.

O valor do módulo de elasticidade obtido na interação revelou-se 30% maior do que aquele obtido em laboratório, ao contrário do valor de ângulo de atrito que apresentou uma redução de 14%. Já a coesão ficou 10% menor do resultado laboratorial.

A retroanálise numérica apresentada pode ser utilizada como uma ferramenta auxiliar na interpretação do ensaio pressiométrico e na obtenção de parâmetros de deformabilidade e resistência, fundamentais para aplicação em obras geotécnicas.

## REFERÊNCIAS

- CÂNDIDO, E. S. *Análise inversa do ensaio pressiométrico utilizando o modelo hiperbólico*. 2016. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.
- IMAMURA, F. B. T. *Utilização do pressiômetro de Ménard na avaliação da capacidade de carga de estacas em solo tropical*. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas – SP, 2017.
- ITASCA CONSULTING GROUP INC. *FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua*. Minneapolis, Minnesota – Estados Unidos, 2011.
- SILVA, P. C. *Avaliação do efeito “set-up” em estacas cravadas em solos argilosos através da teoria da expansão da cavidade cilíndrica*. 2016. 214 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2016.
- SCHINAID, F; ODEBRECH, E. *Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. 2.ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012. 254 p.