XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/39

Capacidade de Carga do Expander Body Obtida pela Modelagem do Ensaio Dinâmico de Energia Crescente

Sérgio C. Paraíso
GEOMEC, Belo Horizonte, Brasil, sergioparaiso@geomec.com.br

Carlos Medeiros Silva
EMBRE ENGENHARIA, Brasília, Brasil, carlos@embre.com.br

RESUMO: O Expander Body, corpo metálico expansivo, quando instalado sobre horizonte de solos de elevada capacidade de carga geomecânica, confere à estaca expressivo ganho de capacidade de carga na ponta. A tecnologia utiliza um corpo metálico expansivo, que é instalado na ponta da estaca e inflado, por meio de injeção de nata de cimento sob alta pressão, produzindo bulbos de até 1200 mm de diâmetro. São apresentados os resultados de uma prova de carga estática e de um ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente realizados em uma estaca escavada de pequeno diâmetro, 40cm, e comprimento de 14,0 m. Na ponta da estaca foi instalado e inflado um Expander Body de 710 mm de diâmetro e 800 mm de altura. Os ensaios foram realizados no polo industrial farmacêutico em Montes Claros/MG, a estaca foi assente no saprólito oriundo da intemperização da rocha calcária do Grupo Bambuí. Inicialmente, a estaca projetada para 1200 kN, foi ensaiada por meio de uma prova de carga estática lenta até 2450 kN e após 35 dias reensaiada através de ensaio dinâmico de energia crescente até 3450 kN os quais não apresentaram indicio de ruptura geotécnica. O ensaio dinâmico foi modelado objetivando privilegiar a capacidade de carga de ponta do Expander Body, permitindo determinar a curva envoltória da resistencia de ponta *versus* deslocamento da ponta e a análise do ponto de inflexão da fase elástica para fase plástica do assentamento da ponta com base no estudo de rigidez de Decóurt (2008). Adicionalmente procura-se determinar a contribuição da resistência da envoltória unitária ativada no ensaio dinâmico por atrito lateral do Expander Body. Ressalta-se que o artigo a ser apresentado tem como objetivo principal avaliar o desempenho de capacidade de carga geotécnica do Expander Body na sua especificidade de expansão de cavidade de ponta.

PALAVRAS-CHAVE: Expander Body, Desempenho, Prova de carga, Ensaio Dinâmico, Capacidade de Carga.

ABSTRACT: The Expander Body, when installed on high-capacity geomechanical soil horizons, provides a significant increase in the load-bearing capacity at the pile tip. The technology employs an expandable metallic body, installed at the pile tip and inflated through high-pressure cement grout injection, producing bulbs up to 1200 mm in diameter. This document presents the results of a static load test and a dynamic energy loading test performed on a small diameter, 40cm, 14.0m long bored pile. At the pile tip, 710 mm diameter and 800 mm height Expander Body was installed and inflated. The tests were conducted at a pharmaceutical industrial site in Montes Claros/MG, with the pile founded on weathered limestone from the Bambuí Group. Initially designed for 1200 kN, the pile was subjected to a slow static load test up to 2450 kN and re-tested after 35 days using a dynamic energy increasing test up to 3450 kN, with no signs of geotechnical failure observed. The dynamic test was modeled to emphasize the load capacity of the Expander Body tip, allowing the determination of the envelope curve of tip resistance versus displacement and analysis of the inflection point from elastic to plastic settlement phases, based on Décourt et al (2008) stiffness study. Additionally, the contribution of the unit envelope resistance activated during the dynamic test through lateral friction of the Expander Body is evaluated. It is noteworthy that the primary objective of this presentation is to demonstrate the geotechnical load capacity performance of the Expander Body, specifically its cavity expansion at the tip.

KEYWORDS: Expander Body, Performance, Load Test, Dynamic Test, Load Capacity.

1 INTRODUÇÃO

O Expander Body, dispositivo metálico de expansão de cavidade, é uma técnica inovadora e pode ser aplicada na base de estacas escavadas ou cravadas, Terceros & Massarsch (2014). A tecnologia tem sido amplamente utilizada no Brasil, tendo sido instalados mais de 5000 unidades em projetos residenciais, comerciais e industriais. Segundo Fellenius et al.(2018), outros países, como Suécia, Noruega, Alemanha, Japão, Paraguai, Bolívia, Peru, Estados Unidos, Coreia do Sul também adotaram a tecnologia como solução eficaz e prática para garantir a capacidade de ponta das estacas.

O sistema de expansão do Expander Body consiste em um tubo de aço dobrado que é inflado por um processo inicial de injeção de nata cimento, sendo a nata de cimento injetada por meio de manqueiras hidráulicas, Silva et al. (2022). Diversos modelos permitem a expansão do Expander Body com diâmetro de 40cm à 120cm e comprimentos de 100 cm à 200 cm. A pressão e o volume de argamassa são monitorados continuamente durante a expansão do Expander Body, gerando uma relação entre pressão de injeção e volume, similar a curva obtida com o pressiômetro de Ménard, Monteiro et al. (2021).

Pretende-se neste artigo apresentar as interpretações de desempenho geotécnico de uma estaca escavada à céu aberto, em solo não saturado, com diâmetro de 40 cm e 14 metros de profundidade. Na ponta da estaca foi instalado um dispositivo de expansão de cavidade, Expander Body, injetado sob pressão de calda de cimento de 45 bar, volumetria de 325 litros. A expansão final foi estimadas em 82 cm de altura , diâmetro médio de 0,71 m e leve achatamento nas extremidades superior e inferior.

A estaca experimentou Prova de Carga Estatica (PCE) para carga de até 2450 KN em acordo com a ABNT NBR 1231 (2021), e após 35 dias foi submetida a Ensaio de Carregamento Dinâmico de Energia Crescente (ECD) apresentando carga mobilizada de até 3450 KN, conforme Figura 1, caracterizando as curvas de resistência ativadas da PCE e da envoltoria global CAPWAP do Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD), CAPWAP MANUAL (2014). A Figura 1 apresenta as curvas dos ensaios dinâmico e estático e as geometrias do Expander Body assumidas entre os estágios inicial e final de injeção de nata de cimento.

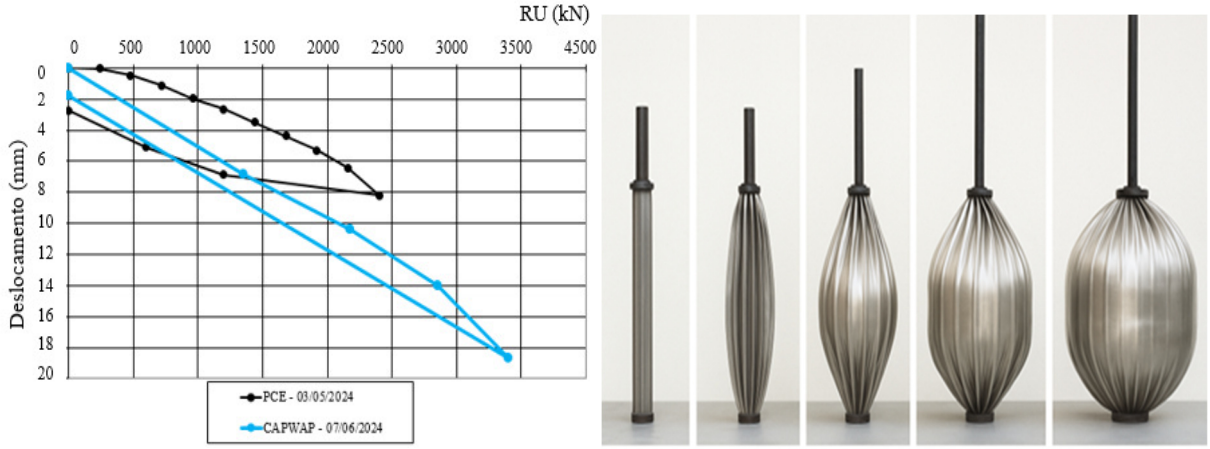


Figura 1 – (a) Curvas Resistência Última (RU) *versus* deslocamento: Prova de carga estatica (cor preta); Ensaio de Carregamento Dinamico (cor Azul); (b) Expander Body e suas geometrias

As tratativas de interpretação do desempenho geotécnico observam fundamentalmente caracterizar a geometria que mais se aproxima do corpo e peculiaridades pós execução do Expander Body, analisar a curva envoltória da resistência estática de ponta *versus* deslocamento da ponta, equivalente do ensaio ECD de energia crescente, com base no estudo de rigidez de Decourt (2008). O objetivo é estabelecer a carga última de ponta com discretização das parcelas de ponta e de atrito ativados, ou seja, verificar a fase de inflexão elástica para a fase plástica do assentamento de ponta do Expander Body. Esta curva envoltória é de origem das modelagens e análises CAPWAP realizadas para cada golpe de energia crescente na conformidade das Figuras 2 e 3.

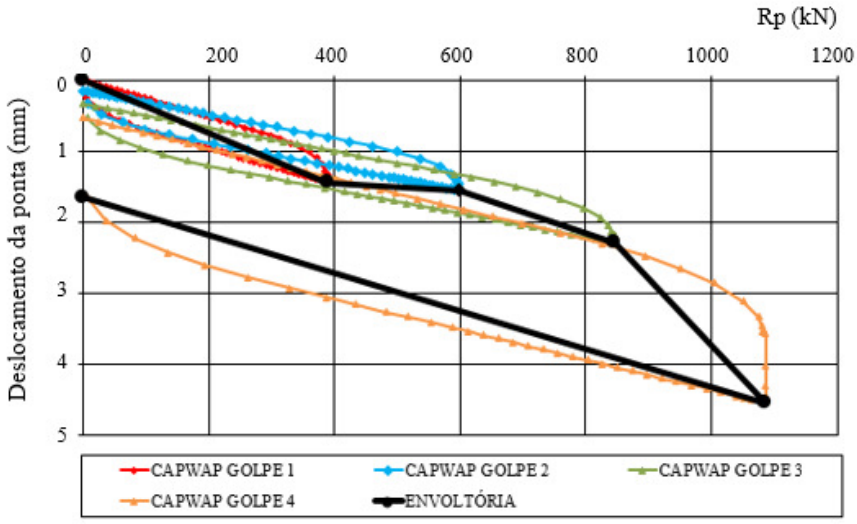


Figura 2 – Curva Envoltória das Resistências de Ponta Ativada (Rp) *versus* Deslocamento da Ponta.

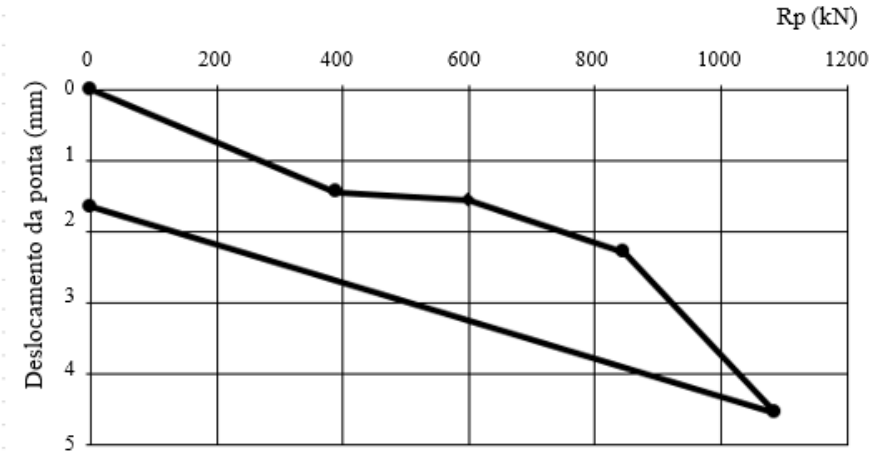


Figura 3 – Curva Envoltória das Resistências de Ponta Ativadas (Rp) *versus* Deslocamento de ponta

Nas Figuras 4 e 5 apresentam-se os sensores da instrumentação, o sistema de impacto e o dispositivo de aquisição de dados utilizados durante o Ensaio de Carregamento Dinâmico.



Figura 4 – Sensores Fixados na estaca



Figura 5 – PDA 8G – Sistema de Impacto

2 CARACTERISTICA GEOLOGICO – GEOTÉCNICA DO SOLO LOCAL

A estaca em questão encontra-se assente no saprólito de intemperização da rocha calcária pertencente ao Grupo Bambuí. As rochas encontradas na região de Montes Claros-MG são predominantemente rochas carbonáticas, principalmente calcários e influencia diretamente as características do relevo, do solo e do ecossistema local. Os solos resultantes do intemperismo do calcário são conhecidos como solos calcários.

Na figura 6 apresenta-se a sondagem realizada próximo a estaca ensaiada com Expander Body instalado em solo de alteração de rocha SPT > 40. Salienta-se que a estaca foi escavada com diâmetro de 40 cm e 1400 cm de profundidade. Na escavação das estacas utilizou-se um equipamento sob caminhão, perfuratriz CZM CD 20. O equipamento possui capacidade e torque para escavar solos com resistência SPT<50 golpes.

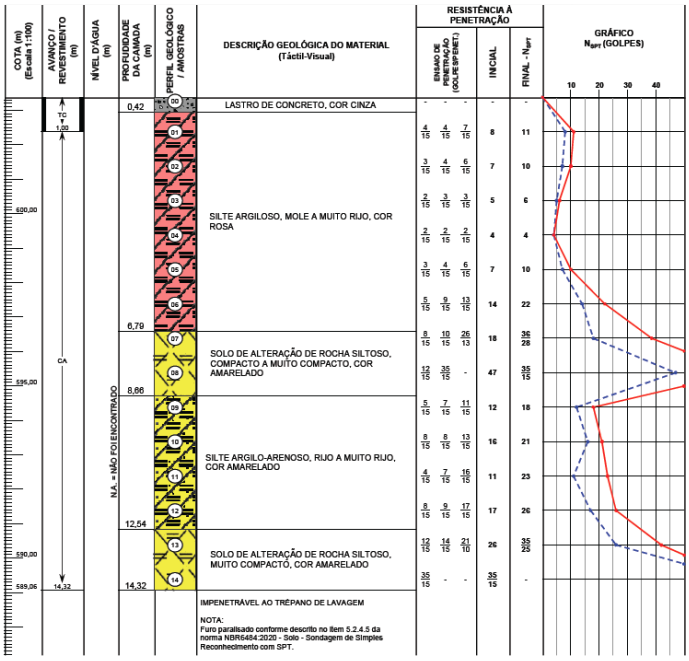


Figura 6- Sondagem tipo SPT realizada próxima a estaca escavada

3 INTERPRETAÇÃO DA CURVA ENVOLTORIA ESTÁTICA DE RESISTENCIA DE PONTA EQUIVALENTE DO ENSAIO ECD NA CONFORMIDADE DO ESTUDO DE RIGIDEZ DE DECOURT

A interpretação da curva envoltória estática de resistência de ponta em conformidade com o método da rigidez, proposto por Décourt (1996, 2008), é uma importante análise para avaliar o comportamento geotécnico, em termos de capacidade de carga e comportamento da ponta da estaca ensaiada. Essa curva representa a relação entre a força aplicada na ponta de uma estaca e o deslocamento correspondente, permitindo identificar os limites de sua resistência. A partir do método da rigidez pode-se compreender a resposta do sistema composto pela estaca escavada e o Expander Body com relação a capacidade de carga última, especialmente analisando-se a curva carga de ponta *versus* deslocamento obtida por meio do ensaio ECD. Na prática, a análise da curva envoltória estática de resistência de ponta no caso do Expander Body, deve ser interpretada considerando-se aspectos como o limite de resistência e o coeficiente de rigidez. Na Tabela 1 são apresentados os dados obtidos no ensaio ECD da curva envoltoria de resistencia de ponta versus deslocamneto da ponta.

Tabela 1 - Dados obtidos no ensaio ECD

RP (kN)	S ponta (mm)	K = Rp/s (kN/mm)	RP (kN)	S ponta (mm)	K = Rp/s (kN/mm)
0	0,00	00,00	**599**	1,55	386,50
50	0,20	250,00	**600**	1,56	384,60
100	0,38	263,20	**650**	1,70	382,40
150	0,58	258,60	**700**	1,84	380,40
200	0,75	266,70	**750**	2,00	375,00
250	0,94	266,00	**800**	2,15	372,10
300	1,10	272,70	**846**	2,28	371,10
350	1,31	267,20	**850**	2,29	371,20
389	1,45	268,30	**900**	2,81	320,30
400	1,47	272,10	**950**	3,25	292,30
450	1,48	304,10	**1000**	3,75	266,70
500	1,49	335,60	**1050**	4,22	248,80
550	1,52	361,80	**1087**	4,54	239,40

No método da rigidez proposto por Decourt (1996, 2008), a rigidez é definida como a razão entre a carga aplicada e o recalque, e sua tendência é diminuir com o aumento do recalque. O método permite visualizar a manifestação da ruptura no gráfico de rigidez, identificando o domínio de transferência da carga pela ponta e pelo atrito lateral. A carga de ruptura convencional é calculada a partir do gráfico de rigidez, que é obtido plotando os valores de rigidez e carga e identificando a carga equivalente na rigidez nula. Na Figura 7 apresenta-se a cuva de rigidez aplicada à curva envoltória de ponta obtida no ensaio ECD, ou seja, a partir das análises gráficas identificou-se o domínio do atrito (capacidade de carga lateral) e o domínio da ponta (capacidade de carga de ponta) do Expander Body.

A interpretação da análise de Rigidez na conformidade da formatação gráfica apresentada na Figura 7, origina-se dos dados da Tabela 1, constituída dos resultados obtidos da curva da Figura 3, configurando ramo inicial pseudo elástico e transição elasto-plástico, conduzindo às seguintes afirmativas:

As análises de regressão lineares obtidas (K vs. Rp), segundo o proposto por Décout (1996,2008), verificam-se conforme as Equações 1 e 2:

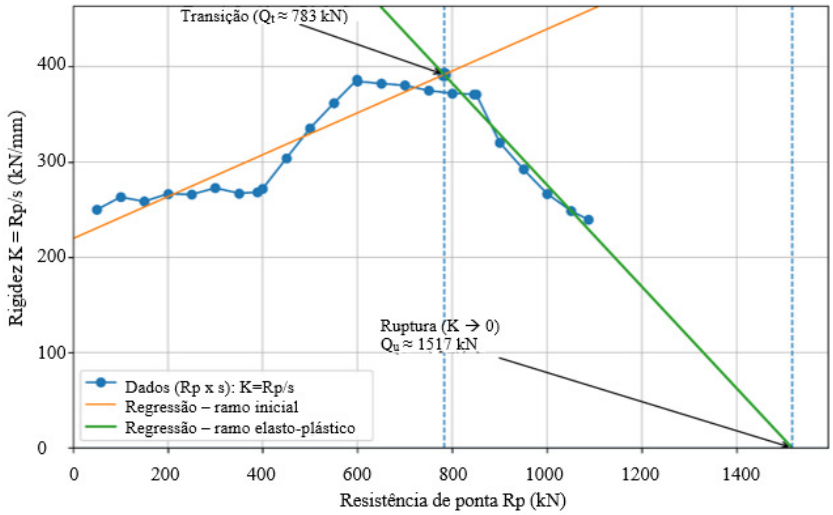


Figura 7- Rigidez aplicada à curva envoltória de ponta, ensaio ECD.

Ramo inicial predominantemente pseudo elástico :

$$K = 0{,}2199\ Rp + 219{,}69 \quad (1)$$

Ramo final elasto-plastico:

$$K = -\ 0{,}5336\ Rp + 809{,}38 \quad (2)$$

A partir da Equação 2 obtém-se a carga de ruptura por extrapolação. Considerando a rigidez nula, K=0, obtém-se 1517 KN para a capacidade de carga última do Expander Body .

Igualando-se as Equações 1 e 2 ou analisando a figura 7 a carga mobilizada de transição do ramo elastico-elasto-plastico é de 783 KN equivalente a rigidez de 392 KN/mm. Interpreta-se que até 783 KN o sistema Expander Body trabalha com rigidez alta e evolução " quase elástica" e na sequência do carregamento, segundo Décourt (1996,2008) até essa carga, 783 KN, o Expander Body está trabalhando preponderantemente por atrito. A partir desse ponto, carga de 783 KN, o Expander Body inicia-se a efetiva mobilização de ponta do Expander Body, processo que exige maiores recalques por unidade de carga e como consequência tem-se a perda sistemática de rigidez do sistema.

Portanto, pode-se postular que : a carga de atrito ativada corresponde a 783 KN e a carga de ponta ativada de correspondencia Rp = Ru – Rs , ou seja, 734 KN.

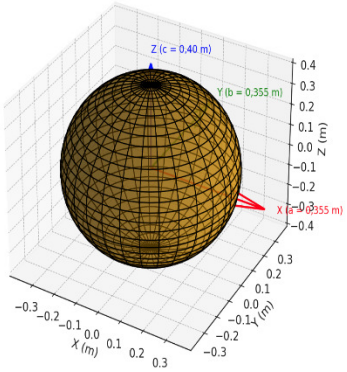
Cabe a observação que a carga de pico da curva envoltoria da resistencia de ponta é de até 1080 KN conforme os dados da tabela 1, sendo que a extrapolação de Décourt (1996,2008) para carga de até 1517 KN trata-se de uma tendência de ruptura. Salienta-se que o sistema Estaca Escavada com Expander Body instalado na ponta da estaca foi ensaiado até 3450 KN com deformações permanentes inferiores a 3 mm sem indícios de ruptura geotécnica.

Análises realizadas com base no método da rigidez proposto por Décourt corroboram com analises realizadas por Monteiro (2023) que observou em seus ensaios que, em alguns casos, mais de 70 % da capacidade de carga do Expander Body é referente ao atrito lateral do Expander Body, fato relacionado a trajetória de tensão imposta durante a injeção de nata cimento para inflar o corpo expansivo. Monteiro (2023) também observou a melhora da capacidade de carga da estaca imediatamente nas cotas acima do Expander pela densificação do solo circunvizinho ao Expander Body, dentre outros fatores peculiares.

4 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E DAS TENSÕES UNITÁRIAS EQUIVALENTES DE ATRITO E DE PONTA DO EXPANDER BODY

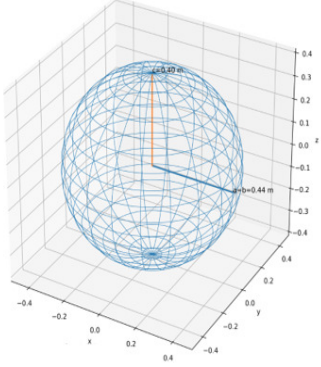
Considerando-se o cenário de execução do Expander Body, nas peculiaridades de altura, diâmetro médio, volumetria e pressão de expansão, conforme os dados divulgados, verifica-se a configuração geométrica, a mais representativa, de um Elipsoide Oblato conforme as Figuras 8 e 9.

Estas figuras apresentam a configuração tridimensional do Expander Body, modelado como um Elipsoide Oblato, observando-se os dados iniciais de campo e na sequencia calibração para um Elipsoide Equivalente, na conformidade da distribuição espacial do bulbo expandido do EB.



Altura = 0,8m
D = 0,71m
V = 210 l < 325 l
A_p = 0,40m²
Superfície lateral = 1,61m²

Figura 8 - Elipsoide Oblato



Altura = 0,8m
D = 0,88m
V = 325 l
A_p = 0,61m²
Superfície lateral = 2,90m²

Figura 9 - Elipsoide Oblato Equivalente

O Expander Body (EB) instalado na ponta da estaca apresenta altura final de aproximadamente 0,80 m, largura média observada na seção central da ordem de 0,71 m e volume total de calda de cimento injetado igual a 325 litros. A combinação desses parâmetros geométricos evidência que o volume efetivamente injetado não pode ser representado de forma consistente por um sólido cilíndrico ou esférico simples, uma vez que, para a altura final observada, o volume correspondente a um elipsoide de revolução com diâmetro constante de 0,71 m seria da ordem de 210 litros, significativamente inferior ao volume medido em campo. Dessa forma, para compatibilizar simultaneamente o volume injetado e a altura final do bulbo, adotou-se uma aproximação geométrica por um elipsoide oblato equivalente, caracterizado por semi-eixo vertical $c = 0{,}40$ m e semi-eixo equatorial $a \approx 0{,}44$ m, resultando em diâmetro equivalente da ordem de 0,88 m e área de ponta equivalente $A_p \approx 0{,}61$ m^2.

Com base na interpretação da curva envoltória de resistência de ponta obtida no Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD), por meio da análise de rigidez segundo o método de Decourt (1996, 2008), foram estimadas as parcelas de resistência associadas ao desempenho do EB, com valores da ordem de $R_s \approx 780$ KN para a carga mobilizada de atrito até a transição elástico–plástica e $R_p \approx 730$ KN para a parcela de carga ativada da resistência de ponta. Considerando a geometria oblata equivalente, obtêm-se uma tensão média de ponta da ordem de $q_b \approx 1{,}2$ MPa e uma tensão média de atrito equivalente no contato do bulbo com o solo confinante da ordem de $\tau \approx 0{,}27$ MPa. Esses níveis de tensão mostram-se compatíveis com o comportamento esperado para solos de alteração de rocha calcária muito compacto (SPT ≈ 40/50), corroborando a adequação da representação geométrica do Expander Body como um Elipsoide Oblato e a coerência física entre o volume injetado, o mecanismo de expansão e o desempenho geotécnico observado no ECD.

Considerando-se os dados de campo corrigidos para V= 210 litros , obtem-se: tensões médias de ponta e atrito, respectivamente de 1,8 MPa e 0,48 MPa .

5 CONCLUSÕES

O estudo desenvolvido permitiu demonstrar que a avaliação do desempenho geotécnico do Expander Body pode ser fundamentada na interpretação da curva de resistência de ponta obtida em ensaios de carregamento dinâmico de energia crescente. A análise da curva envoltória carga de ponta *versus* deslocamento da ponta, utilizando o método de rigidez de Décourt (1996, 2008), mostrou-se eficiente a identificar de forma clara a transição entre os regimes elástico e elasto-plástico, bem como estimar a carga de ruptura equivalente associada ao mecanismo de expansão de cavidade promovido pelo Expander Body.

Os resultados obtidos a partir dessa abordagem conduziram a níveis de tensão média de ponta e de atrito compatíveis com as características geotécnicas do solo de alteração de rocha calcária muito compacto, no qual o Expander Body foi instalado, evidenciando a coerência física das interpretações realizadas. A modelagem geométrica do Expander Body como um elipsoide oblato equivalente revelou-se adequada para compatibilizar o volume injetado, a altura final do bulbo e as áreas efetivas de contato, fornecendo uma base consistente para o cálculo das tensões mobilizadas e para a interpretação do desempenho de expansão de cavidade.

As análises de rigidez aplicadas às curvas globais carga versus deslocamento do topo, tanto da Prova de Carga Estática quanto do Ensaio de Carregamento Dinâmico global, mostraram-se pouco representativas para a caracterização específica do desempenho do Expander Body, uma vez que refletem predominantemente o comportamento global do sistema estaca–solo e não caracteriza o desempenho geotécnico na singularidade do Expander Body.

Conclui-se dos estudos realizados que o desempenho geotécnico da solução de estaca escavada com ponta Expander Body apresenta-se consistente com base na interpretação da curva envoltória de resistência de ponta do ensaio dinâmico de energia crescente, associada a uma configuração geométrica específica do Expander Body. A abordagem mostrou-se coerente e contribuirá para as avaliações futuras da capacidade de carga geotécnica de estacas Expander Body e para o aprimoramento dos critérios de análise e projeto deste tipo de tecnologia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio das empresas GEOMEC, EMBRE e TELMEC relativos aos ensaios de campo e a disponibilização dos dados apresentados neste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2007). Estacas - Ensaio de Carregamento Dinâmico – NBR 13208. Rio de Janeiro, Brasil, 12 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2021). Estacas - Prova de carga estática , NBR 12131. Rio de Janeiro, Brasil, 16 p.

CAPWAP MANUAL – Case Pile Wave Analysis Program – 2014.

Décourt, L. (2008) Loading Tests: Interpretation and Prediction of their Results, ASCE – GSP 180 – 2008 - pags 452 a 470.

Décourt, L. (1996). A ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – III SEFE, 1996, São Paulo. Anais. São Paulo: ABEF e ABMS, v. 1, p. 215–224.

Décourt, L. (2008). Provas de carga em estacas podem dizer muito mais do que têm dito. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – VIII SEFE, 2008, São Paulo. Anais. São Paulo: ABEF, v. 1, p. 221–245.

Terceros, H.M.; Massarsch, K.M. (2014). The use of the expander body with cast in-situ piles in sandy soils. In Proceedings of International Conference on Piling and Deep Foundations, Stockholm, Vol. 1, pp. 347–35.

Fellenius, B.H.; Massarsch, K.R.; Terceros Herrera, M.A.; Terceros Arce, M. (2018). A study of the augmenting effect of equipping piles with an Expander Body. In Proceedings of International Conference on Deep Foundations and Ground Improvement: Urbanization and Infrastructure Development Future Challenges, Rome, Vol. 1, pp. 114–123.

Monteiro, F., F. (2023) Comportamento de Estacas Escavadas Equipadas com o Sistema Expander Body Em Solo Tropical. 438 p., (ENC/FT/UnB, Tese de Doutorado em Geotecnia, 2023)

Monteiro, F.F.; Cunha, R.P.; Aguiar, M.F.P.; Silva, C.M. (2021). Settlement of Bored Piles with Expander Body System in Lateritic Soils. REM - International Engineering Journal, 74, 309–318.

Silva et al. (2022) . Expander Body instalado em Estacas tipo Hélice Continua e tipo Raiz, COBRAMSEG 2022, 2022, Balneário Camboriú-SC. Anais. ABMS.