

5

Apresentação e análise de resultados dos ensaios de deslocamento lateral cíclico

Nos capítulos prévios foi apresentada uma descrição qualitativa dos mecanismos envolvidos no fenômeno de interação solo-duto. Trata-se agora, de expressar, através dos valores obtidos, os comentários e avaliações realizados.

Os resultados dos seis ensaios de deslocamento lateral cíclico são mostrados na Tabela 5.1. Apresentam-se valores de enterramento inicial do duto em termos de protótipo (w_p), força vertical máxima ($V_{m\acute{a}x.}$), força vertical máxima relativa à força vertical na movimentação do duto ($V_{m\acute{a}x.} / V_o$), força resistente de *breakout* ($H_{m\acute{a}x.}$), força vertical correspondente a mobilização do *breakout* (V_1), e a força vertical na mobilização do *breakout* relativa a força vertical máxima decorrente do enterramento do duto ($V_1 / V_{m\acute{a}x.}$).

Tabela 5.1 Resultados dos ensaios de deslocamento lateral cíclico.

Ensaio	w_p (cm)	$V_{m\acute{a}x.}$ (kN/m)	V_o (kN/m)	$V_{m\acute{a}x.} / V_o$ (R)	$H_{m\acute{a}x.}$ (kN/m)	V_1 (para $H_{m\acute{a}x.}$) (kN/m)	$V_1 / V_{m\acute{a}x.}$
7	7,425	25,07	4,11	6,10	2,40	2,97	0,12
8	7,425	28,82	3,49	8,25	2,27	2,33	0,08
9	14,85	36,84	5,81	6,34	2,98	2,54	0,07
10	14,85	42,41	24,75	1,71	4,59	11,23	0,26
11	22,275	51,84	18,13	2,86	5,00	6,72	0,13
12	22,275	39,46	22,74	1,74	5,92	16,55	0,42

5.1. Introdução

Uma configuração típica do registro de forças de um ensaio de deslocamento lateral cíclico é apresentada na Figura 5.1. O 1º ciclo corresponde ao único ciclo onde o duto se movimenta contra o solo intacto, possibilitando o desenvolvimento de forças progressivamente superiores durante todo o percurso. À medida que os

ciclos se repetem, o canal de movimentação do duto e respectivas bermas vão ganhando contornos mais definidos até que, nos últimos ciclos, o canal se encontra completamente formado com a definição clara de bermas em cada extremidade.

A curva apresenta seis eventos característicos que comportam a sequência do ensaio descritos a seguir:

1. Início do movimento lateral e primeiros registros de força lateral com ocorrência de *breakout*;
2. Incremento da força lateral devido ao acúmulo de solo em frente do duto;
3. Máxima força lateral atingida devido à interação do duto pela formação da primeira berma;
4. Diminuição da força lateral máxima devido a inversão do sentido do deslocamento e a perda de contato entre a berma e o duto;
5. Aumento da força lateral devido à formação da berma no sentido oposto;
6. Força de interação lateral entre a berma e o duto. Esta força é menor que a berma inicial. Isto é devido à ocorrência de menor arrasto de material neste sentido pela abertura de canal anterior formada pelo duto no primeiro movimento.

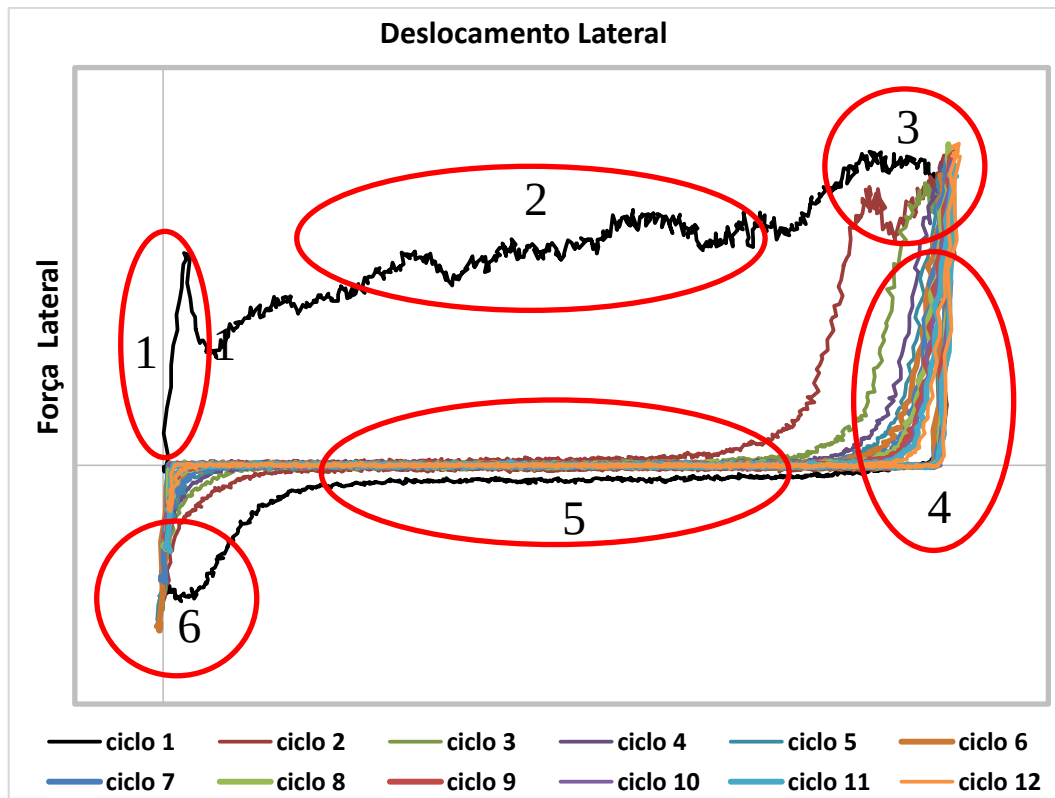


Figura 5.1 - Identificação de eventos típicos em um ensaio de deslocamento lateral cíclico do ensaio 1.

A seguir são apresentados e analisados os resultados de 6 ensaios de arraste lateral cíclico, com velocidades de penetração e arraste de 0,5 mm/s, e profundidades de enterramento de 25, 50 e 75%. Apresentam-se tanto as forças verticais como as horizontais em relação aos deslocamentos laterais de dois ensaios consecutivos correspondentes à mesma profundidade de enterramento em que foram atingidos diferentes índices de sobre carregamento relativo as forças verticais máximas decorrentes do enterramento do duto. Comparou-se os resultados dos mesmos.

5.2.**Resultados dos ensaios de deslocamento lateral com $w/D= 25\%$**

Apresentam-se os resultados em termos de protótipo da força horizontal vs deslocamento lateral dos ensaios de arraste lateral para relação de enterramento de 25% do diâmetro ($w/D=25\%$), ou seja correspondente a um valor de protótipo $w_p = 7,5$ cm com velocidade de penetração e arraste de 0,5 mm/s na Figura 5.2 e Figura 5.4. Em seguida, apresentam-se os resultados em termos de protótipo da força vertical vs deslocamento lateral correspondentes aos mesmos ensaios na Figura 5.3 e Figura 5.5.

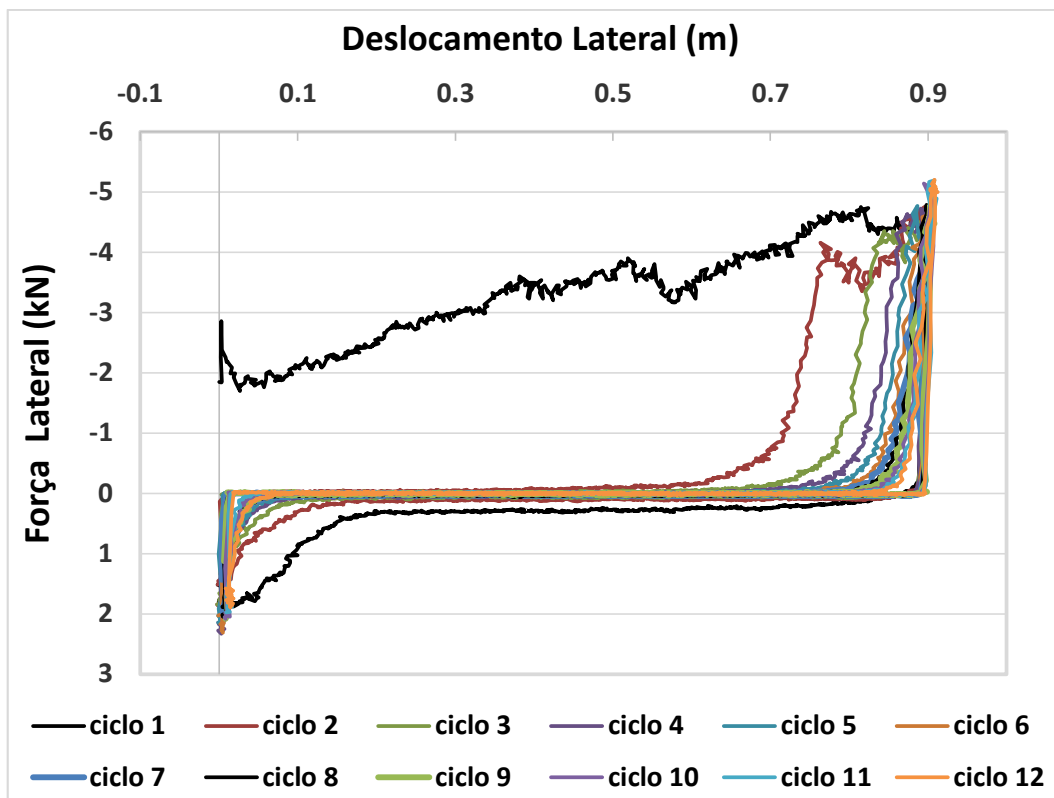


Figura 5.2 - Força Lateral vs Deslocamento lateral para enterramento de 25% do diâmetro – Ensaio 7.

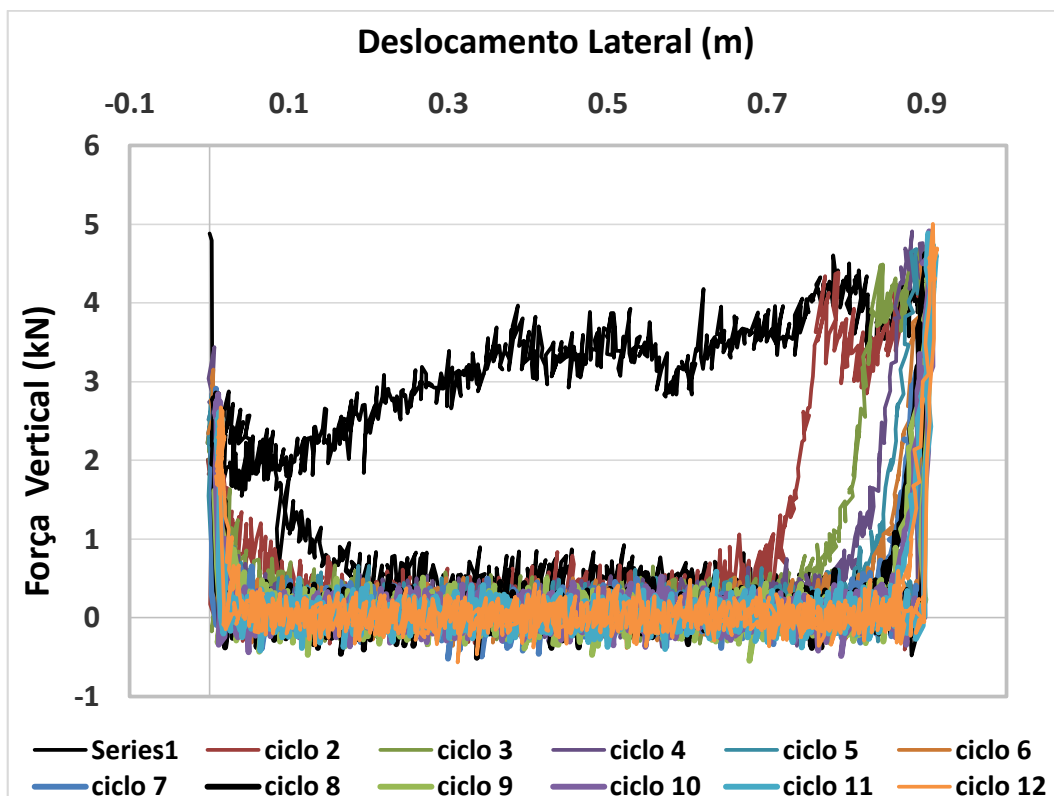


Figura 5.3 Força vertical vs Deslocamento lateral para enterramento de 25% do diâmetro – Ensaio 7.

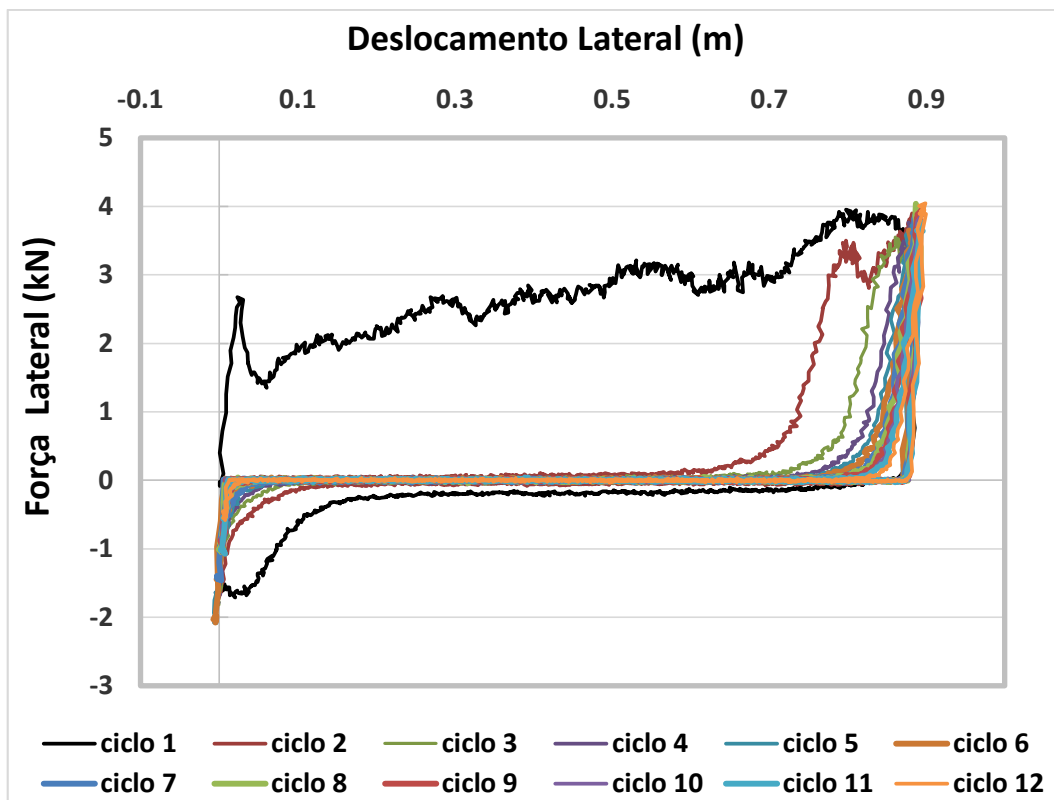


Figura 5.4 Força lateral vs Deslocamento lateral para enterramento de 25% do diâmetro – Ensaio 8.

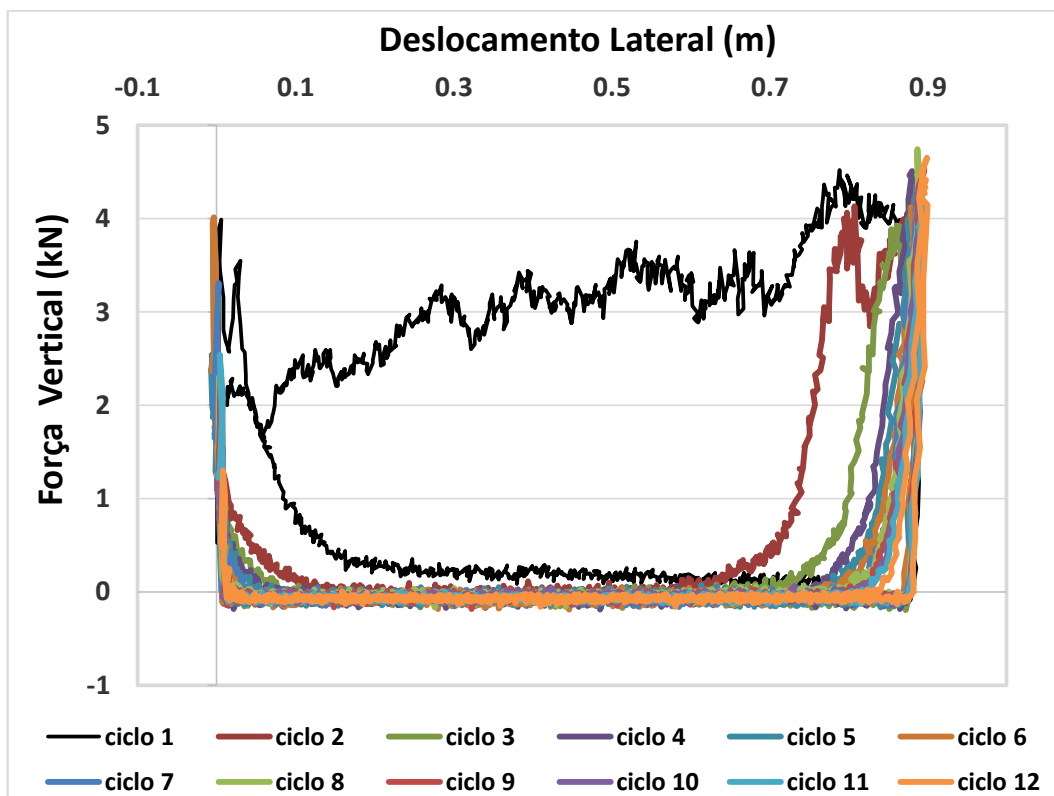


Figura 5.5 Força vertical vs Deslocamento lateral para enterramento de 25% do diâmetro – Ensaio 8.

5.2.1.

Análise de resultados dos ensaios de deslocamento lateral com $w/D=25\%$

Observou-se que os valores de força pico da mobilização da resistência lateral (*breakout*) dos ensaios 7 e 8 (Figura 5.8) foram atingidos para valores de deslocamento de 0,01D e 0,08D respectivamente. Valores experimentais e analíticos reportados na literatura (Audibert e Nyman, 1977; Trautman e O'Rourke, 1983; Hurley e Phillips, 1999; ALA, 2001; Zhang *et al.*, 2001) encontram-se no intervalo de 0,01 - 0,03D para areias medianamente compactas a muito compactas.

Os valores de resistência pico, dados no início da movimentação do duto (*breakout*), foram de 2,85 e 2,70 kN (Figura 5.8). Estes valores foram obtidos após a estabilização das tensões geradas na cravação, correspondendo a valores de índice de “sobre penetração” (R) de 6,1 e 8,3 respectivamente (ver Tabela 5.1). Os valores de forças de *breakout* foram menores aos relatados em Guimarães (2014) provavelmente devido ao relaxamento das forças verticais provenientes do processo de cravação prévio à atuação lateral do duto.

Foi observado que a forma em que as curvas das forças horizontais (Figura 5.2 e Figura 5.4) atingem a resistência pico seguida por uma queda abrupta (*breakout*) revela um tipo de ruptura presente em materiais frágeis (Figura 2.5). Este comportamento está diretamente relacionado à compacidade do solo (areia compacta) condizente ao método de preparação da amostra e é característico em solos com densidades elevadas. Já em estudos mais recentes (Guimarães, 2014) a resistência de *breakout* apresenta um incremento gradativo sem nenhuma ou pouca redução das forças horizontais pós – ruptura, típico de materiais com ruptura dúctil.

Os valores de força máxima foram atingidos porventura da formação das bermas nos deslocamentos de ida com valores médios de 4,05 kN e 4,78 kN. Já os valores de força decorrentes da formação das bermas nos deslocamentos de volta foram de 1,92 e 1,97 kN (Figura 5.2 e Figura 5.4 respectivamente).

Pode-se notar na Figura 5.12 e Figura 5.13 a evolução das forças máximas com o decorrer dos ciclos, onde a tendência é o acréscimo das forças conforme a berma é formada. Isto é melhor observado na Figura 5.13 onde se apresentam os valores de força normalizados com o decorrer dos ciclos.

As curvas das forças verticais da Figura 5.3 e Figura 5.5 apresentam uma relação direta com as curvas das forças horizontais da Figura 5.2 e Figura 5.4, como,

também, evidenciado na Figura 5.6 e Figura 5.7. Pode se concluir que os valores de força horizontal e vertical são semelhantes e as curvas apresentam a mesma configuração após a quebra da primeira berma.

A relação entre as forças horizontais e verticais é comumente representada por meio de trajetórias de forças (Figura 5.10), que definem uma possível superfície de fluência condizente com as condições de contorno (Zhang *et al.*, 2001; Sandford, 2012). As superfícies de fluência normalizada em protótipo, em função da força vertical máxima (do processo de cravação), para os ensaios 7 e 8 de deslocamento lateral cíclico com $w/D=25\%$ são apresentadas na Figura 5.11. Observou-se curvas de configuração aproximadamente parabólicas onde as forças horizontais de *breakout* atingiram o pico para valores de 7 e 8% da máxima força vertical, enquanto as correspondentes forças verticais alcançaram um valor de 10 e 9% relativas à força vertical máxima respectivamente. Uma análise conjunta destes valores indica que para o ensaio 7 obteve-se um menor valor de *breakout* por apresentar um menor índice R (índice de sobre carregamento - ver item 2.3.3), embora a correspondente força vertical fosse maior que a do ensaio 8, o que indica a sensibilidade dos ensaios frente a esta variável (R).

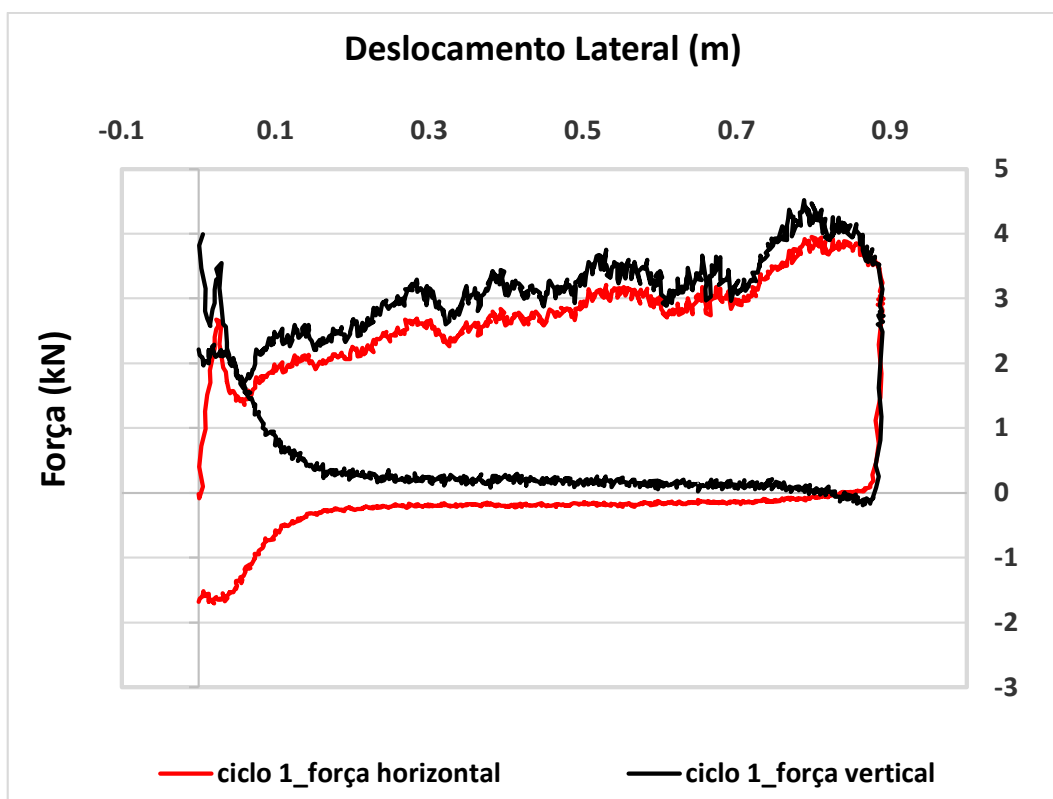


Figura 5.6 - Comparação entre as forças laterais e verticais do primeiro ciclo do ensaio de deslocamento lateral - Ensaio 1.

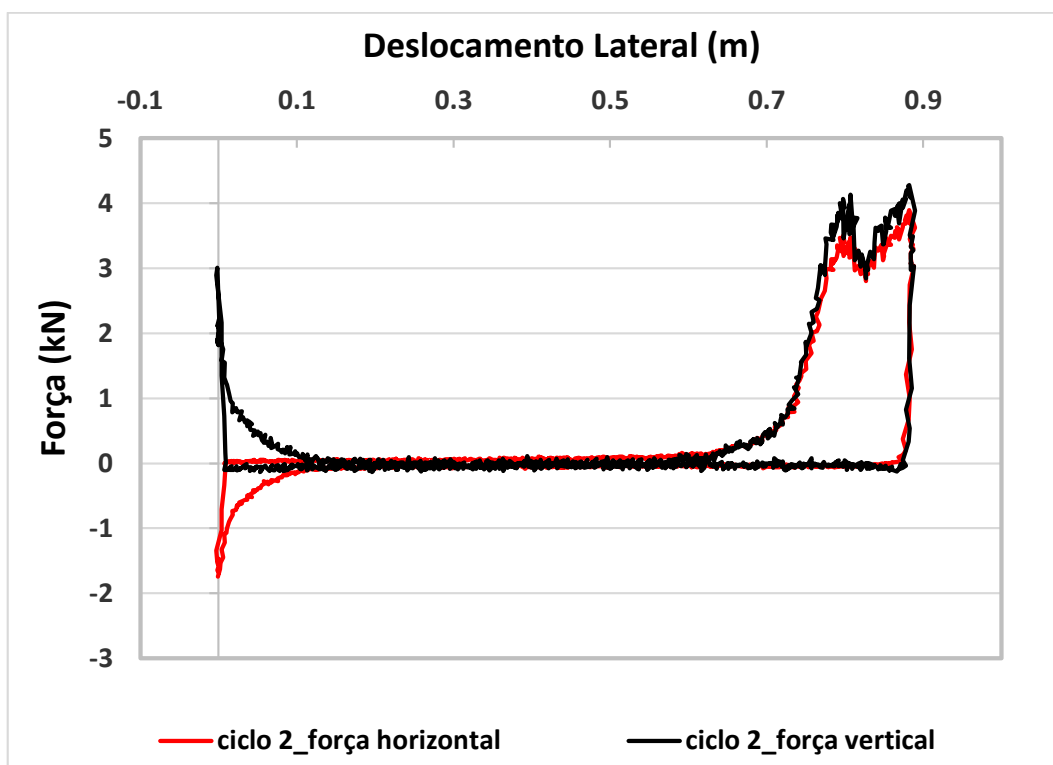


Figura 5.7 - Comparação entre as forças laterais e verticais do segundo ciclo do ensaio de deslocamento lateral - Ensaio 1.

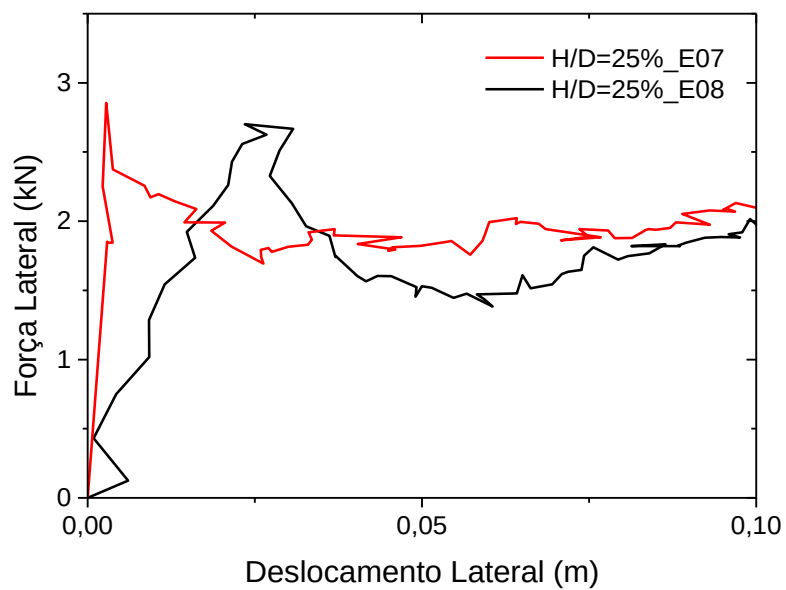


Figura 5.8 - Variação das forças horizontais relativas à mobilização do *breakout* - Ensaios 7 e 8.

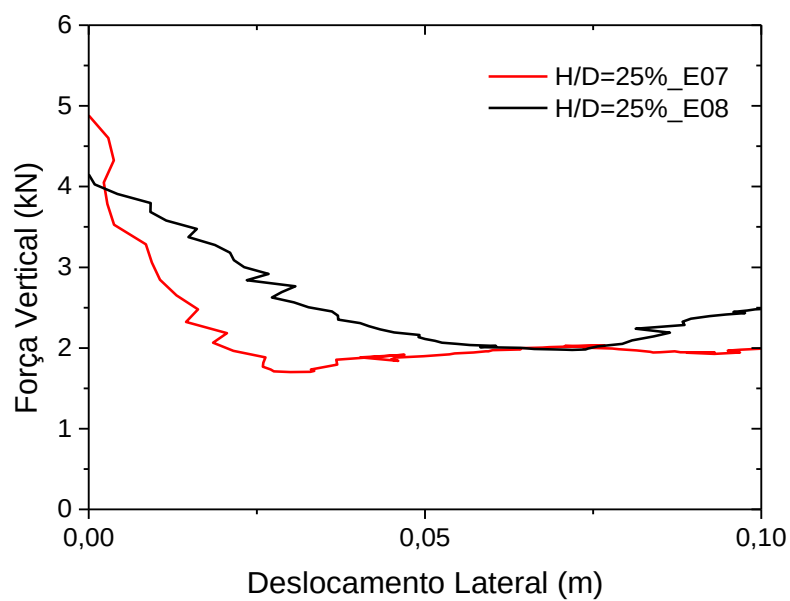


Figura 5.9 - Variação das forças verticais relativas à mobilização do *breakout* – Ensaios 7 e 8.

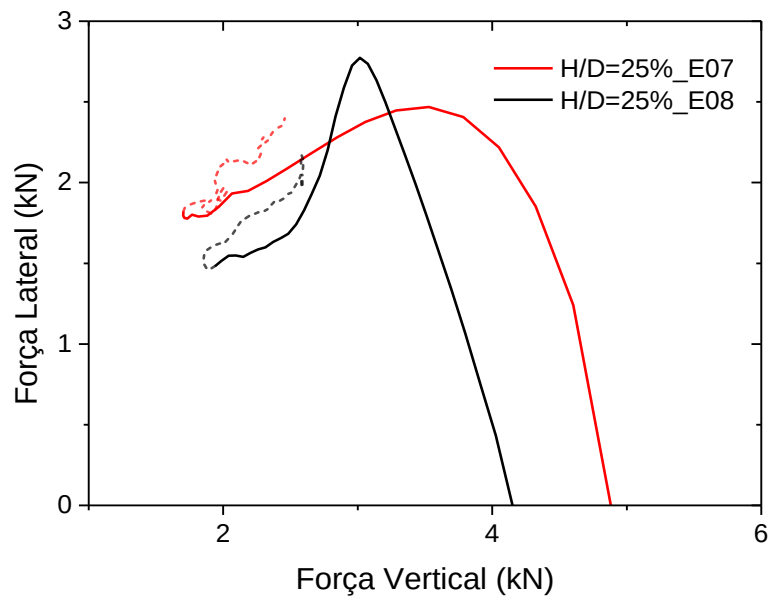


Figura 5.10 – Superfícies de fluência obtidas dos ensaios 7 e 8.

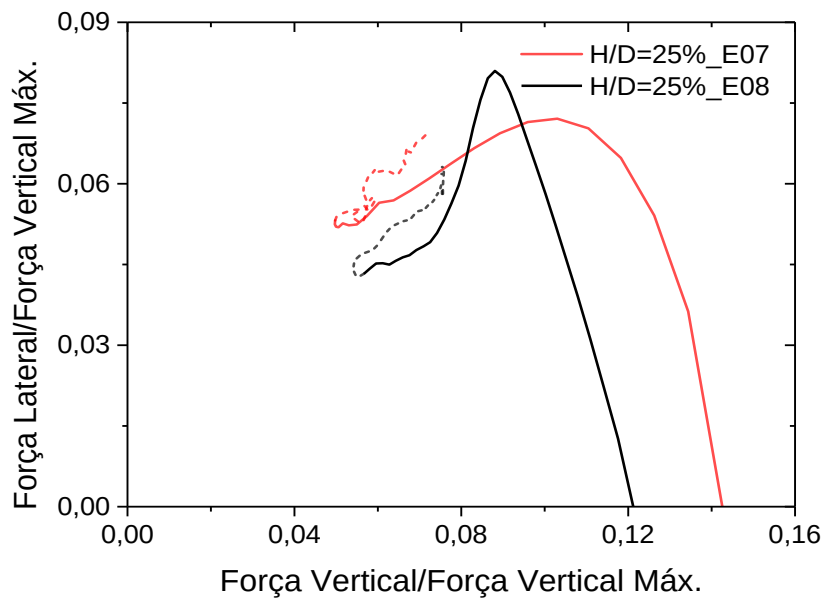


Figura 5.11 - Superfícies de fluência normalizada relativa à força vertical máxima dos ensaios 7 e 8.

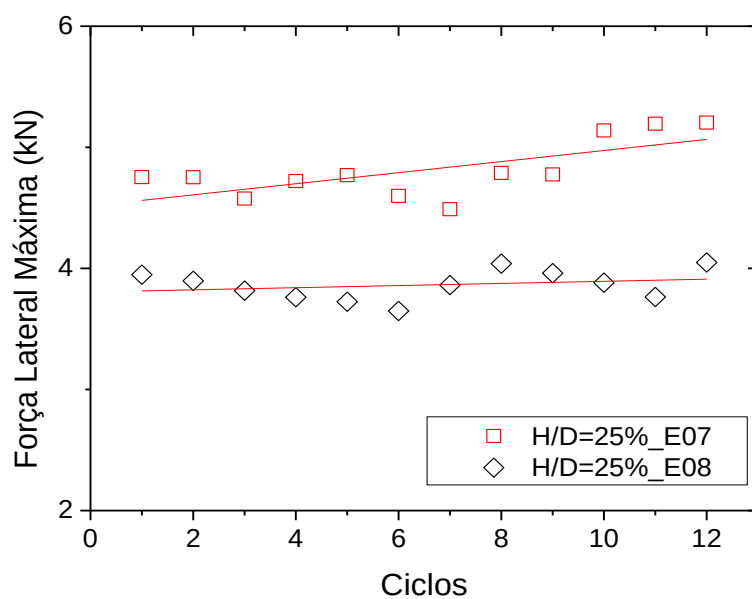


Figura 5.12 - Variação das forças laterais máximas com os ciclos.

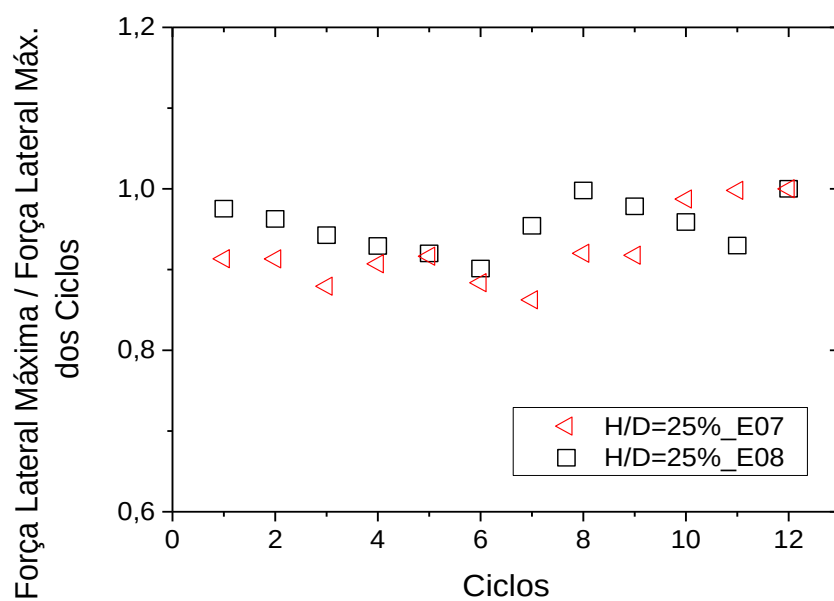


Figura 5.13 - Forças laterais máximas normalizadas vs o número de ciclos.

5.3.**Resultados dos ensaios de deslocamento lateral com $w/D= 50\%$**

Apresentam-se os resultados em protótipo da força horizontal vs deslocamento lateral dos ensaios de arraste lateral para relação de enterramento de 50% do diâmetro ($w/D=50\%$), ou seja, correspondente a um valor de protótipo $w_p = 15$ cm, com velocidade de penetração e arraste de 0,5 mm/s (Figura 5.14 e Figura 5.16). Em seguida, os resultados em protótipo da força vertical vs deslocamento lateral correspondentes aos mesmos ensaios são apresentados Figura 5.15 e Figura 5.17.

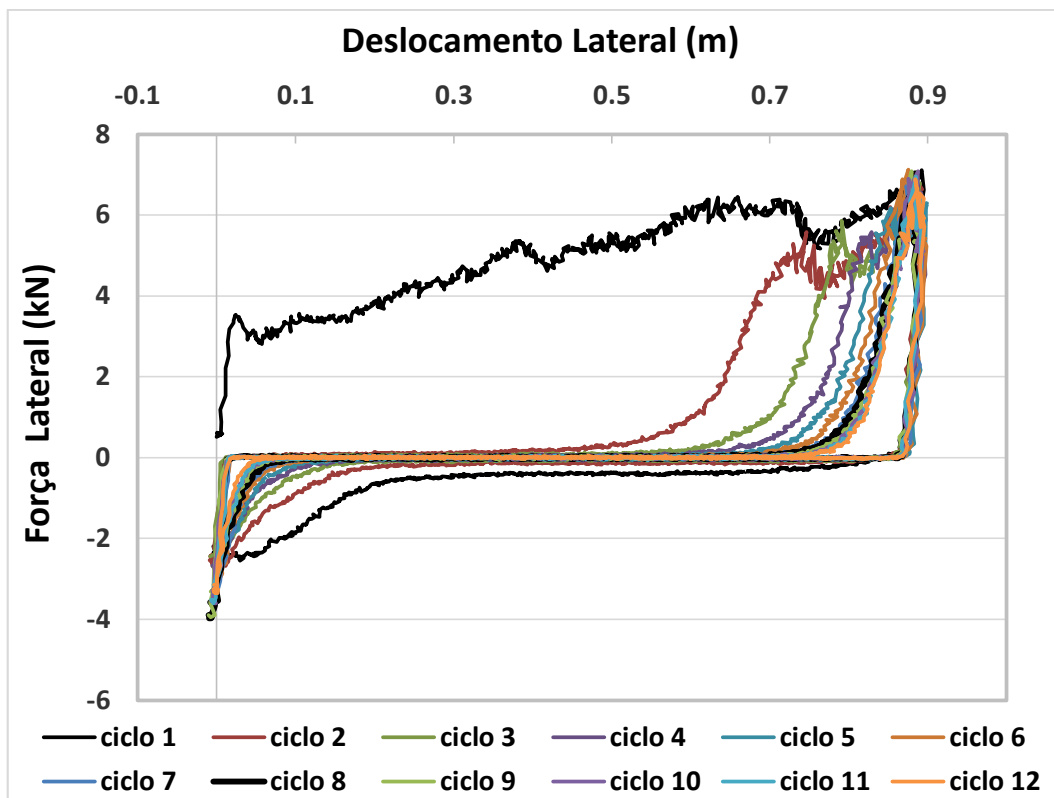


Figura 5.14 - Força lateral vs Deslocamento lateral para enterramento de 50% do diâmetro – Ensaio 9.

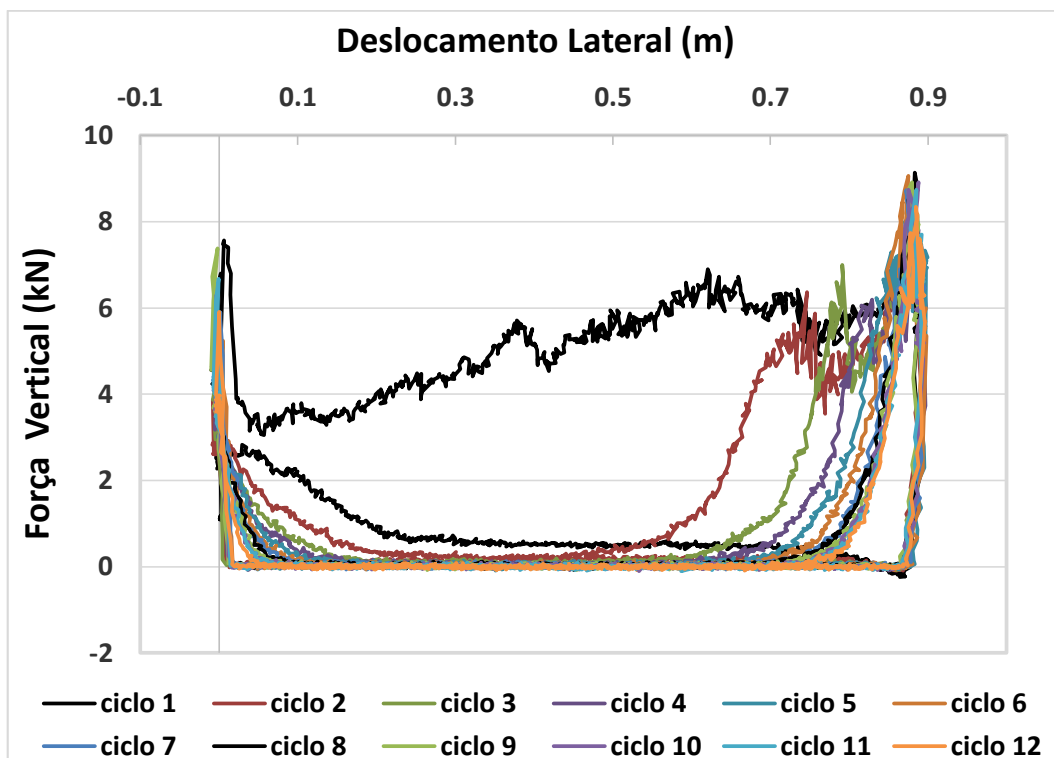


Figura 5.15 - Força vertical vs Deslocamento lateral para enterramento de 50% do diâmetro – Ensaio 9.

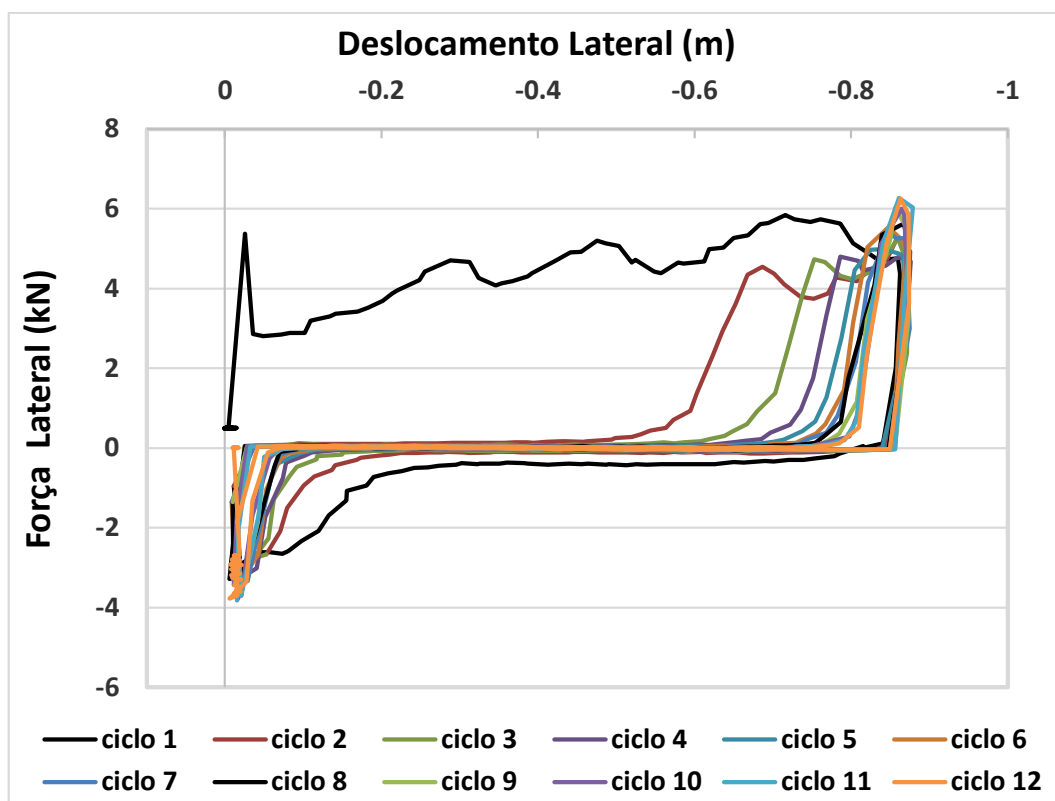


Figura 5.16 - Força lateral vs Deslocamento lateral para enterramento de 50% do diâmetro – Ensaio 10.

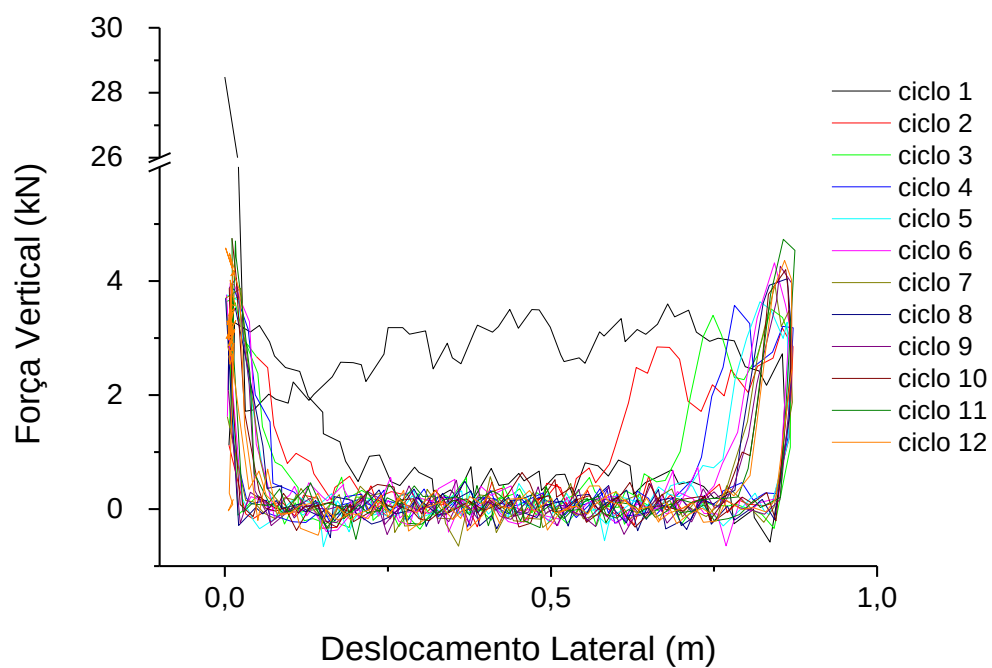


Figura 5.17 - Força vertical vs Deslocamento lateral para enterramento de 50% do diâmetro – Ensaio 10.

5.3.1.

Análise de resultados dos ensaios de deslocamento lateral com $w/D=50\%$

Analizando a Figura 5.18 observou-se que as forças laterais atingiram o *breakout* para distâncias de mobilização similares, com deslocamentos de 22 mm equivalentes a $0,07D$. Os valores de referência da ALA (2001) para areias de sílica, relativos à mesma porcentagem de enterramento para ângulos de atrito entre 20° e 45° são de $0,04D$ (valor aproximadamente 55% menor).

As forças laterais de *breakout* (Figura 5.18) apresentam resultados diferentes com valores pico de 3,54 e 5,44 kN. Esta diferença provavelmente é, devida aos distintos valores do índice de “sobre carregamento” (R). Este índice refere-se à relação entre as forças verticais no instante da movimentação lateral e as forças verticais decorrentes do enterramento do duto; onde valores de $R > 2$ apresentam valores de força *breakout* menores, mesmo com forças máximas verticais semelhantes (Zhang *et al.* 2001).

A Figura 5.19 evidencia a diferença no tempo de relaxamento das forças verticais, no início dos ensaios 9 e 10, com valores de R de 6,3 e 1,7 respectivamente (ver Tabela 5.1). Também pode se verificar uma redução das forças verticais durante o ensaio de arraste lateral que acompanha a queda pós pico das forças de *breakout*.

Uma análise combinada das forças verticais e laterais, para o primeiro ciclo de deslocamento, permitiu determinar a provável superfície de fluência para os ensaios laterais com $w/D=50\%$. A Figura 5.20 apresenta as superfícies de fluência dos ensaios 9 e 10 onde pode-se identificar as trajetórias das forças vertical e horizontal registradas durante o ensaio de deslocamento lateral.

A normalização das forças verticais e laterais dos ensaios 9 e 10 é mostrada na Figura 5.21. Pode se identificar que as forças horizontais pico, relativos à ocorrência do *breakout*, foram atingidos para valores de 6 e 10% da força vertical máxima. Correspondentes valores das forças verticais no *breakout* nos ensaios 9 e 10 foram de 6 e 24% respectivamente.

Pode-se analisar o desenvolvimento das forças máximas durante os ensaios de deslocamento lateral cíclico 9 e 10 na Figura 5.22 e Figura 5.23. Identifica-se a tendência das forças máximas horizontais aumentarem ao longo dos ciclos.

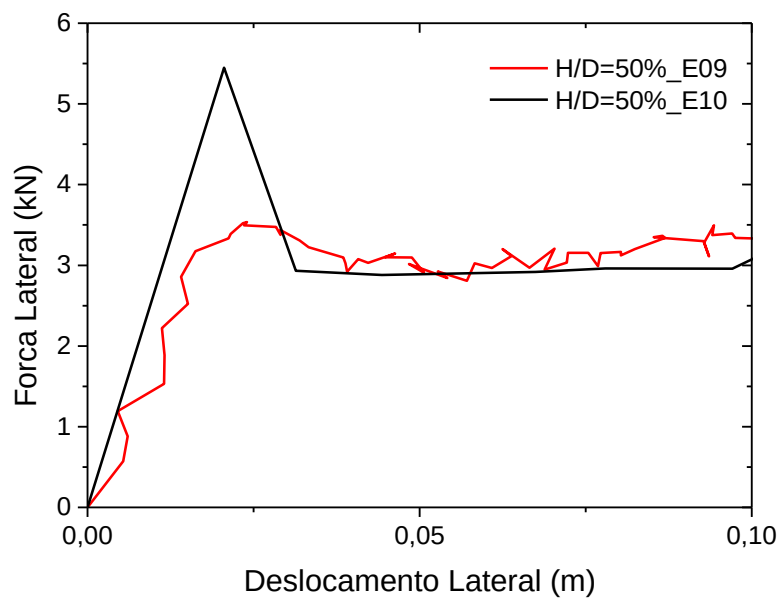


Figura 5.18 - Variação das forças laterais relativas à mobilização do *breakout* - Ensaios Laterais 9 e 10 ($w/D=50\%$).

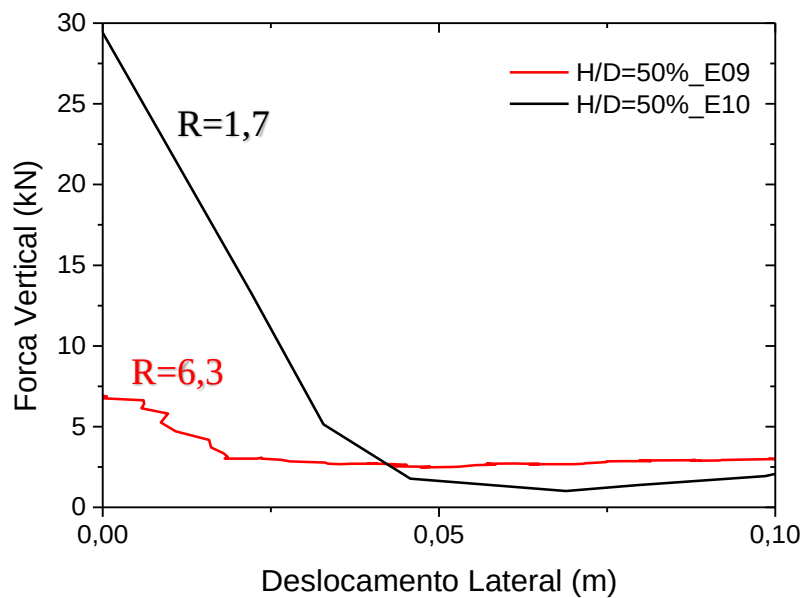


Figura 5.19 - Variação das forças verticais relativas à mobilização do *breakout* – Ensaios Laterais 9 e 10 ($w/D=50\%$).

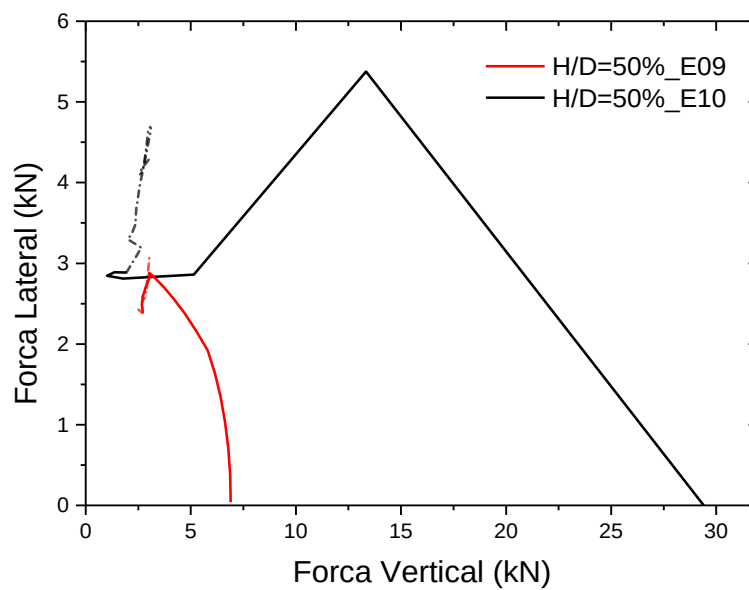


Figura 5.20 - Superfícies de fluência obtidas dos ensaios Laterais 9 e 10 ($w/D=50\%$).

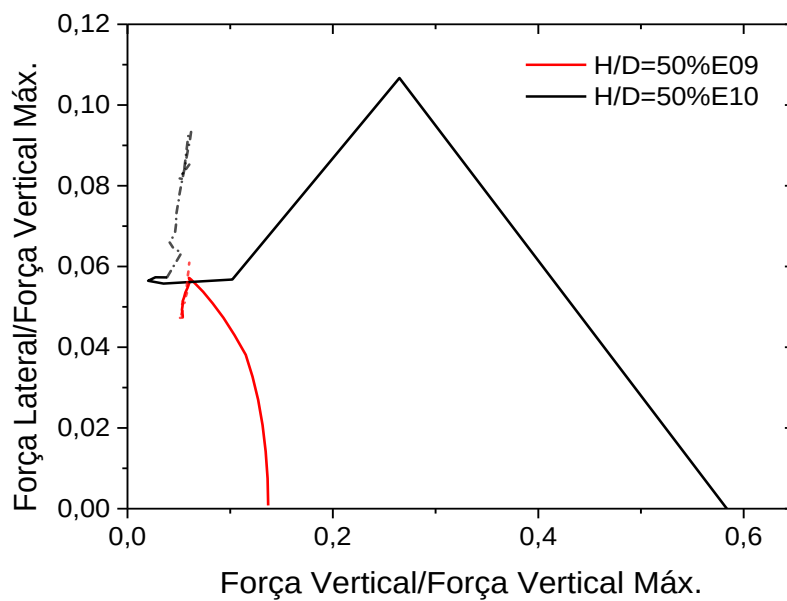


Figura 5.21 - Superfícies de fluência normalizadas relativas às forças verticais máximas dos ensaios Laterais 9 e 10 ($w/D=50\%$).

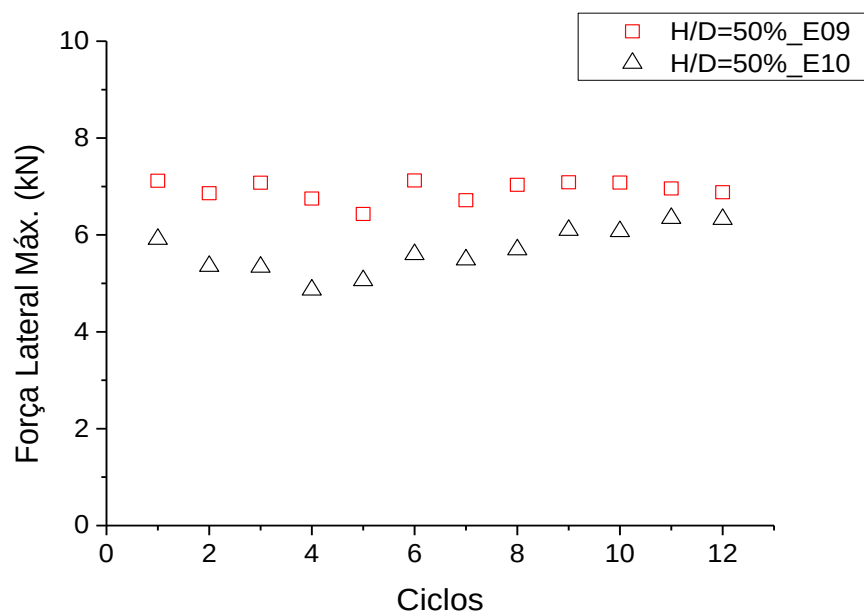


Figura 5.22 - Variação das forças laterais máximas com os ciclos dos ensaios Laterais 9 e 10 ($w/D=50\%$).

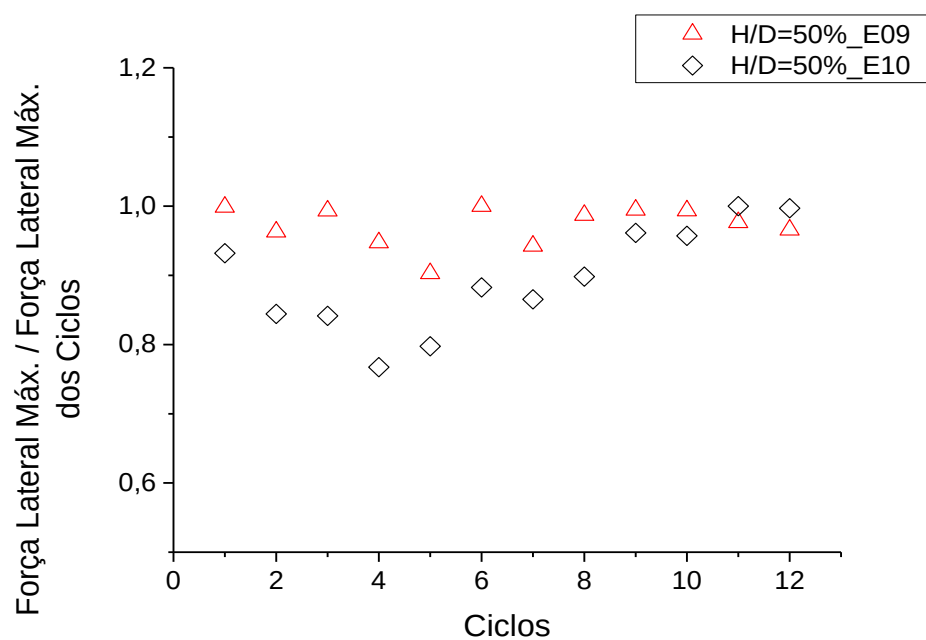


Figura 5.23 - Forças laterais máximas normalizadas vs número de ciclos dos ensaios Laterais 9 e 10 ($w/D=50\%$).

5.4.**Resultados dos ensaios de deslocamento lateral com $w/D=75\%$**

Apresentam-se os resultados em protótipo da força horizontal vs deslocamento lateral dos ensaios de arraste lateral para relação de enterramento de 75% do diâmetro ($w/D=75\%$), ou seja, correspondente a um valor de protótipo $w_p = 22$ cm na Figura 5.24 e Figura 5.26. Em seguida, os resultados em protótipo da força vertical vs deslocamento lateral correspondentes aos mesmos ensaios são apresentados na Figura 5.25 e Figura 5.27.

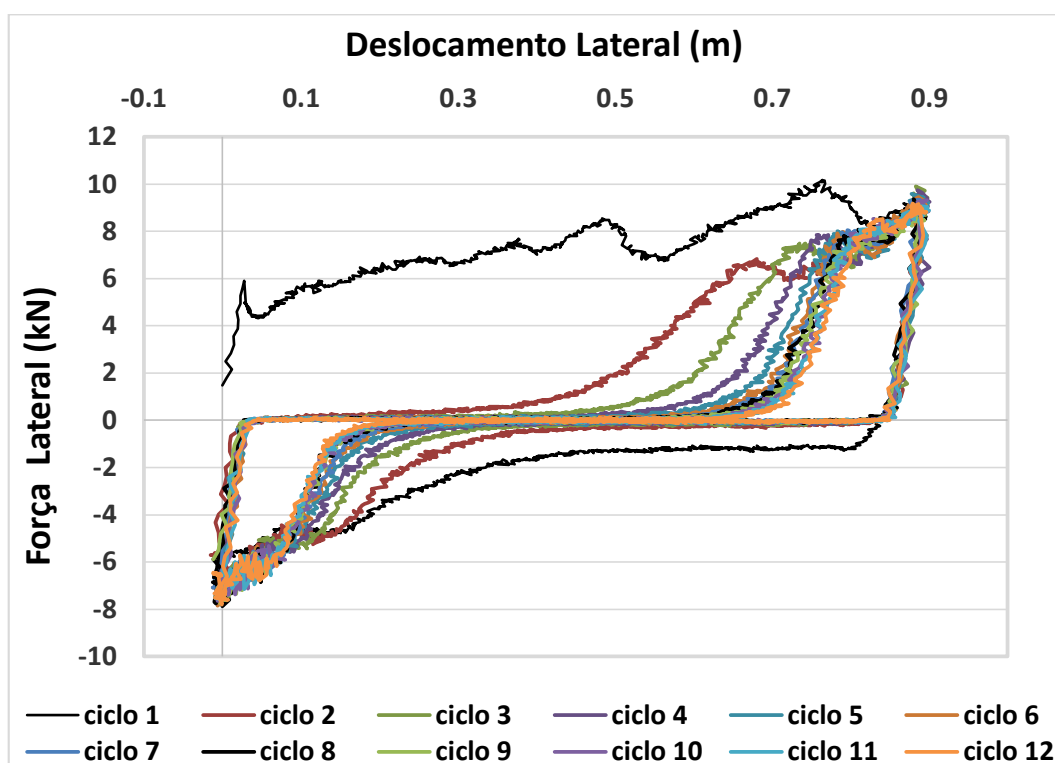


Figura 5.24 - Força lateral vs Deslocamento lateral para enterramento de 75% do diâmetro – Ensaio 11.

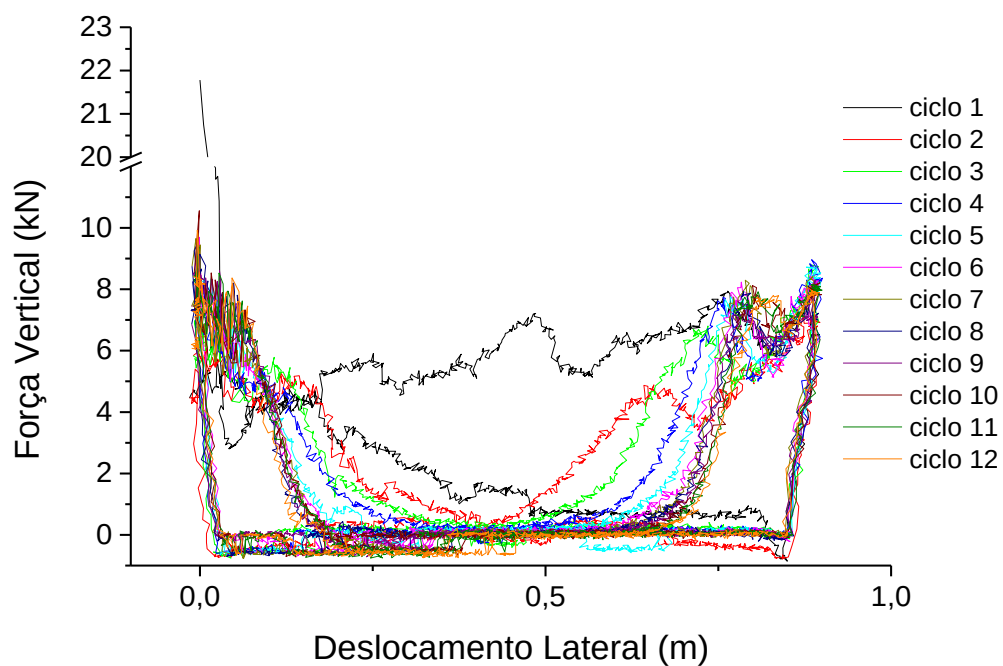


Figura 5.25 - Força vertical vs Deslocamento lateral para enterramento de 75% do diâmetro – Ensaio 11.

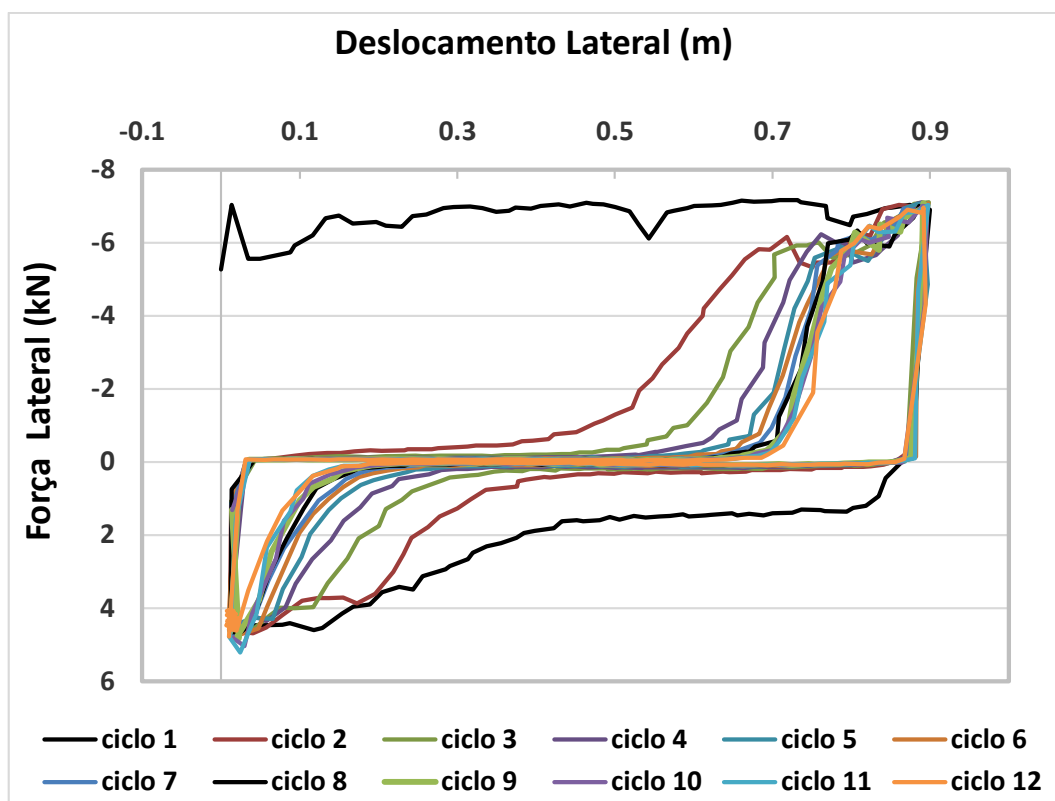


Figura 5.26 - Força lateral vs Deslocamento lateral para enterramento de 75% do diâmetro – Ensaio 12.

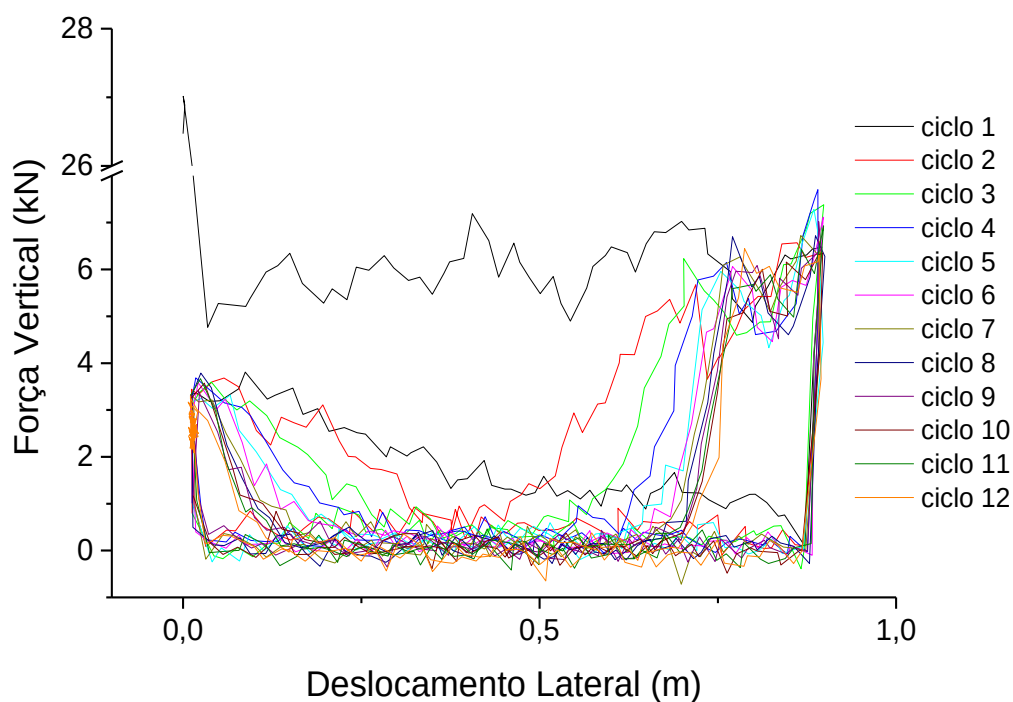


Figura 5.27 - Força vertical vs Deslocamento lateral para enterramento de 75% do diâmetro – Ensaio 12.

5.4.1.

Análise dos resultados dos ensaios de deslocamento laterais com $w/D=75\%$

Os registros das forças laterais e verticais relativos à ocorrência do *breakout* dos ensaios 11 e 12 são apresentados na Figura 5.28 e Figura 5.29, onde nota-se que as forças resistentes de *breakout* apresentam valores pico de 5,94 e 7,03 kN com distâncias de mobilização de 27 mm (0,09D) e 14 mm (0,06D) respectivamente. Estes valores são superiores aos estimados pela ALA (2001) na distância de mobilização (0,05D). Esta variação dos valores tanto da mobilização da resistência pico como da distância de ocorrência de *breakout* podem ser devido à diferença dos valores de R nos ensaios 11 e 12 (ver Tabela 5.1).

Foi observado que os valores de força vertical residual foram atingidos para os mesmos deslocamentos em que as forças laterais alcançaram o ponto de inflexão mínimo após o *breakout* (Figura 5.28 e Figura 5.29).

As prováveis superfícies de fluência obtidas dos ensaios com $w/D=75\%$ são apresentadas na Figura 5.38 e Figura 5.39. As mobilizações das resistências laterais máximas atingiram o pico para valores de 10 e 11% da força vertical máxima, tendo as correspondentes forças verticais atingidos valores de 13 e 21% da força máxima vertical respectivamente.

A variação das forças máximas dos ensaios com o decorrer dos ciclos é apresentada na Figura 5.32 e Figura 5.33. Verifica-se uma diminuição das forças laterais máximas ao longo dos ciclos. Provavelmente esta diminuição seja devida a uma degradação das bermas.

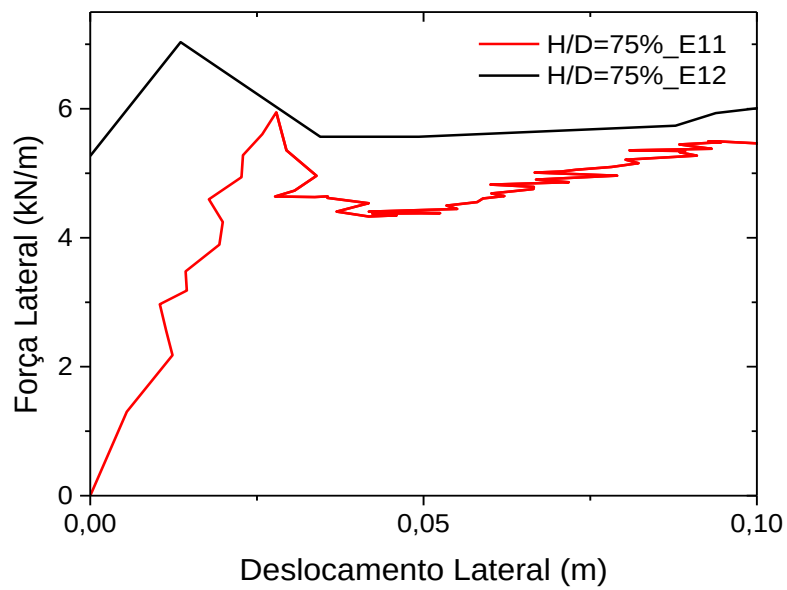


Figura 5.28 - Variação das forças laterais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios laterais 11 e 12 ($w/D=75\%$).

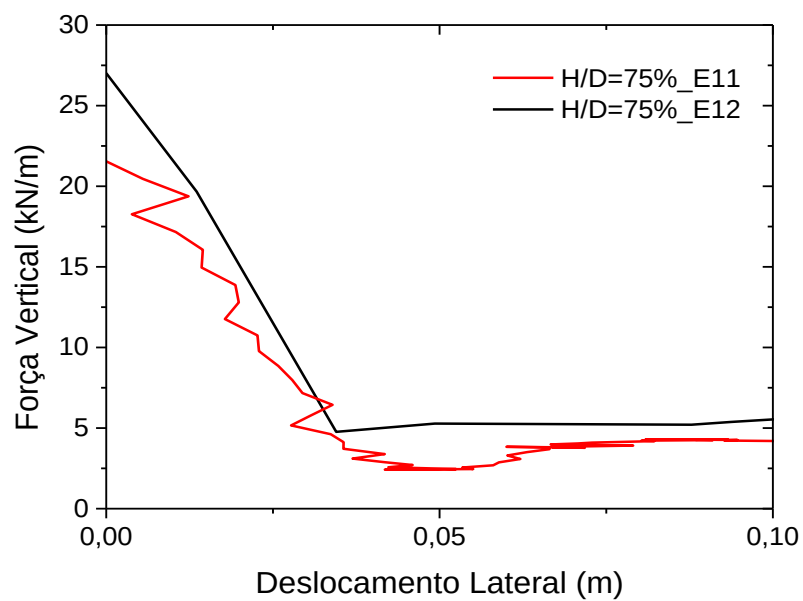


Figura 5.29 - Variação das forças verticais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios laterais 11 e 12 ($w/D=75\%$).

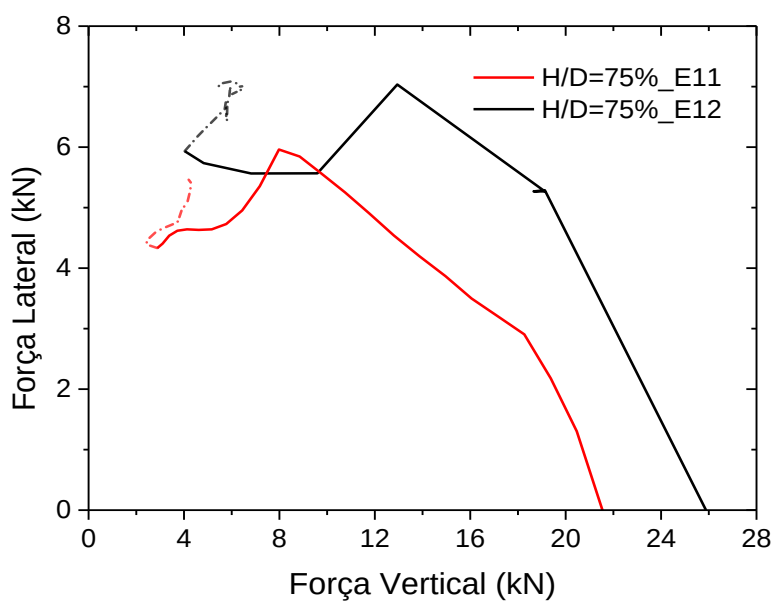


Figura 5.30 - Superfície de fluência obtidas dos ensaios laterais 11 e 12 (w/D=75%).

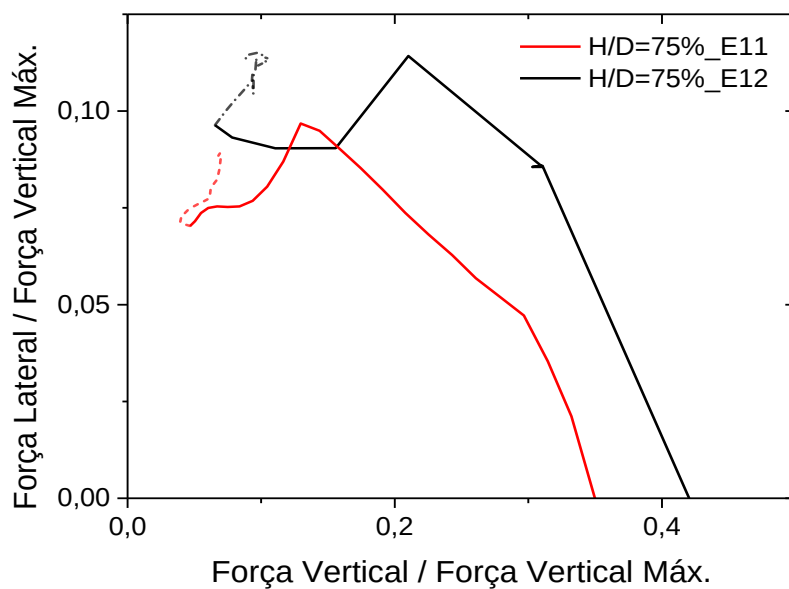


Figura 5.31 - Superfícies de fluência normalizada relativas à força vertical máxima dos ensaios laterais 11 e 12 (w/D=75%).

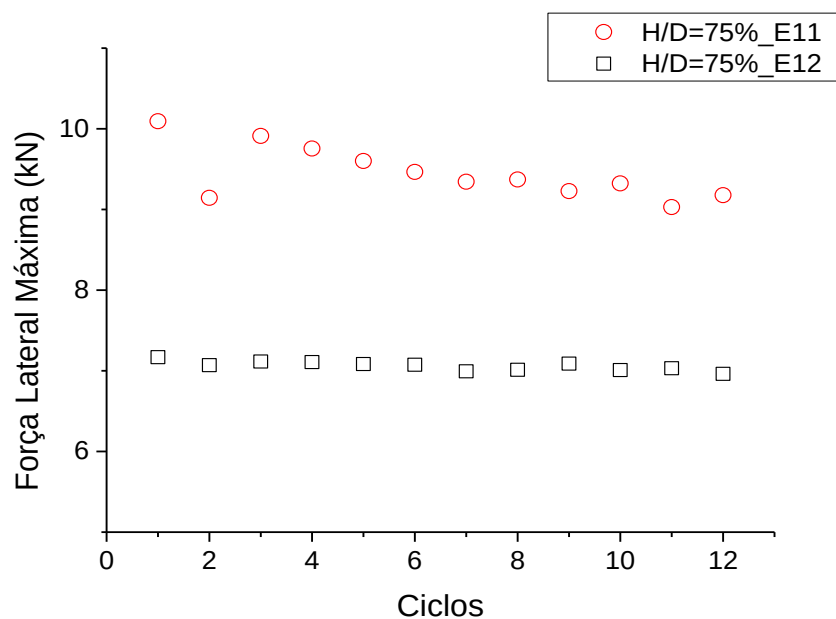


Figura 5.32 - Variação das forças laterais máximas com os ciclos dos ensaios laterais 11 e 12 ($w/D=75\%$).

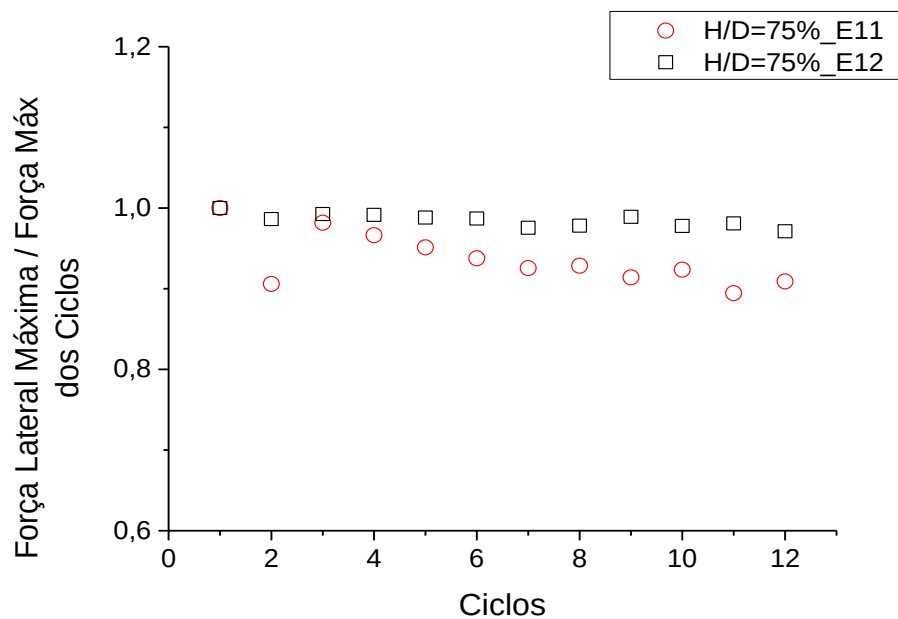


Figura 5.33 - Forças laterais máximas normalizadas vs número de ciclos dos ensaios laterais 11 e 12 ($w/D=75\%$).

5.5.

Análise geral dos resultados dos ensaios de deslocamento lateral com $w/D=25$, 50 e 75%

Para a análise geral dos ensaios laterais utilizou-se os dados dos ensaios com maior taxa de amostragem (10 amostras por segundo) para a elaboração dos gráficos relativos aos deslocamentos e normalizados. Estes dados corresponderam aos ensaios 8, 9 e 11.

A evolução das forças laterais relativas ao *breakout* para o primeiro ciclo dos ensaios 8, 9 e 11 é apresentada na Figura 5.34. Nota-se que a distância de mobilização da resistência lateral pico foi similar para os ensaios com $w/D = 25$, 50 e 75% sendo em torno de $0,085D$. Esta distância de mobilização da máxima resistência lateral é similar à obtida por Zhang *et al.* (2001), como evidenciado na Figura 2.11 (esquerda) e Figura 5.34, sendo aproximadamente 25 mm.

O maior valor de *breakout* foi relativo ao ensaio com $w/D=75\%$, devido ao maior valor de força vertical e menor índice de sobre carregamento ($R=2,86$), decorrentes do processo de cravação (Figura 5.35). Pode verificar-se também que as forças resistentes de *breakout* para os ensaios 8 e 9 foram diferentes apresentado valores de 2,70 e 3,54 kN. Estes valores guardaram correspondência com os respectivos valores de R (8,25 e 6,34). Isto evidenciou que, possivelmente, valores elevados de R conduzem a baixas resistências de *breakout*, com valores residuais próximos ao *breakout*, como evidenciado na Figura 2.10 (esquerda) e Figura 5.34.

Os registros das forças verticais dos ensaios laterais com $w/D= 25$, 50 e 75% relativas à ocorrência do *breakout* são mostrados na Figura 5.35. Pode ser constatado que as forças verticais e laterais atingiram o valor residual simultaneamente à valores ao redor de 2,42 kN. Identificou-se também que a queda das forças verticais aconteceram para um mesmo valor de deslocamento lateral de aproximadamente 50mm. Isto evidencia a estreita relação entre as forças verticais e laterais no decorrer dos ensaios.

Uma comparação das curvas de superfície de fluência obtidas dos ensaios de $w/D= 25$, 50 e 75% (Figura 5.36 e Figura 5.37) evidencia que, para os ensaios de $w/D= 25$ e 50%, as forças laterais de *breakout* e as correspondentes forças verticais relativas atingiram o pico para o mesmo valor de 5% da força vertical máxima. Já no ensaio 10 a força lateral pico e a força vertical relativa foram atingidas para

valores de 10 e 13% da força vertical máxima decorrente da fase de enterramento do duto.

As curvas das superfícies de fluência dos ensaios com $w/D = 25, 50$ e 75% apresentam similaridade às obtidas por Zhang *et al.* (2001) (Figura 5.38). Pode-se observar que as forças verticais da curva de fluência permanecem aproximadamente constantes durante os primeiros instantes do ensaio indicando que a trajetória de forças encontra-se inicialmente numa região elástica, evidenciado pela inclinação das curvas de fluência nos trechos iniciais, até atingir o ponto de fluência.

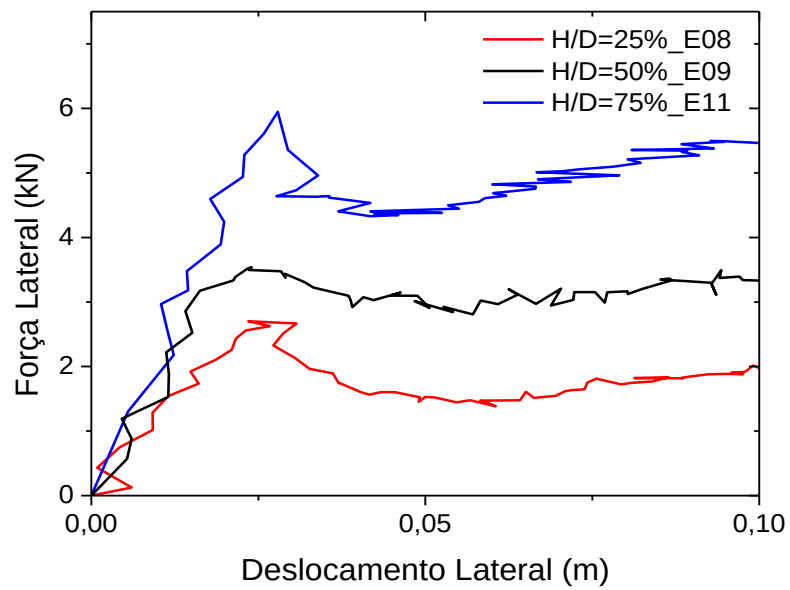


Figura 5.34 – Comparação das forças laterais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios 8, 9 e 11 ($w/D= 25, 50$ e 75% respectivamente).

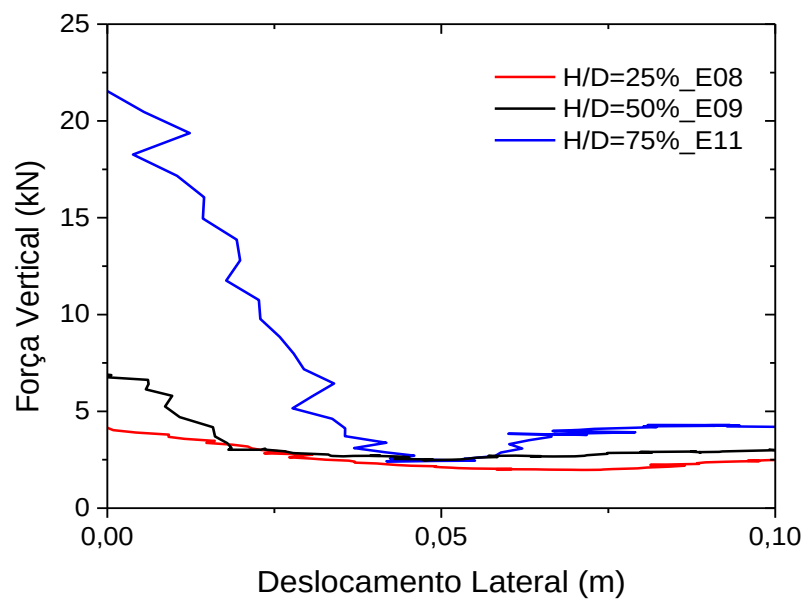


Figura 5.35 – Comparação das forças verticais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios 8, 9 e 11 ($w/D= 25, 50$ e 75% respectivamente).

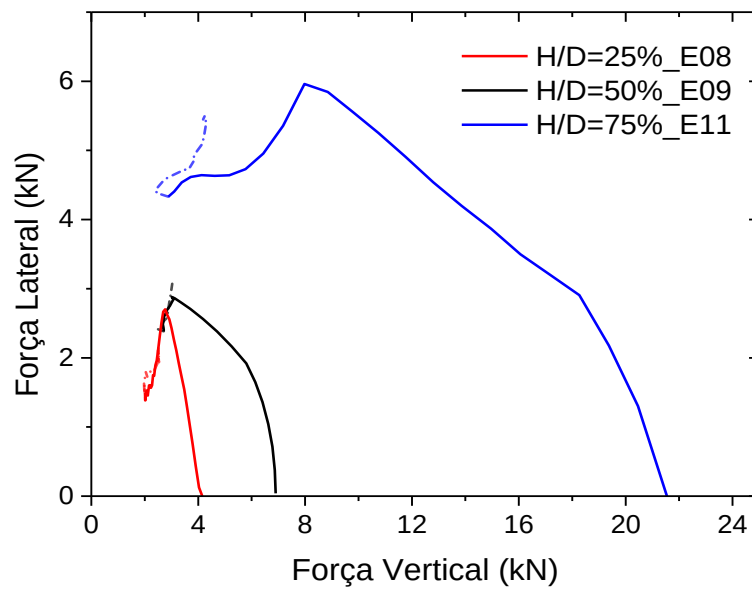


Figura 5.36 – Comparação das Superfícies de fluência obtidas dos ensaios 8, 9 e 11 ($w/D=$ 25, 50 e 75% respectivamente).

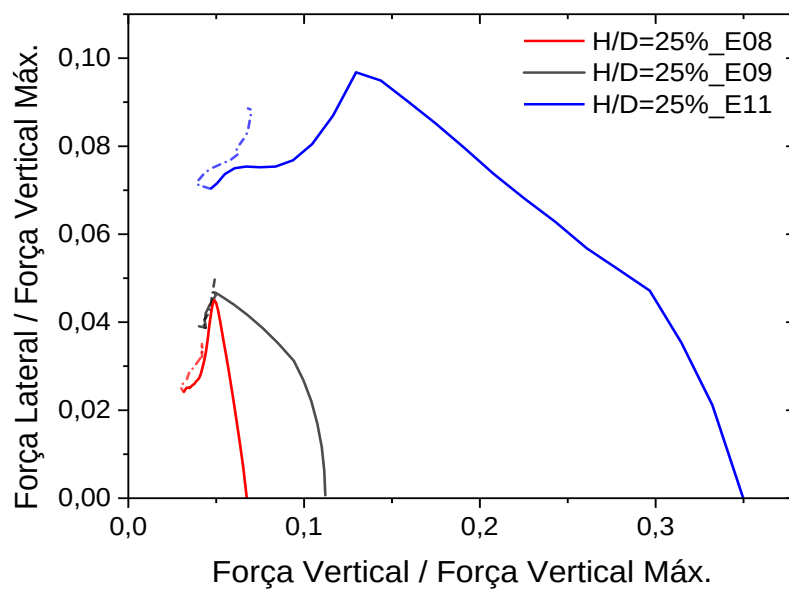


Figura 5.37 - Comparação das Superfícies de fluência normalizadas dos ensaios 8, 9 e 11 ($w/D=$ 25, 50 e 75% respectivamente).

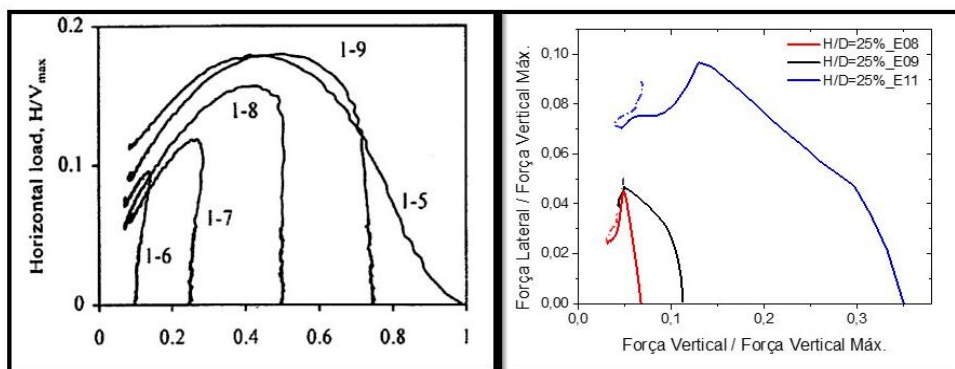


Figura 5.38 – Comparação das curvas de fluência com as de Zhang *et al.* (2001).

Em seguida, apresenta-se uma análise comparativa dos resultados experimentais obtidos com resultados experimentais de outros e previsões analíticas destacadas na literatura. É apresentado na Figura 5.39 valores de força normalizados, para diversas profundidades de enterramento, comparados com resultados de outros autores encontrados (Almeida *et al.*, 2007; Guimarães, 2014). Valores obtidos no presente estudo e previsões teóricas propostas por Almeida *et al.* (2013) e Zhang *et al.* (1999, 2000, 2001), também são plotados no gráfico. Uma breve discussão é dada a seguir.

O gráfico mostra resultados de ensaios realizados em areias calcárias em estados que variam desde fofo a compactos e de condições secas a submersas. Três principais métodos de preparação das amostras foram utilizados nesses ensaios: fluidização, compactação e pluviação com variantes dos mesmos.

Observa-se na Figura 5.39 que de forma geral os valores obtidos no presente estudo apresentam-se intermediários entre os valores estimados pelos diversos autores. Verificou-se que os resultados obtidos no presente estudo apresentam um bom ajuste com a previsão teórica proposta por Almeida *et al.* (2013) para um ângulo de atrito de 40° . Esta diferença entre o ângulo de atrito medido dos perfis de resistência (com valor médio de $36,5^\circ$) e o valor teórico estimado (40°) pode ser devido ao método de estimação do ângulo de atrito relativo aos ensaios CPT e a variabilidade intrínseca decorrente do método de preparação das amostras.

Os valores estimados segundo de Zhang *et al.* (2001) apresentam uma boa precisão na estimativa dos valores de resistência lateral normalizada. Estes valores foram calculados através da eq. (2.22). Os parâmetros utilizados na estimativa da

resistência lateral (Tabela 2.1) foram adotados avaliando a Figura 2.14, Figura 2.15 e Figura 5.37.

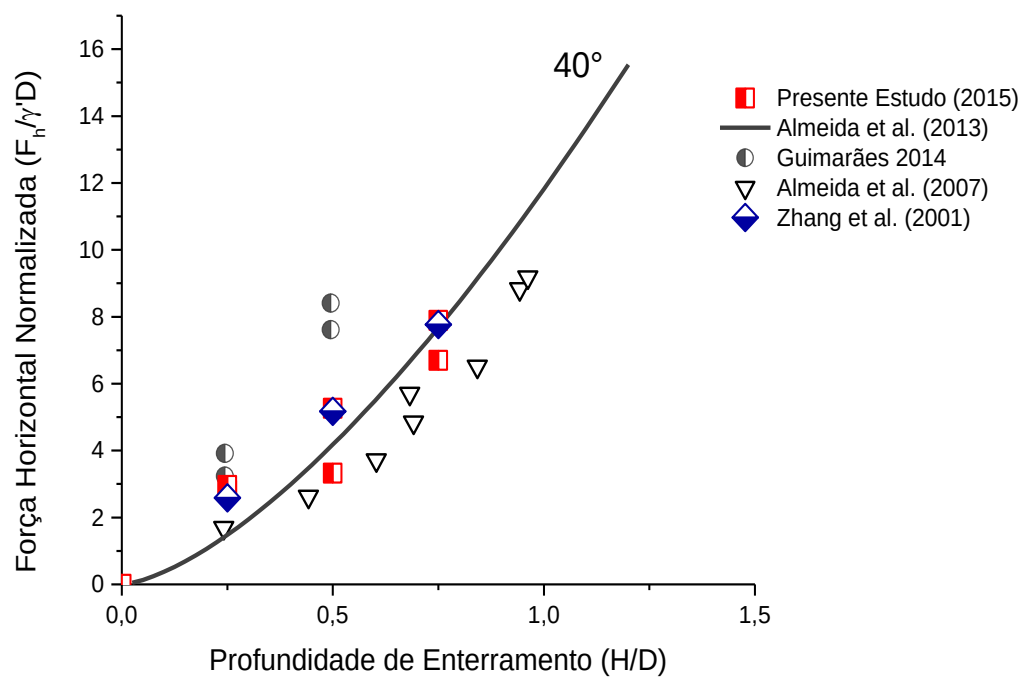


Figura 5.39 – Comparação de forças normalizadas obtidas experimentalmente e modelos propostos na literatura (modificado de Almeida *et al.*, 2007).

Tabela 5.2 Parâmetros utilizados na estimativa dos valores de resistência lateral normalizada.

μ	0,6
m	0,15
n	0
k_{vp} (kN/m/m)	500