



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



LUCAS BELLINI MACHADO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
**ANÁLISE NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE FUNDAÇÕES EM
RADIER ESTAQUEADO**

UBERLÂNDIA - MG
2020

LUCAS BELLINI MACHADO

**ANÁLISE NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE FUNDAÇÕES EM RADIER
ESTAQUEADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de
Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia

UBERLÂNDIA – MG
2020

LUCAS BELLINI MACHADO

**ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE FUNDAÇÕES EM RADIER
ESTAQUEADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal
de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção
do título de bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia
Presidente da Banca – Orientador

Prof^a. Dr^a. Eliane Betânia Carvalho Costa
Membro

MSc. Rodrigo Álvares de Araújo Melo
Membro

Aluno Lucas Bellini Machado
Orientando

UBERLÂNDIA – MG
2020

DEDICATÓRIA

À população brasileira que trabalha de forma justa e honesta. Prometo envidar meus esforços a fim de aplicar meus conhecimentos para o crescimento da minha nação.

“Sobre a imensa Nação Brasileira,
Nos momentos de festa ou de dor,
Paira sempre, sagrada bandeira,
Pavilhão da Justiça e do Amor!”

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por sempre me iluminar nos momentos de dificuldades e me fornecer forças para continuar lutando por meus objetivos.

Ao meu orientador, Prof.^a Dr. Jean Rodrigo Garcia, pela oportunidade de realização dessa pesquisa. Agradeço pelos ensinamentos, sabedoria compartilhada, pelos caminhos e oportunidades que me abriu e por toda a confiança que me foi dada. Agradeço, também, pela atenção, paciência e amizade.

À empresa dinamarquesa *Optum Computational Engineering* por conceder a licença acadêmica do *software OPTUM G3 2020* à Universidade Federal de Uberlândia.

Ao corpo de funcionários e ex-funcionários da FECIV-UFU e IG-UFU: docentes, secretários, técnicos, orientadores e todos os outros que me auxiliaram com carinho e atenção e acreditaram em mim.

Ao Prof. Dr. Paulo Cabaña Guterres que acreditou em meu potencial e confiou em meu trabalho construindo pontes para que eu pudesse atravessar e expandir minhas possibilidades. Por ter me mandado mensagens de carinho e apoio durante toda a minha estadia em Portugal e até hoje, as quais foram muito importantes para que me mantivesse estabilizado.

Aos funcionários do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, Lisboa, Portugal. Por partilharem conhecimentos sem restrição e cuidarem de mim com tanto carinho em meu estágio no exterior. Em especial à Eng.^a Dra. Joana Carreto, minha orientadora e supervisora de estágio no laboratório a quem tenho muita admiração e respeito e à Eng.^a Dra. Laura Caldeira por me possibilitar um crescimento pessoal e profissional incalculável.

Ao corpo de funcionários da Teleco Engenharia: ao meu supervisor Fernando Azara Tavares, quem confiou a mim a possibilidade de estagiar, e em especial ao mestre de obras José Fábio de Brito por todas as conversas e ensinamentos que me foram passadas e também a abertura para que eu pudesse transmitir tudo que pude inclusive aos serventes Ronan e Daniel pela amizade.

Às minhas famílias: Bellini, Machado, Félix e aos Coelho que sempre me apoiaram durante toda a minha trajetória, sempre orando para que meus projetos pessoais se concretizassem.

Em particular à minha mãe Maria Teresa Cabrera Bellini, que é a estrutura que sustenta a edificação do homem que me tornei em todos os âmbitos da minha vida, que sempre trabalhou com todo amor e carinho para me proporcionar as melhores escolas e nunca deixou que nenhuma oportunidade que me foi dada fosse desperdiçada.

Ao meu pai João Antônio Rossi Machado pelos conselhos, amizade, confiança em meus projetos de vida e suporte de todas as formas que pôde.

À minha namorada Maria Carolina Coelho, que me forneceu apoio e auxiliou incondicionalmente durante toda a minha trajetória de graduação, inclusive sendo uma parceira pesquisadora a quem discutimos e aprendemos juntos a melhor forma de avançarmos cada um em nossos projetos.

Aos meus queridos irmãos Enzo e Bernardo que são muito amados e queridos em meu coração.

Aos meus muitos amigos verdadeiros que sou muito abençoado por ter em minha vida e espero que saibam que mobilizarei todos os meus esforços no sentido de poder auxiliá-los a todo momento sem esperar nada em troca.

RESUMO

A utilização de infraestruturas em radier estaqueado tem sido amplamente empregada em projetos com grandes dimensões verticais, os quais devido ao crescimento e ocupação populacional, tornaram-se mais frequentes. Este trabalho busca avaliar o comportamento de fundações em radier estaqueado por meio de análise numérica tridimensional simplificada por simetria, a relação entre o comprimento e espaçamento das estacas com o recalque e a capacidade de carga estabelecendo as curvas carga-recalque. Além disso, buscou-se estabelecer a proporcionalidade de cargas destinadas a cada elemento que constitui a fundação radier estaqueado, os ganhos ao se dimensionar a estrutura desta forma em relação ao método tradicional de grupo de estacas e a comparação de resultados entre o modelo simplificado pilar equivalente e o modelo completo. Para tal, a análise consistiu em casos de fundações estaqueadas compostas por 9 estacas (3 x 3), com 5, 10 e 15 metros de comprimento, 0,3 m de diâmetro constante e espaçamento entre estacas (s/d) de 3, 3,5, 4 e 4,5. As curvas carga-recalque foram obtidas através da solicitação da estrutura em doze estágios de carregamento para deslocamentos máximos entre 45 a 55 mm em solo homogêneo com características obtidas a partir de testes de validação a partir do resultado experimental obtido por Garcia (2015), e utilizado métodos preestabelecidos para a obtenção da capacidade de carga, uma vez que as curvas não apresentaram a ruptura nítida. O aumento das variáveis, comprimento e espaçamento entre estacas, promoveram reduções dos recalques em todos os modelos analisados. Ademais, determinou-se a parcela de carga resistida pelo contato bloco-solo, em aproximadamente 17%, o que representa significativo aumento da capacidade de carga na estrutura. O fator de proporcionalidade entre resistências empregando o dimensionamento em radier estaqueado ou método convencional demonstra coerência ao apresentar grandes ganhos em função do aumento da estrutura superficial e convergência ao valor 1,0 para estacas profundas, pois a carga resistida pelo radier perde significância. Por fim, a análise comparativa entre simulações demonstra um possível espaçamento ótimo para a redução entre os resultados de deslocamentos verticais, simplificação e modelo completo, sendo o desvio menor que 0,5 cm para o espaçamento de 4,5d, limite superior simulado.

PALAVRAS-CHAVE: Fundação radier estaqueado, Recalque, Estacas, Método dos elementos finitos, Análise numérica tridimensional.

ABSTRACT

The use of piled raft infrastructures has been widely used in projects with large vertical dimensions, which due to population growth and occupation, have become more frequent. This work seeks to evaluate the behavior of piled raft foundations by means of simplified three-dimensional numerical analysis by symmetry, the relation between the length and spacing of the piles with the settlement and the load capacity establishing the load-settlement curves. In addition, we sought to establish the proportionality of loads destined to each element that constitutes the piled raft foundation, the gains from dimensioning the structure in this way in relation to the traditional pile group method and comparison of results between the simplified equivalent pillar model and the complete model. For this purpose, the analysis consisted of cases of pile foundations composed of 9 piles (3 x 3), with 5, 10 and 15 m in length, constant diameter of 0.3 m and spacing between piles (s/d) of 3, 3, 5, 4 and 4.5. The load-settlement curves were obtained by requesting the structure in twelve loading stages for maximum displacements between 45 to 55 mm in homogeneous soil with characteristics obtained from calibration tests based on the experimental result performed by Garcia (2015) and pre-established methods were used to obtain the load capacity, because the curves clearly did not evince the rupture. The increase in variables, length and spacing between pile centers, promote reductions in settlement in all models. In addition, it was possible to determine the load portion resisted by the block-soil contact was determined by approximately 17%, which represents a significant increase in the bearing capacity in the structure. The proportionality factor between resistances employing the design in piled raft or conventional method demonstrates coherence when presenting great gains due to the increase in the surface structure and convergence to the value 1.0 for deep piles, as the load resisted by the raft loses significance. Finally, the comparative analysis between simulations demonstrates a possible optimal spacing for the reduction between the results of vertical displacements, simplification and complete model, with the deviation being less than 0.5 cm for the 4.5d spacing, simulated upper limit.

KEYWORDS: Piled raft foundation, Settlement, Foundation, Piles, Finite Element Method, Tridimensional numerical analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fundação em radier estaqueado	13
Figura 2. Caracterização do sistema radier estaqueado.....	14
Figura 3. Parcelas de resistência de uma estaca	16
Figura 4. Porcentagem de cargas resistidas pela estrutura superficial	17
Figura 5. Curvas carga-recalque para radier estaqueado.....	18
Figura 6. Geometria dos modelos numéricos simplificada por simetria.	19
Figura 7. Distribuição dos pontos utilizados para leitura das tensões na seção transversal das estacas.	20
Figura 8. Geometria radier estaqueado com quatro estacas.	21
Figura 9. Curva carga-recalque para radier estaqueado com 4 estacas.	21
Figura 10. Vistas do modelo de calibração.....	22
Figura 11. Curvas carga-recalque de calibração.....	23
Figura 12. Modelagem numérica.....	24
Figura 13. Curvas carga-recalque.....	25
Figura 14. Cargas de ruptura pelos diferentes métodos.....	28
Figura 15. Cargas de ruptura média com desvio pelos métodos de previsão selecionados.	29
Figura 16. Superfície de capacidade de ruptura dependentes das variáveis.....	29
Figura 17. Proporção de cargas em estacas com $L = 5$ m..	32
Figura 18. Proporção de cargas em estacas com $L = 10$ m.	32
Figura 19. Proporção de cargas em estacas com $L = 15$ m..	33
Figura 20. Valores de ζ_{PR} e respectivos R_M	34
Figura 21. Modelos de comparação.....	36
Figura 22. Diferença de recalques entre os modelos.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades dos materiais modelados.....	19
Tabela 2. Métodos de estimativa de capacidade de carga.	24
Tabela 3. Carga de ruptura obtida pelos métodos selecionados.	27
Tabela 4. Cargas admissíveis e recalques equivalentes por diferentes métodos de ruptura.....	30
Tabela 5. Cargas resistidas por cada elemento da fundação mista.....	30
Tabela 6. Fatores de eficiência das estruturas isoladas.	31
Tabela 7. Ganho de capacidade de carga (ζ_{PR}).	34

SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
1.1. Justificativa	12
1.2. Objetivos.....	12
2. Revisão Bibliográfica.....	13
2.1. Radier Estaqueado	13
2.2. Capacidade de Carga	15
2.3. Contato bloco-solo em fundações estaqueadas.....	16
3. Material e Métodos.....	18
4. Testes de validação do modelo.....	20
4.1. Prova de carga experimental.....	20
4.2. Teste de convergência.....	21
4.3. Calibração do modelo	22
5. Métodos de estimativa da capacidade de carga.....	23
6. Resultados e discussões.....	24
6.1. Curvas carga-recalque.....	24
6.2. Capacidade de carga	27
6.3. Proporcionalidade de cargas	30
6.4. Ganho de carga devido ao radier estaqueado (ζ)	33
6.5. Análise de simulação entre pilar equivalente e modelo completo.....	35
6.5.1. Método do Pilar Equivalente	35
6.5.2. Análise numérica	35
7. Conclusão.....	37
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	38
APÊNDICE A	40
Pontos de leitura de tensões	41
Tabelas de cálculo.....	53
APÊNDICE B.....	55

1. Introdução

A utilização de fundações em radier estaqueado tem sido amplamente empregada como solução de projetos geotécnicos com superestruturas de grandes dimensões verticais. Por meio da sua aplicação, tornou-se possível uma maior verticalização das estruturas, atingindo alturas superiores a 300 m. Atualmente, a verticalização é um processo essencial devido ao crescimento populacional e avanço da ocupação em grandes centros urbanos. Portanto, o uso de radier estaqueado torna-se cada vez mais recorrente, possibilitando o aumento da taxa de ocupação destas construções.

A Fundação tem como objetivo transmitir as cargas oriundas da superestrutura para o solo, que tem como função resistir as cargas promovendo deslocamentos verticais aceitáveis para a edificação. A infraestrutura pode ser classificada como rasa ou profunda sendo dependente da cota em que a fundação atinge no solo. Cabe ao projetista de fundações, utilizando as informações da prospecção geotécnica, dimensionar a infraestrutura mais adequada.

O dimensionamento de um sistema de fundação estaqueada comumente é feito assumindo que todas as cargas são suportadas pelo conjunto de estacas, sendo desprezada a contribuição da capacidade portante do radier (EL-GARHY *et al.* 2013). Este critério promove estimativas conservadoras para os valores de recalque, promovendo maior estabilidade para a infraestrutura e redução de possíveis impactos na fundação provenientes de fatores imprevisíveis. Em contrapartida, o mesmo torna as estruturas mais onerosas do que o necessário.

O radier estaqueado é um tipo de fundação em que as estruturas horizontais (rasas) atuam em conjunto com as verticais (profundas), no sentido de suporte às cargas solicitantes. Dessa forma, esse tipo de estrutura pode ser classificado como uma fundação mista em que há resistência superficial, pelo contato bloco-solo, ou profunda, através das estacas.

Diante do exposto, buscou-se avaliar neste trabalho a relação entre o comprimento e espaçamento das estacas através de modelagem tridimensional utilizando ferramentas numéricas. Os dados e curvas carga-recalque resultantes foram compilados e analisados mostrando a eficiência dos acréscimos de comprimento e espaçamento na capacidade de carga da fundação mista.

Além disso, foram analisados os elementos de fundação mista separadamente, radier e estacas, sendo assim possível compreender os ganhos de carga pela estrutura radier em contraste ao modelo bloco com estacas.

1.1. Justificativa

Há ainda poucos avanços científicos sobre o comportamento de radiers estaqueados no Brasil e a parcela significativa de resistência proporcionada pelo contato bloco-solo. O método comumente empregado para o dimensionamento é a consideração exclusiva da resistência proporcionada pelo grupo de estacas, assim desprezando a resistência adicional proporcionada pela estrutura de radier. O aprofundamento do conhecimento no funcionamento completo da estrutura de fundação pode promover ganhos significativos em dimensionamento, de forma a reduzir o superdimensionamento deste tipo de infraestrutura e promovendo economia significativa nos custos de obra. Este projeto pretende contribuir com o avanço do estado da arte no dimensionamento de infraestruturas em radier estaqueado.

1.2. Objetivos

O principal foco deste trabalho de conclusão de curso é a análise numérica de uma infraestrutura em radier estaqueado sobre nove estacas (3 x 3) estabelecendo variações no comprimento e espaçamento das estacas. Assim, entendendo os ganhos em capacidade de carga ao se empregar essa metodologia de dimensionamento e sua relação com as variáveis pré-estabelecidas.

Desta forma, os objetivos específicos que estabeleceu-se para este trabalho são:

- Apresentar as curvas carga-recalque resultantes das análises numéricas promovendo as variações no comprimento das estacas e afastamento entre as mesmas, utilizando testes de convergência e calibração do modelo utilizando ensaios experimentais de forma a fornecer fiabilidade aos resultados;
- Estimar a capacidade de carga para cada configuração simulada;
- Estabelecer a proporção de cargas destinada a cada estrutura constituinte da fundação;
- Calcular os ganhos da infraestrutura utilizando o modelo radier estaqueado em contraste ao método comumente aplicado;
- Simular uma simplificação da infraestrutura utilizando o método do pilar equivalente e constatar os desvios entre resultados de deslocamentos verticais em comparação com o modelo completo para a variação entre espaçamentos de estacas.

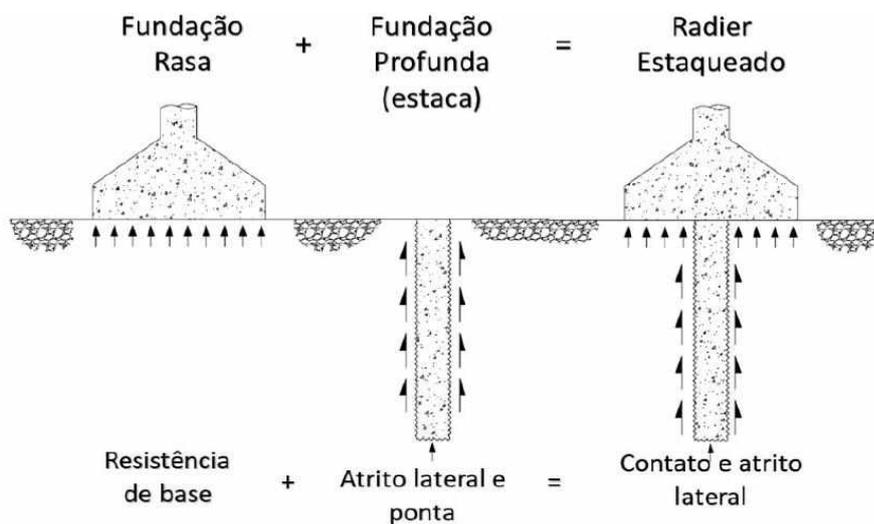
2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo foram apresentadas as bases teóricas e o estado da arte no dimensionamento de estruturas em radier estaqueado, objeto de estudo deste presente trabalho.

2.1. Radier Estaqueado

O desenvolvimento da estrutura radier estaqueado foi feita por Zeevaert (1957), com o principal propósito de redução dos deslocamentos verticais de uma fundação rasa até valores desejáveis através da inserção de estacas (TEIXEIRA, 1996) (Figura 1).

Figura 1. Fundação em radier estaqueado



Fonte: Garcia (2018)

A introdução de estacas na fundação em radier tem como objetivo principal a redução de deslocamentos verticais do solo para um valor aceitável (RANDOLPH, 1983) através da transmissão de parte das cargas para camadas de solo mais resistentes e, assim, criando um sistema de infraestrutura com maior capacidade de suporte. Sua principal característica é o compartilhamento das cargas pela estrutura mista da qual este tipo de fundação é constituída, sendo parte das cargas resistida pelo radier e parte pela resistência do grupo de estacas.

A utilização da fundação em radier estaqueado torna-se uma interessante solução de dimensionamento de projetos geotécnicos, promovendo diminuição do comprimento das estacas e um inicial aumento da capacidade de carga do sistema em comparação aos projetos de bloco de estacas convencionais e estabilização dos recalques (GARCIA, 2019).

O sistema de fundação misto promove interação entre o radier, grupo de estacas e solo para o sustendo de cargas verticais, forças horizontais e momentos oriundos da superestrutura (JANDA *et al.*, 2009). O atrito lateral e resistência de ponta das estacas em conjunto com o aumento da área de contato, que reduz as tensões transmitidas ao solo pela superestrutura através do radier, promovem em conjunto grandes reduções nos deslocamentos verticais.

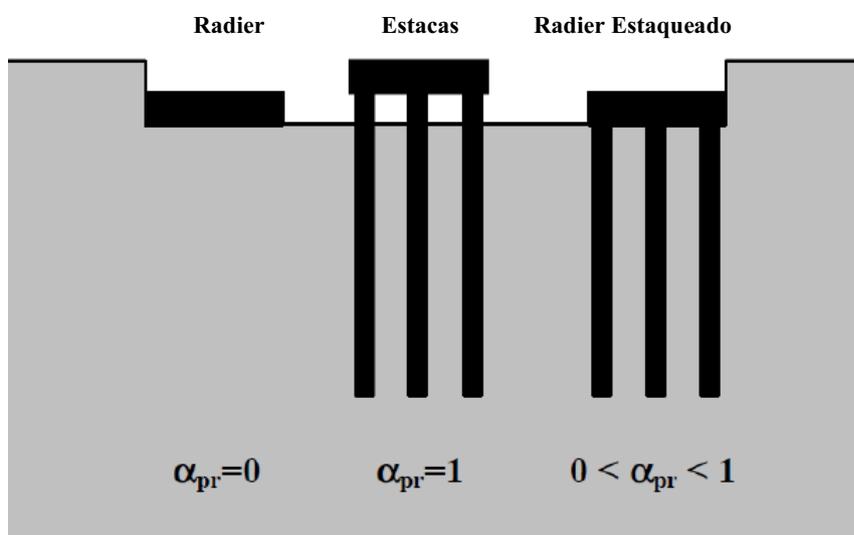
A estimativa dos recalques para um conjunto de estacas pode ser obtida por meio de cálculos analíticos, método do pilar equivalente (POULOS; DAVIS, 1968) e radier equivalente (POULOS; DAVIS, 1980), ou através de modelos que pelo uso de ferramentas numéricas, como o método de elementos finitos, promovem aproximações mais realistas, comumente utilizando *softwares* computacionais.

A caracterização de radier estaqueado está associada à resistência das cargas da superestrutura de forma distribuída entre os elementos de fundação, sendo parte resistida pelo conjunto de estacas e parte pelo elemento superficial radier. Segundo a proposta de Mandolini (2003) (Equação 1), através de um coeficiente que representa a parte das cargas totais levada às estacas, α_{pr} , é possível caracterizar este tipo de infraestrutura, onde Q_{PR} é a carga total aplicada sobre a estrutura de radier estaqueado e $Q_{pile,i}$ é a carga resistida por uma dada estaca i . Assim estabelecendo o coeficiente α_{pr} , $\alpha_{pr} = 1$ é característica de um grupo de estacas em que a parte superior não está em contato com o solo, $\alpha_{pr} = 0$ a fundação é apenas superficial e $0 < \alpha_{pr} < 1$ a infraestrutura funciona como uma fundação mista, radier estaqueado (Figura 2).

$$\alpha_{pr} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{pile,i}}{Q_{PR}}$$

Equação 1

Figura 2. Caracterização do sistema radier estaqueado.



Fonte: Mandolini (2003).

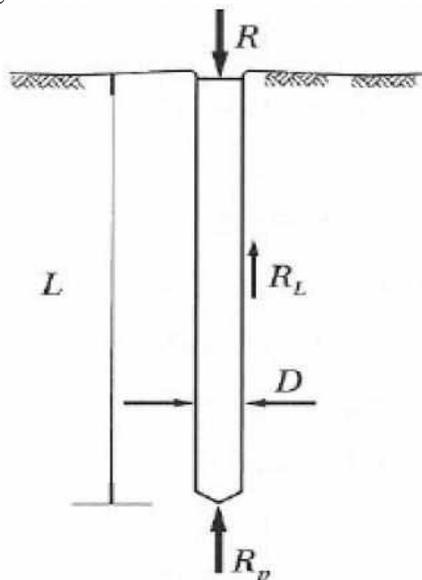
São três os métodos de dimensionamento a respeito de radier estaqueado (RANDOLPH, 1994):

- Abordagem convencional: esse método consiste em dimensionar as estacas como um grupo que resistirá a grande maioria das cargas totais, porém também é considerada a porção das cargas absorvidas pela estrutura, principalmente para a máxima capacidade de carga. O método calcula separadamente o diâmetro e comprimento das estacas, através de um fator de segurança, controlando o radier estaqueado utilizando o grupo de estacas. O método convencional ocorre quando $\alpha_{pr} = 1$ segundo Mandolini (2003), ou seja, toda a carga é resistida pelo grupo de estacas;
- Controle dos recalques diferenciais: as estacas são posicionadas afim de limitar os recalques totais para níveis aceitáveis. Logo, há redução dos recalques diferenciais pela limitação dos deslocamentos verticais totais;
- Critério para a mobilização total ou parcial das estacas: esse método estabelece que as estacas devem ser dimensionadas para absorver entre 70% e 80% da capacidade máxima do atrito lateral, a partir do qual ocorrem deformações plásticas/fluência. Esta abordagem promove estacas suficientes sob o radier para que a tensão de contato entre estrutura superficial e solo seja reduzida a valores menores do que a tensão de pré-adensamento do solo, valor de tensão que separa os trechos de recompressão e reta virgem do solo.

2.2. Capacidade de Carga

A capacidade de carga (R) é caracterizada como a carga que promove total mobilização tanto do atrito lateral (R_L), tensão resistente inicial às solicitações oriundas da infraestrutura, quanto da resistência de ponta (R_P), tensão resistente final a ser mobilizada (Figura 3). A partir da completa mobilização da estaca os valores de recalque são significativamente acrescidos e não necessariamente ocorre a ruptura do elemento estrutural estaca. Assim, a ruptura geotécnica apresenta singularidade em comparação a rupturas estruturais. No caso da capacidade de carga ser superior a resistência à compressão da estaca, o valor limite a ser considerado é a resistência da estrutural da fundação profunda.

Figura 3. Parcelas de resistência de uma estaca



Fonte: Cintra e Aoki (2010)

Por equilíbrio obtém-se a Equação 2:

$$R = R_L + R_p \quad \text{Equação 2}$$

O R é o valor da força correspondente à resistência máxima que o sistema pode oferecer ou o valor que representa uma condição de ruptura geotécnica. Outros termos podem ser utilizados como capacidade de suporte, carga de ruptura, carga última e capacidade de carga última, que podem ser representados por outros símbolos (CINTRA; AOKI, 2010).

2.3. Contato bloco-solo em fundações estaqueadas

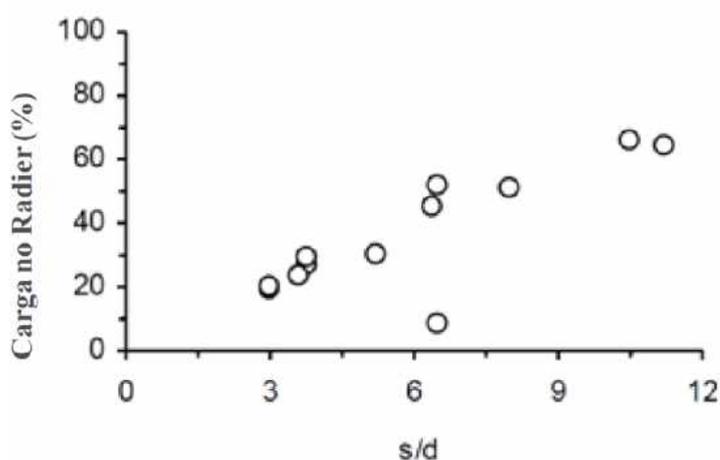
A consideração do elemento superficial pode proporcionar significativas alterações no sistema com fundações profundas devido ao contato com o solo. Há o apoio do radier/bloco no solo de fundação que passa a resistir às tensões oriundas da superestrutura em conjunto com as estacas. Essa consideração classifica a infraestrutura como uma fundação mista, ou seja, constituída por duas estruturas que atuam simultaneamente diminuindo os recalques e aumentando a capacidade de carga da fundação.

Segundo Randolph (1994), um dos interesses do contato do radier com o solo é a promoção de uma ruptura do tipo “bloco”. Dessa forma, o conjunto radier, estacas e solo formam um único elemento. Este efeito de ruptura supõe-se que resulte em um fator de segurança maior em comparação aos elementos de fundação separados. Em estruturas radier estaqueado há um aumento da capacidade de carga que pode ser observado no comportamento da curva carga-recalque.

Através de ensaios em escala real em solo com características argilosas, Brand *et al.* (1972), concluíram que a influência do radier só é significativa para blocos com estacas espaçadas satisfatoriamente. Observou-se que, para um espaçamento de 3 diâmetros entre as estacas, limite inferior adotado neste trabalho, o bloco suporta aproximadamente 20% da capacidade de carga de uma sapata equivalente de tamanho igual.

Mandolini *et al.* (2005) avaliaram a proporção de carga entre as estacas e o radier. No radier estaqueado a tendência é o aumento do espaçamento entre estacas promover maior absorção de carga pelo radier, atingindo valores de cerca de 70% para espaçamentos de 12 vezes o diâmetro da estaca (Figura 4).

Figura 4. Porcentagem de cargas resistidas pela estrutura superficial



Fonte: Mandolini *et al.*(2005)

2.4. Interação entre radier e estacas

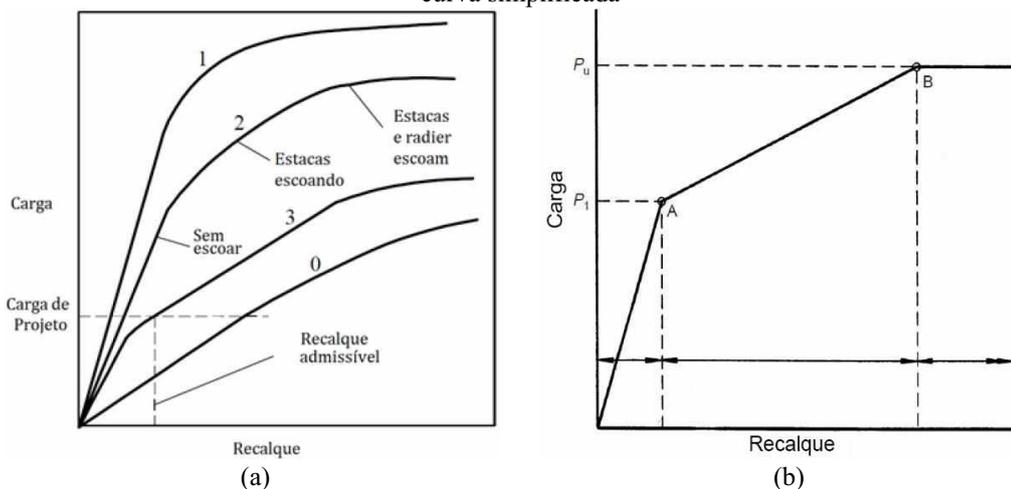
Determinar a proporção de cargas para cada elemento que constitui a fundação radier estaqueado é imprescindível para a compreensão da estrutura de fundação. Desse modo, é possível extrair toda a potencialidade de ambos os elementos, horizontal e vertical, que constituem a fundação mista. (MANDOLINI *et al.*,2005).

O efeito de influência mútua entre os elementos promove uma ordem contrária a solicitação em estacas individuais. A resistência de ponta é mobilizada anteriormente, e só após ocorre a mobilização do atrito lateral. O estado-limite último ocorre por uma ruptura por puncionamento. (RANDOLPH, 1994).

Poulos (2001) retratou o comportamento carga-recalque de uma estrutura de fundação em radier estaqueado (Figura 5), em que a curva 0 é o desempenho apenas da estrutura superficial radier. A curva 1 apresenta o comportamento da fundação mista, no qual o grupo de

estacas exerce maior papel na resistência das cargas. A curva 2 é um caso no qual as estacas operam a um baixo fator de segurança. A curva 3 representa um radier estaqueado dimensionado para a utilização total da capacidade de carga, ou seja, esta curva demonstra a estratégia de redução dos deslocamentos verticais adicionando estacas que utilizam a capacidade total das estacas na carga de projeto.

Figura 5. Curvas carga-recalque para radier estaqueado. (a) Análise para diferentes ideologias de projeto; (b) curva simplificada



Fonte: Poulos (2001)

3. Material e Métodos

As análises consistiram em fundações estaqueadas compostas por 9 estacas (3 x 3), com variação de comprimento das estacas em 5, 10 e 15 m. Foi estabelecido um diâmetro constante de 0,3 m por toda a extensão das estacas, espaçamento entre as laterais do bloco e o solo de 20 cm, espessura do radier de 0,8 m e espaçamento entre centros (s/d) de 3 a 4,5 espaçados em acréscimos de 0,5. As propriedades dos materiais do modelo (Tabela 1) foram definidas como um solo homogêneo ao longo da profundidade e obtidas através de testes de validação e convergência para as curvas carga-recalque a partir de provas de carga experimentais de Garcia (2015), realizados na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, em Campinas, São Paulo, e o radier-estaqueado com propriedades padrão de concreto armado, de acordo com Ardiaca (2009). O modelo constitutivo elasto-plástico de Mohr-Coulomb, apesar de aproximado, apresenta resultados coerentes à simulação do comportamento das curvas carga-recalque do solo de fundação em radier estaqueado.

Tabela 1. Propriedades dos materiais modelados.

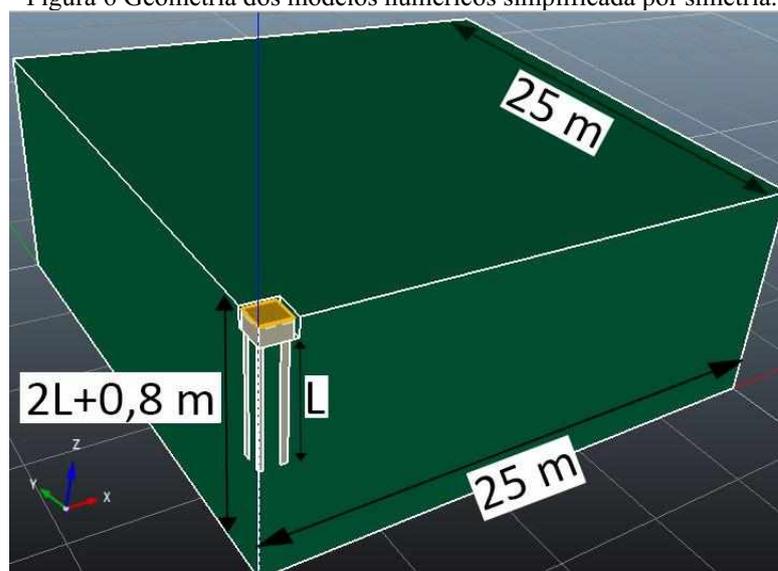
Material	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ϕ (°)	ν	c' (kPa)
Solo	15	83	10	0,33	13
Estaca	25	30.000	60	0,18	300

γ - peso próprio; E - módulo de elasticidade; ϕ - ângulo de atrito interno; ν - coeficiente de Poisson; c' - coesão.

Fonte: Autor (2020)

Os modelos foram simulados pelo software *OPTUM G3 2020*. A ferramenta computacional promove uma análise numérica da estrutura através de cálculos por malha de elementos finitos em três dimensões. Assim, devido ao fornecimento da licença acadêmica pela empresa *Optum Computational Engineering* possibilitou-se o desenvolvimento deste trabalho. O problema modelado foi composto de uma malha em elementos finitos com elementos triangulares, utilizando-se de simplificação geométrica por linhas de simetria, a qual reduziu significativamente o tempo de processamento dos dados, sendo modelado um quarto da estrutura. As dimensões do modelo (Figura 6) e densidade de malha foram obtidos através dos testes de convergência entre modelo experimental e ensaios de prova de carga experimentais.

Figura 6 Geometria dos modelos numéricos simplificada por simetria.



Fonte: Autor (2020).

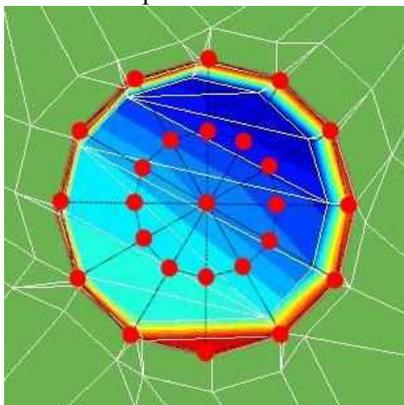
A zona próxima à estrutura de fundação teve sua malha de elementos finitos densificada para promover maior eficiência da interação solo-estrutura para a análise e, portanto, resultar em valores de recalque de melhor precisão. As malhas adotadas foram triangulares com 6.000, 10.000 e 15.000 elementos, valores obtidos através do processo de otimização. A variação de altura entre os modelos exigiu um maior número de elementos para os que possuíam maiores alturas.

As cargas sobre a estrutura de fundação em estágios possibilitaram obter a curva carga-recalque para o modelo numérico, que simula as deformações elastoplásticas dos materiais para

deslocamentos verticais máximos entre 45 e 55 mm. A partir dos resultados foram utilizados diferentes métodos para a obtenção das cargas de ruptura da infraestrutura.

Através de ferramentas gráficas foi possível definir a tensão média nas estacas (Figura 7). Utilizou-se uma geometria com 25 pontos de leitura de tensões e multiplicou-se a média pela área da estaca, sendo obtido o valor aproximado das cargas atuantes nas estacas. Por conseguinte, foi definida a proporção das cargas totais resistidas pelo conjunto de estacas e pelo radier. As figuras resultantes que apresentam as tensões verticais nas estacas, obtidas pelo *software*, e tabelas de cálculo das tensões e cargas médias estão presentes nos apêndices deste projeto (Apêndice A).

Figura 7 Distribuição dos pontos utilizados para leitura das tensões na seção transversal das estacas.



Fonte: Autor (2020).

4. Testes de validação do modelo

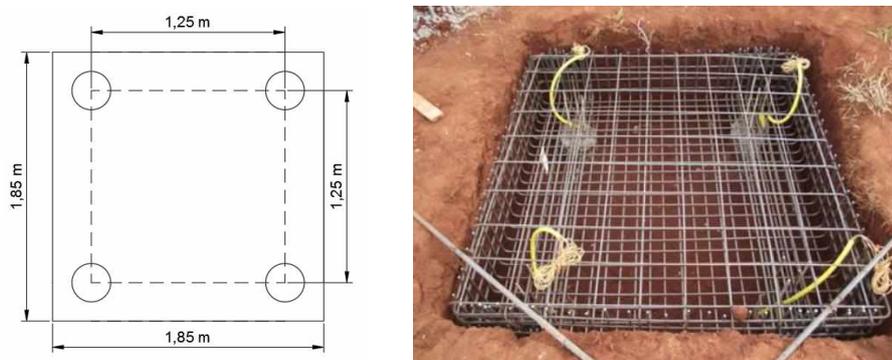
Para atribuir melhor confiabilidade à análise numérica, foram executados testes de validação a partir de ensaios experimentais que validassem os resultados do modelo, as dimensões adotadas para a análise, condições de contorno e malha de elementos finitos. Logo, o modelo e suas propriedades foram calibrados utilizando os resultados de prova de carga executada em um bloco com 4 estacas por Garcia (2015). Para tanto, foi modelado um radier estaqueado com 4 estacas previamente às análises principais deste projeto.

4.1. Prova de carga experimental

Garcia (2015) realizou provas de carga experimentais no Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Foram executados diversos ensaios de prospecção para a caracterização do subsolo no campo experimental e executados radier estaqueados com uma, duas, três e quatro estacas com diâmetro de 0,25 m e espaçamento s/d de 5. As mesmas foram dimensionados pelo *software* estrutural CYPECAD. A partir destes ensaios foi escolhida para os testes de validação e

calibração do modelo numérico a infraestrutura com quatro estacas (Figura 8), devido à maior similaridade com a fundação radier estaqueado com 9 estacas (3x3), foco do estudo deste projeto.

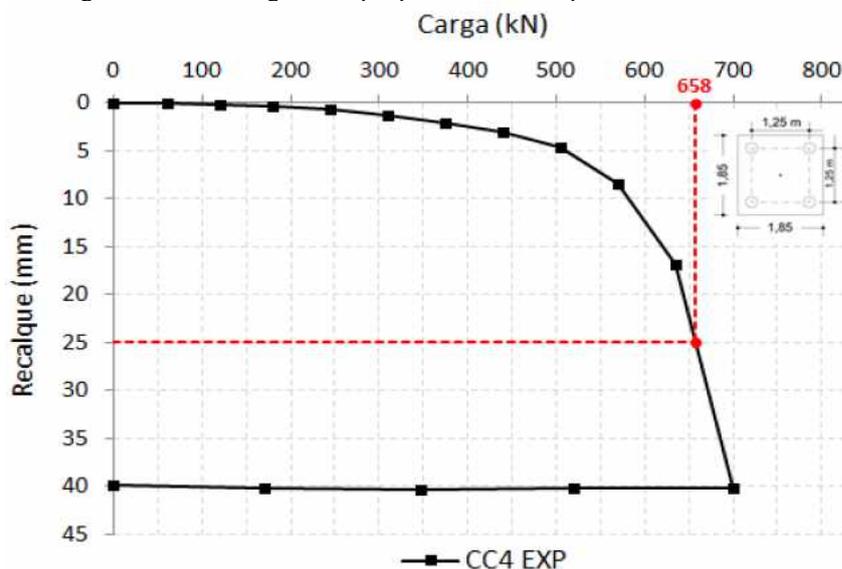
Figura 8 Geometria radier estaqueado com quatro estacas. (a) projeto em planta (b) como executado



Fonte: Garcia (2015).

O ensaio de prova de carga no radier estaqueado com 4 estacas resultou na curva carga recalque (Figura 9). Foi constatada uma carga máxima de ensaio de 700 kN com deslocamento vertical máximo de 40,14 mm (GARCIA, 2015).

Figura 9. Curva carga-recalque para radier estaqueado com 4 estacas.



Fonte: Garcia (2015).

4.2. Teste de convergência

Para a validação das dimensões do modelo foram realizados testes prévios, de forma que a geometria do modelo foi determinada através do teste de convergência, que averiguou se as condições de contorno apresentaram resultados correspondentes com as definições

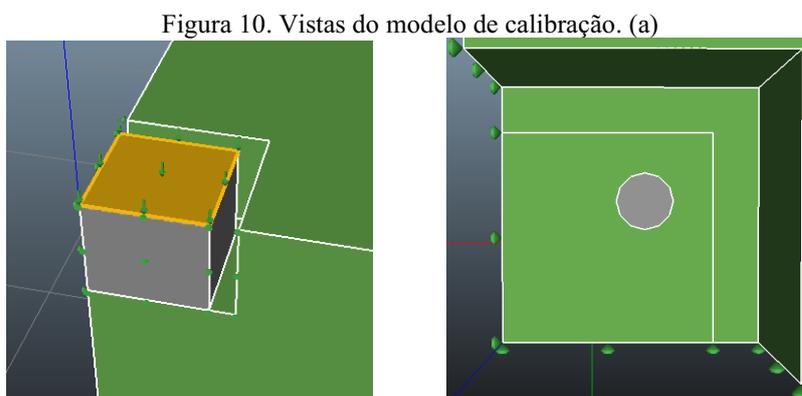
preestabelecidas. As condições de contorno nos limites de fronteira foram consideradas indeslocáveis ou que possuíssem deslocamentos muito baixos, deste modo, não exercendo influência nos resultados.

Previamente à simulação numérica fez-se necessário constatar as condições de contorno do problema por testes de convergência que buscavam avaliar as condições nos limites de fronteira. A geometria avaliada foi para uma malha em planta de 25 m x 25 m, que apresentou valor máximo de deslocamento de 0,16 mm, considerado desprezível para o caso analisado. O número de elementos finitos foi otimizado para ganhos de tempo de processamento.

Conseqüentemente à simetria dos modelos analisados, a ferramenta numérica possibilita que as análises sejam executadas em uma fração do caso completo. Assim, os testes de convergência resultaram em modelos de aproximadamente 25 m x 25 m e 10,8 m de profundidade, representando $\frac{1}{4}$ do problema. O recurso da simetria, que permite a redução nas dimensões do modelo e malha de elementos finitos, tem importante relevância pois promove uma redução drástica do número de elementos e nós. Em conclusão, torna-se possível simular um modelo de milhares de elementos e nós em um tempo muito menor. Utilizou-se um modelo elastoplástico, que corresponde a um comportamento não linear.

4.3. Calibração do modelo

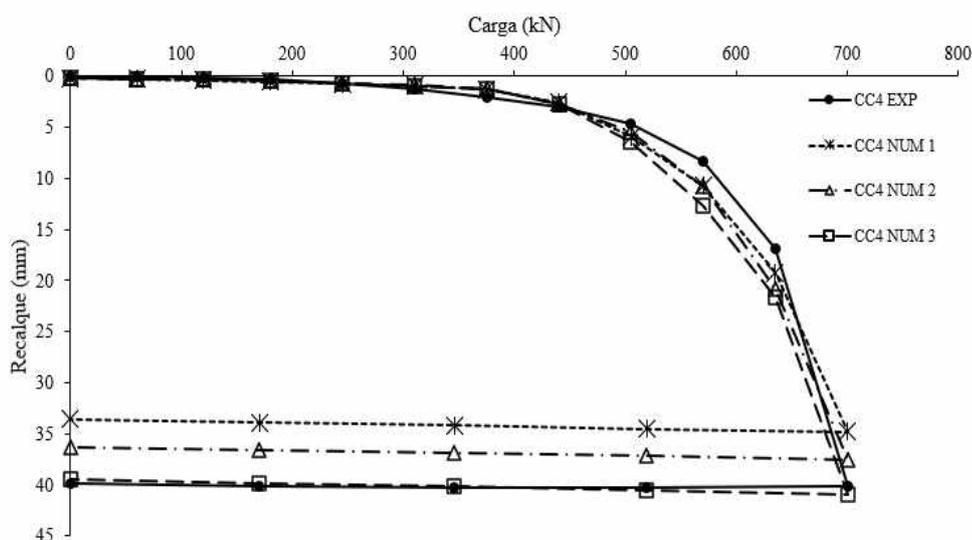
Foi modelada uma estrutura em radier estaqueado, simplificada por simetria, análoga à fundação ensaiada experimentalmente por Garcia (2015) com 4 estacas (Figura 10), porém, com uma camada de solo homogênea. O modelo apresenta limites de 25 m x 25 m nos eixos horizontais e altura de 10,8 metros, sendo utilizadas ferramentas de aprimoração de malha de elementos finitos do *software* e realizados testes de malha para ganhos de tempo de processamento e melhor convergência de resultados.



Fonte: Autor (2020).

Através de diversos processamentos de dados deste modelo e constantes ajustes foram calibrados os parâmetros dos materiais na ferramenta numérica, de modo que a curva carga-recalque obtida pela ferramenta computacional fosse o mais próxima da curva real de ensaio possível (Figura 11). O modelo foi submetido às mesmas cargas as quais o radier estaqueado real foi solicitado na prova de carga.

Figura 11. Curvas carga-recalque de calibração.



Fonte: Autor (2020).

Os parâmetros adotados foram os oriundos da curva CC4 NUM 3 pela maior proximidade dos recalques finais obtidos pela curva carga-recalque experimental. Os resultados apresentados no gráfico acima são apenas representativos do subgrupo que apresentou melhores aproximações da curva experimental. Foram feitas centenas de tentativas antes de se obter valores adequados.

5. Métodos de estimativa da capacidade de carga

Uma vez que as curvas numéricas não resultaram em uma ruptura nítida, foi necessário convencionar as cargas de ruptura através do ajuste das curvas por meio de retroanálise. Foram selecionados quatro métodos para a obtenção de uma melhor amostragem. Os métodos utilizados para a avaliação da capacidade de carga foram Décourt (1996), Chin (1978), Aoki (1976) e Van der Veen (1953) (Tabela 2). Através da curva carga-recalque resultante da análise numérica tridimensional foi possível ajustar as curvas dos métodos para cada modelo e assim, obter o valor de capacidade de carga resultante (Apêndice B).

Tabela 2. Métodos de estimativa de capacidade de carga.	
Métodos	Equações de curvas ajustadas
Van der Veen(1953)	$P = R(1 - e^{-a\rho})$
Aoki (1976)	$P = R(1 - e^{-(a\rho+b)})$
Chin (1978)	$P = \frac{R \times \rho}{\rho + R \times b}$
Décourt (1996)	$P = \frac{b}{\rho^{-1} - a}$

Fonte: Autor (2020).

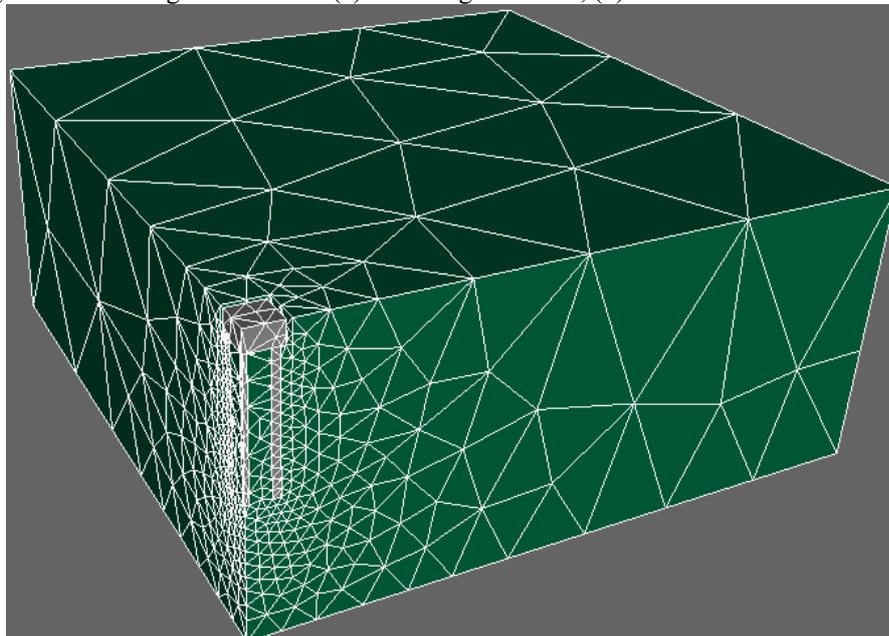
6. Resultados e discussões

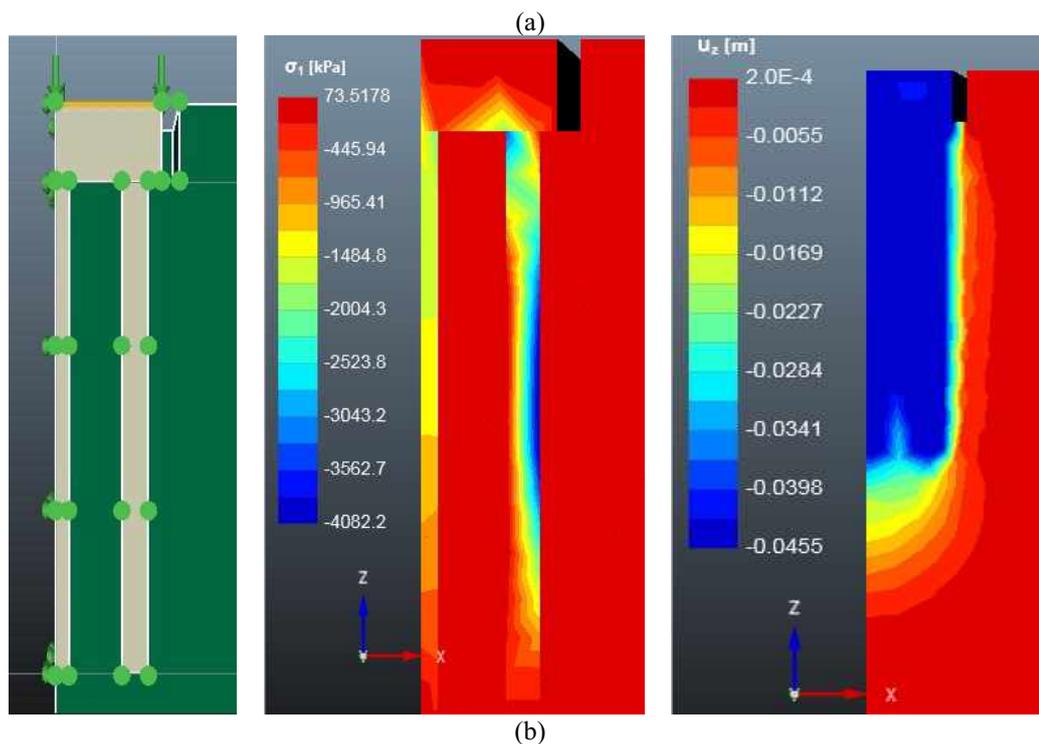
Neste tópico são abordados os diferentes resultados obtidos pelas análises numéricas, e a partir desses valores foram calculados diversos fatores e elaboradas curvas que promovem melhor entendimento do funcionamento das estruturas radier estaqueado com 9 estacas (3x3) processadas.

6.1. Curvas carga-recalque

Os deslocamentos verticais finais da modelagem pelo *software* OPTUM G3 (Figura 12) foram analisados tridimensionalmente através da opção de resposta *final displacement* (u_z), e os valores finais de recalque utilizados para a elaboração das curvas são provenientes da estrutura radier estaqueado.

Figura 12. Modelagem numérica. (a) Modelo geométrico; (b) Resultados finais do modelo.



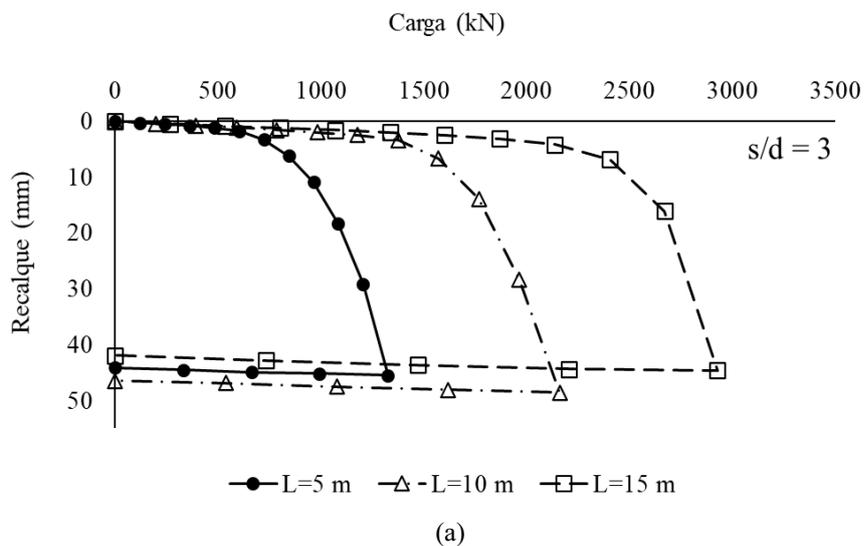


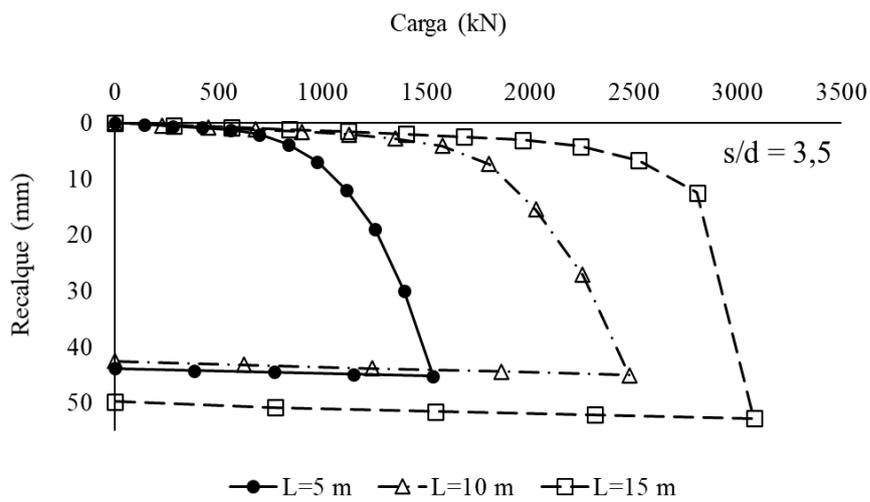
Fonte: Autor (2020).

Constata-se a densificação da malha próxima à estrutura de análise e a presença do bulbo na parte inferior da estrutura onde há concentração de tensões.

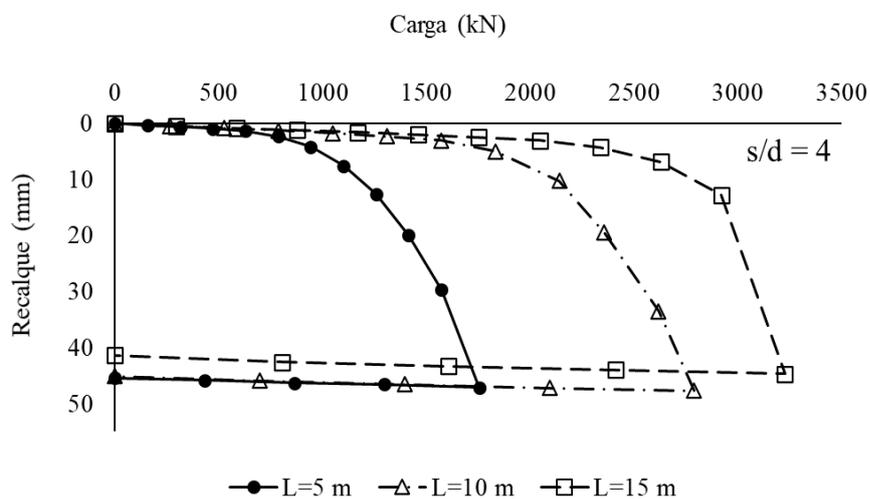
As curvas carga-recalque provenientes dos cálculos numéricos (Figura 13) foram obtidas após carregamento progressivo da estrutura, até deslocamentos verticais entre 45 e 55 mm pré-estabelecidos, e posterior descarregamento para a obtenção das deformações plásticas. O carregamento foi feito em doze etapas e o descarregamento em quatro.

Figura 13. Curvas carga-recalque. (a) $s/d = 3$; (b) $s/d = 3,5$; (c) $s/d = 4$; (d) $s/d = 4,5$.

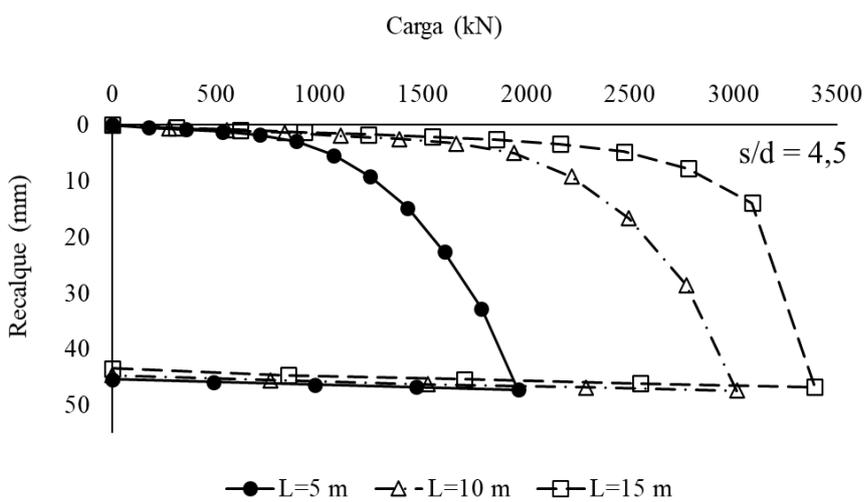




(b)



(c)



(d)

Fonte: Autor (2020).

Há ganho em capacidade de suporte com o aumento do comprimento das estacas e espaçamento entre centros, com conseqüente aumento da estrutura de fundação rasa radier. O modelo que contém estacas de 5 m de comprimento e espaçamento de 3 diâmetros tem sua carga máxima para os recalques estipulados em aproximadamente 1.300 kN. Já a estrutura de 15 m de comprimento e 4,5 diâmetros tem sua carga máxima de aproximadamente 3.400 kN, um ganho na capacidade de carga maior que o dobro.

6.2. Capacidade de carga

Utilizando os métodos de previsão de capacidade de carga foram obtidas as curvas ajustadas com seus respectivos R^2 e previsão de carga última, R [kN] (Tabela 3). Os valores de R^2 ficaram próximos de 1,0, mostrando um excelente ajuste das curvas obtidas pelo *software* de análise tridimensional pelos métodos escolhidos. As curvas de ajuste, retas ajustadas e comparações estão presentes nos apêndices (Apêndice B) deste projeto.

Tabela 3. Carga de ruptura obtida pelos métodos selecionados.

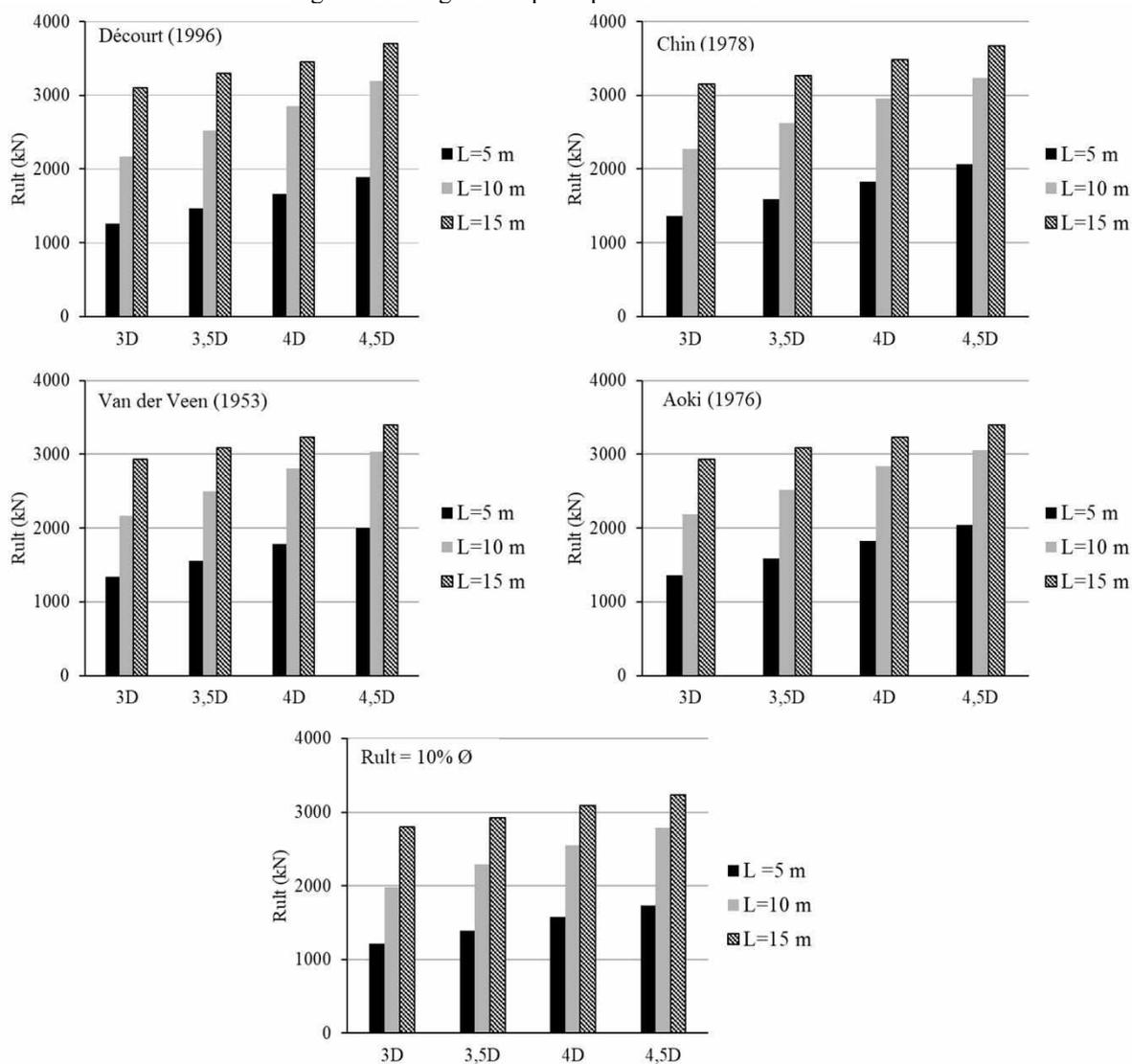
L (m)	Método	3d			3,5d			4d			4,5d		
		R^2	R (kN)	$R_{méd}$ (kN)									
5	Décourt	0,947	1261		0,932	1470		0,934	1661		0,937	1896	
	Chin	0,995	1367	1331	0,994	1593	1550	0,993	1825	1772	0,992	2067	2004
	Van der Veen	0,967	1337		0,969	1554		0,972	1781		0,975	2006	
	Aoki	0,976	1357		0,977	1584		0,979	1821		0,981	2046	
Décourt	0,952	2168			0,966	2526			0,964		2849		
10	Chin	0,997	2271	2198	0,997	2629	2542	0,998	2953	2863	0,997	3240	3131
	Van der Veen	0,956	2166		0,962	2496		0,962	2809		0,971	3038	
	Aoki	0,959	2186		0,966	2516		0,966	2839		0,975	3058	
	Décourt	0,966	3099			0,967		3297			0,976	3448	
15	Chin	0,995	3150	3027	0,996	3270	3185	0,994	3483	3347	0,994	3667	3543
	Van der Veen	0,978	2929		0,933	3086		0,980	3229		0,959	3401	
	Aoki	0,984	2929		0,957	3086		0,989	3229		0,975	3401	

Fonte: Autor (2020).

As cargas de ruptura estipuladas pelos diferentes métodos tiveram variação máxima da ordem de 300 kN entre as mesmas. Dessa forma, pela convergência dos valores (baixo coeficiente de variação) é possível definir os resultados com maior exatidão, mesmo utilizando diferentes métodos.

Foram elaborados gráficos de barra separados para a capacidade de carga dos modelos adotados e para a previsão da carga de ruptura convencional pelo método de Décourt (1996) (Figura 14), que define a carga de ruptura como sendo a carga que promove um deslocamento vertical de 10% do diâmetro das estacas, ou seja, as cargas que promovem recalques de 30 mm considerando o diâmetro das estacas do problema.

Figura 14. Cargas de ruptura pelos diferentes métodos.

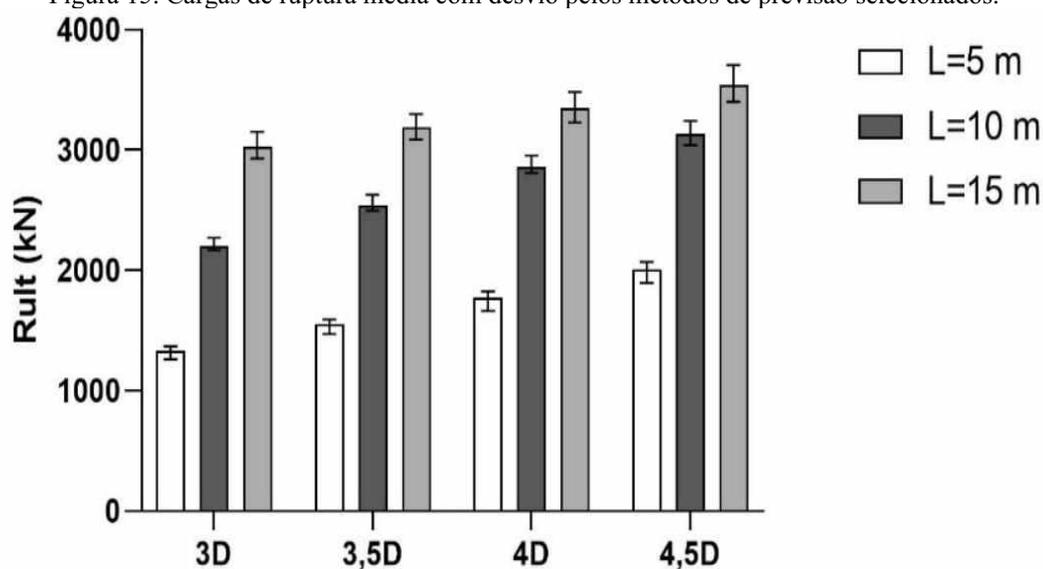


Fonte: Autor (2020).

Através dos valores calculados de capacidade de carga por diferentes métodos selecionados e apresentados na Tabela 3 foi calculada a carga média de ruptura para cada modelo. A Figura 15 apresenta os valores médios, R_{ult} [kN], e os respectivos desvios de capacidade de carga. A figura foi elaborada utilizando o *software* estatístico *GraphPad Prism 8.3.0*.

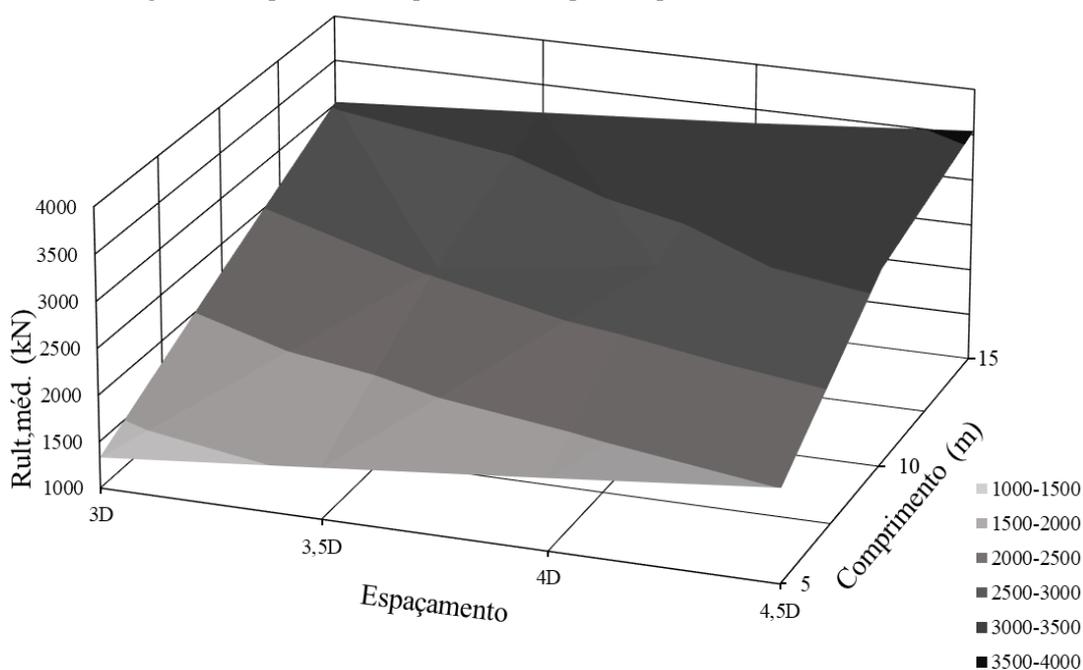
Utilizou-se os valores médios para o desenvolvimento de uma superfície de capacidade de carga, a qual estabelece uma correlação visual entre as variáveis: comprimento das estacas e espaçamento entre centros e a capacidade de carga da fundação radier estaqueado (Figura 16).

Figura 15. Cargas de ruptura média com desvio pelos métodos de previsão selecionados.



Fonte: Autor (2020).

Figura 16. Superfície de capacidade de ruptura dependentes das variáveis.



Fonte: Autor (2020).

A superfície de capacidade de carga correlaciona de maneira ilustrativa os ganhos com o aumento das variáveis analisadas. É possível constatar uma ascensão menor da superfície, relacionada ao ganho de capacidade de carga, com a variação do espaçamento estipulado em comparação com o aumento do comprimento das estacas, onde a inclinação é mais acentuada.

Ao se aplicar um fator de segurança ($F.S. = 2,0$) em todas as cargas de ruptura foram calculadas as cargas admissíveis na estrutura de fundação, e utilizando os respectivos métodos adotados os recalques esperados foram calculados (Tabela 4).

Tabela 4. Cargas admissíveis e recalques equivalentes por diferentes métodos de ruptura.

L(m)	s/d	Décourt		Chin		Van der Veen		Aoki	
		P _{adm} (kN)	ρ (mm)						
5	3,0	630,5	2,2	683,5	3,1	668,5	7,1	678,5	5,1
	3,5	735,0	2,5	796,5	3,5	777	7,7	792,0	5,7
	4,0	830,5	2,6	912,5	3,9	890,5	8	910,5	6,4
	4,5	948,0	3,4	1033,5	4,7	1003	9	1023,0	7,2
10	3,0	1084,0	2,3	1135,5	3,2	1083	6	1093,0	3,9
	3,5	1263,0	2,7	1314,5	3,5	1248	6,5	1258,0	4,2
	4,0	1424,5	2,9	1476,5	3,7	1404,5	7	1419,5	4,5
	4,5	1594,5	3,6	1620,0	4,1	1519	6,8	1529,0	4,6
15	3	1549,5	2,1	1575,0	3,1	1464,5	4,3	1464,5	2,5
	3,5	1648,5	2,2	1635,0	2,9	1543	5,7	1543,0	1,9
	4,0	1724,0	2,2	1741,5	3,1	1614,5	4,2	1614,5	2,4
	4,5	1852,0	2,7	1833,5	3,3	1700,5	5,1	1700,5	2,5

Fonte: Autor (2020).

Constata-se uma variação elevada da previsão dos recalques principalmente pelo método de Van der Veen (1953), possivelmente pelo fato de ser um método mais antigo, o mesmo superestima os deslocamentos verticais totais na estrutura.

6.3. Proporcionalidade de cargas

Pela ferramenta computacional de análise numérica foi possível a medição, aproximada, das cargas resistidas pelas estacas no sistema de fundação radier estaqueado e com o conhecimento da carga total aplicada à estrutura a diferença é dissipada ou assumida pelo contato. As cargas resistidas por cada elemento em diferentes estágios de carregamento foram compiladas na Tabela 5.

Tabela 5. Cargas resistidas por cada elemento da fundação mista.

L (m)	Carga aplicada	3d		3,5d		4d		4,5d	
		P _P (kN)	P _R (kN)						
5	27% Q _{total}	279	82	333	85	341	130	440	94
	55% Q _{total}	621	102	761	74	817	126	935	134
	82% Q _{total}	977	107	1154	98	1190	224	1428	177
	100% Q _{total}	1111	213	1345	186	1508	247	1747	213
10	27% Q _{total}	541	48	590	86	722	64	703	128
	55% Q _{total}	1098	80	1270	83	1438	132	1514	149
	82% Q _{total}	1675	92	1905	123	2219	137	2166	329
	100% Q _{total}	1749	411	2198	281	2383	407	2287	730
15	27% Q _{total}	790	12	787	54	827	49	871	55
	55% Q _{total}	1422	180	1610	72	1693	60	1740	114
	82% Q _{total}	2033	371	2154	369	2172	457	2115	665
	100% Q _{total}	2121	806	2707	372	2774	453	2587	805

P_P – Carga resistida pelas estacas; P_R – Carga resistida pelo radier; Q_{total} – Carga total simulada;

Fonte: Autor (2020).

A partir da Tabela 5 é possível calcular a porcentagem das cargas para a solicitação final que se destina a cada estrutura do radier estaqueado, sendo de grande importância este valor para compreender os ganhos proporcionados pela fundação superficial. A proporção média de cargas destinadas ao grupo de estacas é 83,4%, enquanto 16,6% das cargas máximas são suportadas pelo radier.

Pela proporção de cargas foi possível o cálculo dos fatores α_{PG} e α_R , fatores de eficiência do grupo de estacas e radier, respectivamente (Tabela 6). Os fatores demonstram a eficiência no suporte das cargas em cada caso separadamente.

Tabela 6. Fatores de eficiência das estruturas isoladas.

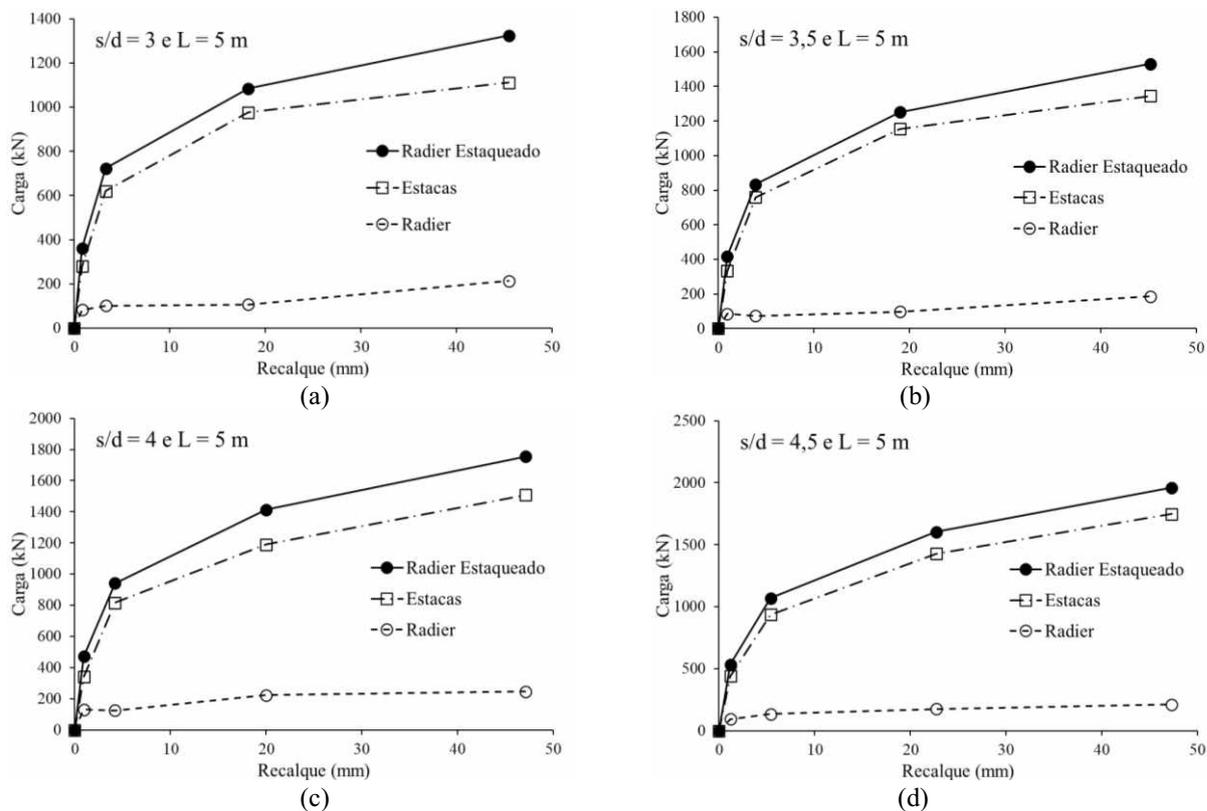
L (m)	s/d	Carga no grupo de estacas			Carga no radier		
		Combinada	Isolada	α_{PG}	Combinada	Isolada	α_R
5	3,0	1324,8	1111,4	0,84	1324,8	213,4	0,16
	3,5	1530,9	1344,9	0,88	1530,9	186,0	0,12
	4,0	1755,0	1507,7	0,86	1755,0	247,3	0,14
	4,5	1960,2	1747,3	0,89	1960,2	212,9	0,11
10	3,0	2160,0	1748,7	0,81	2160,0	411,3	0,19
	3,5	2478,6	2197,7	0,89	2478,6	280,9	0,11
	4,0	2790,0	2383,3	0,85	2790,0	406,7	0,15
	4,5	3016,5	2286,5	0,76	3016,5	730,0	0,24
15	3,0	2926,7	2121,1	0,72	2926,7	805,6	0,28
	3,5	3078,6	2706,8	0,88	3078,6	371,8	0,12
	4,0	3226,5	2773,6	0,86	3226,5	452,9	0,14
	4,5	3392,2	2587,1	0,76	3392,2	805,2	0,24

Fonte: Autor (2020).

Assim, os intervalos de eficiência encontrados para a simulação apresentam como resistência das estacas uma porcentagem mínima de 72% da carga combinada aplicada à estrutura, enquanto o radier recebe minimamente 11%. Verifica-se também que as cargas máximas absorvidas pelo grupo de estacas e radier são de 89% e 28%, respectivamente.

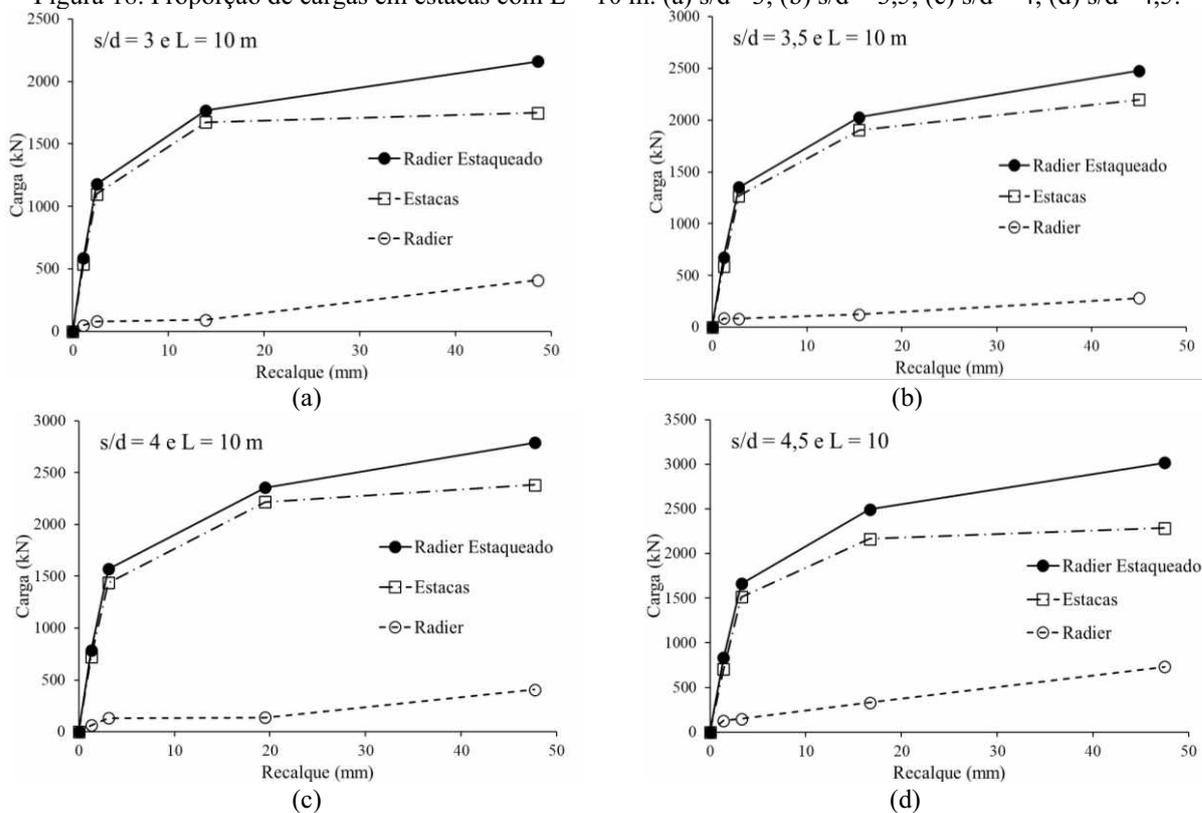
Deste modo, foram construídas curvas (Figura 17 até 19) que mostram as cargas resistidas por cada elemento da fundação mista e pelo conjunto associado ao respectivo recalque em mm. Os deslocamentos verticais são os mesmos para as duas estruturas e para o conjunto em um mesmo estágio, havendo apenas variação na carga resistida.

Figura 17. Proporção de cargas em estacas com $L = 5$ m. (a) $s/d = 3$; (b) $s/d = 3,5$; (c) $s/d = 4$; (d) $s/d = 4,5$.



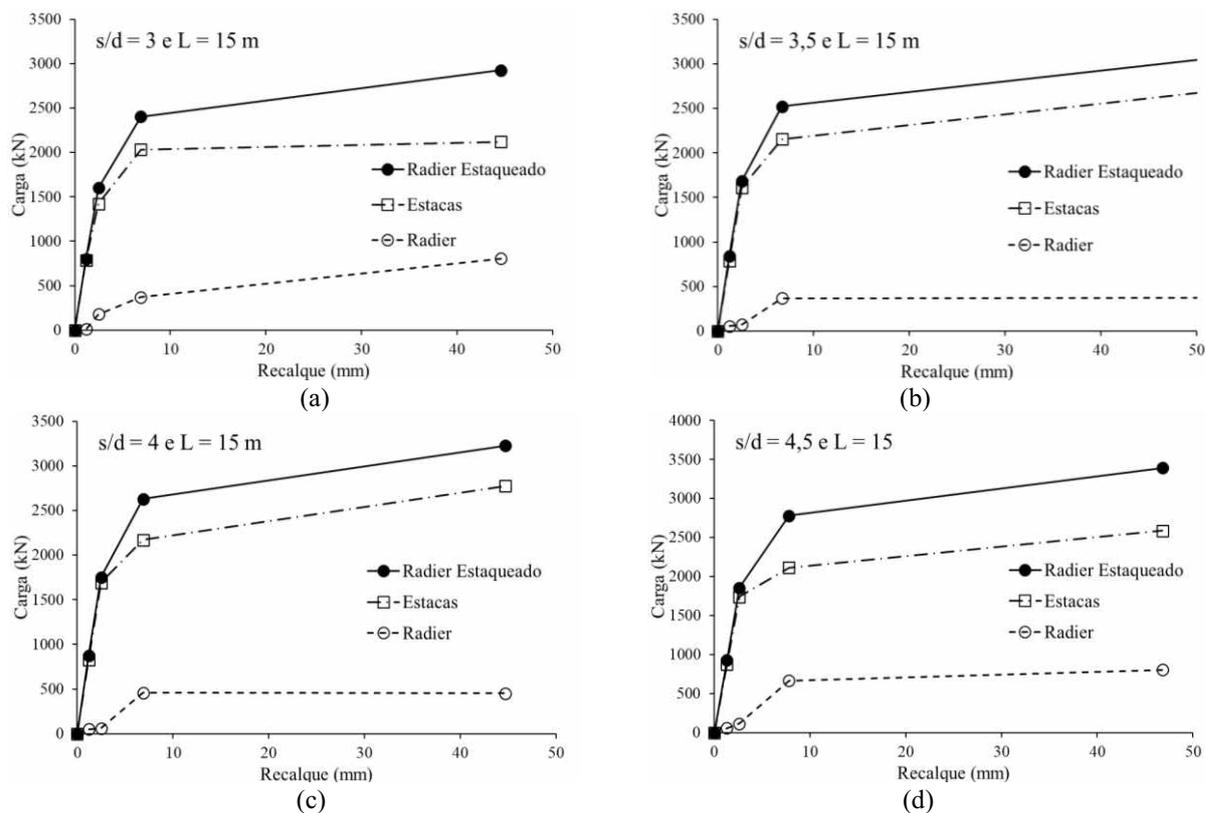
Fonte: Autor (2020).

Figura 18. Proporção de cargas em estacas com $L = 10$ m. (a) $s/d = 3$; (b) $s/d = 3,5$; (c) $s/d = 4$; (d) $s/d = 4,5$.



Fonte: Autor (2020).

Figura 19. Proporção de cargas em estacas com $L = 15$ m. (a) $s/d = 3$; (b) $s/d = 3,5$; (c) $s/d = 4$; (d) $s/d = 4,5$.



Fonte: Autor (2020).

As curvas proporcionam uma melhor compreensão dos aspectos de suporte de cada estrutura separadamente durante o processo de carregamento em sua totalidade. Além disto, é possível identificar uma primeira fase elástica em que há um grande suporte de cargas com pequenas variações de recalques, seguida de uma fase plástica dos elementos que promove uma baixa absorção de cargas para variações maiores de deslocamentos verticais.

6.4. Ganho de carga devido ao radier estaqueado (ζ)

O ganho de capacidade de carga promovido pelo contato da fundação é caracterizado conforme Equação 3, em que Q_{PR} é a capacidade de carga do radier estaqueado e Q_{PG} é a do grupo de estacas.

$$\zeta_{PR} = \frac{Q_{PR}}{Q_{PG}} \quad \text{Equação 3}$$

Dos resultados das curvas carga-recalque (Figura 9) foi selecionado o valor correspondente a carga máxima aplicada (Q_{PR}) para um recalque máximo ($\rho_{\text{máx}} = 40$ mm). A

carga admissível nas estacas foi calculada utilizando um fator de segurança de 1,5 (Tabela 7). O valor Q_{PG} foi calculado utilizando o método semi-empírico de Décourt-Quaresma (1996), corrigido pelo critério de Converse-Labarre, para uma estaca hélice contínua e valor de N_{spt} constante de 6, adaptado devido à homogeneidade da análise, ao apresentado por Garcia (2015). Os valores correspondentes a ζ_{PR} indicam os acréscimos ao utilizar o modelo radier estaqueado.

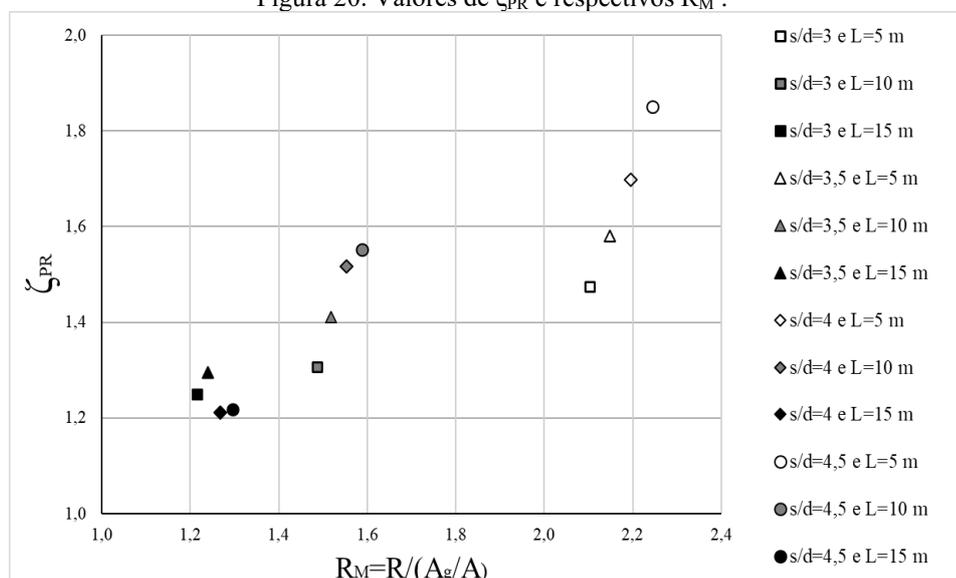
Tabela 7. Ganho de capacidade de carga (ζ_{PR}).

s/d	L(m)	Q_{PR} (kN)	$Q_{PR,adm}$ (kN)	Q_{PG} (kN)	ζ_{PR}
3	5	1284	856	871	1,47
	10	2076	1384	1590	1,31
	15	2885	1923	2309	1,25
3,5	5	1483	989	938	1,58
	10	2416	1208	1713	1,41
	15	2992	1995	2488	1,20
4	5	1680	1120	990	1,70
	10	2740	1827	1807	1,52
	15	3181	2121	2625	1,21
4,5	5	1908	1272	1031	1,85
	10	2919	1946	1882	1,55
	15	3329	2219	2733	1,22

Fonte: Autor (2020).

Há um aumento do fator ζ_{PR} com o aumento do espaçamento entre estacas, aumento da estrutura de fundação rasa, o que demonstra coerência de modo que os ganhos de suporte ao se considerar o contato bloco-solo aumentem com o acréscimo de área na estrutura do radier.

Foram plotados os valores obtidos com os respectivos valores R_M de cada configuração analisada (Figura 20), em que $R_M=R/(A_g/A)$, sendo: $R=(n.s/L)^{0,5}$, n é o número de estacas, s o espaçamento entre centros, L o comprimento das estacas, A_g área total coberta pelo grupo de estacas e A área total do bloco. Os eixos foram dispostos de modo a facilitar a visualização dos valores.

Figura 20. Valores de ζ_{PR} e respectivos R_M .

Fonte: Autor (2020).

6.5. Análise de simulação entre pilar equivalente e modelo completo

Foram simuladas quatro novas análises através do método do pilar equivalente com o comprimento das estacas constante de 5 m e variando o espaçamento entre centros de estacas utilizando os limites pré-estabelecidos neste projeto, sendo assim possível a comparação com o modelo completo e buscando a eficiência da simplificação nos resultados dos deslocamentos verticais.

6.5.1. Método do Pilar Equivalente

O método de simplificação consiste em aproximar o conjunto de estacas em uma única coluna equivalente de mesmo comprimento, porém diâmetro equivalente (Equação 4), calculado através da área total coberta pelo grupo de estacas (A_g). Assim, é necessário determinar o módulo de elasticidade equivalente da coluna (E_{eq}) (Equação 5).

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_g} \quad \text{Equação 4}$$

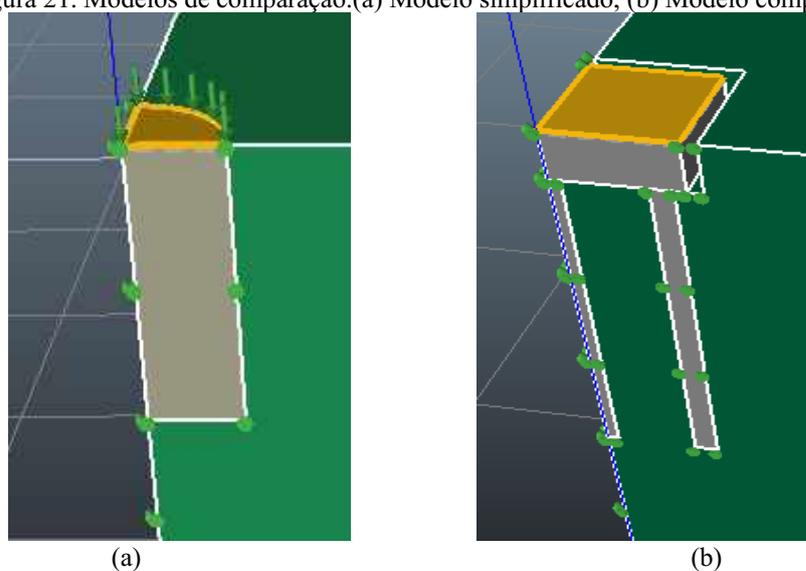
$$E_{eq} = E_s + (E_p - E_s) \left(\frac{A_p}{A_g} \right) \quad \text{Equação 5}$$

A equação 4 é dependente do módulo de elasticidade do solo, E_s , e da estaca, E_p . A área A_p é a soma das áreas da seção transversal do grupo de estacas.

6.5.2. Análise numérica

Através da ferramenta computacional foi modelado o radier estaqueado como sendo um pilar equivalente e um modelo completo (Figura 21), ambos submetidos aos mesmos estágios de carregamento, tensões compatibilizadas devido a diferença de área aplicada, e sendo mantidos os parâmetros geométricos e da malha de elementos finitos. Deste modo, foi possível a comparação de desvios nos resultados de recalques

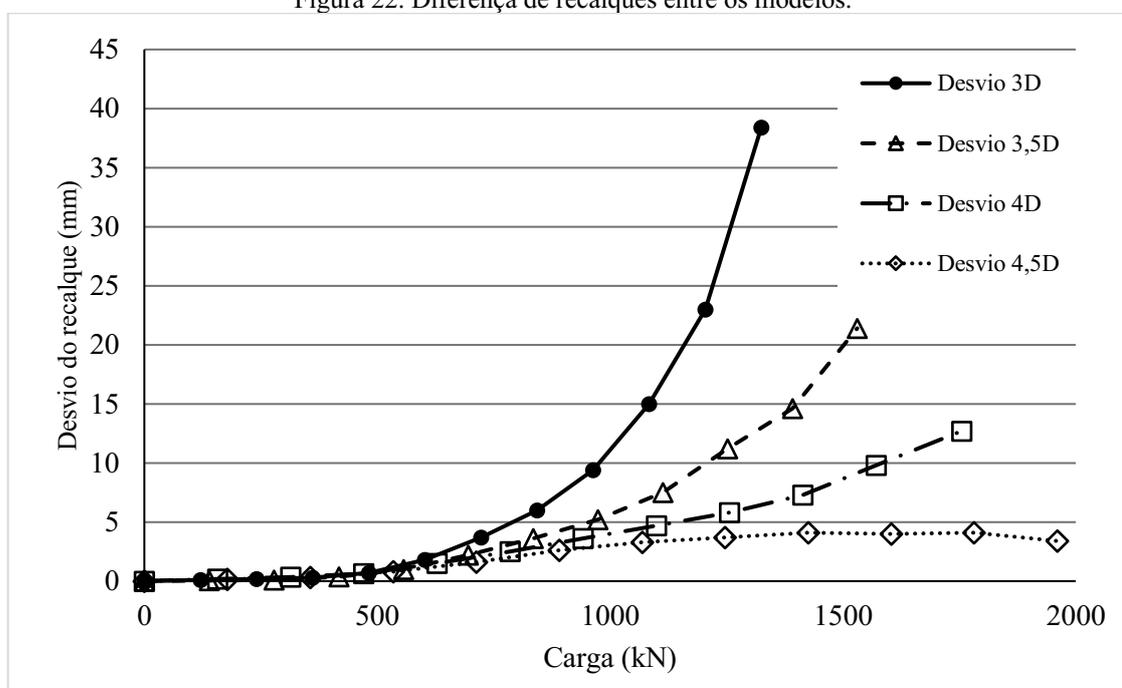
Figura 21. Modelos de comparação.(a) Modelo simplificado; (b) Modelo completo.



Fonte: Autor (2020).

Foram calculados os diâmetros e os módulos de elasticidade equivalentes para a variação do espaçamento entre centro de estacas pré-estabelecidos. A partir dos resultados de deslocamento vertical foi possível produzir uma curva com a diferença de valores entre os dois modelos, chamada de desvio entre recalques (Figura 22). Dessa forma, quanto mais próximo de zero, mais próximos estarão os recalques resultantes preditos entre os dois modelos.

Figura 22. Diferença de recalques entre os modelos.



Fonte: Autor (2020).

É possível constatar uma redução significativa da diferença de resultados com o aumento do espaçamento entre estacas, sendo possível a determinação de um espaçamento

ótimo para a aplicação da simplificação pelo método do pilar equivalente nas análises. A simplificação pode promover uma economia de tempo significativa na modelagem dos problemas. As análises resultaram em menos de 0,5 cm de diferença entre os resultados de deslocamento vertical para um espaçamento (s/d) de 4,5.

7. Conclusão

Com base nas análises realizadas é possível obter a parcela significativa, cerca de 17%, da capacidade de carga resistida pelo contato entre o bloco e o solo em contraponto ao sistema comumente empregado que considera apenas o grupo de estacas. Dessa forma, constata-se um trabalho conjunto entre os dois elementos que constituem o radier estaqueado afim de suportar as cargas solicitantes.

O aumento dos comprimentos das estacas e espaçamentos entre centros promovem significativos ganhos de capacidade de carga. O aumento do comprimento das estacas promove maior aumento da carga de ruptura última ao ser comparado com o aumento do bloco, acrescer o espaçamento entre estacas. O resultado é esperado a medida que a carga suportada pelo conjunto de estacas é de cerca de 83% da carga total aplicada ao conjunto. Portanto, acrescer esta estrutura promove maiores ganhos.

O cálculo dos fatores α e ζ propiciaram uma melhor compreensão do funcionamento da estrutura ao resistir às cargas solicitantes. O valor de α_R demonstra as proporções de carga suportadas pela estrutura superficial, bloco, assim a média de 0,17 demonstra importante participação no aumento da carga de ruptura. O valor de ζ é um fator de proporcionalidade entre resistências ao aplicar o método radier estaqueado em comparação ao método comumente aplicado que apenas considera o conjunto de estacas. Seu valor cresce com o aumento da estrutura superficial e converge para próximo de 1,0 com o emprego de estacas mais profundas, o que demonstra menor efetividade para estruturas dimensionadas pelo método radier estaqueado que tem estacas de grandes comprimentos em comparação a área do bloco.

Por fim, a análise pelo método do pilar equivalente demonstra para os valores de comprimento de estacas de 5 m que há convergência entre o modelo completo e a simplificação com o aumento do espaçamento entre centros de estacas. O valor de s/d de 4,5 apresentou diferenças menores que 0,5 cm nos deslocamentos verticais resultantes. Desta forma, é possível constatar uma boa eficiência do modelo simplificado, podendo promover ganhos expressivos de tempo em modelagem e processamento.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ARDIACA, D. H. **Mohr-Coulomb parameters for modelling of concrete structures**, Plaxis Bulletin, (Spring), 12–15, 2009.

BRAND, E. W. et al. **Load tests on small foundations in soft clay**, 5th PSC, ASCE, v. 1, pt.2, pp.903-928, 1972.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Fundações por estacas: Projeto Geotécnico**, 1a ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

DÉCOURT, L. **A ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez**, In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais - SEFE III. São Paulo: ABEF/ABMS, v. 1, p. 215-224, 1996.

EL-GARHY B., GALIL A. A., YOUSSEF A., RAIA M. A. (2013). **Behavior of raft on settlement reducing piles: Experimental model study**, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v. 5, p. 389-399, 2013.

GARCIA J. R. **Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP**, Dissertação de Doutorado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, 2015.

GARCIA J. R. **Tipos de Fundações**, Notas de Aula, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

GARCIA J. R. **Analysis of the contribution of the block-soil contact in piled foundations**, Latin American Journal of Solids and Structures, ed. 211, 2019.

JANDA T., CUNHA R. P., KUKLIK P., ANJOS G.M. **Three-dimensional finite element analysis and back-analysis of CDA standard pile groups and piled rafts founded on tropical soil**, Soil and Rocks, v. 32, n. 1, p. 3-18, 2009.

MANDOLINI, A. **Design of pile draft foundations: practice and development**, BAP IV, International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, v. 1, pp. 59-80, 2003.

MANDOLINI, A., RUSSO, G. e VIGGIANI, C. **Piled foundations: Experimental investigations, analysis and design**, State-of-the-Art Rep. Proc. 16th ICSMGE, Osaka, Japan, v. 1, p.177–213, 2005.

POULOS H. G., DAVIS E.H. **The settlement behaviour of single axiallyloaded incompressible piles and piers**, Geotechnique 18(3):351–371, 1968.

POULOS H.G., DAVIS E.H. **Pile foundation analysis and design**, Wiley, New York, 1980.

POULOS, H. G. **Piled raft foundations: design and applications**. *Geotechnique*, v.51, n.2, p.95-113, 2001.

RANDOLPH M. F. **Design of piled raft foundations**, Proc. Int. Symp. on Recent Developments in Laboratory and Field Tests and Analysis of Geotechnical Problems, Bangkok, pp 525–537, 1983.

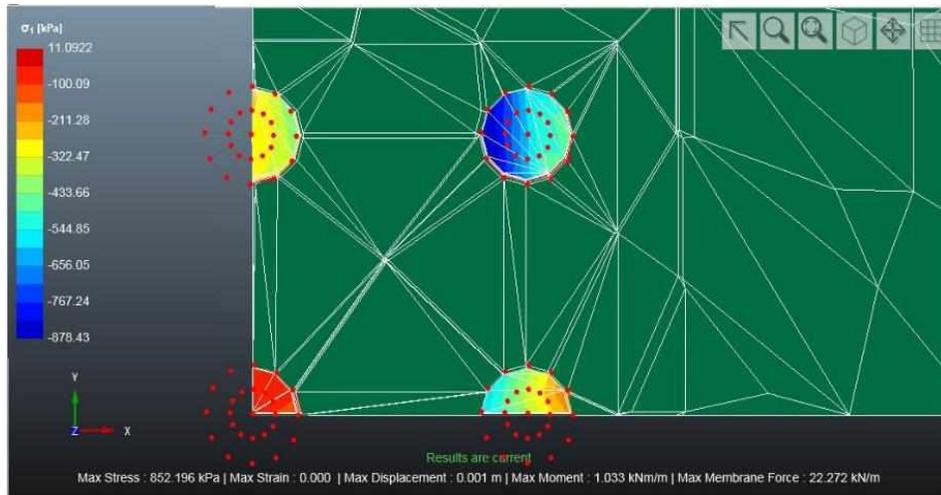
RANDOLPH M. F. **Design methods for pile groups and piled rafts**, vol 5. S.O.A report, 13 ICSMFE, New Delhi, pp 61–82, 1994.

TEIXEIRA, R. S. **Resistência ao cisalhamento de um solo compactado não saturado**, Dissertação de mestrado, Departamento de Geotecnia, São Carlos, EESC/USP. 161p, 1996.

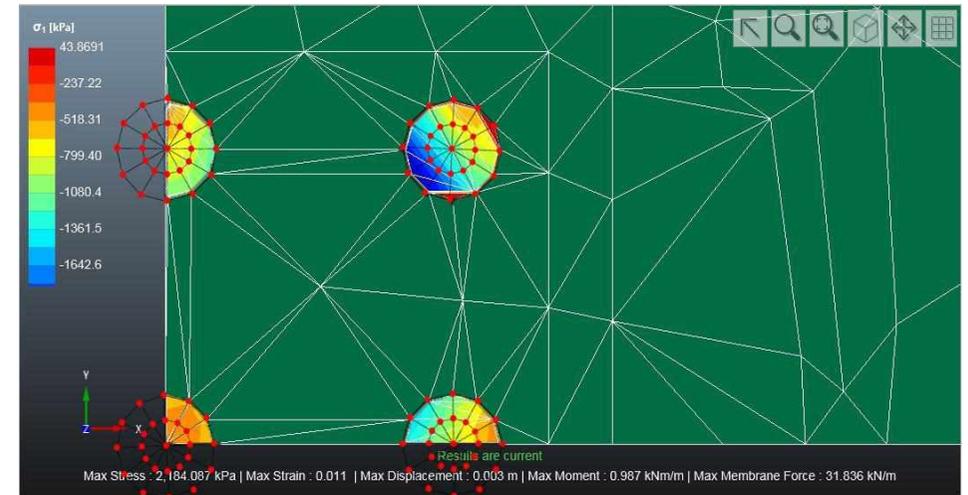
ZEEVAERT, L. **Compensated Friction-pile Foundation to Reduce the Settlement of Buildings on Highly Compressible Volcanic Clay of Mexico City**, Proc. 4 ICSMFE, London, v.2, 1957.

APÊNDICE A

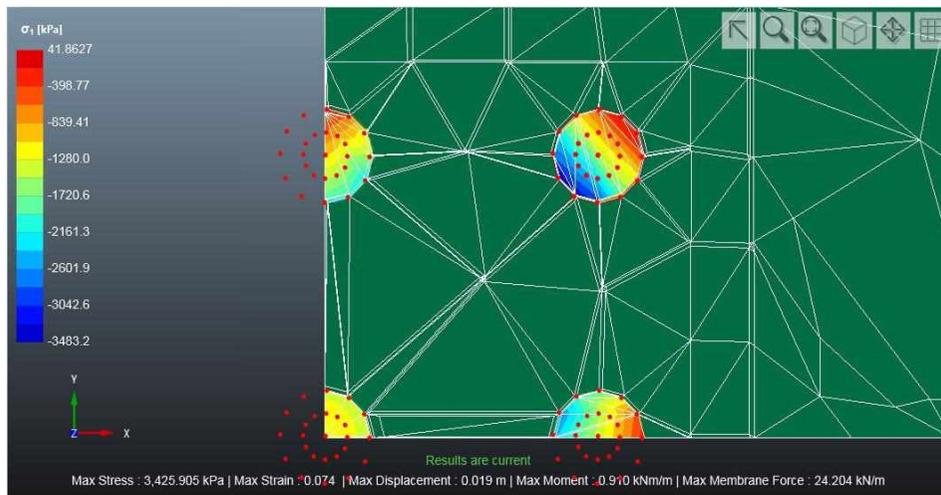
Pontos de leitura de tensões

 $s/d = 3$ e $L = 5$ m

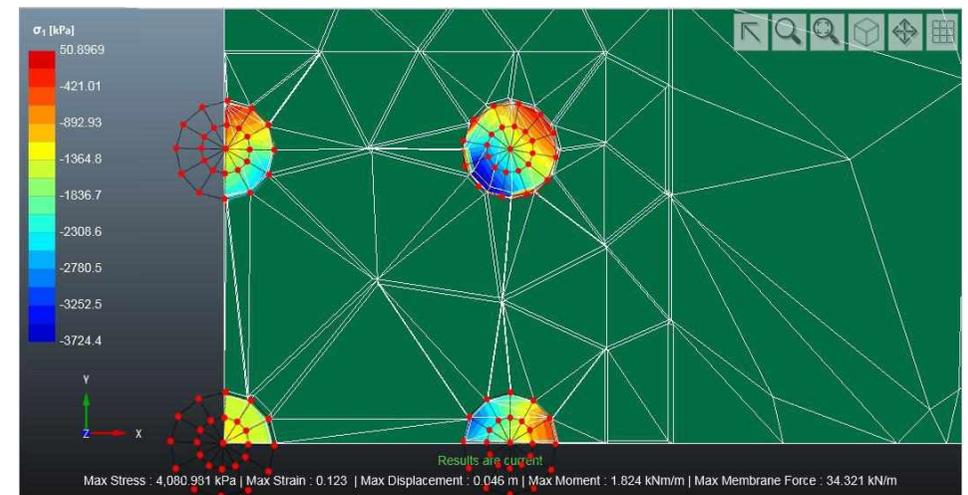
ESTÁGIO 4 DE CARREGAMENTO



ESTÁGIO 7 DE CARREGAMENTO

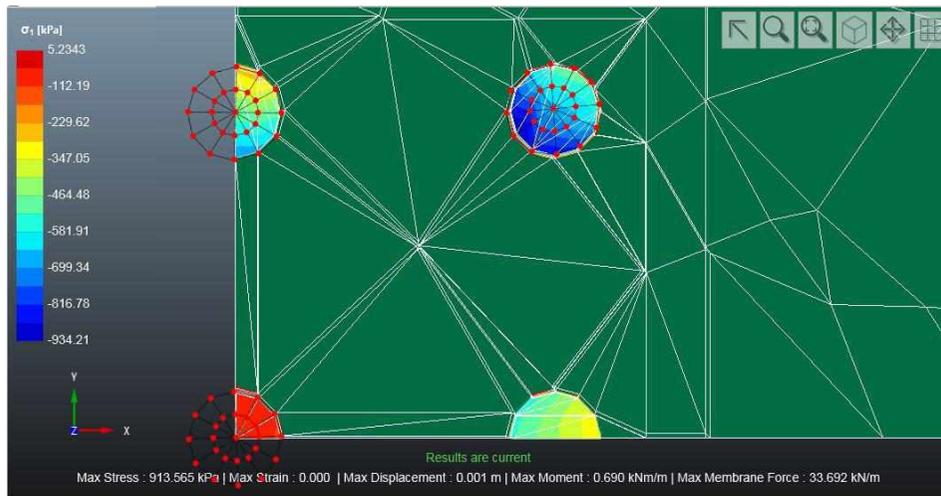


ESTÁGIO 10 DE CARREGAMENTO

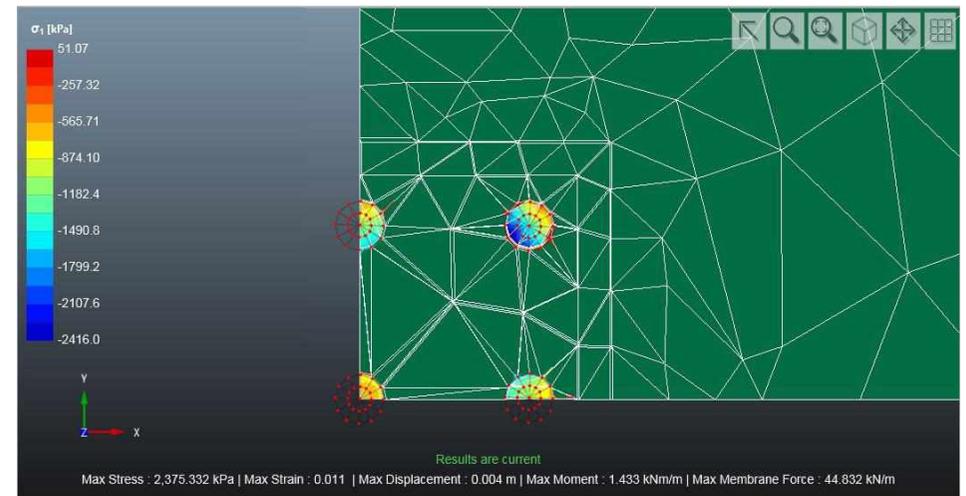


ESTÁGIO 12 DE CARREGAMENTO

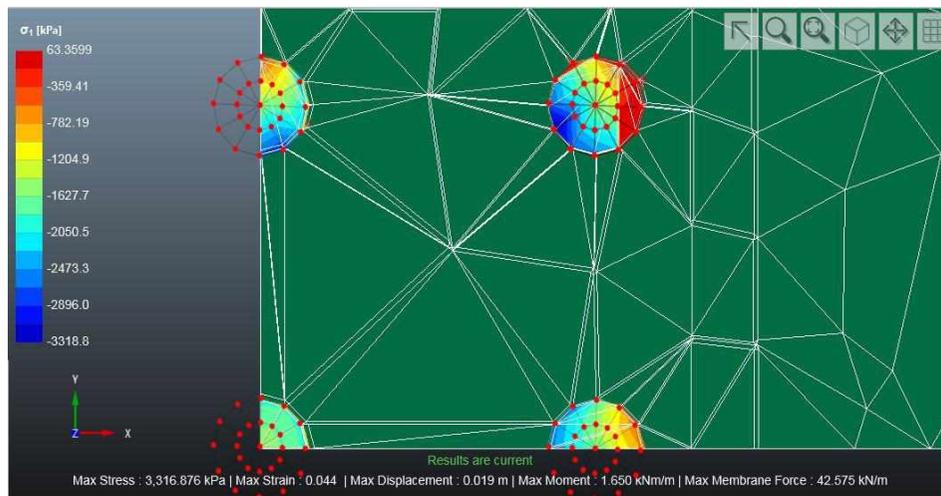
$$s/d = 3,5 \text{ e } L = 5 \text{ m}$$



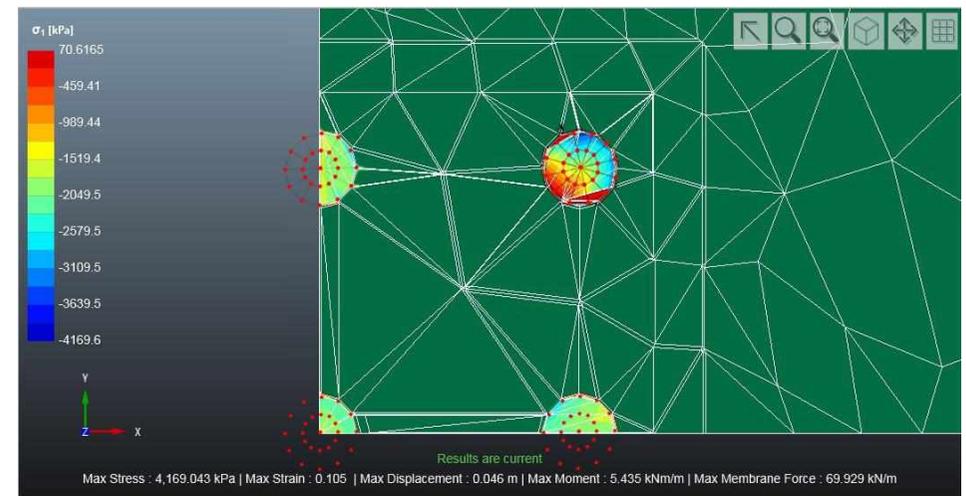
ESTÁGIO 4 DE CARREGAMENTO



ESTÁGIO 7 DE CARREGAMENTO

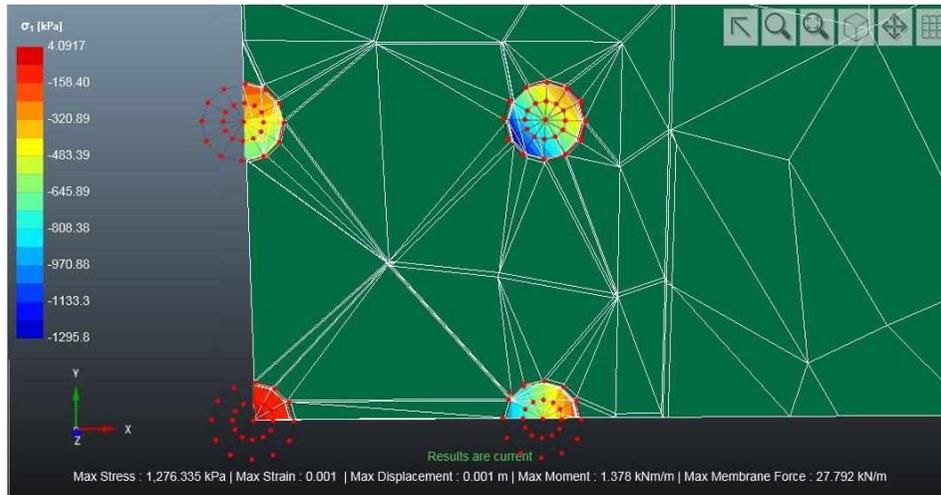


ESTÁGIO 10 DE CARREGAMENTO

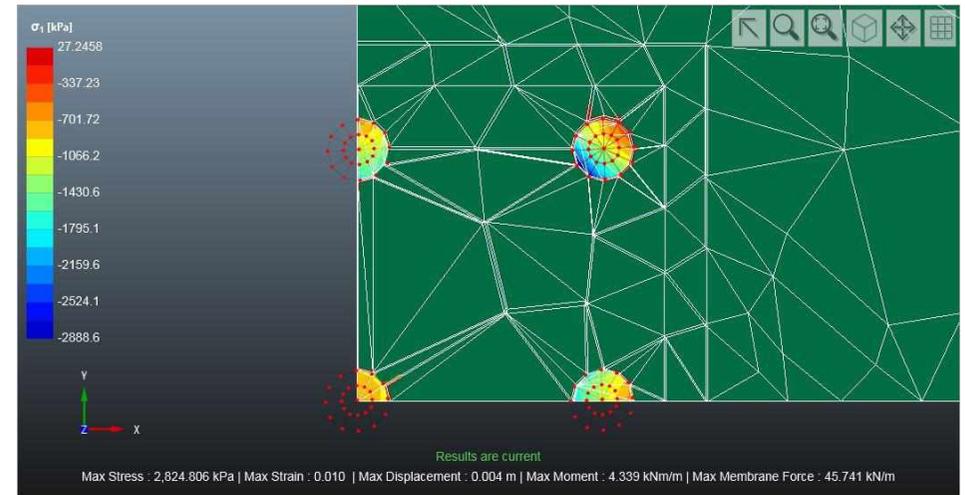


ESTÁGIO 12 DE CARREGAMENTO

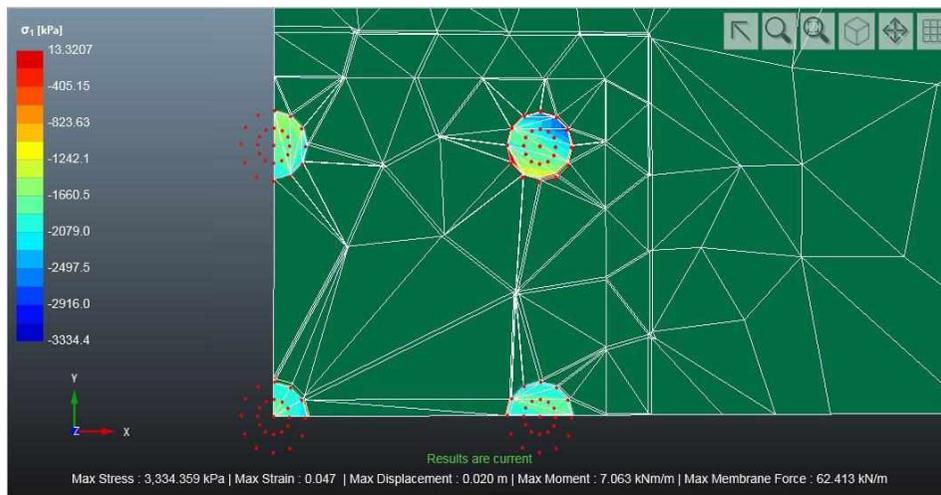
$$s/d = 4 \text{ e } L = 5 \text{ m}$$



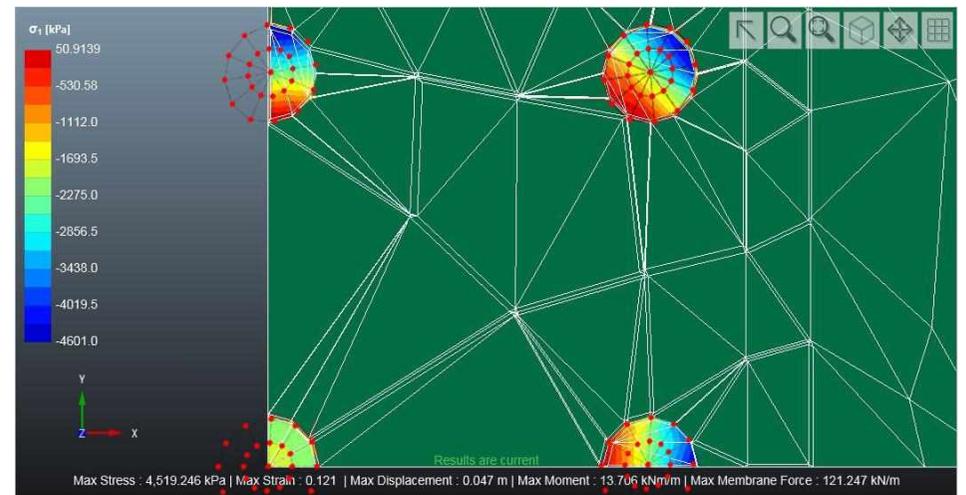
ESTÁGIO 4 DE CARREGAMENTO



ESTÁGIO 7 DE CARREGAMENTO

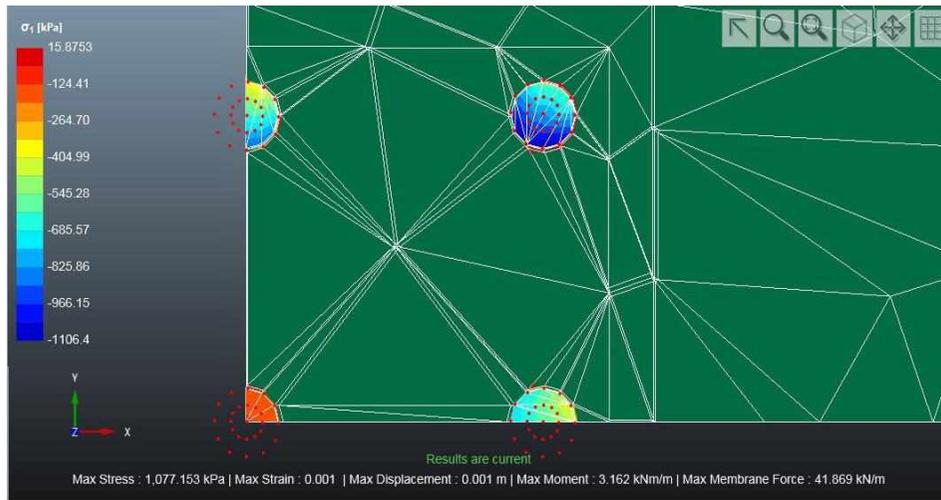


ESTÁGIO 10 DE CARREGAMENTO

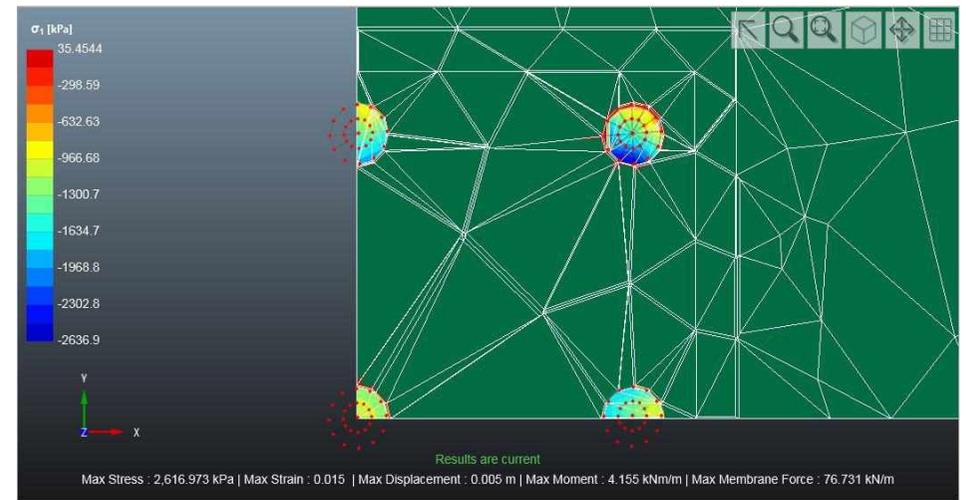


ESTÁGIO 12 DE CARREGAMENTO

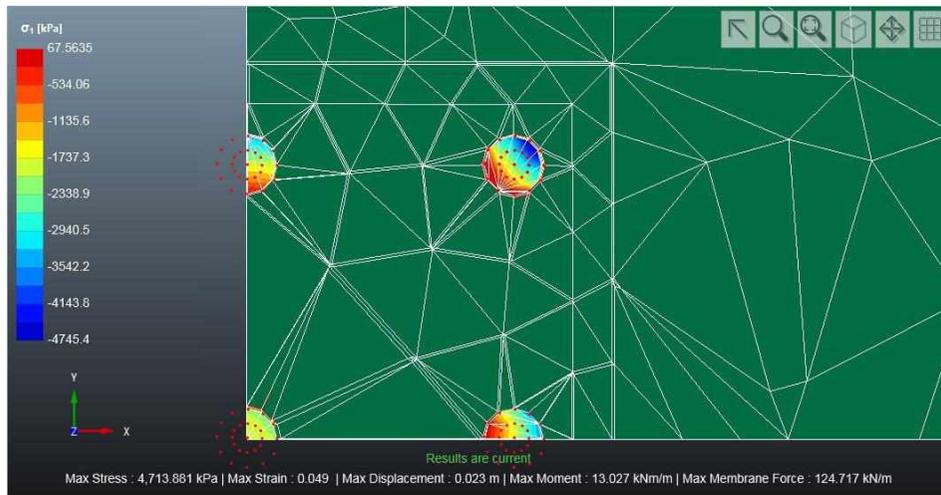
$s/d = 4,5$ e $L = 5$ m



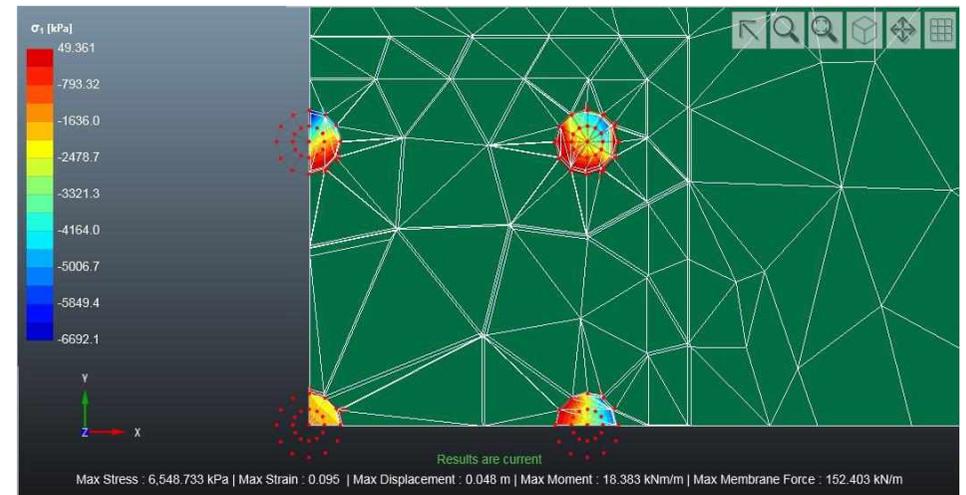
ESTÁGIO 4 DE CARREGAMENTO



ESTÁGIO 7 DE CARREGAMENTO

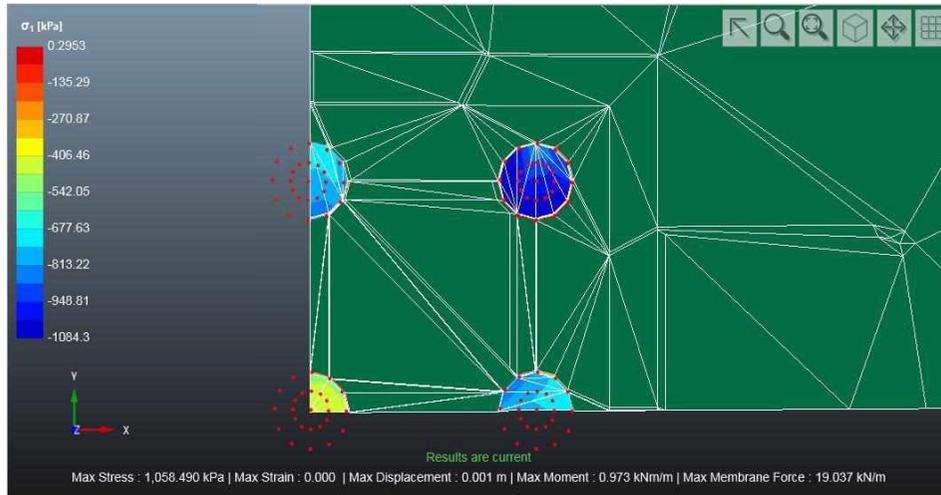


ESTÁGIO 10 DE CARREGAMENTO

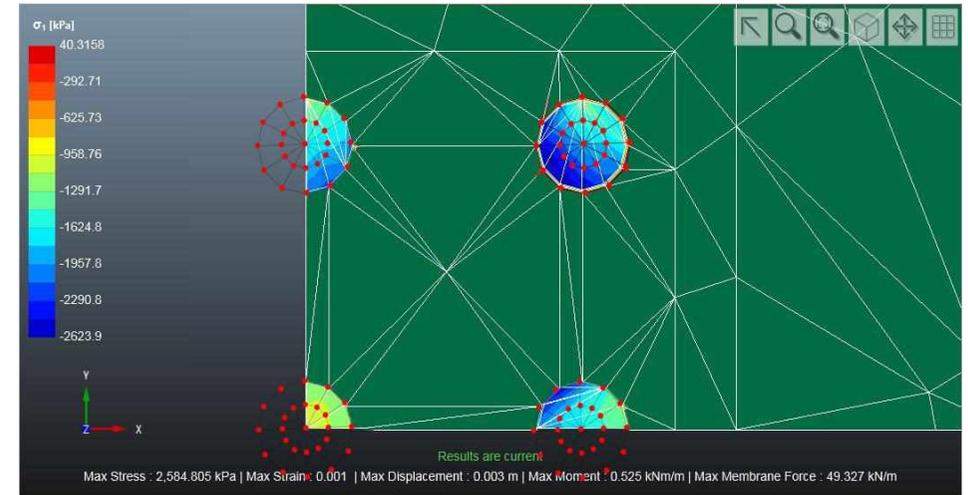


ESTÁGIO 12 DE CARREGAMENTO

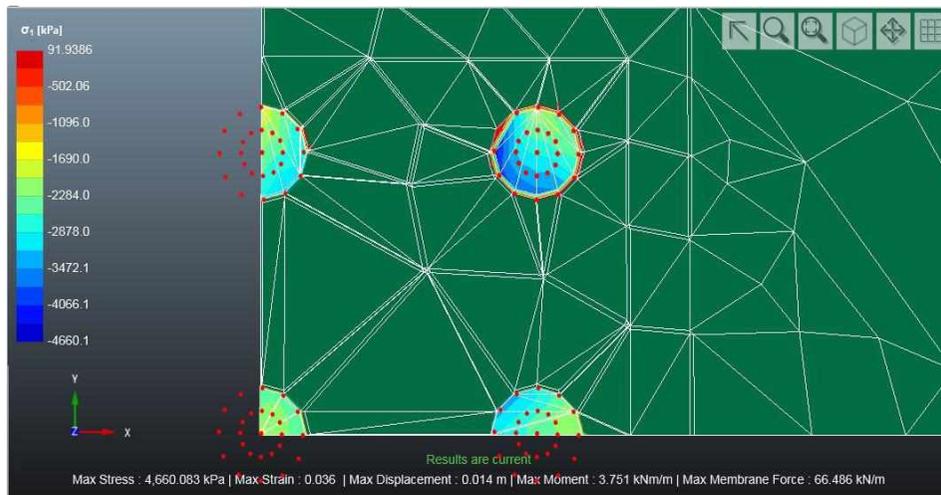
$$s/d = 3 \text{ e } L = 10 \text{ m}$$



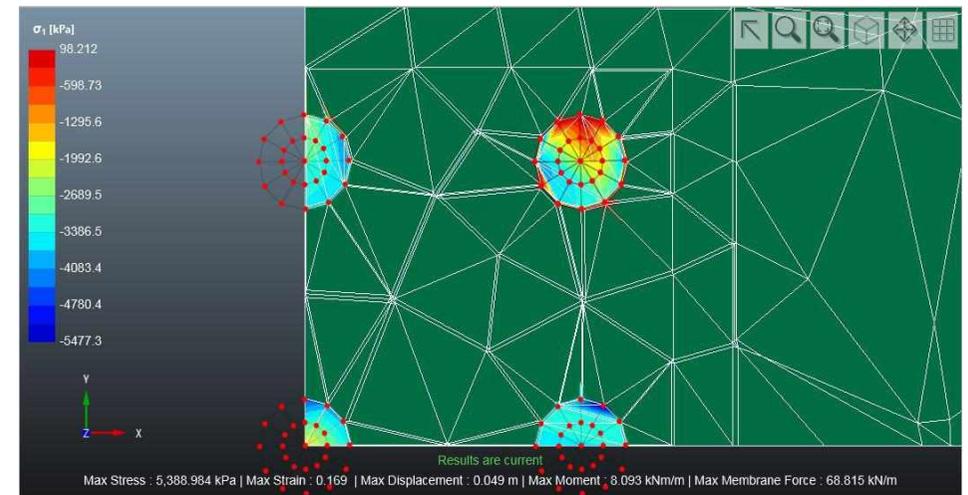
ESTÁGIO 4 DE CARREGAMENTO



ESTÁGIO 7 DE CARREGAMENTO

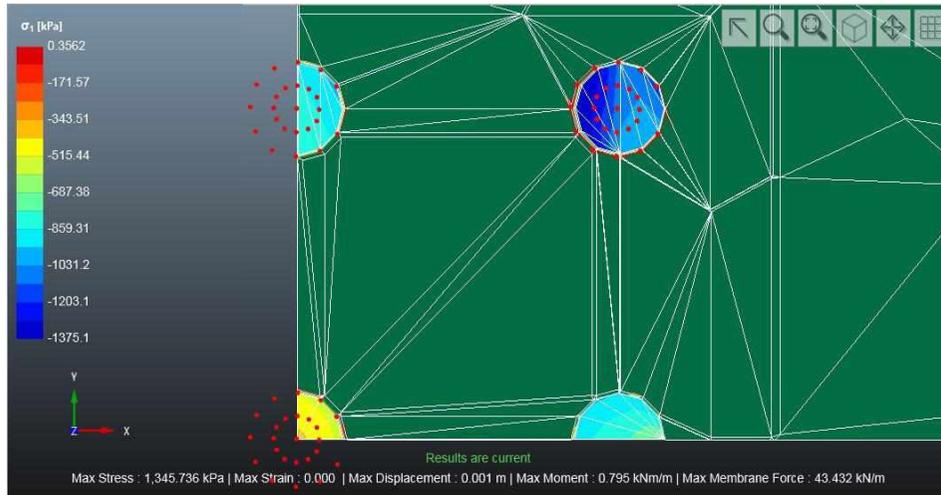


ESTÁGIO 10 DE CARREGAMENTO

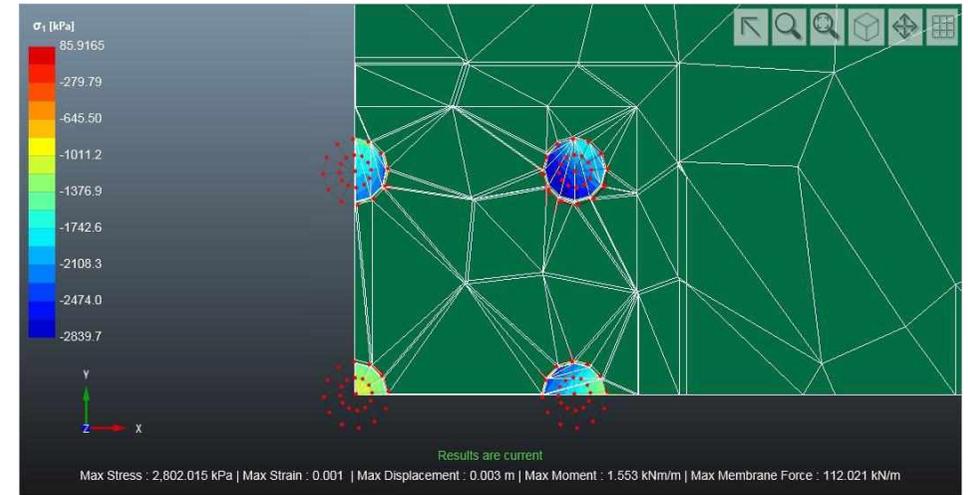


ESTÁGIO 12 DE CARREGAMENTO

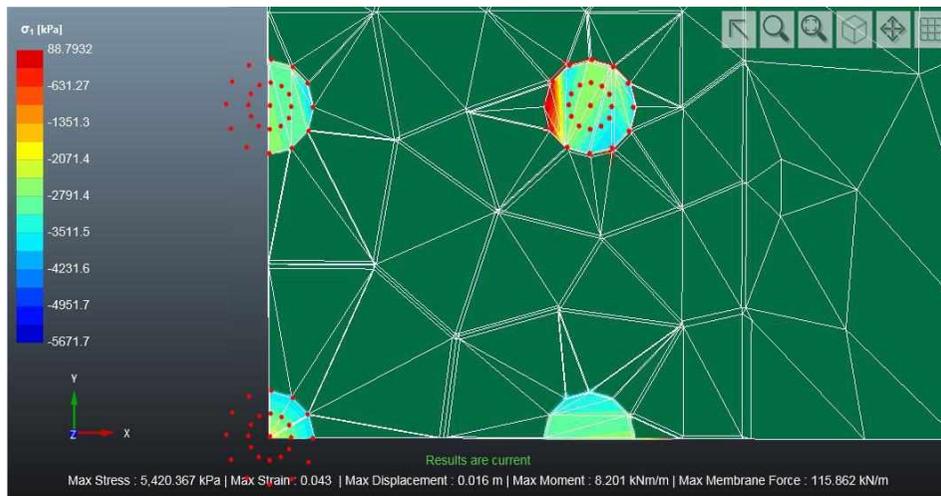
$s/d = 3,5$ e $L = 10$ m



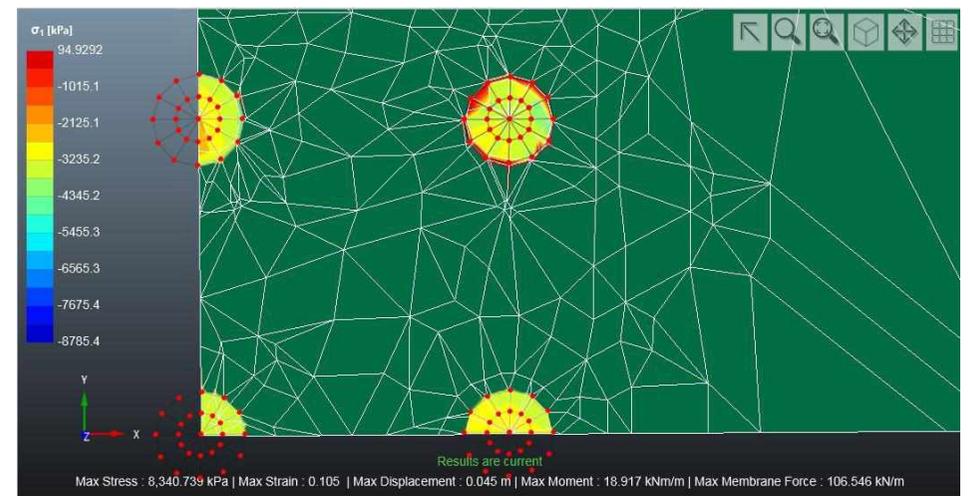
ESTÁGIO 4 DE CARREGAMENTO



ESTÁGIO 7 DE CARREGAMENTO

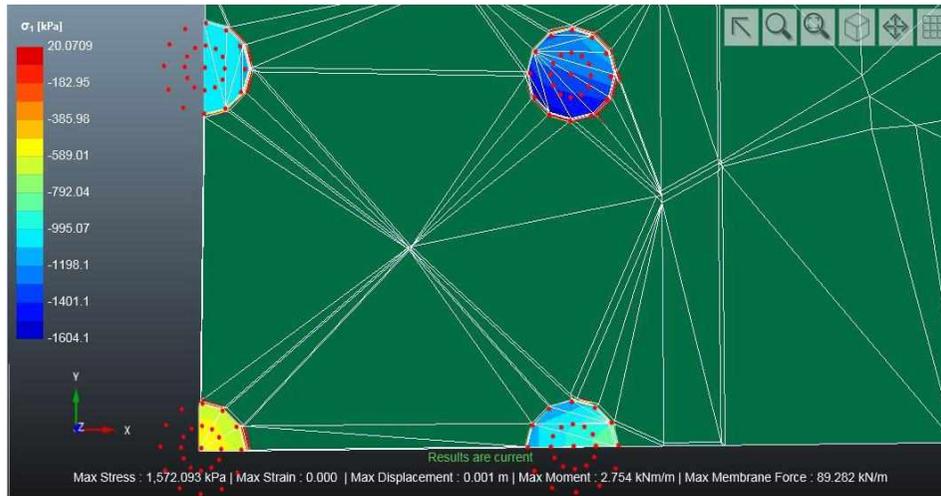


ESTÁGIO 10 DE CARREGAMENTO

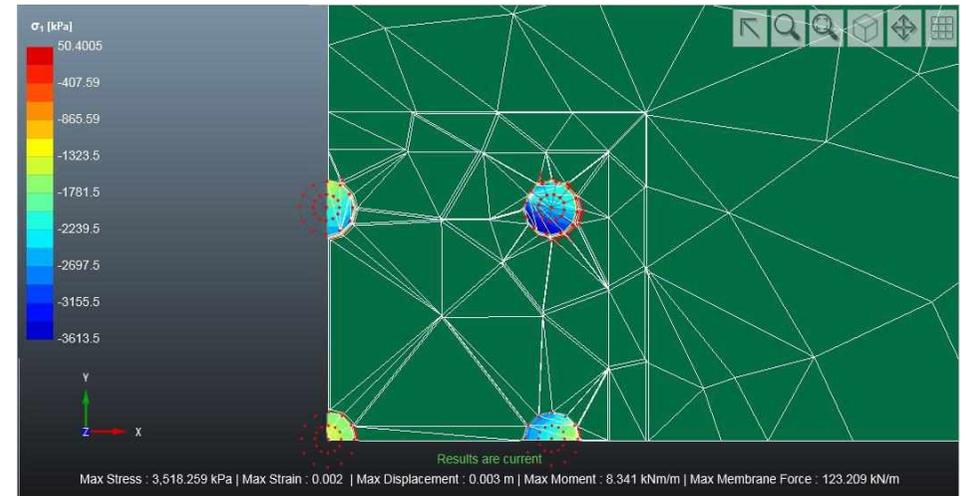


ESTÁGIO 12 DE CARREGAMENTO

$$s/d = 4 \text{ e } L = 10 \text{ m}$$



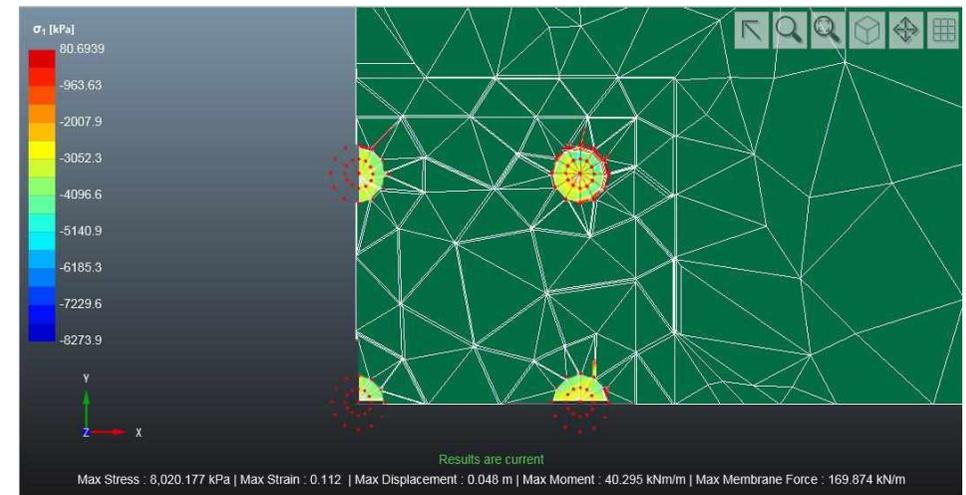
ESTÁGIO 4 DE CARREGAMENTO



ESTÁGIO 7 DE CARREGAMENTO

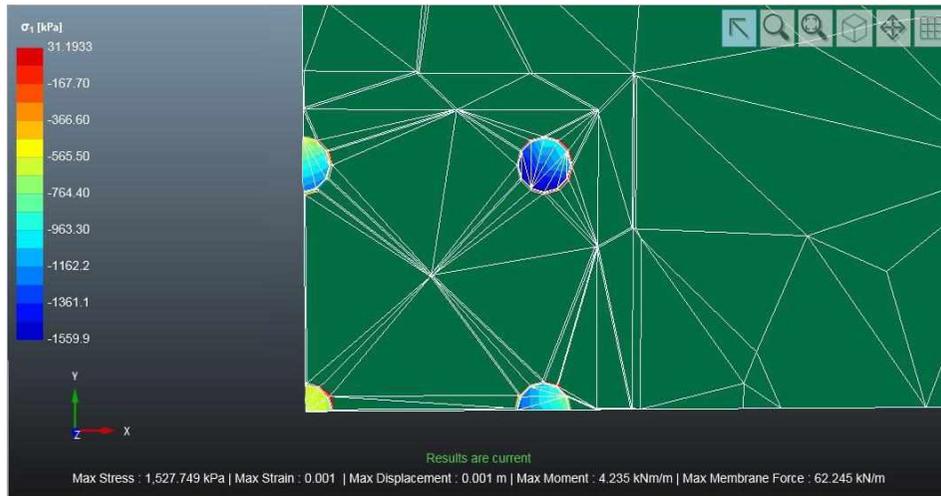


ESTÁGIO 10 DE CARREGAMENTO

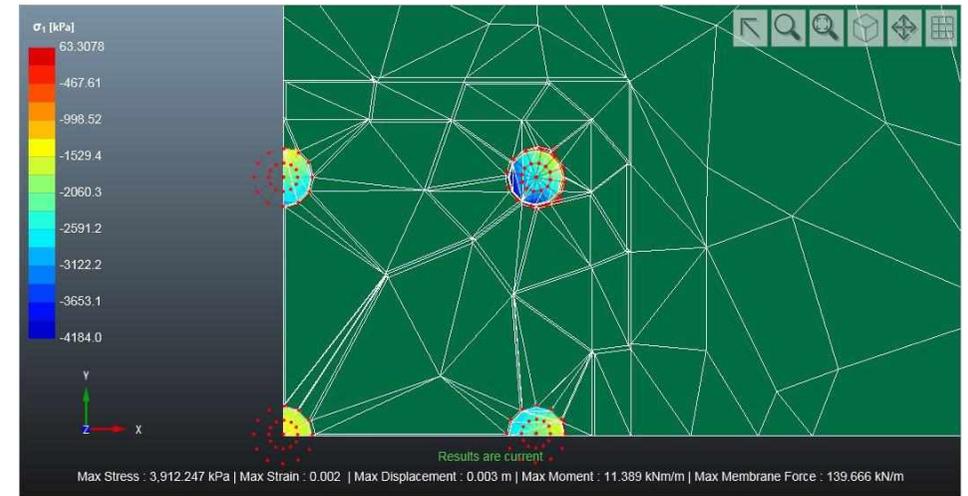


ESTÁGIO 12 DE CARREGAMENTO

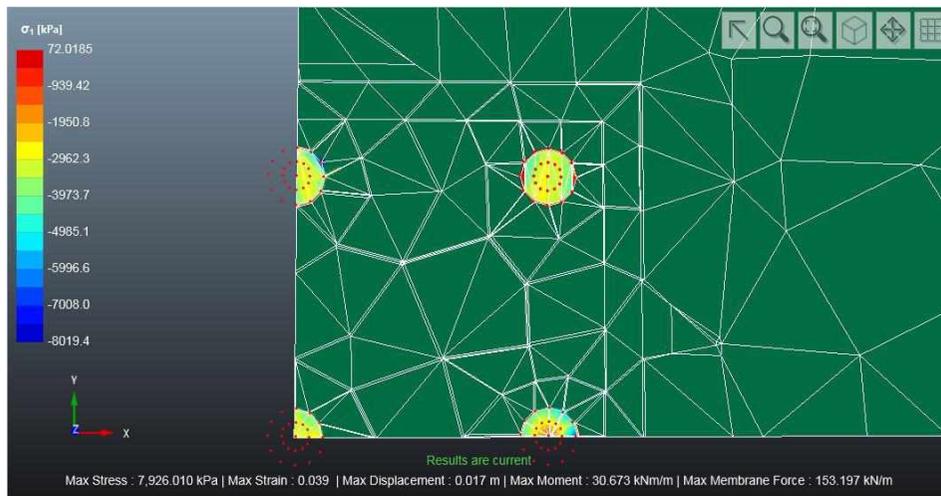
$s/d = 4,5$ e $L = 10$ m



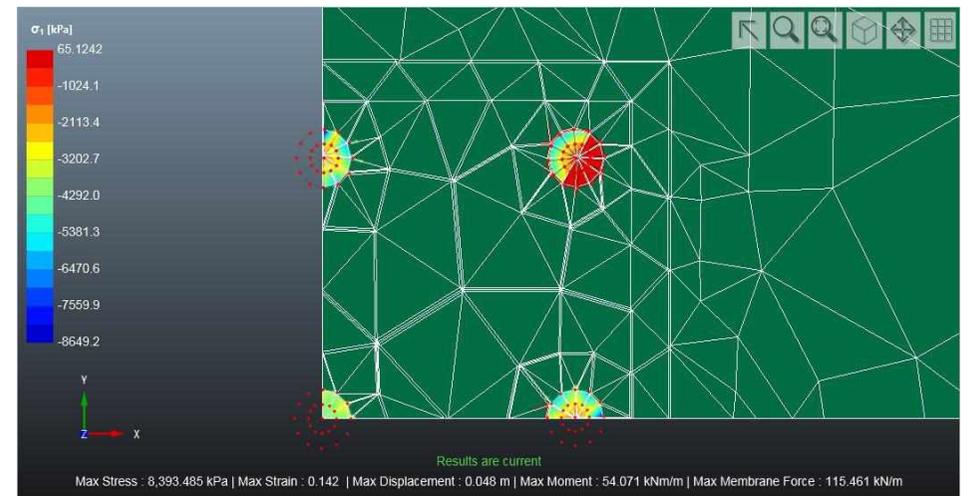
ESTÁGIO 4 DE CARREGAMENTO



ESTÁGIO 7 DE CARREGAMENTO

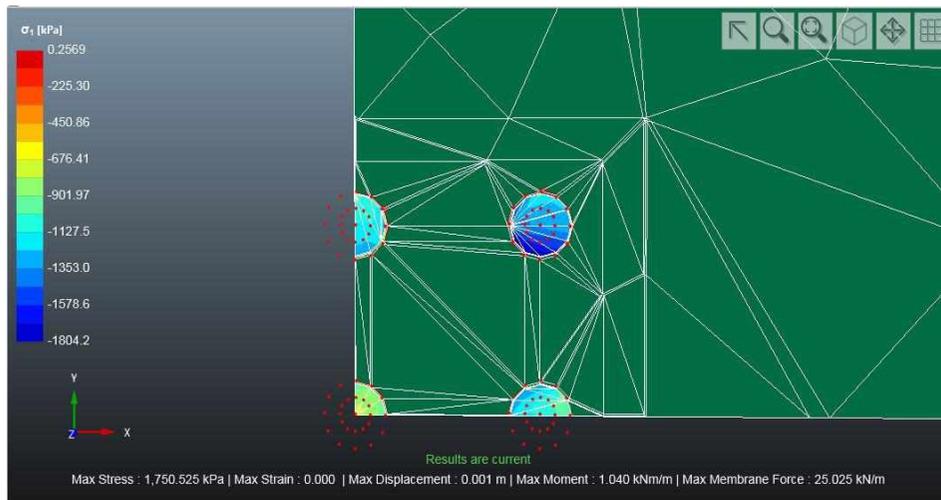


ESTÁGIO 10 DE CARREGAMENTO

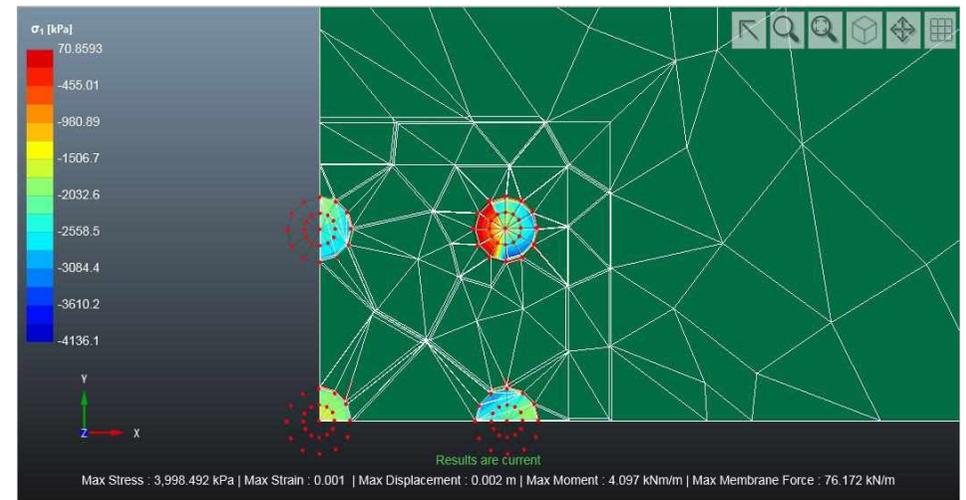


ESTÁGIO 12 DE CARREGAMENTO

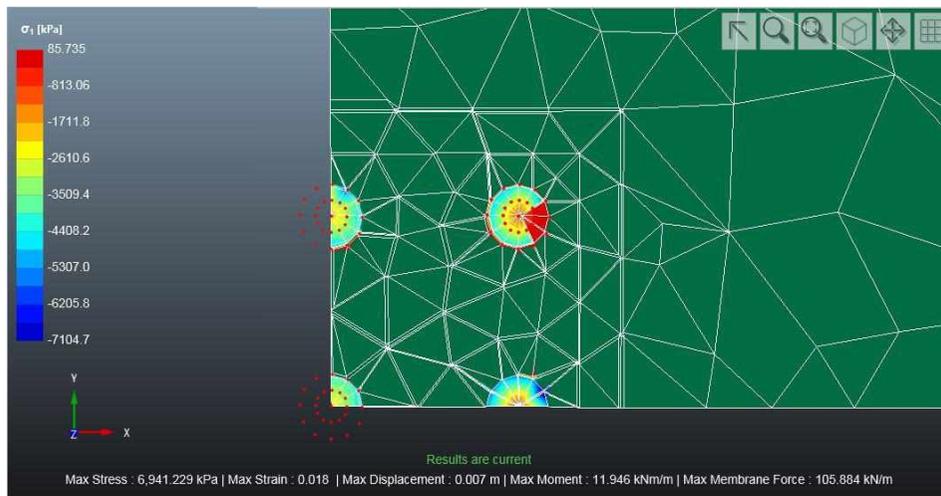
$$s/d = 3 \text{ e } L = 15 \text{ m}$$



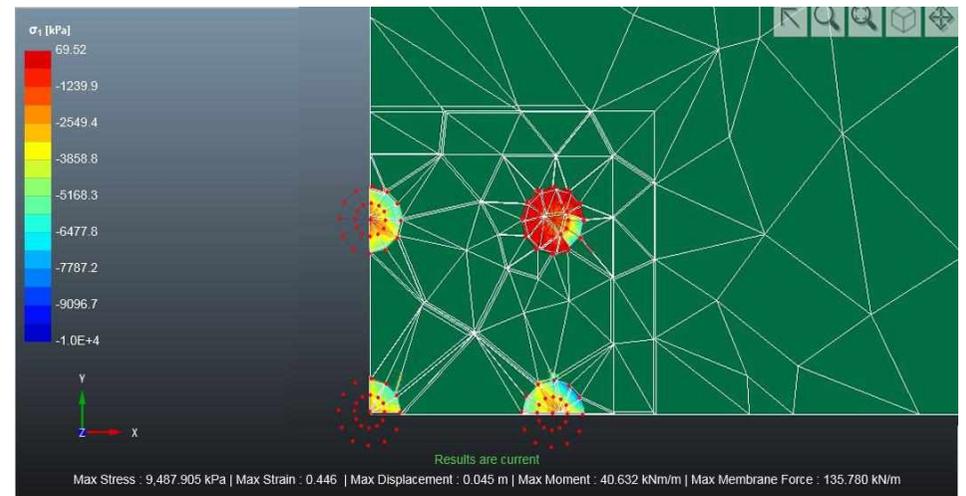
ESTÁGIO 4 DE CARREGAMENTO



ESTÁGIO 7 DE CARREGAMENTO

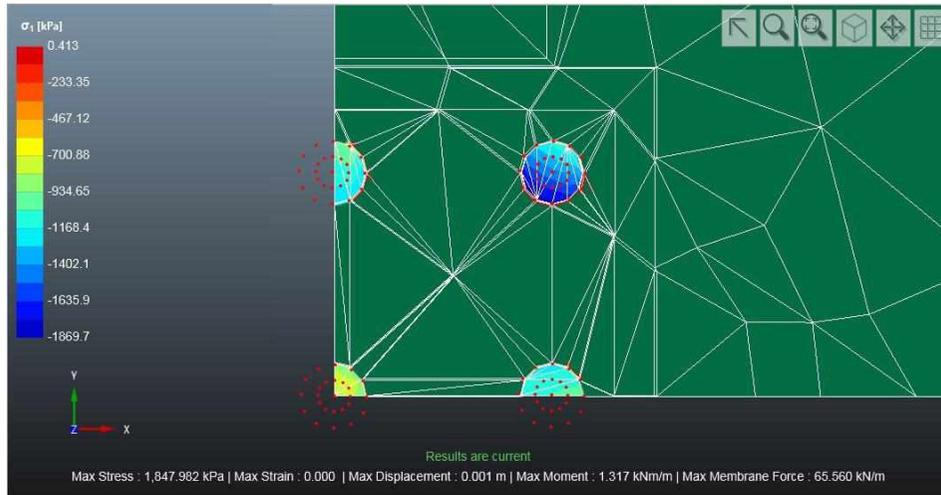


ESTÁGIO 10 DE CARREGAMENTO

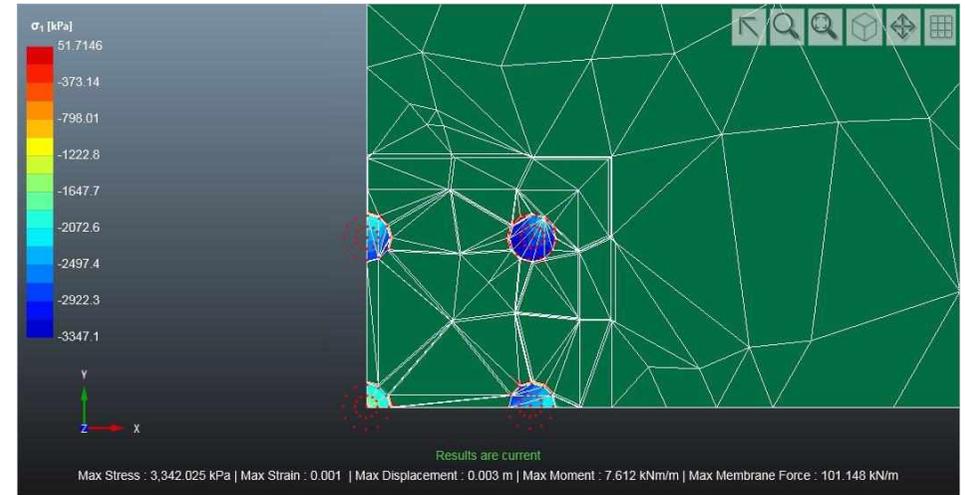


ESTÁGIO 12 DE CARREGAMENTO

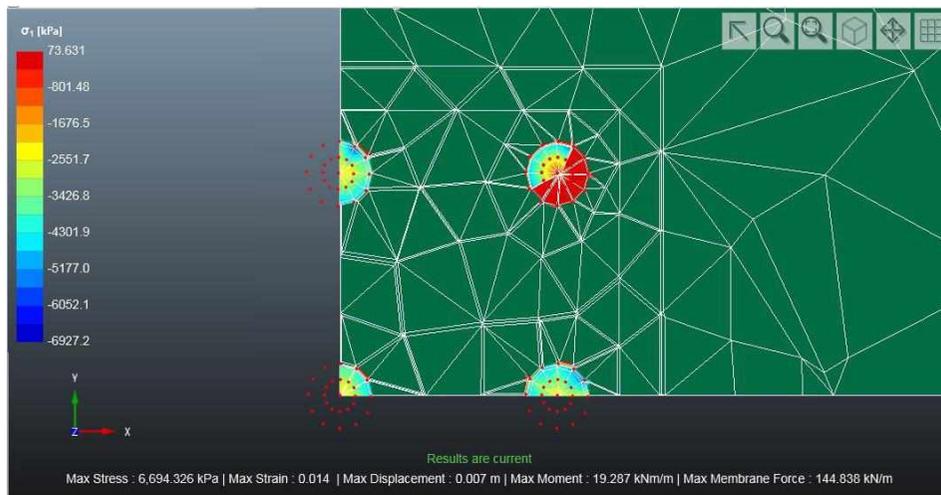
$s/d = 3,5$ e $L = 15$ m



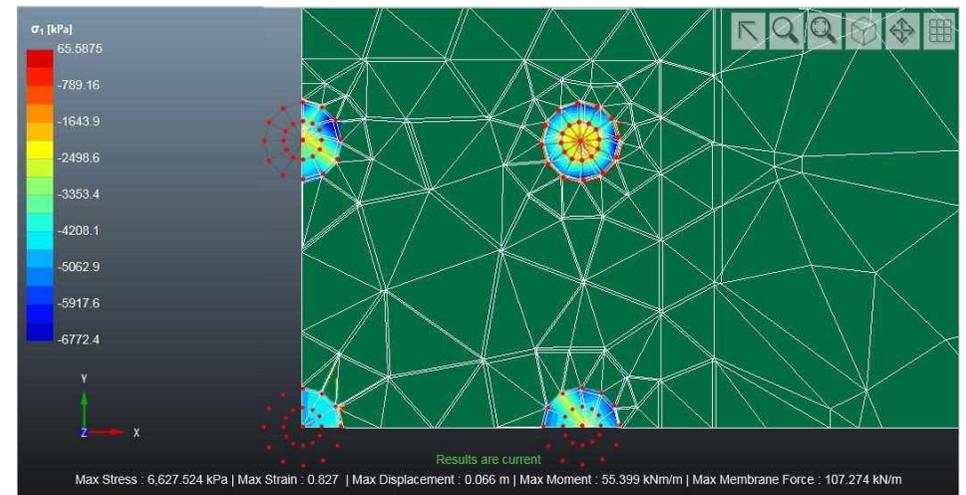
ESTÁGIO 4 DE CARREGAMENTO



ESTÁGIO 7 DE CARREGAMENTO

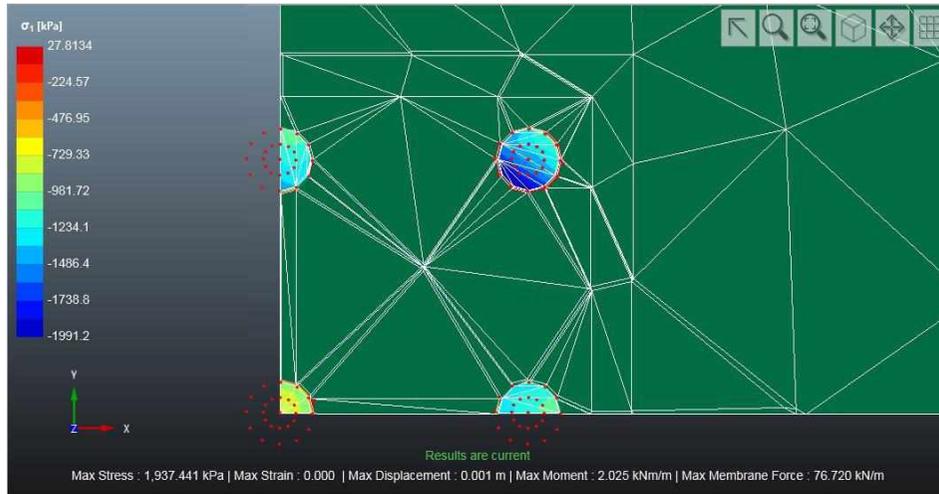


ESTÁGIO 10 DE CARREGAMENTO

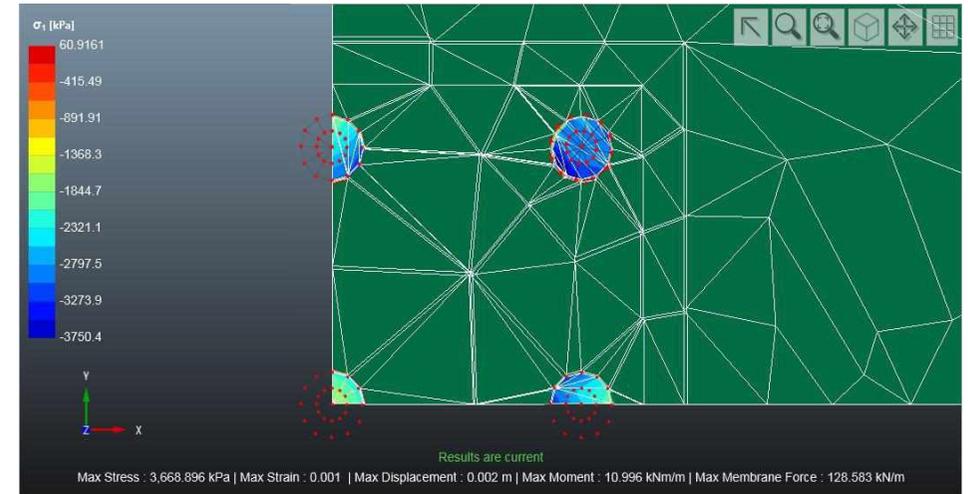


ESTÁGIO 12 DE CARREGAMENTO

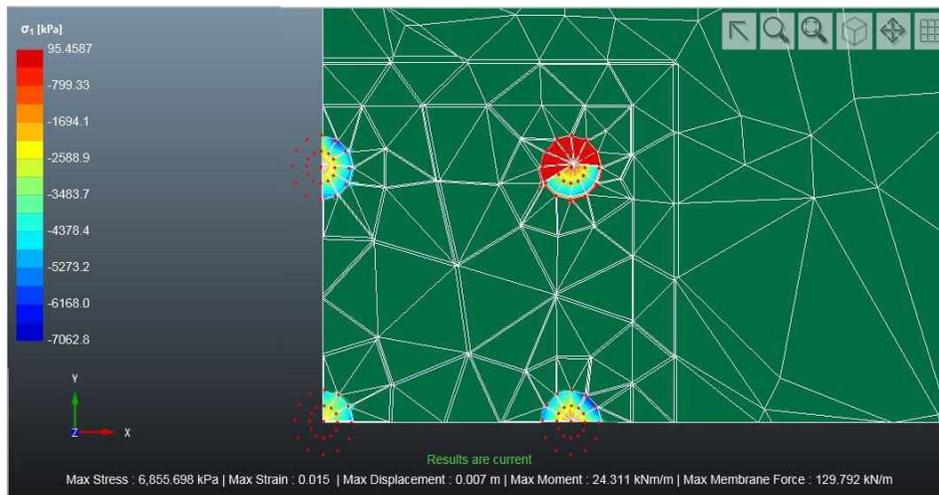
$s/d = 4$ e $L = 15$ m



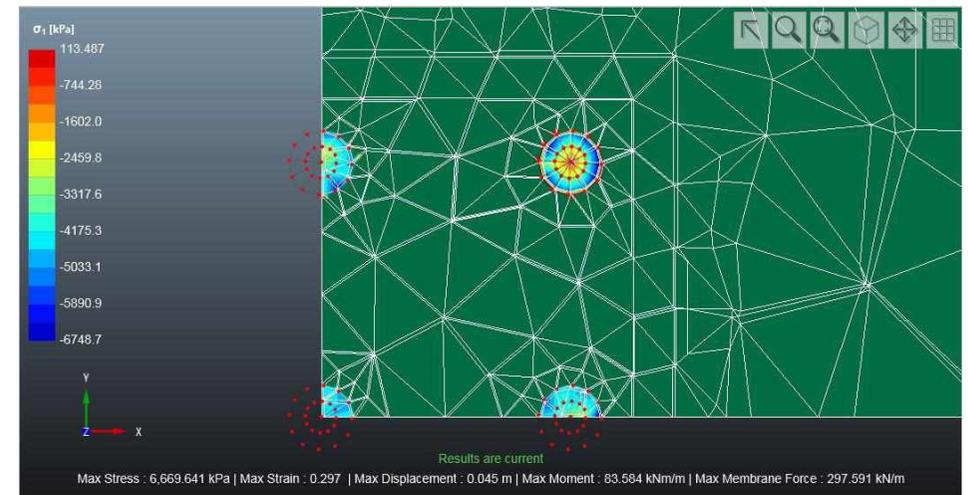
ESTÁGIO 4 DE CARREGAMENTO



ESTÁGIO 7 DE CARREGAMENTO

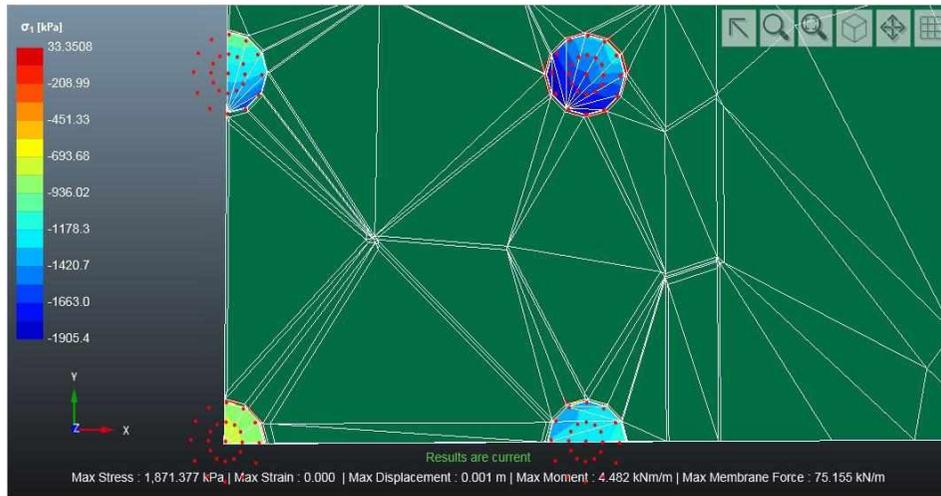


ESTÁGIO 10 DE CARREGAMENTO

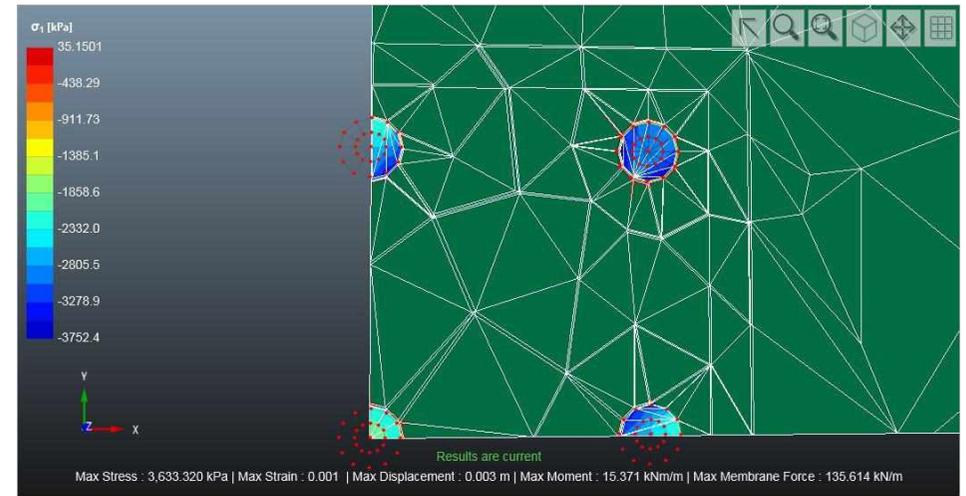


ESTÁGIO 12 DE CARREGAMENTO

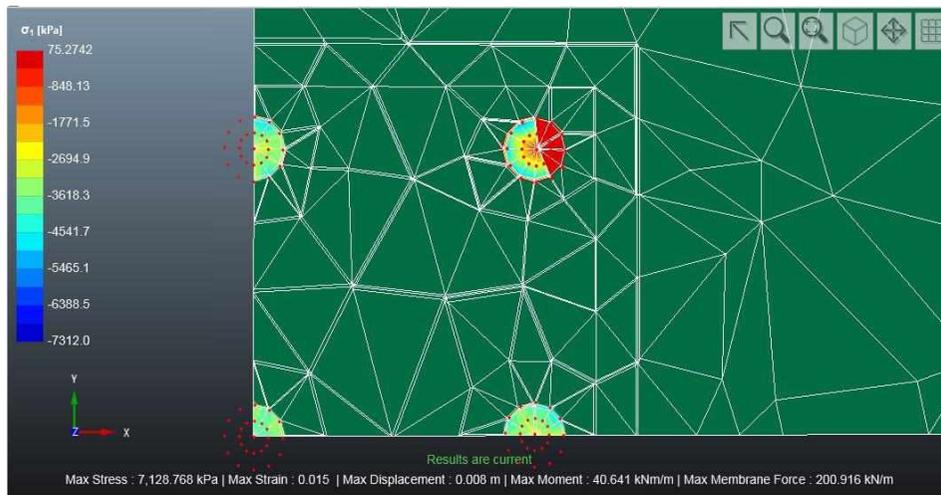
$s/d = 4,5$ e $L = 15$ m



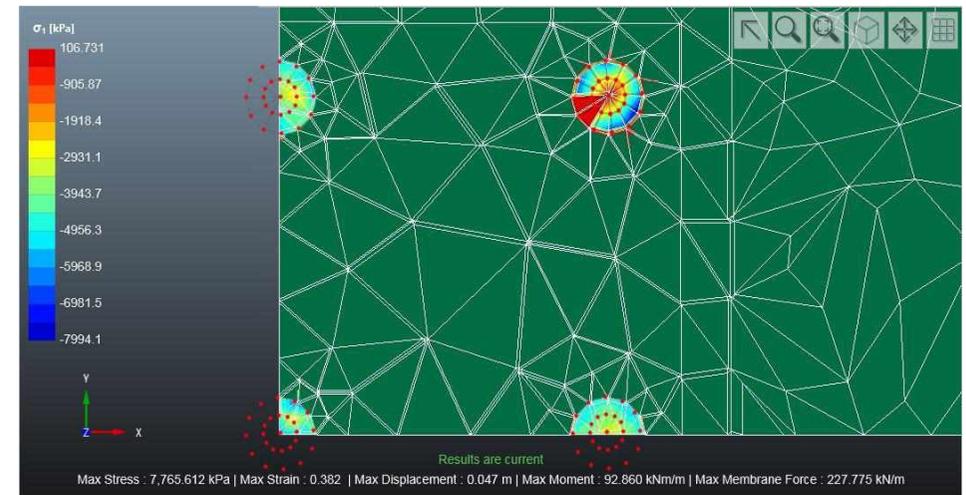
ESTÁGIO 4 DE CARREGAMENTO



ESTÁGIO 7 DE CARREGAMENTO



ESTÁGIO 10 DE CARREGAMENTO

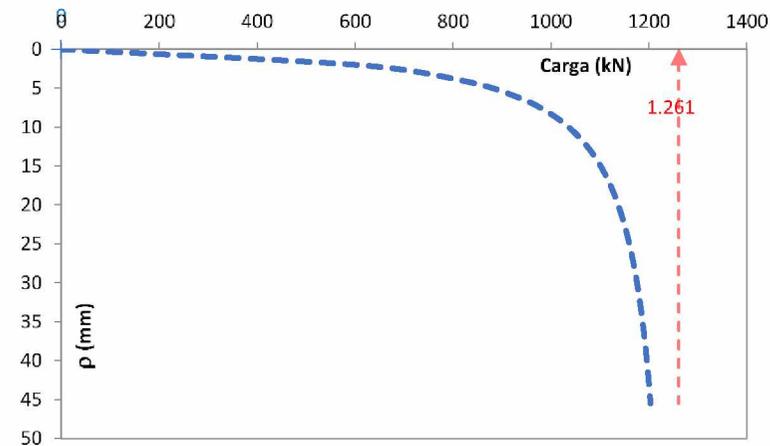


ESTÁGIO 12 DE CARREGAMENTO

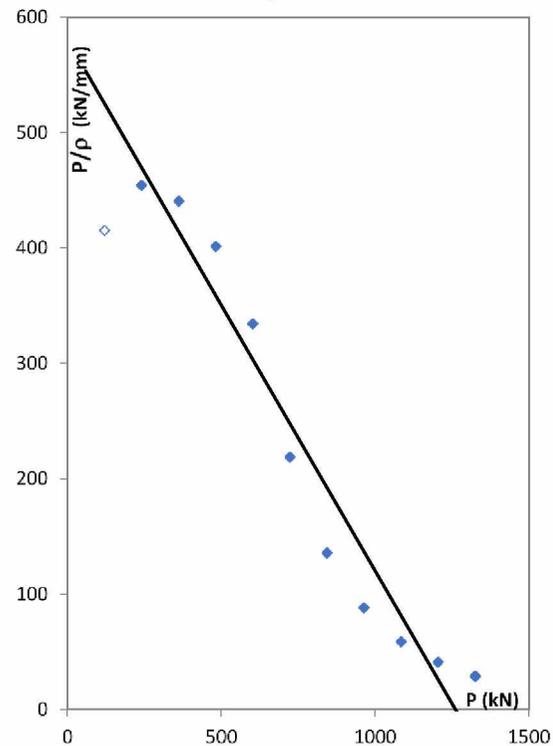
APÊNDICE B

Décourt (1996) para $(s/d)=3$ e $L=5$ m

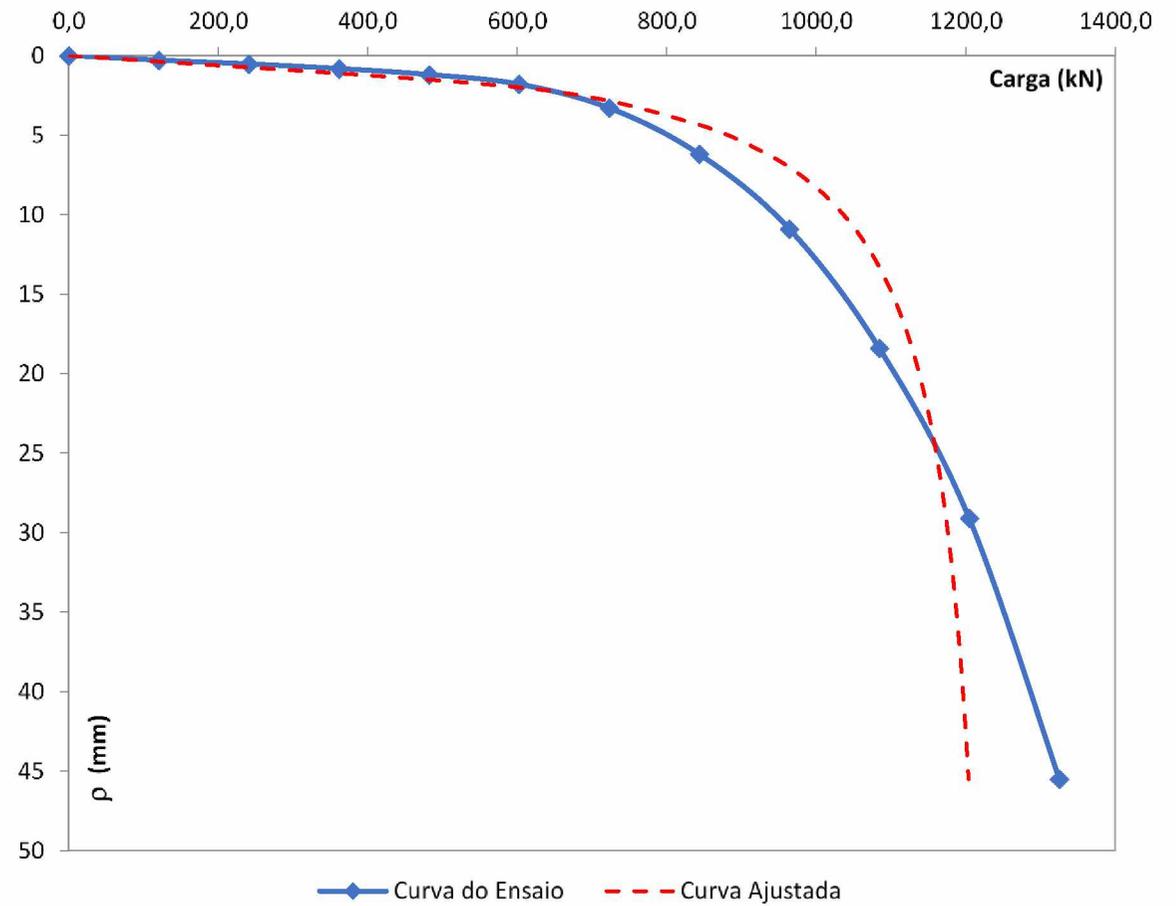
Curva Ajustada



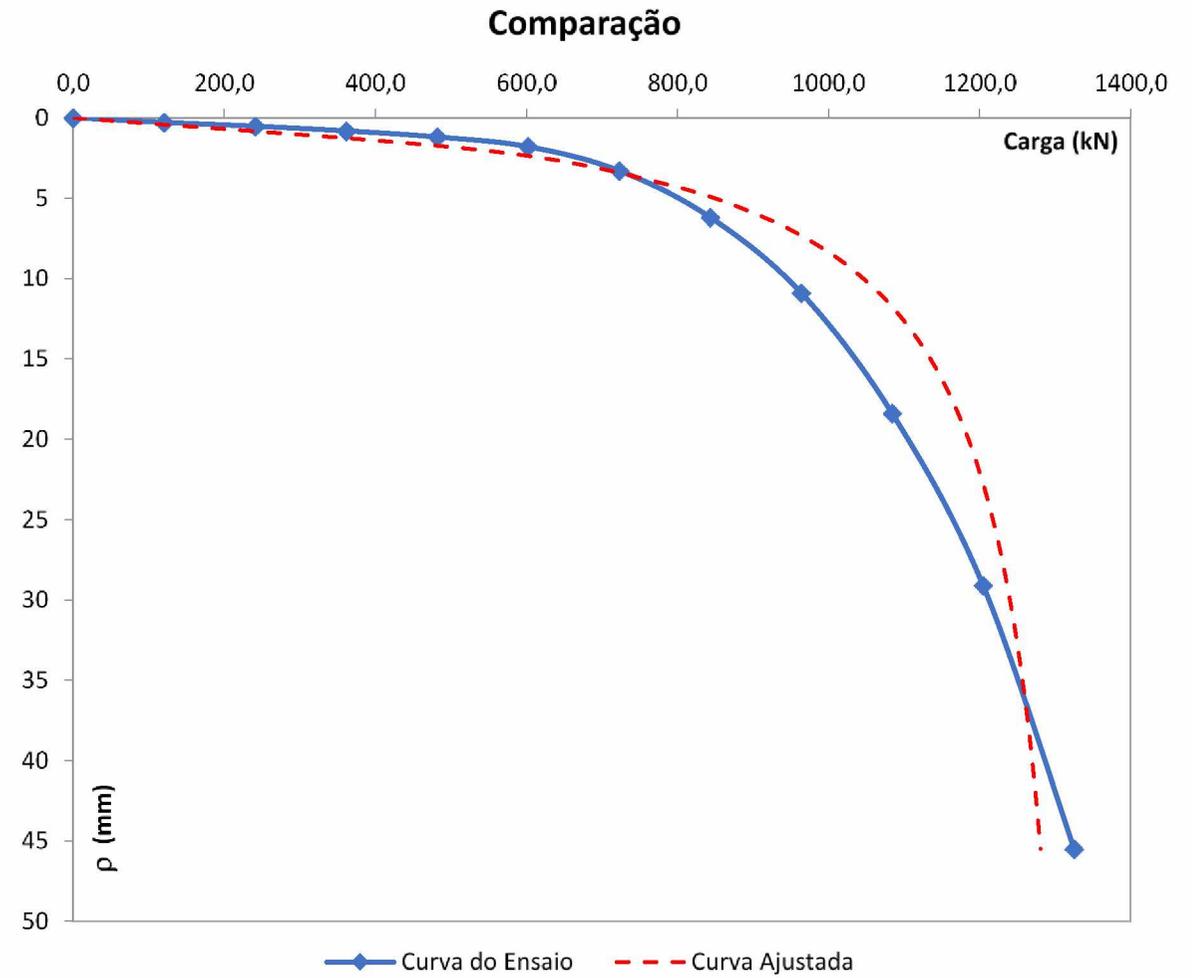
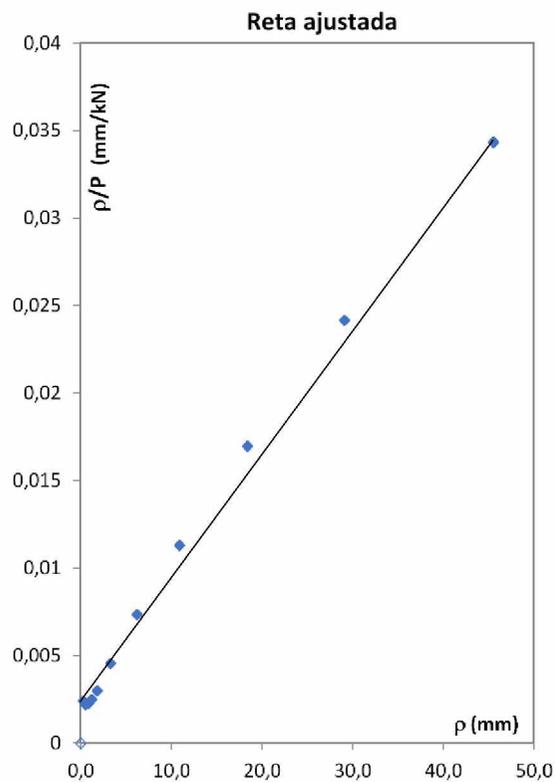
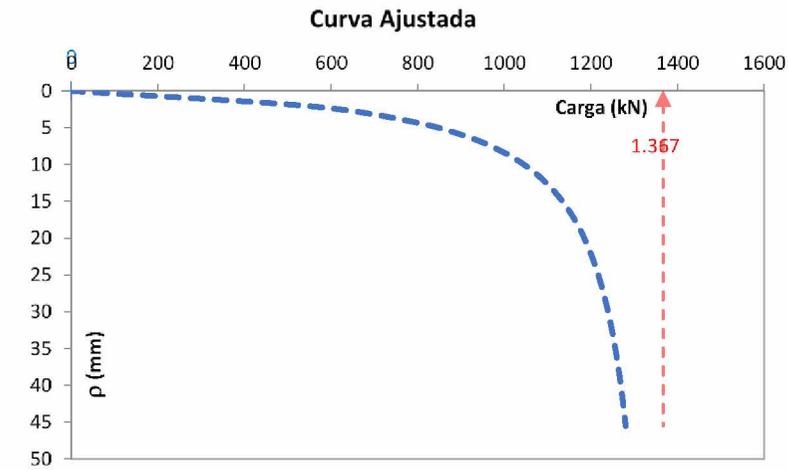
Reta Ajustada



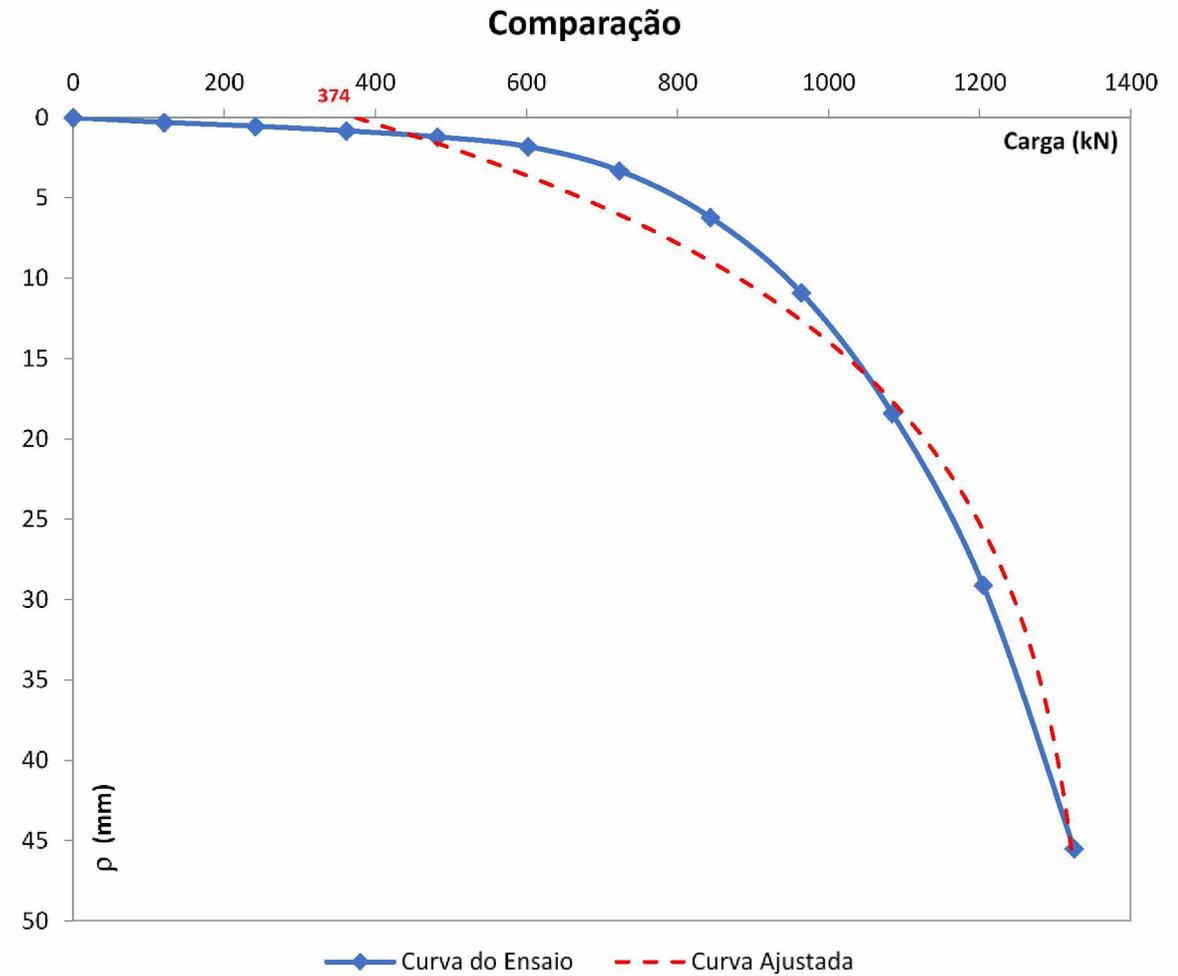
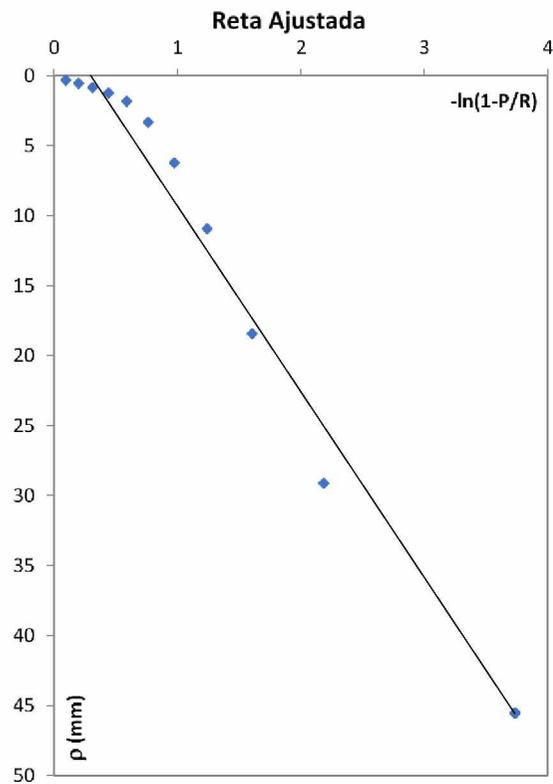
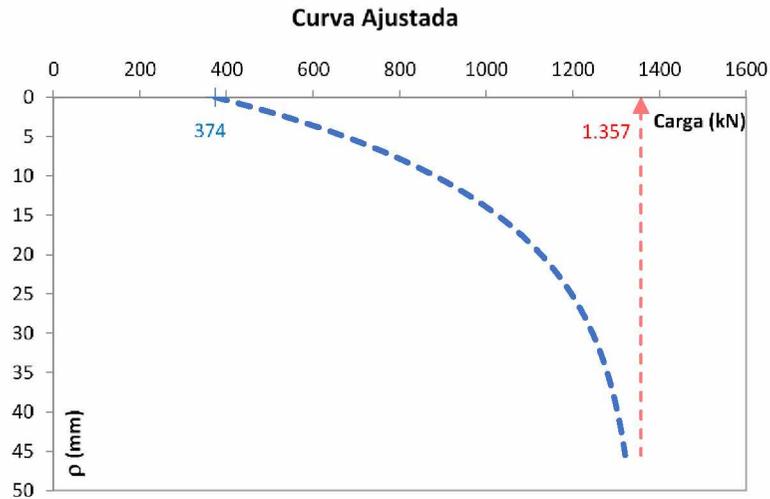
Comparação



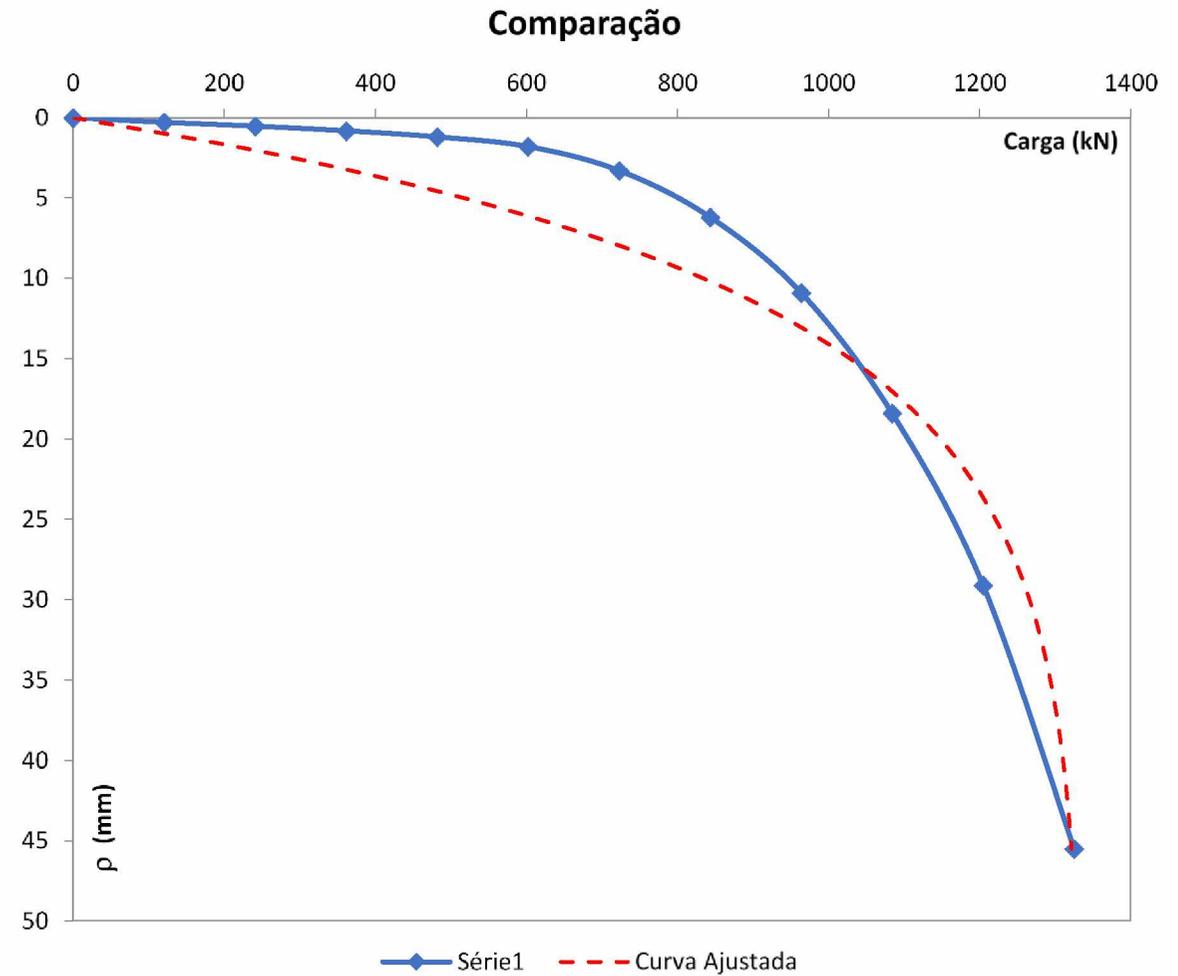
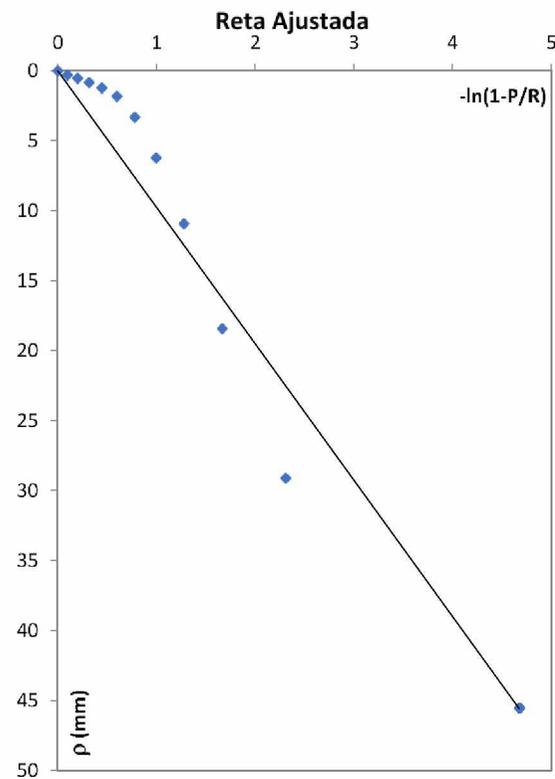
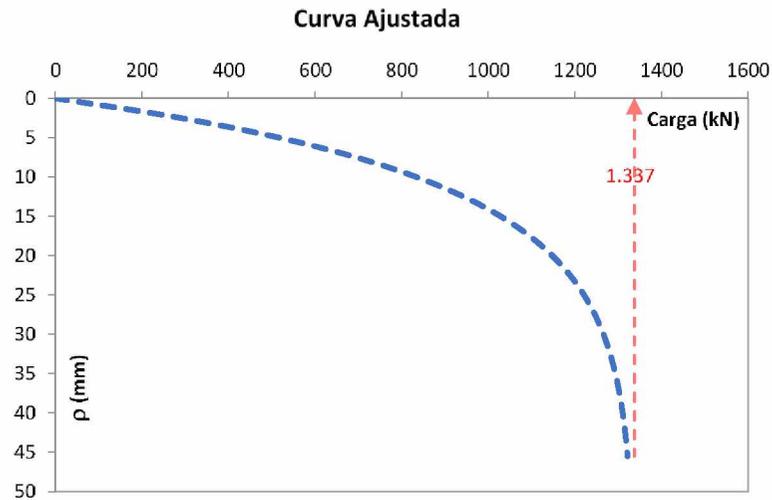
Chin (1978) para $(s/d)=3$ e $L=5$ m



Aoki (1976) para $(s/d)=3$ e $L=5$ m

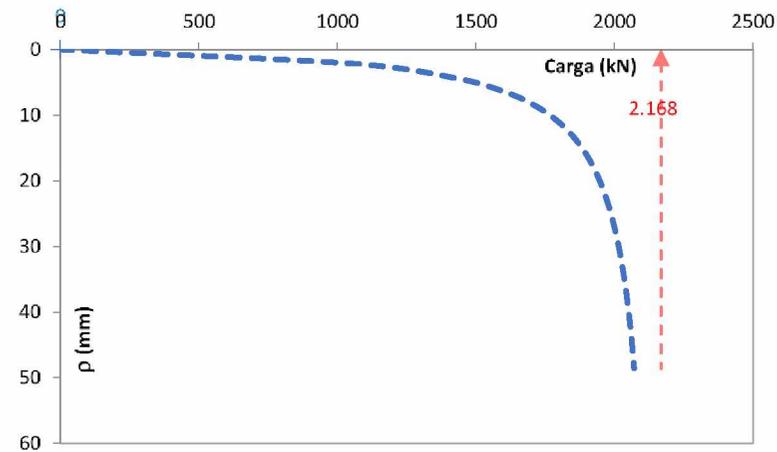


Van der Veen (1953) para $(s/d)=3$ e $L=5$ m

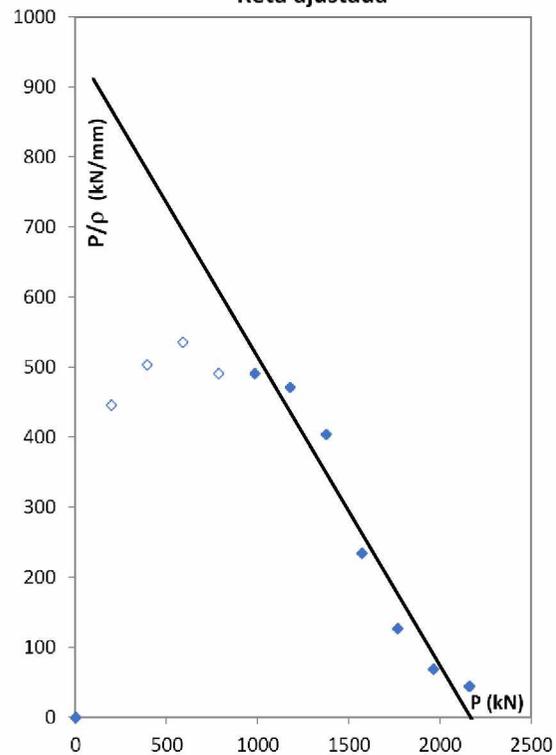


Décourt (1996) para $(s/d)=3$ e $L=10$ m

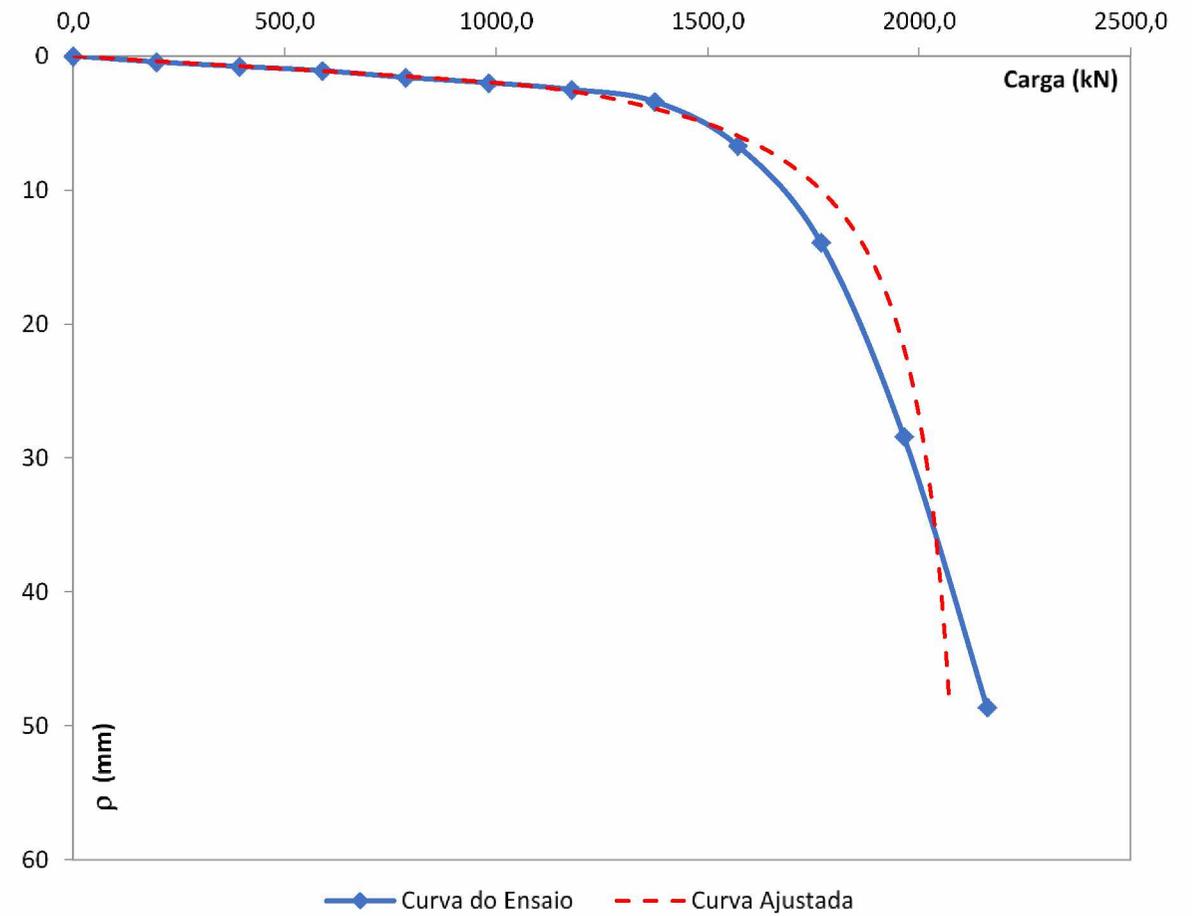
Curva Ajustada



Reta ajustada

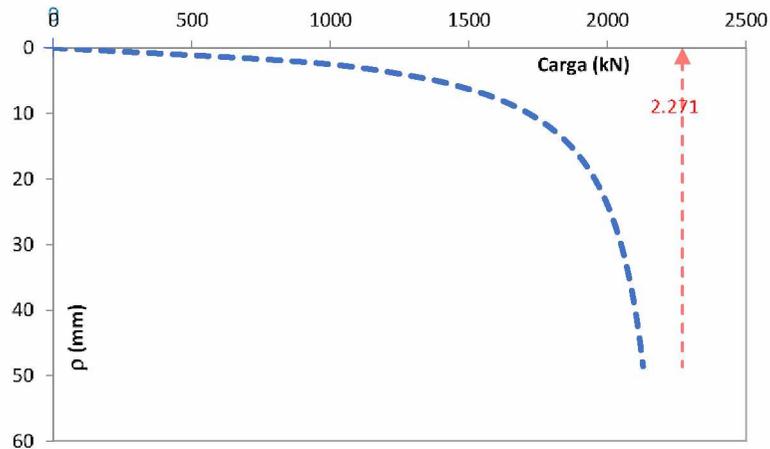


Comparação

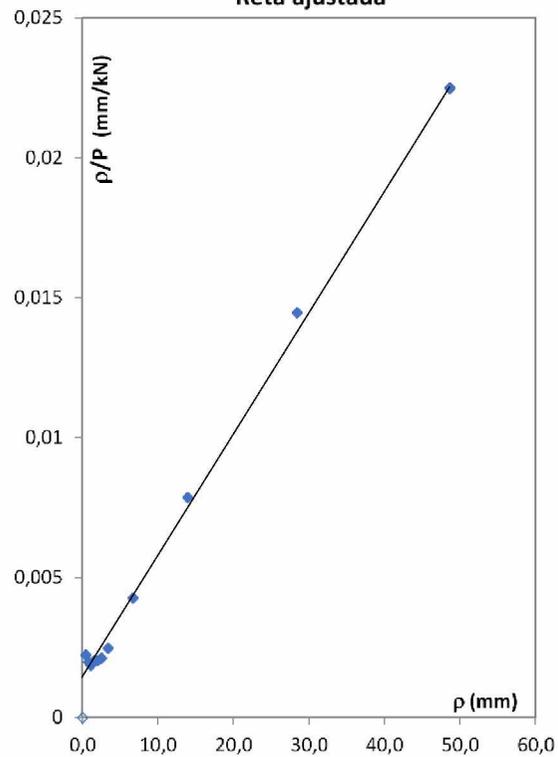


Chin (1978) para $(s/d)=3$ e $L=10$ m

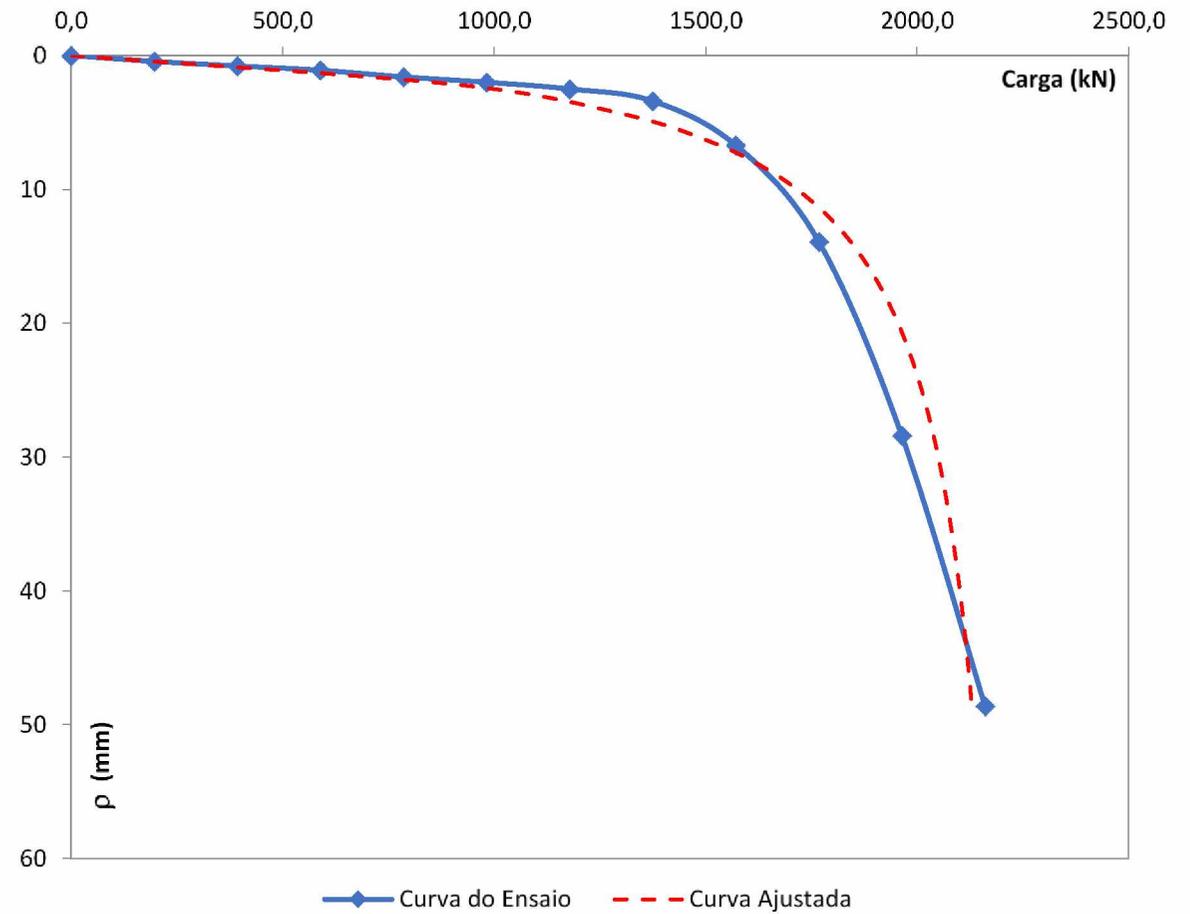
Curva Ajustada



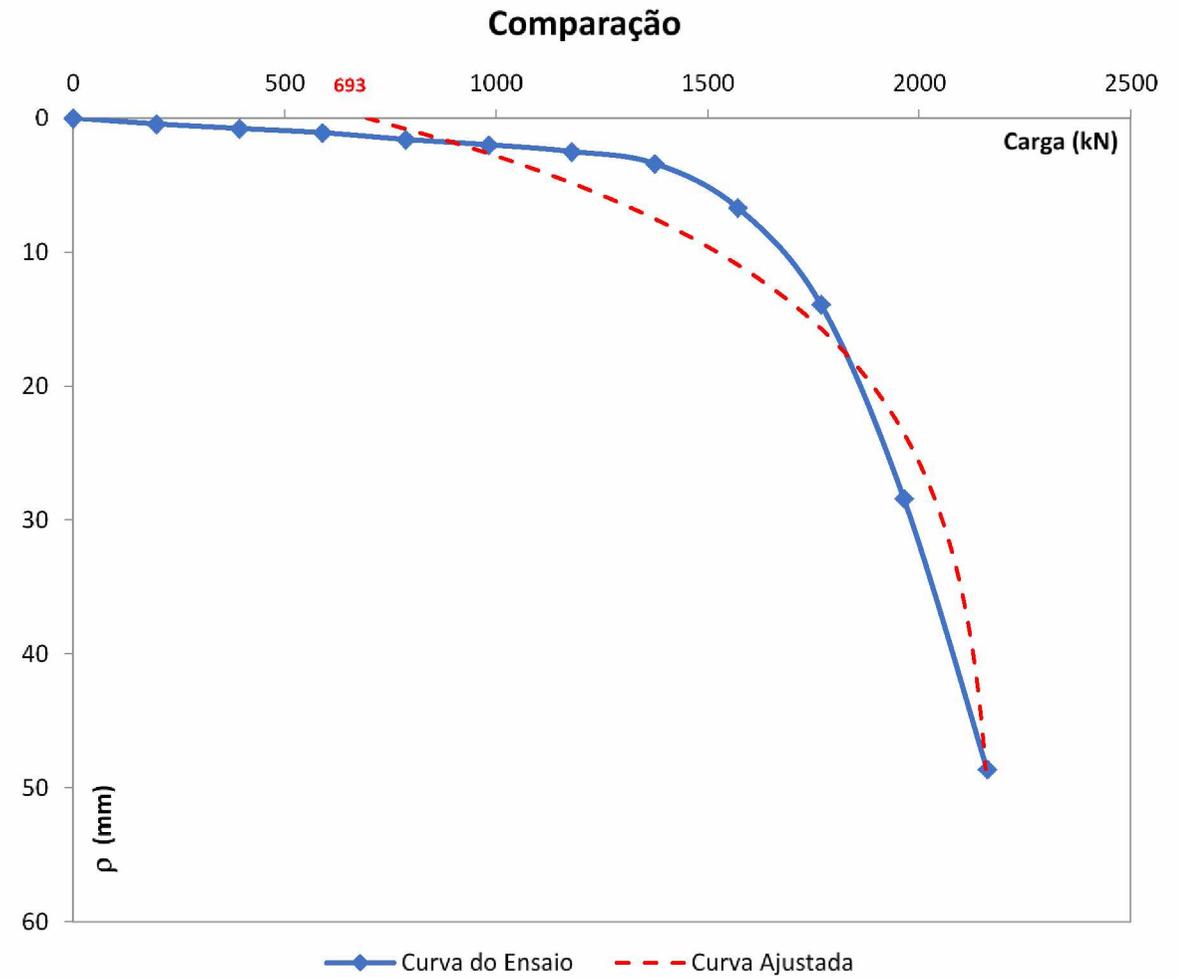
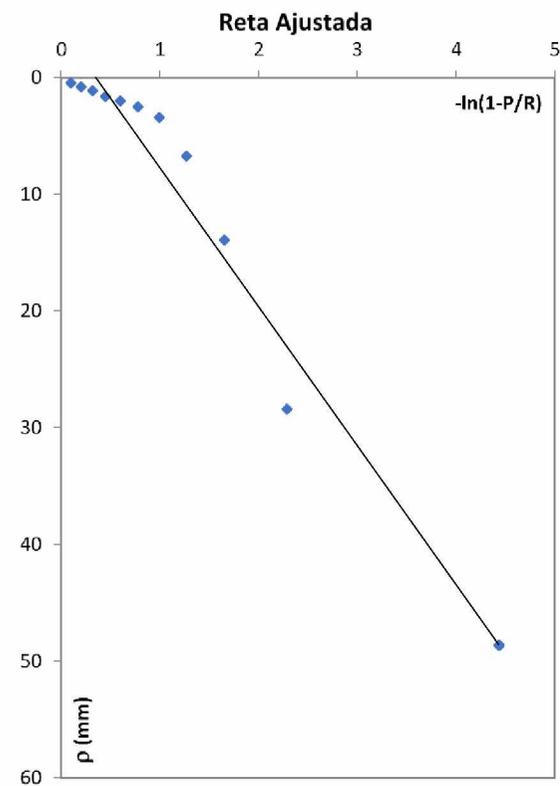
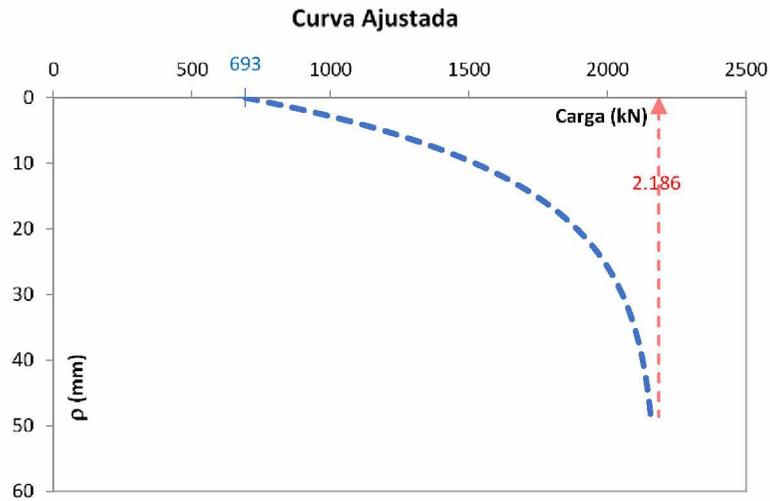
Reta ajustada



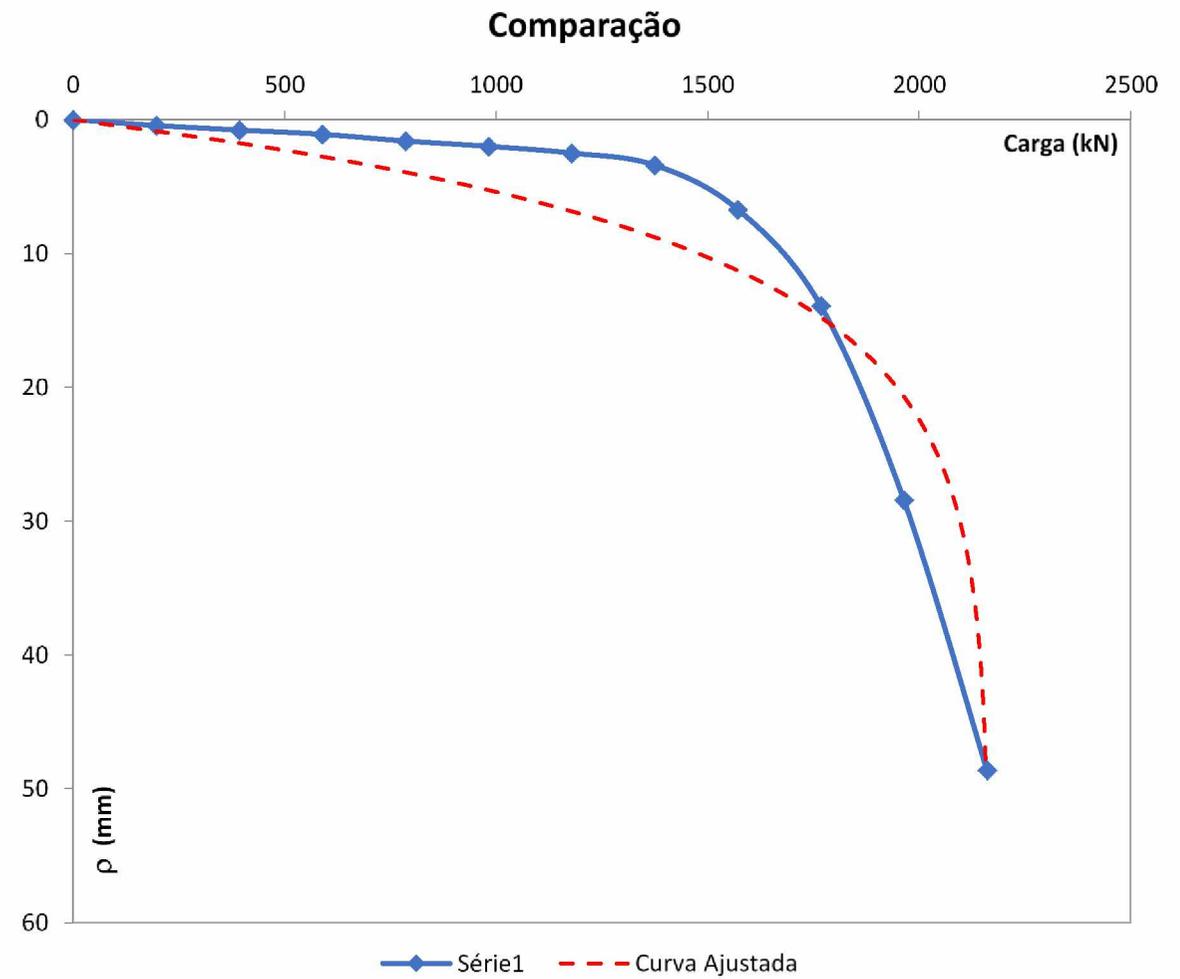
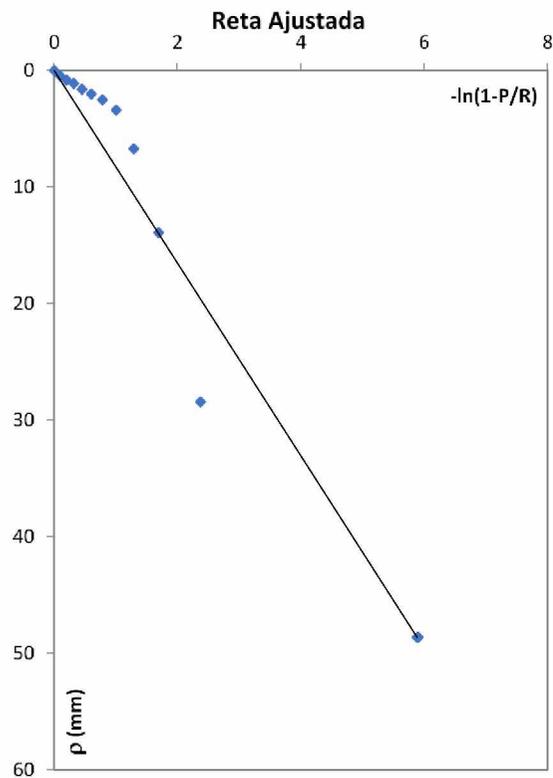
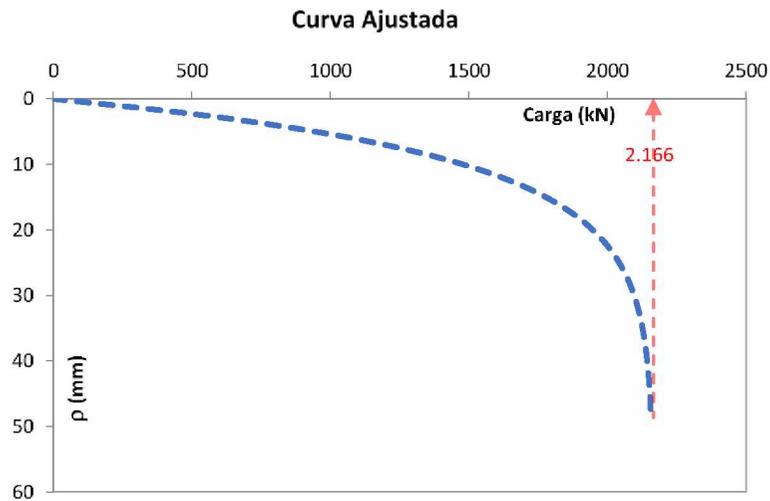
Comparação



Aoki (1976) para $(s/d)=3$ e $L=10$ m

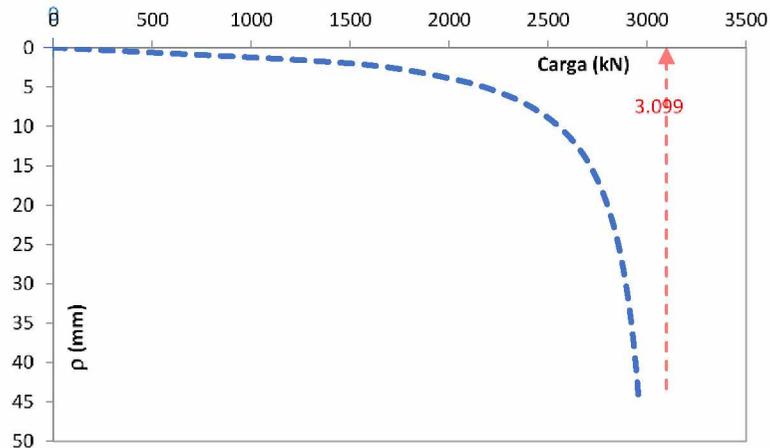


Van der Veen (1953) para $(s/d)=3$ e $L=10$ m

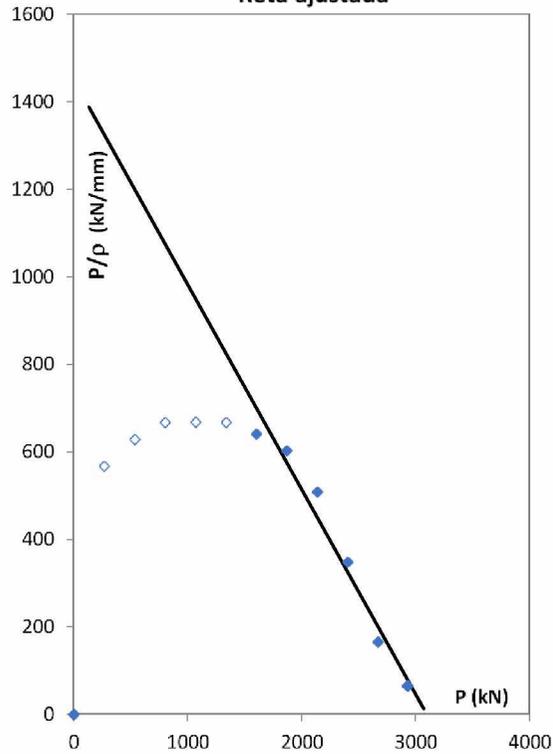


Décourt (1996) para $(s/d)=3$ e $L=15$ m

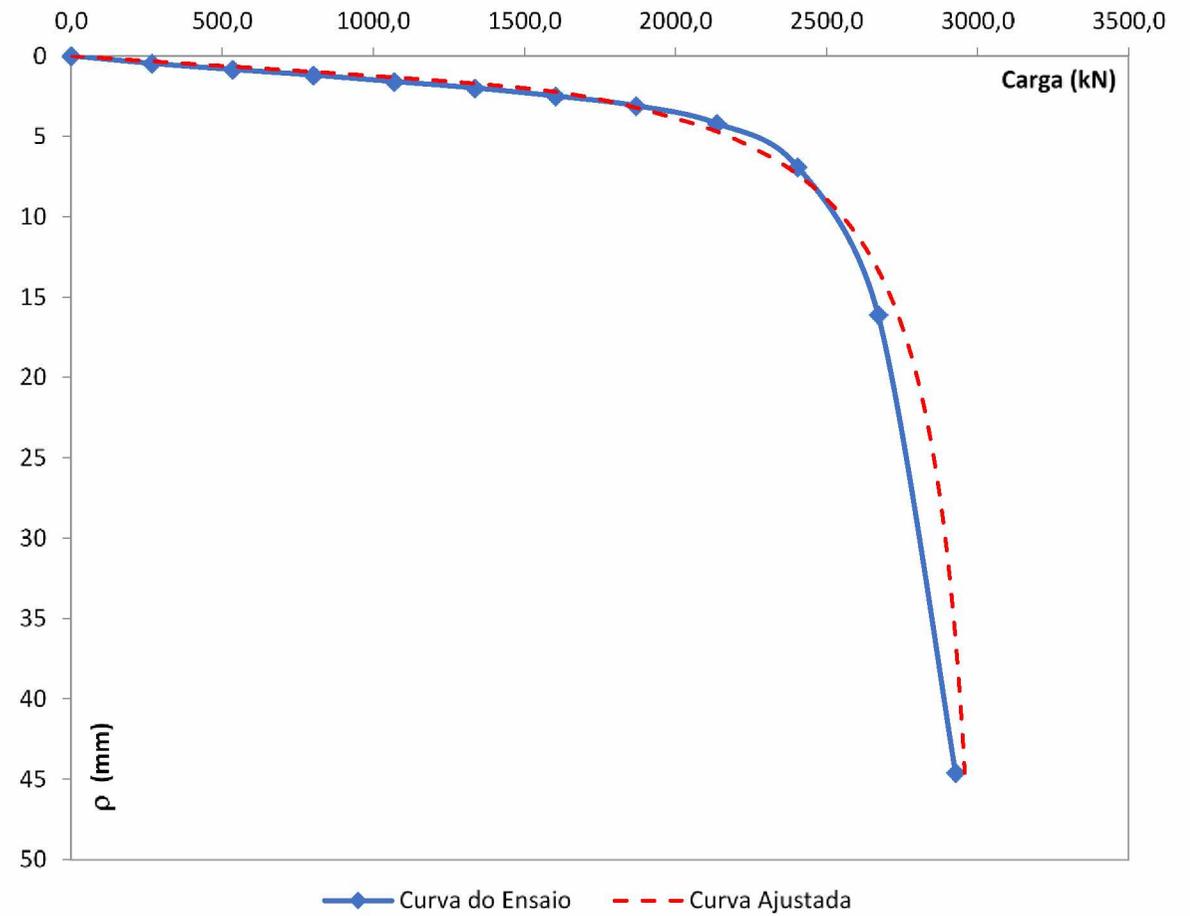
Curva Ajustada



Reta ajustada

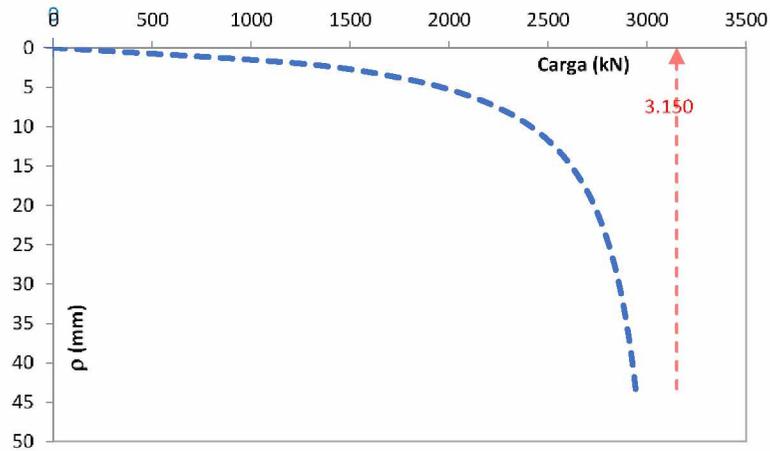


Comparação

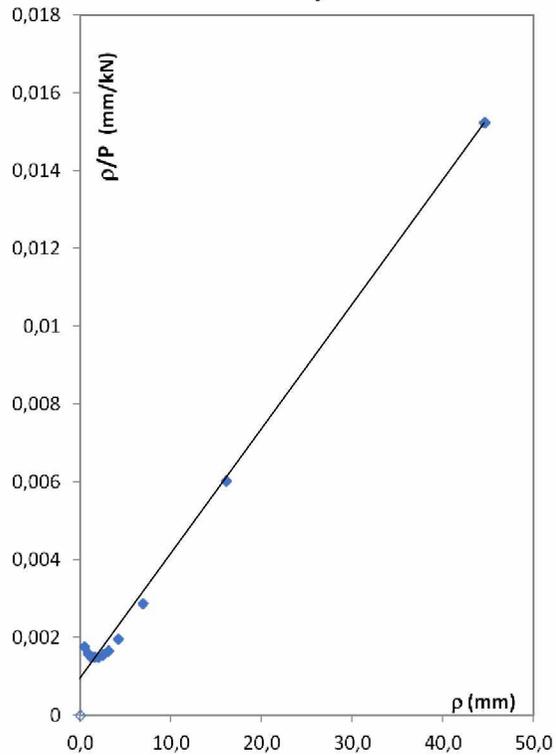


Chin (1978) para $(s/d)=3$ e $L=15$ m

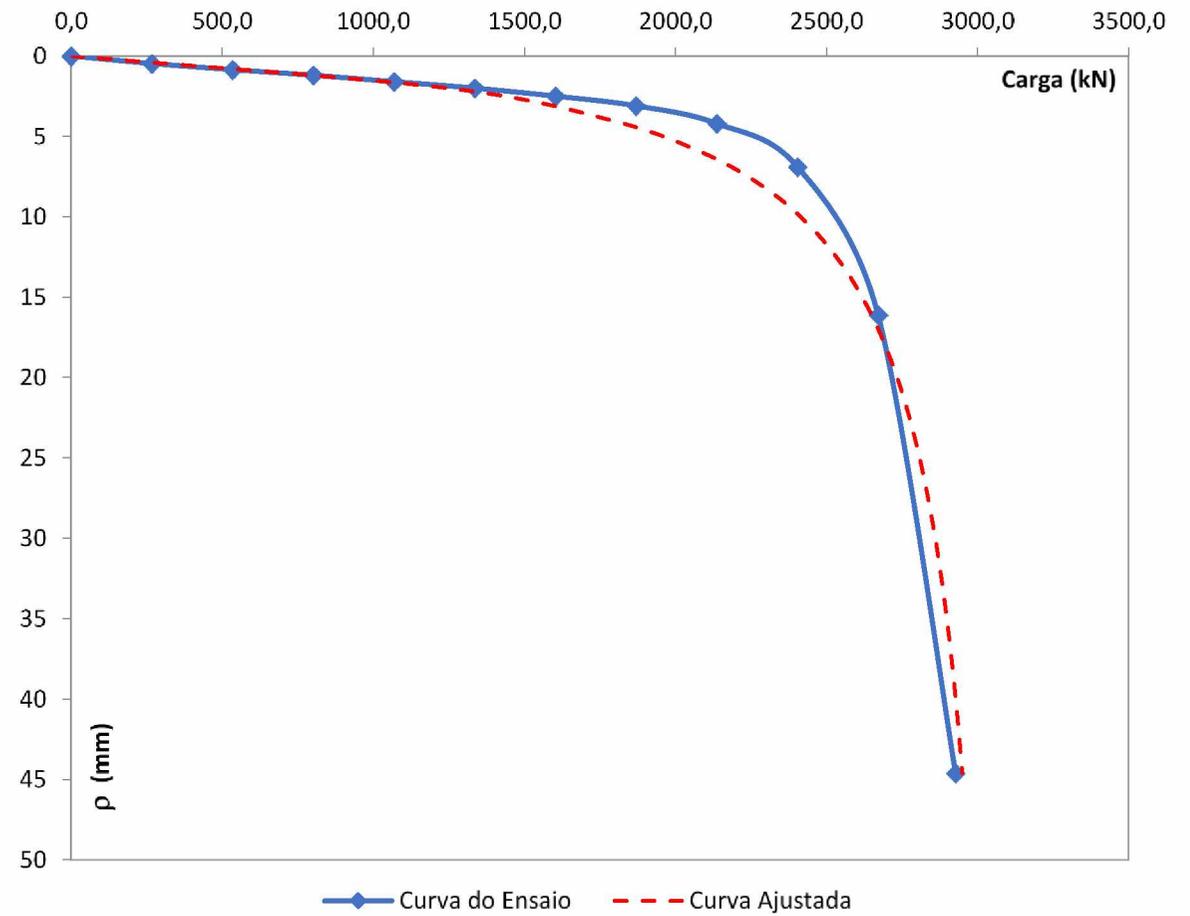
Curva Ajustada



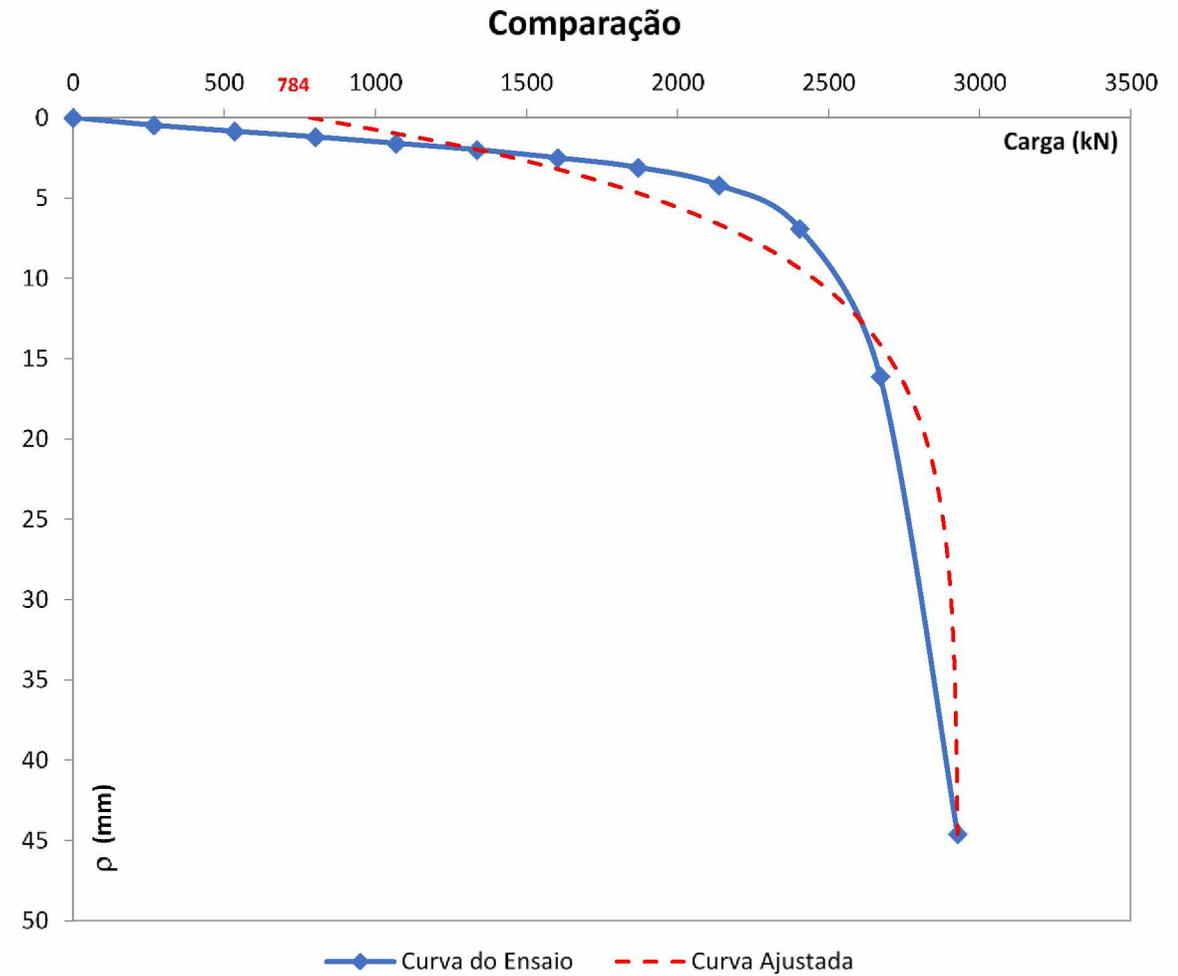
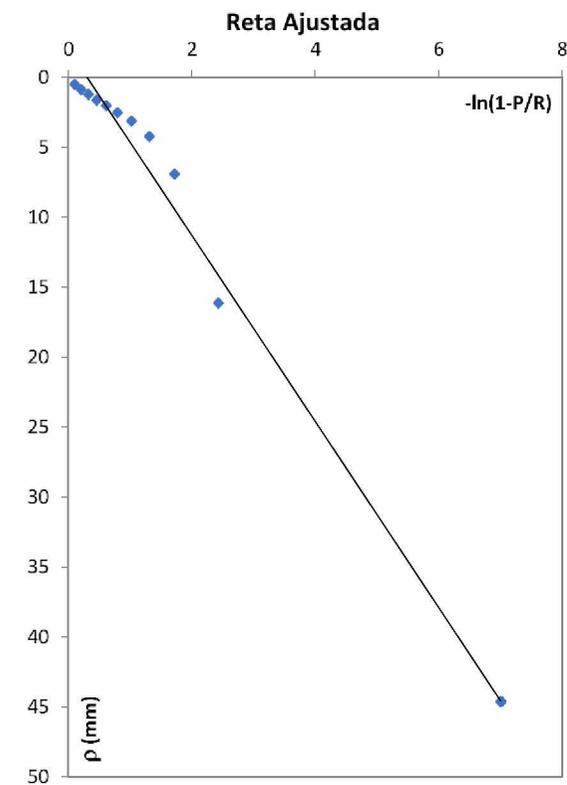
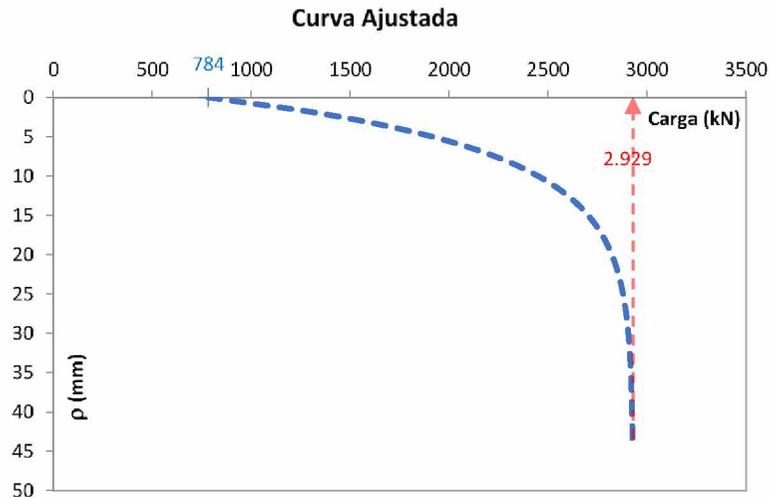
Reta ajustada



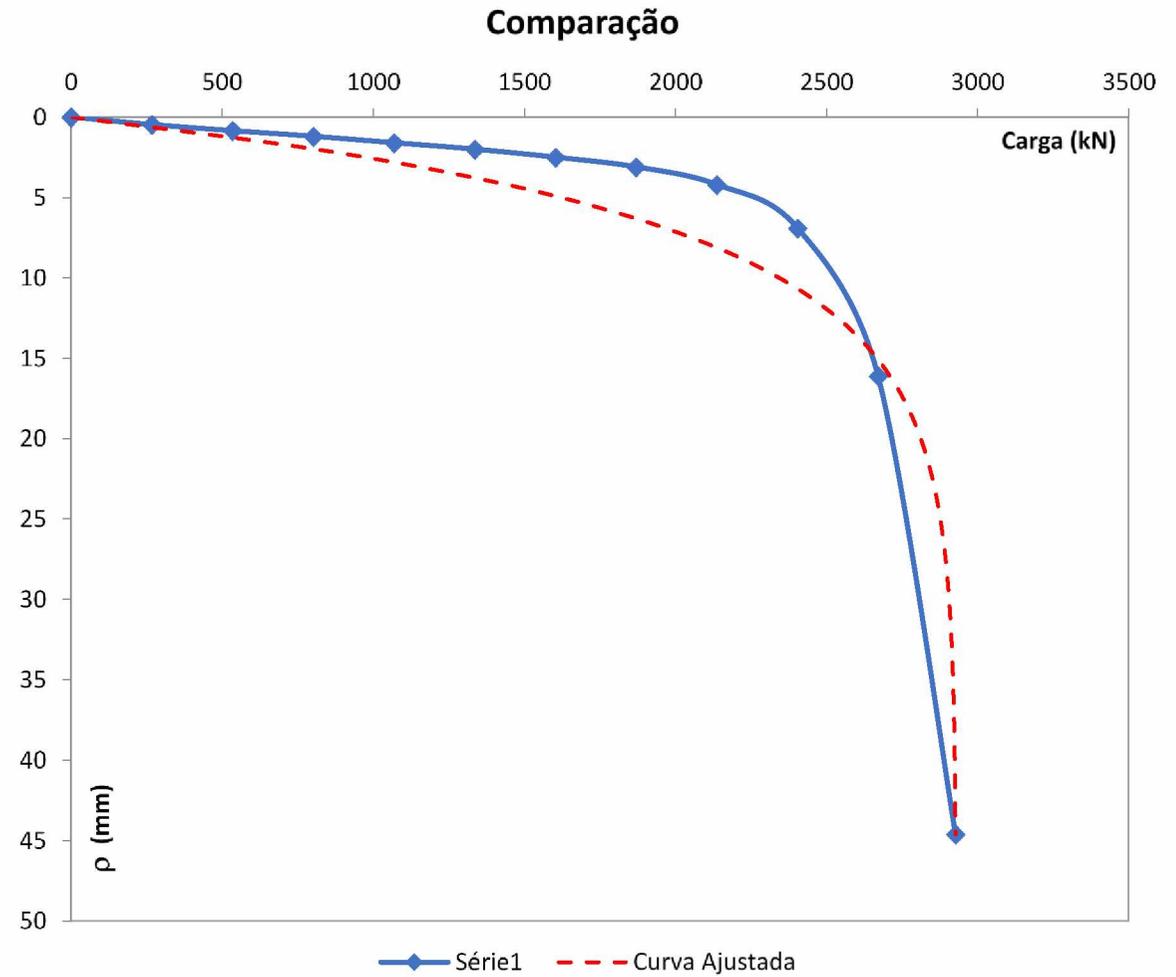
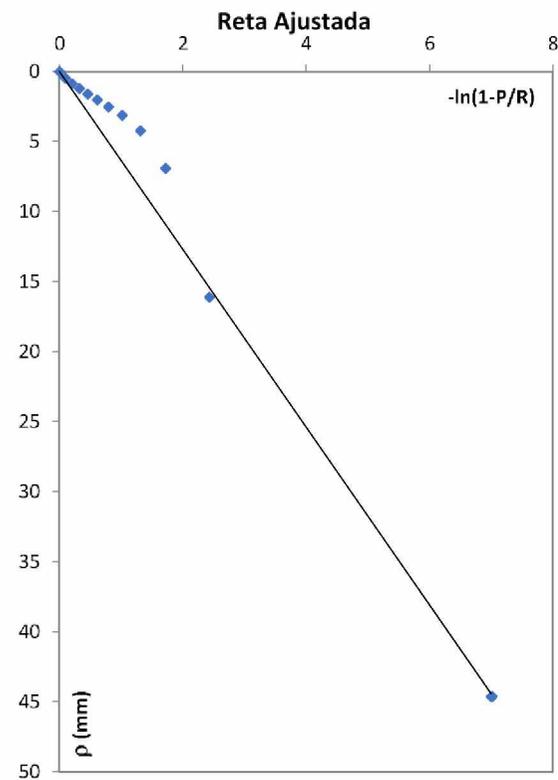
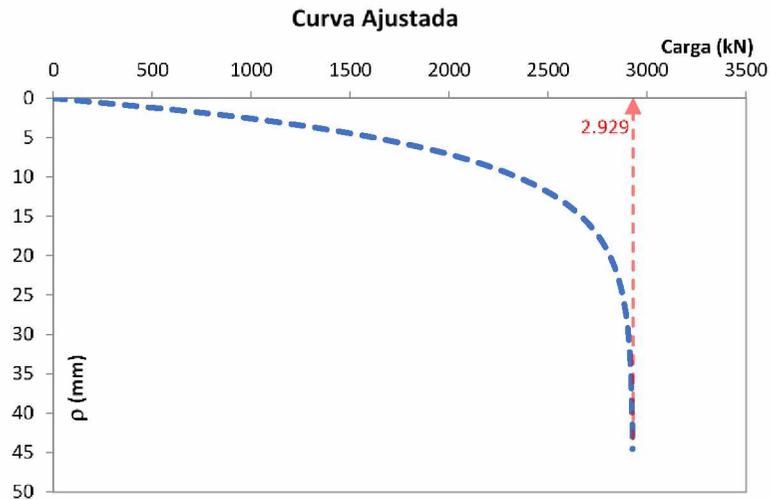
Comparação



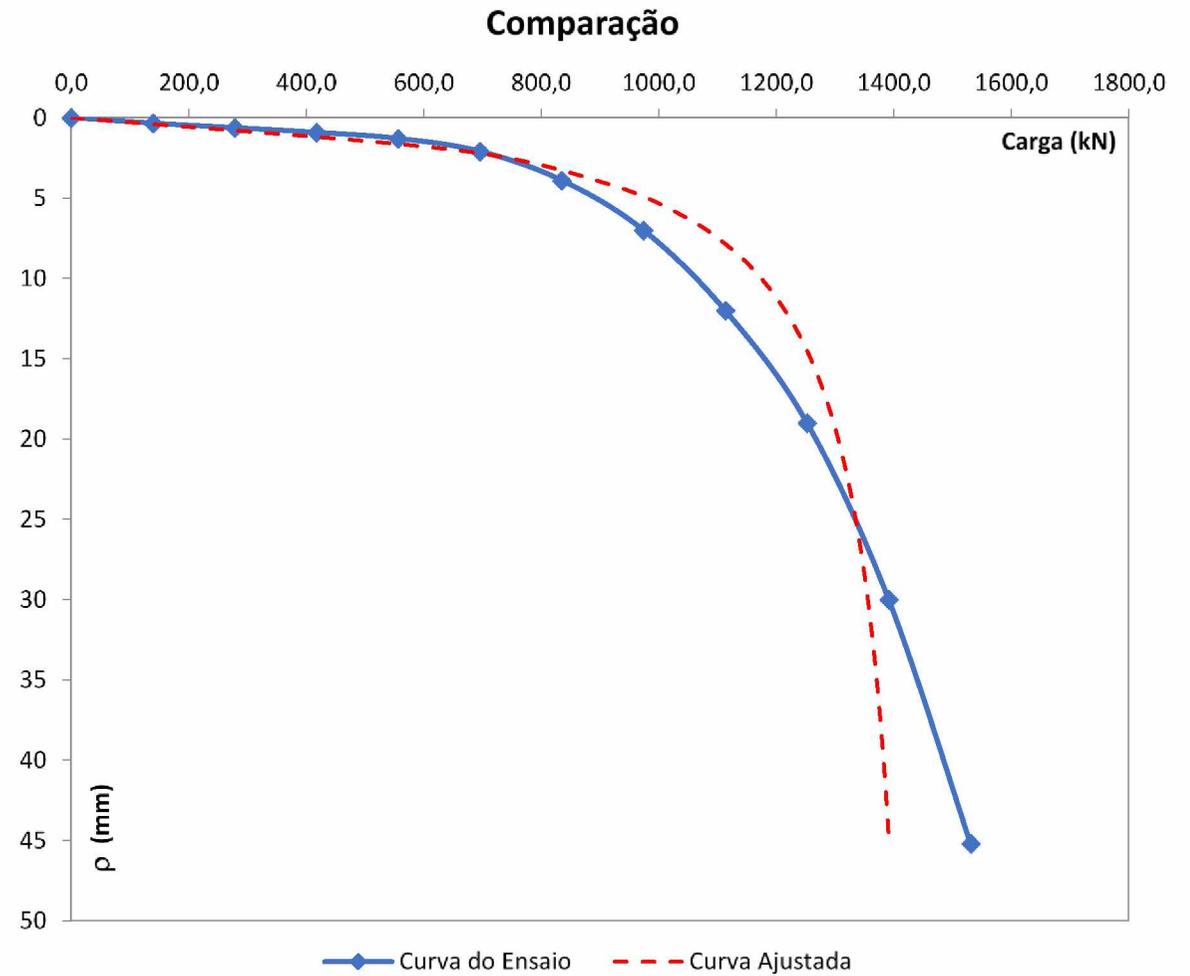
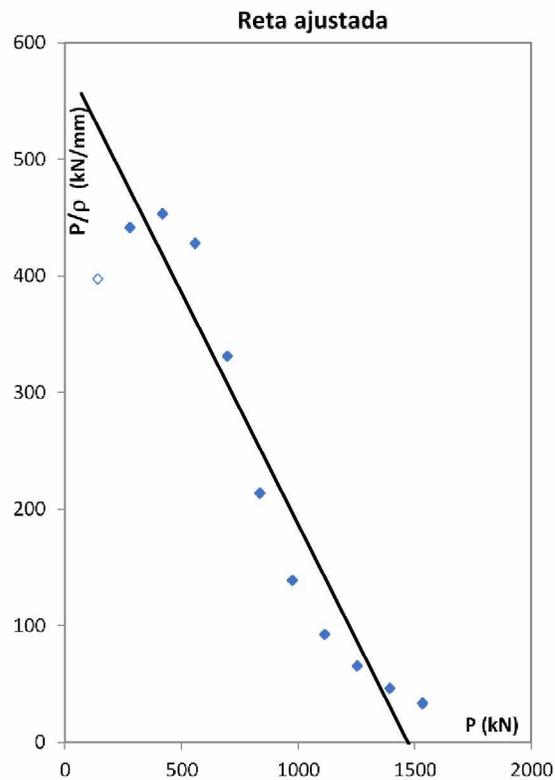
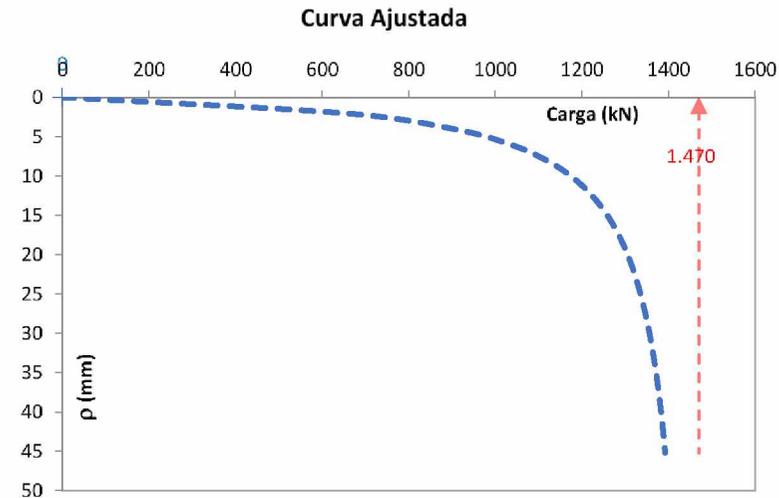
Aoki (1976) para $(s/d)=3$ e $L=15$ m



Van der Veen (1953) para $(s/d)=3$ e $L=15$ m

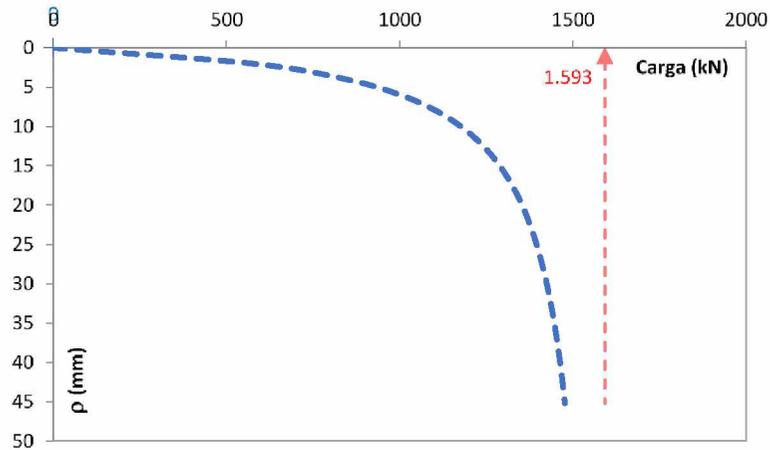


Décourt (1996) para $(s/d)=3,5$ e $L=5$ m

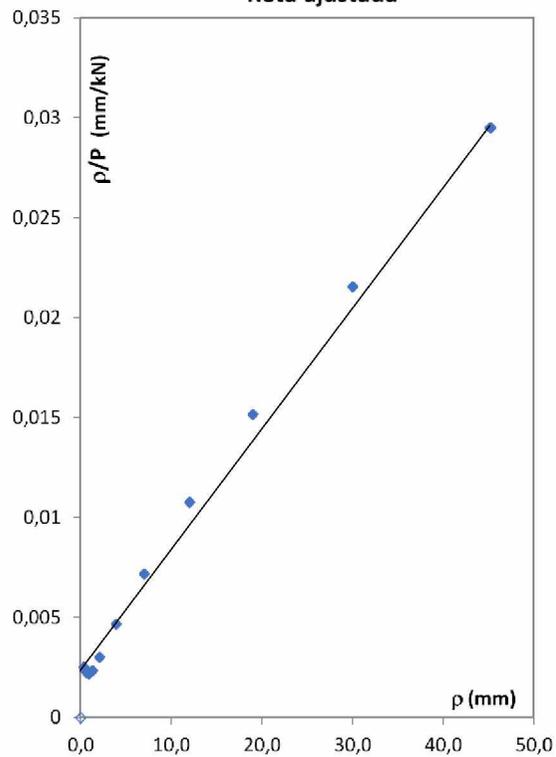


Chin (1978) para $(s/d)=3,5$ e $L=5$ m

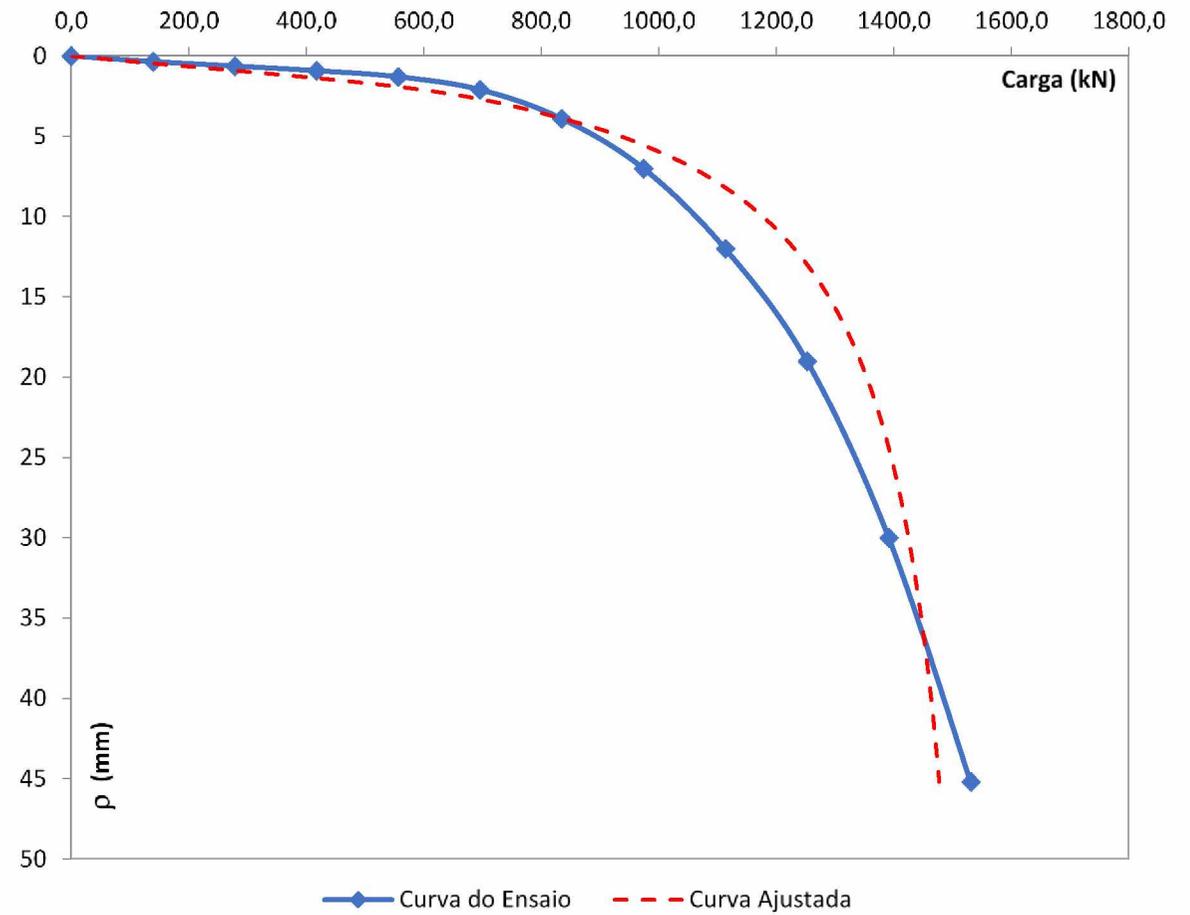
Curva Ajustada



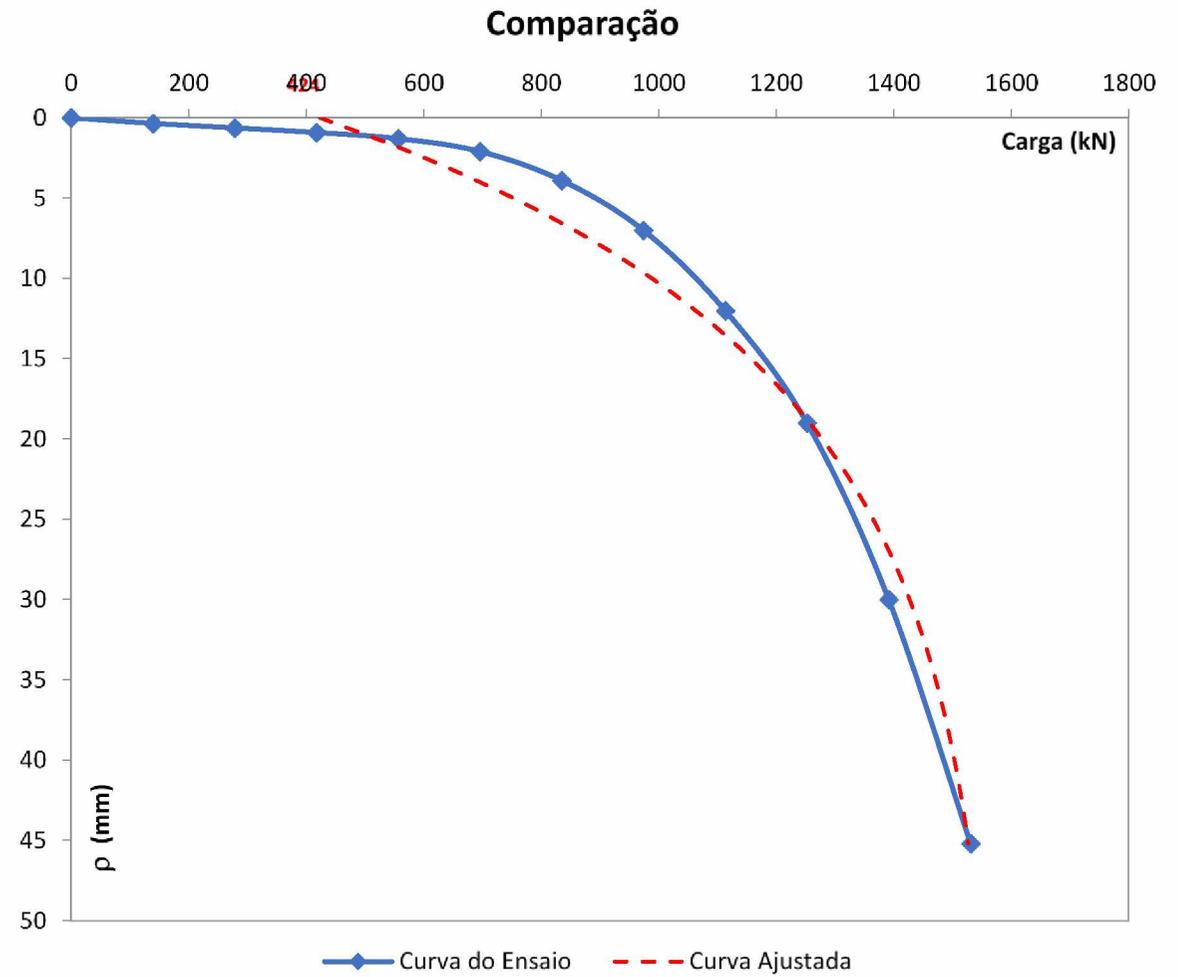
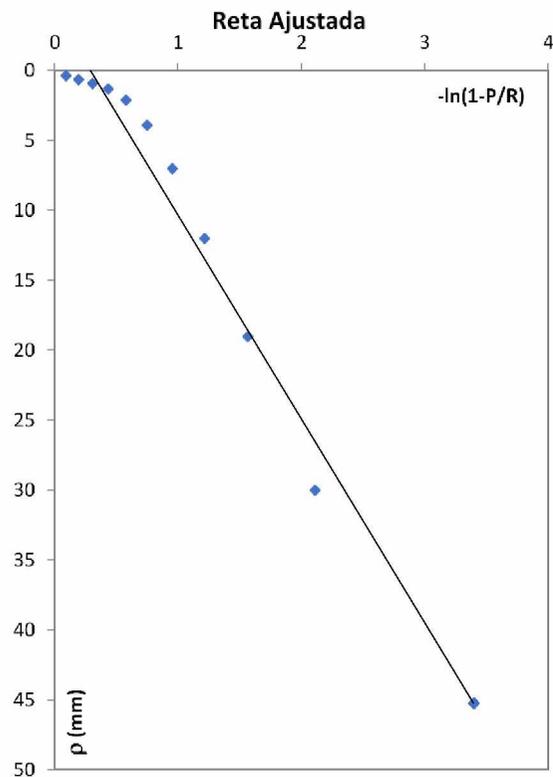
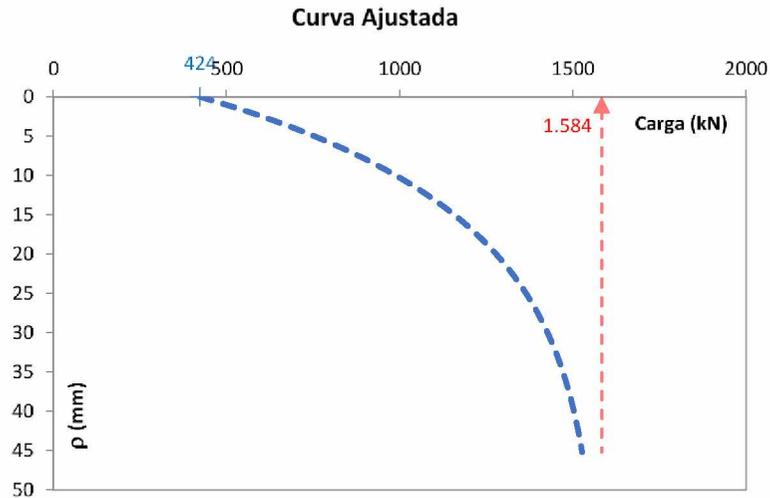
Reta ajustada



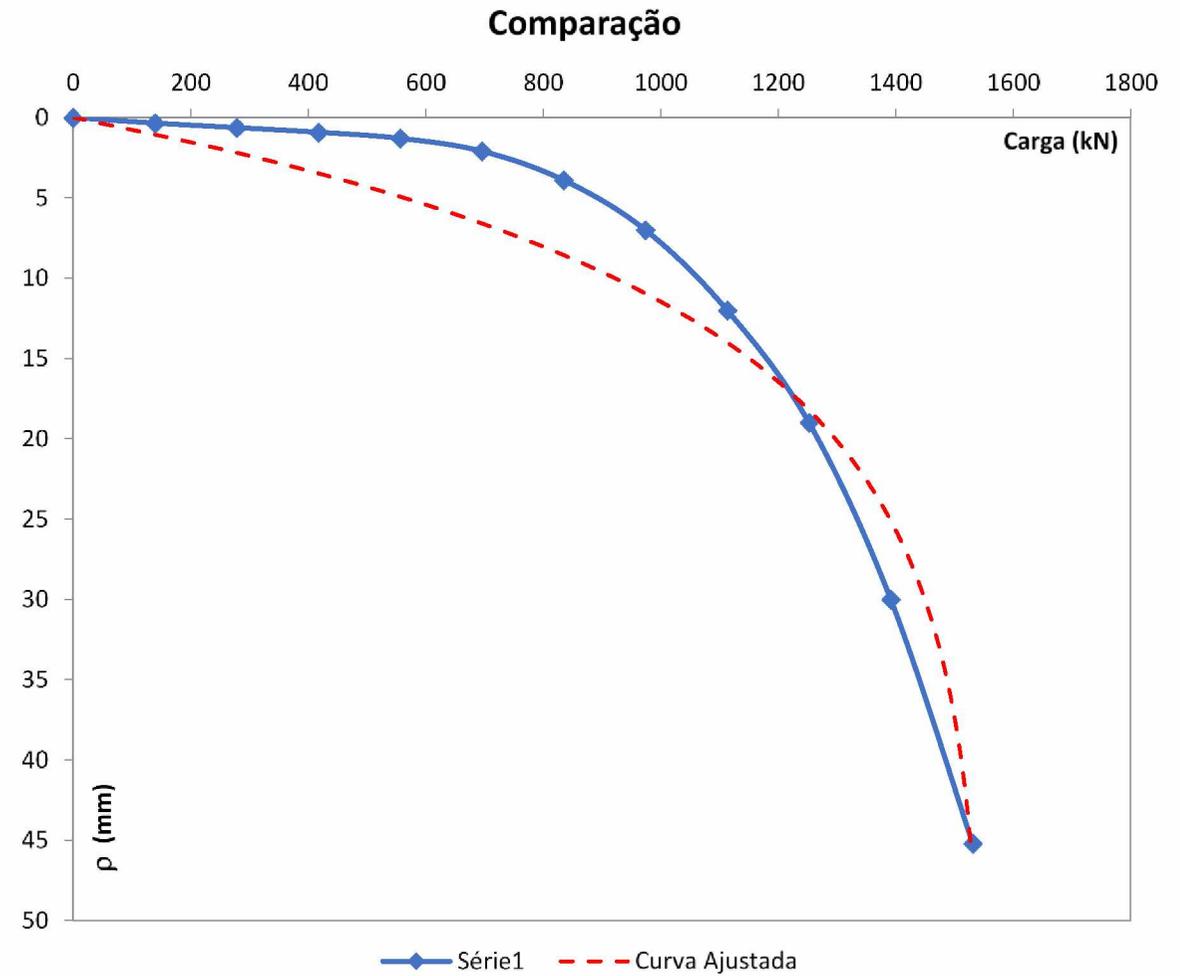
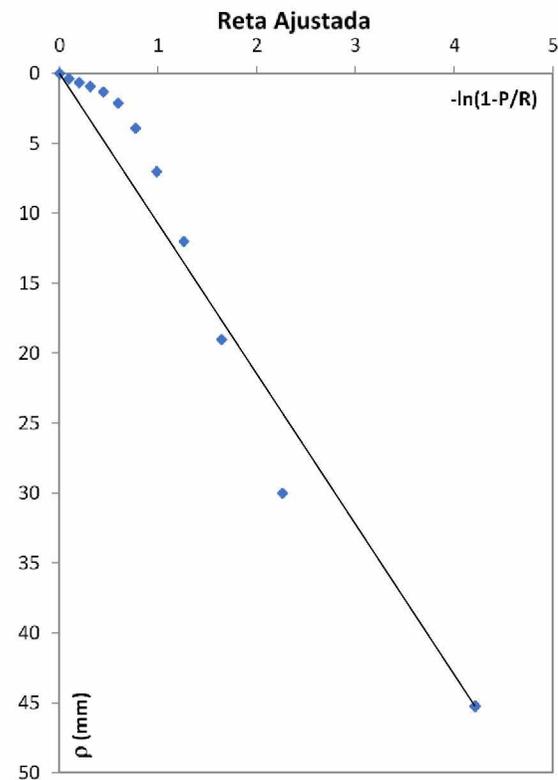
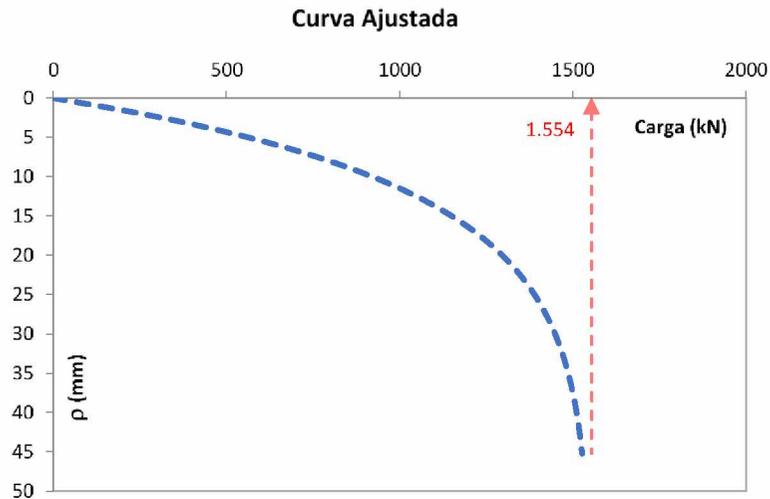
Comparação



Aoki (1976) para $(s/d)=3,5$ e $L=5$ m

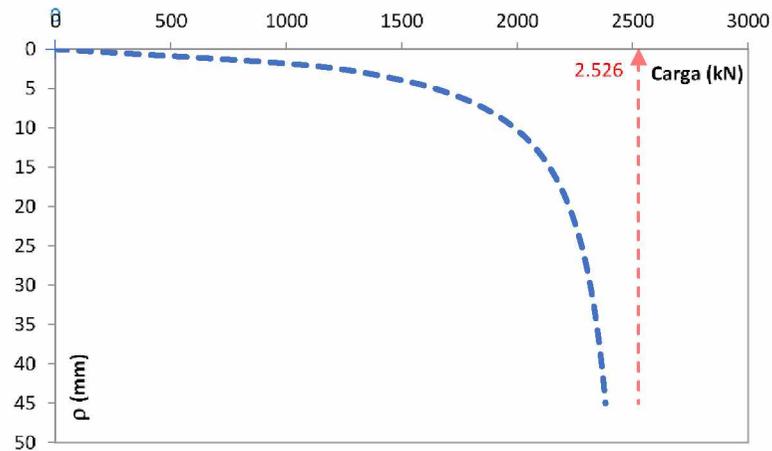


Van der Veen (1953) para $(s/d)=3,5$ e $L=5$ m

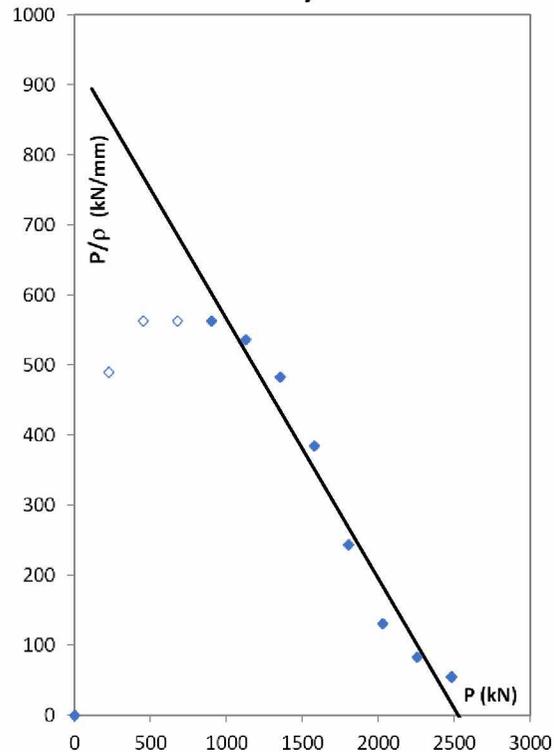


Décourt (1996) para $(s/d)=3,5$ e $L=10$ m

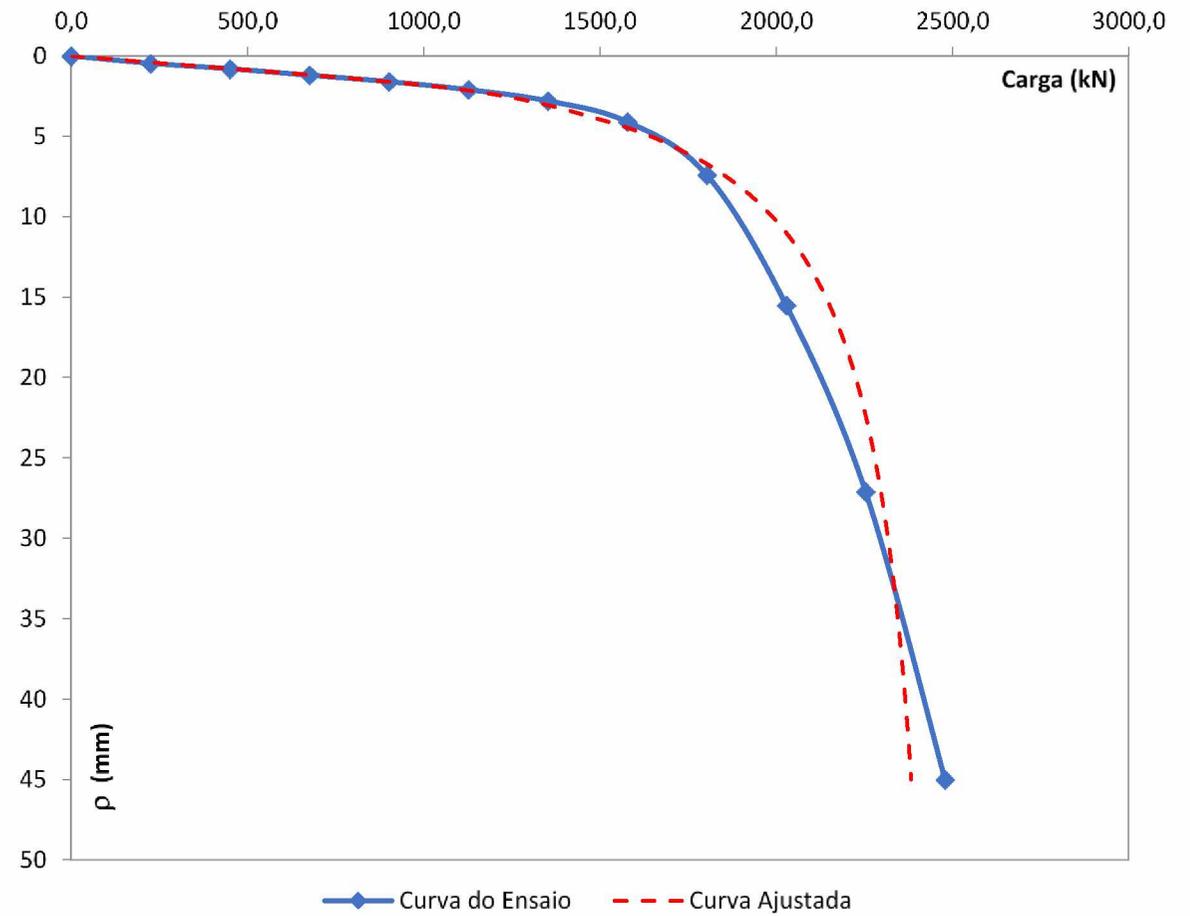
Curva Ajustada



Reta ajustada

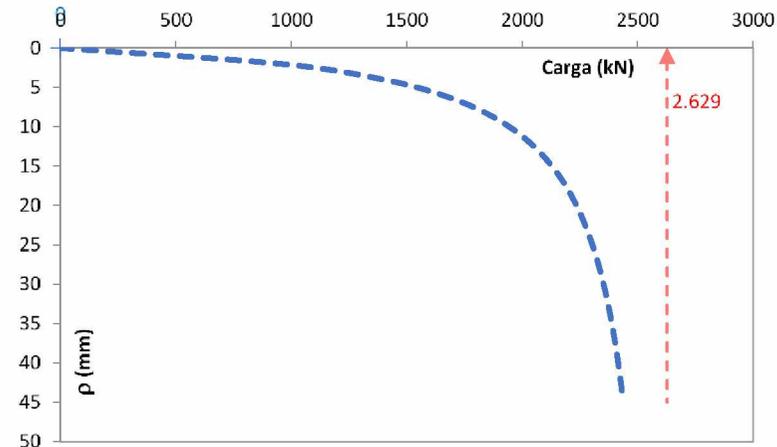


Comparação

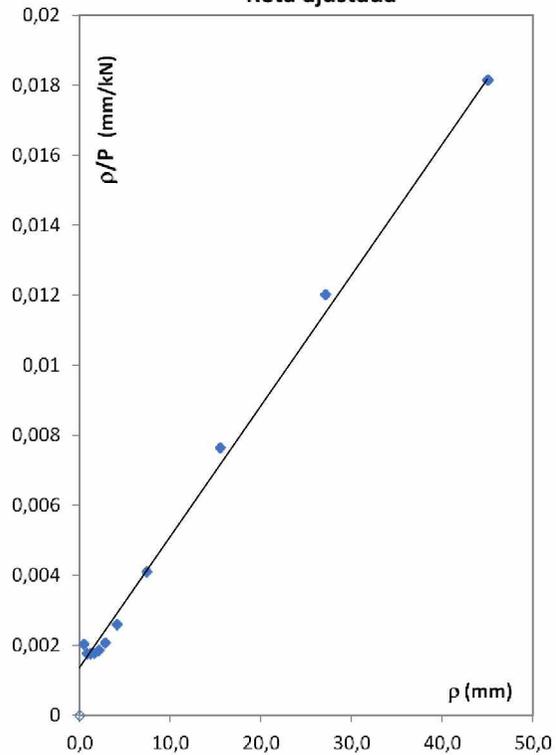


Chin (1978) para $(s/d)=3,5$ e $L=10$ m

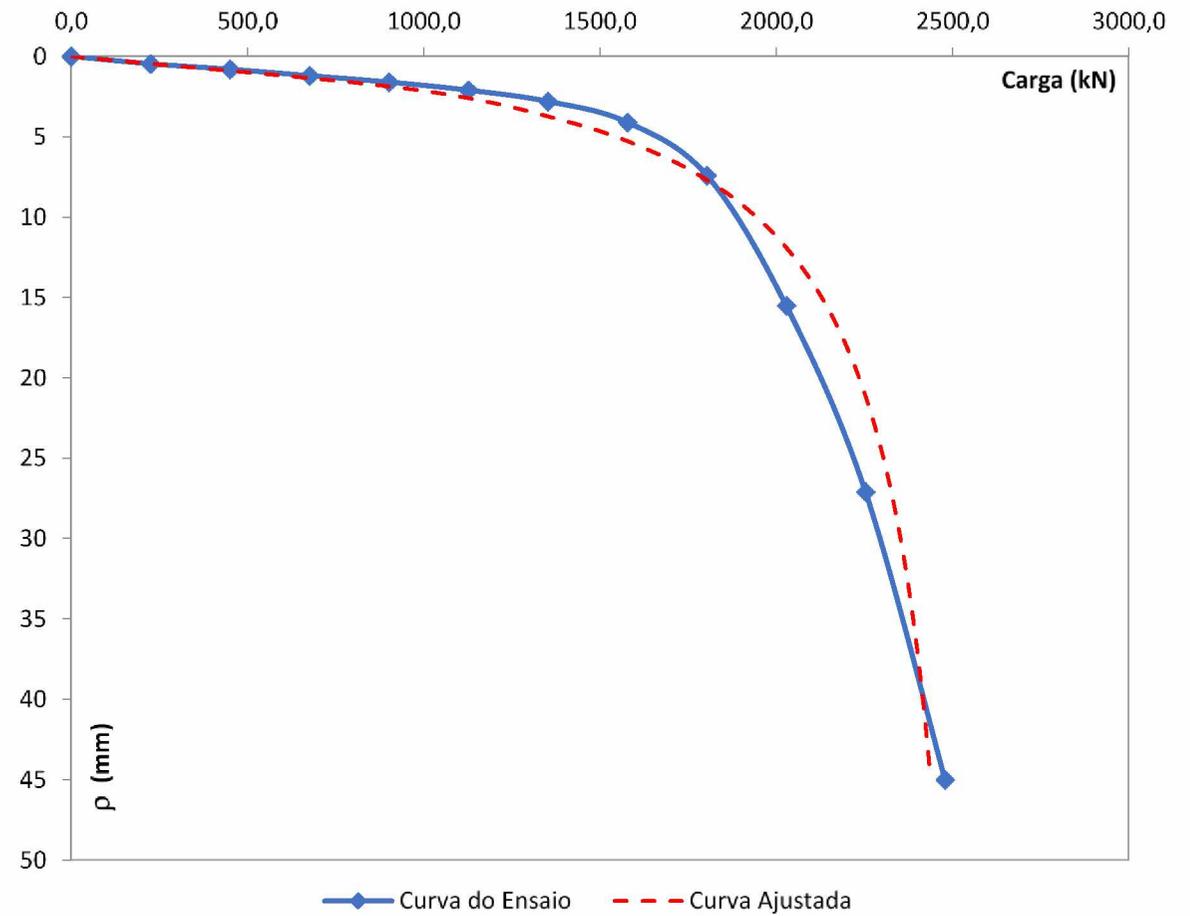
Curva Ajustada



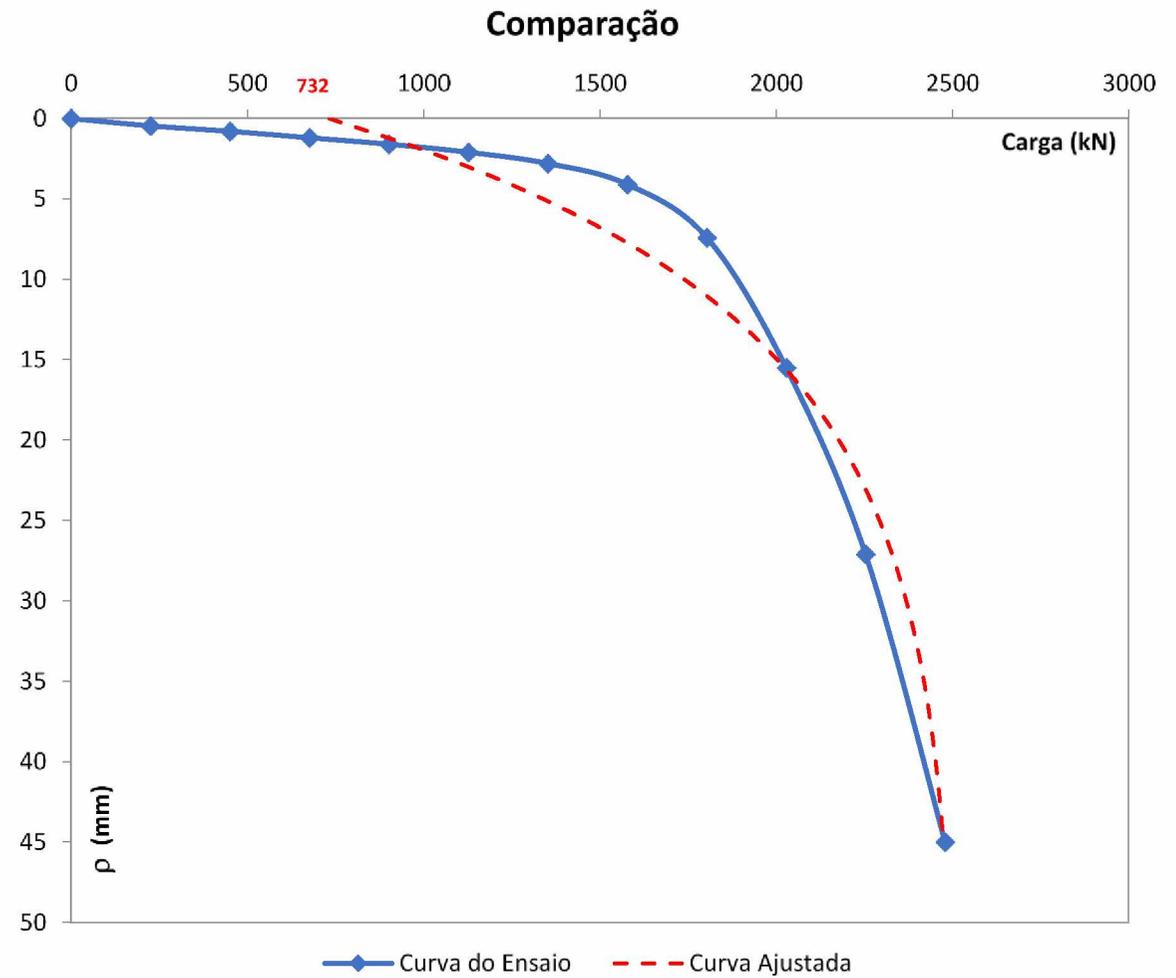
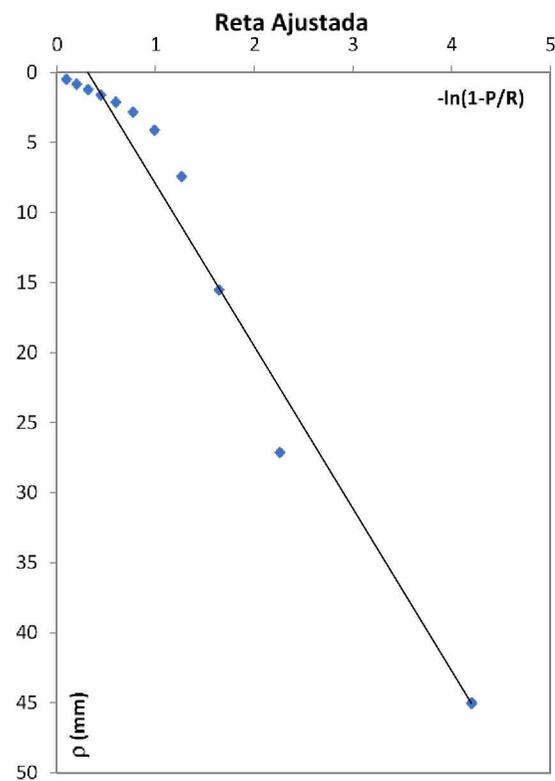
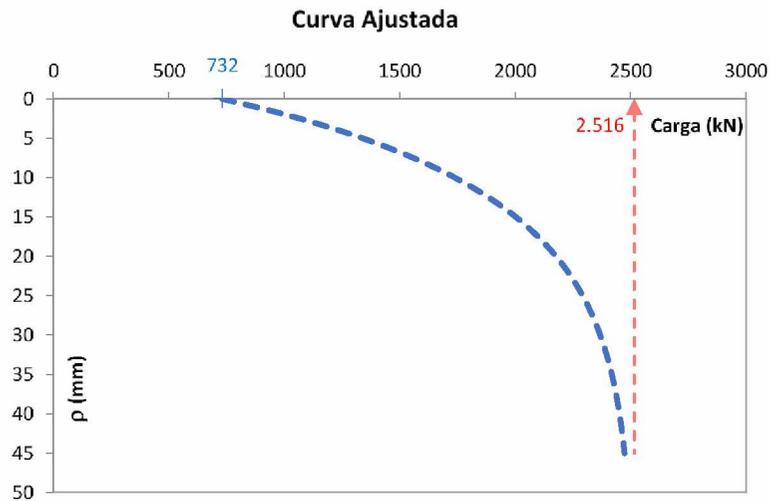
Reta ajustada



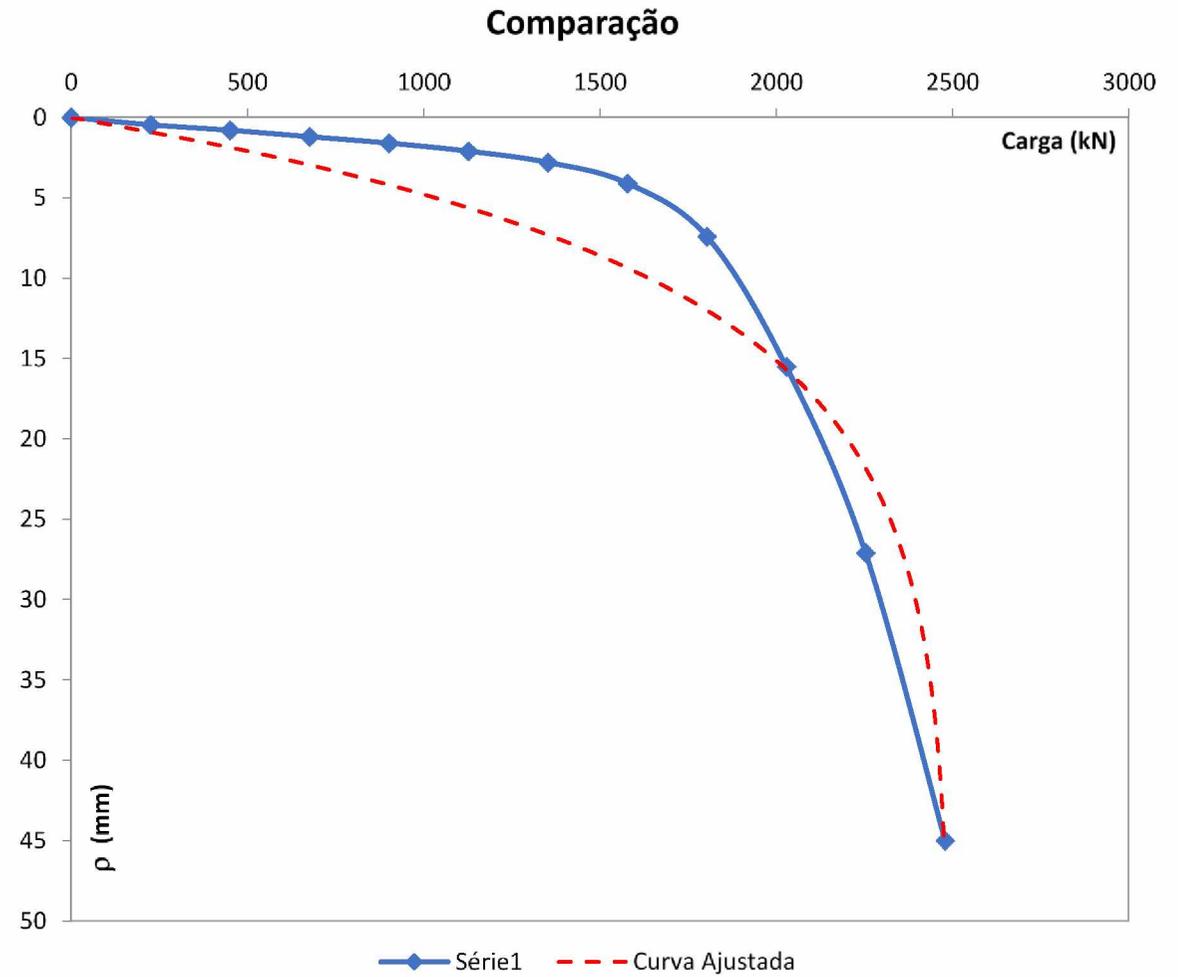
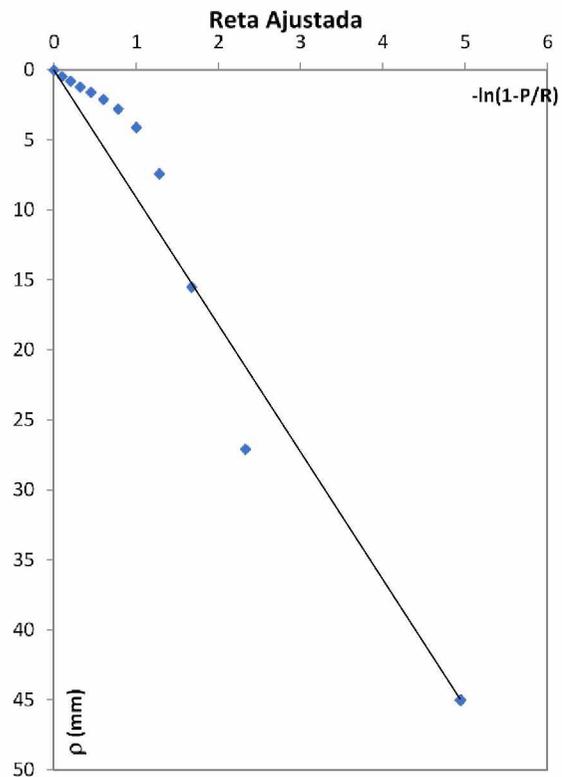
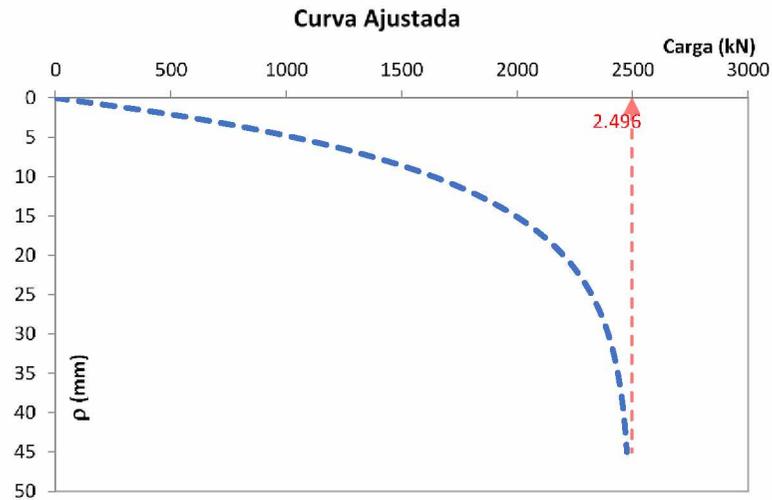
Comparação



Aoki (1976) para $(s/d)=3,5$ e $L=10$ m

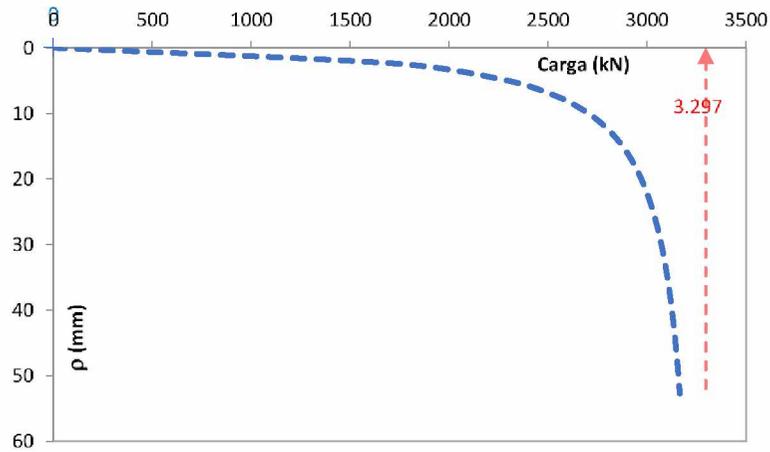


Van der Veen (1953) para $(s/d)=3,5$ e $L=10$ m

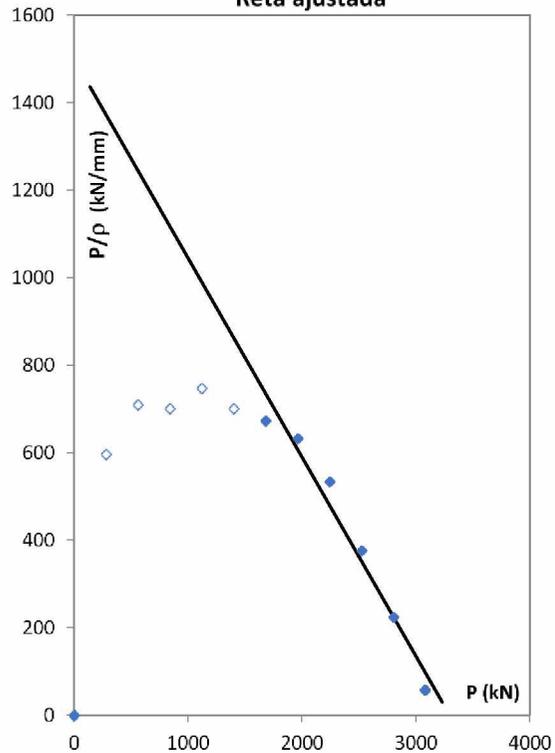


Décourt (1996) para $(s/d)=3,5$ e $L=15$ m

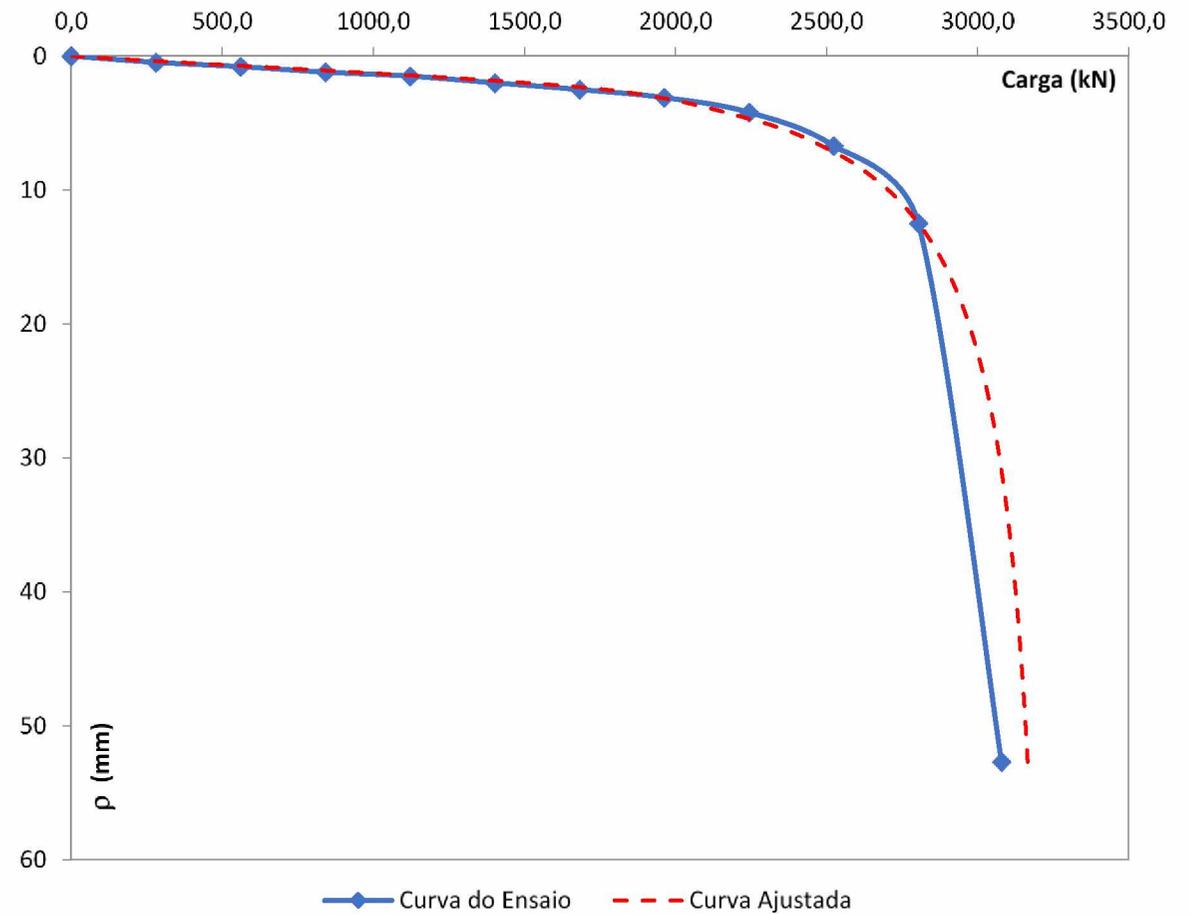
Curva Ajustada



Reta ajustada

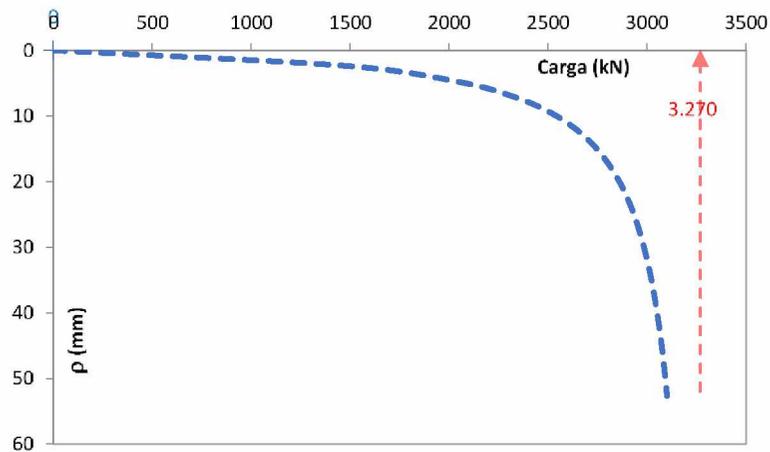


Comparação

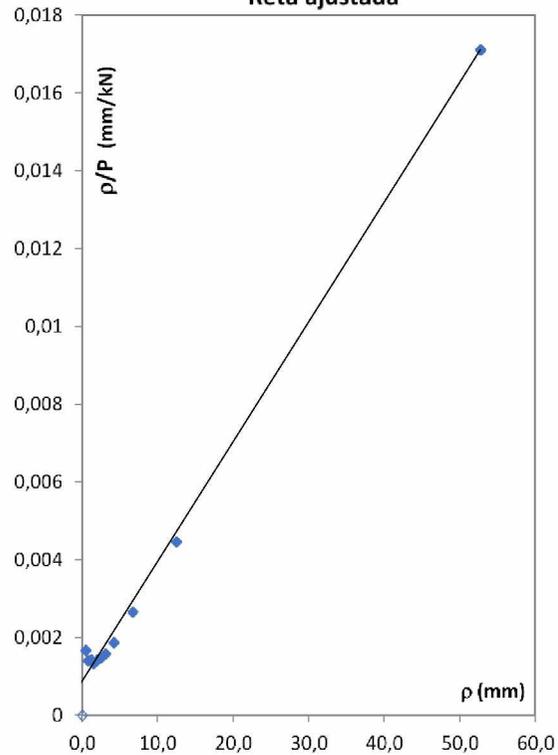


Chin (1978) para $(s/d)=3,5$ e $L=15$ m

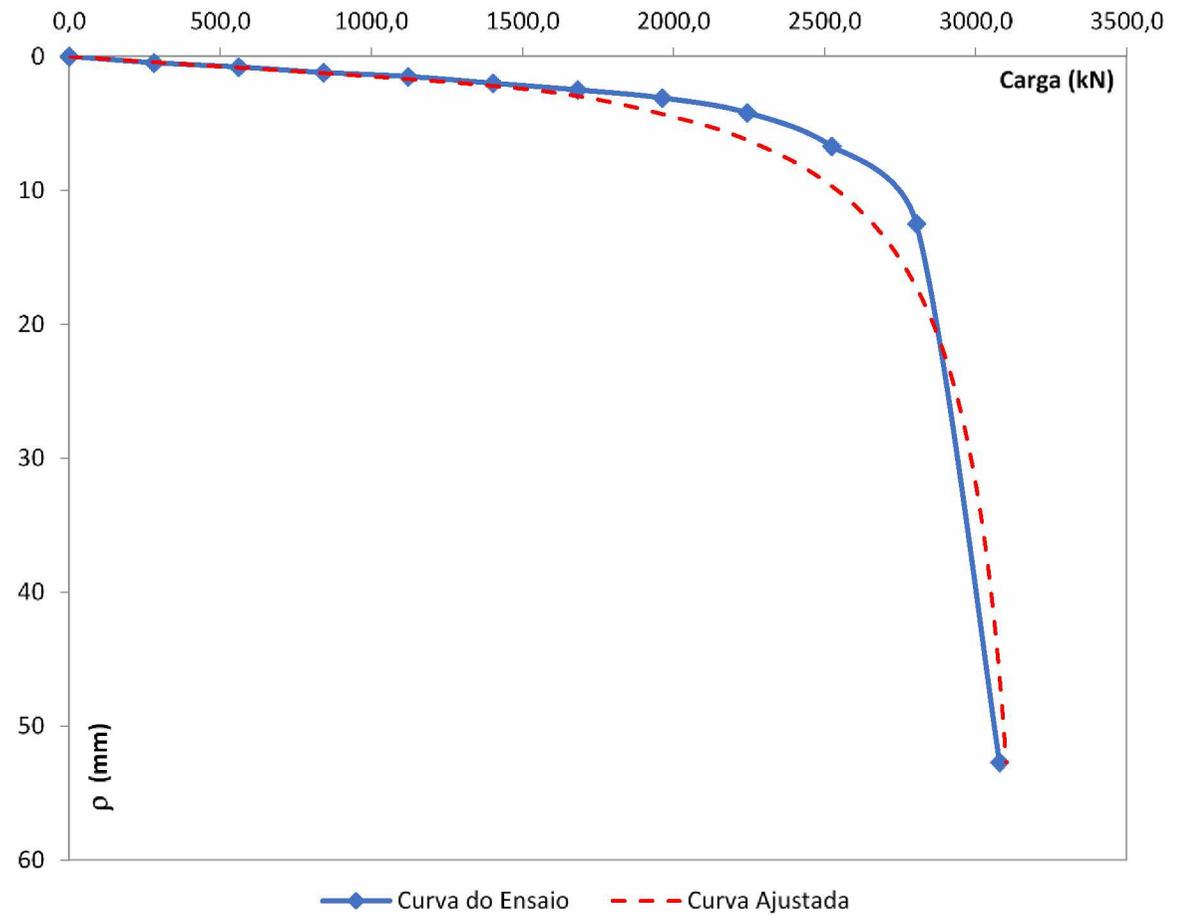
Curva Ajustada



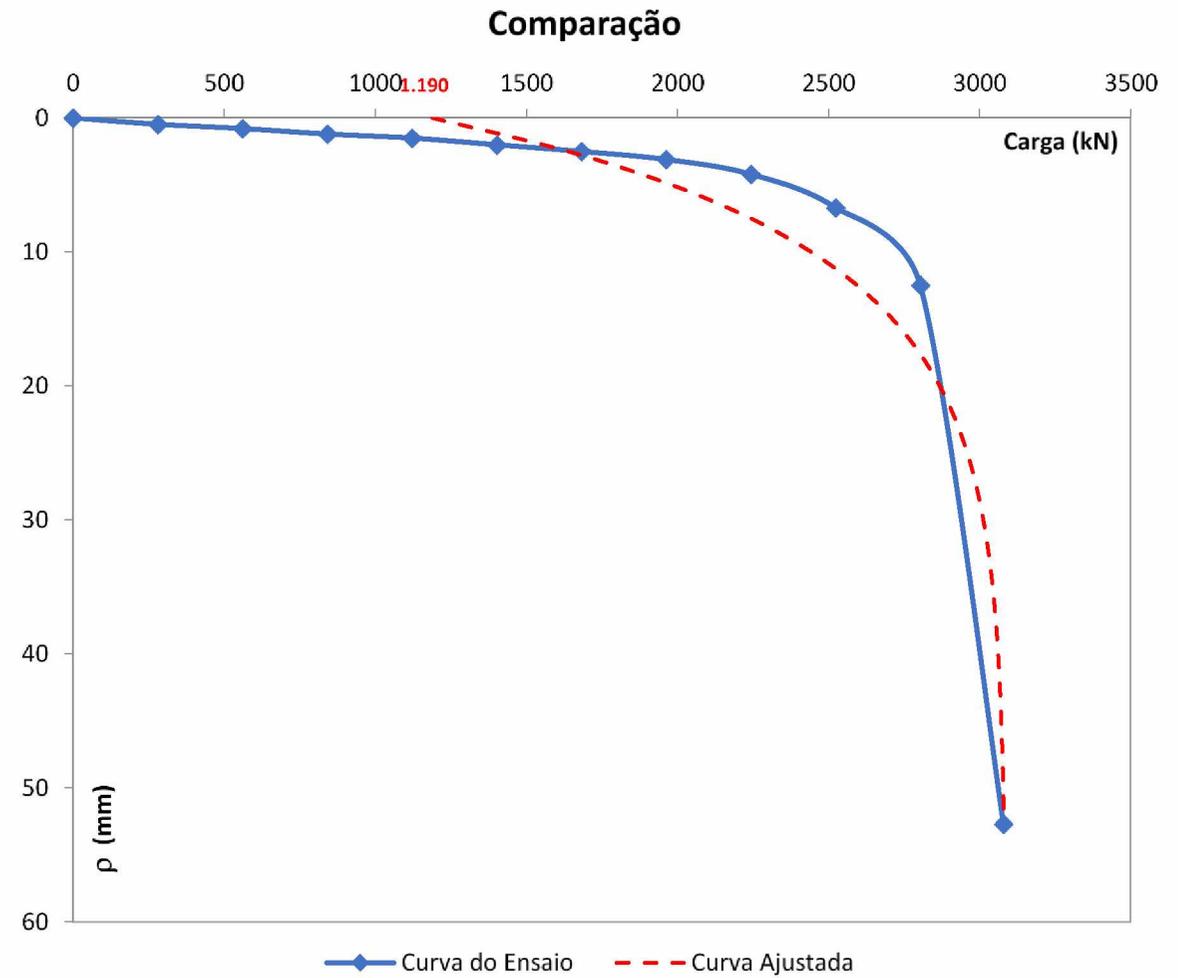
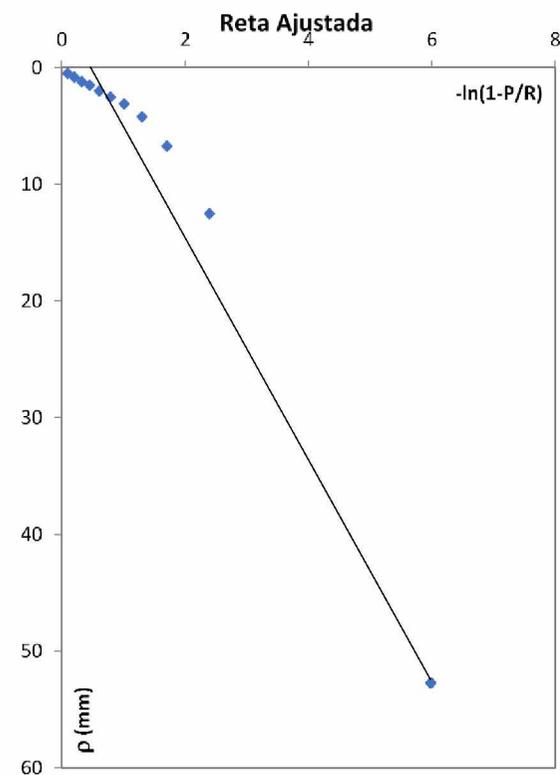
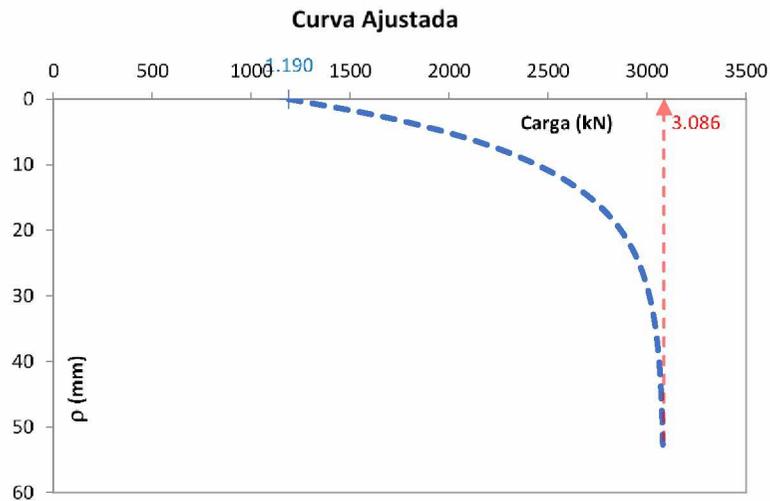
Reta ajustada



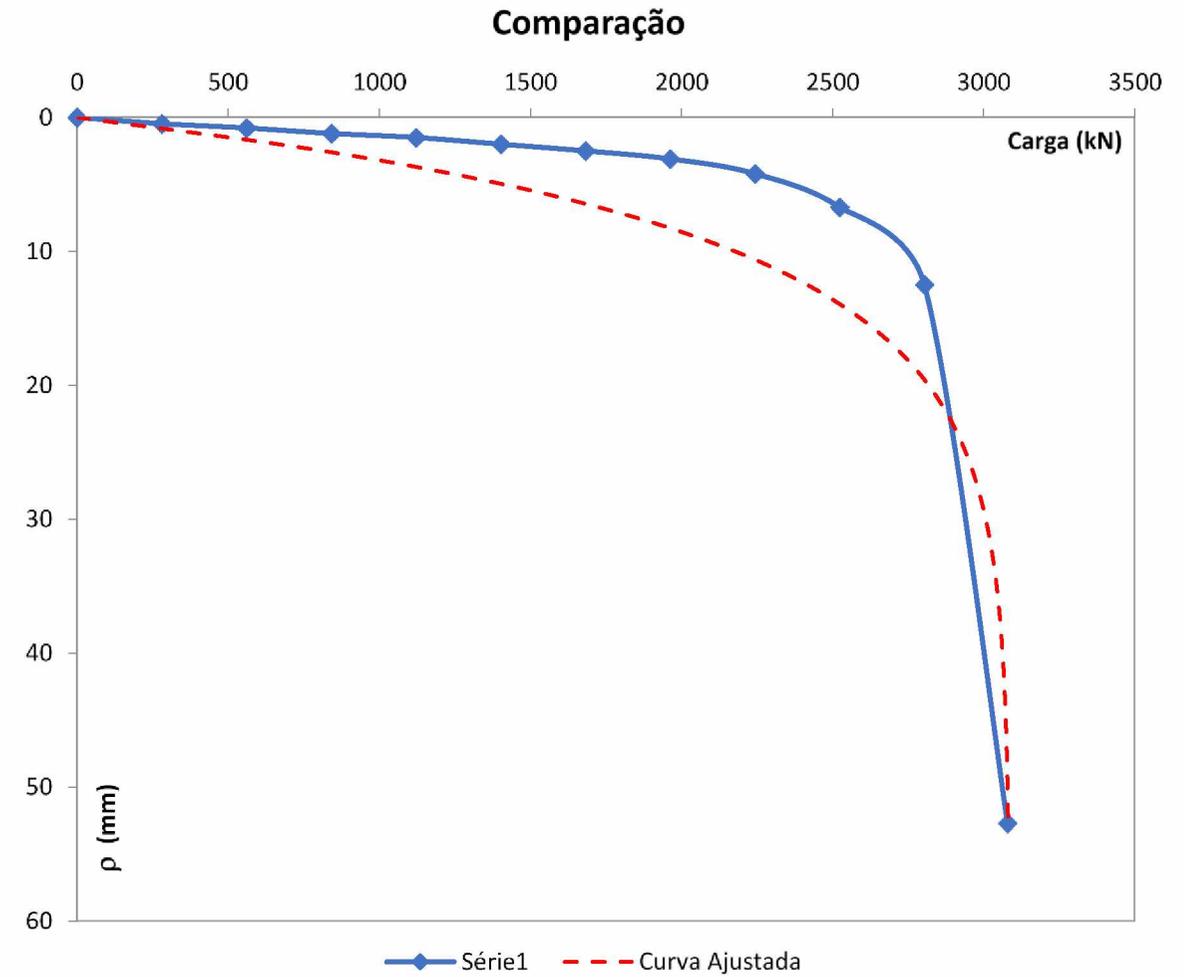
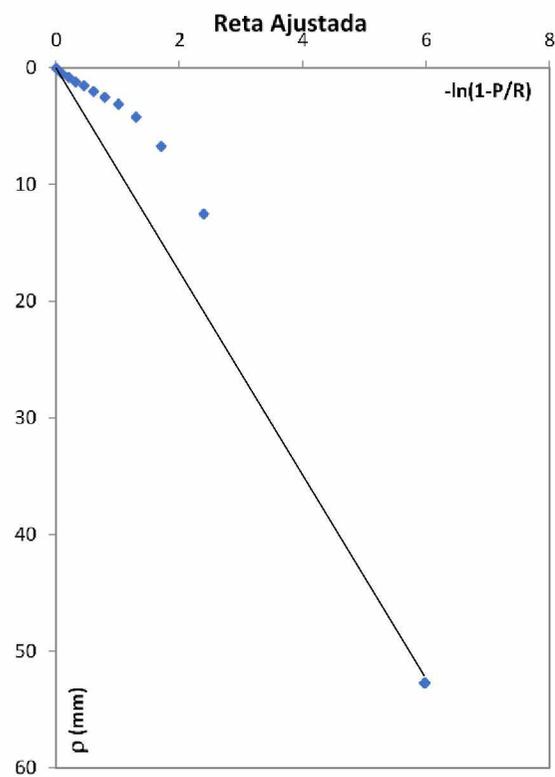
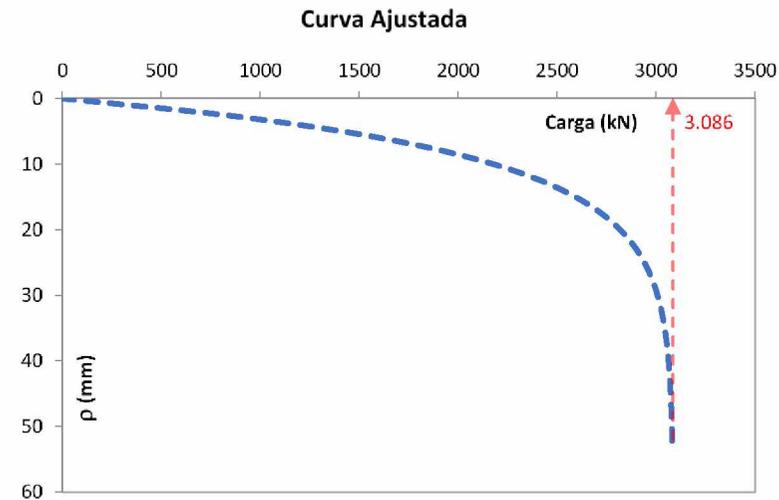
Comparação



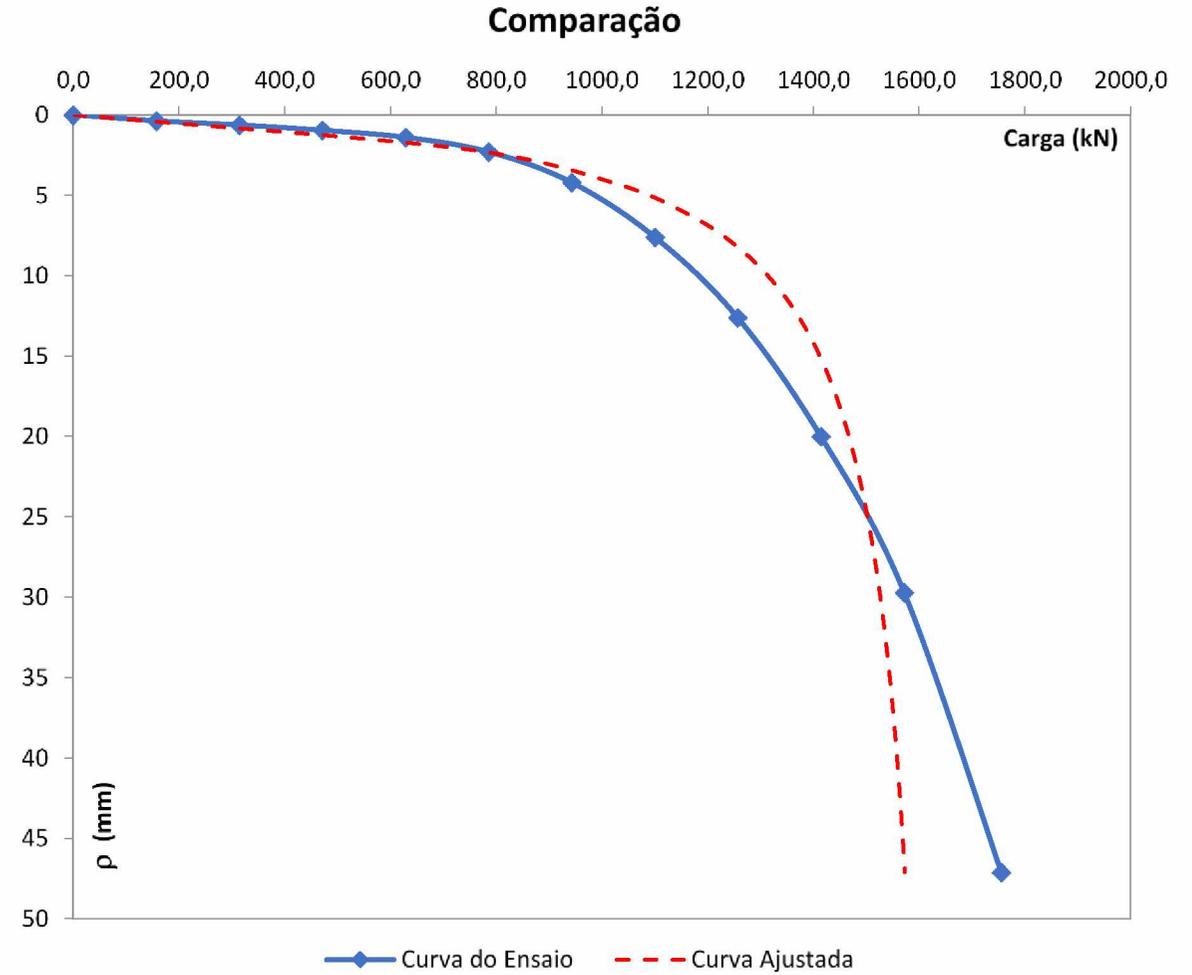
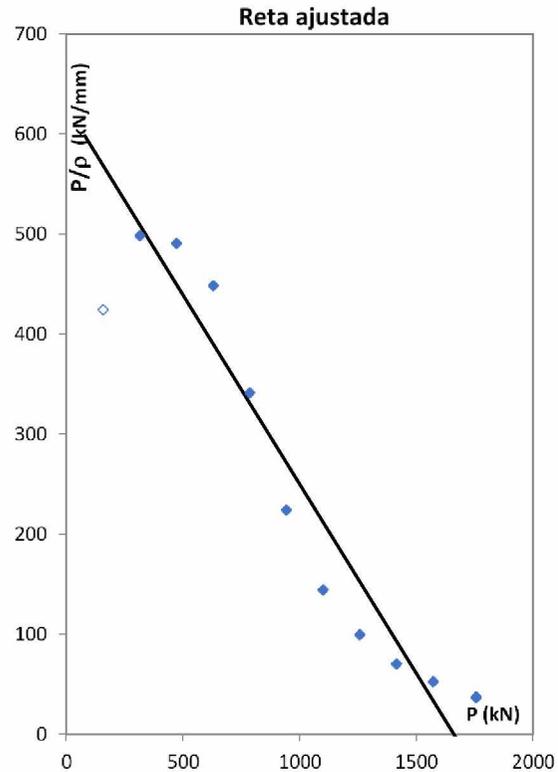
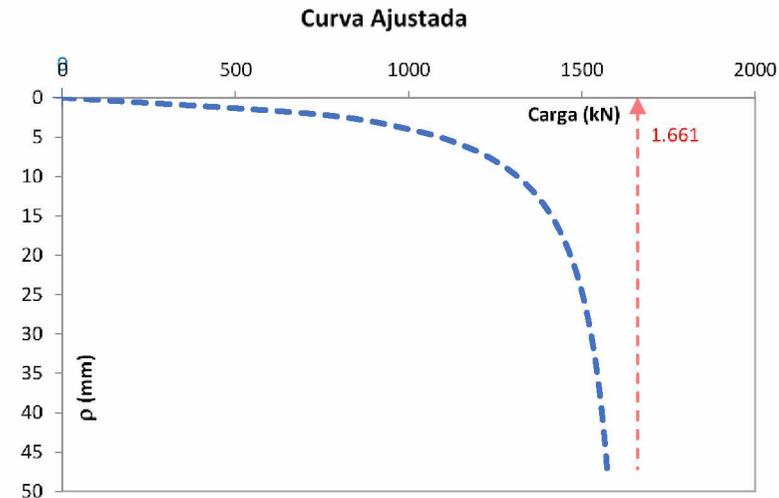
Aoki (1976) para $(s/d)=3,5$ e $L=15$ m



Van der Veen (1953) para $(s/d)=3,5$ e $L=15$ m

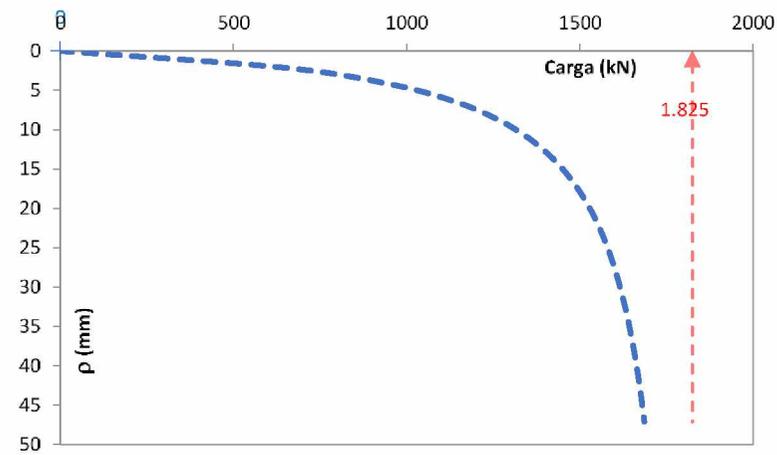


Décourt (1996) para $(s/d)=4$ e $L=5$ m

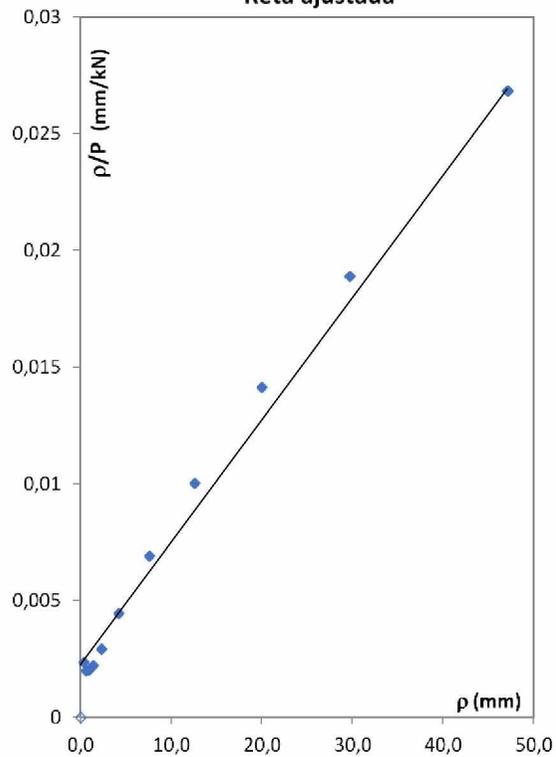


Chin (1978) para $(s/d)=4$ e $L=5$ m

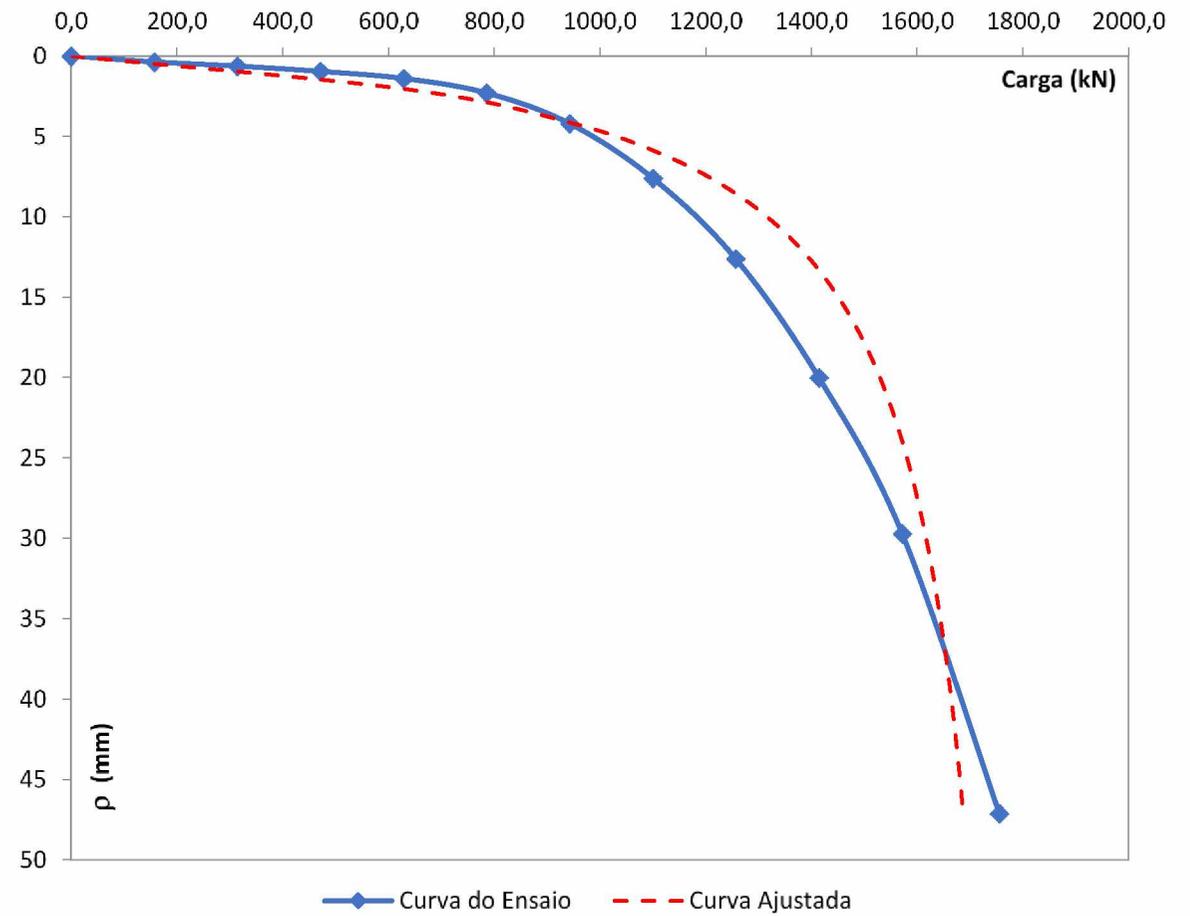
Curva Ajustada



Reta ajustada

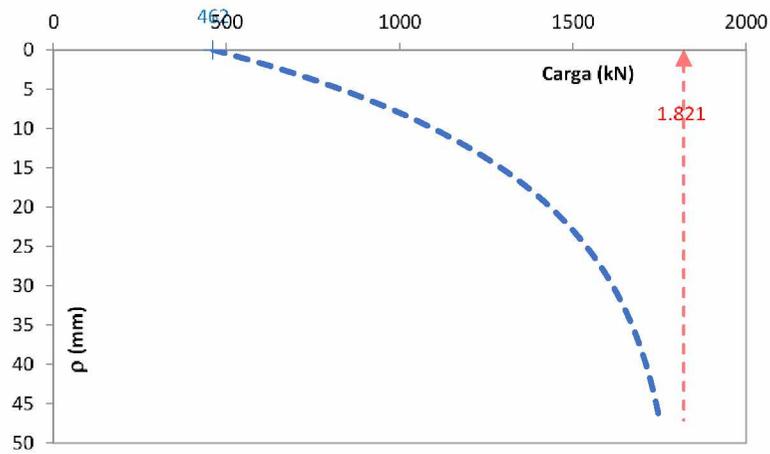


Comparação

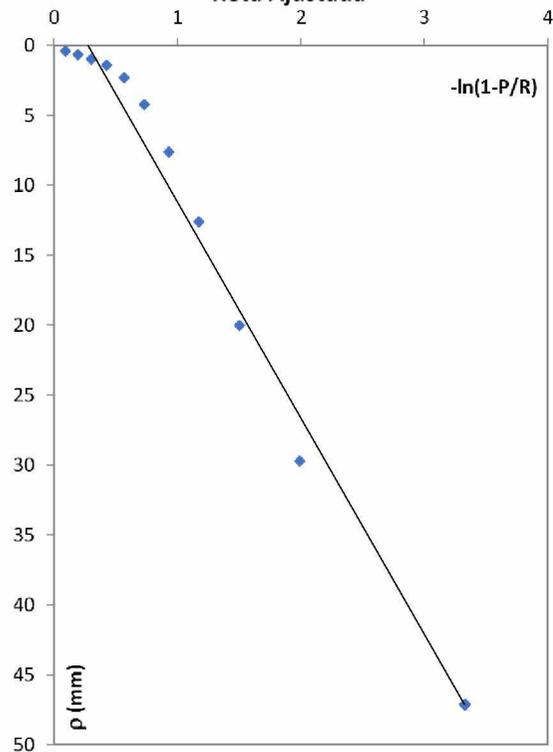


Aoki (1976) para $(s/d)=4$ e $L=5$ m

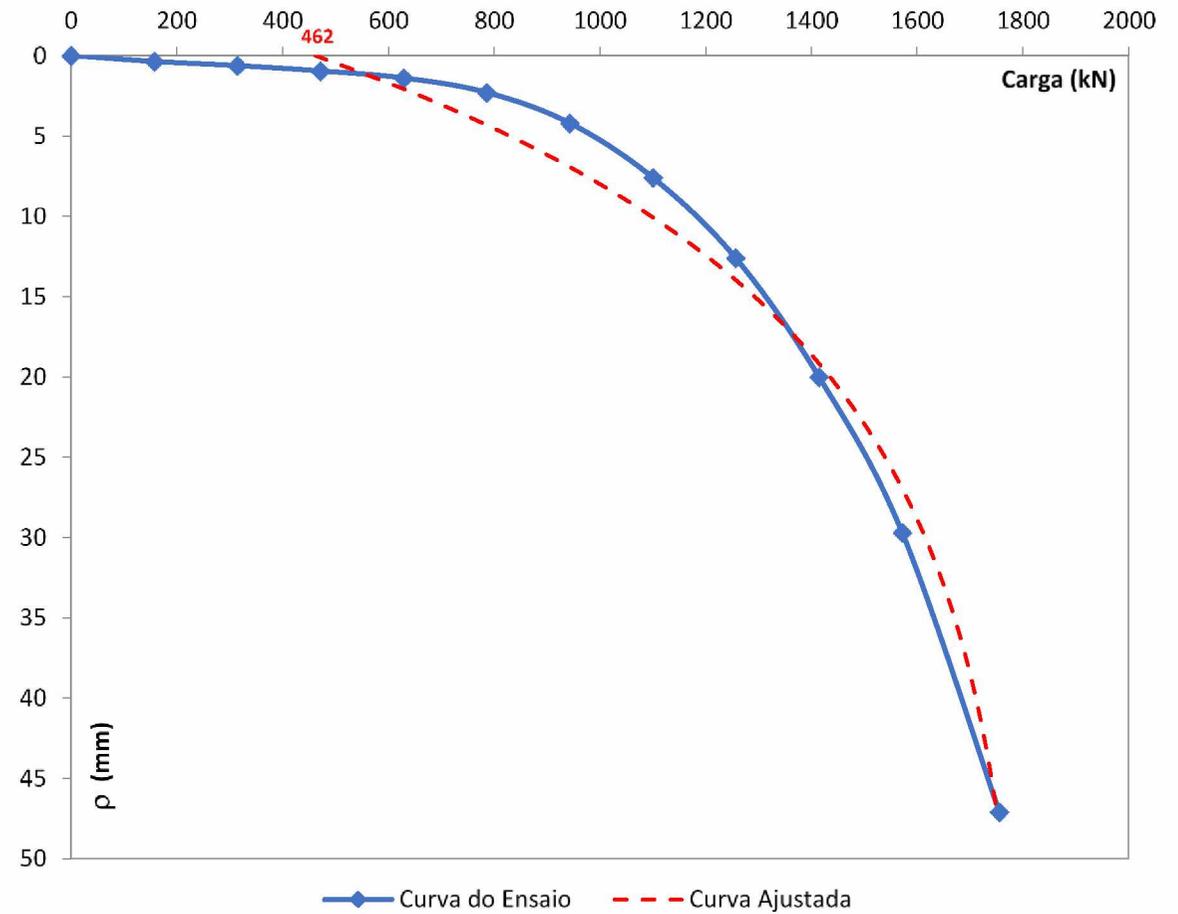
Curva Ajustada



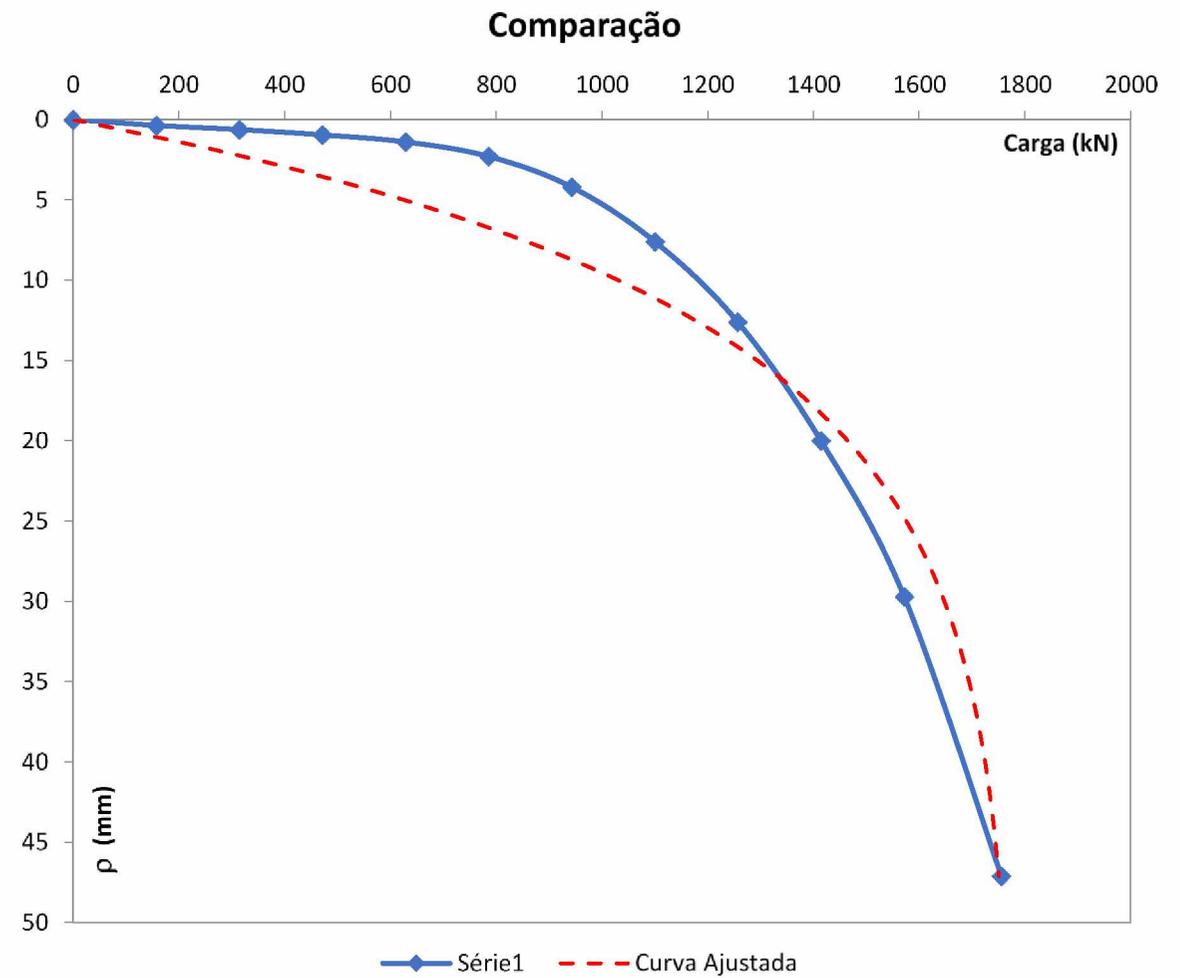
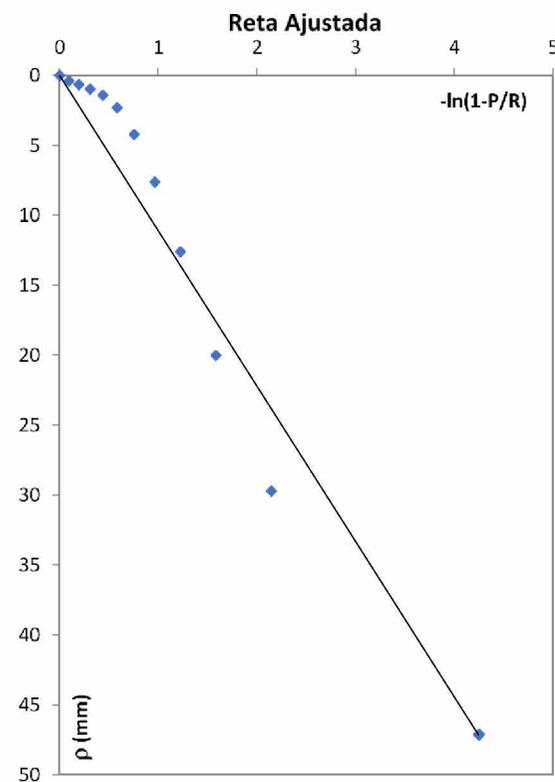
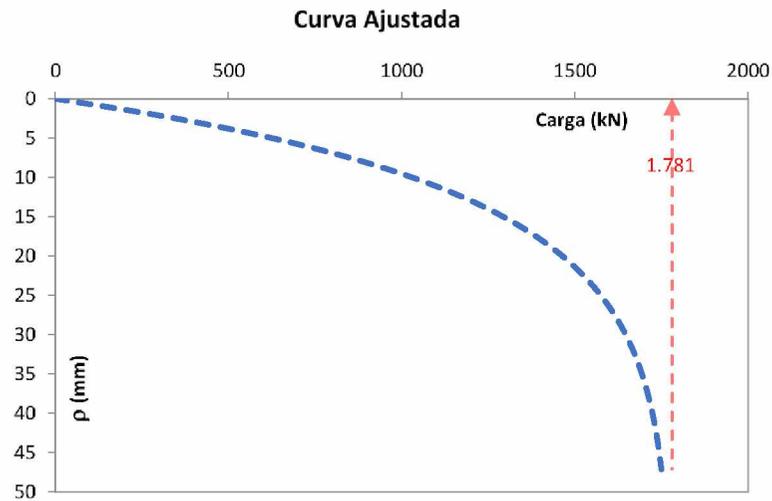
Reta Ajustada



Comparação

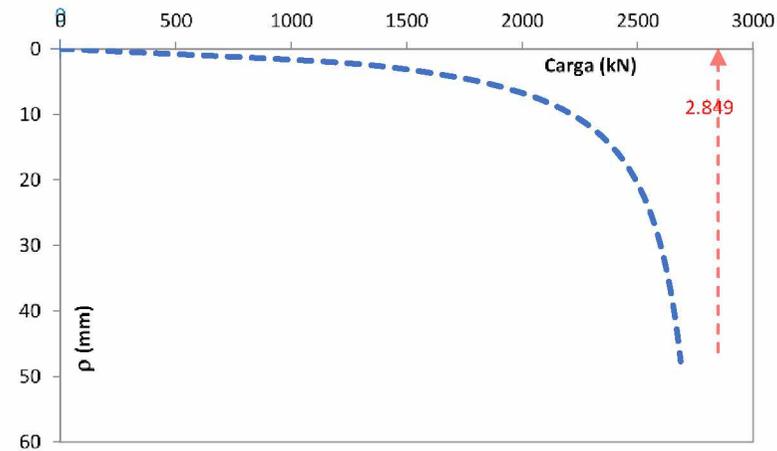


Van der Veen (1953) para $(s/d)=4$ e $L=5$ m

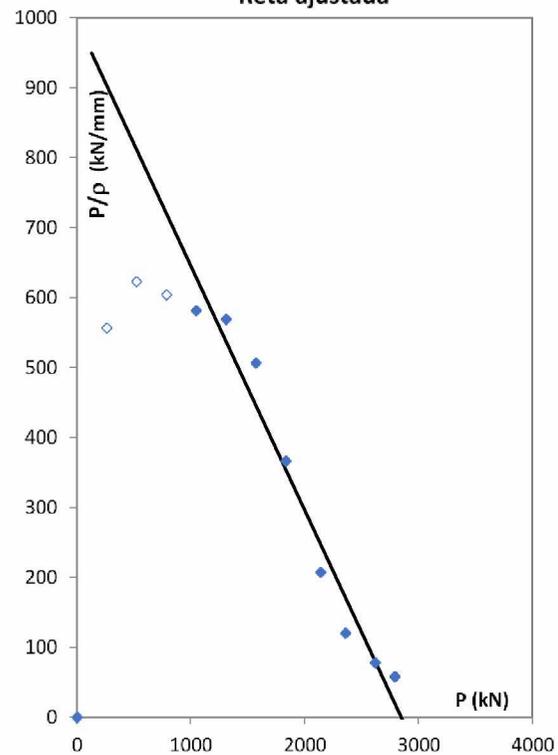


Décourt (1996) para $(s/d)=4$ e $L=10$ m

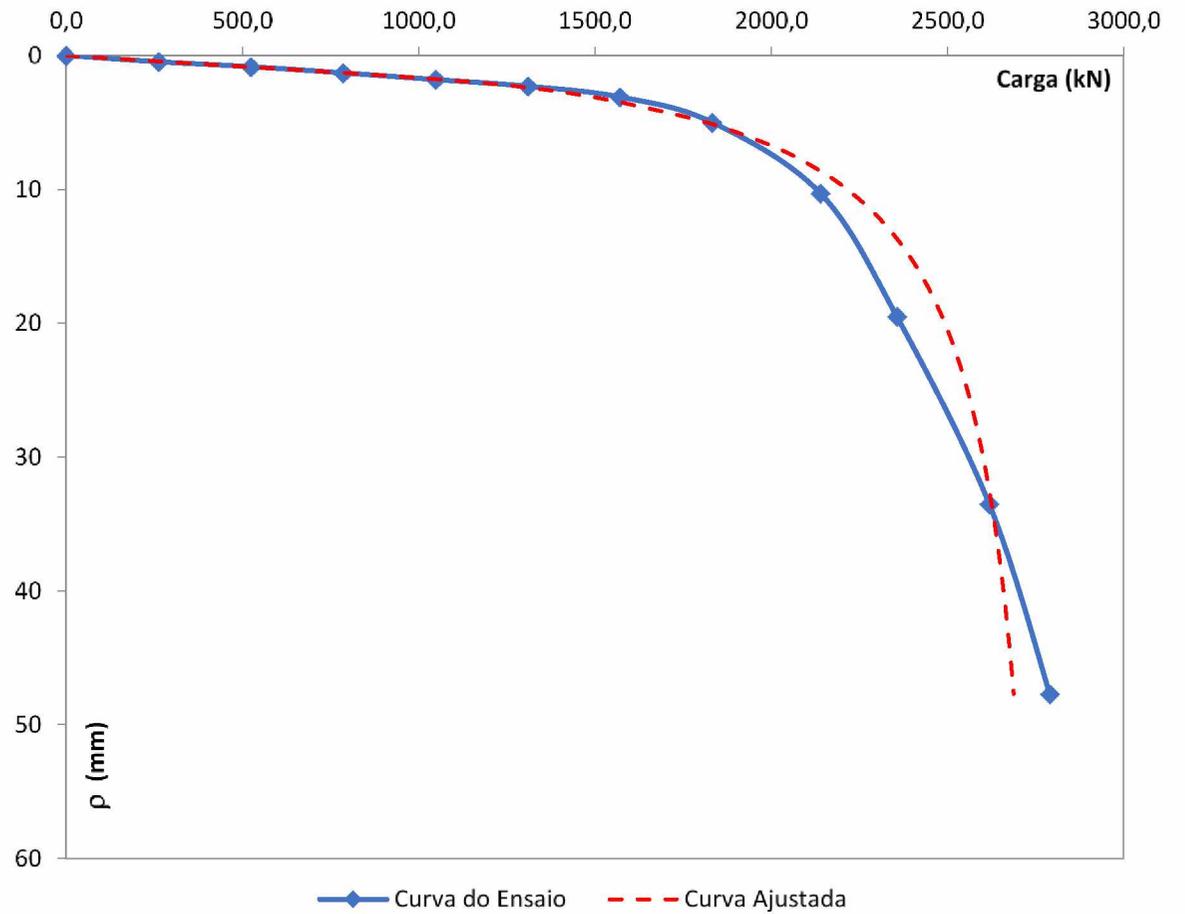
Curva Ajustada



Reta ajustada

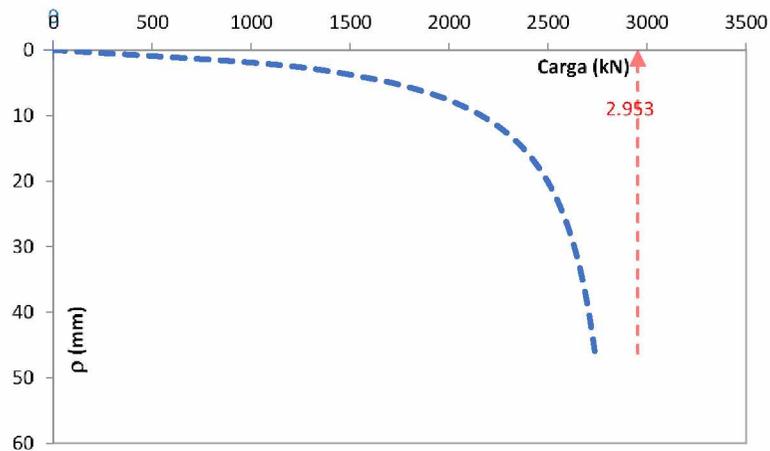


Comparação

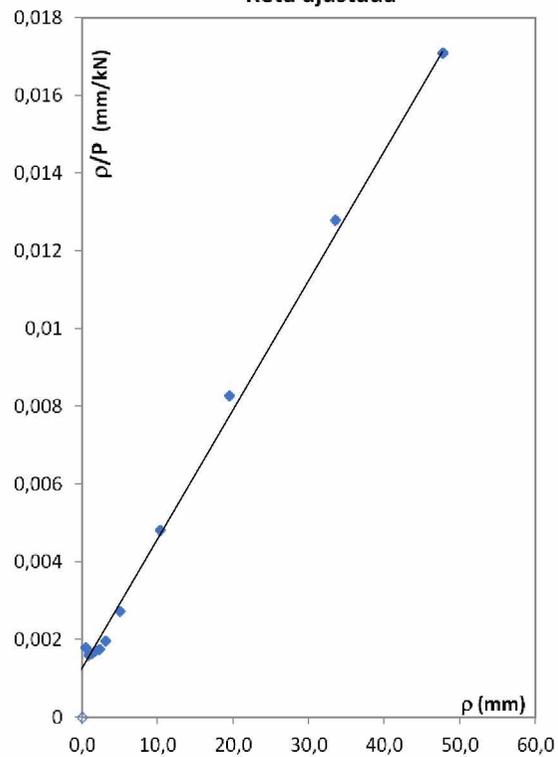


Chin (1978) para $(s/d)=4$ e $L=10$ m

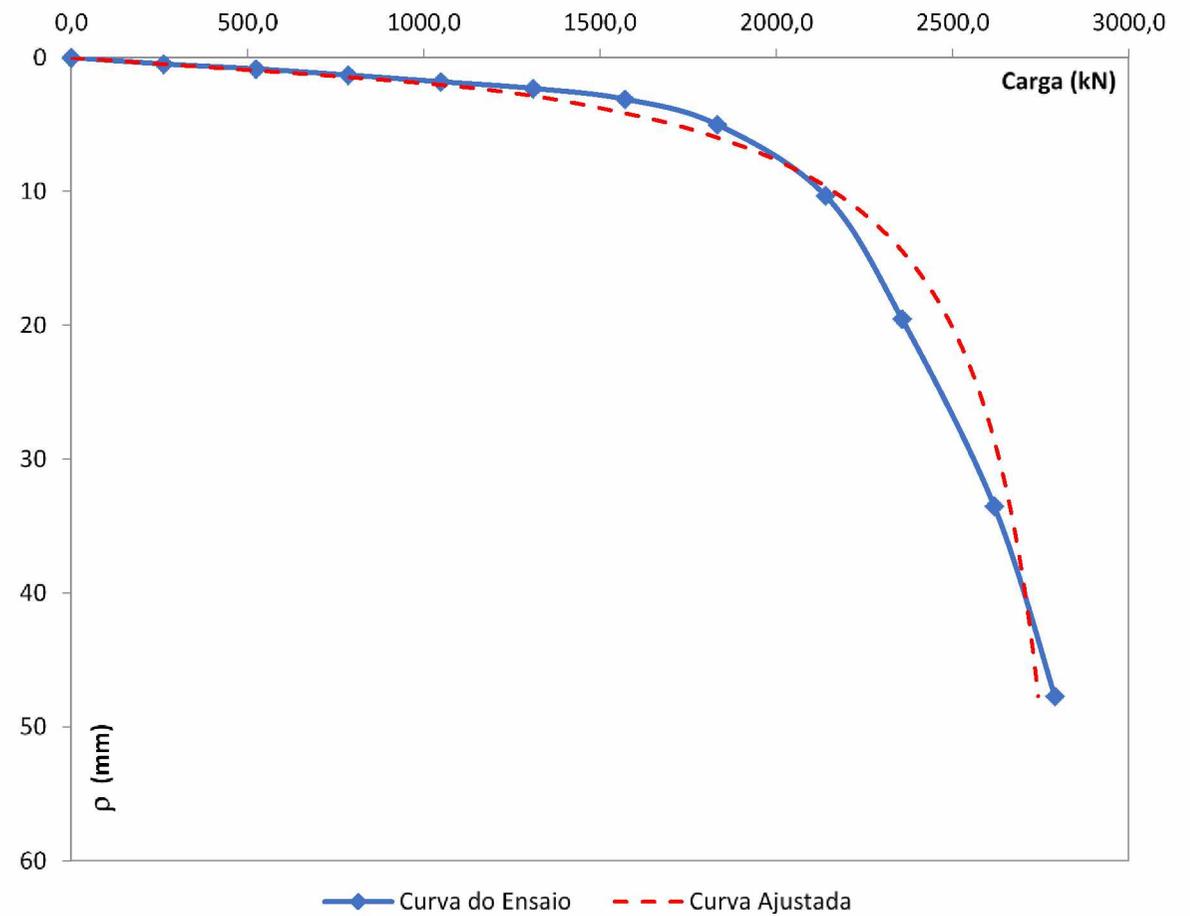
Curva Ajustada



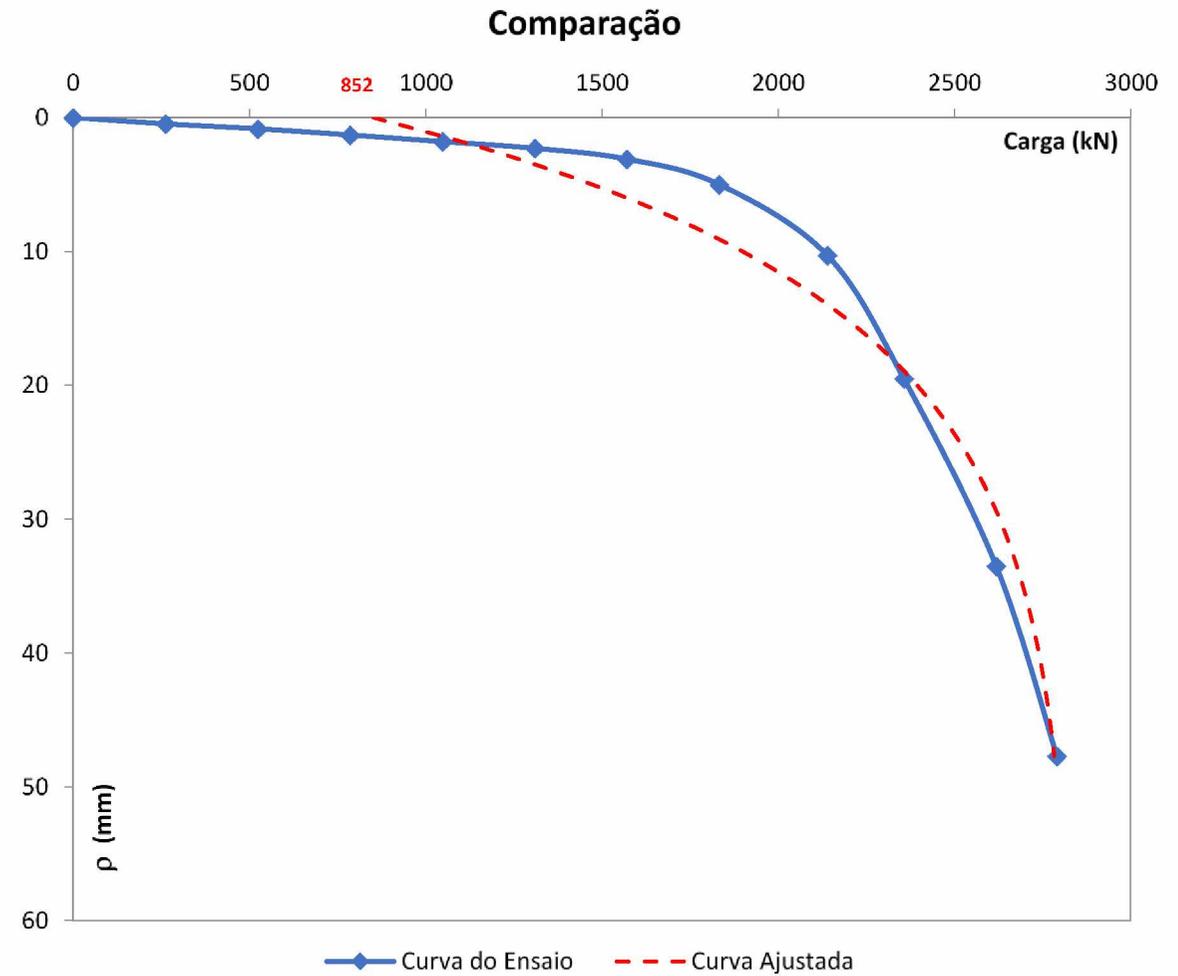
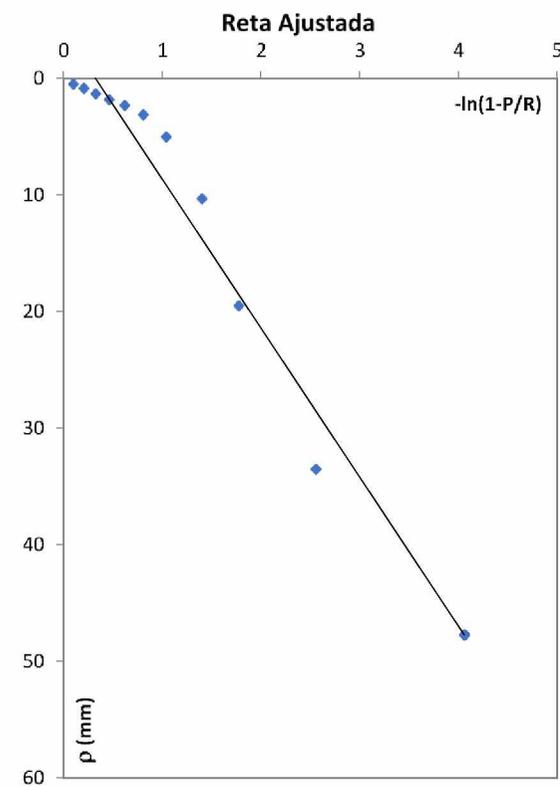
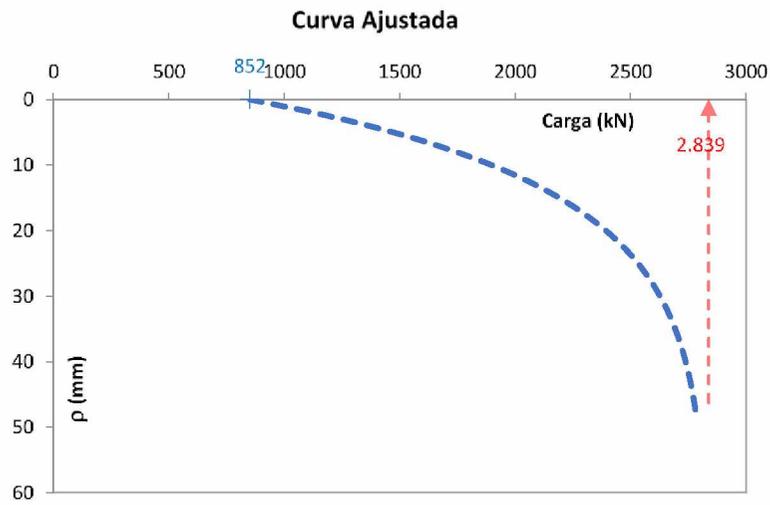
Reta ajustada



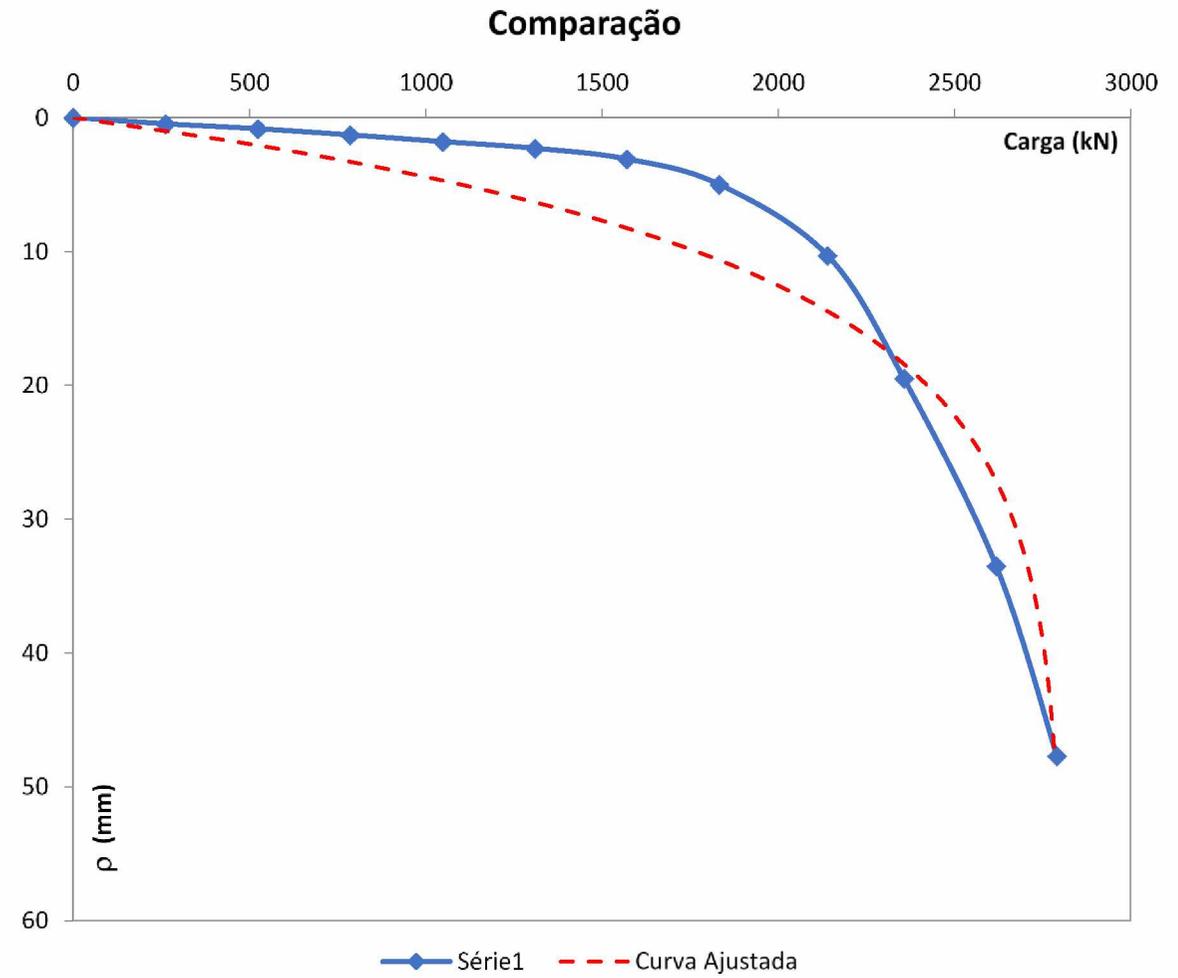
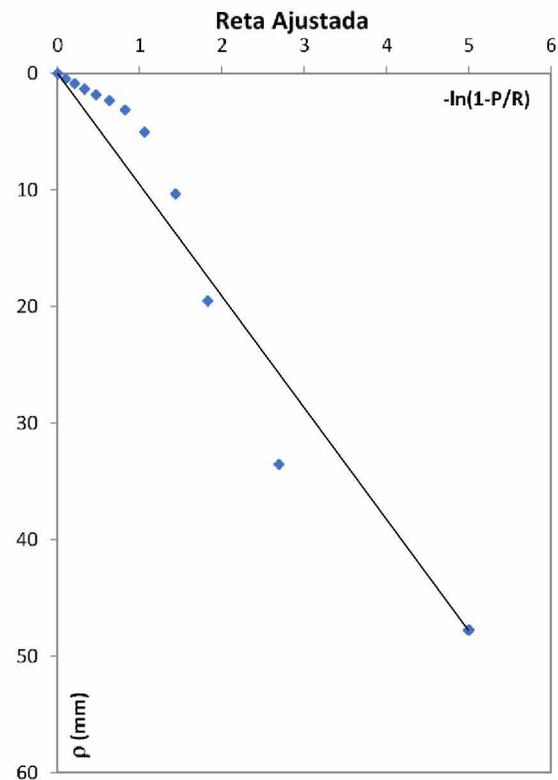
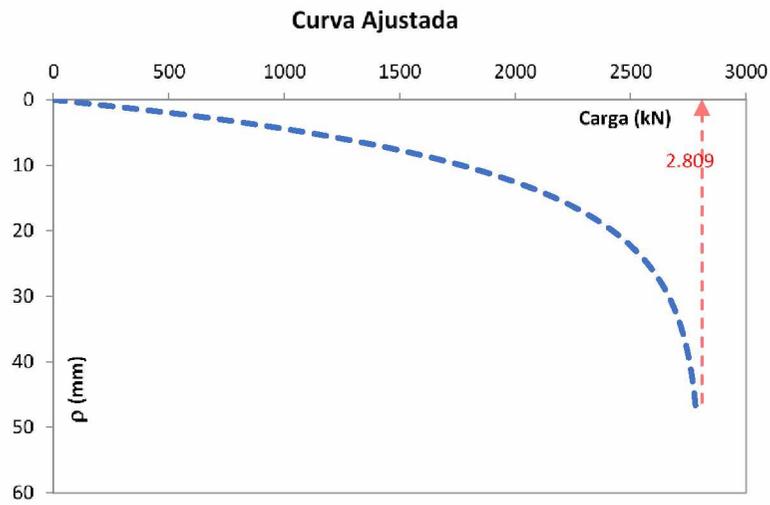
Comparação



Aoki (1976) para $(s/d)=4$ e $L=10$ m

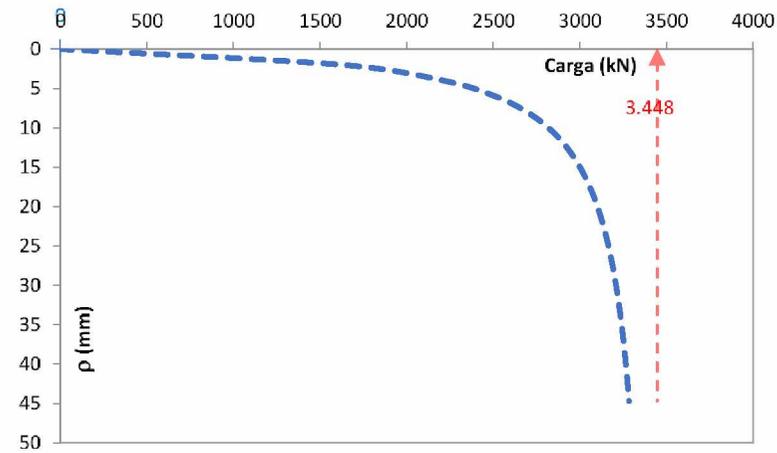


Van der Veen (1953) para $(s/d)=4$ e $L=10$ m

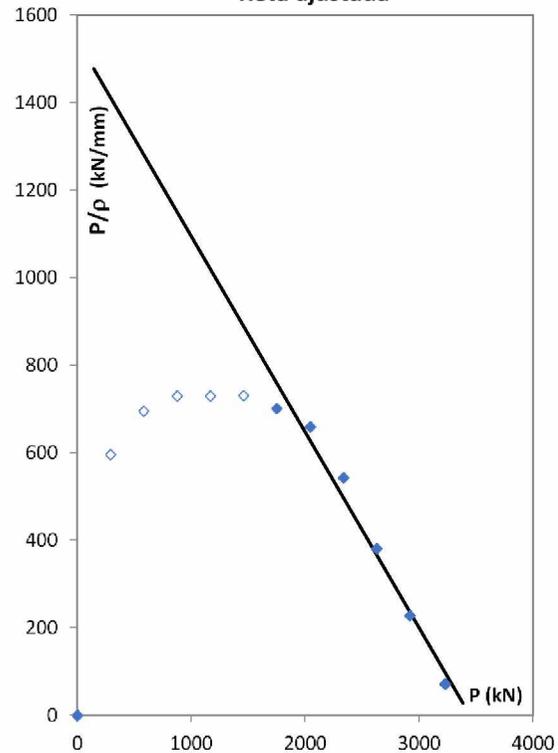


Décourt (1996) para $(s/d)=4$ e $L=15$ m

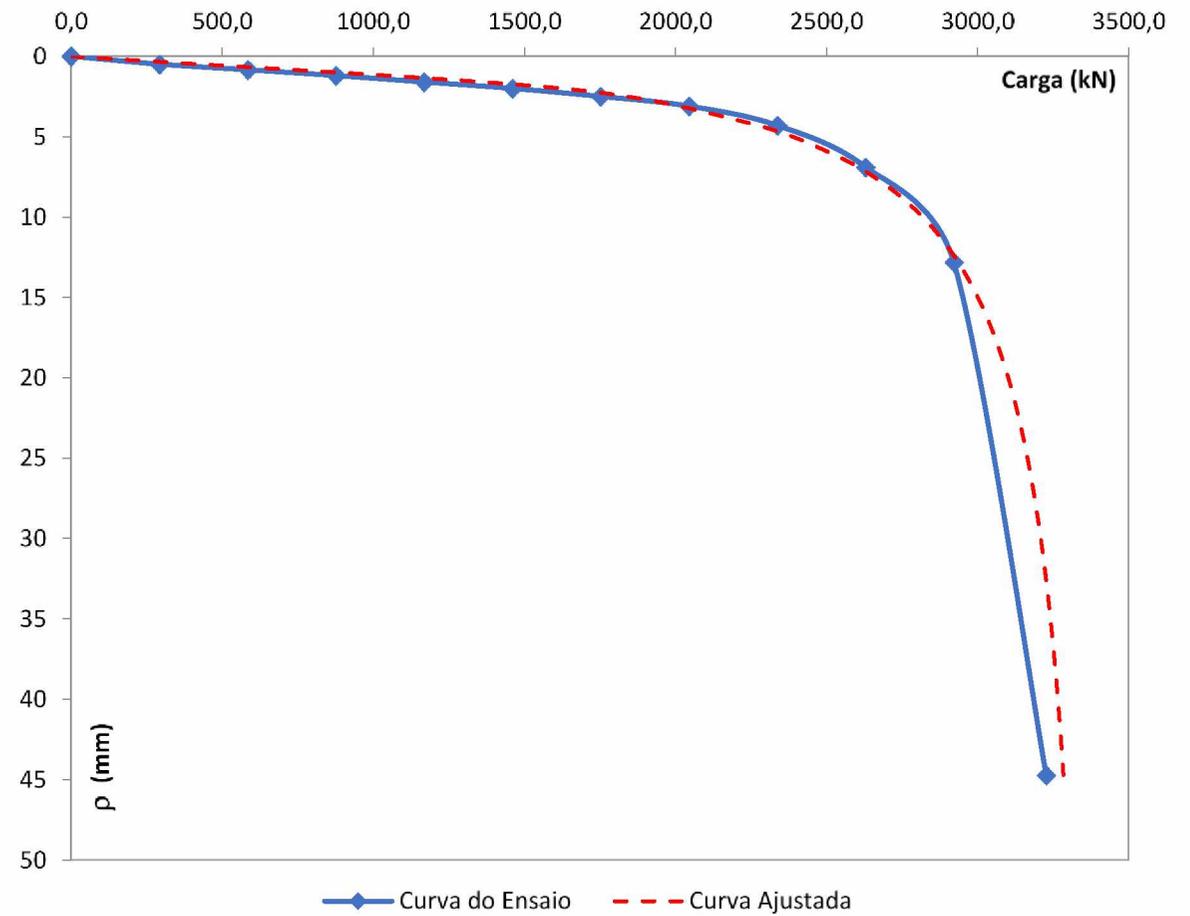
Curva Ajustada



Reta ajustada

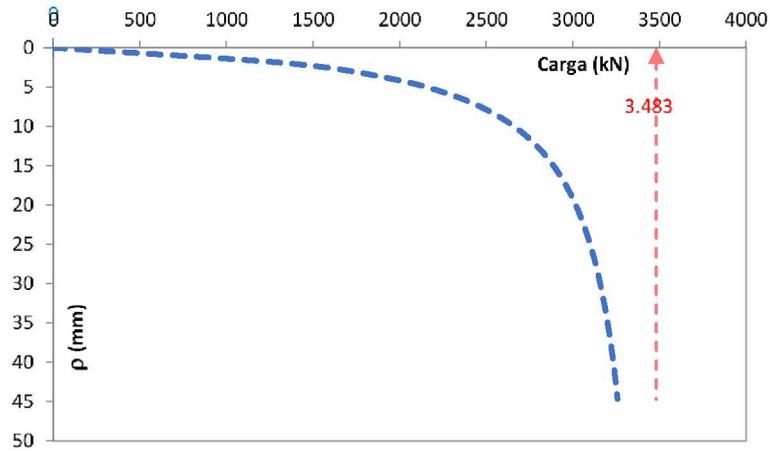


Comparação

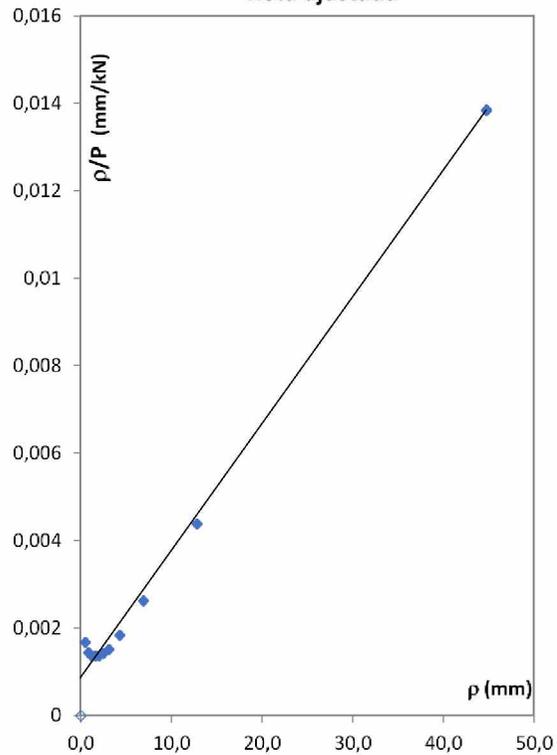


Chin (1978) para $(s/d)=4$ e $L=15$ m

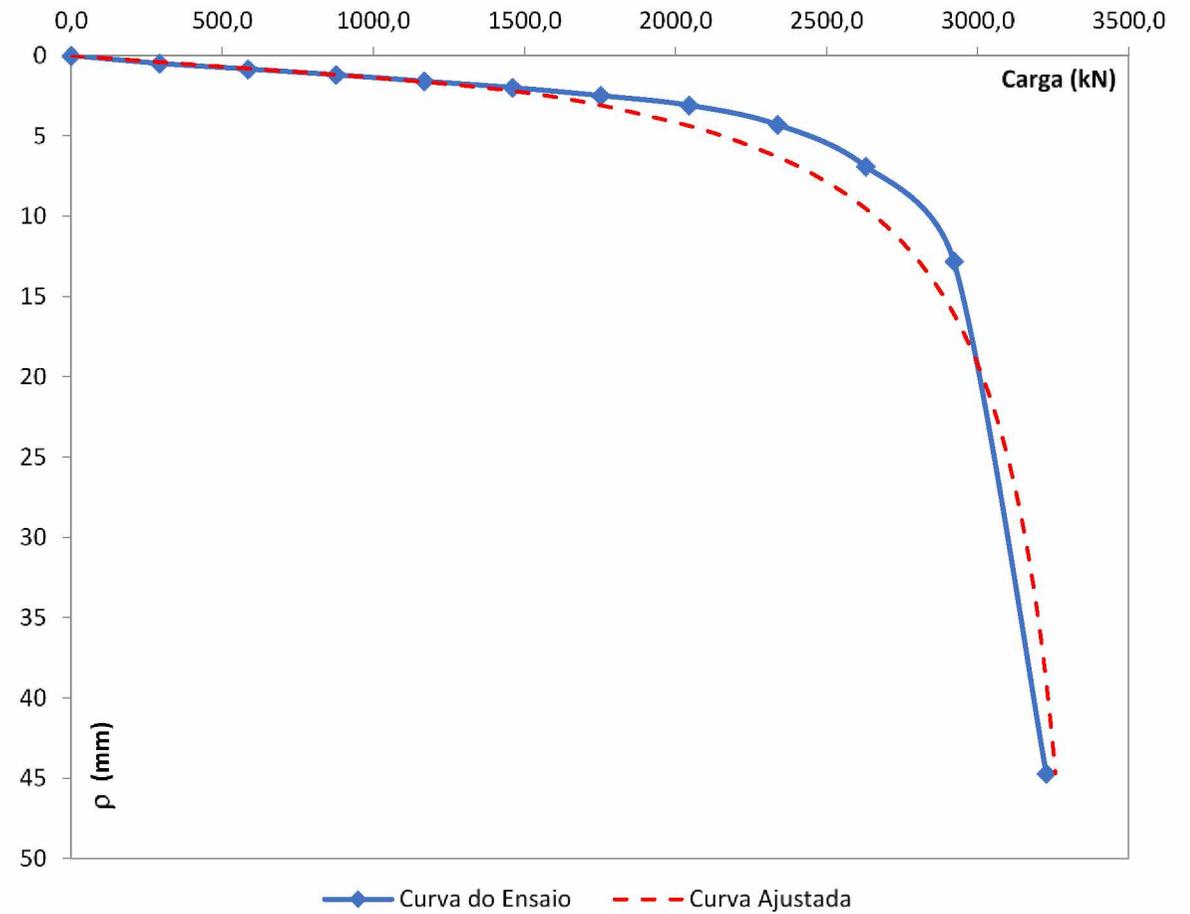
Curva Ajustada



Reta ajustada

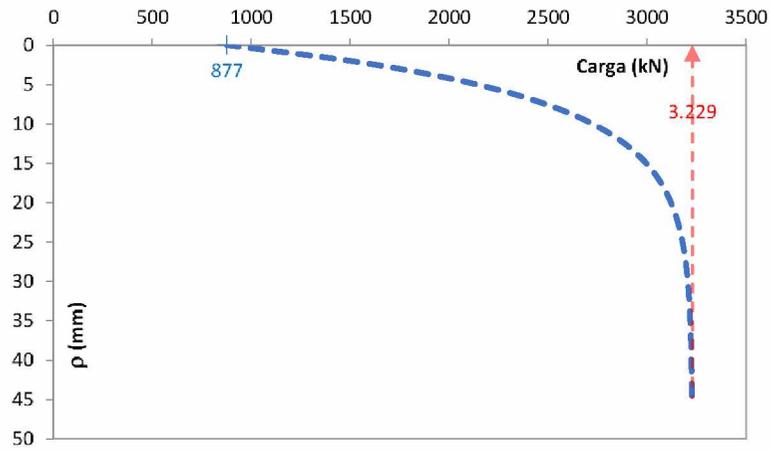


Comparação

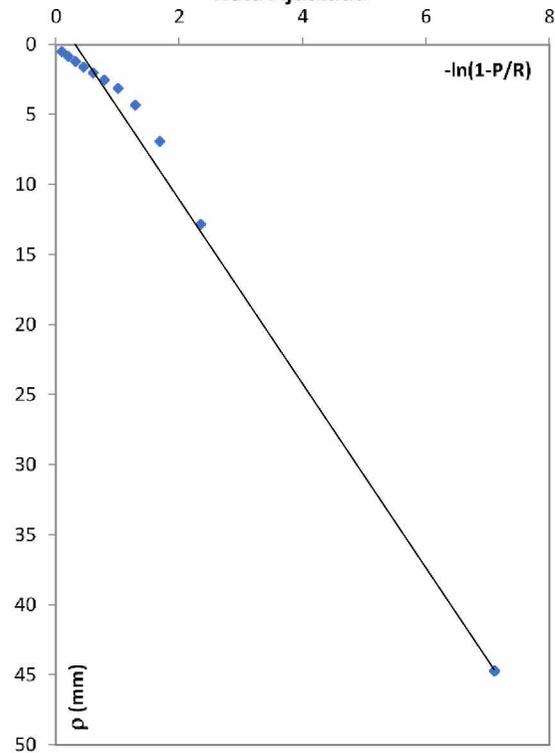


Aoki (1976) para $(s/d)=4$ e $L=15$ m

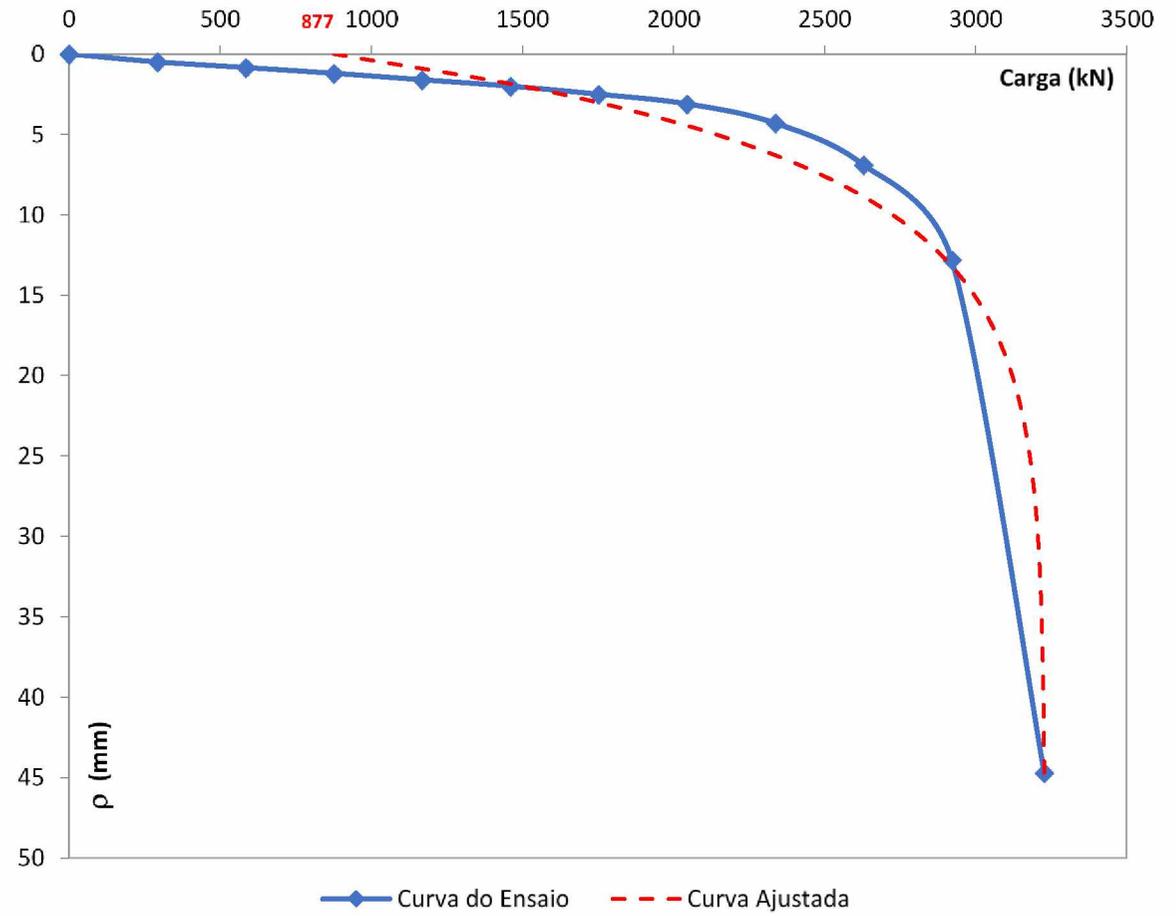
Curva Ajustada



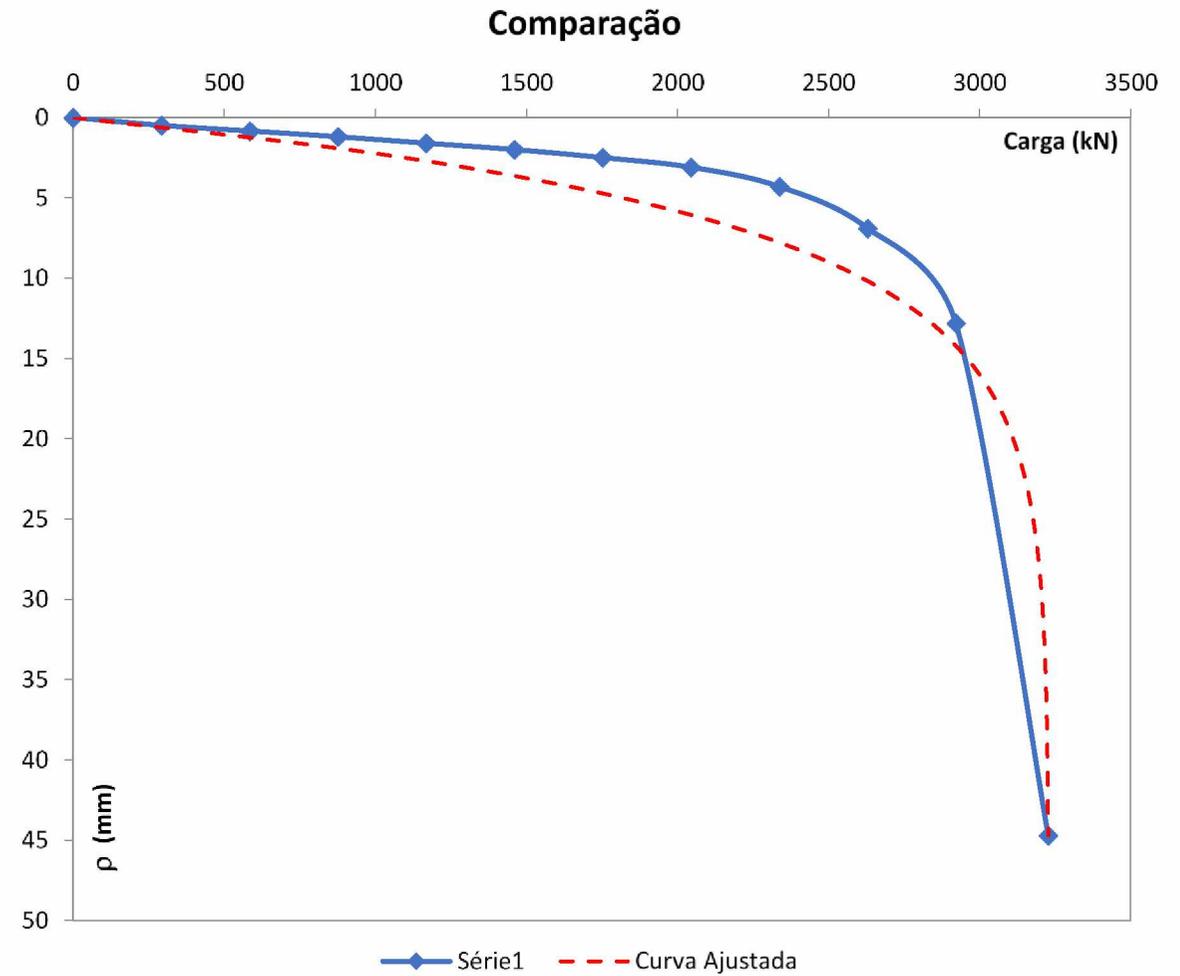
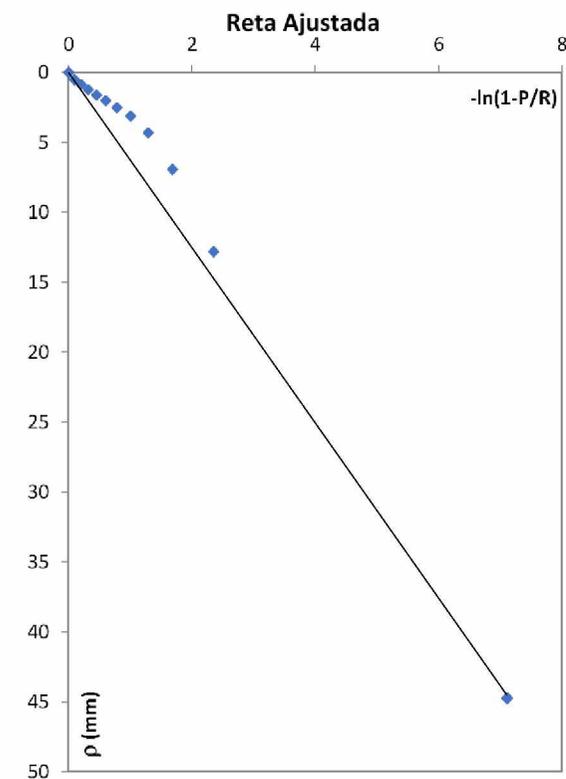
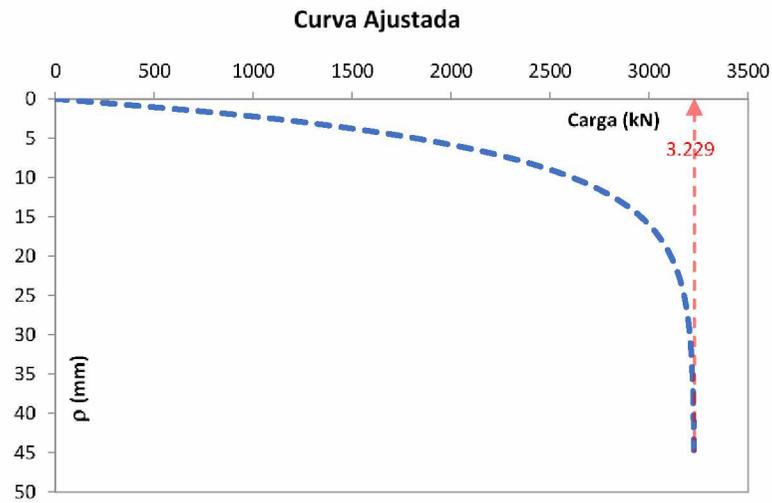
Reta Ajustada



Comparação

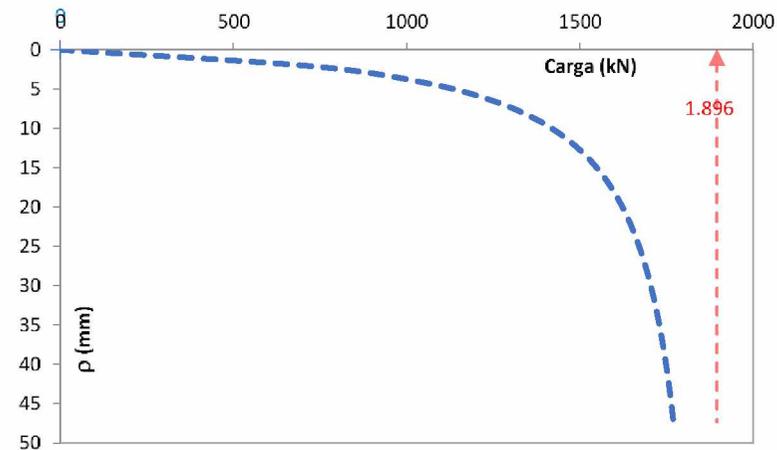


Van der Veen (1953) para $(s/d)=4$ e $L=15$ m

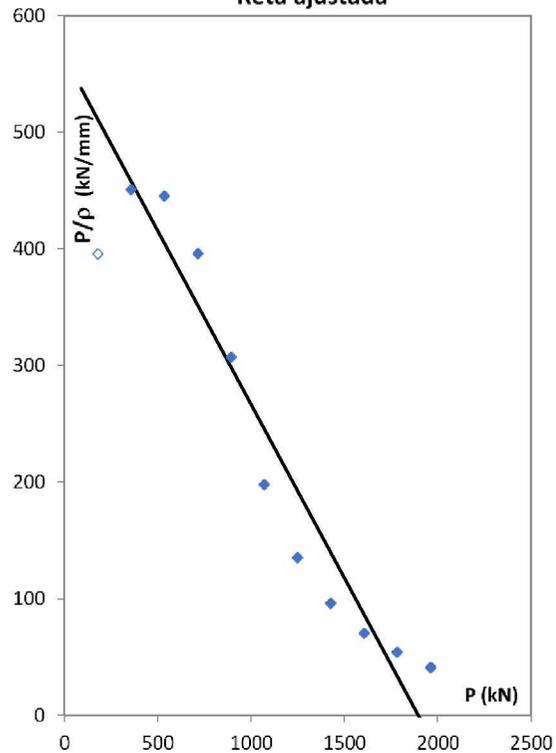


Décourt (1996) para $(s/d)=4,5$ e $L=5$ m

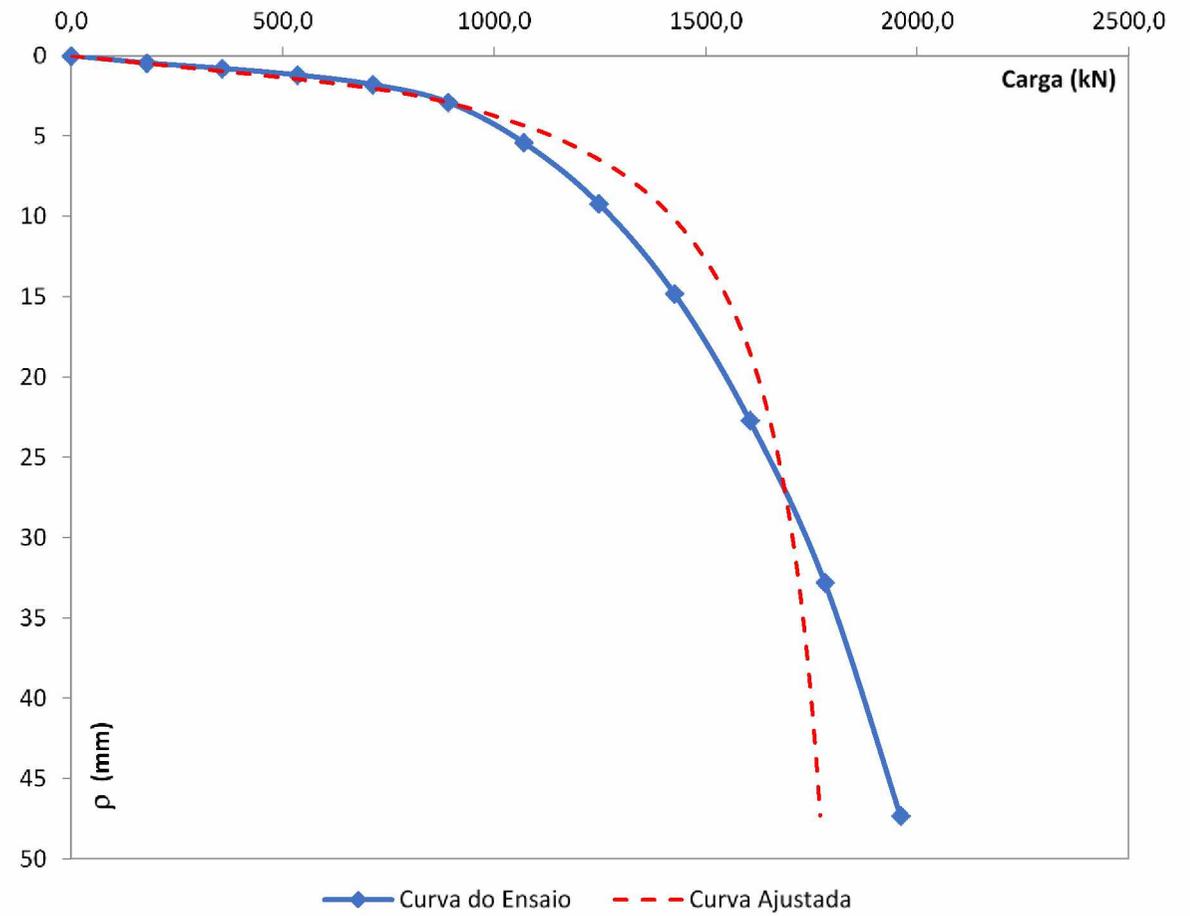
Curva Ajustada



Reta ajustada

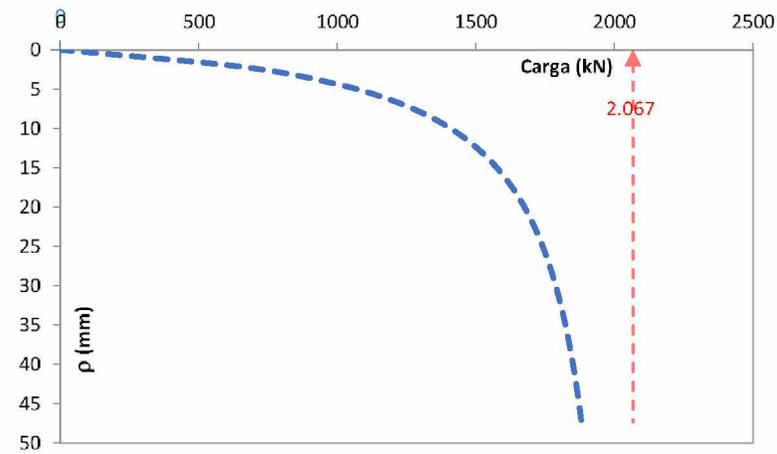


Comparação

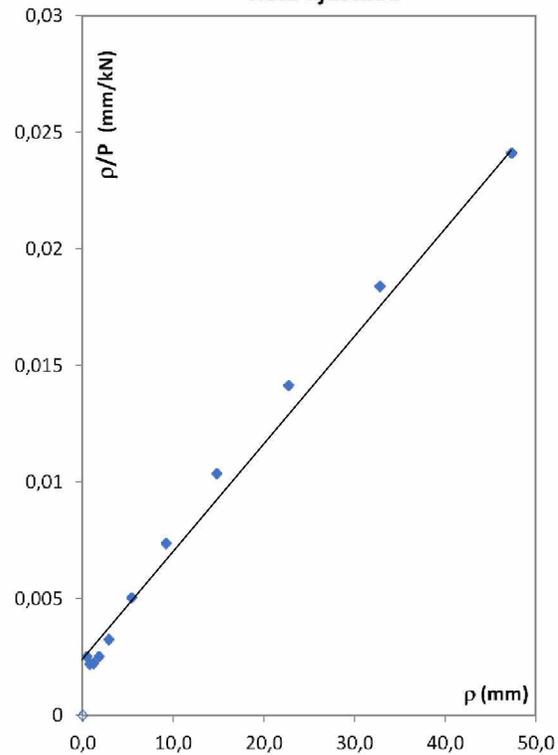


Chin (1978) para $(s/d)=4,5$ e $L=5$ m

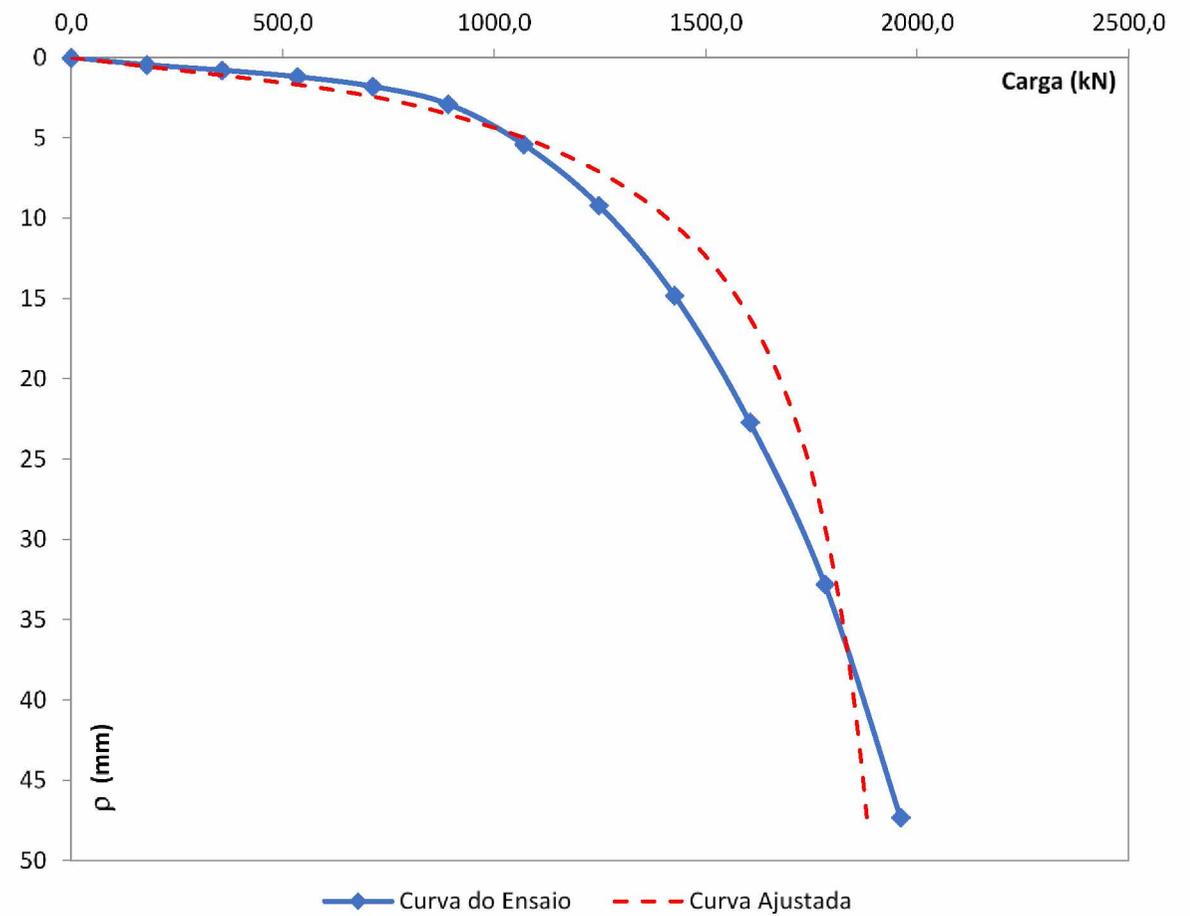
Curva Ajustada



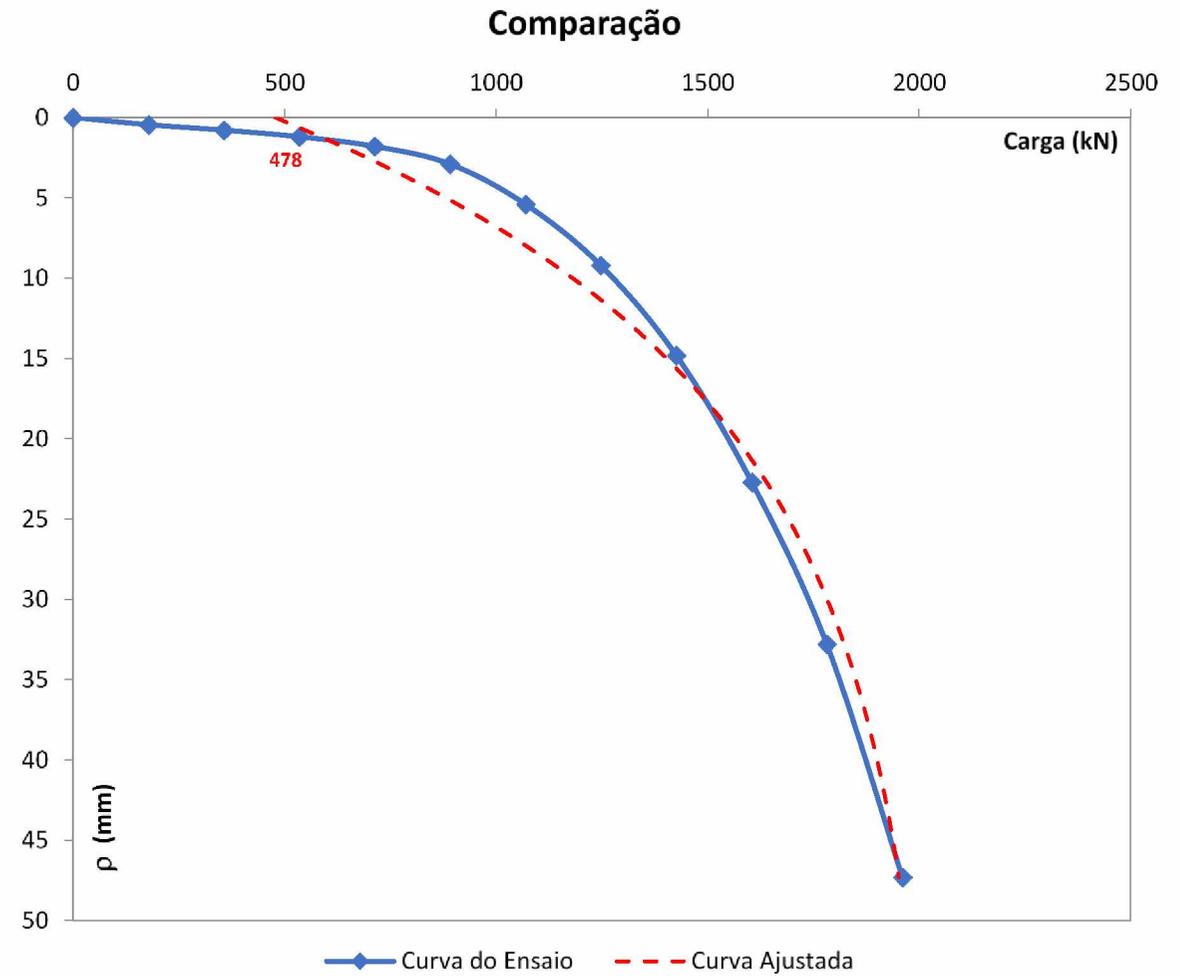
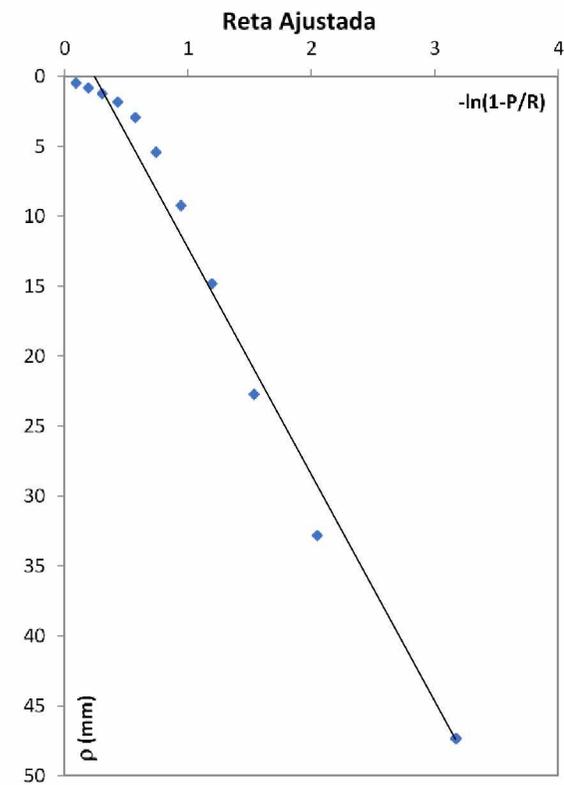
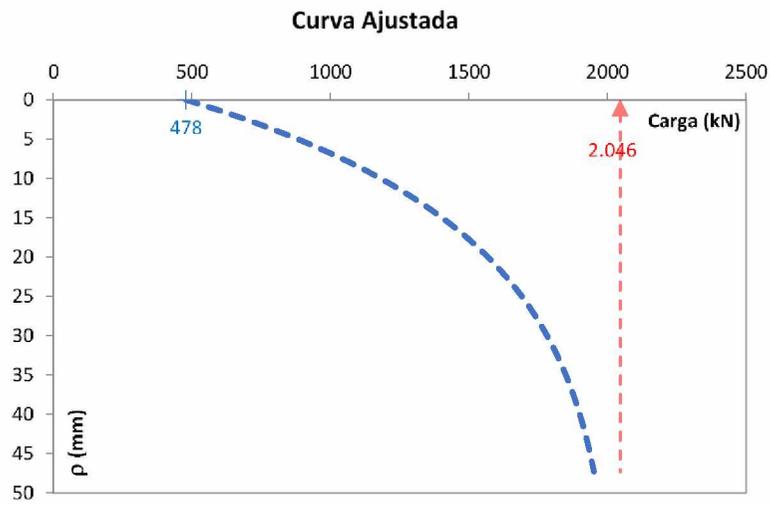
Reta ajustada



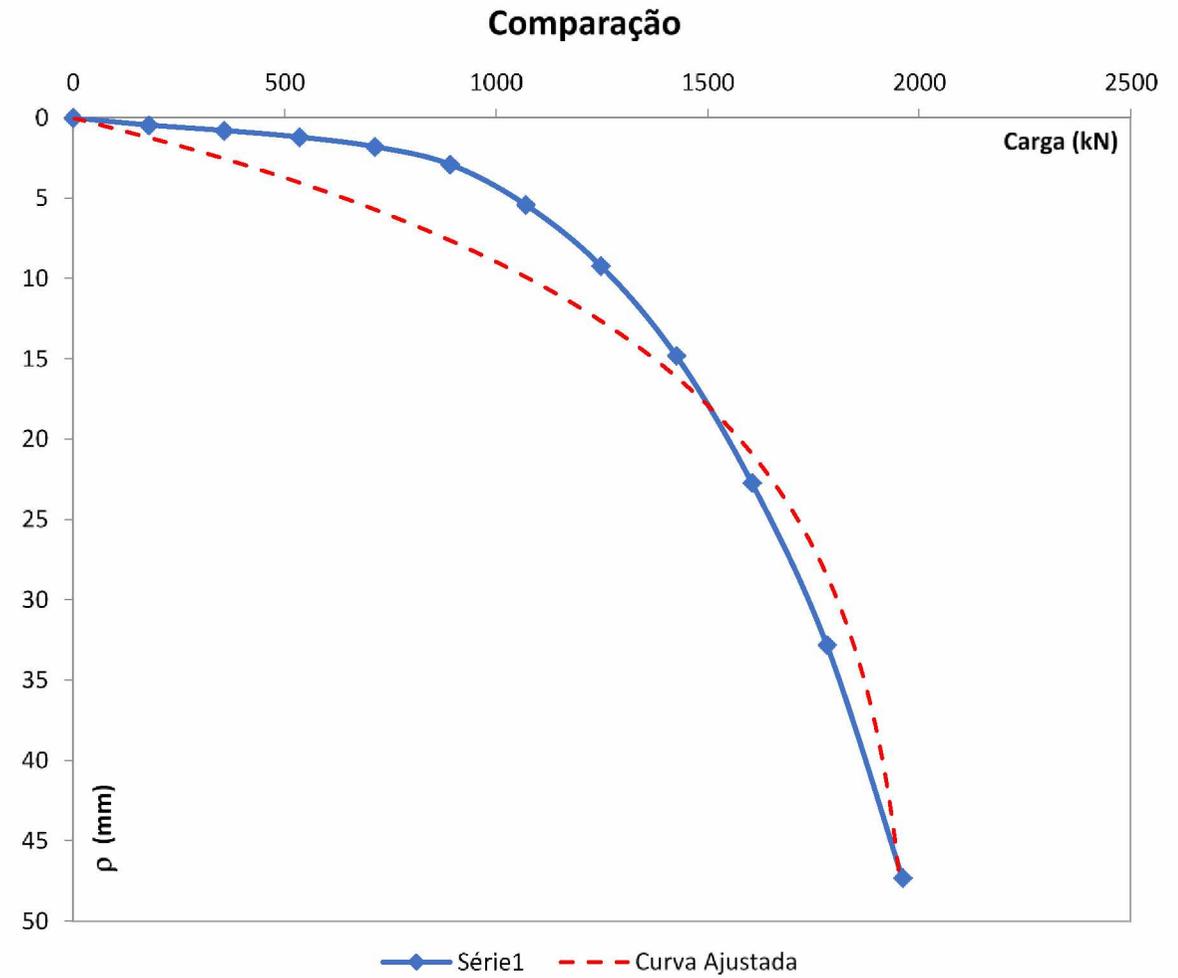
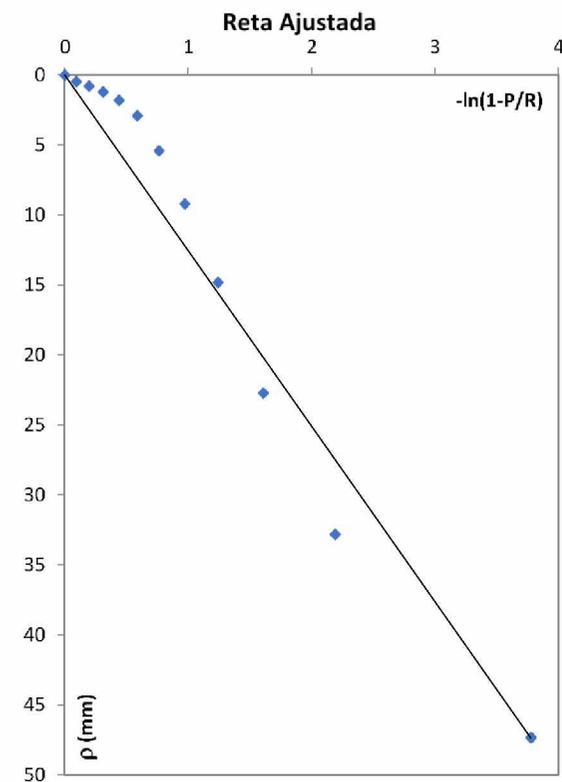
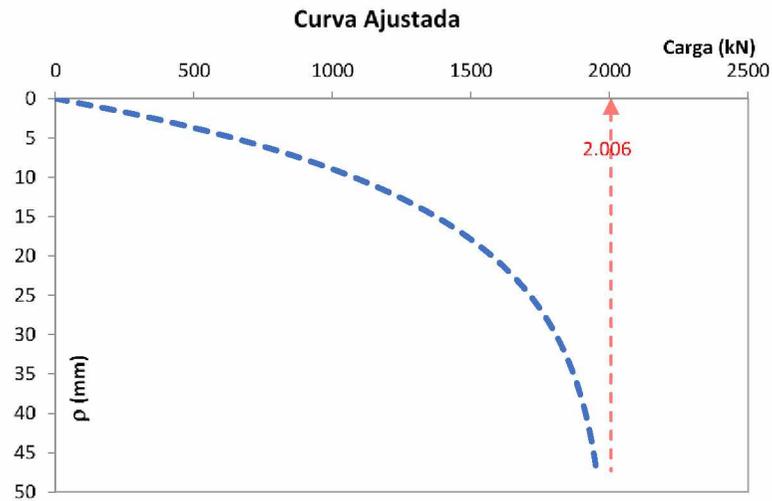
Comparação



Aoki (1976) para $(s/d)=4,5$ e $L=5$ m

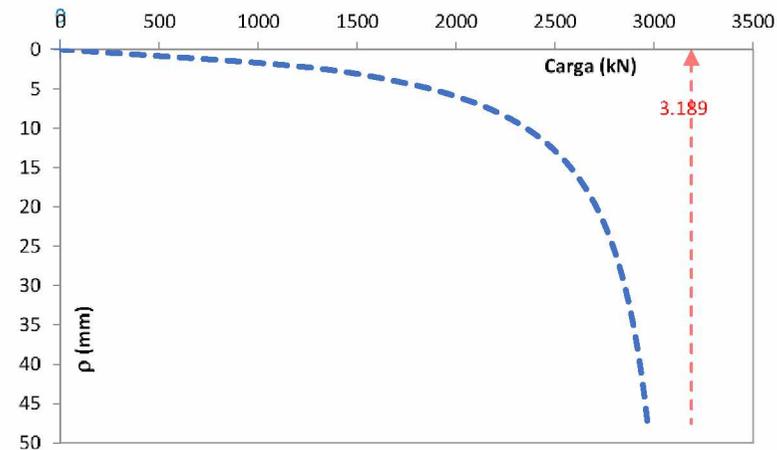


Van der Veen (1953) para $(s/d)=4,5$ e $L=5$ m

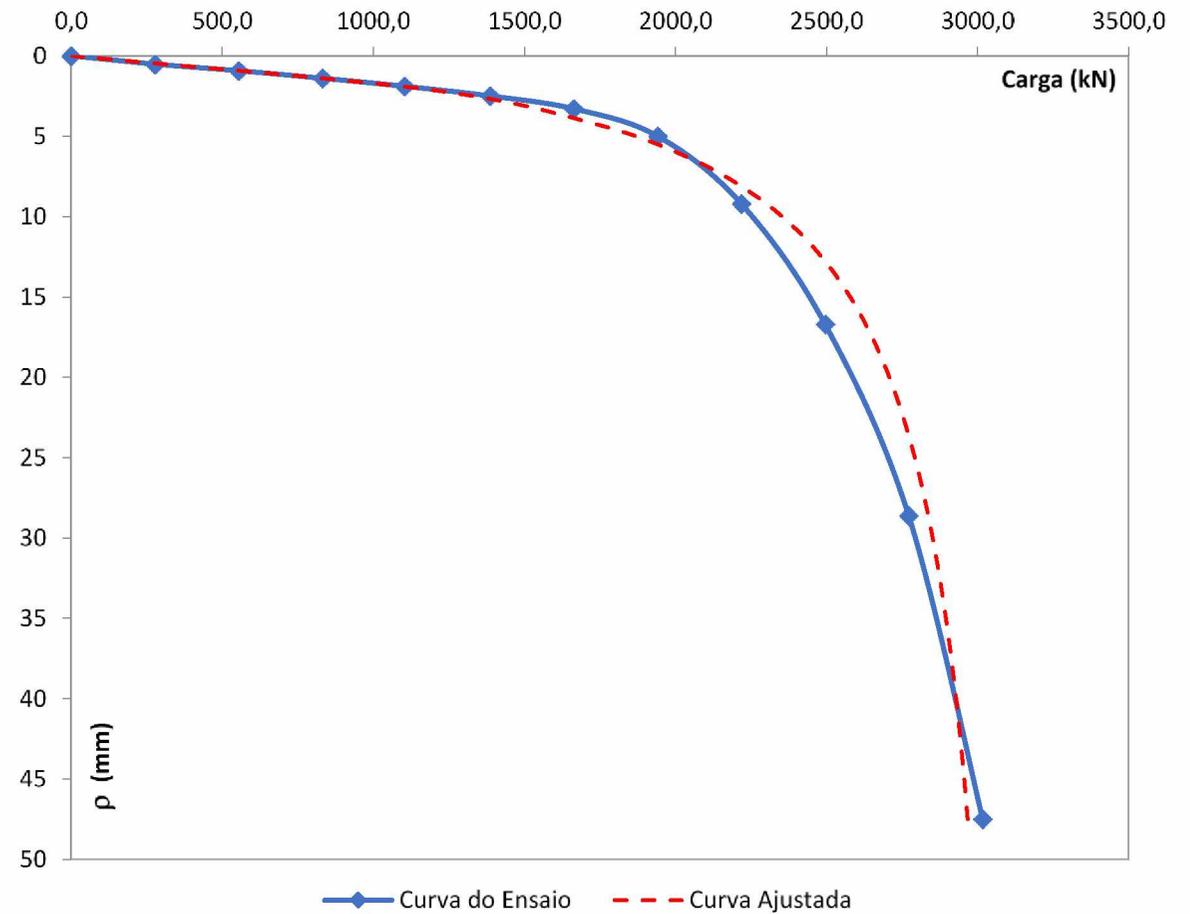


Décourt (1996) para $(s/d)=4,5$ e $L=10$ m

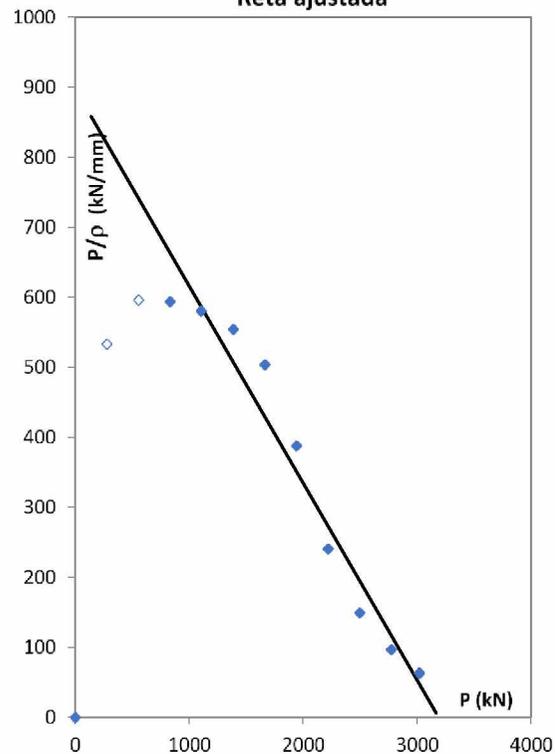
Curva Ajustada



Comparação

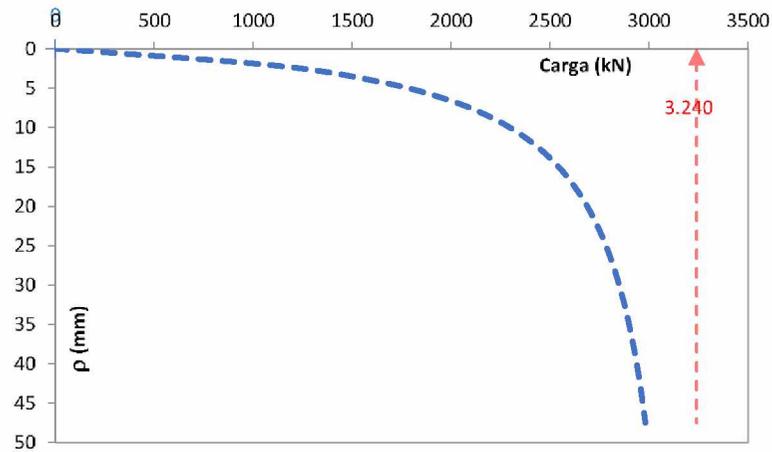


Reta ajustada

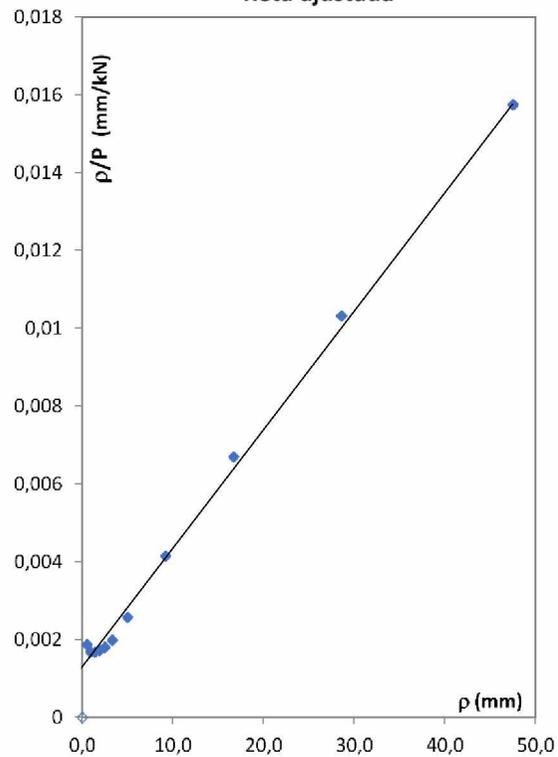


Chin (1978) para $(s/d)=4,5$ e $L=10$ m

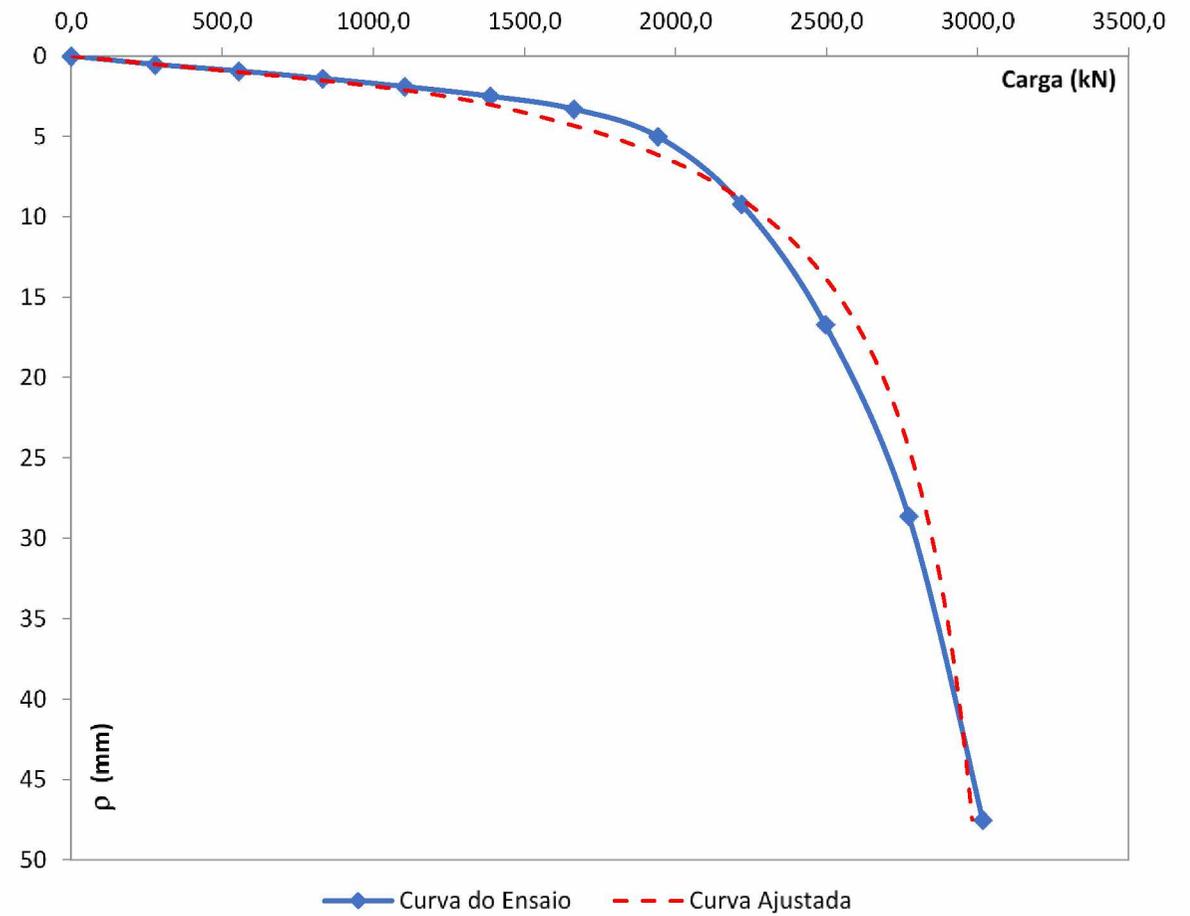
Curva Ajustada



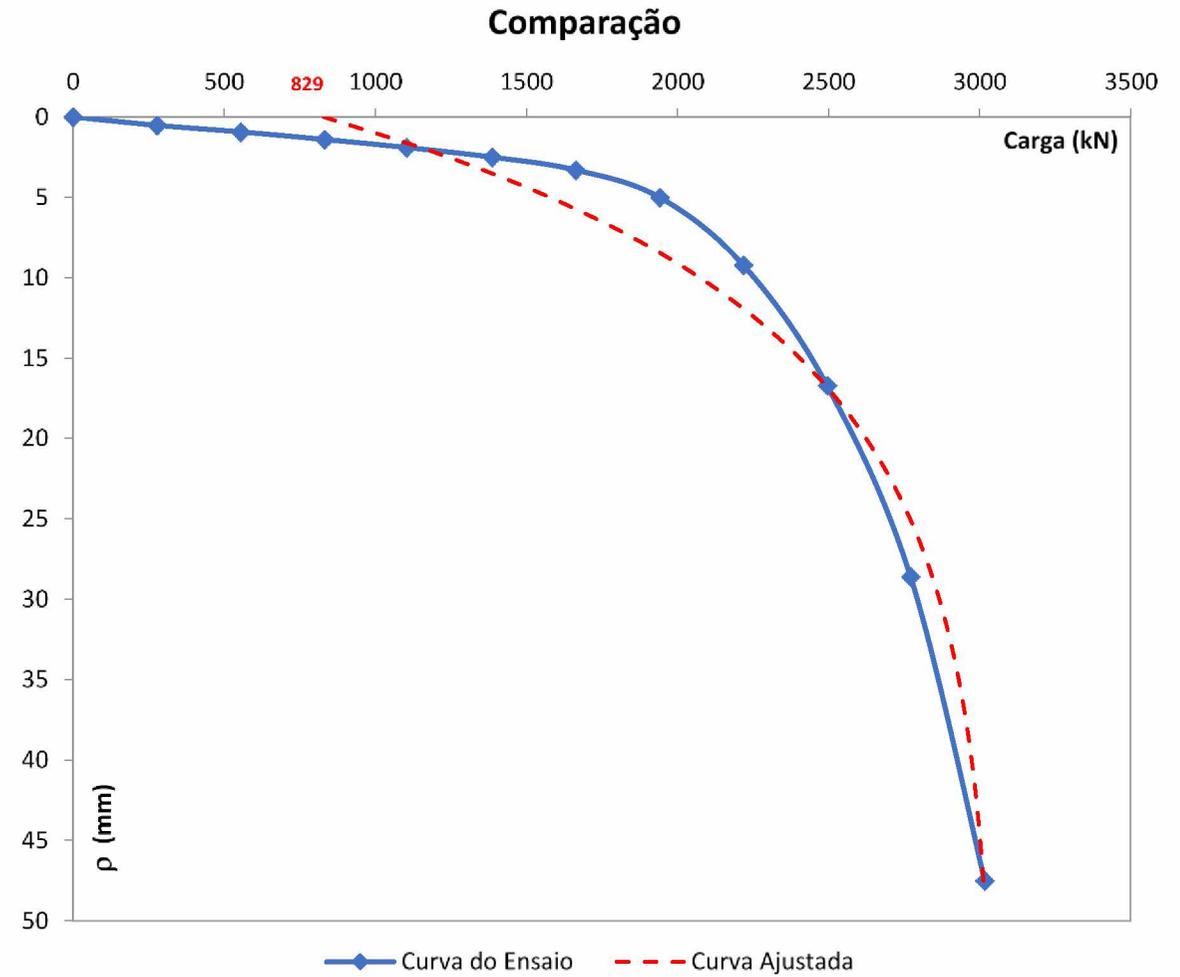
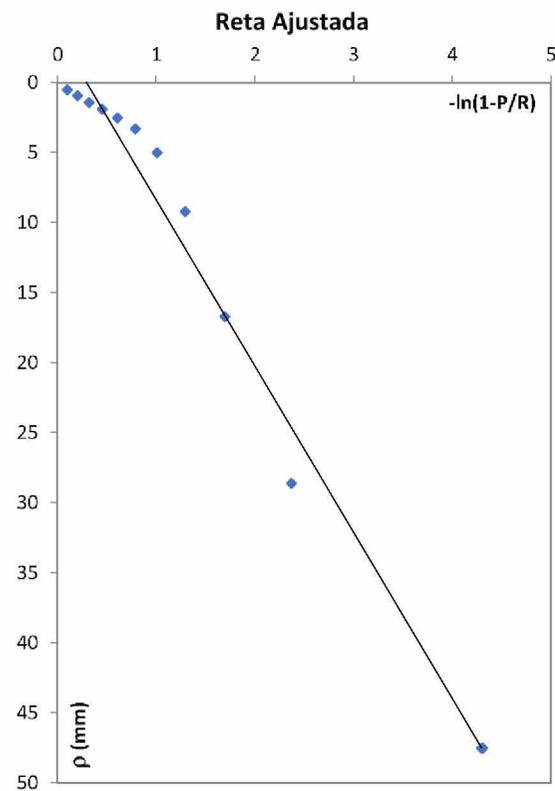
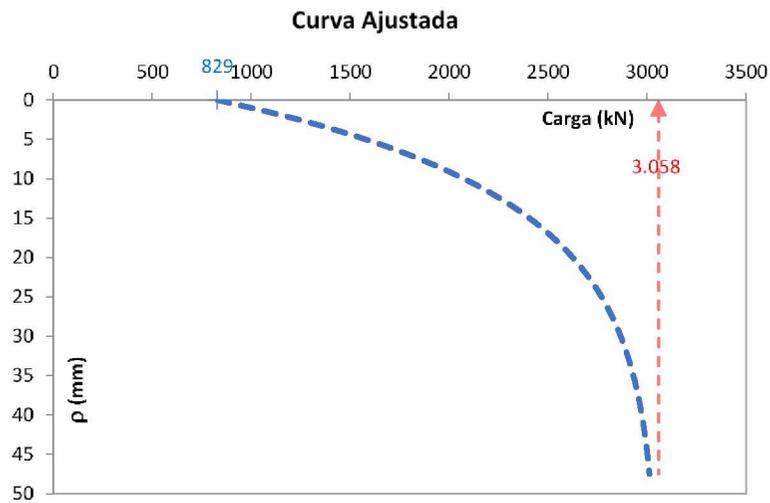
Reta ajustada



Comparação

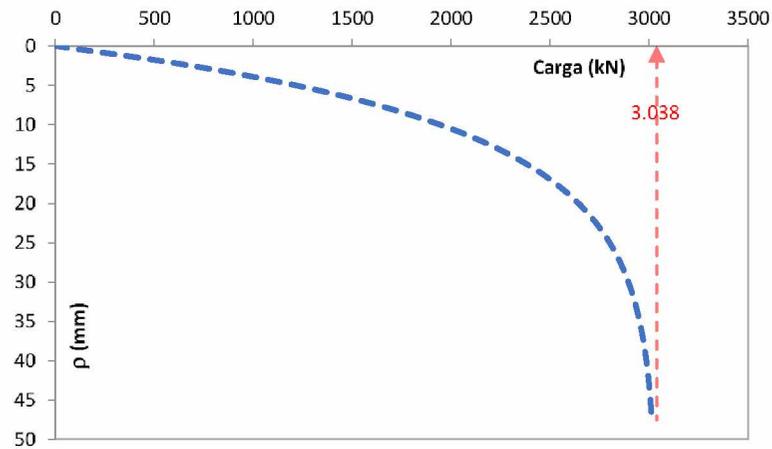


Aoki (1976) para $(s/d)=4,5$ e $L=10$ m

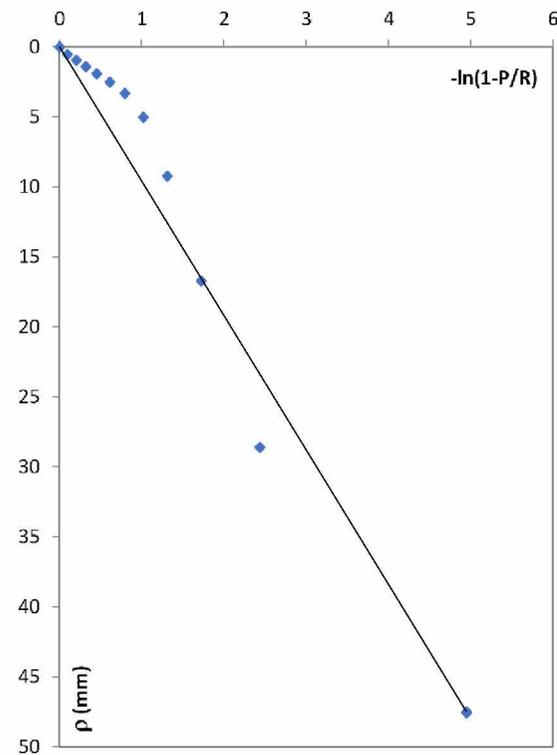


Van der Veen (1953) para $(s/d)=4,5$ e $L=10$ m

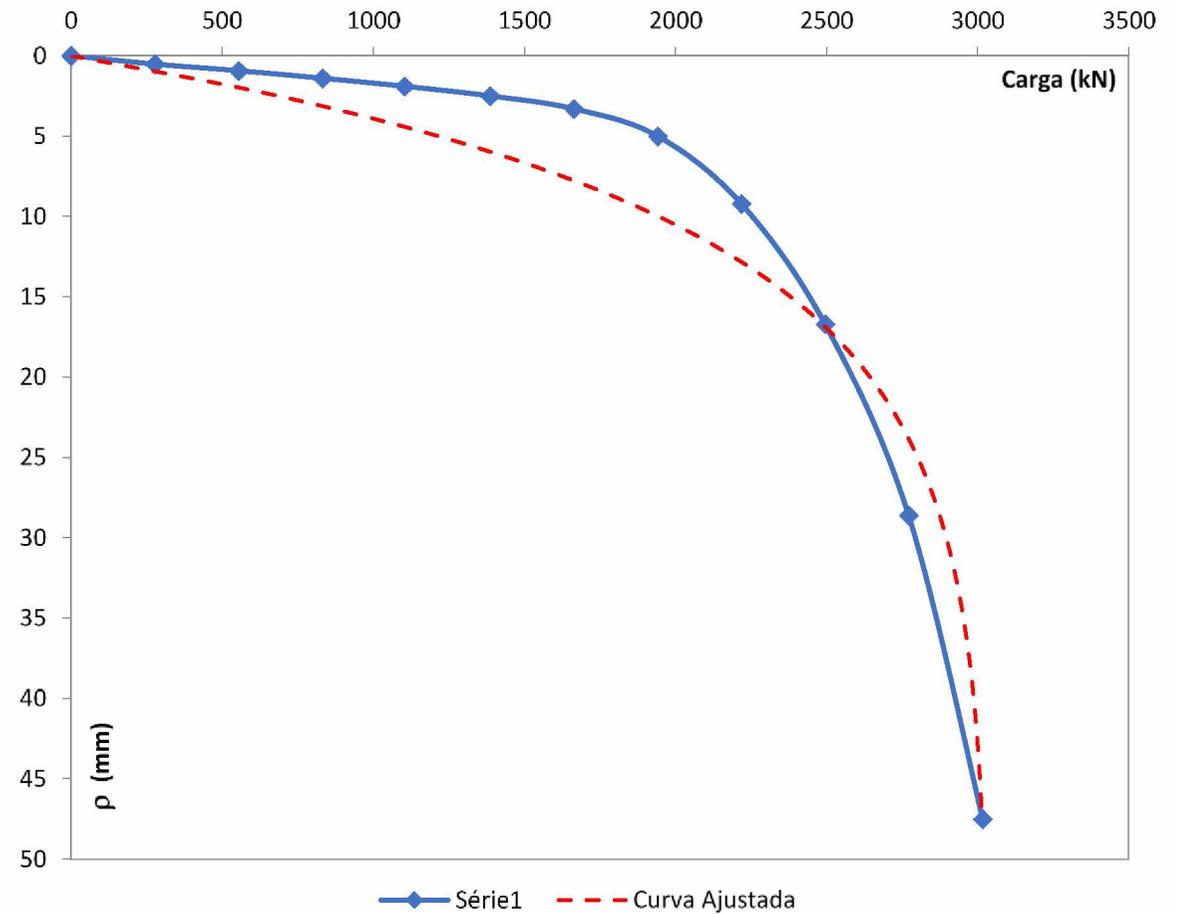
Curva Ajustada



Reta Ajustada

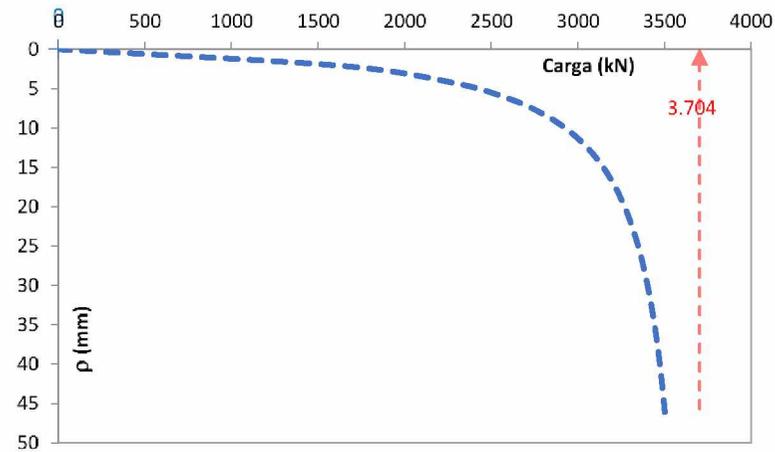


Comparação

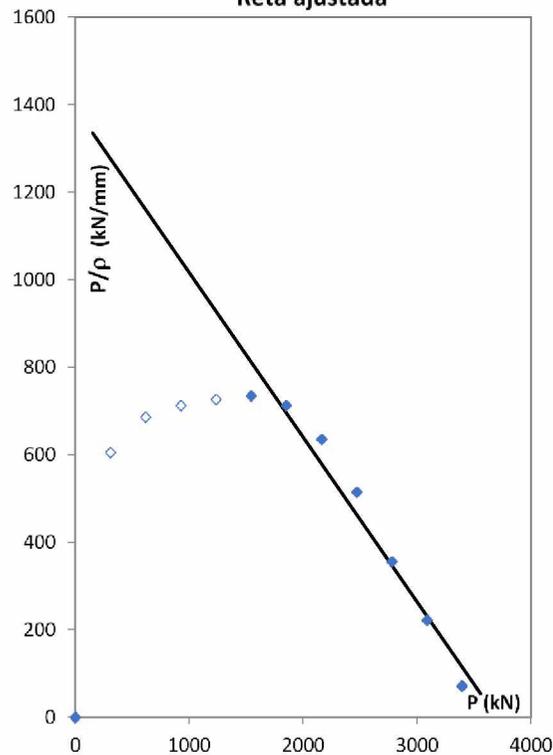


Décourt (1996) para $(s/d)=4,5$ e $L=15$ m

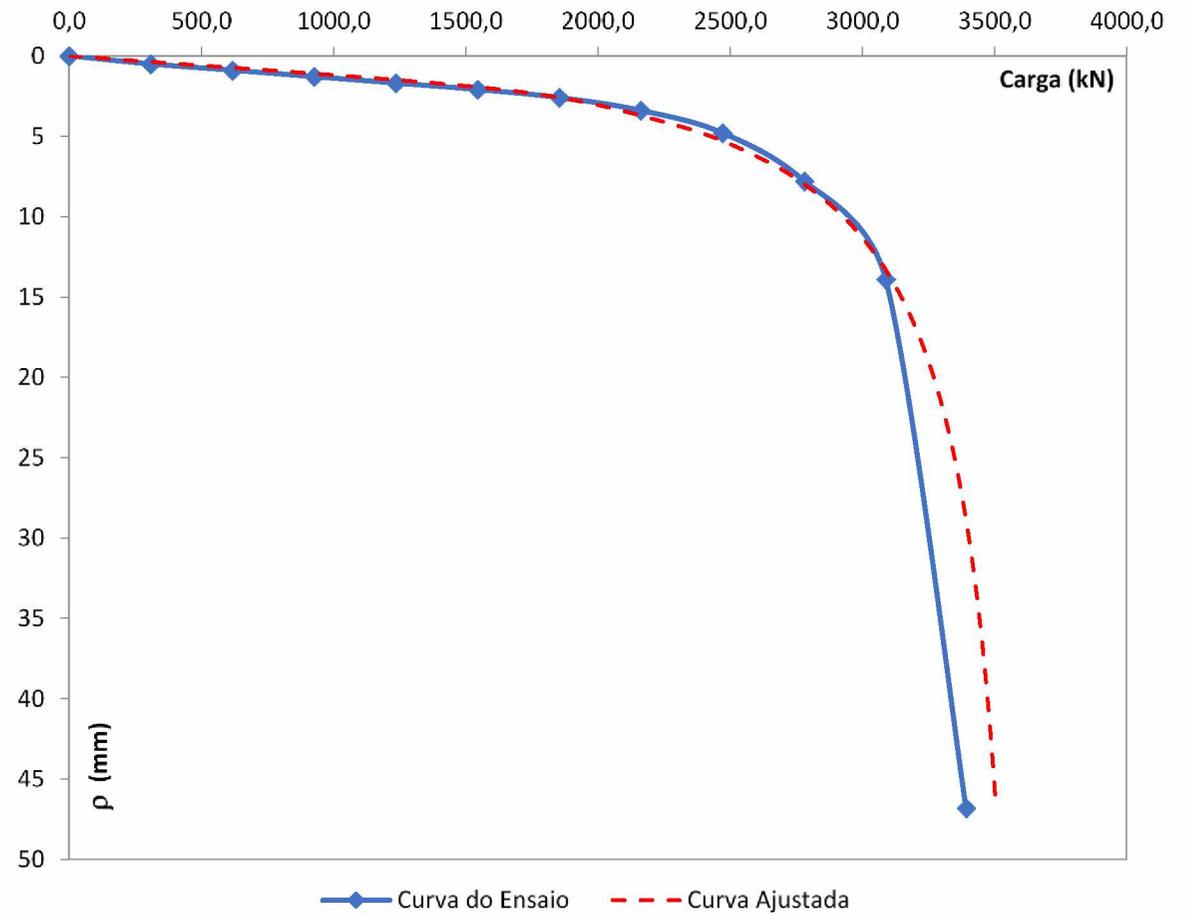
Curva Ajustada



Reta ajustada

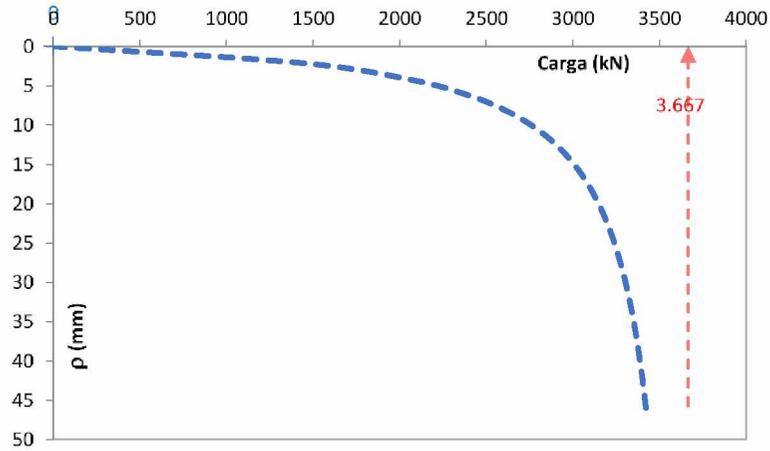


Comparação

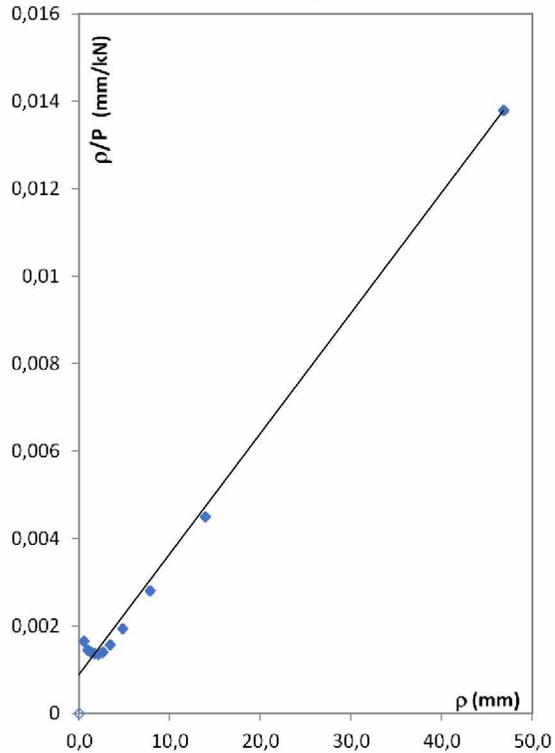


Chin (1978) para (s/d)=4,5 e L=15 m

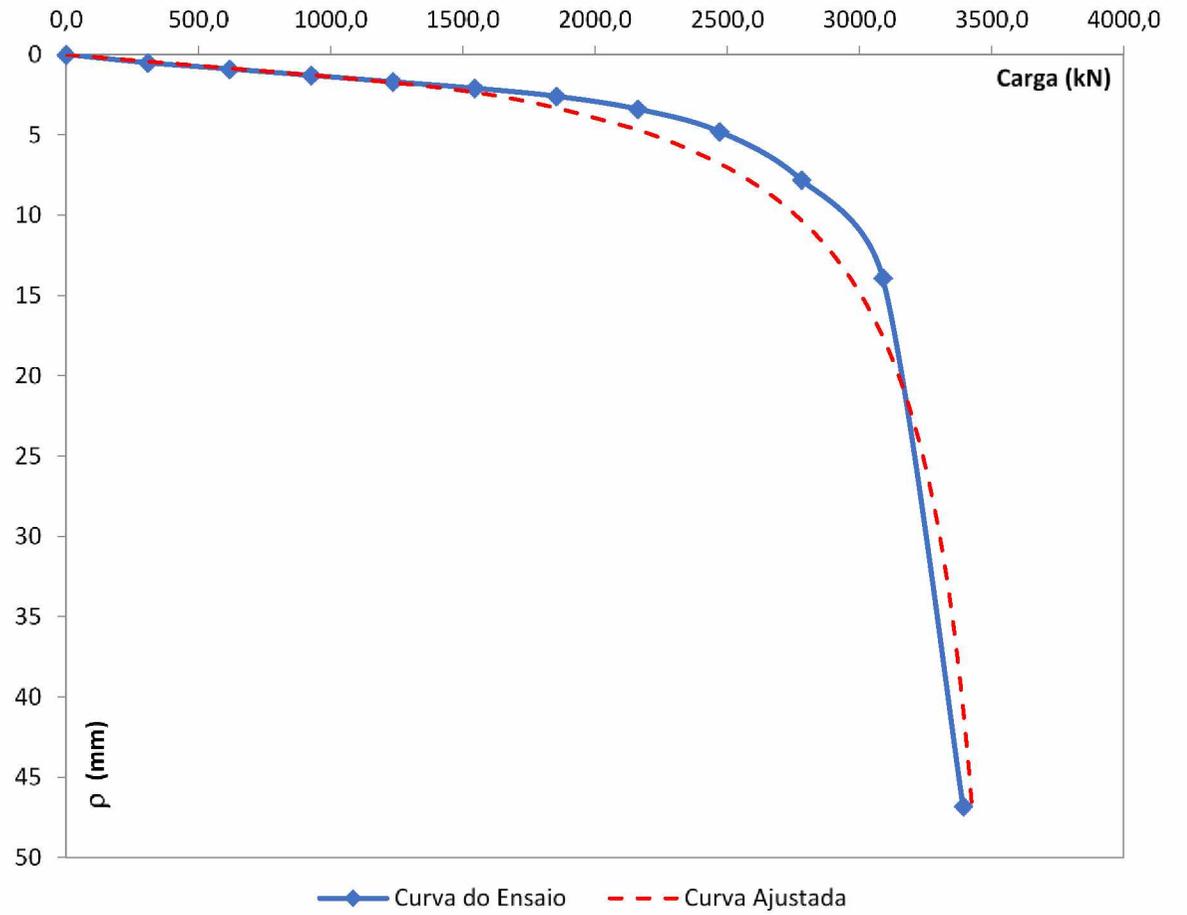
Curva Ajustada



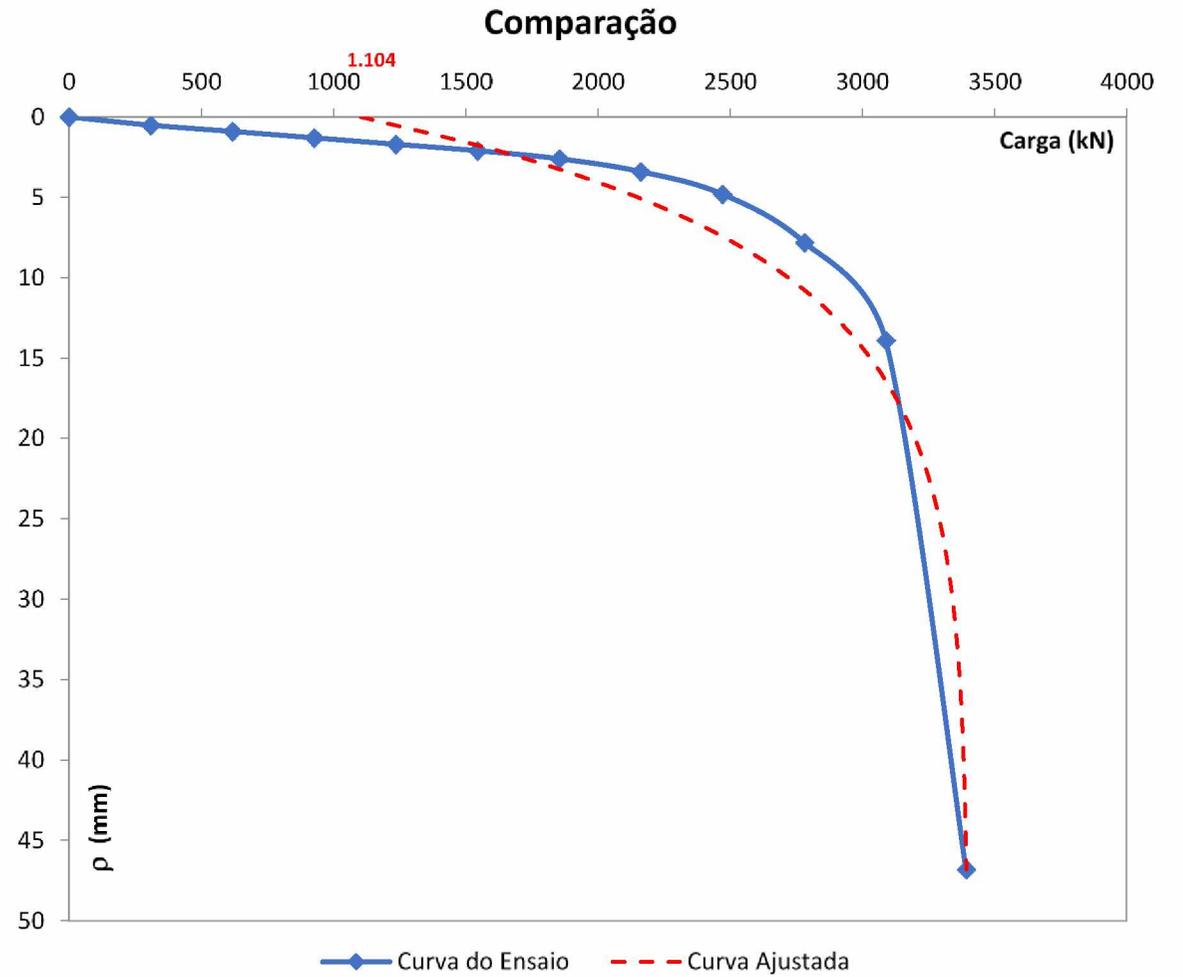
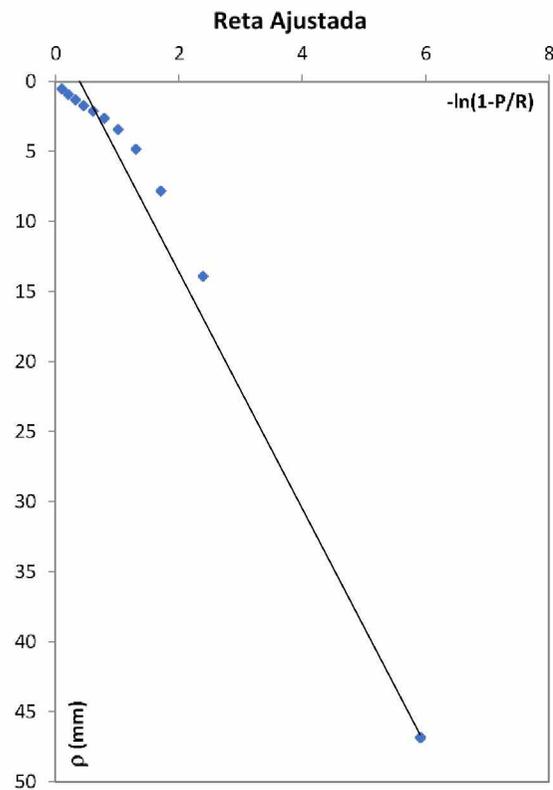
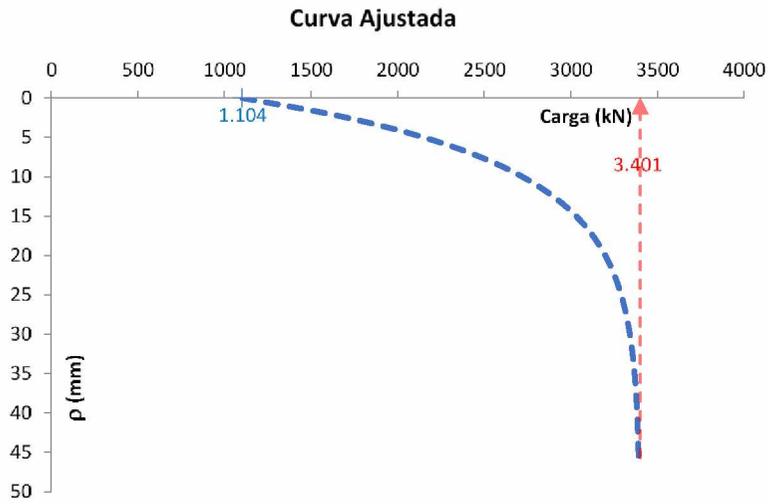
Reta ajustada



Comparação

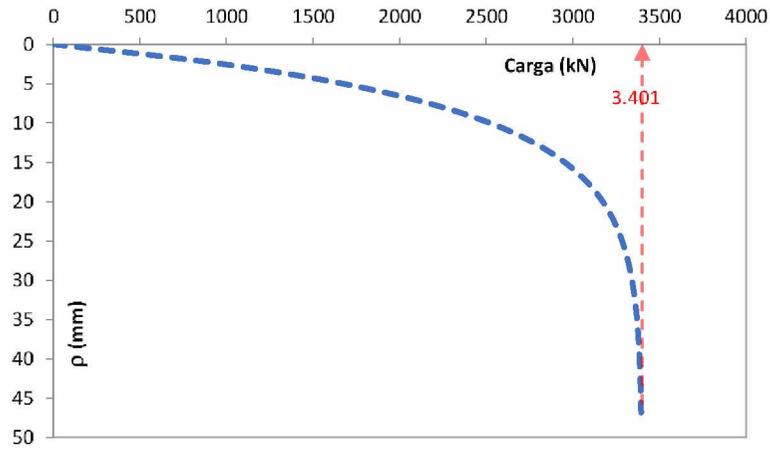


Aoki (1976) para (s/d)=4,5 e L=15 m

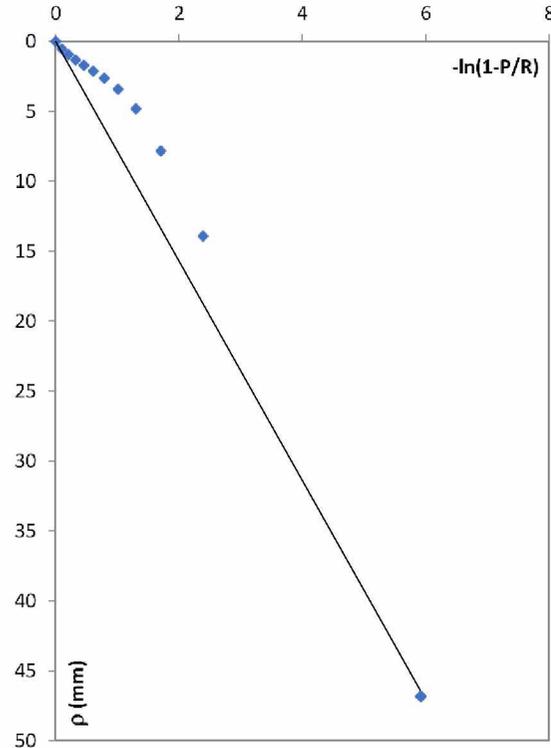


Van der Veen (1953) para $(s/d)=4,5$ e $L=15$ m

Curva Ajustada



Reta Ajustada



Comparação

