

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

HERIVELTO DA SILVA TEIXEIRA
MARCO TÚLIO PEREIRA SILVEIRA

**Análise Comparativa de Provas de Carga Convencionais e
Bidirecionais P&P com ensaios realizados em modelo
físico reduzido 1g**

Ouro Branco, Minas Gerais
07 de dezembro de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

HERIVELTO DA SILVA TEIXEIRA
MARCO TÚLIO PEREIRA SILVEIRA

**Análise Comparativa de Provas de Carga Convencionais e
Bidirecionais P&P com ensaios realizados em modelo
físico reduzido 1g**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil
da Universidade Federal de São João del-Rei, como
requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. DSc. Tales Moreira de Oliveira.

Ouro Branco, Minas Gerais
07 de dezembro de 2018

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

T266a

Teixeira, Herivelto da Silva.

Análise comparativa de provas de carga convencionais e bidirecionais P&P com ensaios realizados em modelo físico reduzido 1g / Herivelto da Silva Teixeira; Marco Túlio Pereira Silveira; orientador Tales Moreira de Oliveira. -- Ouro Branco, 2018.
61 p.

Trabalho de Conclusão (Graduação - Engenharia Civil) -
Universidade Federal de São João del-Rei, 2018.

1. Prova de carga bidirecional P&P 2. Prova de carga convencional
3. Modelo físico reduzido I. Silveira, Marco Túlio Pereira II. Oliveira, Tales
Moreira de, orient. III. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

Título: Análise Comparativa de Provas de Carga Convencionais Bidirecionais P&P com ensaios realizados em modelo físico reduzido

Autores: Herivelto da Silva Teixeira
Marco Túlio Pereira Silveira

Aprovada como parte das exigências para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. DSc. Tales Moreira de Oliveira - UFSJ
(Orientador)

Prof. DSc. Leandro Neves Duarte - UFSJ
(Avaliador Interno)

Douglas Henrique dos Santos Sousa
(Avaliador Externo)

Ouro Branco, MG
07 de dezembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, que nos guiou e encorajou durante mais esse ciclo das nossas jornadas, nos dando saúde e força para vencer as dificuldades diárias.

Agradecemos também à todas as pessoas que contribuíram para que esse sonho se tornasse realidade, ao longo da graduação e ao final para a concretização desse trabalho. À equipe do INFRAGEO, pelo apoio e oportunidade de desenvolver essa pesquisa, aos técnicos de laboratório por todo o suporte e aos professores Leandro Duarte e Douglas Sousa, que sempre estavam dispostos a sanar nossas dúvidas e nos ajudar.

Em especial, agradecemos ao professor e amigo Tales Moreira de Oliveira pela confiança depositada, pelo incentivo, orientação, paciência, pelos ensinamentos que nos transmitiu durante esse trabalho e também em suas aulas. Você é uma grande pessoa e um excelente profissional, sem dúvidas o levaremos como exemplo em nossas vidas.

RESUMO

As provas de carga convencionais apresentam resultados confiáveis e satisfatórios, entretanto, a comunidade geotécnica ainda questiona sobre as contribuições de atrito lateral e resistência de ponta, separadamente, para a capacidade de carga em fundações profundas, somasse a este fato, dificuldades de se instalar em campo reações para o seu funcionamento e os riscos envolvidos. A prova de carga Bidirecional, apresenta vantagem frente as provas de cargas convencionais pelo fato de dispensarem estruturas de reação tornando-se sobre tudo mais seguras. Com o intuito de conduzir essas discussões, foram desenvolvidas as provas de carga bidirecionais em modelo físico reduzido não-centrifugado, de similitude restrita visando entender melhor o seu funcionamento, tendo em vista inúmeros questionamentos suscitados da comunidade técnica em torno de como interpretar os resultados obtidos, bem como a sua confiabilidade frente a resultados das provas de carga convencionais executados.

Apesar de serem contestados por alguns na comunidade geotécnica em razão do sentido de aplicação da carga, os métodos bidirecionais têm se mostrado muito eficientes e com resultados compatíveis com as provas de carga convencionais. A célula P&P, abordada neste trabalho, ainda está em fase de testes, mas traz uma tecnologia inovadora, pois permite seu reaproveitamento em outros experimentos, reduzindo o custo final das provas de carga.

A realização de experimentos em modelo reduzido de similitude restritiva, avaliado sobre quesitos qualitativos, permitiu comparar os resultados de provas de carga convencionais e bidirecional P&P, verificando-se que há uma concordância satisfatória entre as cargas admissíveis, estimadas por meio de métodos consagrados na literatura.

Palavras-chave: Prova de carga bidirecional; Prova de carga convencional; P&P; Modelo físico reduzido; Capacidade de carga; Carga admissível.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais tipos de fundações profundas: (a) estaca, (b) tubulão e (c) caixão.....	3
Figura 2 - Esquema de estaca padrão	5
Figura 3 - Esquema de prova de carga utilizando a O'cell	10
Figura 4 - Exemplo de aplicação do Método de <i>Van der Veen</i> (1953).....	13
Figura 5 - Carga de ruptura segundo o método de <i>Chin-Kondner</i> (1970, 1971).....	13
Figura 6 - Gráfico do critério de 80% de <i>Brinch-Hansen</i> (1963).....	14
Figura 7 - Curvas esquemáticas de um ensaio bidirecional	16
Figura 8 - Aparato para realização dos ensaios em modelo reduzido.....	19
Figura 9 - Compactação de uma camada de solo (a) e escarificação (b)	20
Figura 10 - Representação esquemática dos modelos de estacas	21
Figura 11 - Dispositivos utilizados no Modelo B	21
Figura 12 - Locação das estacas	22
Figura 13 – Lançamento da argamassa nas estacas Modelo C (a) e estacas do Modelo B já executadas (b).....	23
Figura 14 - Montagem para a calibração da célula de carga	25
Figura 15 - Curva de calibração da célula de carga	25
Figura 16 – Esquema de montagem e instrumentação da prova de carga convencional	27
Figura 17 – Desenho esquemático e detalhe da montagem de prova de carga bidirecional	28
Figura 18 – Estacas do Modelo C exumadas (a) e Detalhe da exumação de estaca do Modelo B (b).....	29

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comportamento do deslocamento admissível das estacas.....	32
Gráfico 2 - Comportamento do deslocamento admissível das estacas.....	33
Gráfico 3 - Comportamento geral das Curvas Carga x Deslocamento.....	34
Gráfico 4 - Dispersão dos resultados das 20 provas de carga.....	35
Gráfico 5 - Curvas Carga x Deslocamento de prova de carga bidirecional em estaca mal projetada	37
Gráfico 6 - Curva Carga x Deslocamento C1	44
Gráfico 7 - Curva Carga x Deslocamento C2.....	44
Gráfico 8 - Curva Carga x Deslocamento C3.....	45
Gráfico 9 - Curva Carga x Deslocamento C4.....	45
Gráfico 10 - Curva Carga x Deslocamento C5.....	46
Gráfico 11 - Curva Carga x Deslocamento C6.....	46
Gráfico 12 - Curva Carga x Deslocamento C1".....	47
Gráfico 13 - Curva Carga x Deslocamento C2".....	47
Gráfico 14 - Curva Carga x Deslocamento C3".....	48
Gráfico 15 - Curva Carga x Deslocamento C4".....	48
Gráfico 16 - Curva Carga x Deslocamento C5".....	49
Gráfico 17 - Curva Carga x Deslocamento B1.....	50
Gráfico 18 - Curvas Ajustada e Equivalente B1.....	50
Gráfico 19 - Curva Carga x Deslocamento B2.....	51
Gráfico 20 - Curvas Ajustada e Equivalente B2.....	51
Gráfico 21 - Curva Carga x Deslocamento B3.....	52
Gráfico 22 - Curvas Ajustada e Equivalente B3.....	52
Gráfico 23 - Curvas Carga x Deslocamento B4.....	53
Gráfico 24 - Curvas Ajustada e Equivalente B4.....	53
Gráfico 25 - Curvas Carga x Deslocamento B1".....	54
Gráfico 26 - Curvas Ajustada e Equivalente B1".....	54
Gráfico 27 - Curvas Carga x Deslocamento B2".....	55
Gráfico 28 - Curvas Ajustada e Equivalente B2".....	55
Gráfico 29 - Curvas Carga x Deslocamento B3".....	56
Gráfico 30 - Curvas Ajustada e Equivalente B3".....	56

Gráfico 31 - Curvas Carga x Deslocamento B4"	57
Gráfico 32 - Curvas Ajustada e Equivalente B4"	57
Gráfico 33 - Curvas Carga x Deslocamento B5"	58
Gráfico 34 - Curvas Ajustada e Equivalente B5"	58
Gráficos 35 a 37 - Curva Carga x Deslocamento de provas de carga bidirecionais..	59
Gráfico 36.....	59
Gráfico 37.....	60
Gráfico 38.....	60
Gráfico 39.....	61

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

- SPT: *Standart Penetration Test*;
- CPT: *Continuous Performance Test*;
- P&P: célula hidrodinâmica bidirecional *Pull & Push*;
- \emptyset : Diâmetro das estacas;
- L : Comprimento das estacas;
- cm: Centímetros;
- f_{ck} : Resistência característica do concreto;
- MPa: Megapascal;
- Q : Capacidade de carga das estacas;
- W : Peso próprio dos elementos de fundação;
- Q_p : Resistência de ponta;
- Q_p : Resistência por atrito lateral;
- A_B : Área da base das estacas;
- q_p : Resistência de ponta (unitária);
- q_p : Resistência por atrito lateral (unitária);
- U : Perímetro das estacas;
- PCE: Prova de Carga Estática;
- PCD: Prova de Carga Dinâmica;
- QML: *Quick Maintained Load Test*;
- Al_f : Resistência por atrito lateral do fuste;
- Al_p : Resistência por atrito lateral da ponta;
- O'cell: célula de Osterberg;
- r : Recalques nos ensaio convencional ou na curva ajustada;
- Q_u : Resistência última pelos métodos de extrapolação da curva Carga x Recalque;
- A_B : Área da base das estacas;
- C_1 : Coeficiente angular da reta obtida pelo critério de 80% de *Brinch-Hansen*;
- C_2 : Intercepto no eixo das ordenadas da reta obtida pelo critério de 80% de *Brinch-Hansen*;

- r_u : Recalque correspondente à carga última pelo critério de 80% de *Brinch-Hansen*;
- s.d.: sem data;
- m: metros;
- SUCS: Sistema Unificado de Classificação dos Solos;
- kg: quilogramas;
- a/c: relação água/ cimento;
- CPV-ARI: Cimento *Portland* de Alta Resistência Inicial;
- mm: milímetros;
- psi: unidade de medida de pressão (*Pound force per Square Inch* – lbf/in²);
- IC: Índice de confiança;
- p : Probabilidade de significância;
- SQ: Soma dos quadrados dos tratamentos;
- GL: Graus de liberdade;
- QM: Razão entre a soma dos quadrados e os graus de liberdade;
- s: Desvio padrão;
- s^2 : Variância;
- PCC: Prova de Carga Convencional;
- PCB: Prova de Carga Bidirecional;
- \bar{x} : Média aritmética;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS GERAIS.....	2
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2	REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1	Fundações profundas.....	3
2.1.1	Estacas Tipo Broca.....	4
2.1.2	Capacidade de carga de estacas isoladas	4
2.1.3	Métodos teóricos e semi-empíricos	6
2.2	Provas de Carga	6
2.2.1	Prova de Carga Convencional.....	7
2.2.2	Carregamento rápido de carga mantida ou QML (<i>Quick Maintained Load Test</i>)	7
2.2.3	Instrumentação das estacas	8
2.2.4	Prova de Carga Bidirecional	8
2.2.5	Tecnologia <i>O-cell</i>	10
2.2.6	Célula P&P	11
2.3	Análise e interpretação das PCE	11
2.3.1	Métodos de extrapolação da curva Carga x Recalque	11
2.3.1.1	Método de Van der Veen (1953).....	12
2.3.1.2	Método de Chin-Kondner (1970,1971).....	13
2.3.1.3	Método de Brinch-Hansen (1963)	14
2.3.2	Curva Ajustada (Silva, 1983)	15
2.3.3	Fórmulas de aproximação considerando o encurtamento elástico	15
2.3.3.1	Método de Massad (2015)	16
2.4	Análise estatística	17
2.5	Modelo físico reduzido	18
3	METODOLOGIA	19
3.1	Aparato.....	19
3.2	Solo.....	20
3.3	Execução das estacas	20
3.3.1	Escavação	22

3.3.2	Argamassagem.....	22
3.4	Calibrações	24
3.4.1	Anel dinamométrico	24
3.4.2	Célula de carga (Célula Hidroexpansiva)	24
3.5	Provas de carga	26
3.5.1	Estacas do Modelo C.....	26
3.5.2	Estacas do Modelo B.....	27
3.6	Exumação das estacas	28
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	29
4.1	Estudos preliminares e calibração dos modelos	29
4.2	Provas de carga satisfatórias	29
4.2.1	Análise de integridade e exumação.....	30
4.3	Resultados das provas de carga convencionais	31
4.4	Resultados das provas de carga bidirecionais	32
4.5	Resultados gerais	34
4.6	Análise estatística das cargas admissíveis obtidas por provas de carga convencionais e bidirecionais	35
4.7	Discussões.....	36
5	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
	APÊNDICE A – Curvas Carga x Deslocamento das PCC.....	44
	APÊNDICE B – Curvas Carga x Deslocamento das PCB.....	50
	APÊNDICE C – Resultados das provas de carga de calibração dos modelos.....	59

1 INTRODUÇÃO

As provas de carga constituem o meio mais seguro e eficaz para se verificar o desempenho de fundações. Basicamente, consistem na aplicação de incrementos de carga iguais e sucessivos sobre os elementos teste e na análise dos recalques (Probst et al, 2018). O entendimento do comportamento do elemento estudado frente às cargas aplicadas subsidia a elaboração de projetos mais seguros e mais econômicos, daí a grande importância da realização desse ensaio e de ensaios de reconhecimento como o SPT, CPT e outros.

Existem duas metodologias principais de execução de provas de carga estática: a convencional, considerada a mais precisa e confiável, porém onerosa, e a bidirecional, que permite a determinação individual das capacidades geotécnicas de ponta e fuste e outros parâmetros e é aliada a um custo de execução inferior (Marinho, 2018). Os ensaios bidirecionais são praticados no mundo de acordo com duas técnicas concebidas paralelamente na década de 1980. Uma, desenvolvida pelo Engenheiro brasileiro Pedro Elísio A. F. da Silva, que utiliza uma célula expansiva hidrodinâmica, e outra criada pelo Dr. Jorj O. Osterberg, denominada O'cell. Ambos os métodos surgiram como alternativas ao método convencional com o intuito de evoluir as provas de carga diante de inconvenientes como o alto custo, os complexos sistemas de reação, e outros (Rocha e Gomes, 2017).

Em contrapartida, as células expansivas, são equipamentos de sacrifício, pois são concretados no interior da estaca no momento de sua execução (Resende et al, 2018). Buscando uma solução a esse inconveniente foi idealizada pelo Engenheiro Civil, Edmilson Freitas, um novo modelo de ensaio, com uma célula expansiva hidrodinâmica denominada célula P&P – *Push & Pull* (Rocha e Gomes, 2017). O método, em fase experimental, possibilita uma redução do custo final das provas de carga tendo em vista o reaproveitamento das células.

A comparação dos resultados dessas provas de carga com as provas de carga convencionais sob ótica estatística, possibilita a verificação da validade do novo método. Visando esse entendimento qualitativo, trabalhou-se com modelagem reduzida de similitude restritiva em estacas escavadas a trado manual e moldadas com argamassa (cimento, areia e água).

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho visa analisar, por meios estatísticos e de forma qualitativa, os resultados obtidos em provas de cargas convencionais e bidirecionais P&P, realizadas em modelo físico reduzido 1g, não-centrifugado de similitude restritiva, aplicados em estacas escavadas do tipo trado manual.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

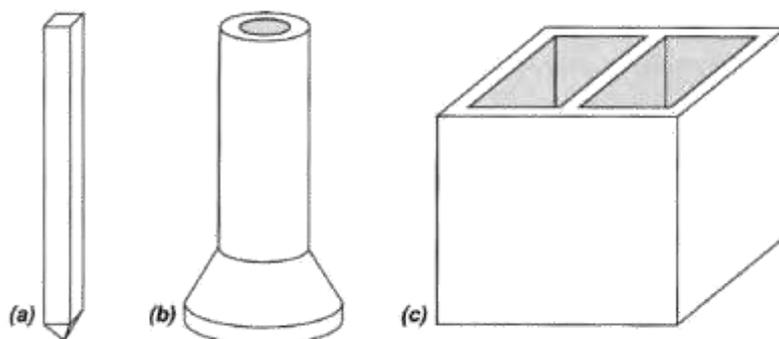
- Analisar, comparar e discutir os resultados de provas de carga convencional com os obtidos na prova de carga bidirecional P&P;
- Avaliar o comportamento Carga x Deslocamento da curva ajustada obtida pela prova de carga Bidirecional; e
- Analisar as diferenças entre os resultados da carga admissível aplicando testes de probabilidade aos dados obtidos dos ensaios.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fundações profundas

A NBR 6122:2010 define fundação profunda como: “Elemento de fundação que transmite a carga ao terreno pela base (resistência de solo), por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, e que está assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3,0 m, salvo justificativa. Nesse tipo de fundação incluem-se as estacas, os tubulões e os caixões”, ilustrados na Figura 1.

Figura 1 - Principais tipos de fundações profundas: (a) estaca, (b) tubulão e (c) caixão.



Fonte: VELLOSO, D.A; LOPES, F. R. Fundações. Nova edição, 2010.

Segundo Melo (2009), as estacas são elementos esbeltos, cuja relação entre o diâmetro e o comprimento (ϕ/L) é pequena. A sua execução ocorre sem a descida de operário e elas são empregadas quando as camadas superficiais do solo não são suficientemente resistentes.

As estacas empregadas nas obras civis, diferem-se entre si basicamente pelo método executivo e materiais de que são constituídas. A NBR 6122:2010 trata de alguns tipos, sendo eles:

- Estacas cravadas por percussão;
- Estacas cravadas por prensagem;
- Estacas escavadas, com injeção;
- Estacas tipo broca;
- Estacas apiloadas;
- Estacas tipo Strauss;

- Estacas escavadas;
- Estacas tipo Frank;
- Estacas mistas;
- Estacas “hélice contínua”;

Segundo Duarte (2018), essas estacas podem ser classificadas em duas categorias: estacas de deslocamento e estacas sem deslocamento. As primeiras são introduzidas no terreno através de algum processo que não promove a retirada de solo (estacas pré-moldadas, por exemplo) e as sem deslocamento são executadas a partir de uma perfuração no terreno por um processo qualquer, ou seja, com a remoção de material, caso do típico trado manual.

O estudo do comportamento das estacas deve envolver a capacidade de carga de estacas isoladas, recalques de estacas isoladas e estes mesmos fenômenos em grupo de estacas (Vargas, 1977 *apud* Melo, 2009).

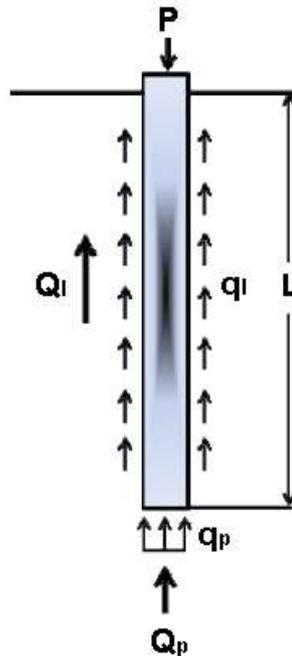
2.1.1 Estacas Tipo Broca

De acordo com a NBR 6122:2010, são um tipo de fundação profunda executada por perfuração com trado manual ou mecânico, sem uso de revestimento e posterior concretagem. A escavação deve prosseguir até a profundidade prevista, ao atingi-la, procede-se a limpeza do fundo com a remoção do material desagregado e eventualmente acumulado durante a escavação. A referida norma recomenda para essa tipologia os diâmetros mínimo e máximo de 20 e 50 cm, respectivamente. O concreto deve ser lançado do topo da perfuração com auxílio de funil, devendo apresentar f_{ck} não inferior a 15 MPa, consumo de cimento superior a 300 kg/m³ e consistência plástica (NBR 6122:2010).

2.1.2 Capacidade de carga de estacas isoladas

De acordo com Tavares (2012), a formulação do problema de uma estaca isolada carregada axialmente parte do princípio de equilíbrio entre as cargas atuantes no sistema (peso próprio do elemento + a sobrecarga) e a resistência fornecida pelo solo, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de estaca padrão



Fonte: adaptado de Tavares, 2012.

O equilíbrio é expresso por:

$$Q + W = Q_p + Q_l \quad (1)$$

Onde:

- Q : capacidade de carga da estaca;
- W : peso próprio do elemento (normalmente desprezado);
- Q_p : resistência da ponta;
- Q_l : resistência por atrito lateral.

Em termos das resistências unitárias a Equação 1 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$Q = A_B \cdot q_p + U \cdot q_l \cdot L \quad (2)$$

Onde:

- A_B : área da base da estaca;
- q_p : resistência de ponta (unitária);
- q_l : resistência lateral (unitária);

- U : perímetro da estaca;
- L : comprimento da estaca.

2.1.3 Métodos teóricos e semi-empíricos

A previsão da carga de interação solo-estrutura por meio desses métodos, assim como nas provas de carga, seguem o princípio supracitado. Souza e Amora (2018) destacam que os métodos teóricos são elaborados a partir de teorias da Mecânica dos Solos, baseando-se nos parâmetros do solo. Já os semi-empíricos baseiam-se em resultados de ensaios de penetração realizados *in situ* como o CPT e o SPT (Duarte, 2018). O mesmo autor relata que dentre as metodologias consagradas destacam-se as desenvolvidas por Aoki Velloso (1975) e Luciano Décourt; e Arthur Quaresma (1978), amplamente utilizadas no Brasil para o dimensionamento de fundações profundas. Esses e outros métodos são descritos nos trabalhos de Marinho (2018) e Souza e Amora (2018).

2.2 Provas de Carga

As provas de carga são consideradas a forma mais correta, eficiente e confiável, para se avaliar o comportamento da curva Carga x Recalque e a determinar a carga de ruptura de estacas (Melo, 2015).

Quanto às metodologias executivas podem ser divididas em dois tipos: estática (PCE) e dinâmica (PCD). As PCE são realizadas a partir da aplicação de uma carga conhecida no topo da estaca, em incrementos sucessivos e iguais com a simultânea monitoração dos deslocamentos verticais da cabeça da estaca até que seja atingida a ruptura ou alcançada a carga máxima pretendida (Cintra et al, 2013 *apud* Colatino et al, 2018). Os ensaios de carregamento dinâmico, por sua vez, consistem na oscilação da estrutura e observação de seu comportamento quando vibrada e quando sobre elas são aplicados golpes com um sistema de percussão (Oliveira, 2006 *apud* Rocha e Gomes, 2017).

2.2.1 Prova de Carga Convencional

De acordo com a NBR 12131:2006, as provas de carga podem ser realizadas com os seguintes tipos de carregamento, todos realizados em estágios iguais e sucessivos, cabendo ao projetista definir qual utilizar:

- Carregamento lento;
- Carregamento rápido;
- Carregamento misto (lento seguido de rápido);
- Carregamento cíclico, lento ou rápido.

O trabalho de Melo (2009) detalha a metodologia de todas essas modalidades, mas neste trabalho dá-se ênfase ao ensaio rápido. A prova de carga do tipo *Quick Maintained Load Test* (QML) é realizado, em média, em entre duas e três horas, apresentando-se como um método vantajoso dos pontos de vista técnico, prático e econômico (Fellenius, 1980).

2.2.2 Carregamento rápido de carga mantida ou QML (*Quick Maintained Load Test*)

O QML representou uma grande evolução das provas de carga estáticas, por torná-las mais rápidas e baratas. A NBR 12131:2006 estabelece que o carregamento deve ser executado em estágios iguais e sucessivos observando-se que:

- a carga aplicada em cada estágio não deve ser superior a 10% da carga de trabalho prevista para a estaca ensaiada;
- em cada estágio a carga deve ser mantida durante 10 minutos, independente da estabilização dos deslocamentos, que devem ser lidos obrigatoriamente no início e no final;
- atingida a carga máxima do ensaio, deve-se fazer leituras adicionais com 10, 30, 60, 90 e 120 minutos, procedendo-se com o descarregamento, que deve ser feito em no mínimo 5 estágios de 10 minutos, com a leitura dos respectivos deslocamentos.

A referida norma resume a aparelhagem necessária para a execução do ensaio a dispositivos de aplicação de carga, de medição e sistema de reação.

Para a aplicação de carga, comumente são utilizados macacos hidráulicos alimentados por bombas elétricas ou manuais que atuam contra um sistema de reação

(Rocha e Gomes, 2017). Os mesmos autores salientam que o controle da carga é feito por um manômetro, analógico ou digital, posicionado na saída da bomba hidráulica. Por meio dele controla-se a carga aplicada no elemento de fundação em teste, em cada estágio de carregamento. Os sistemas de reação para provas de carga podem ser projetados de diversas maneiras, sendo comum a utilização de estacas e vigas de reação, tirantes ancorados no solo, a própria estrutura, veículos adaptados e outros (NBR 12131:2006). A viga de reação ao ser solicitada, reage com uma carga de mesma intensidade e de sentido contrário, que comprime a estaca, fazendo-a se deslocar para baixo.

Segundo Cintra et al (2010) *apud* Souza e Amora (2018) a proximidade das estacas de reação em relação à estaca de ensaio pode afetar o resultado da prova de carga. De acordo com a NBR 12131:2006, a distância mínima entre eixos das estacas deve ser de três vezes o diâmetro da estaca de reação e o mesmo vale para os bulbos de tensões dos tirantes.

2.2.3 Instrumentação das estacas

Albuquerque (2001) relata que existem várias técnicas de instrumentação geotécnica, e que a escolha do uso de uma delas dependerá dos parâmetros que se deseja obter. Para medidas de deformação e deslocamento é comum a utilização de extensômetros, *tell tales* e outros instrumentos. Oliveira (2006) ressalta que esses devem ser selecionados com base no comprimento do aparelho, a sensibilidade, o alcance do deslocamento e a precisão de leitura. Os *tell tales*, segundo Lidquist et al (1998) *apud* Albuquerque (2001) consistem, basicamente, em se colocar um tubo guia dentro da estaca, com a sua ponta localizada em níveis pré-determinados. São colocadas hastes dentro do tubo guia e feitas leituras de deslocamento dessas hastes, o que torna possível obter parâmetros de transferência de carga e movimentação vertical. Os mesmos autores chamam a atenção para a influência do atrito das hastes com o tubo, que pode ocasionar medidas incoerentes.

2.2.4 Prova de Carga Bidirecional

Fellenius, 2006 *apud* Marinho, 2018 destaca a dificuldade de se determinar a parcela da carga aplicada na ponta de uma estaca em uma prova de carga convencional. Essa dificuldade associada ao interesse de tornar o método

convencional mais seguro, rápido e econômico impulsionaram os primeiros estudos sobre os ensaios bidirecionais (Rocha e Gomes, 2017). As primeiras células expansivas hidrodinâmicas que possibilitaram as primeiras provas de cargas bidirecionais foram concebidas pelo Engenheiro Pedro Elísio Chaves A. F. da Silva, no início da década de 80, no Brasil. Paralelamente, nos Estados Unidos, o Dr. Jorge Osterberg propunha um trabalho semelhante (Fellenius, 2006 *apud* Marinho, 2018).

De acordo com Fellenius (2015), o método bidirecional de provas de carga consiste no posicionamento de uma célula de carga (célula hidrodinâmica bidirecional) no interior da estaca para solicitar o segmento superior à célula (fuste), fazendo-o reagir contra o segmento inferior (parcela do fuste abaixo da célula e a ponta). O funcionamento do método é regido pelo princípio elementar de ação e reação (Arcos, 2012). A força que mobiliza o fuste é de mesma intensidade que a força que solicita o segmento inferior da estaca, porém de sentido oposto (Marinho, 2018).

Segundo Rocha e Gomes (2017), a ruptura isolada do fuste ou do segmento inferior da estaca para uma determinada carga não representa a carga máxima de suporte do elemento de fundação. Quando um elemento se rompe isoladamente, o outro ainda não atingiu o seu nível de carga máximo. Por essa razão, um estudo preliminar para que se faça o correto posicionamento da célula é primordial para que se tenha resultados satisfatórios com o método. Essas análises partem do princípio do equilíbrio entre a resistência por atrito lateral do fuste do segmento superior à célula, com a resistência lateral e de ponta do segmento inferior:

$$Al_f + W = Al_p + Q_p \quad (3)$$

Onde:

- Al_f : resistência por atrito lateral do fuste;
- Al_p : resistência por atrito lateral da ponta;
- Q_p : resistência de ponta.

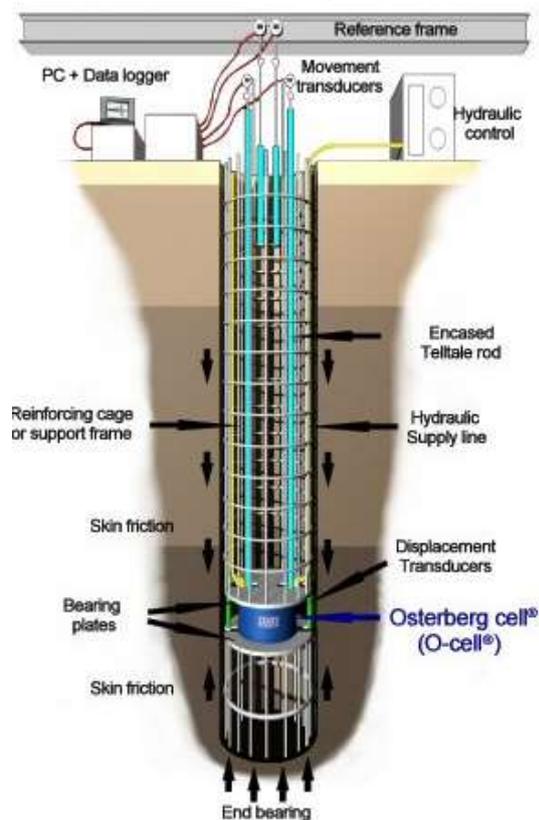
Essas resistências são calculadas, geralmente, por métodos semi-empíricos com os dados da investigação geotécnica preliminar (Pereira, 2016 *apud* Rocha e Gomes, 2017). Fellenius (2015) ressalta as possibilidades de análises proporcionadas pelo método bidirecional. O teste convencional gera somente resultados de carga e

movimento do topo das estacas, enquanto o ensaio bidirecional possibilita a avaliação individual (Carga x Recalque) do fuste e da ponta e em termos totais.

2.2.5 Tecnologia O-cell

O nome célula de Osterberg é uma referência ao seu inventor, Dr. Jorj O. Osterberg. O dispositivo funciona hidraulicamente, tem alta capacidade de carga e é instalado no interior do elemento de fundação em teste, apresentando também o inconveniente do sacrifício após o ensaio (Loadtest, 2018). O princípio de funcionamento é o mesmo da célula hidrodinâmica bidirecional. A pressão aplicada na célula carrega a estaca/tubulão em duas direções: para cima, mobilizando a resistência por atrito lateral do fuste e para baixo, contra a resistência de ponta e por atrito lateral dela. A instrumentação desses dispositivos é específica para cada O'cell e permite a medição da expansão direta da célula, o movimento do topo, e da ponta, a compressão elástica, a separação automática dos dados de resistência por camadas estratigráficas e outros dados detalhados sobre o elemento testado (Loadtest, 2018). A Figura 3 mostra o esquema de prova de carga utilizando a O'cell.

Figura 3 - Esquema de prova de carga utilizando a O'cell



Fonte: Loadtest, 2018.

2.2.6 Célula P&P

Um dos grandes inconvenientes das metodologias de PCE bidirecionais está relacionado à perda das células de carga após os ensaios, que eleva consideravelmente o custo final das provas de carga. Buscando a economicidade, por meio do reaproveitamento das células, foi idealizada pelo Engenheiro Civil, Edmilson Freitas, um novo modelo de ensaio, com uma célula expansiva hidrodinâmica denominada célula P&P – *Push & Pull* (Rocha e Gomes, 2017). O mecanismo tem o mesmo princípio de funcionamento dos dois métodos existentes (ação e reação), entretanto, fuste e ponta são solicitados com a célula de carga posicionada na superfície. Em parceria com a empresa Arcos Engenharia de Solos, o Infrageo - Grupo de Pesquisa em Infraestrutura de Vias Terrestres e Obras Geotécnicas vem realizando ensaios de campo e em modelos reduzidos com o intuito de aferir a efetividade da metodologia. Nesse contexto, há de se destacar o trabalho desenvolvido por Rocha e Gomes em 2017. Esses mesmos autores descrevem a célula P&P como sendo composta por duas placas rígidas de aço funcionando em um movimento de sentidos opostos, aos ser acionada por um macaco hidráulico.

2.3 Análise e interpretação das PCE

2.3.1 Métodos de extrapolação da curva Carga x Recalque

Quando em uma prova de carga não se atinge um nível de recalque que caracterize a ruptura, podem ser utilizados métodos de extrapolação da curva Carga x Recalque para se estimar a carga de ruptura ou carga última (Bessa et al, 2016). Segundo Zammataro et al (2007) *apud* Melo (2009), deve-se realizar uma análise criteriosa na escolha do método de extrapolação, uma vez que o seu uso indiscriminado pode gerar grandes erros na interpretação dos resultados. Em Melo (2009) são apresentados os principais critérios de ruptura que constam na literatura, dentre eles: *Van der Veen* (1953), *Chin-Kondner* (1970,1971) e *Brinch-Hansen* (1963), os quais são descritos a diante. Vale também a citação de métodos mais recentes como o de Décourt (1996), que segundo Métodos...,s.d. não é aconselhado para estacas escavadas, e o Método de Monteiro (2000).

2.3.1.1 Método de Van der Veen (1953)

O método proposto por Van der Veen (1953) é um dos mais utilizados no Brasil e utiliza a forma exponencial para ajustar a curva entre a carga e o deslocamento (Bessa, 2016).

Segundo Velloso & Lopes (2002) *apud* Melo (2009), as extrapolações pelo método de Van der Veen (1953) são confiáveis apenas em casos que o recalque máximo alcançado na prova de carga for, no mínimo, 1% da largura da estaca.

A equação que define a curva é dada pela Equação 4.

$$Q = Q_u(1 - e^{-\alpha \cdot z}) \quad (4)$$

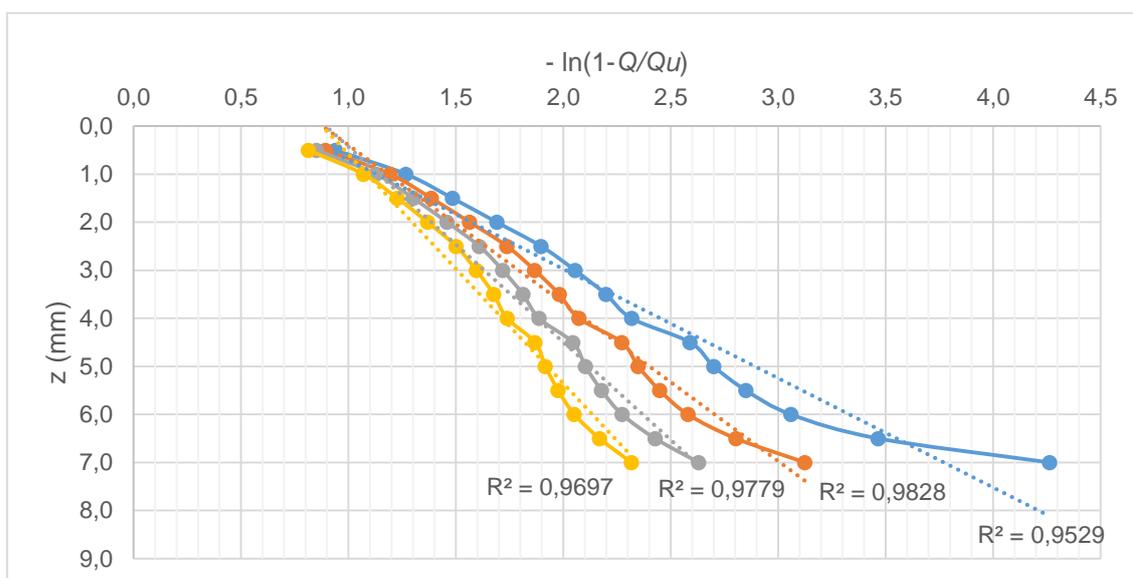
Onde:

- Q : carga aplicada no topo da estaca;
- Q_u : carga última da estaca;
- z : recalque correspondente a Q ;
- α : coeficiente que define a forma da curva Carga x Recalque.

Reescrevendo a Equação 4, obtém-se a equação de uma reta (Equação 5). Partindo de um valor arbitrário de Q_u , calcula-se os valores correspondentes de $\ln(1 - Q/Q_u)$ e esses são plotados em função do recalque medido (Pérez, 2014). Por tentativas, experimenta-se valores diferentes de Q_u , até que se encontre uma reta com o melhor coeficiente de correlação (R^2) possível (Bessa et al, 2016).

$$\alpha \cdot z = - \ln(1 - Q/Q_u) \quad (5)$$

Figura 4 - Exemplo de aplicação do Método de Van der Veen (1953)

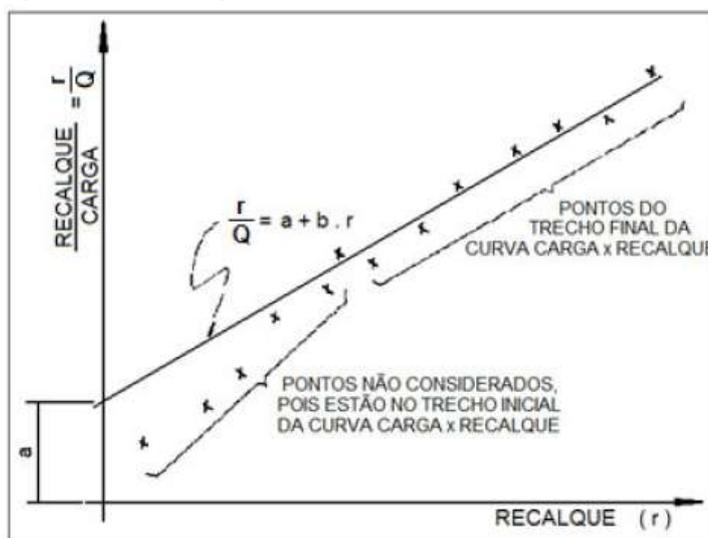


Fonte: autoria própria.

2.3.1.2 Método de Chin-Kondner (1970, 1971)

De acordo com Bessa et al (2016), esse método possibilita a extrapolação da carga de ruptura para ensaios dos tipos lento e rápido. Segundo Melo (2009), deve-se dividir os valores de carga pelos respectivos recalques e plotá-los em um gráfico *versus* Recalque (Figura 5). A carga última é dada como o inverso da inclinação da linha formada pelos pontos plotados no gráfico, de acordo com a equação (França, 2011, *apud* Bessa et al, 2016).

Figura 5 - Carga de ruptura segundo o método de Chin-Kondner (1970, 1971)



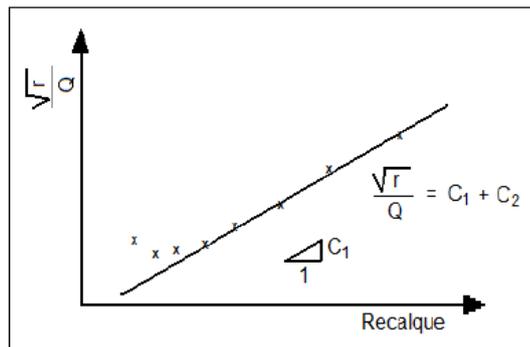
Fonte: Alonso, 1991 *apud* Melo, 2009, pág. 45.

2.3.1.3 Método de Brinch-Hansen (1963)

Segundo Fellenius (1980) *apud* Melo (2009), o método tem dois critérios, a saber:

- 90% de *Brinch-Hansen* que define a carga limite como sendo a correspondente ao dobro do recalque medido para 90% desta carga;
- 80% de *Brinch-Hansen* que estima que a carga limite corresponde a 4 vezes o recalque medido para 80% desta carga. Neste caso deve-se verificar o valor extrapolado pelo curva traçada no gráfico ($r^{1/2}/Q_u$) versus r , onde r é o recalque e Q a carga correspondente (Figura 6). A carga limite é determinada pela Equação 5. O método também possibilita a estimativa do recalque correspondente à carga última (Equação 6).

Figura 6 - Gráfico do critério de 80% de *Brinch-Hansen* (1963)



Fonte: Niyama et al, 1996 *apud* Melo, 2009.

$$Q_u = \frac{1}{2\sqrt{C_1 C_2}} \quad (5)$$

$$r_u = \frac{C_2}{C_1} \quad (6)$$

Onde:

- C_1 : coeficiente angular da reta;
- C_2 : intercepto no eixo das ordenadas.
- Q_u : carga limite da estaca;
- r_u : recalque correspondente a Q_u .

Segundo Métodos..., s.d., a escolha do critério depende da forma da curva Carga x Recalque obtida. Quando se observa um trecho inicial linear utiliza-se 90% de *Brinch-Hansen* e aplica-se o segundo critério quando a configuração inicial é curva.

2.3.2 Curva Ajustada (Silva, 1983)

De acordo com Silva (1983) *apud* Cruz (s.d.) para se converter as curvas bidirecionais em curva única Carga x Recalque, denominada Curva Ajustada da estaca, deve-se:

- Verificar na curva Carga x Recalque do topo (fuste), qual carga equivale a um recalque x ;
- Procurar na curva Carga x Recalque da base (ponta), qual carga provocou o mesmo recalque x ;
- Plotar a curva final da estaca obtida através da somatória de cargas, que provocaram o mesmo recalque do topo e da base.

Cruz (s.d.) salienta que para que essa operação seja viabilizada é necessário que a estacas sejam rígidas, que as tensões atuando na ponta e no fuste sejam similares e que o deslocamento da ponta seja equivalente ao do fuste no que se refere a atrito lateral.

2.3.3 Fórmulas de aproximação considerando o encurtamento elástico

A metodologia proposta por Silva (1983) é contestada pela comunidade geotécnica por ser demasiadamente simples e desconsiderar o encurtamento elástico das estacas durante os ensaios. Falconi e Masset (2016) chamam a atenção para as metodologias discutidas por Alonso e da Silva (2000) e Massad (2015) que introduzem o encurtamento para estimar as cargas de ruptura e os recalques correspondentes.

Segundo Massad (2015) para carregamentos realizados pelo método bidirecional, o encurtamento elástico é dado pela Equação 7.

$$\Delta_e = c' \cdot \frac{A_l}{K_r} \quad (7)$$

Onde:

- c' : é igual a 1/3 para uma distribuição linear do atrito lateral no fuste;

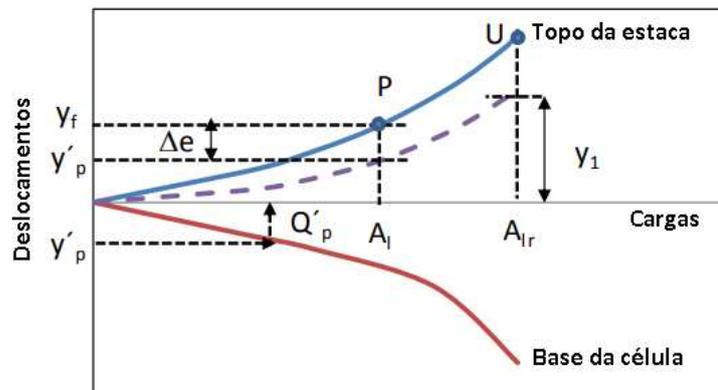
- A_l : carga de atrito lateral;
- K_r : é a rigidez da estaca com altura h , seção transversal S e módulo de elasticidade E , dada pela Equação 8.

$$K_r = \frac{E \cdot S}{h} \quad (8)$$

2.3.3.1 Método de Massad (2015)

A proposta de Massad (2015) para determinar uma curva equivalente à do ensaio convencional parte das seguintes considerações relacionadas à Figura 7. O ponto P é um ponto da curva ascendente de um ensaio bidirecional obtido pelo par A_l e γ_f (deslocamento correspondente) e o deslocamento aproximado do topo da estaca (γ'_t) é igual a $\gamma_f - \Delta_e$.

Figura 7 - Curvas esquemáticas de um ensaio bidirecional



Fonte: adaptado de Massad (2015).

Para simular o ensaio convencional, γ'_t é admitido como o deslocamento da ponta da estaca associado a Q'_p , como indicado na Figura 7 (Massad, 2015). O ponto correspondente à curva equivalente (γ_0, P_0) é obtido a partir das Equações 9 e 10.

$$\gamma_0 = \gamma'_p + \Delta_e \cdot \frac{c}{c'} + \frac{Q'_p}{K_r} \quad (9)$$

$$P_0 = A_l + Q'_p \quad (10)$$

Onde:

- c : é igual a $1 - c'$.

2.4 Análise estatística

A *ANalysis Of VAriance* (ANOVA), segundo Sepine (2013), é um procedimento que permite comparar vários tratamentos simultaneamente. Esse procedimento é capaz de identificar a igualdade (ou não) dos valores esperados (médias) de uma determinada variável de interesse nas k subpopulações de interesse. Assim, o que se deseja testar é:

- Hipótese Nula (H_0): a média de todas as populações são iguais, ou seja, a diferença entre elas é zero;
- Hipótese Alternativa (H_1): nem todas as médias populacionais são iguais, ou seja, indica que as médias são diferentes.

Segundo Melo (2012), esses dois testes de hipótese indicam o nível de significância (α) que é a probabilidade de aceitar ou rejeitar (H_0), quando ela for verdadeira. Comumente são adotados valores de α entre 1% e 5%.

Com o objetivo de esclarecer alguns conceitos estatísticos usados na análise de variância, Konkra (s.d.) define que:

- Tratamento é uma denominação genérica, para designar qualquer método, elemento ou material, cujo efeito deseja-se medir e comparar, podendo ser quantitativo ou qualitativo. Nessa pesquisa, tomou-se como tratamentos a estimativa da carga admissível a partir de provas de carga convencionais e bidirecionais;
- Repetição é o número de vezes que um tratamento deve ser executado para se obter resultados satisfatórios, dependendo dos recursos disponíveis, do tipo de delineamento e da variável resposta;
- Unidades experimentais são as unidades nas quais os tratamentos são aplicados gerando os dados e permitindo avaliar seus efeitos; e
- Grau de Liberdade (GL) é o número de determinações independentes (dimensão da amostra) subtraído o número de parâmetros estatísticos a serem avaliados na população.

O Teste de *Tukey* (1949) é um método da ANOVA e se destaca por ser eficiente ao fazer comparações entre os pares e também por ser de fácil aplicação. O teste pode ser interpretado com base no valor da diferença mínima significativa (D.M.S.), no intervalo de confiança e no valor de p (ABG Consultoria Estatística, 2017). Segundo o Portal Action, s.d., esse método ajusta o nível de confiança para cada intervalo

individual de forma que o nível de confiança simultâneo resultante seja igual ao valor especificado.

O Teste de *Shapiro-Wilk* (1965) avalia a normalidade através do cálculo da correlação entre os dados e as contagens normais de seus dados. A hipótese nula desse teste é que os dados podem ser normalmente distribuídos, sendo assim, se o valor de p encontrado for maior que o nível de significância adotado, não pode ser descartada a possibilidade de os dados assumirem uma distribuição normal (Suporte Minitab®, 2018).

Na prática geotécnica a aplicação dessas análises estatísticas permite avaliar, por exemplo, se há diferenças significativas entre as cargas admissíveis estimadas por extrapolação das Curvas Carga x Deslocamento obtidas em provas de carga Convencionais e Bidirecionais.

2.5 Modelo físico reduzido

Segundo Reinhorn (2008) *apud* Oliveira (2018), define-se modelo físico ou modelo reduzido como a redução de qualquer estrutura complexa, seja uma edificação, ponte ou obra geotécnica para um modelo mais simples sem perda de características comportamentais importantes do sistema. Para os casos em que as cargas externas aplicadas são predominantes, e o caminho de tensões não é objeto do estudo, pode-se também desenvolver modelos reduzidos sem aplicação de centrífugas (não-centrifugado). Nessas condições, os modelos são ditos 1g (uma vez a ação da gravidade) e são capazes de fornecer dados representativos (Guimarães, 1986 *apud* Oliveira, 2018).

O sistema modelado durante o desenvolvimento deste trabalho não teve como objetivo reproduzir um protótipo, ou seja, geometria, materiais, esforços atuantes e outros parâmetros necessários foram definidos de forma independente, especificamente, de acordo com as condições de execução, facilidade de aquisição e limitações dos equipamentos disponíveis. Pelo fato de não se ter aplicado os efeitos de alteração da gravidade, o modelo é definido como sendo reduzido de similitude restrita.

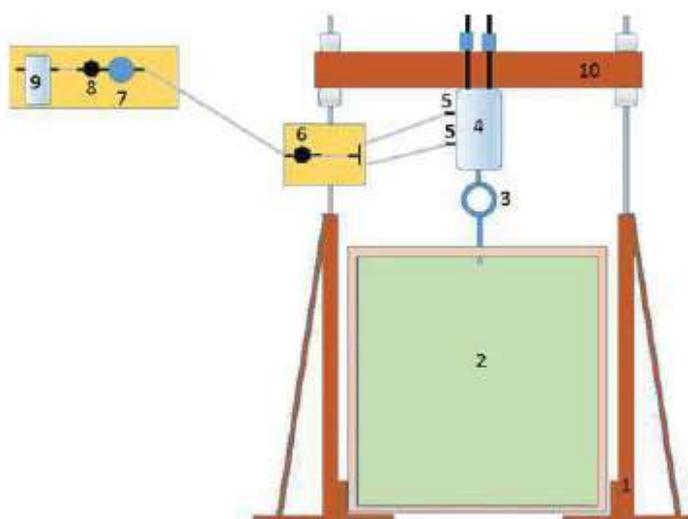
3 METODOLOGIA

3.1 Aparato

Para a realização dos experimentos foi desenvolvido um aparato, conforme Figura 6, no Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba, Ouro Branco, Minas Gerais. O sistema consiste em uma caixa de aço e madeira (2) com dimensões 1,0 m x 1,0 m x 1,0 m, apoiada sobre guias (1) fixadas em um pórtico metálico que permitem a movimentação do conjunto para frente e para trás.

Ainda no pórtico, foi colocada uma viga de reação (10) e um cilindro pneumático (4) para aplicação dos carregamentos, tanto para compactação do solo quanto para realização das provas de carga convencionais. Esses dois dispositivos foram fixados pelo sistema porca-parafuso, para permitir sua movimentação (de um lado da viga para o outro), de acordo com a necessidade da execução dos ensaios. Para controlar a carga aplicada, foram instalados um regulador de pressão (8), um manômetro de pressão (7) e um registro (6). Além disso, o sistema possui dois registros (5) de entrada e saída de ar do cilindro pneumático. O ar comprimido é gerado por um compressor, anterior ao filtro de ar (9).

Figura 8 - Aparato para realização dos ensaios em modelo reduzido



Fonte: Costa et al, 2017.

3.2 Solo

O solo utilizado para execução das fundações trata-se de um silte de baixa compressibilidade (classificação SUCS: ML), LL igual a 41% e IP igual a 7%, peso específico aparente seco máximo igual a 16,61 kN/m³ e umidade ótima de 24,6%. Esses parâmetros foram obtidos nos estudos de Oliveira (2018) que determinou também as condições adequadas à compactação ditas a seguir. A massa de solo compactada deve possuir, aproximadamente 80 cm de altura e para tal devem ser compactadas 16 camadas de solo com 66,0 kg cada. A umidade de compactação pode variar entre 24,0% e 27,0%.

Para a compactação de cada camada o solo foi disposto na caixa, nivelado e compactado com uma placa quadrada de 51 cm de lado. Visando a solidarização entre camadas, após a compactação de cada uma, foi realizado o processo de escarificação com uma haste com dois “dentes” em uma das extremidades. Ambos os procedimentos são mostrados na Figura 9.

Figura 9 - Compactação de uma camada de solo (a) e escarificação (b)



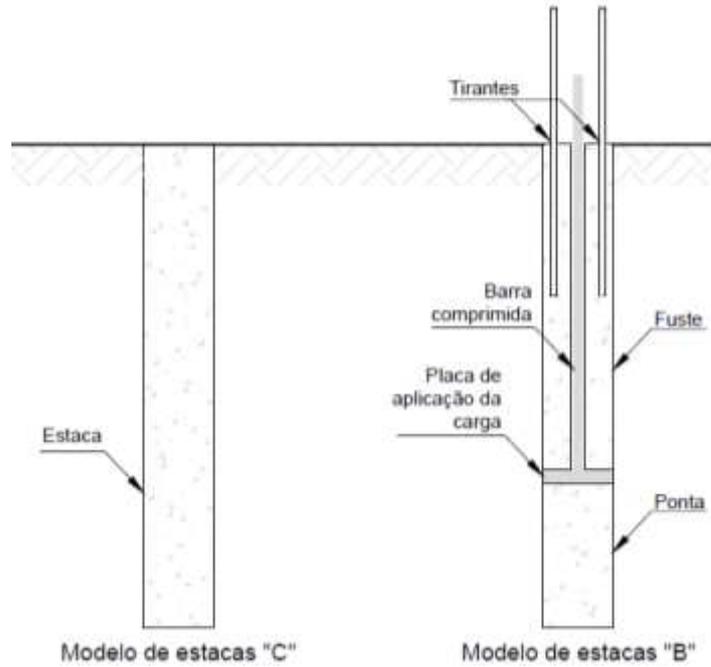
Fonte: acervo próprio.

3.3 Execução das estacas

O modelo reduzido de similitude restritiva 1g, não-centrifugado, consiste em estacas escavadas a trado manual com, em média, 35,0 cm de comprimento e 3,5 cm de diâmetro. Para a realização das provas de carga, foram concebidos dois modelos de estacas, o Modelo C constituído de estacas submetidas à provas de carga

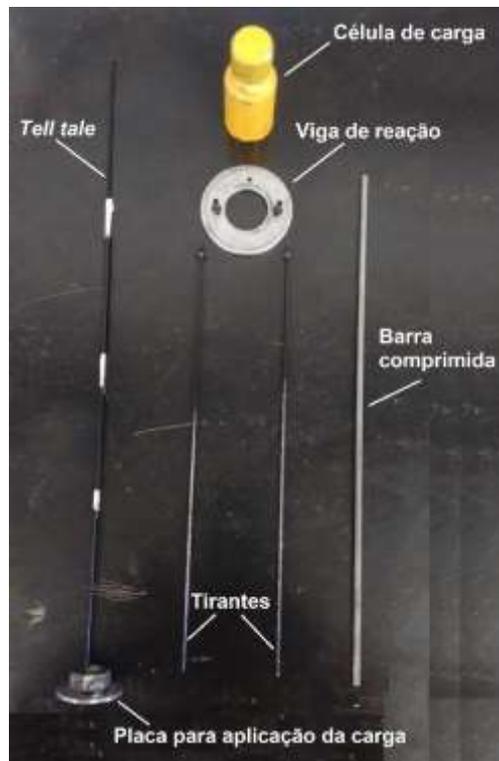
convencionais e o Modelo B de estacas submetidas à provas de carga utilizando a célula P&P, conforme Figuras 10 e 11.

Figura 10 - Representação esquemática dos modelos de estacas



Fonte: autoria própria.

Figura 11 - Dispositivos utilizados no Modelo B

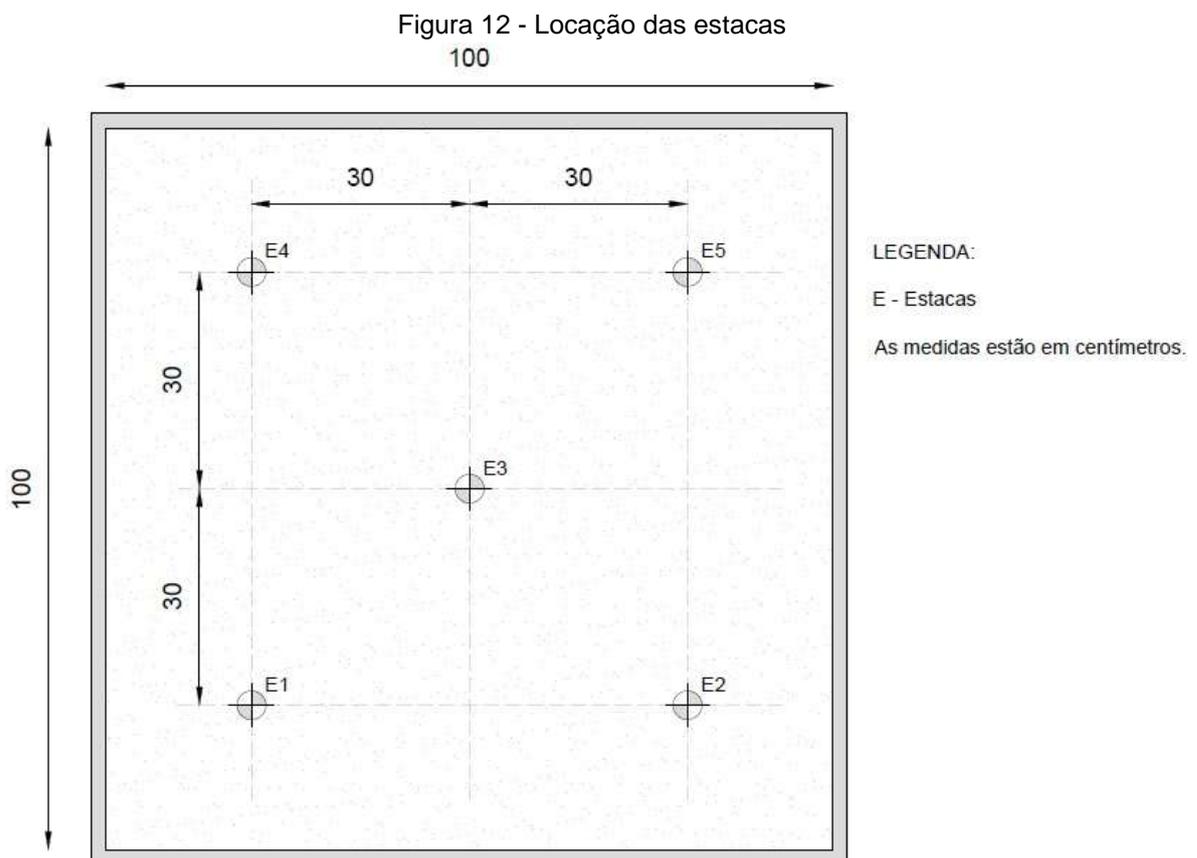


Fonte: acervo próprio.

Ambos os modelos foram calibrados experimentalmente por tentativas, visando facilitar a execução das estacas, a instrumentação, a realização das provas de carga e a determinação dos comprimentos ideais para o equilíbrio entre as resistências da ponta e do fuste das estacas do Modelo B. Ao todo foram realizadas 16 provas de carga convencionais e 16 bidirecionais.

3.3.1 Escavação

Para a execução das estacas, foi utilizado um trado, com aproximadamente 35,0 mm de diâmetro e 50 cm de comprimento. As estacas foram locadas conforme croqui da Figura 12, atendendo ao critério da distância mínima determinado pela NBR 6122:2010.



Fonte: autoria própria.

3.3.2 Argamassagem

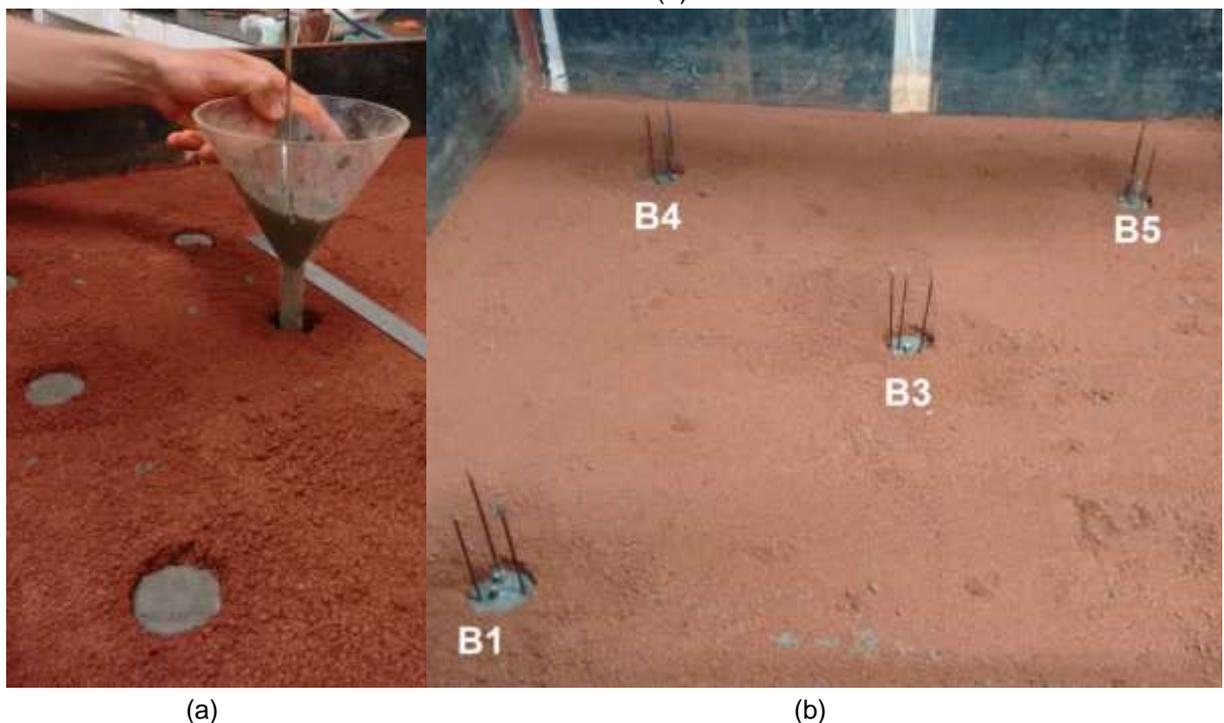
O traço utilizado para a argamassagem das estacas foi 1:2,5 com relação água/cimento de 0,75. Para viabilizar a realização das PCE em um tempo curto após a argamassagem (em média, 48 horas) foi utilizado o cimento *Portland CPV-ARI*, de

cura rápida. A definição desse traço foi feita após testes em laboratório para se obter as melhores condições construtivas, principalmente, quanto ao adensamento. Pelo fato de as estacas serem submetidas a baixos níveis de carregamento, não houve preocupação com a resistência após a cura.

Após a escavação, o fundo de todos os modelos foi submetido a um golpe do soquete padrão para ensaio *Proctor* com queda de 2 cm, sendo imediatamente realizada a argamassagem. A cada avanço de 5 cm no processo, efetuou-se a vibração da argamassa com uma haste de 2 mm de diâmetro.

A execução dos elementos do Modelo B, seguiu cinco etapas: escavação; compactação do fundo da escavação e argamassagem da ponta; posicionamento da placa de aplicação de carga, do *tell tale*, e dos tubos que o revestem o *tell tale* e a barra comprimida; argamassagem do fuste; posicionamento dos tirantes (Figura 13). A definição da cota da placa para aplicação de carga foi feita com base em estimativas de cargas resistentes por atrito lateral e da ponta determinadas a partir de testes preliminares, em modelos similares, conforme mencionado anteriormente. A Figura 13 mostra uma etapa do processo executivo das estacas do Modelo C e as estacas do Modelo B já executadas.

Figura 13 – Lançamento da argamassa nas estacas Modelo C (a) e estacas do Modelo B já executadas (b)



Fonte: acervo próprio.

3.4 Calibrações

3.4.1 Anel dinamométrico

A constante característica do anel foi determinada por Baêta (2017) por meio de ensaio realizado em prensa de compressão. Nesse trabalho também consta a especificação técnica do anel, transcrita a seguir.

- Fabricante: SOLOTEST;
- Tipo: com relógio comparador analógico;
- Série: 2373;
- Capacidade de carga nominal: 500 kgf;
- Tipo de relógio comparador: 0 -10 mm, precisão de 0,01 mm;
- Constante característica: 223,13 kgf/mm.

3.4.2 Célula de carga (Célula Hidroexpansiva)

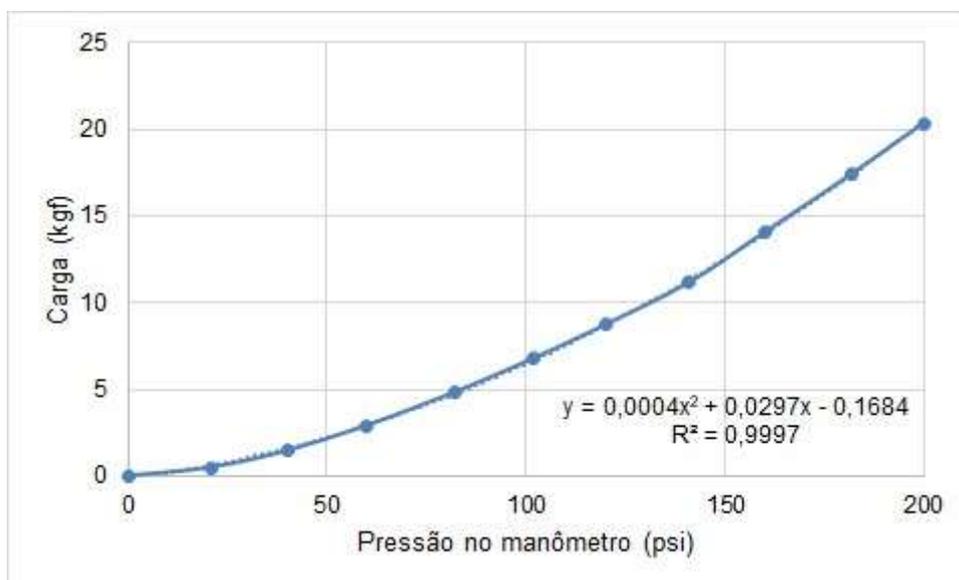
A célula de carga foi calibrada por metodologia análoga à utilizada por Baêta (2017), utilizando uma prensa de compressão. A célula foi posicionada em contato com a base de um anel dinamométrico com constante característica igual a 48,44 kgf/mm, foram realizados acréscimos de pressão de 68,95 kPa e feitas as leituras de deslocamento correspondentes (Figura 14). Com os dados lidos, obteve-se a curva de calibração da célula cuja equação foi utilizada para estimar as cargas aplicadas nas estacas do Modelo B (Figura 15).

Figura 14 - Montagem para a calibração da célula de carga



Fonte: acervo próprio.

Figura 15 - Curva de calibração da célula de carga



Fonte: autoria própria.

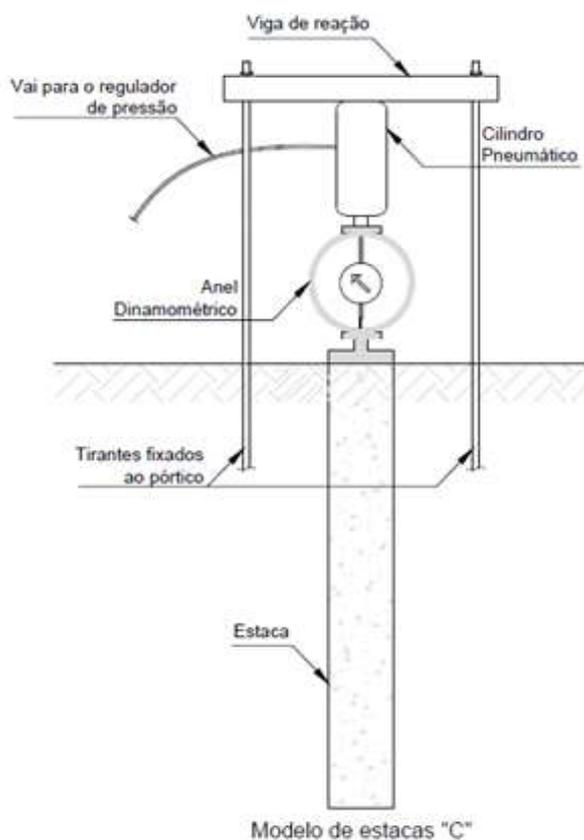
3.5 Provas de carga

3.5.1 Estacas do Modelo C

Os testes foram realizados segundo os critérios da ABNT NBR 12131:2006 para carregamento rápido. Para o sistema de reação, foi utilizada a viga fixada ao pórtico, mostrado na Figura 16. O controle da carga aplicada foi feito por um manômetro digital e um regulador de pressão, já descritos anteriormente. A capacidade de carga das estacas foi estimada com base em dados coletados em ensaios preliminares, chegando-se a um valor médio de 35 kgf. A partir desse valor foi definida a magnitude dos acréscimos de carga, que não deve ser superior a 10% da carga máxima esperada. Os incrementos de cada estágio foram de aproximadamente 3 kgf, equivalente à pressão de 4,82 kPa lida no manômetro. A Figura 16 mostra o esquema de montagem e a instrumentação das provas de carga para as estacas do Modelo C.

Durante os ensaios são realizadas leituras de dois relógios comparadores um que mede o deslocamento do topo da estaca e o segundo que é o do anel dinamométrico que possibilita a determinação da carga aplicada na estaca.

Figura 16 – Esquema de montagem e instrumentação da prova de carga convencional



(a)

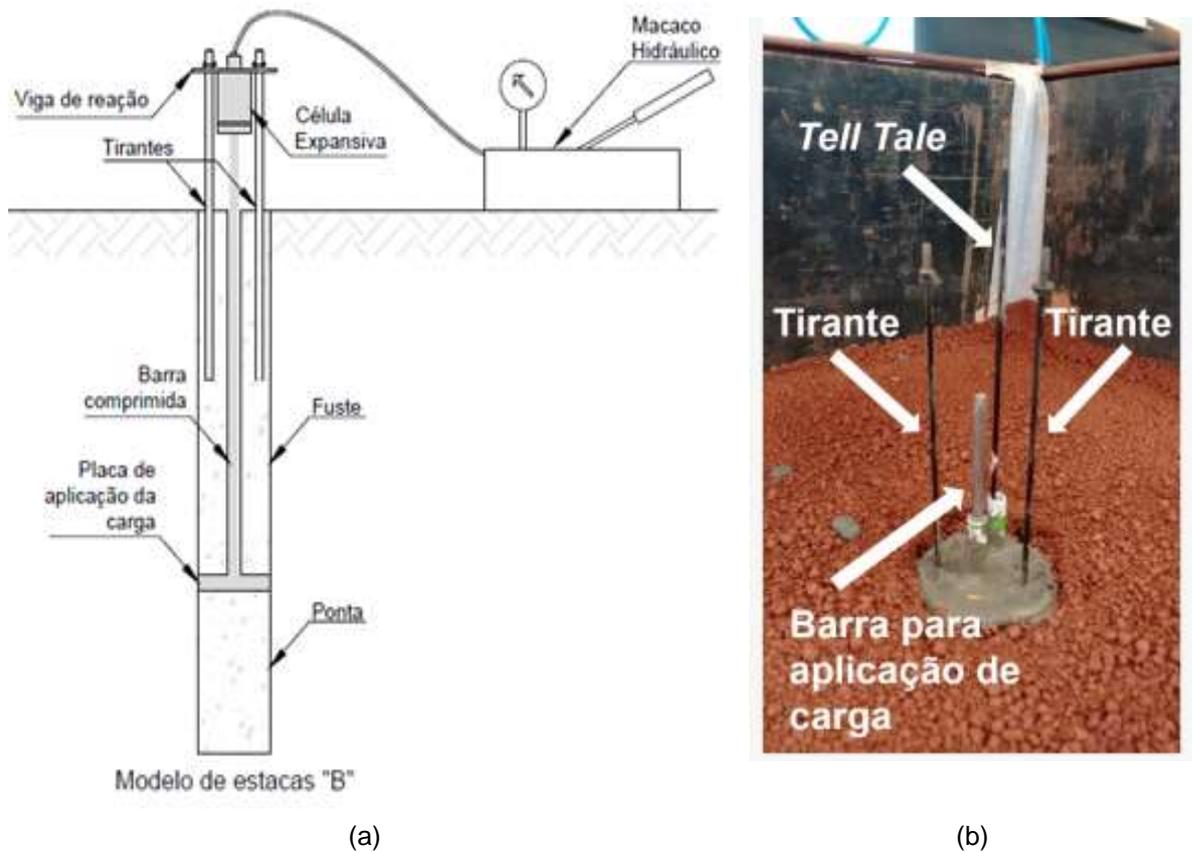
(b)

Fonte: autoria própria.

3.5.2 Estacas do Modelo B

As provas de carga bidirecionais (Figura 17) também foram realizadas seguindo as recomendações da ABNT NBR 12131:2006 para carregamento rápido. Os acréscimos de carga na célula foram feitos com o auxílio de um macaco hidráulico, que tem como fluido um óleo, e medidos com um manômetro digital. Os incrementos foram em média de 0,8 kgf, equivalente à pressão de 68,94 kPa lida no manômetro. Para a aferição dos deslocamentos foram utilizados dois relógios comparadores: o R1 que mede o deslocamento da ponta, por meio de um *tell tale* adaptado e solidarizado à placa na qual a carga é aplicada; e o R2, posicionado sobre a viga de reação para a medição do deslocamento ascendente do fuste da estaca.

Figura 17 – Desenho esquemático e detalhe da montagem de prova de carga bidirecional



Fonte: autoria própria.

3.6 Exumação das estacas

Após a realização das provas de carga, as estacas foram exumadas e tiveram aferidas as suas propriedades geométricas. Durante o processo deve-se conferir também se o funcionamento do sistema ocorreu conforme planejado sendo reportadas quaisquer anormalidades observadas. A Figura 18 mostra algumas estacas sendo exumadas.

Figura 18 – Estacas do Modelo C exumadas (a) e Detalhe da exumação de estaca do Modelo B (b)



Fonte: acervo próprio.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Estudos preliminares e calibração dos modelos

A utilização dos modelos reduzidos vem se consolidando como uma boa alternativa para o desenvolvimento de pesquisas geotécnicas (Oliveira, 2018). Para o sucesso dos estudos é fundamental que se faça um estudo de concepção do modelo, levando em conta os objetivos da pesquisa, a precisão requerida, a forma de aquisição de dados, fatores intervenientes, etc.

Para o desenvolvimento deste trabalho fez-se necessária a realização de provas de carga teste, cujos resultados são apresentados no APÊNDICE C, para que fossem feitos ajustes nos projetos de modelos de estaca a fim de gerar resultados, de fato, satisfatórios. Dentre esses, destacam-se a definição do traço, argamassa, comprimento de ancoragem dos tirantes, o diâmetro das estacas, sistemas de reação, aquisição de dados e aplicação de carga, controle da execução (escavação e argamassagem), instrumentação e definição da cota de aplicação de carga nas provas de carga bidirecionais (localização da célula no interior da estaca).

4.2 Provas de carga satisfatórias

Inicialmente, os dados obtidos para cada uma das 20 provas de carga realizadas, foram tratados com a finalidade de se obter a Curva Carga (kgf) x Deslocamento (mm).

Com as Curvas dos ensaios convencionais aplicou-se diretamente o método de *Van der Veen* (1953) para a estimativa da capacidade de carga de ruptura e valor correspondente de deslocamento. A obtenção da carga última das provas de carga bidirecionais, também pelo método de *Van der Veen* (1953) foi realizada sob as curvas Ajustadas e Equivalente dos métodos de Silva (1983) e Massad (2015), respectivamente.

De acordo com os objetivos traçados, os dados obtidos foram tabulados e realizou-se a análise de variância (ANOVA) para verificar se há diferença significativa entre os resultados das provas de carga convencional e bidirecional em termos de carga admissível.

Tendo sido comprovada a hipótese de não existência de diferença significativa entre os dados, com a validação da ANOVA e assumindo a normalidade da amostra pelo método de *Shapiro-Wilk*, foi possível analisar as diferenças probabilísticas entre as diferentes metodologias desenvolvidas para determinação da carga admissível das estacas. A fim de complementar a ANOVA, foi utilizado o teste de *Tukey* (com 5% de nível de significância) a fim de verificar a existência ou não de diferenças significativas entre os resultados das provas de carga obtidas pelas diferentes metodologias.

4.2.1 Análise de integridade e exumação

Visando verificar a integridade, o estado e as dimensões das estacas após a finalização dos ensaios, todas estacas foram exumadas conforme método anteriormente descrito. Em nenhuma das estacas foi observada a ocorrência de fatores anormais que pudessem caracterizar a obtenção de dados inconsistentes, a não ser as diferenças geométricas.

Os dados geométricos de todas as estacas ensaiadas constam na Tabela 1. Os diâmetros listados são as médias de três medições, próximas ao topo e à base e uma intermediária.

Tabela 1 - Dados geométricos de todas as estacas ensaiadas

PC	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)	PC	Comprimento (cm)		Diâmetro (cm)
				Fuste	Ponta	
C1	34,0	3,6	B1	26,0	7,0	3,8
C2	34,0	3,4	B2	28,0	4,5	3,8
C3	32,0	3,2	B3	28,5	4,8	3,6
C4	34,0	3,5	B4	28,5	4,5	4,0
C5	33,0	3,5	B1"	29,0	4,0	3,8
C6	35,0	3,5	B2"	29,0	5,0	3,8
C1"	33,0	3,4	B3"	29,0	5,1	3,8
C2"	33,0	3,5	B4"	29,0	5,0	3,9
C3"	34,0	3,4	B5"	29,0	5,1	3,8
C4"	34,0	3,5				
C5"	33,0	3,4				

Nota: o prefixo C caracteriza as provas de carga convencionais e o B, as bidirecionais. As aspas diferenciam PC realizadas em diferentes caixas.

Fonte: autoria própria.

4.3 Resultados das provas de carga convencionais

Todas as provas de carga convencionais foram feitas segundo os critérios da ABNT NBR 12131 (2006), com acréscimos de carga inferiores a 10% da carga de ruptura estimada para cada estaca. Na Tabela 2 são apresentados os resultados de capacidade de carga e carga de trabalho das estacas, bem como os respectivos deslocamentos.

Tabela 2 - Resultados das provas de carga convencionais

PC	Q_u (kgf)	Deslocamento (mm)	Q_{adm} (kgf)	Deslocamento (mm)	Carga máxima aplicada (kgf)
C1	22,50	3,40	11,25	0,70	27,89
C2	28,00	3,00	14,00	0,50	37,93
C3	23,20	1,60	11,60	0,20	35,70
C4	25,00	2,70	12,50	0,25	33,47
C5	27,60	6,80	13,80	0,78	31,24
C6	33,80	9,00	16,90	1,00	37,93
C1"	43,00	10,80	21,50	0,80	46,86
C2"	30,90	4,80	15,45	0,40	35,70
C3"	43,50	7,60	21,75	1,20	53,55
C4"	38,25	11,50	19,13	1,00	40,16
C5"	32,40	6,00	16,20	0,65	37,93

Fonte: autoria própria.

A Tabela 3 mostra alguns parâmetros estatísticos obtidos a partir desses dados. Ressalta-se que todos os valores de carga admissível estão dentro do intervalo $(\bar{x} - 2s, \bar{x} + 2s)$, onde \bar{x} é a carga admissível média e s é o desvio padrão.

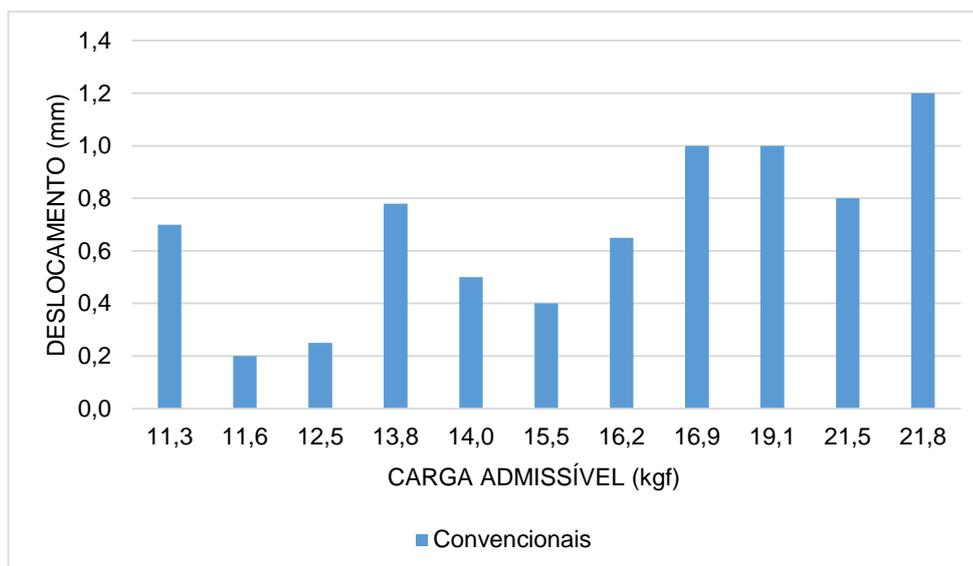
Tabela 3 - Dados estatísticos das PCC

Média (\bar{x})	Desvio padrão (s)	Variância (s^2)	Intervalo
15,83	3,52	12,39	(8,79; 22,87)

Fonte: autoria própria

A seguir os resultados são apresentados graficamente, sendo possível observar a relação entre os deslocamentos e as cargas admissíveis.

Gráfico 1 - Comportamento do deslocamento admissível das estacas



Fonte: autoria própria.

4.4 Resultados das provas de carga bidirecionais

As provas de carga bidirecionais também foram realizadas segundo os critérios da ABNT NBR 12131:2006, com acréscimos de carga inferiores a 10% da carga de ruptura estimada. Na Tabela 4 são apresentados os resultados de capacidade de carga e carga de trabalho das estacas, bem como os respectivos deslocamentos.

Tabela 4 - Resultados das provas de carga bidirecionais

PC	Q_u (kgf)	Deslocamento (mm)	Q_{adm} (kgf)	Deslocamento (mm)	Carga máxima aplicada (kgf)
B1	31,10	2,50	15,55	0,14	15,46
B2	27,10	3,42	13,55	0,22	14,35
B3	44,00	1,00	22,00	0,13	21,54
B4	32,50	5,20	16,25	0,05	16,86
B1"	39,50	6,00	19,75	0,30	21,58
B2"	25,40	0,90	12,70	0,05	12,55
B3"	42,10	2,50	21,05	0,33	21,58
B4"	39,10	3,00	19,55	0,15	21,58
B5"	34,00	9,50	17,00	0,42	17,11

Fonte: autoria própria.

A Tabela 5 mostra os mesmos parâmetros estatísticos obtidos para as PCB. Verifica-se também que todos os valores de carga admissível estão dentro do intervalo $(\bar{x} - 2s, \bar{x} + 2s)$.

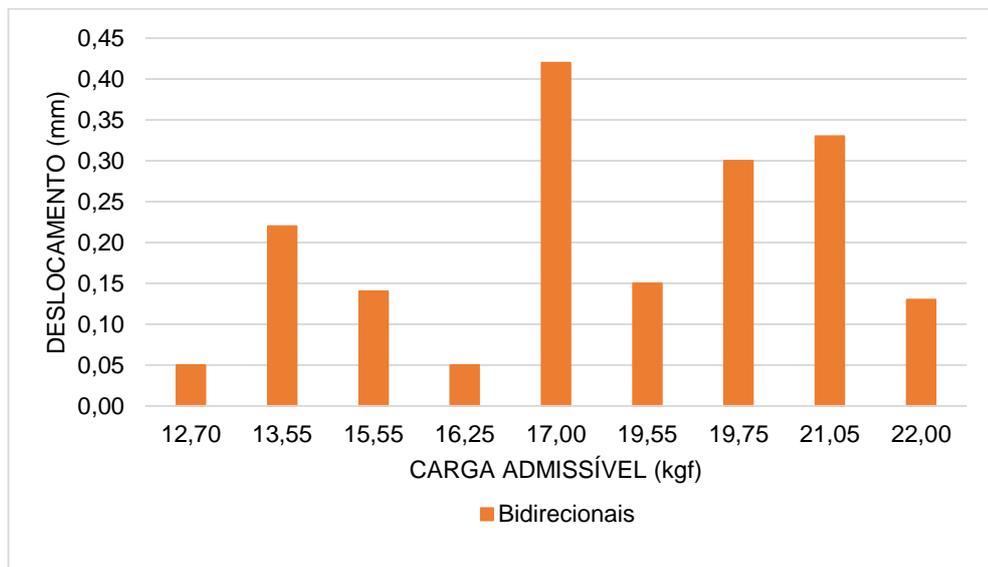
Tabela 5 - Dados estatísticos das PCB

Média (\bar{x})	Desvio padrão (s)	Variância (s^2)	Intervalo
17,49	3,09	9,54	(11,31; 23,67)

Fonte: autoria própria

A seguir os resultados são apresentados graficamente.

Gráfico 2 - Comportamento do deslocamento admissível das estacas

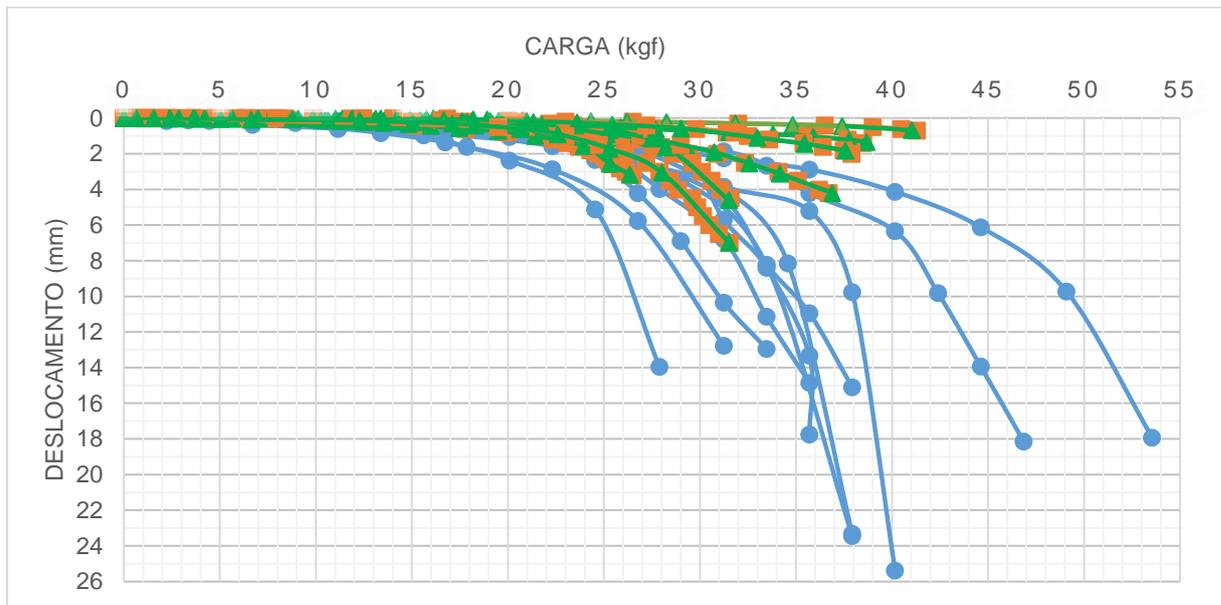


Fonte: autoria própria.

4.5 Resultados gerais

No Gráfico 3 são mostradas as Curvas Carga x Deslocamento de todas as provas de carga realizadas*.

Gráfico 3 - Comportamento geral das Curvas Carga x Deslocamento

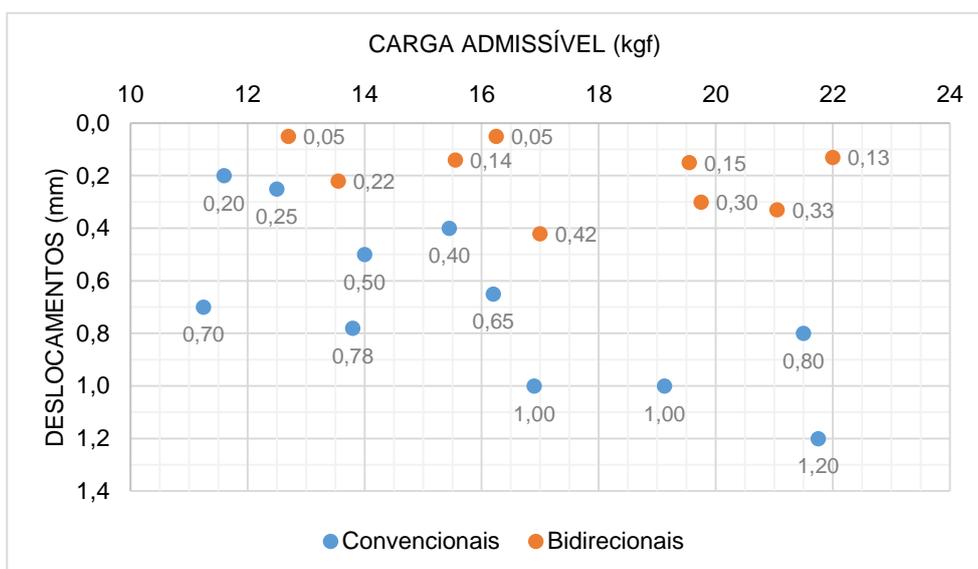


*em azul: provas de carga convencionais; em laranja: curvas Ajustadas (Silva, 1983); em verde: curvas Equivalentes (Massad, 2015).

Fonte: autoria própria.

O comportamento da dispersão dos dados de todas as provas de carga é apresentado no Gráfico 4, no qual é possível observar que ambas as metodologias conduziram a resultados de carga admissível dentro de uma mesma faixa. Por outro lado, as estacas do modelo C, apresentaram deslocamentos admissíveis, em média duas vezes maiores que as do modelo B.

Gráfico 4 - Dispersão dos resultados das 20 provas de carga



Fonte: autoria própria.

4.6 Análise estatística das cargas admissíveis obtidas por provas de carga convencionais e bidirecionais

Conforme já mencionado, a análise estatística dos resultados das provas de carga, baseou-se na Análise de Variância para testar a correspondência entre o método convencional de execução de provas de carga em estacas e a proposta de Edmilson Freitas, utilizando a célula P&P. Os resultados da ANOVA são apresentados no Quadro 1, onde SQ e QM são os parâmetros Soma dos Quadrados e Quadrados Médios.

Quadro 1 - Análise de variância das cargas admissíveis

Causa de variação	GL	SQ	QM	<i>p</i>
Tratamentos	1	13,7	13,70	0,307
Resíduo	18	223,3	12,41	
Total	19	237,0		

Fonte: autoria própria.

Ao nível de significância de 5%, a hipótese de que não há diferença significativa entre os resultados deve ser aceita.

O teste de normalidade de *Shapiro –Wilk* indicou um valor de *p* igual a 0,2045 sugerindo que os dados assumem uma distribuição normal. Neste trabalho essa análise foi considerada suficiente para validar a aplicação da ANOVA.

Os resultados do Teste de *Tukey* são apresentados na Quadro 2, que mostra a diferença entre as médias dos resultados dos dois métodos, o intervalo de confiança e o valor de p .

Quadro 2 - Análise de variância das cargas admissíveis

	Diferença	IC – 95%	Valor de p
PCC-PCB	-1,663	[-4,989;1,662]	0,307

Fonte: autoria própria.

Pelo Teste anterior, comprova-se que as médias das cargas admissíveis obtidas pelos dois métodos de prova de carga não apresentam diferença significativa.

4.7 Discussões

A partir dos procedimentos e análises realizadas neste trabalho, no qual foram projetadas e testadas duas metodologias de prova de carga em modelo reduzido, pôde-se chegar à definição de condições e formas de execução das estacas e dos ensaios, importantes para obtenção de resultados satisfatórios e seguros em estudos de natureza similar. Vale ressaltar:

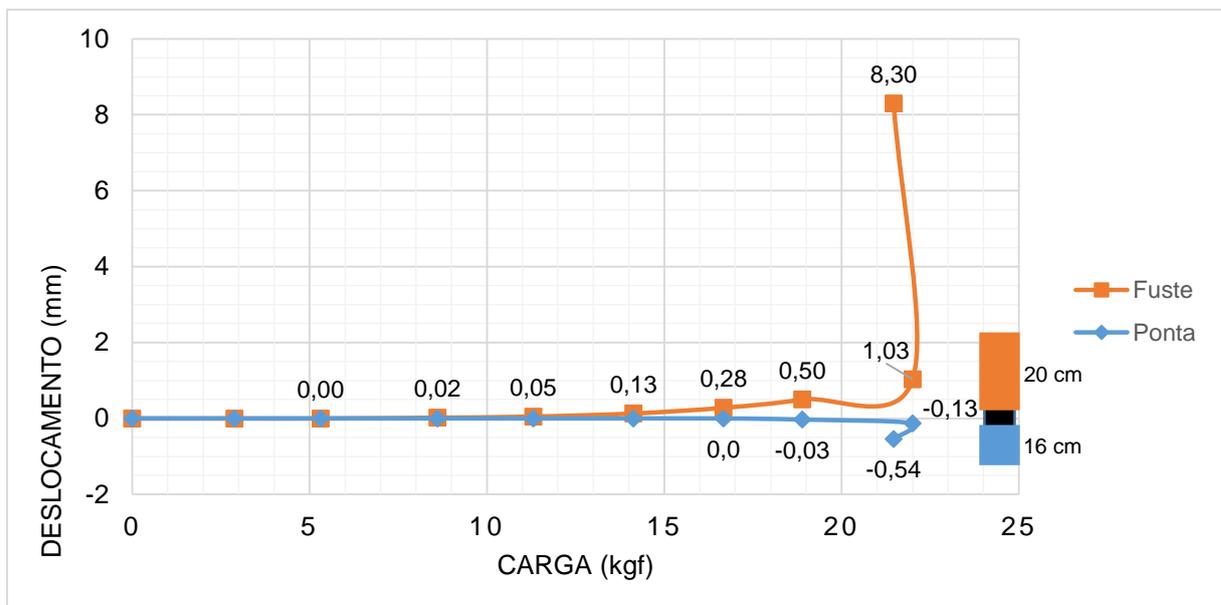
- o traço da argamassa de 1:2,5 (cimento:areia);
- relação água-cimento igual a 0,70;
- diâmetro das estacas igual ou superior a 4 cm;
- comprimento de ancoragem dos tirantes igual ou superior a 10 cm;
- diâmetro do trado deve ser 0,5 cm menor que o diâmetro pretendido para as estacas;
- o fundo das estacas deve ser compactado com energia padronizada para diminuir as diferenças devidas à sujeira de ponta;
- o diâmetro da placa de aplicação de carga deve ser 0,5 cm menor que o diâmetro das estacas;
- para evitar a aderência da argamassa com a face superior da placa de aplicação de carga, deve-se aplicar sobre ela um desmoldante ou revesti-la com fita adesiva;
- recomenda-se que a barra para aplicação de carga apresente-se pelo menos 5 cm acima da superfície;
- os tirantes devem ser posicionados logo após a argamassagem;

- no caso de provas de carga em estacas do Modelo B, deve-se utilizar um manômetro com capacidade de leitura superior a 1380 kPa.

Quanto à definição da cota de instalação da célula de aplicação de carga, célula hidroexpansiva, verificou-se a necessidade de se fazer ensaios com e sem a presença da resistência de ponta para se prever as parcelas de contribuição de cada uma das partes das estacas. Para as condições deste estudo obteve-se uma resistência por atrito lateral unitário média em torno de 0,68 kgf/cm e a resistência da ponta (sem a parcela de atrito) de aproximadamente 11 kgf. Em termos percentuais, a contribuição da ponta girou em torno de 30% da capacidade de carga das estacas. Com base nesses resultados, dimensões ideais da estaca para a realização da prova de carga bidirecional aqui proposta são 29 cm de fuste, um segmento inferior (ponta) com 6 cm e diâmetro de 4 cm.

Nos casos em que as dimensões acima propostas não são seguidas, nota-se o deslocamento excessivo de uma das partes pela falta de equilíbrio das resistências oferecidas pelos segmentos acima e abaixo da placa, o que compromete a obtenção das Curvas Ajustada e Equivalente conforme está evidenciado no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Curvas Carga x Deslocamento de prova de carga bidirecional em estaca mal projetada



Fonte: autoria própria.

De acordo com os resultados obtidos recomenda-se que na prática seja também realizada pelo menos uma prova de carga bidirecional sem função de avaliar

as fundações da obra, mas com objetivo de se determinar o valor do atrito unitário. Para tal deve-se proceder a execução de uma prova de carga bidirecional em que o comprimento do segmento alocado abaixo da célula expansiva seja igual ou superior ao do seguimento acima célula expansiva P&P ou mesmo quando na bidirecional em que no lugar da placa instala-se a célula hidroexpansiva. Assim será possível obter o valor do atrito lateral unitário do segmento superior permitindo que a determinação do posicionamento do elemento aplicador de carga no ensaio para se avaliar a capacidade de carga das estacas utilizadas na obra se deem de forma efetiva, ou seja, sem discrepância entre os dados obtidos para a Curva Carga x Deslocamento dos segmentos superiores e inferiores. Dessa forma é possível estimar com maior precisão a resistência que será oferecida pelo segmento superior a qual poderá ser subtraída da carga total estimada por métodos semi-empíricos consagrados de estimativa de capacidade de carga como o Método de Aoki e Velloso (1975), o Método de Décourt e Quaresma (1978) e o Método de Teixeira (1996). O ensaio teste pode ser executado com estacas de comprimentos e tamanho inferiores ao utilizados na realidade da obra, pois o seu objetivo é calibrar o posicionamento da placa no caso da P&P ou da célula hidroexpansiva, em perfis de solos com variação significativa do perfil geológico geotécnico estender o seu comprimento.

Neste estudo também foi possível verificar que pela metodologia de prova de carga utilizando a célula P&P, para modelos reduzidos similares, pode-se desprezar o encurtamento elástico das estacas (ditas elementos rígidos), que assume valores da ordem de 10^{-4} mm. Esse fato pode ser explicado pelo fato do fuste das estacas ensaiadas, estarem sujeitas a cargas muito inferiores aquelas resistidas pela argamassa. Dessa forma, a metodologia da Curva Ajustada, proposta por Silva (1983) pode ser considerada satisfatória e suficiente.

Pela análise estatística apresentada, considerando um índice de confiança igual 95%, foi comprovada razoável concordância entre os resultados das provas de carga convencionais e bidirecionais P&P. A diferença entre as médias das cargas admissíveis obtidas por cada método foi de 10,48%, a qual foi considerada aceitável tendo em vista as diferenças geométricas das estacas, alterações nas propriedades do solo de uma caixa para a outra, a distinção das formas de aplicação de carga e ainda o fato de algumas estacas não terem atingindo o comportamento plástico na Curva Carga x Deslocamento, casos de B3 e B2”.

Em vista do exposto, pode-se afirmar que a metodologia com a célula P&P apresenta-se como uma excelente forma para se prever o desempenho de estacas escavadas. As vantagens relacionadas ao custo, execução e segurança são evidentes e certamente farão com que o novo mecanismo venha a ser amplamente difundido no meio geotécnico.

Observa-se por fim que a determinação da carga última aplicando o método de Van Der Veen se ajustou muito bem aos resultados das diferentes provas de carga executadas, ou seja foi capaz de prever com eficiência tanto a carga de ruptura para a prova de carga convencional quanto para o ensaio bidirecional obtido com os métodos de Silva (1983) e Massad (2015) com posterior extrapolação.

5 CONCLUSÃO

O intuito deste trabalho foi conceber e testar uma metodologia que possibilitasse a validação de resultados (em termos qualitativos) da inovadora prova de carga bidirecional P&P. Por via estatística foi atestada a concordância entre as cargas admissíveis obtidas pelos dois métodos estudados, que não apresentaram diferença significativa segundo a ANOVA, hipótese também confirmada pelo Teste de *Tukey*.

Observou-se que má definição dos comprimentos da ponta e do fuste, para posicionar a célula do ensaio bidirecional, leva ao desequilíbrio das resistências das duas parcelas e descumprimindo a premissa do Método de Silva (1983) para a obtenção da Curva Ajustada. Nos casos em que ocorrem deslocamentos muito pequenos de um dos trechos, a extrapolação pelo Método de *Van der Veen* leva a valores exagerados de carga última (Magalhães, 2005 *apud* Melo, 2012). Conclui-se também que para estudos em modelos reduzidos de estacas similares, pode-se desprezar o encurtamento elástico.

Em suma, verificou-se que a metodologia com a célula P&P, de fato, exprime resultados consistentes e tendo em vista as reduções de custo e tempo de execução além da maior segurança do sistema, a alternativa tenderá a ser amplamente utilizada na engenharia de fundações, salva a necessidade de mais testes em escala real.

Afirma-se ainda a grande necessidade de se executar uma prova de carga “*bidirecional teste*” em obra, com estaca curta posicionado a célula para execução do ensaio na metade do comprimento da estaca e assim possibilitar a obtenção de uma curva Carga x Deslocamento do segmento superior da estaca ensaiada e utilizá-la para estimativa da carga lateral unitária a qual será aplicada para definir com precisão o posicionamento da célula no ensaio das estacas “*in loco*” por possibilitar refinamento nos cálculos empregando os métodos semi-empíricos para determinação da capacidade de carga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABG Consultoria Estatística. Comparações Múltiplas – Teste de *Tukey*. Disponível em: <http://www.abgconsultoria.com.br/blog/comparacoes-multiplas-teste-de-tukey/>. Acesso em 03 de abril de 2019.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023:** Informação e documentação – Referências: Elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 6027:** Informação e documentação – Sumário: Apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6028:** Informação e documentação – Resumo: Apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6122:** Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 10520:** Informação e documentação – Citações em documentos: Apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 12131:** Estacas – Prova de carga estática: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 14724:** Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos: Apresentação. Rio de Janeiro, 2011.

ALBUQUERQUE, P. J. R. DE. *Estacas Escavadas, Hélice Contínua e Ômega: Estudo do Comportamento à Compressão em Solo Residual de Diabásio, através de Provas de Carga Instrumentadas em Profundidade*. 2001. 298 f. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.

ARCOS ENGENHARIA DE SOLOS. Prova de carga estática com célula expansiva Arcos. 2012. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=eM2722BCwgk>. Acesso em 18 de janeiro de 2019.

BESSA, A. K. S.; MONTEIRO, F. F.; DE AGUIAR, M. F. P.; MONTEIRO, T. M.; DE OLIVEIRA, F. H. L. Análise de Métodos de Interpretação de Curva Carga x Recalque de Provas de Carga Estática em Fundações Profundas no Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19, 2018, Salvador, Anais... Salvador: Unifor. 2018. p. 2-4.

COLATINO, A. C.; AGUIAR, M. F. P.; MARQUES, L. M.; OLIVEIRA, F. H. L. Análise Comparativa de Resultados de Provas de Carga Estática e Dinâmica em Estacas Escavadas Raiz com Pressão de Injeção Zero Executadas em Camada de Solo Mole da Cidade de Maceió, AL. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19, 2018, Salvador. Anais... Salvador: Instituto Brasileiro de Educação Continuada, 2018. p. 1-10.

COSTA, Y. P.; OLIVEIRA, T. M.; PINTO, R. A. R.; MAIA, W. O. Análise do comportamento geotécnico de estacas tipo mini-rap, sob a ótica de modelos reduzidos

(não centrifugado) 1g. In: SIMPÓSIO DA PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO-OESTE, 4., 2017, Goiânia, Goiás. Anais... Goiânia, Goiás: Universidade Federal de São João del-Rei, 2017. p. 1-6.

CRUZ, F. V. A. DE S. Aplicação, Análise e Interpretação do Ensaio de Prova de Carga Estática, realizado pelo Método Bidirecional. GeoEstática Consultoria e Engenharia, Brasil. [s.d.].

DUARTE, L. N. Notas de aulas. Aula 06 - "Fundações profundas (Capacidade de carga)". 2018. Ouro Branco, MG.

FALCONI, F. F.; MASSET, V. L. Análise Prática de Resultados de Ensaio Bidirecionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18, 2016, Belo Horizonte, MG. Anais...

FELLENIUS, B. H. The Analysis of Results from Routine Pile Load Test. 1980.

FELLENIUS, B.H. Analysis of results of an instrumented bidirectional-cell test. 2015. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA 46(2) 64-67.

KRONKA, S. N. Estatística Experimental. Disponível em: http://www.abhorticultura.com.br/eventos/trabalhos/ev_1/MINI01.pdf. Acesso em 03 de abril de 2019.

LOADTEST. Tecnologia de célula-O. Disponível em: http://www.loadtest.com/services_int/ocelltechnology.htm. Acesso em 18 de janeiro de 2019.

MARINHO, Caio Araujo. *Análise de prova de carga estática com célula hidrodinâmica bidirecional-arcos x métodos semi-empíricos de estimativa de carga de ruptura*. 2018. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco, MG.

Massad, F. (2015) On the interpretation of the Bidirectional Static Load Test, *Soils and Rocks*, São Paulo, Vol. 38, n. 3, p. 249-262. Disponível em: http://www.soilsandrocks.com.br/soils-androcks/SR38-3_249-262.pdf. Acesso em 25 de março de 2019.

MELO, Barbara Nardi. *Análise de provas de carga à compressão à luz do conceito de rigidez*. 2009. 250 f. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

Métodos para previsão da capacidade de suporte. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/9014/9014_3.PDF. Acesso em: 10 de março de 2019.

OLIVEIRA, C. R. DE. *Prova de carga em estruturas de concreto*. 2006. 142 f. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

OLIVEIRA, Tales Moreira de. D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2018. Estacas tipo Mini-RAP. Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva (UFV).

PROBST, C.A.; DE AGUIAR, M. F. P.; MENDES, G. C. M.; DE OLIVEIRA, F. H. L. Análise Comparativa de Métodos de Determinação da Capacidade de Carga em Estacas Hélice Contínua com Ensaio de Prova de Carga Estática Realizados em Uberaba-MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19, 2018, Salvador, Anais... Salvador: Instituto Brasileiro de Educação Continuada. 2018. p. 3-3.

RESENDE, A. S.; GIANFORTE, F.; PINHEIRO, J. A.; GOLOMBECK, M. Apresentação de Resultado Recorde em Ensaio Bidirecional, Prova de Carga com Células Expansivas. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 19, 2018, Salvador, Anais... Salvador: [s.n.]. 2018. p. 1-5.

ROCHA, S. A.; GOMES, T. B. G. Análise Geotécnica De Prova De Carga Bidirecional Com Célula Expansiva Hidrodinâmica Arcos e P&P. 2017. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco, MG.

SEPINE, L. D. Aplicação do planejamento de experimentos (DOE) em cubas eletrolíticas visando a redução do consumo de energia. 32 f. 2013. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2013.

SOUSA, W. E.; AMORA, M. A. DE R. *Análise De Uma Prova De Carga Estática Do Tipo Lenta Em Microestaca Arcos*. 2018. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco, MG.

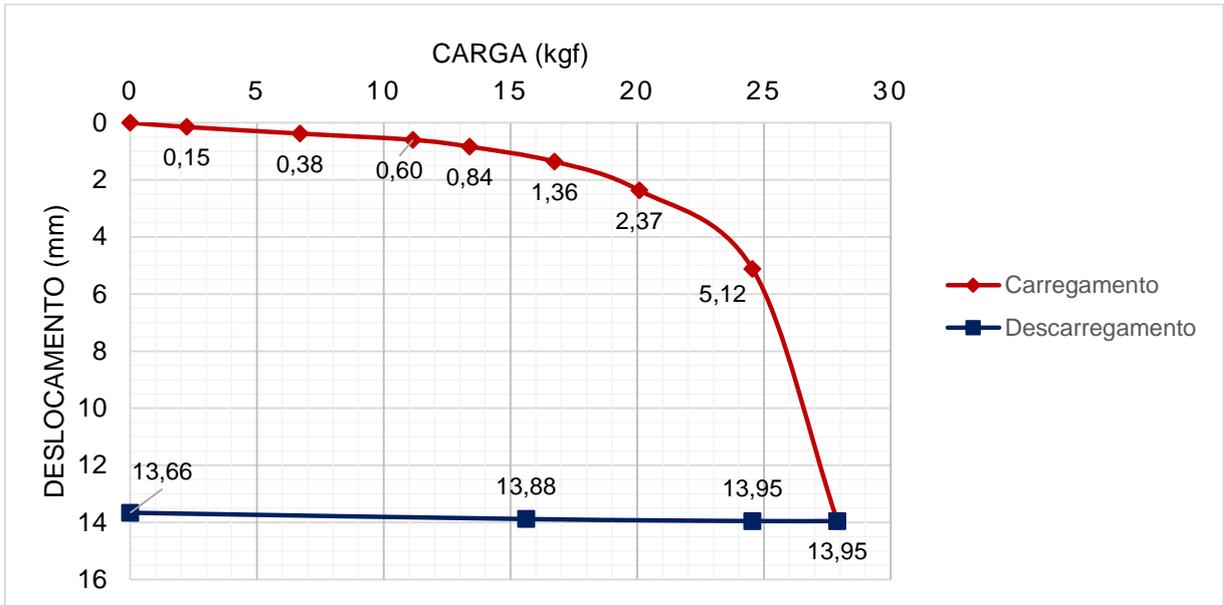
SUPORTE MINITAB®, Testes de normalidade. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/test-for-normality/>. Acesso em 05 de abril de 2019

TAVARES, M. V. C. F. *Avaliação Experimental de Fundações Estaqueadas em Modelos 1g*. 155 f. 2012. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

VELLOSO, D. de A.; LOPES, F. de R. **Fundações**. nova ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010, v.2.

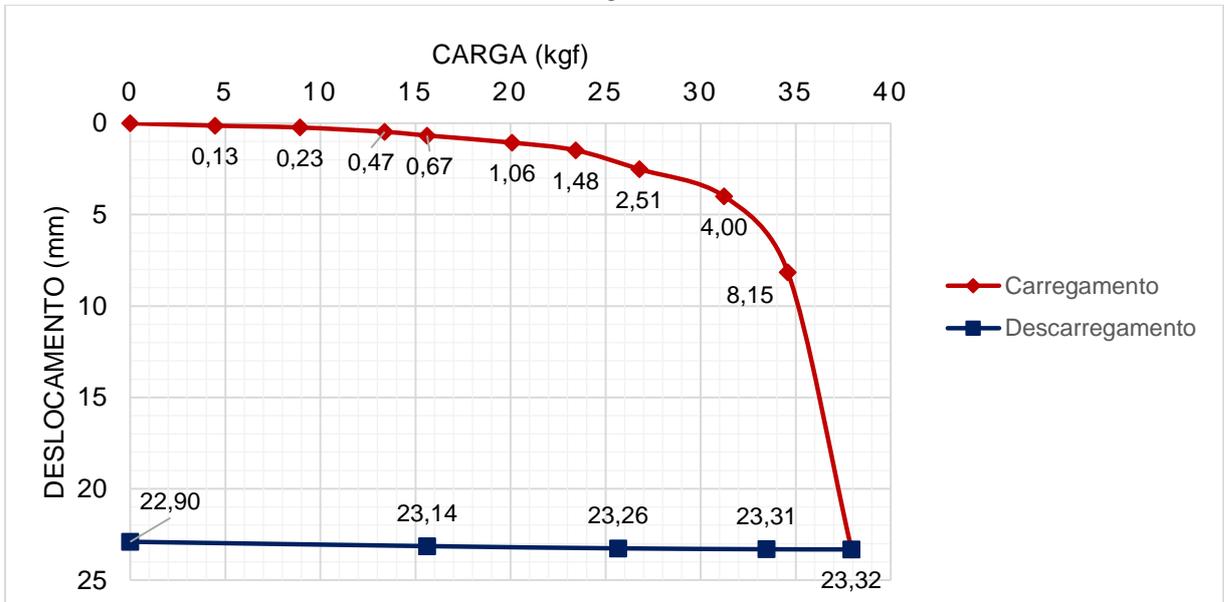
APÊNDICE A – Curvas Carga x Deslocamento das PCC

Gráfico 6 - Curva Carga x Deslocamento C1



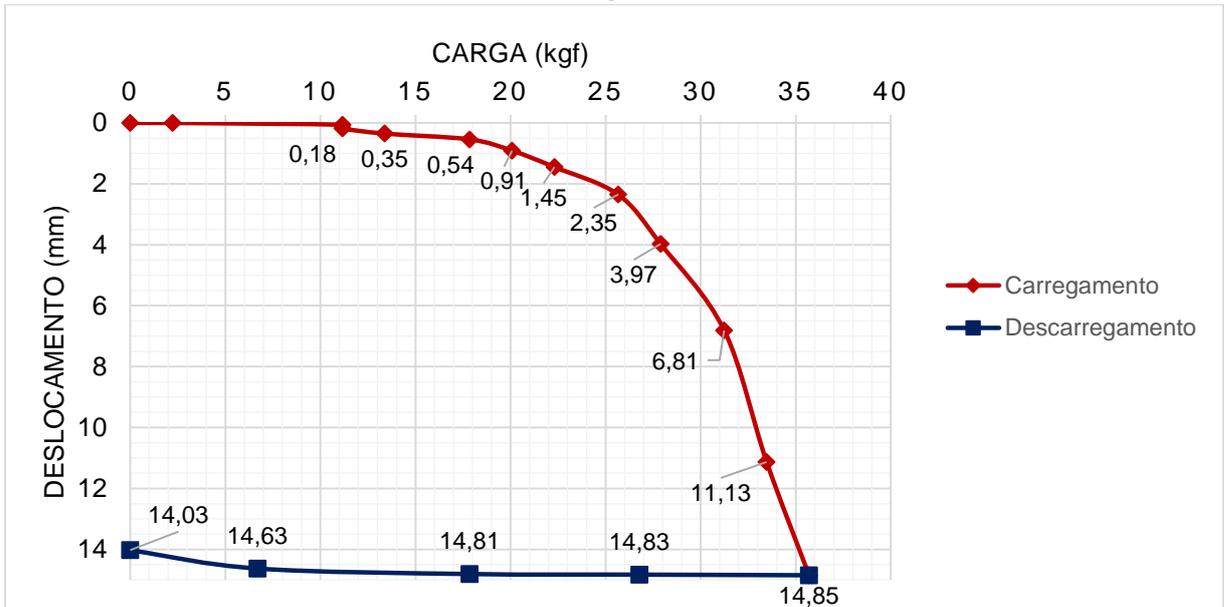
Fonte: autoria própria.

Gráfico 7 - Curva Carga x Deslocamento C2



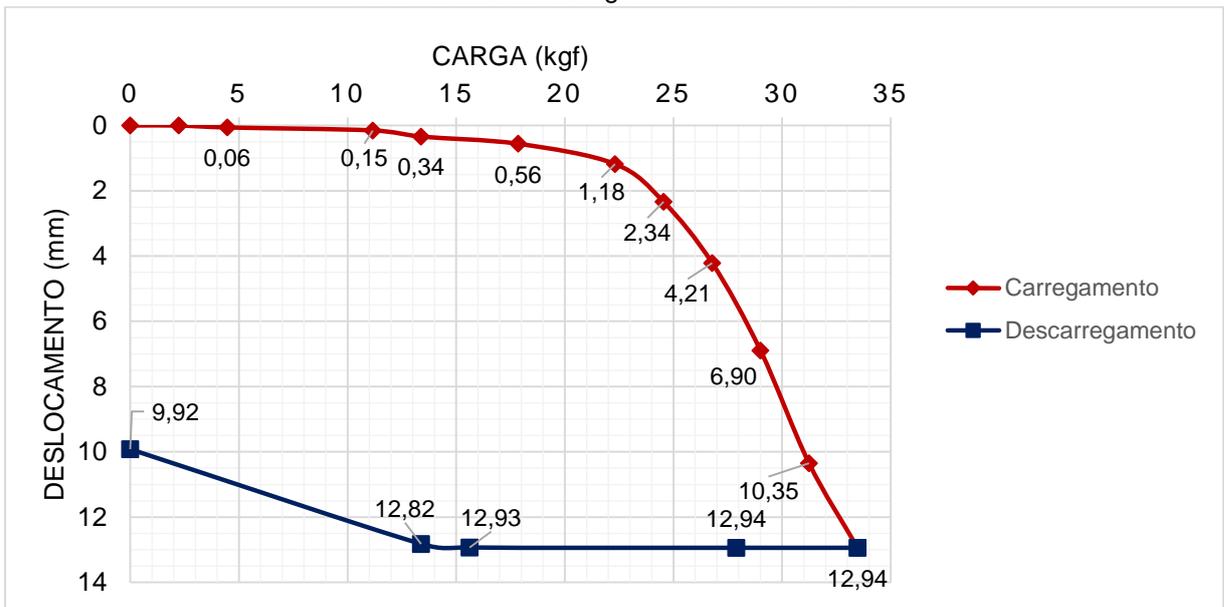
Fonte: autoria própria.

Gráfico 8 - Curva Carga x Deslocamento C3



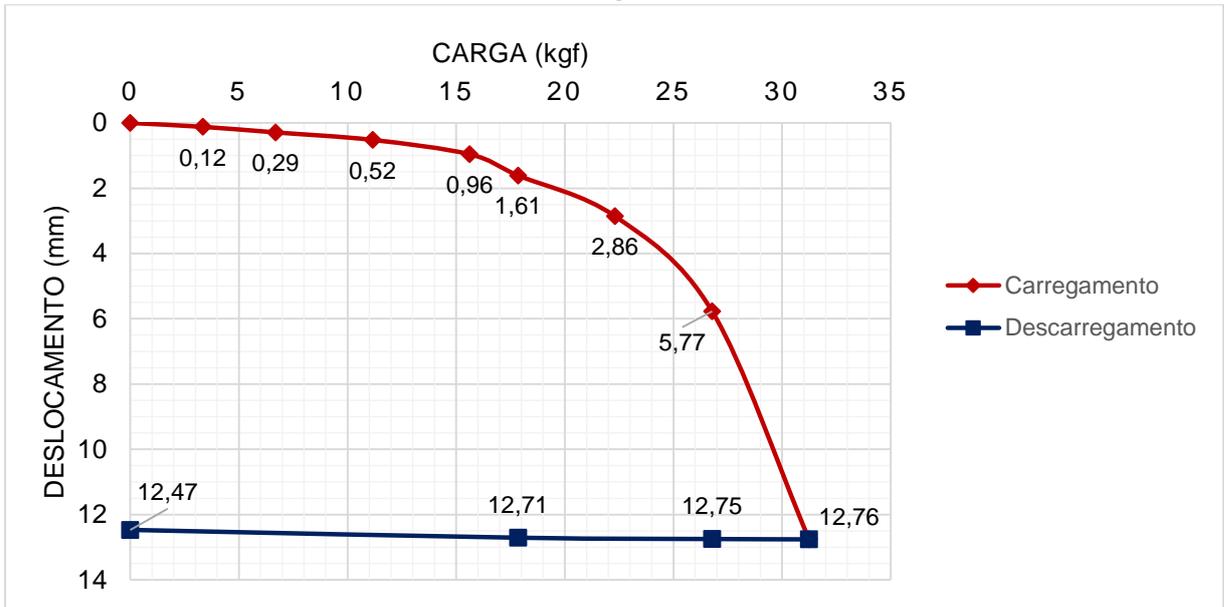
Fonte: autoria própria.

Gráfico 9 - Curva Carga x Deslocamento C4



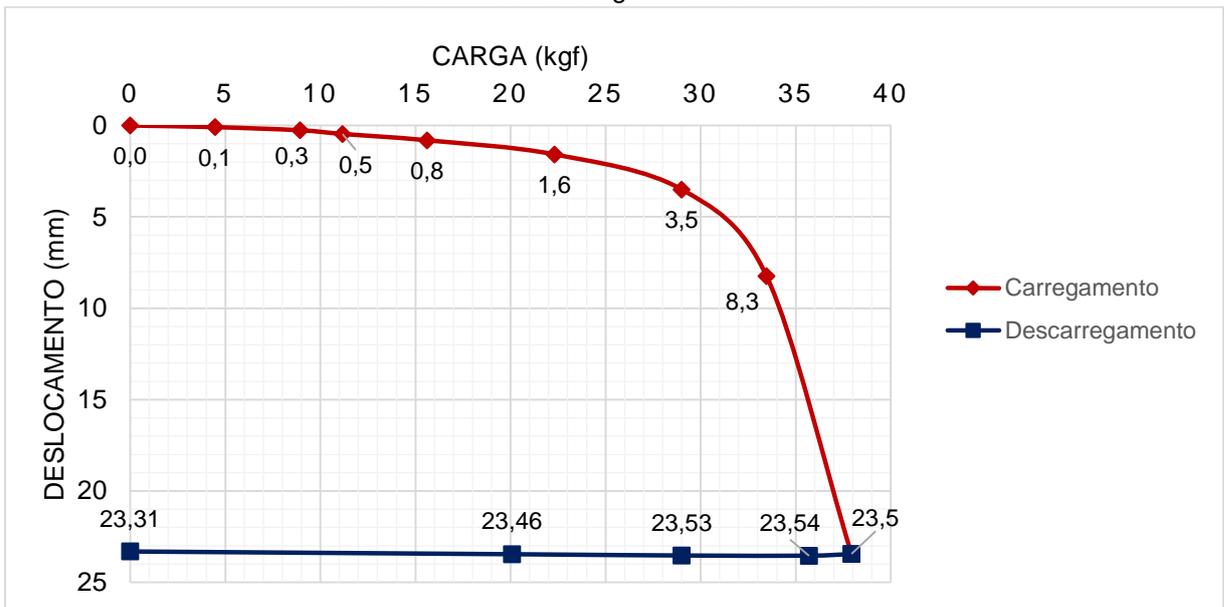
Fonte: autoria própria.

Gráfico 10 - Curva Carga x Deslocamento C5



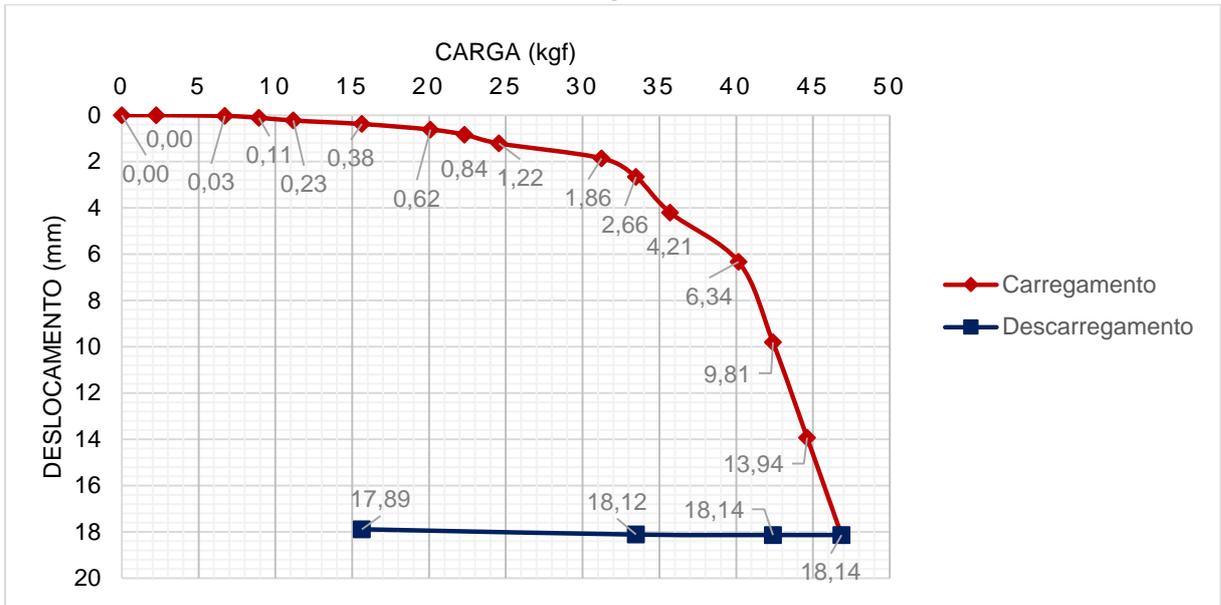
Fonte: autoria própria.

Gráfico 11 - Curva Carga x Deslocamento C6



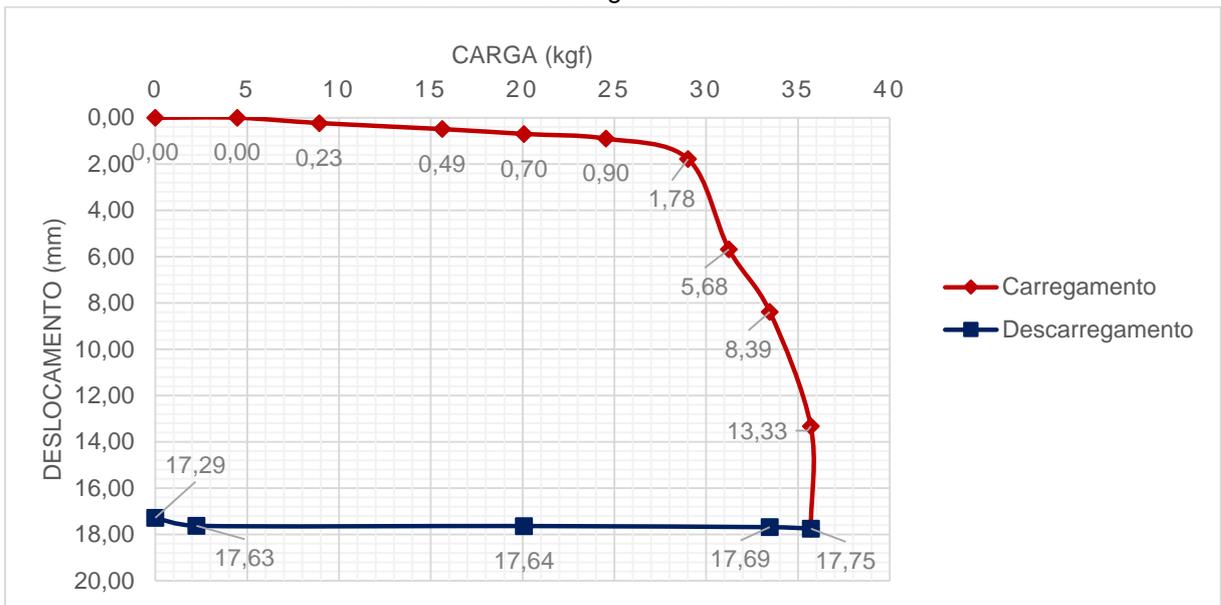
Fonte: autoria própria.

Gráfico 12 - Curva Carga x Deslocamento C1"



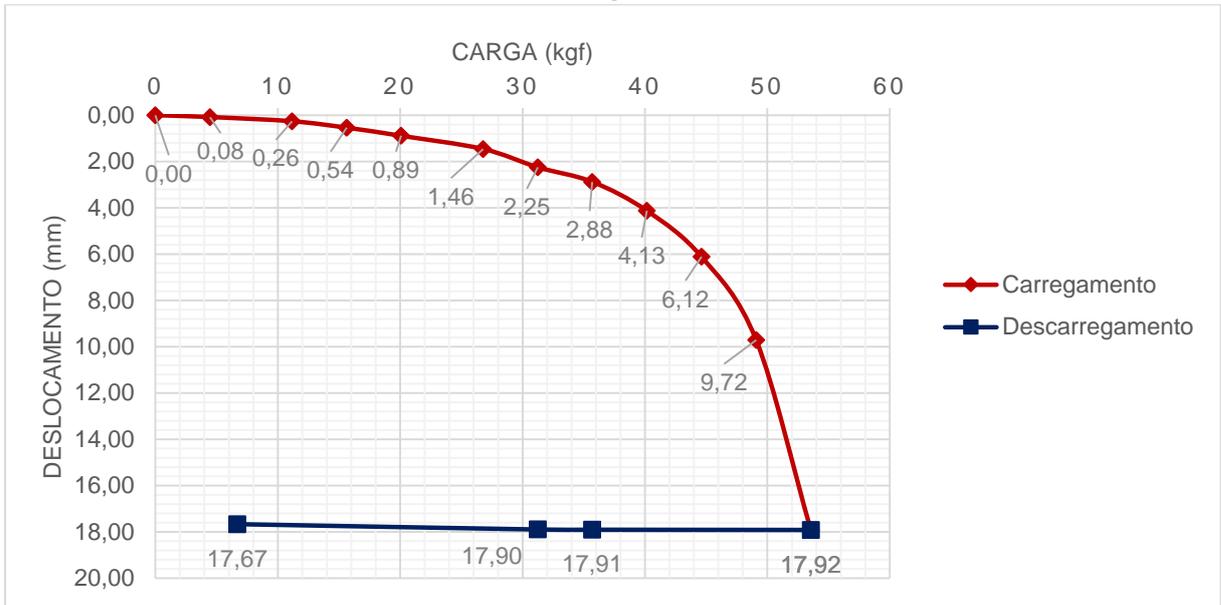
Fonte: autoria própria.

Gráfico 13 - Curva Carga x Deslocamento C2"



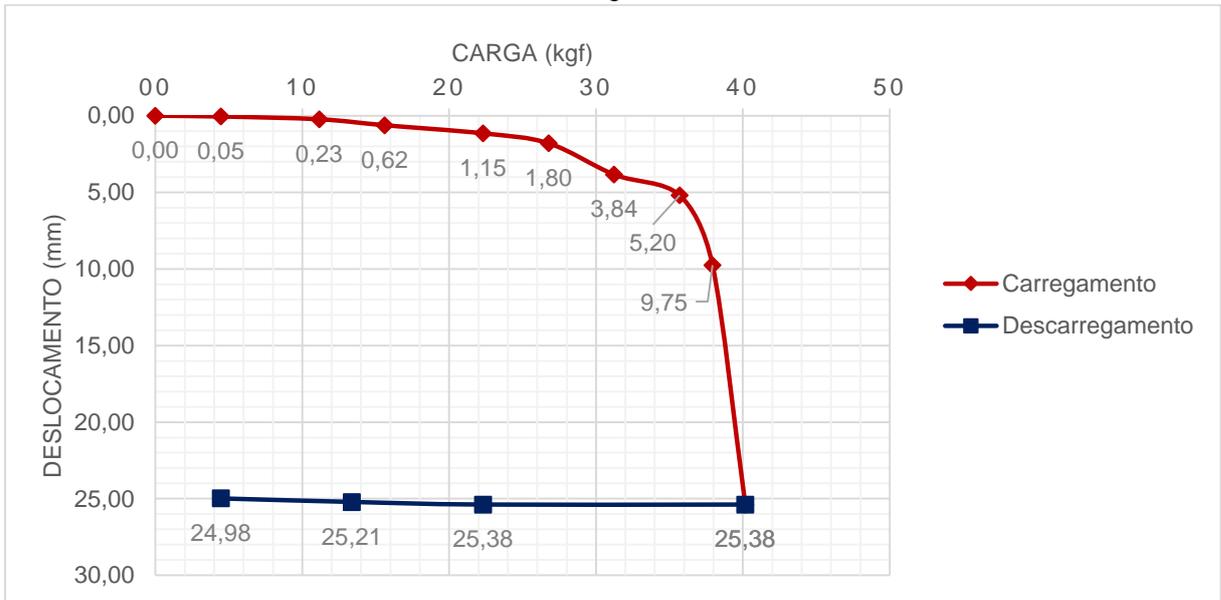
Fonte: autoria própria.

Gráfico 14 - Curva Carga x Deslocamento C3"



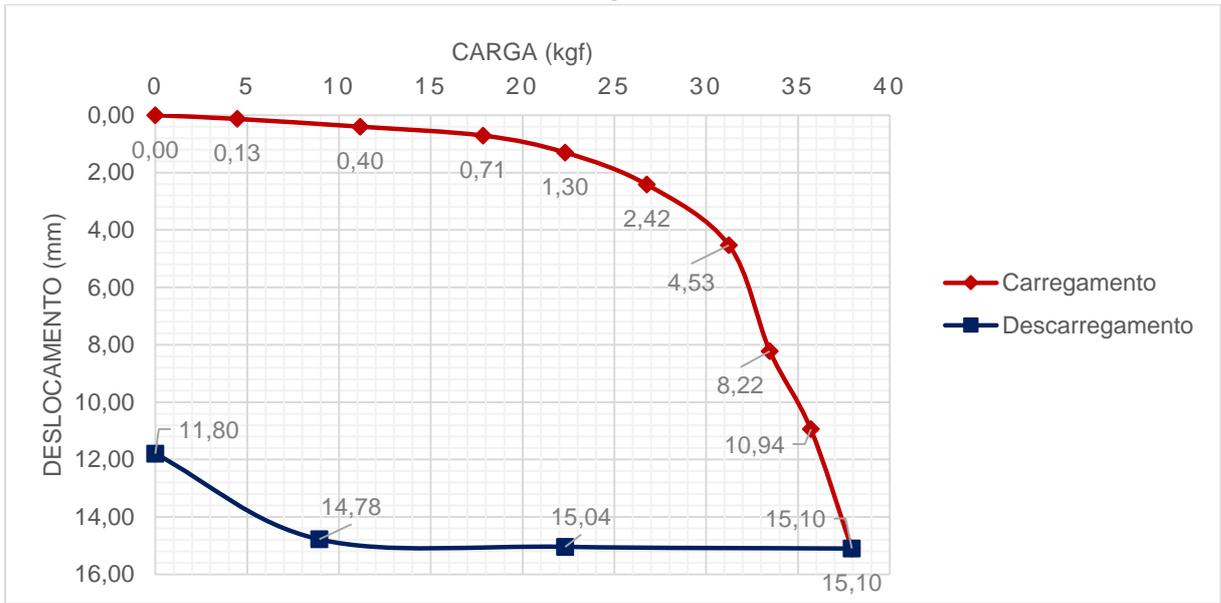
Fonte: autoria própria.

Gráfico 15 - Curva Carga x Deslocamento C4"



Fonte: autoria própria.

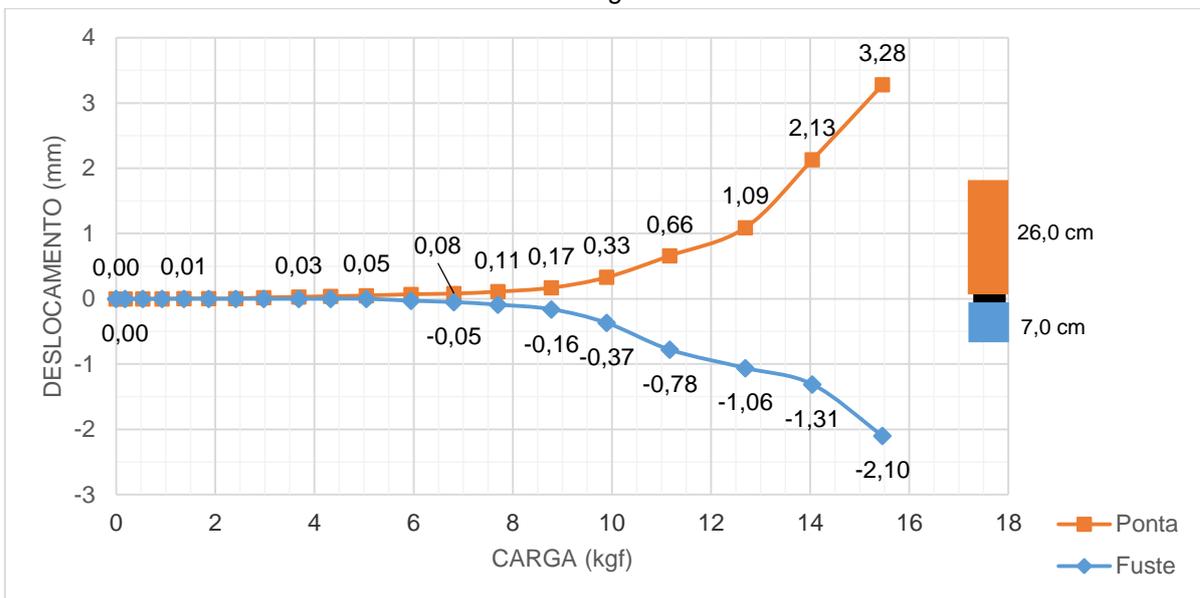
Gráfico 16 - Curva Carga x Deslocamento C5"



Fonte: autoria própria.

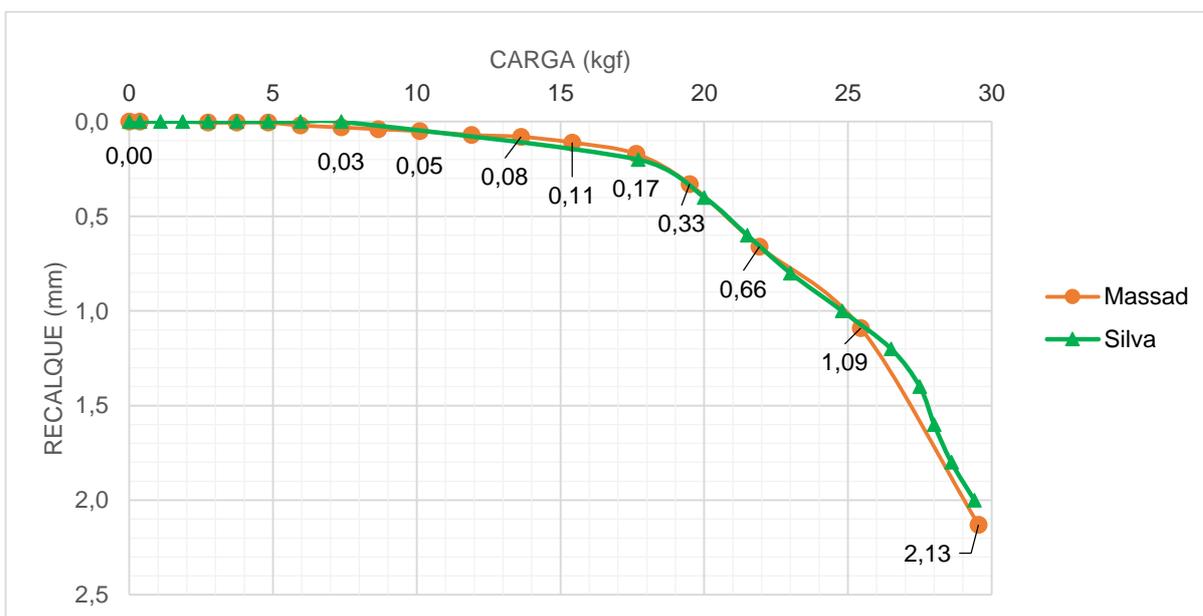
APÊNDICE B – Curvas Carga x Deslocamento das PCB

Gráfico 17 - Curva Carga x Deslocamento B1



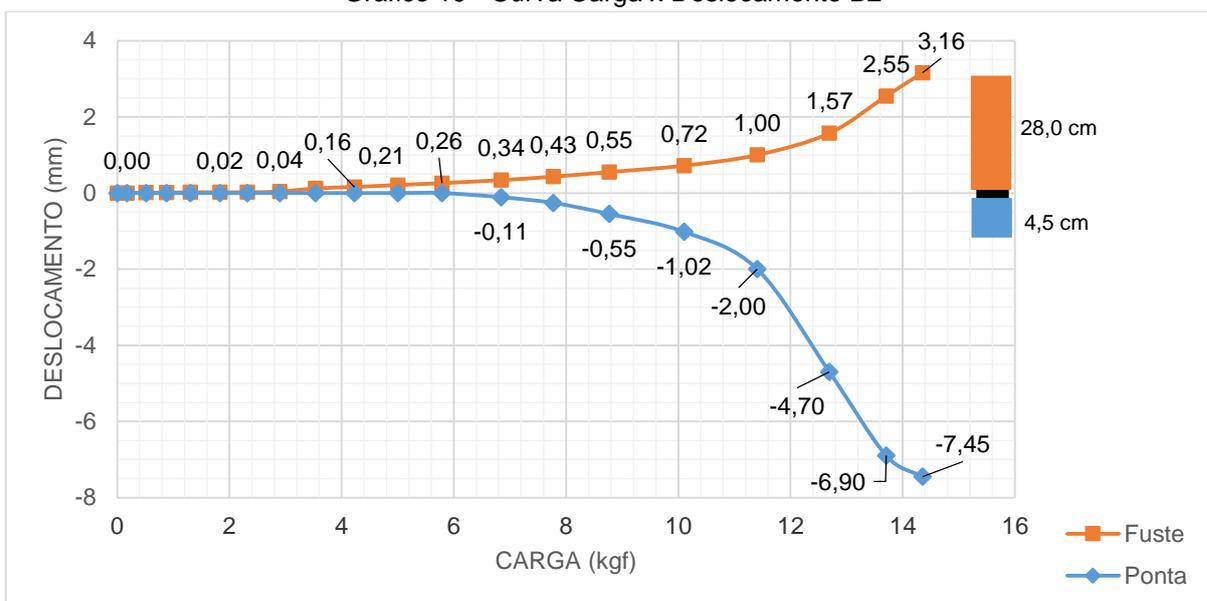
Fonte: autoria própria.

Gráfico 18 - Curvas Ajustada e Equivalente B1



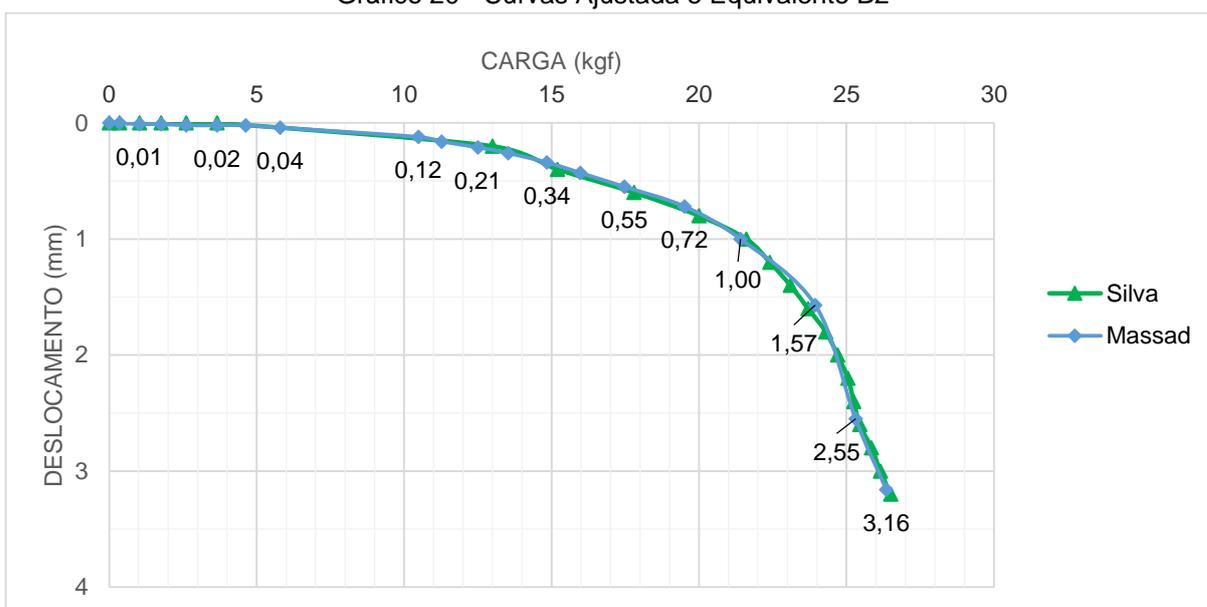
Fonte: autoria própria.

Gráfico 19 - Curva Carga x Deslocamento B2



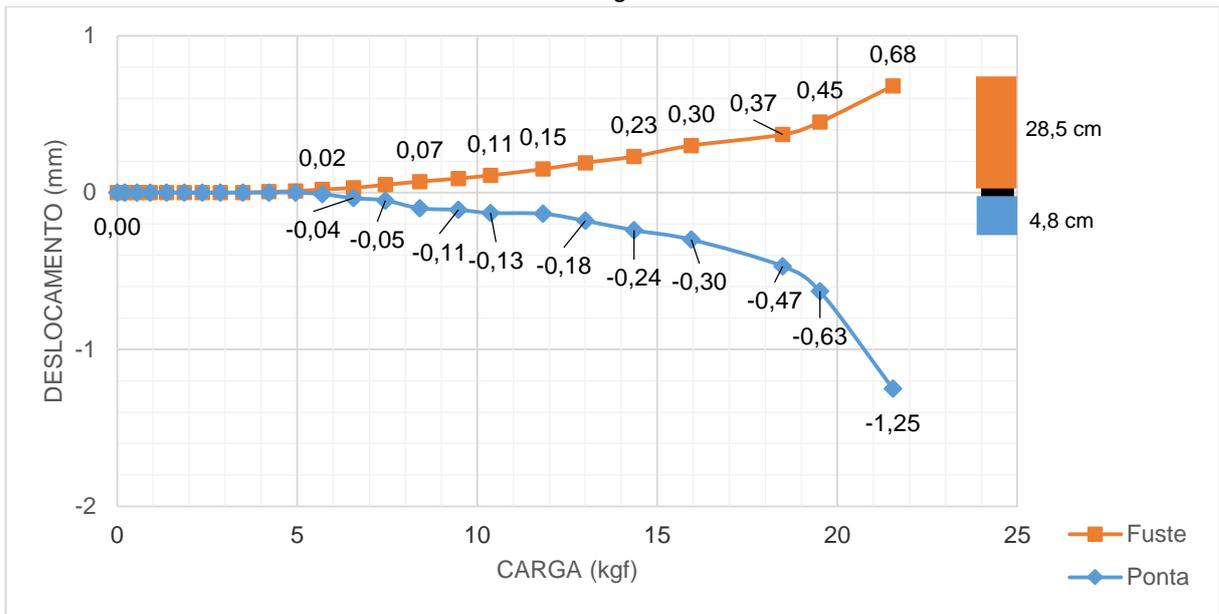
Fonte: autoria própria.

Gráfico 20 - Curvas Ajustada e Equivalente B2



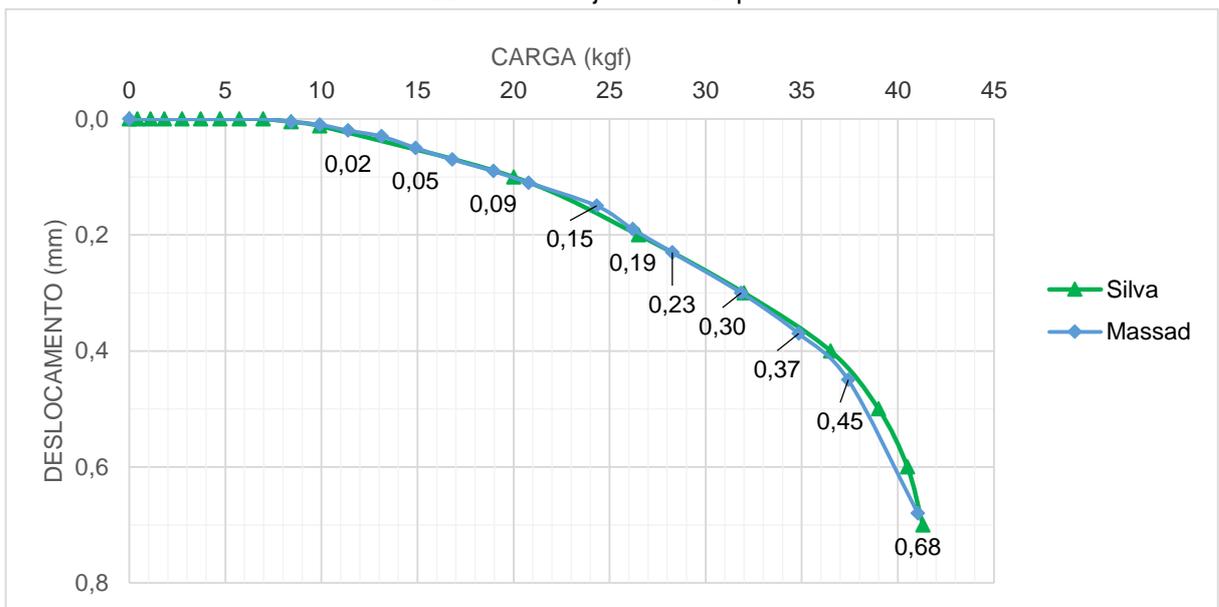
Fonte: autoria própria.

Gráfico 21 - Curva Carga x Deslocamento B3



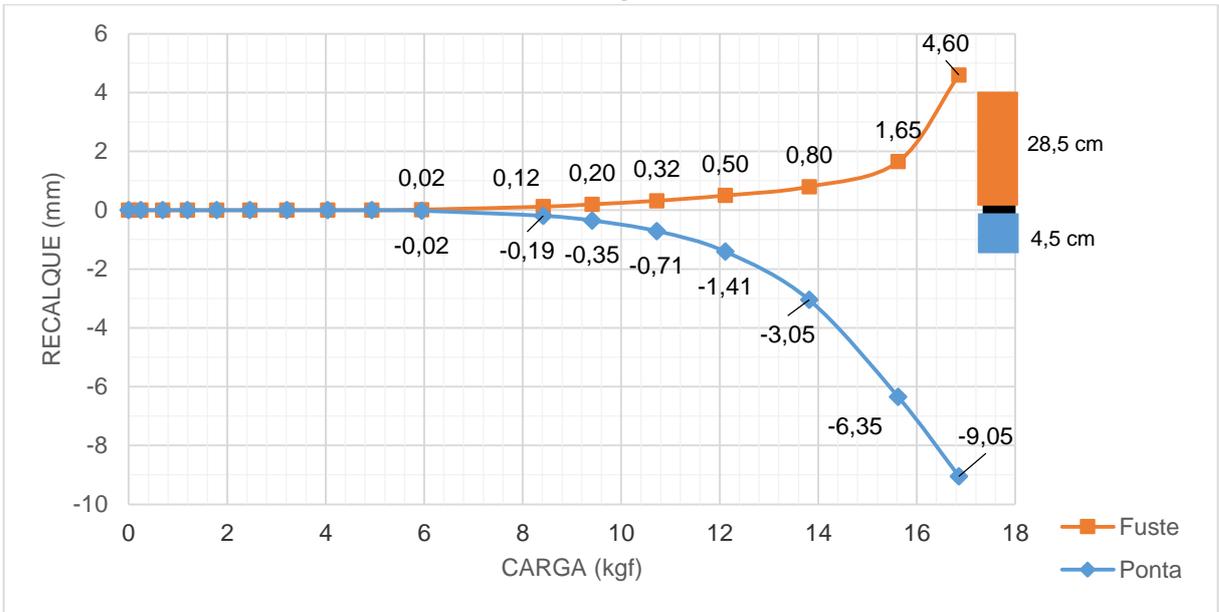
Fonte: autoria própria.

Gráfico 22 - Curvas Ajustada e Equivalente B3



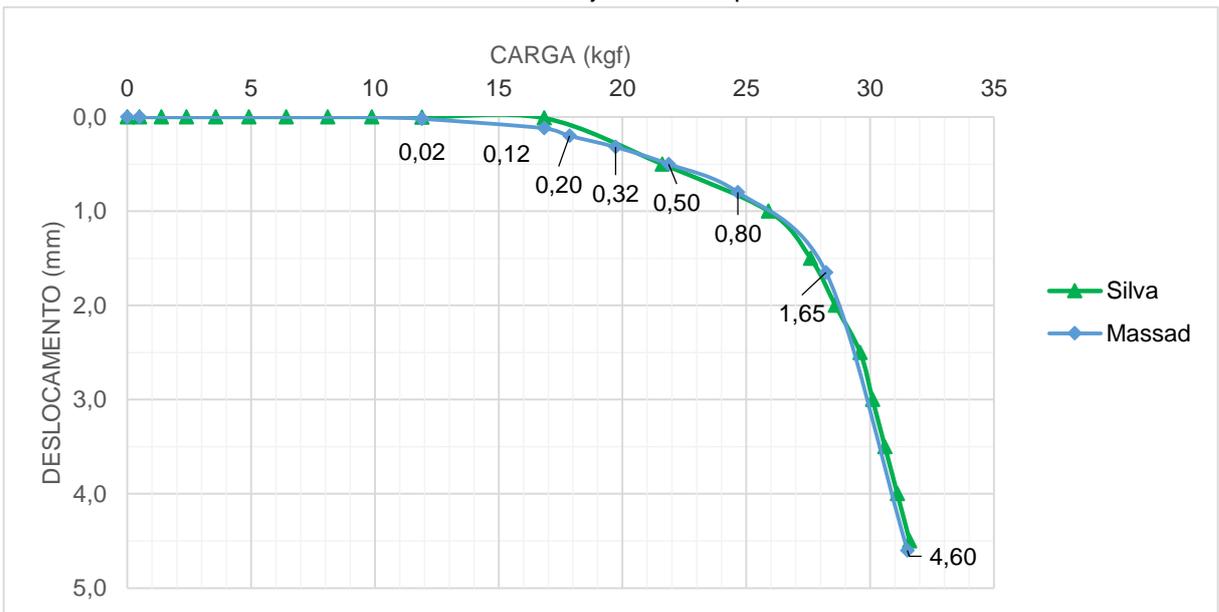
Fonte: autoria própria.

Gráfico 23 - Curvas Carga x Deslocamento B4



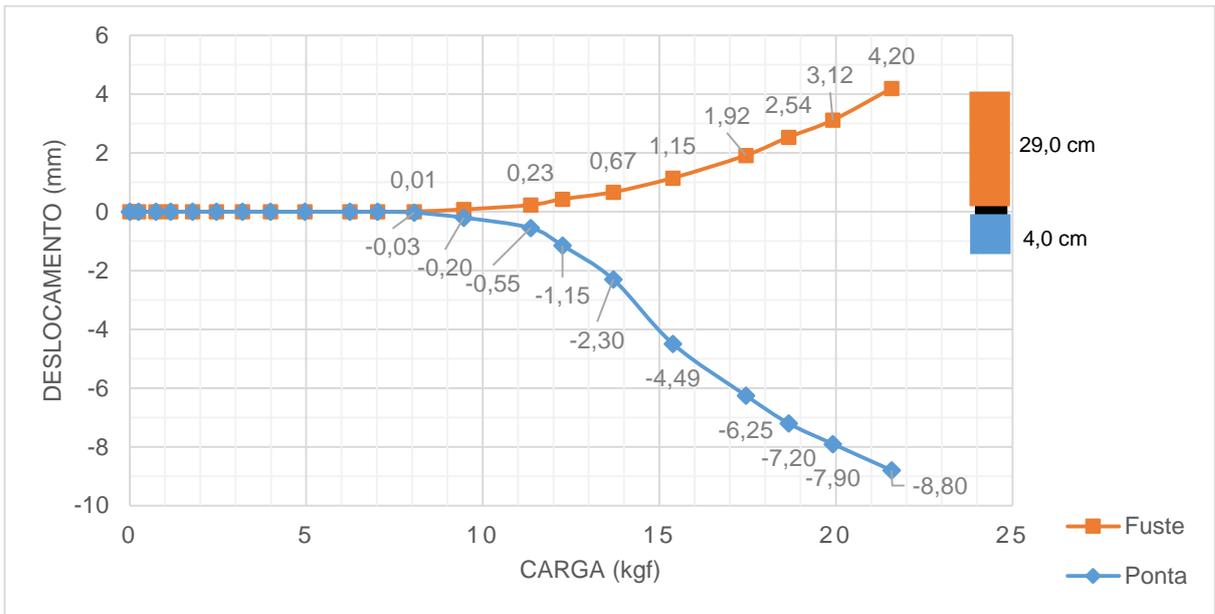
Fonte: autoria própria.

Gráfico 24 - Curvas Ajustada e Equivalente B4



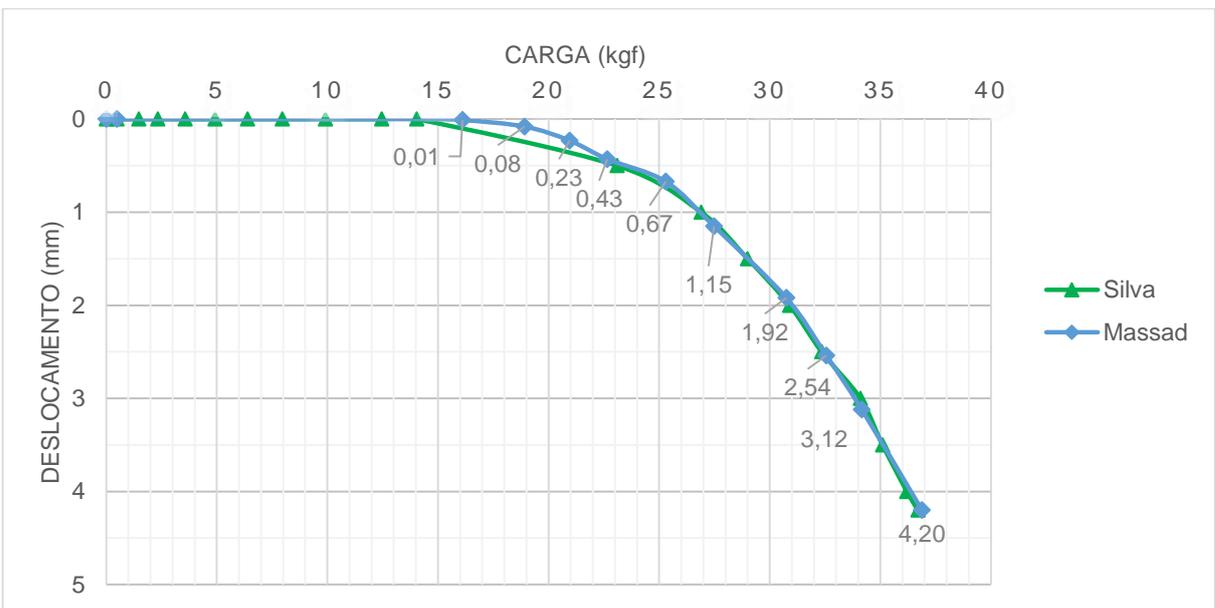
Fonte: autoria própria.

Gráfico 25 - Curvas Carga x Deslocamento B1"



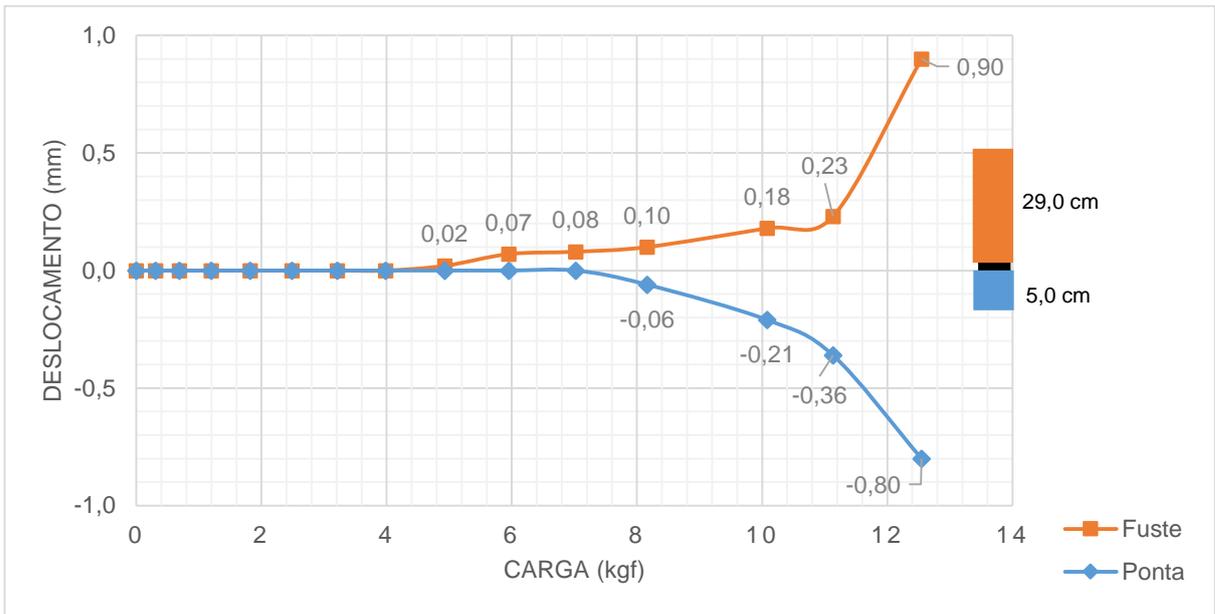
Fonte: autoria própria.

Gráfico 26 - Curvas Ajustada e Equivalente B1"



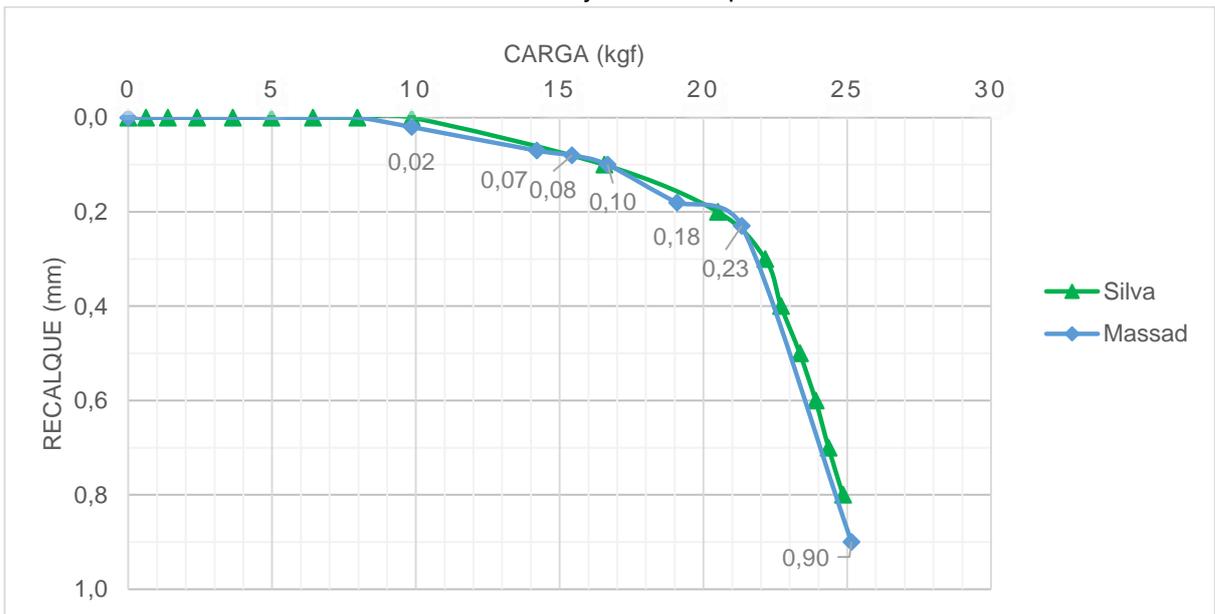
Fonte: autoria própria.

Gráfico 27 - Curvas Carga x Deslocamento B2"



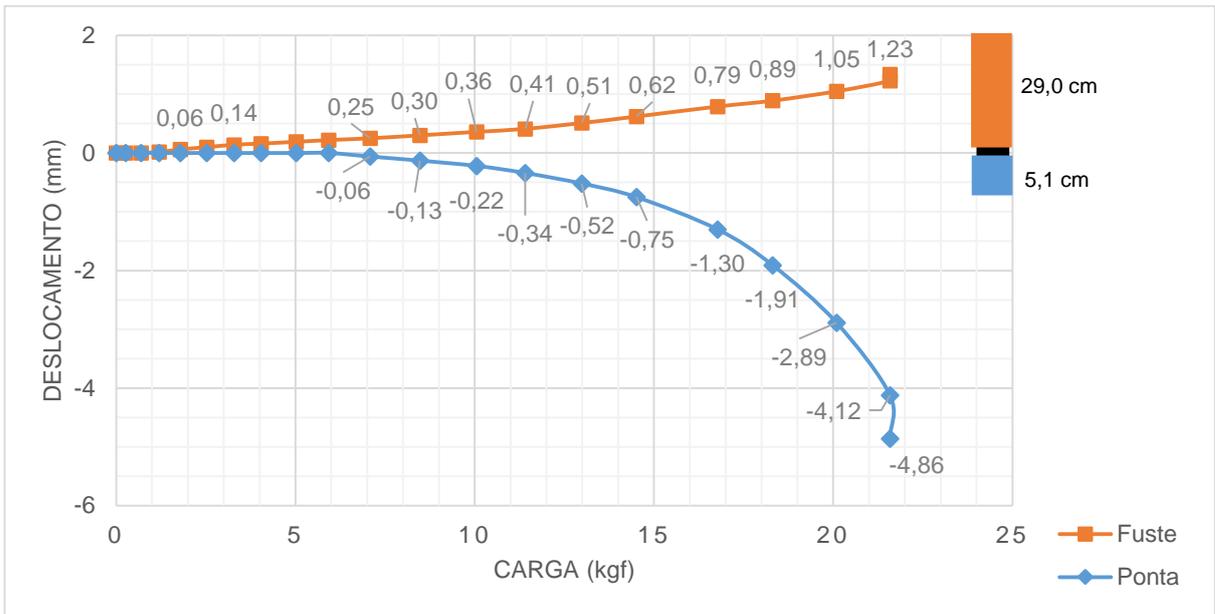
Fonte: autoria própria.

Gráfico 28 - Curvas Ajustada e Equivalente B2"



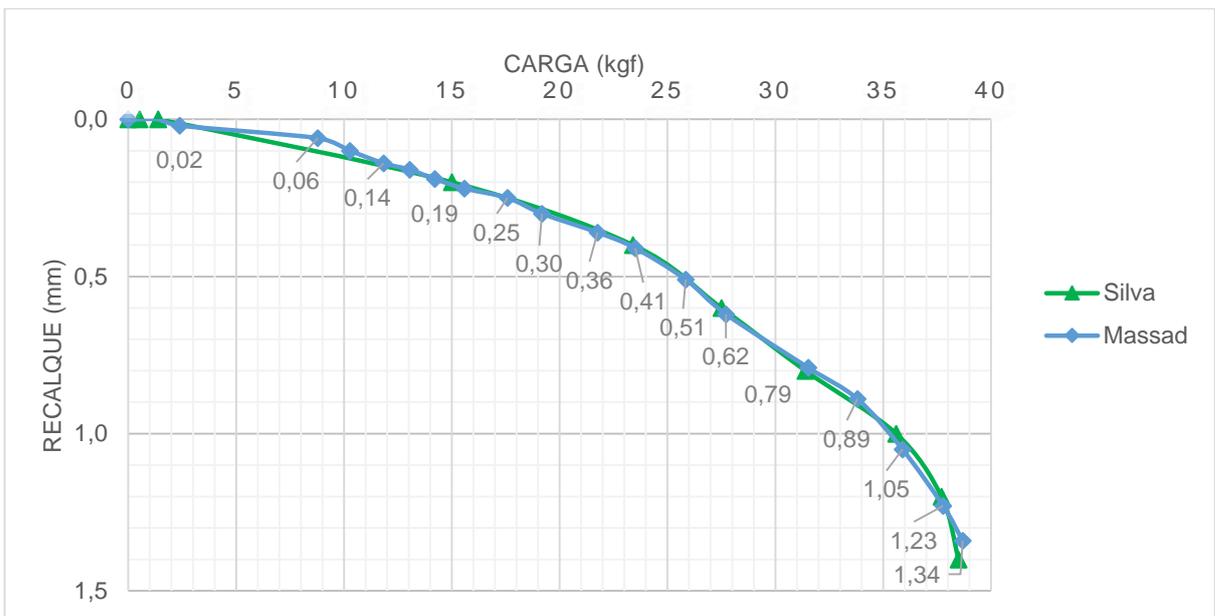
Fonte: autoria própria.

Gráfico 29 - Curvas Carga x Deslocamento B3"



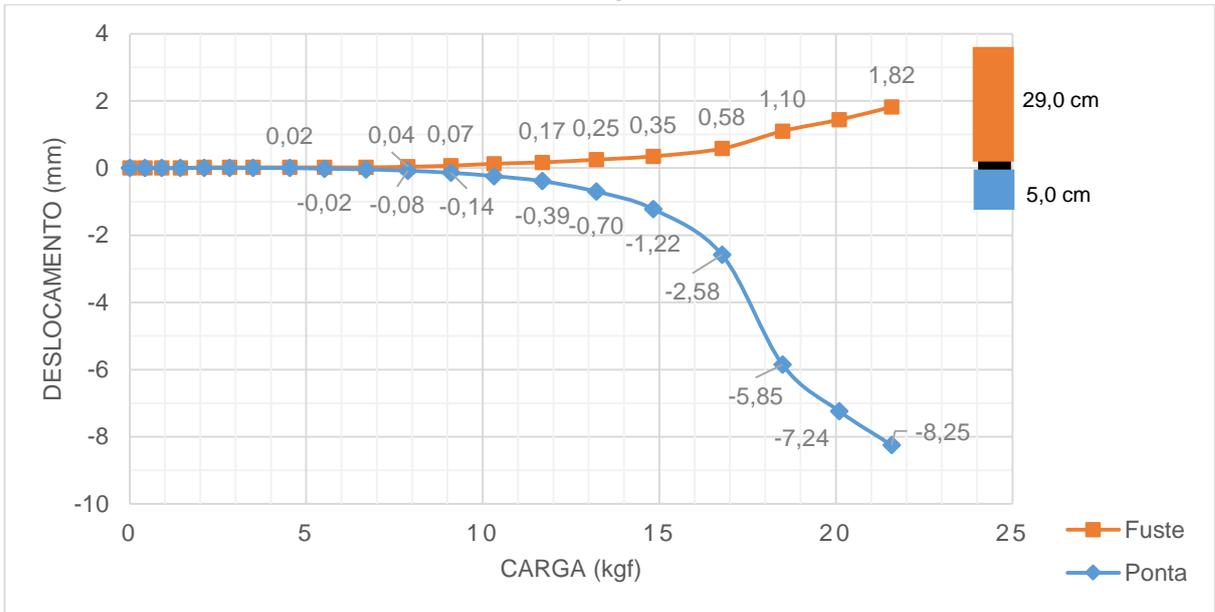
Fonte: autoria própria.

Gráfico 30 - Curvas Ajustada e Equivalente B3"



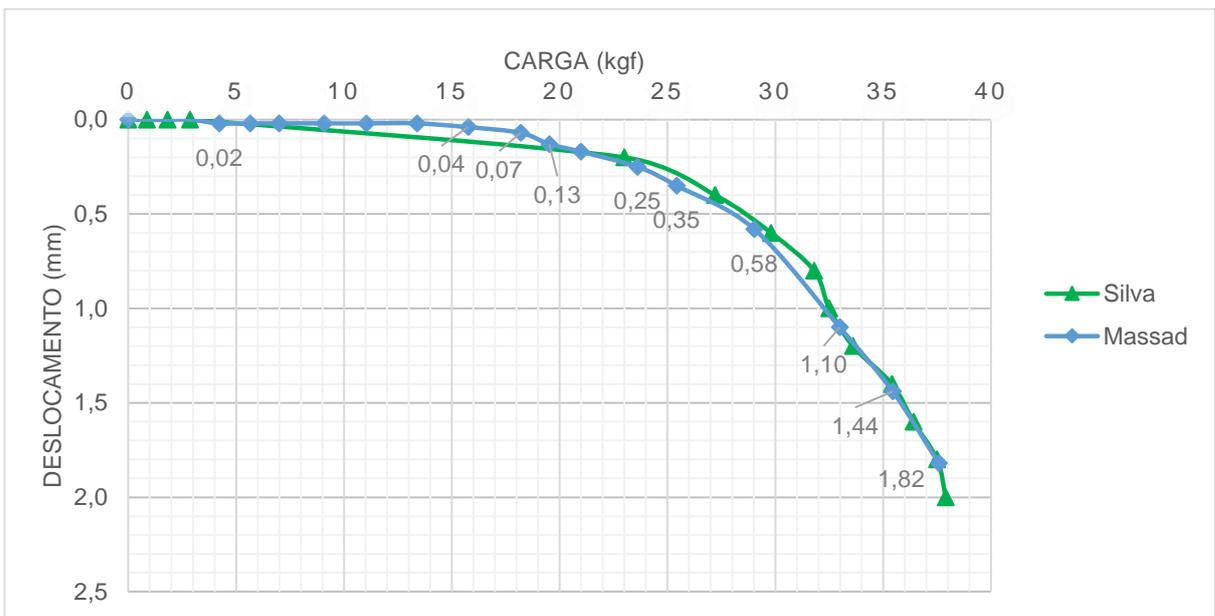
Fonte: autoria própria.

Gráfico 31 - Curvas Carga x Deslocamento B4"



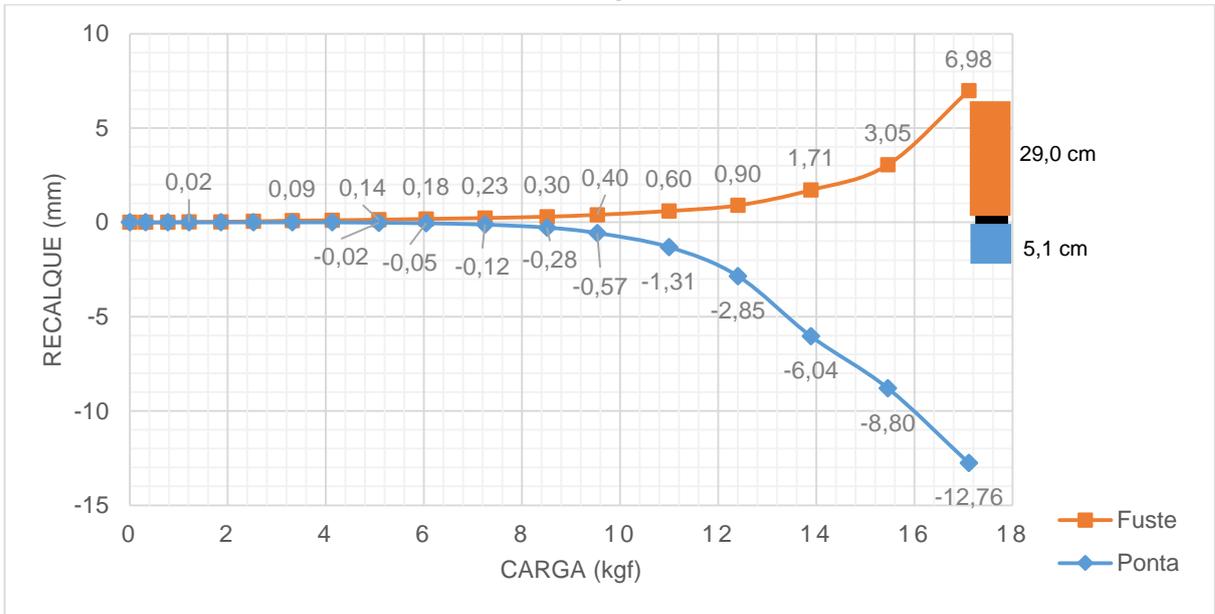
Fonte: autoria própria.

Gráfico 32 - Curvas Ajustada e Equivalente B4"



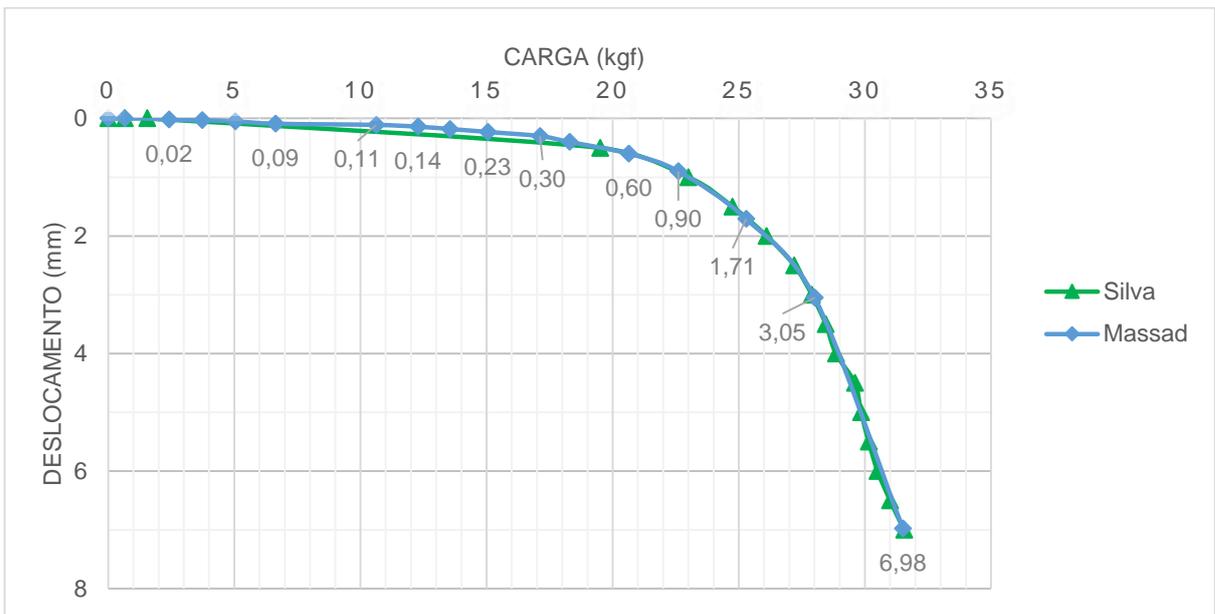
Fonte: autoria própria.

Gráfico 33 - Curvas Carga x Deslocamento B5"



Fonte: autoria própria.

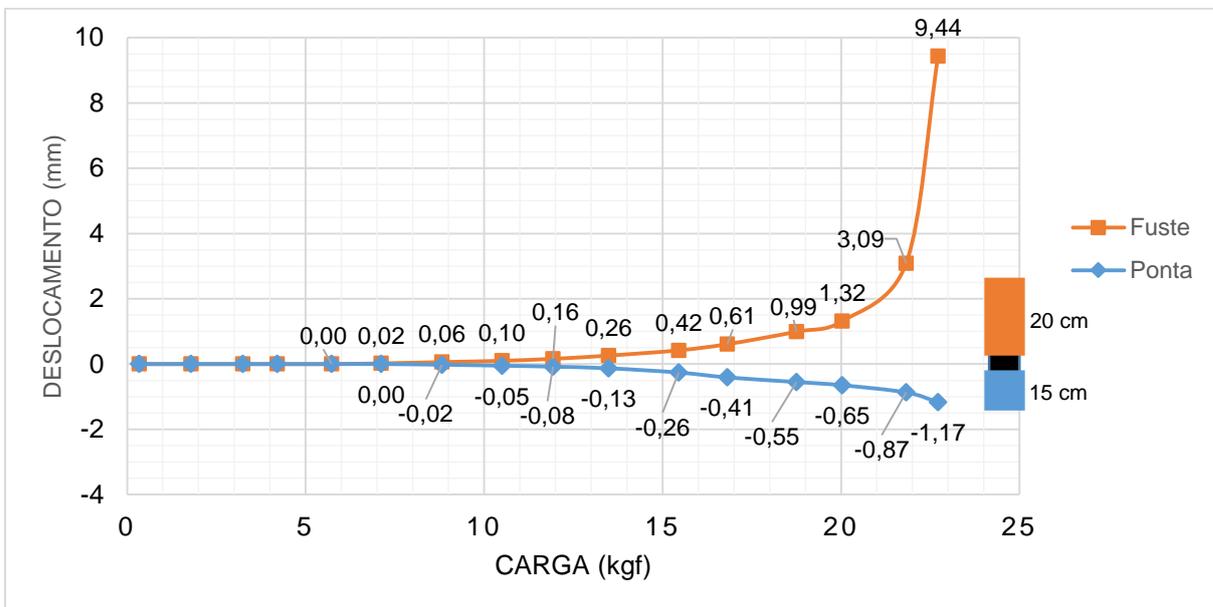
Gráfico 34 - Curvas Ajustada e Equivalente B5"



Fonte: autoria própria.

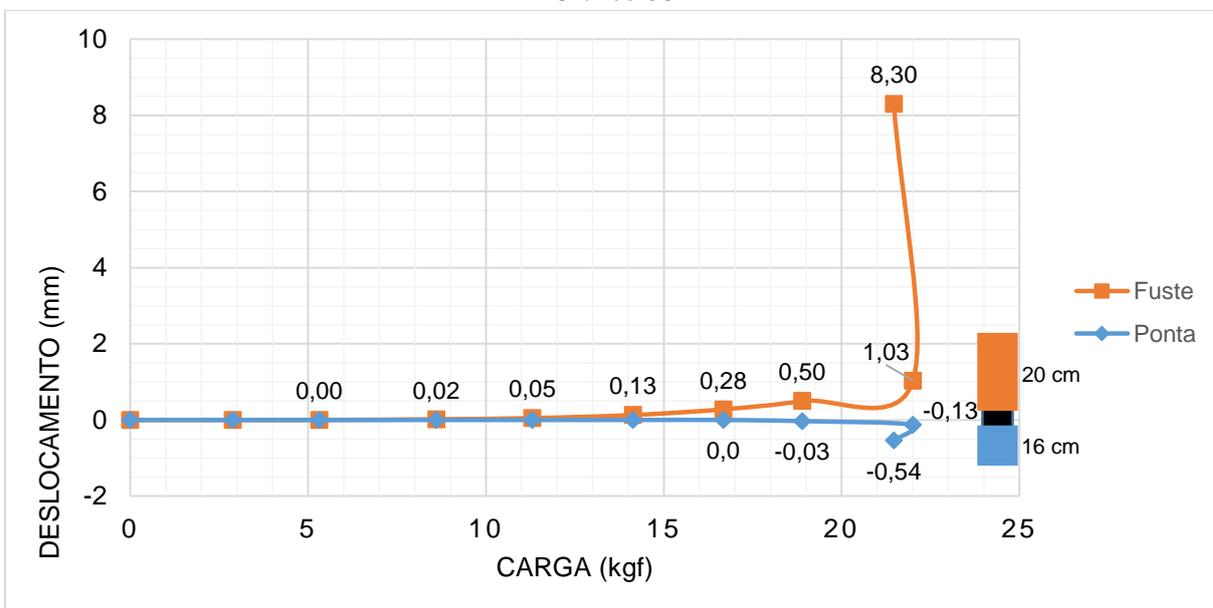
APÊNDICE C – Resultados das provas de carga de calibração dos modelos

Gráficos 35 a 37 - Curva Carga x Deslocamento de provas de carga bidirecionais



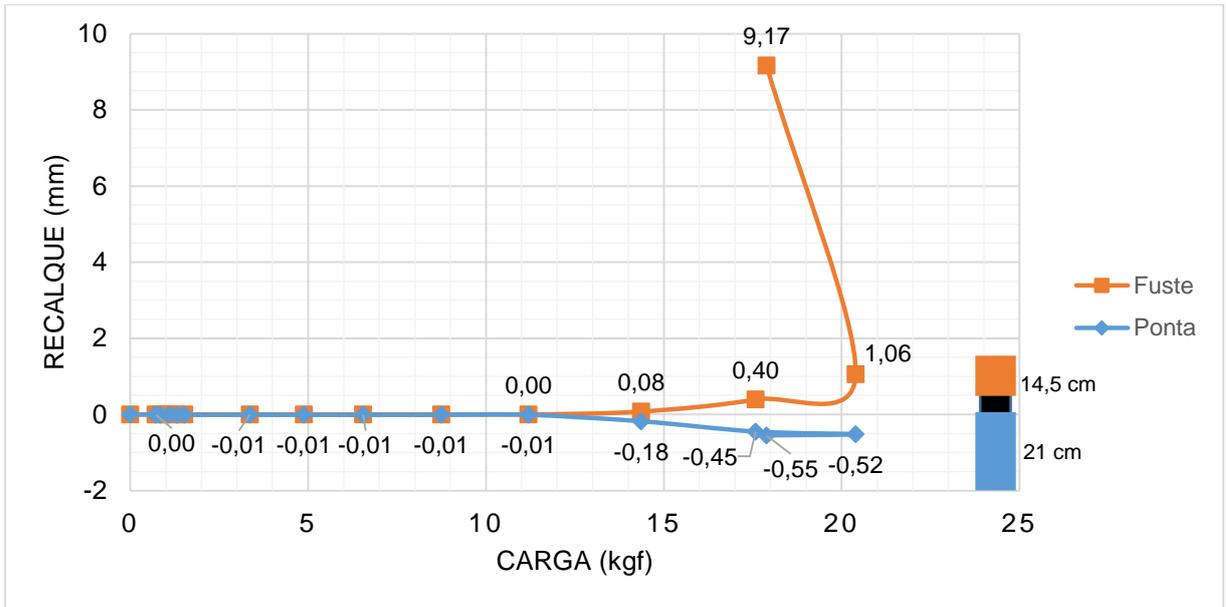
Fonte: autoria própria.

Gráfico 36



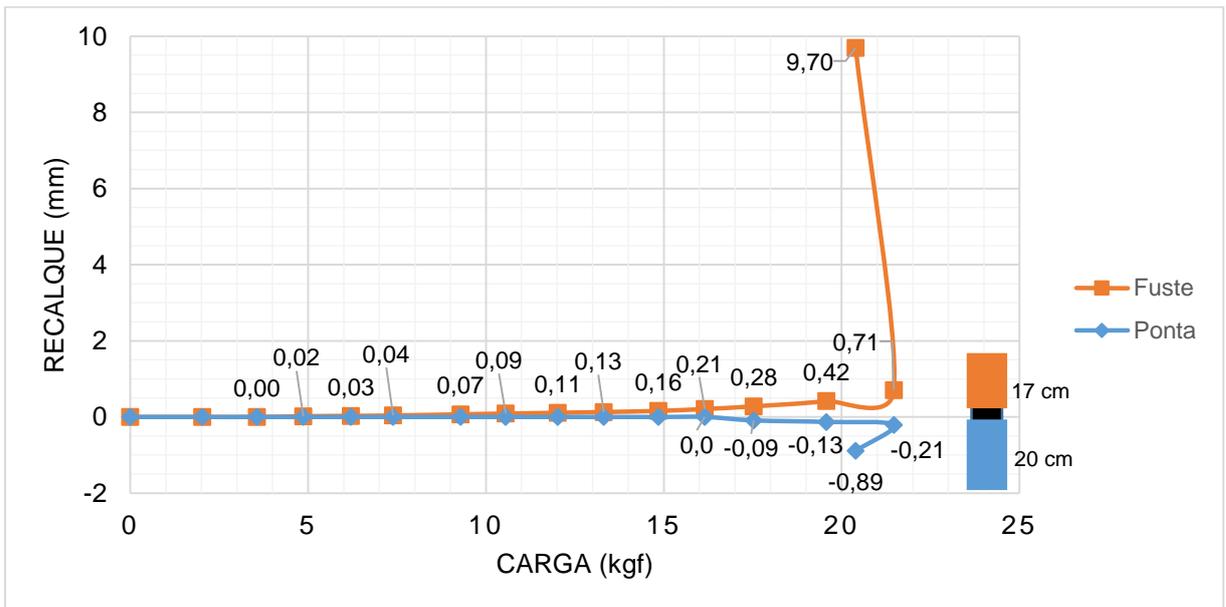
Fonte: autoria própria.

Gráfico 37



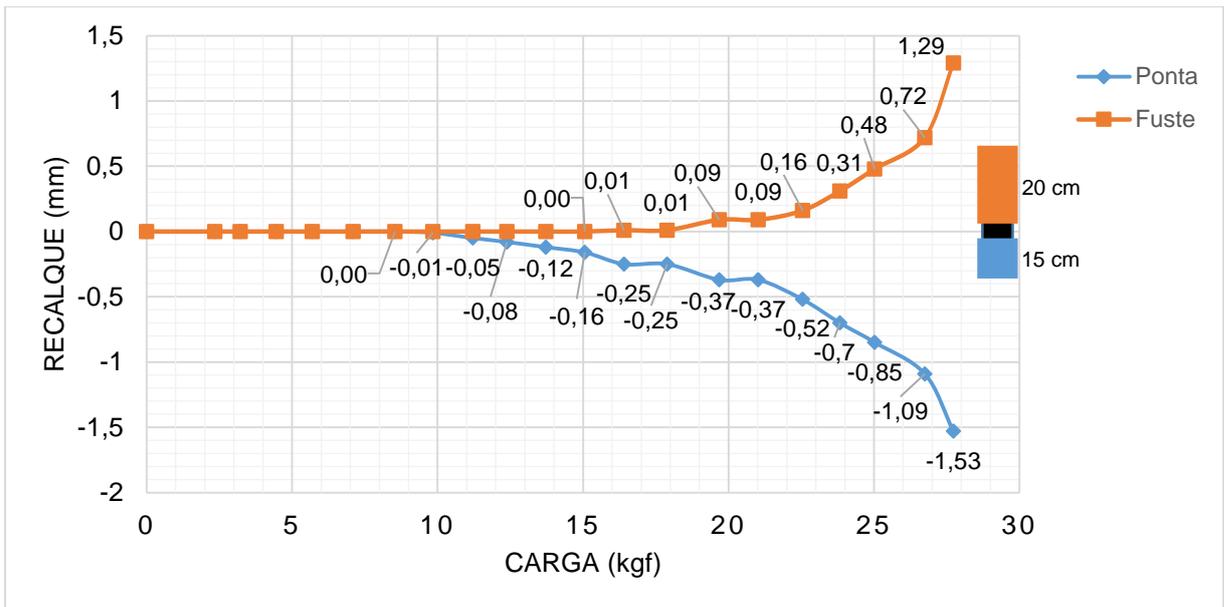
Fonte: autoria própria.

Gráfico 38



Fonte: autoria própria.

Gráfico 39



Fonte: autoria própria.