

## 6

### Apresentação e análise de resultados dos ensaios de deslocamento axial 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 axial 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 6.1 Resultados dos ensaios de deslocamento axial 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	32,71	7,90	4,14	0,75	4,63	0,14
8	7,425	28,97	25,59	1,13	0,79	8,19	0,28
9	14,85	46,73	20,22	2,31	1,84	1,86	0,04
10	14,85	36,58	11,08	3,30	0,88	2,57	0,07
11	22,275	73,91	40,64	1,82	3,54	18,60	0,25
12	22,275	69,52	28,57	2,43	3,15	11,73	0,17

## 6.1. Introdução

Está representada na Figura 6.1 uma configuração típica do registro de forças de um ensaio de deslocamento axial cíclico. O 1º ciclo corresponde ao único movimento do duto contra o solo intacto, possibilitando o desenvolvimento de forças resistentes progressivamente superiores até a ocorrência do *breakout* onde a mobilização da resistência axial máxima é atingida. À medida que o duto se movimenta, a resistência axial continua à incrementar conforme as bermas vão ganhando contornos definidos culminando com a clara definição das bermas em cada extremidade nos últimos ciclos.

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

1. Início da movimentação axial com primeiros registros da mobilização da resistência axial e ocorrência de *breakout*;
2. Incremento da força axial devido às resistências de ponta e atrito com o deslocamento do duto através do solo;
3. Máxima força axial atingida, pela interação solo-duto, devido à formação da primeira berma no extremo do canal de movimentação;
4. Queda da força axial máxima devido à inversão do sentido de deslocamento e a perda de contato entre a berma e o duto;
5. Aumento da força axial devido à formação da berma no sentido oposto;
6. Força de interação axial entre a berma e o duto. Esta força é menor que a força da berma inicial devido à menor acumulação de material no sentido de volta do que no primeiro movimento.

A geometria final do ensaio de interação axial em areia submersa está apresentada na Figura 6.2.

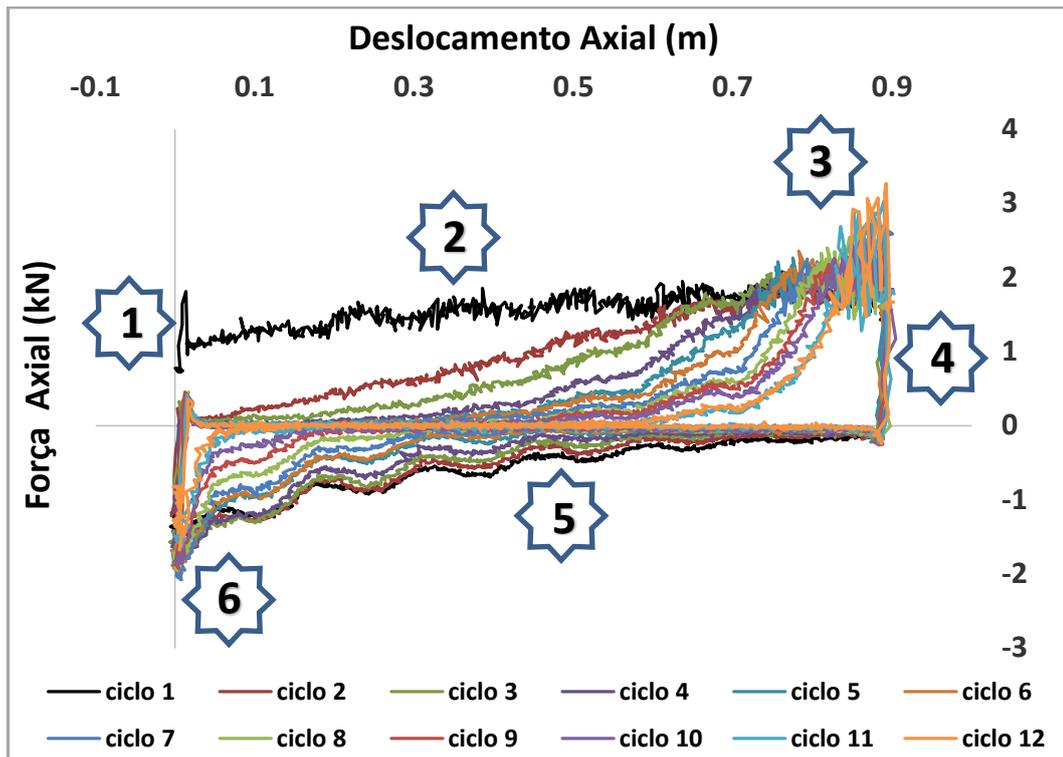


Figura 6.1 – Identificação de eventos típicos durante o ensaio de deslocamento axial cíclico.



Figura 6.2 – Resultado final do ensaio de interação axial.

A seguir são apresentados e analisados os resultados de seis ensaios de arraste axial 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 axiais em relação aos deslocamentos axiais de dois ensaios consecutivos

correspondentes à mesma profundidade de enterramento em que foram atingidos diferentes índices de sobre carregamento relativos as forças verticais máximas decorrentes do enterramento do duto. Comparou-se os resultados dos mesmos.

## **6.2.**

### **Resultados dos ensaios de deslocamento axial com $w/D= 25\%$**

Apresentam-se os resultados em termos de protótipo da força axial vs deslocamento axial dos ensaios de deslocamento axial para relação de enterramento de 25% do diâmetro ( $w/D=25\%$ ) (Figura 6.3 e Figura 6.5) ou seja, correspondente a um valor de protótipo  $w_p = 7,5$  cm com velocidade de penetração e arraste de 0,5 mm/s. Em seguida, apresentam-se os resultados em protótipo da força vertical vs deslocamento axial correspondentes aos mesmos ensaios (Figura 6.4 e Figura 6.6).

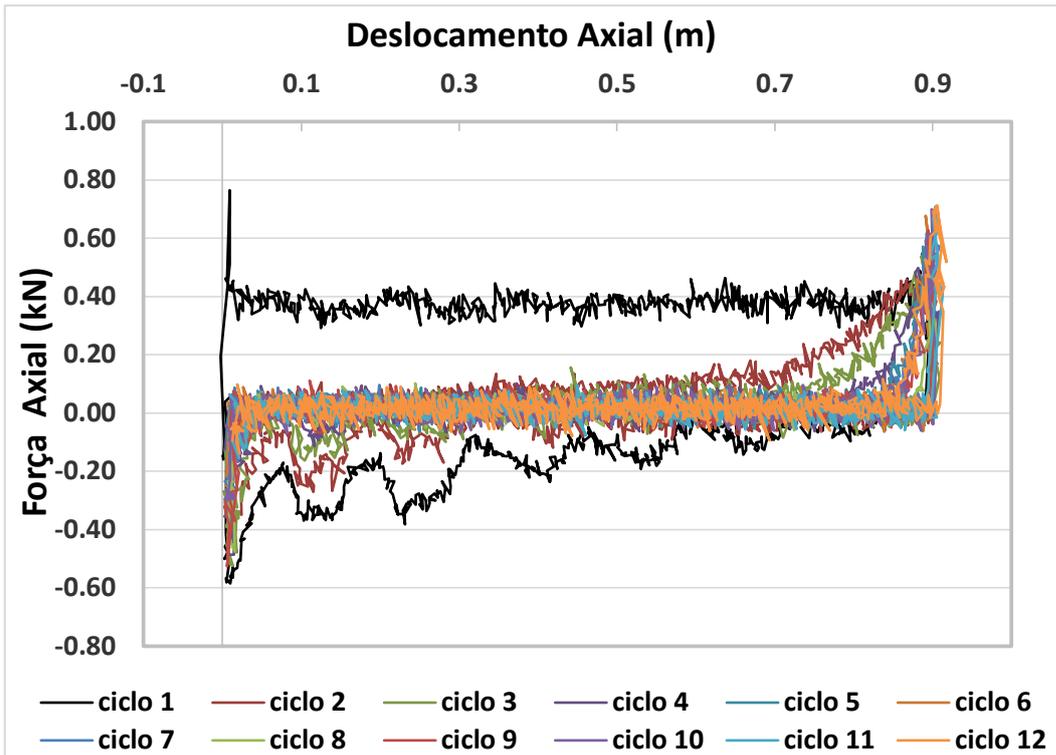


Figura 6.3 - Força axial vs Deslocamento axial para enterramento de 25% do diâmetro – Ensaio 7.

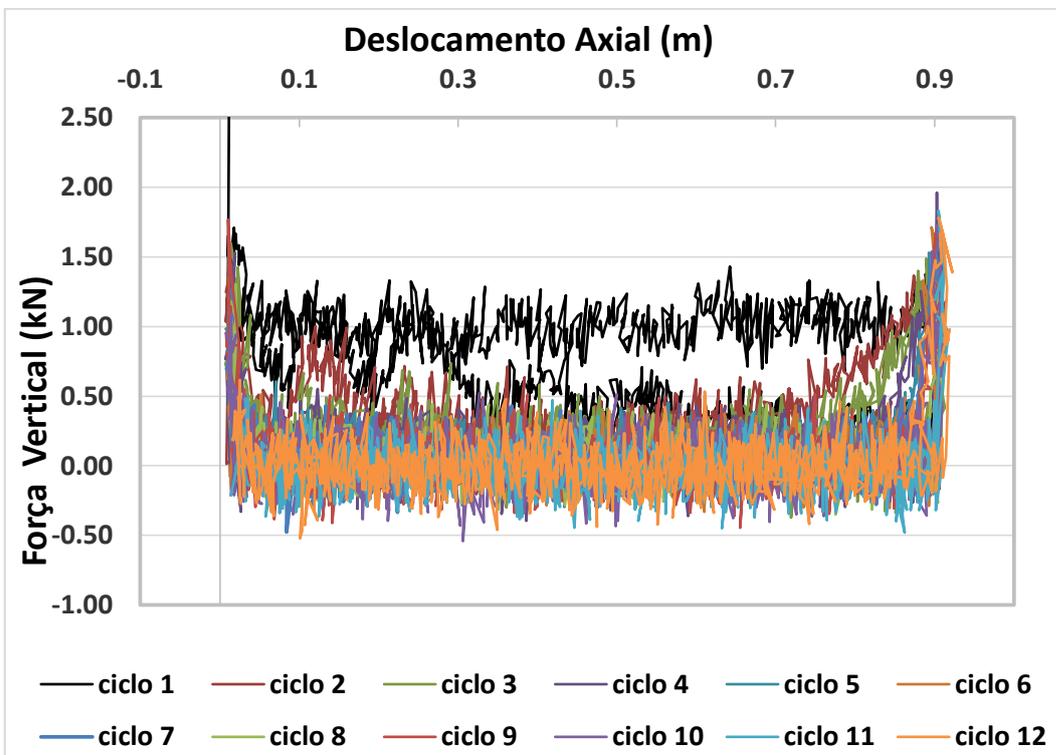


Figura 6.4 - Força vertical vs Deslocamento axial para enterramento de 25% do diâmetro – Ensaio 7.

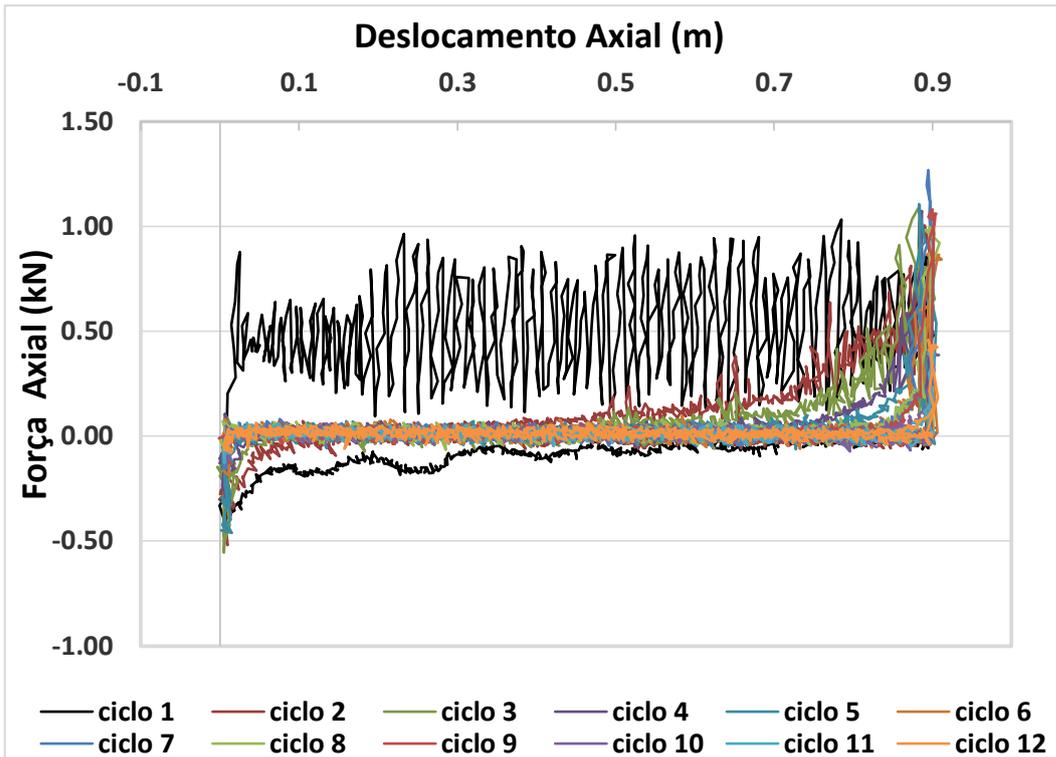


Figura 6.5 - Força axial vs Deslocamento axial para enterramento de 25% do diâmetro – Ensaio 8.

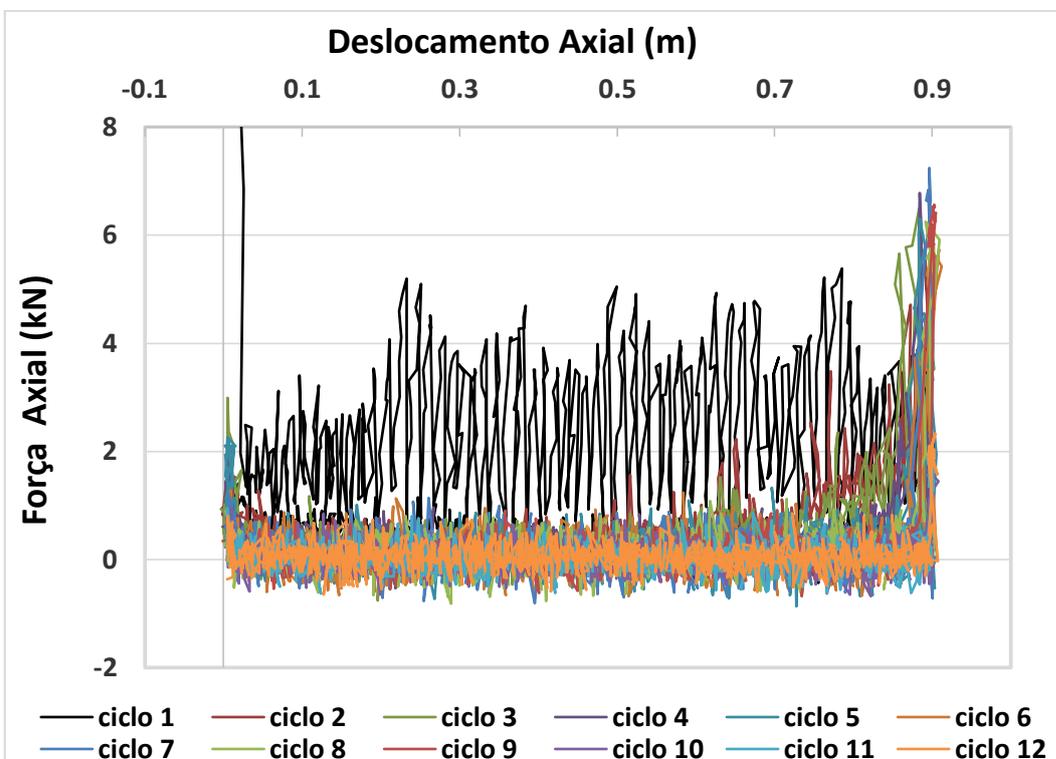


Figura 6.6 - Força vertical vs Deslocamento axial para enterramento de 25% do diâmetro – Ensaio 8.

### 6.2.1.

#### **Análise de resultados dos ensaios de deslocamento axial com $w/D=25\%$**

Apresentam-se os registros das forças axiais e verticais relativas à mobilização do *breakout* obtidas dos primeiros ciclos dos ensaios 7 e 8 (Figura 6.7 e Figura 6.8). Observou-se que as resistências axiais pico (*breakout*) foram atingidas para valores similares de 0,75 e 0,79 kN. Esta semelhança nos dados pode ser devida a proximidade dos valores de “R” (índices de sobrecarga relativos as forças máximas verticais) (ver Tabela 6.1).

As distâncias de mobilização da resistência axial pico atingiram valores de 14 e 22 mm equivalentes a 0,05D e 0,07D para os ensaios 7 e 8 respectivamente. Estes valores apresentam-se superiores aos propostos em relação a solos de textura grosseira (ALA, 2001), onde se relatam valores constantes de 3 mm para areias densas e 5 mm para areias fofas.

Foi identificado que durante o início da movimentação do duto os valores de força vertical decrescem atingindo um valor residual no momento em que as forças axiais alcançaram os valores pico (Figura 6.7 e Figura 6.8).

A superfície de fluência do carregamento vertical-axial combinado está mostrada na Figura 6.9. Do gráfico observou-se que as trajetórias das forças combinadas apresentam uma configuração aproximadamente parabólica. As superfícies de fluência normalizadas relativas às forças verticais máximas dos ensaios 7 e 8 respectivamente são apresentadas na Figura 6.10. Foi observado que a mobilização das resistências axiais pico foram atingidas para uma combinação de valores de 2 e 3% da força axial e de 14 e 28% da força vertical relativos à força máxima vertical.

O desenvolvimento das resistências axiais máximas com o número de ciclos para deslocamentos de 0.45 m (1.5D) no trajeto de ida e volta é apresentado na Figura 6.11 e Figura 6.12. Observou-se que a degradação das resistências axiais, ao longo do ensaio, tendo um formato aproximadamente parabólico e atingindo um valor residual muito próximo do zero.

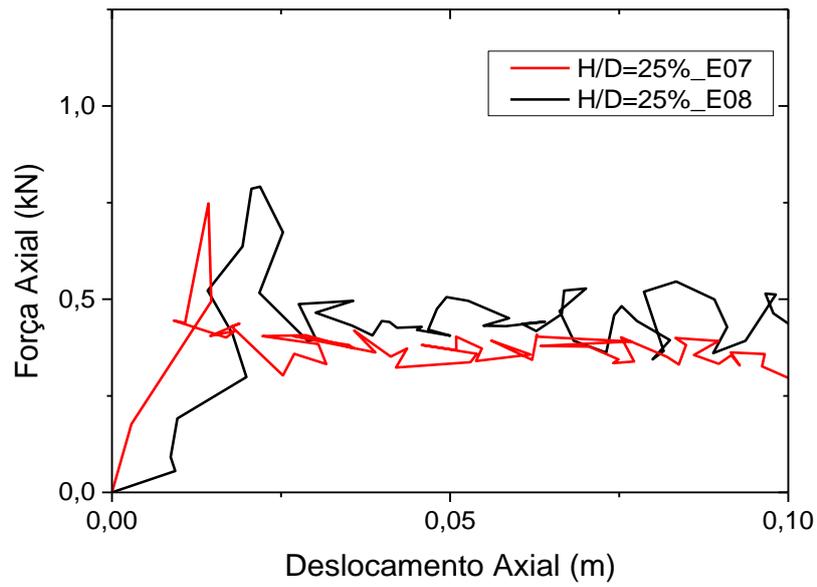


Figura 6.7 - Variação das forças axiais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios 07 e 08.

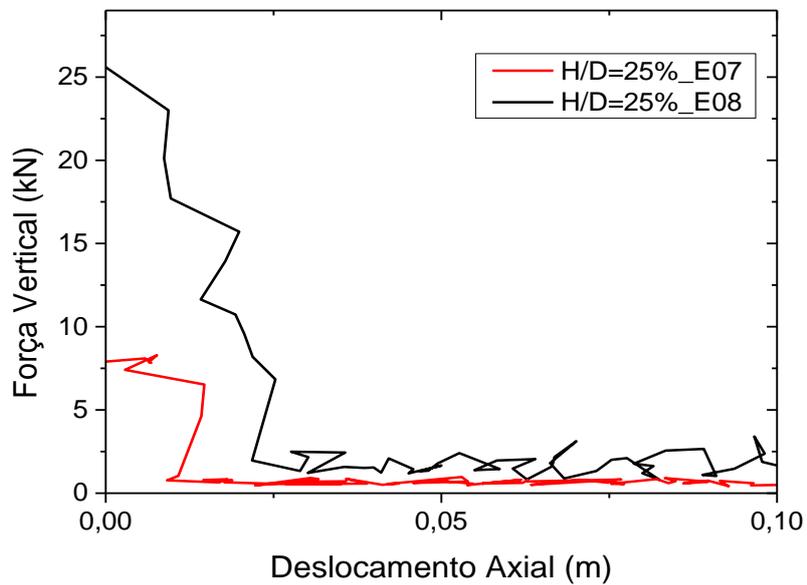


Figura 6.8 - Variação das forças verticais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios 7 e 8.

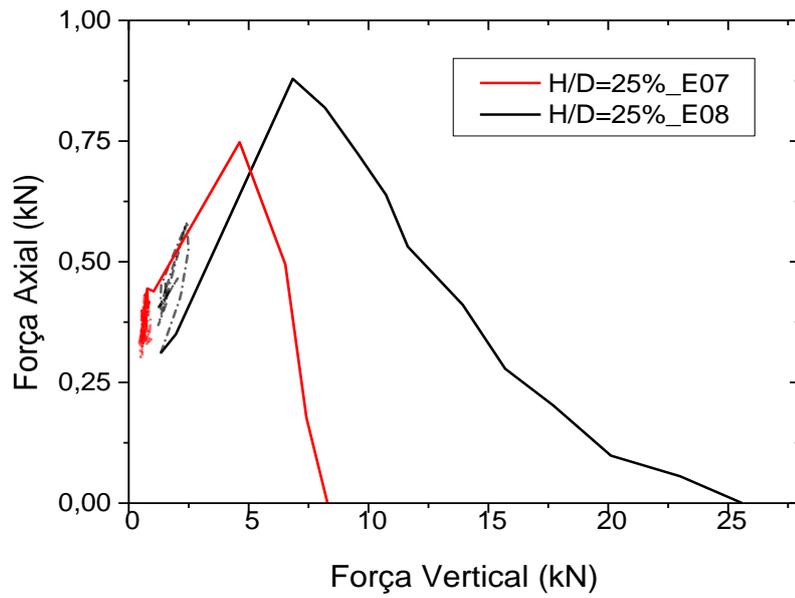


Figura 6.9 - Superfície de fluência obtidas dos ensaios 7 e 8.

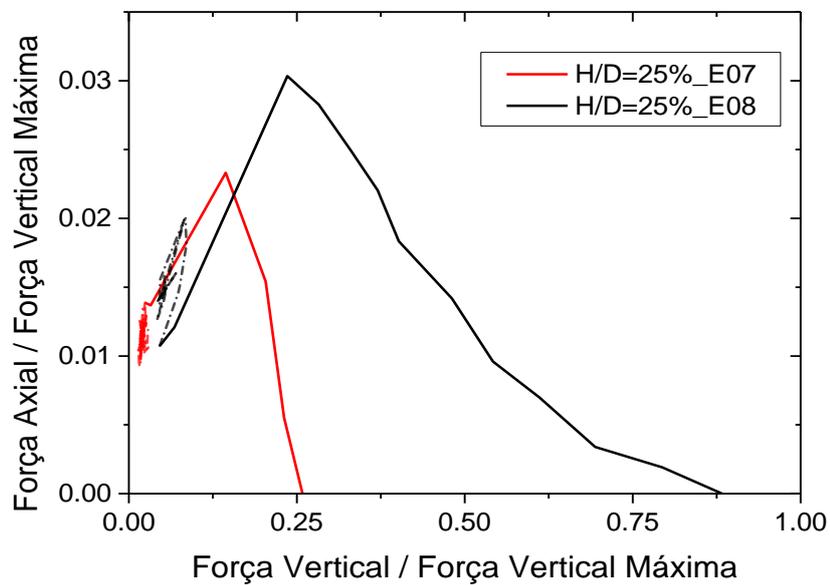


Figura 6.10 - Superfícies de fluência normalizadas relativas à força vertical máxima dos ensaios 7 e 8.

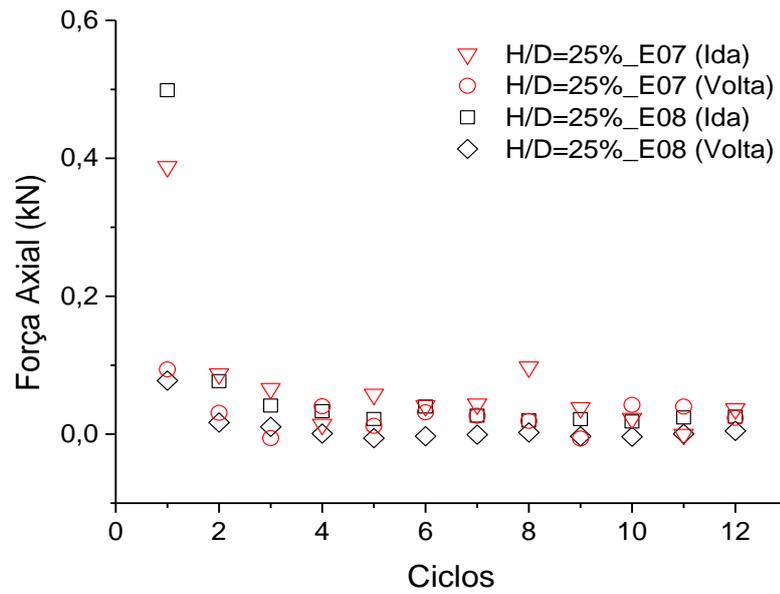


Figura 6.11 – Degradação das resistências axiais com o desenvolvimento dos ciclos para deslocamentos de 1,5D dos ensaios 7 e 8.

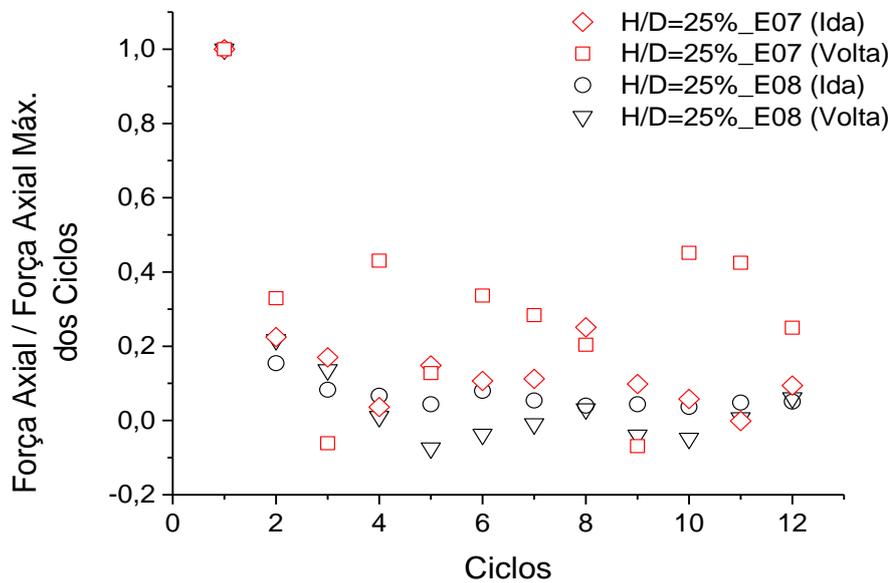


Figura 6.12 – Resistências axiais normalizadas com o desenvolvimento dos ciclos para deslocamentos de 1,5D dos ensaios 7 e 8.

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

Apresentam-se os resultados em protótipo (Figura 6.13 e Figura 6.15) da força axial vs deslocamento axial dos ensaios de arraste axial para relação de enterramento de 50% do diâmetro ( $w/D=50\%$ ), ou seja, correspondente a um valor de protótipo  $w_p = 0,22$  m. Em seguida, os resultados em protótipo da força vertical vs deslocamento axial correspondentes aos mesmos ensaios são apresentados na Figura 6.14 e Figura 6.16.

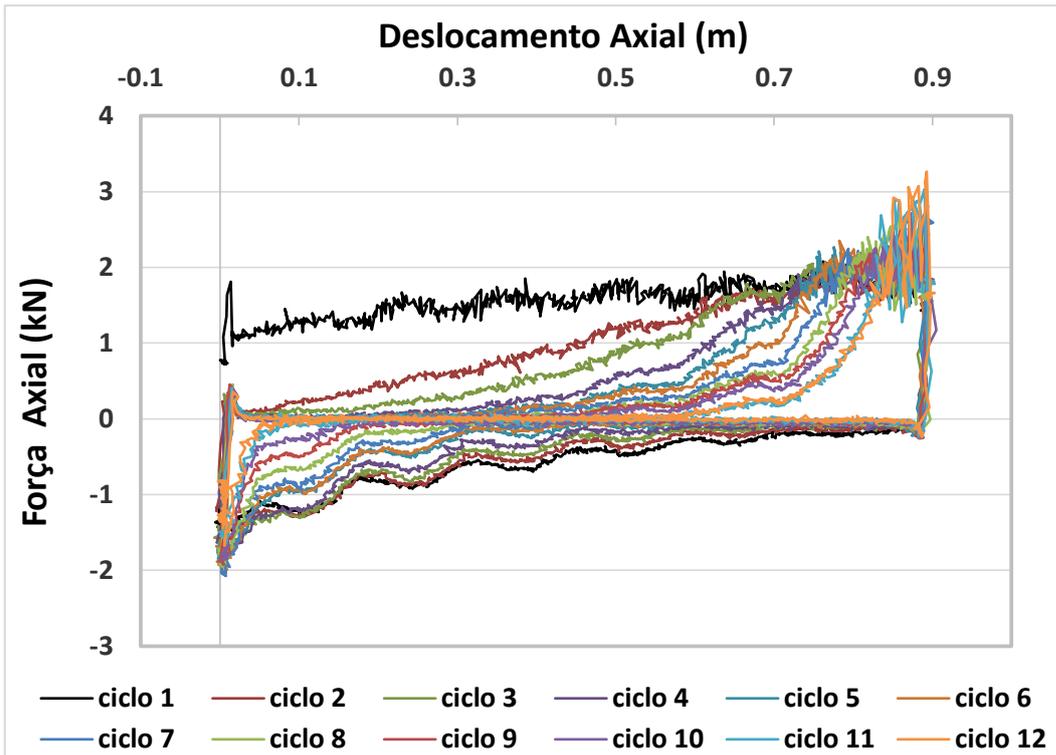


Figura 6.13 - Força axial vs Deslocamento axial para enterramento de 50% do diâmetro – Ensaio 9.

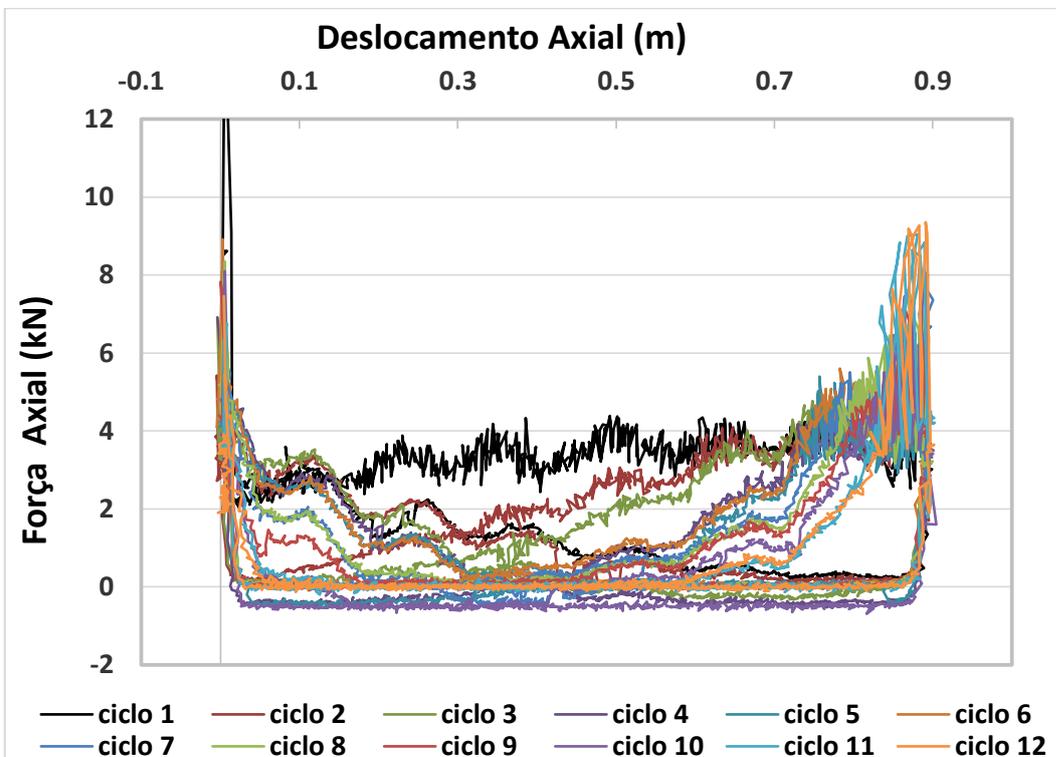


Figura 6.14 - Força vertical vs Deslocamento axial para enterramento de 50% do diâmetro – Ensaio 9.

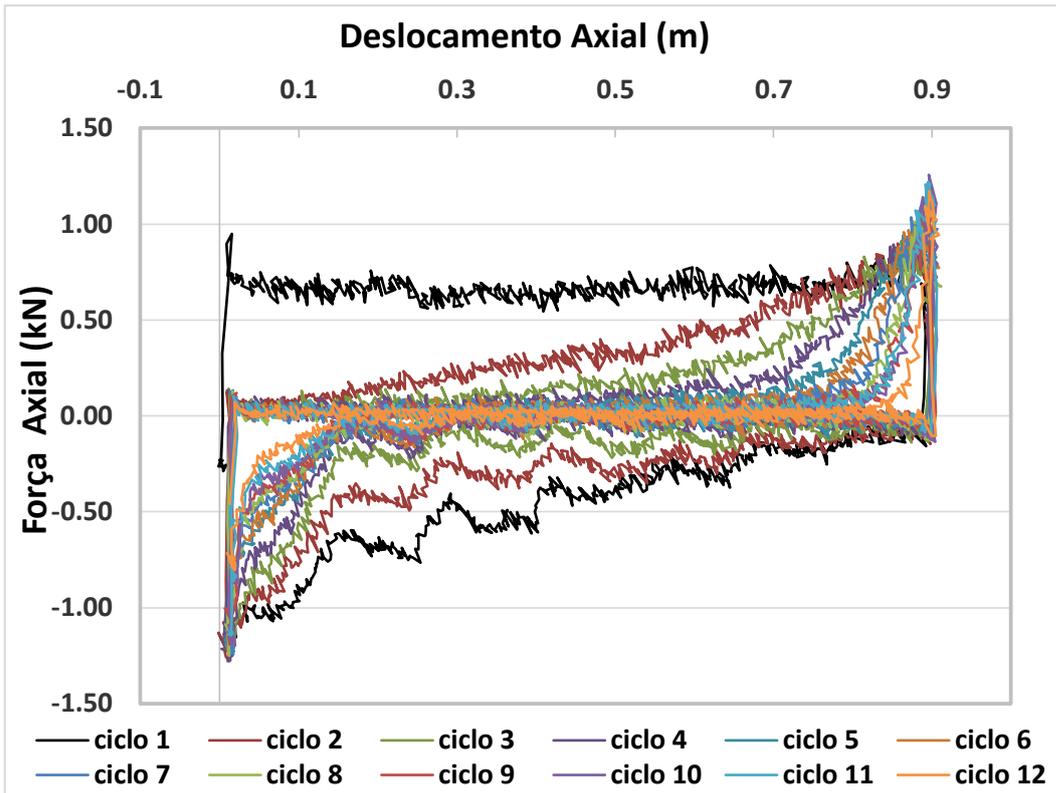


Figura 6.15 - Força axial vs Deslocamento axial para enterramento de 50% do diâmetro – Ensaio 10.

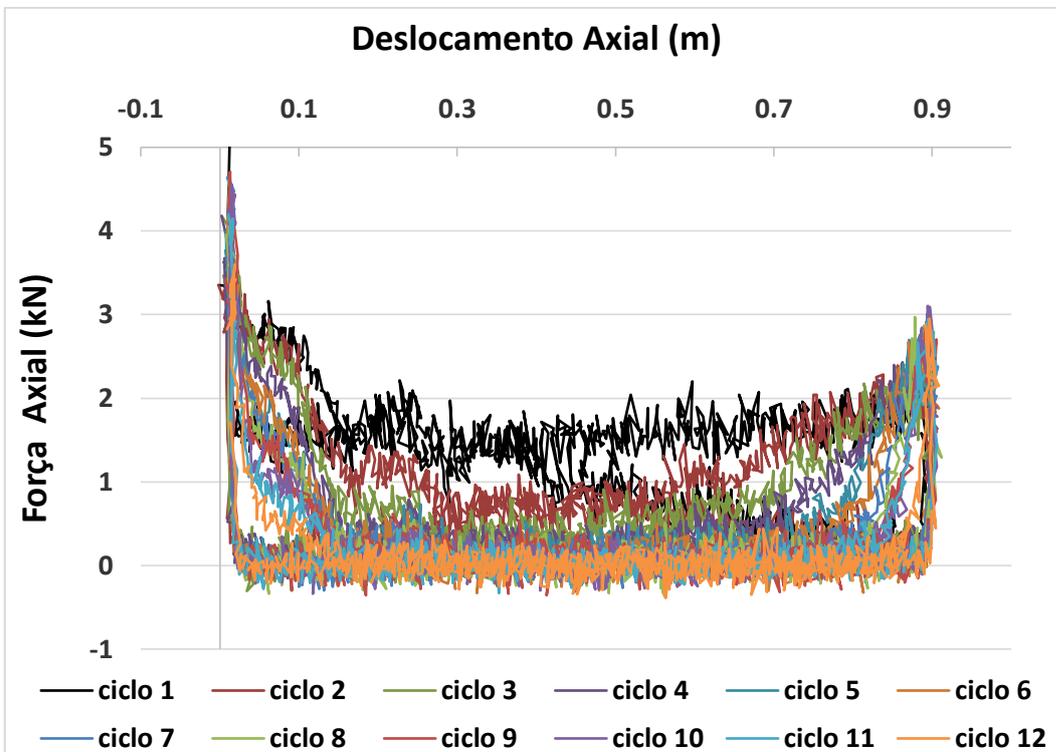


Figura 6.16 - Força vertical vs Deslocamento axial para enterramento de 50% do diâmetro – Ensaio 10.

### 6.3.1.

#### **Análise de resultados dos ensaios de deslocamento axial com $w/D=50\%$**

As forças axiais e verticais relativas à ocorrência do *breakout* dos ensaios 9 e 10 são mostradas na Figura 6.17 e Figura 6.18, onde foram atingidos valores de índice de sobre carregamento (R) de 2 e 3 respectivamente (ver Tabela 6.1). Uma breve discussão é dada a seguir. Observou-se que a mobilização da resistência axial pico foi atingida para valores de força de 1.84 e 0.88 kN com distâncias de mobilização do *breakout* de 19 e 10 mm respectivamente. Estes valores possuem correspondência com os respectivos índices de sobre carregamento (R), sendo que no ensaio 7 foi realizada uma menor relaxação das forças verticais acarretando um maior valor de resistência axial e distância de mobilização.

As trajetórias das forças verticais e axiais combinadas que definem as possíveis superfícies de fluência dos ensaios 9 e 10 são mostrados na Figura 6.19. A seguir na Figura 6.20 são apresentadas as mesmas superfícies de fluência normalizadas com relação as máximas forças verticais decorrentes da enterramento do duto no solo. As mobilizações das resistências axiais pico foram atingidos para valores combinados de força axial de 5 e 2% em correspondência as forças verticais de 21 e 9% em relação as forças verticais máximas. Estas curvas apresentam uma configuração aproximadamente parabólica.

O desenvolvimento da mobilização das forças resistentes com o decorrer dos ciclos é mostrado na Figura 6.21. Apresentam-se as resistências de cada ciclo nas trajetórias de ida e volta para distâncias de 0,45 m (1.5D) em termos de protótipo. Observou-se que as forças axiais resistentes decaem com o decorrer dos ciclos comportando um formato aproximadamente parabólico. Esta característica é melhor evidenciada na Figura 6.22 onde se apresentam as forças axiais normalizadas com os ciclos.

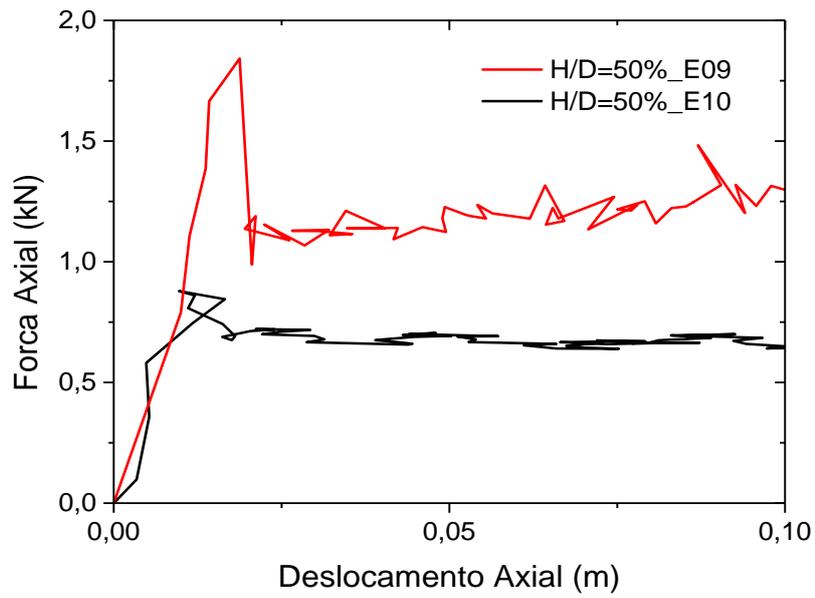


Figura 6.17 - Variação das forças axiais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios 9 e 10.

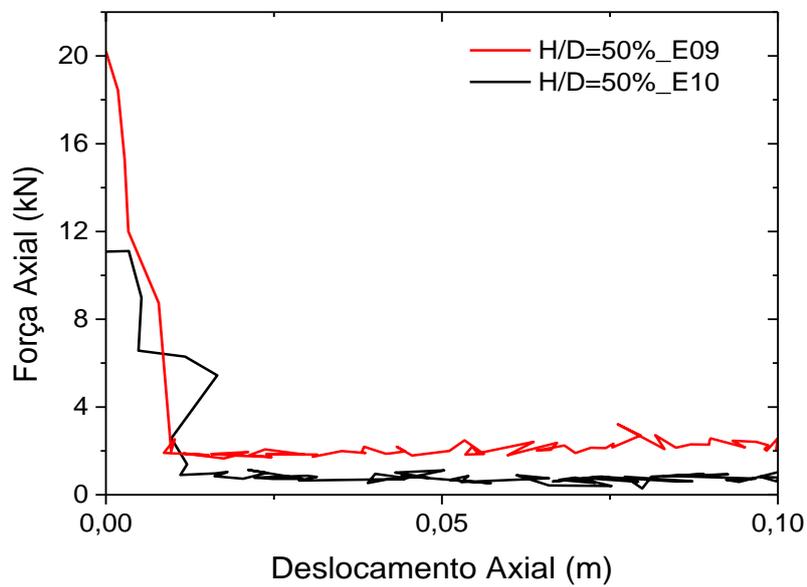


Figura 6.18 - Variação das forças verticais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios 9 e 10.

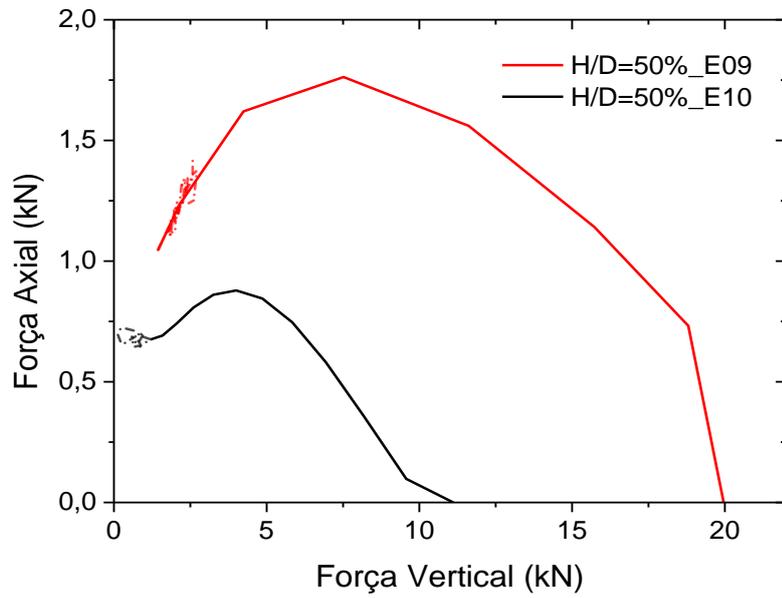


Figura 6.19 - Superfícies de fluência obtidas dos ensaios 9 e 10.

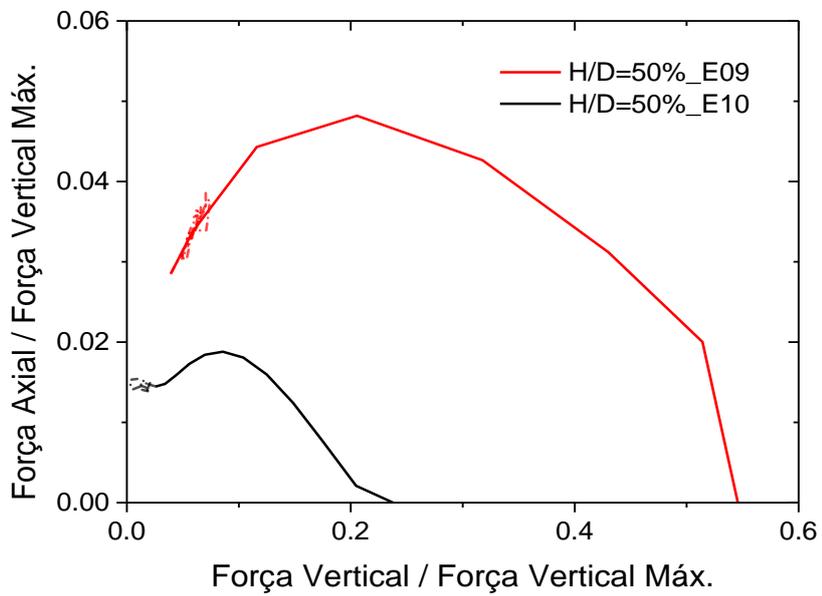


Figura 6.20 - Superfícies de fluência normalizadas relativas à força vertical máxima dos ensaios 9 e 10.

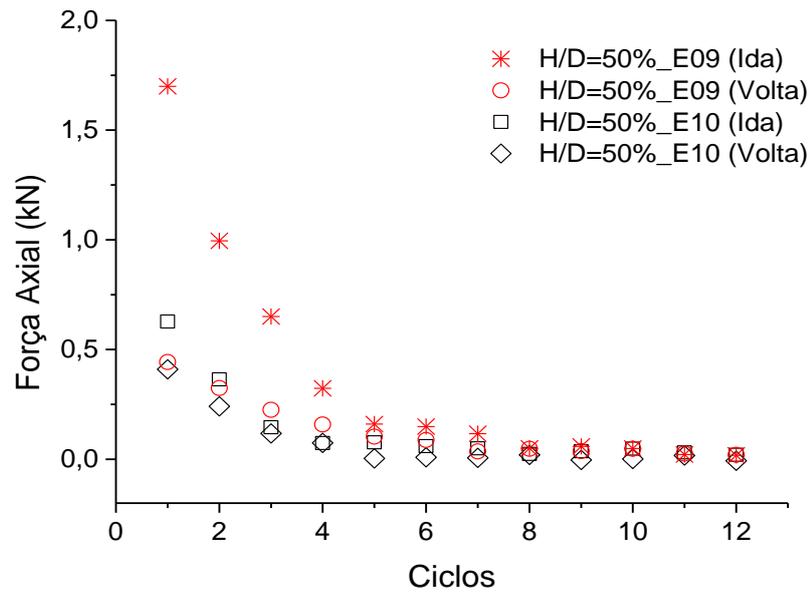


Figura 6.21 – Degradação das resistências axiais com o desenvolvimento dos ciclos para deslocamentos de 1,5D dos ensaios 9 e 10.

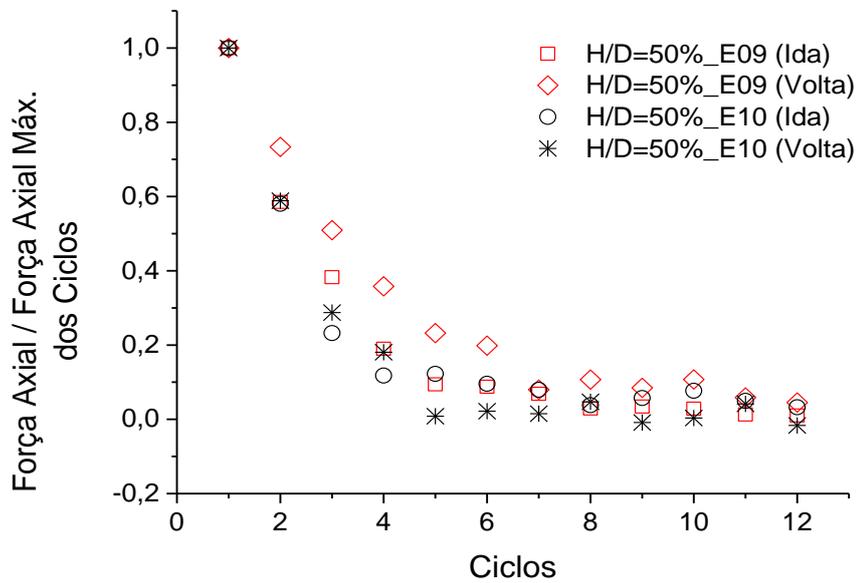


Figura 6.22 - Resistências axiais normalizadas com o desenvolvimento dos ciclos para deslocamentos de 1,5D dos ensaios 9 e 10.

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

Apresentam-se os resultados em termos de protótipo (Figura 6.23 e Figura 6.25) da força axial *vs* deslocamento axial dos ensaios de arraste axial para relação de enterramento de 75% do diâmetro ( $w/D=75\%$ ), ou seja, correspondente a um valor de protótipo  $w_p = 22$  cm. Em seguida, os resultados da força vertical *vs* deslocamento axial correspondentes aos mesmos ensaios em termos protótipo são apresentados na Figura 6.24 e Figura 6.26.

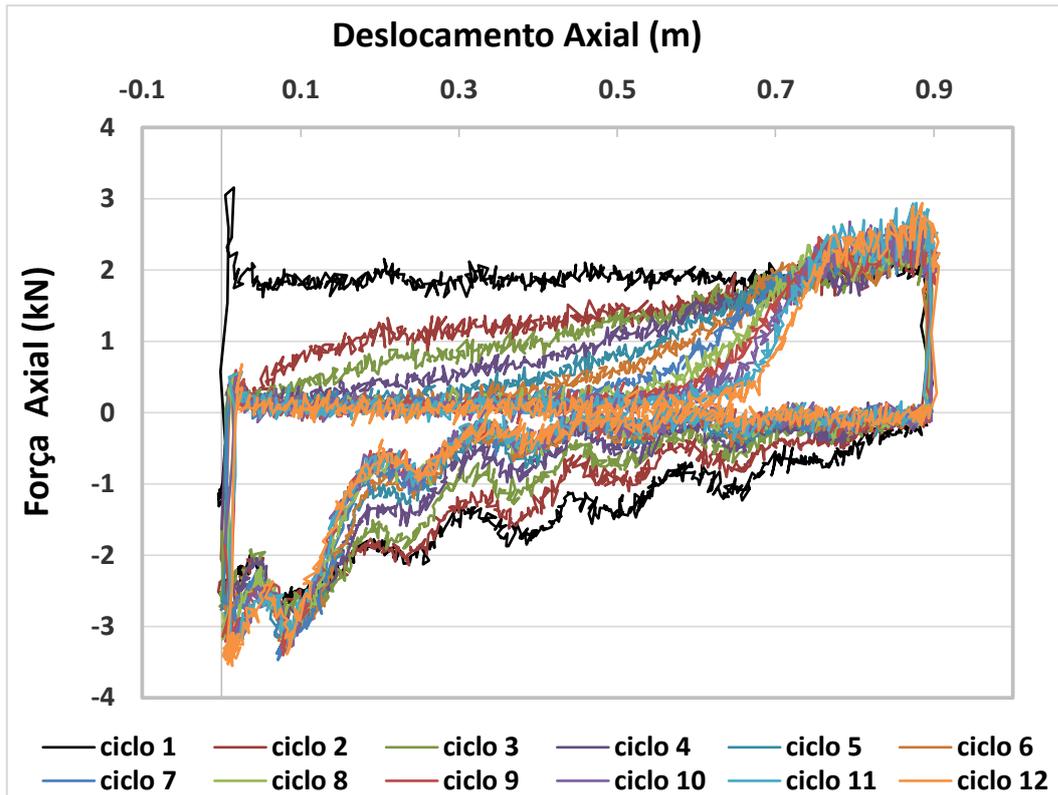


Figura 6.23 - Força axial vs Deslocamento axial para enterramento de 75% do diâmetro – Ensaio 11.

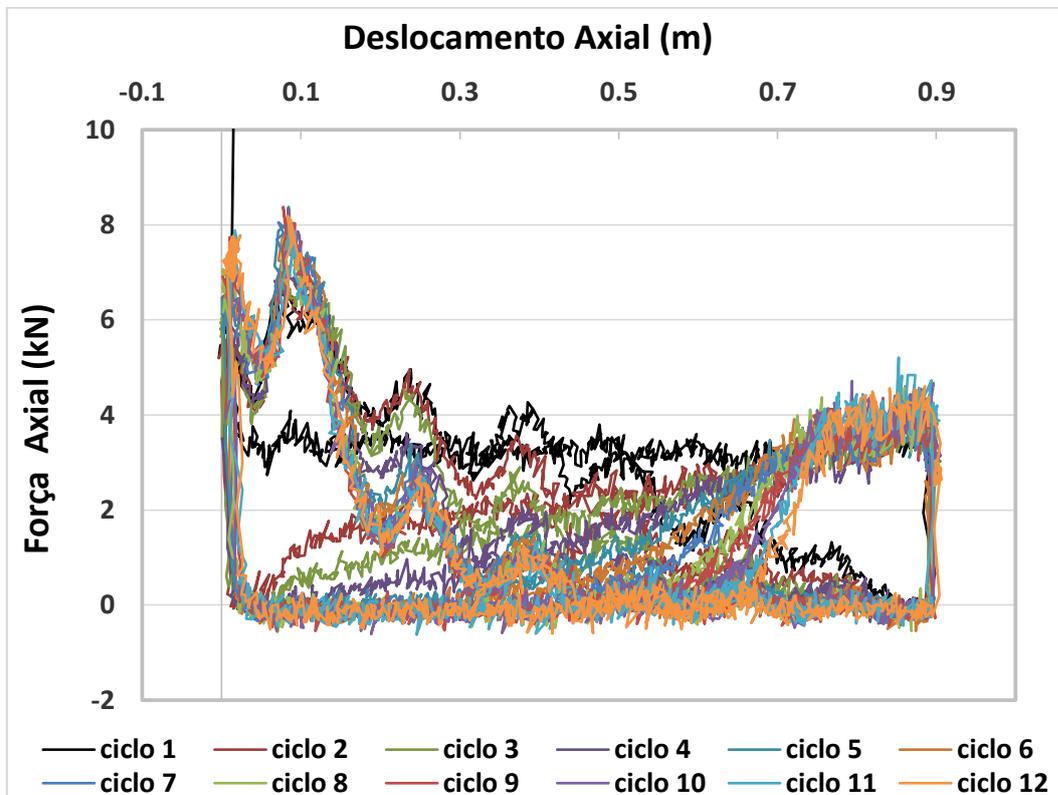


Figura 6.24 - Força vertical vs Deslocamento axial para enterramento de 75% do diâmetro – Ensaio 11.

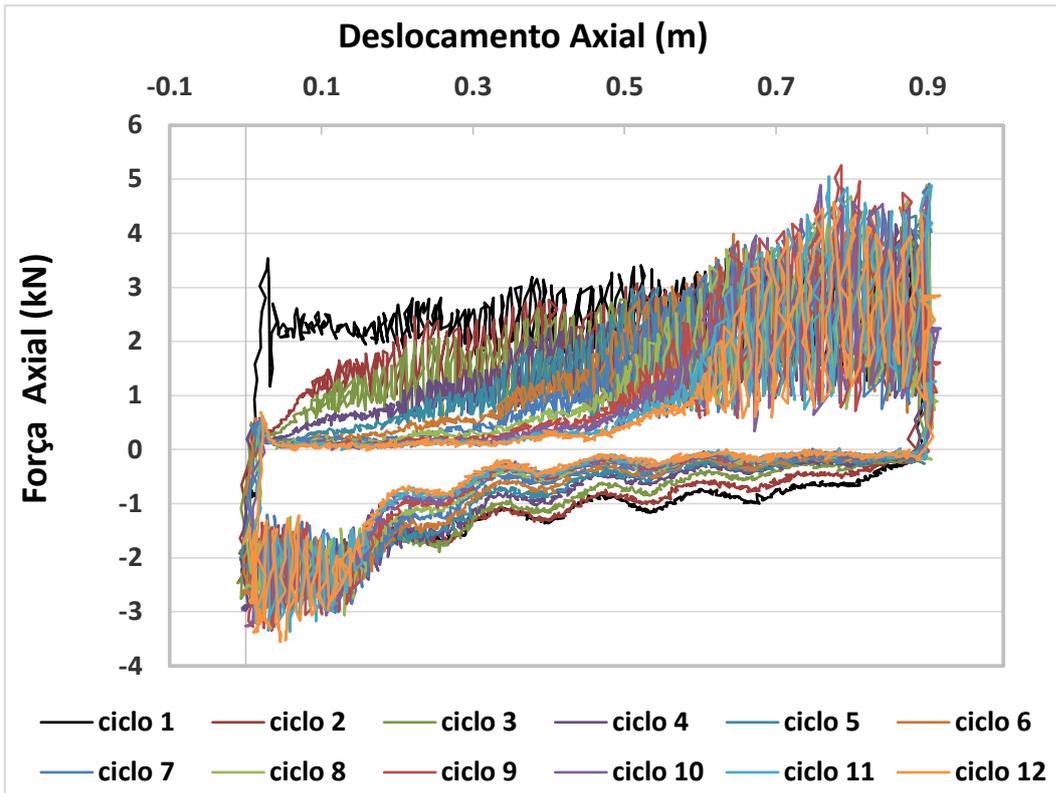


Figura 6.25 - Força axial vs Deslocamento axial para enterramento de 75% do diâmetro – Ensaio 12.

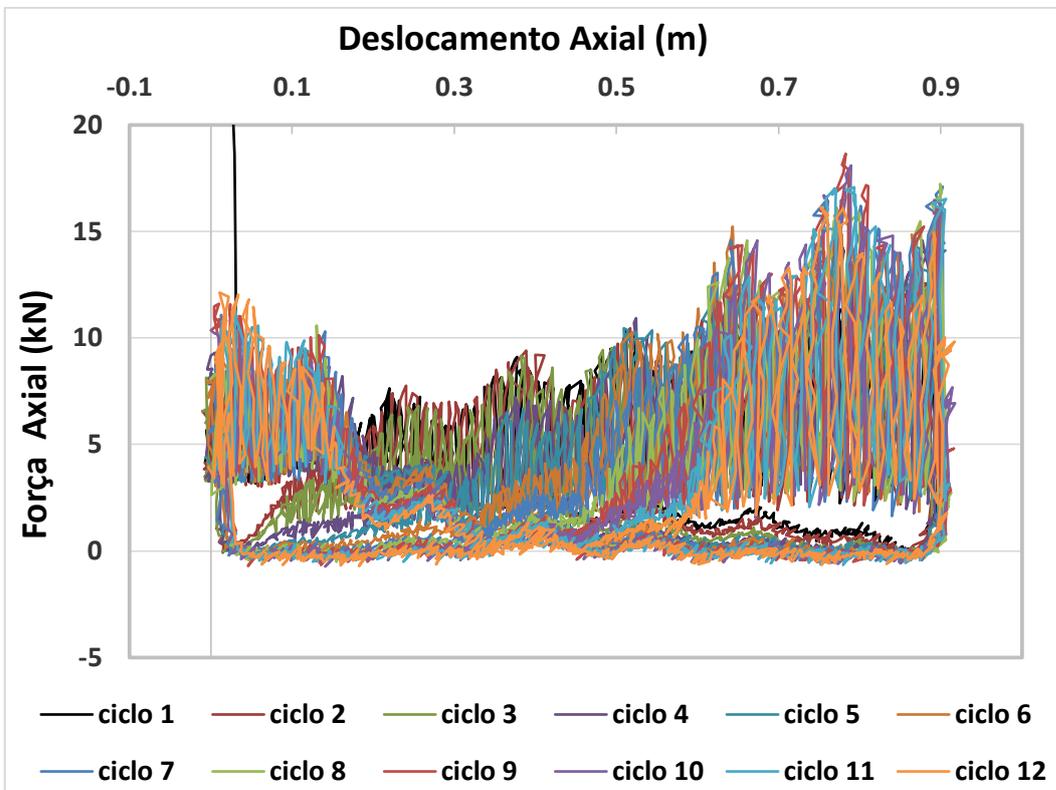


Figura 6.26 - Força vertical vs Deslocamento axial para enterramento de 75% do diâmetro – Ensaio 12.

#### 6.4.1.

#### **Análise de resultados dos ensaios axiais com $w/D=75\%$**

Os registros das forças axiais e verticais relativas à ocorrência do *breakout* dos ensaios 11 e 12 são mostradas na Figura 6.27 e Figura 6.28, em que ocorreram relaxamento de tensões relativos as forças verticais máximas decorrentes do enterramento do duto com valores de “R” de 1.8 e 2.4 (ver Tabela 6.1). Observou-se que as resistências axiais máximas mobilizadas atingiram valores de força de 3,54 e 3,15 kN para distâncias de mobilização de 29 e 18 mm respectivamente (Figura 6.27). Esta relativa similitude, entre os valores das resistências máximas mobilizadas, pode ser devido à proximidade dos valores de “R”. As curvas das superfícies de fluência dos ensaios 11 e 12 são mostradas na Figura 6.29. Em seguida, apresenta-se na Figura 6.30 as curvas de fluência normalizadas em relação as máximas forças verticais experimentadas dos mesmos ensaios. Uma breve discussão é dada a seguir:

A envoltória que comporta a trajetória das cargas axial-vertical combinadas foi aproximadamente parabólica, com resistências axiais atingindo o pico ao redor do 20% das forças verticais máximas dos ensaios (Figura 6.29). As forças verticais correspondentes às resistências axiais pico foram em média ao redor de 5% das forças verticais máximas.

É apresentado na Figura 6.31 o desenvolvimento das resistências axiais dos ensaios 11 e 12 com o decorrer dos ciclos para deslocamentos de 0,45 m. Identificou-se que a tendência das forças axiais resistentes decaiu com o aumento dos ciclos tendo uma configuração aproximadamente parabólica. Isto é evidenciado melhor na Figura 6.32, onde apresentam-se os valores de resistência axial normalizados nas trajetórias de ida e volta.

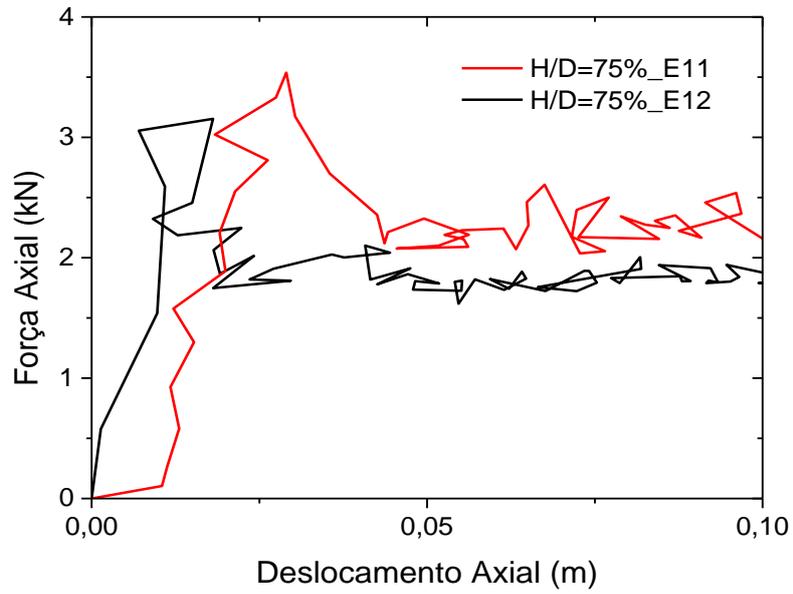


Figura 6.27 - Variação das forças axiais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios 11 e 12.

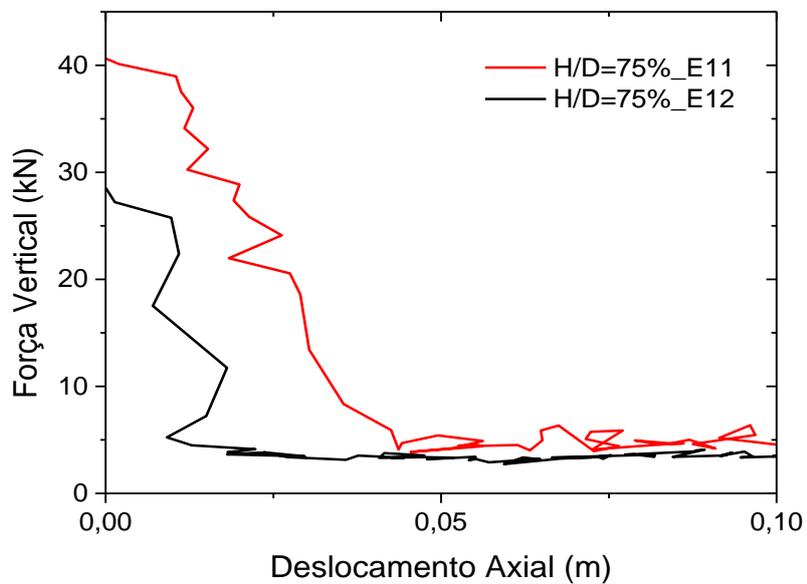


Figura 6.28 - Variação das forças verticais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios 11 e 12.

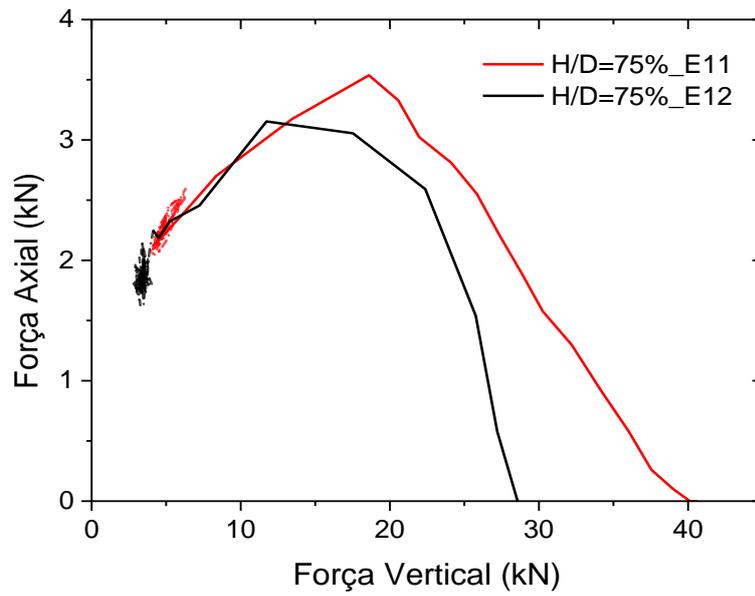


Figura 6.29 - Superfícies de fluência obtidas dos ensaios 9 e 10.

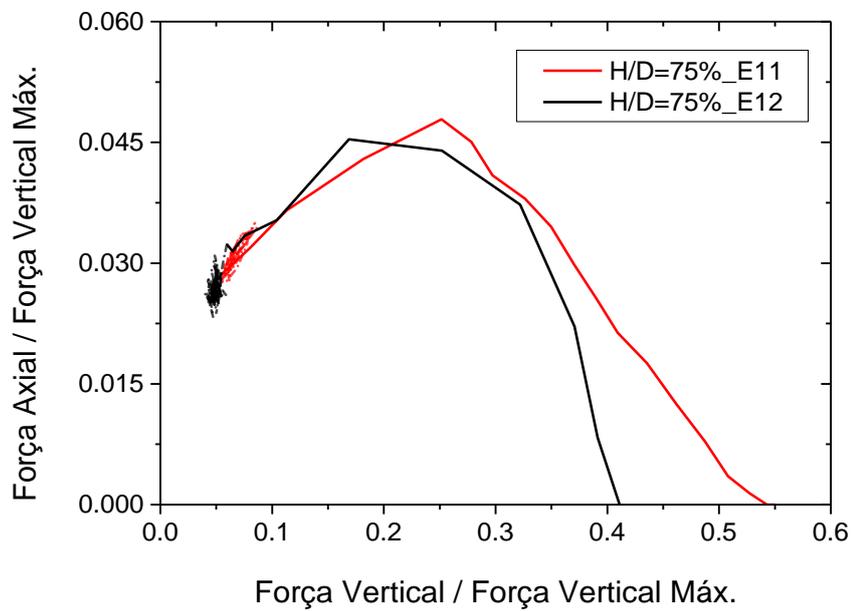


Figura 6.30 - Superfícies de fluência normalizada relativas à força vertical máxima dos ensaios 11 e 12.

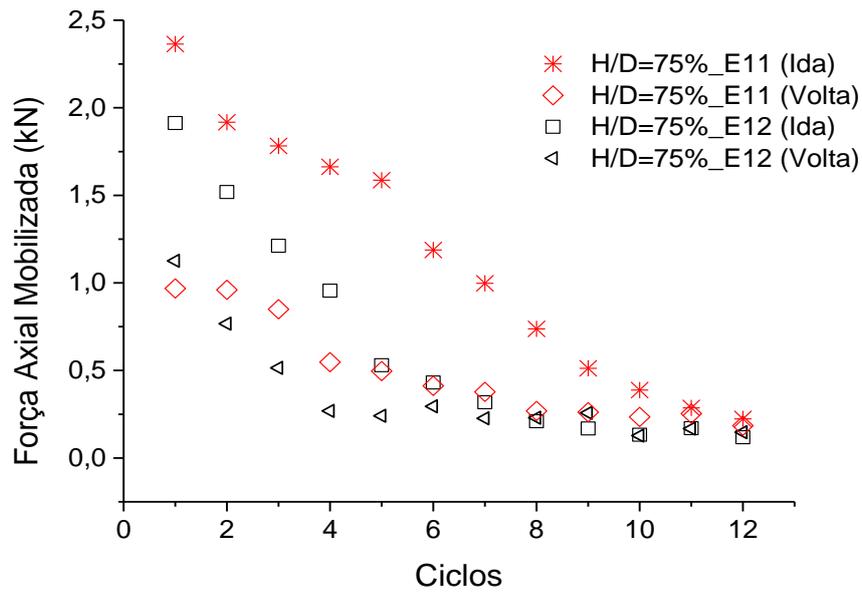


Figura 6.31 - Degradação das resistências axiais com o desenvolvimento dos ciclos para deslocamentos de 1,5D dos ensaios 11 e 12.

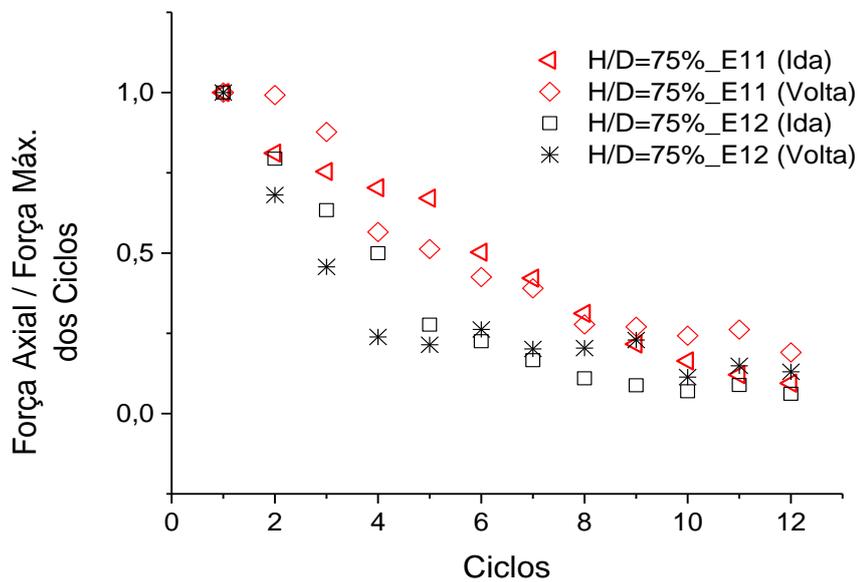


Figura 6.32 - Resistências axiais normalizadas com o desenvolvimento dos ciclos para deslocamentos de 1,5D dos ensaios 11 e 12.

## 6.5.

### **Análise geral dos resultados dos ensaios de deslocamento axial com $w/D=25, 50$ e $75\%$**

Para a análise global dos ensaios axiais foram agrupados os dados dos ensaios segundo as condições de sobre carregamento atingidas. Os ensaios 7, 9 e 12 conformaram um grupo que atingiram valores de  $R \geq 2$ . Do mesmo modo os ensaios 8, 9 e 11 atingiram valores de  $R \leq 2$  (Tabela 6.1).

Os registros das forças axiais e verticais relativas à ocorrência do *breakout* para os ensaios com  $R \geq 2$  são apresentados na Figura 6.33 e Figura 6.34.

Observou-se que a mobilização das resistências axiais de *breakout* dos ensaios com  $w/D= 25, 50$  e  $75$  atingiram valores de 0,75; 1,84 e 3,15 kN respectivamente (Figura 6.33). Estes valores aumentam conforme o acréscimo da porcentagem de enterramento ( $w/D$ ), o que evidencia que a resistência axial de dutos enterrados superficialmente é fortemente influenciada pelas condições de enterramento. Observou-se também que as distancias de mobilização da resistência axial máxima dos ensaios com  $w/D= 25, 50$  e  $75\%$  foram aproximadamente iguais a 18 mm, que correspondem a um valor de  $0,06 D$  (diâmetro do duto). Foi observado que as forças verticais decaem durante a movimentação axial do duto até atingir um valor residual que corresponde à distância em que todas as forças axiais atingiram o pico (*breakout*).

As trajetórias das forças verticais e axiais combinadas que delimitam uma possível superfície de fluência dos ensaios 7, 9 e 12 são mostradas na Figura 6.35. As mesmas superfícies de fluência normalizadas relativas às forças verticais máximas experimentadas durante os ensaios são apresentadas na Figura 6.36.

Observou-se que as curvas apresentam uma configuração aproximadamente parabólica, mantendo um acréscimo relativamente proporcional conforme aumenta o enterramento do duto ( $w/D$ ) (Figura 6.35).

Foi observado na Figura 6.36 que as curvas de superfície de fluência dos ensaios 9 e 12 apresentam geometrias similares, provavelmente devido a possuírem um mesmo índice de sobre carregamento ( $R=2,3$ ). Entretanto, a curva do ensaio 7 apresenta-se desfasada por possuir um valor de  $R= 4,1$ .

Apresentam-se na Figura 6.37 e Figura 6.38 os registros das forças axiais e verticais relativas à ocorrência do *breakout* dos ensaios 8, 9 e 11 com valores de  $R \leq 2$ .

Observou-se na Figura 6.37 que as distâncias de mobilização das resistências axiais máximas dos ensaios 7, 9 e 12 foram de 74, 149 e 223 mm. Estes resultados correspondem a valores normalizados em relação ao diâmetro de 0,25; 0,50 e 0,75 coincidentes às porcentagens de enterramento dos respectivos ensaios. Observou-se, também, que os valores de resistência axial correspondentes às distâncias de mobilização do *breakout* foram de 0,79; 0,88 e 3,54 kN respectivamente.

Apresentam-se na Figura 6.39 as trajetórias das forças verticais e axiais combinadas que delimitam uma possível superfície de fluência dos ensaios 8, 9 e 11. Em seguida, são mostradas na Figura 6.40 as mesmas superfícies de fluência normalizadas com relação às forças verticais máximas experimentadas durante os ensaios.

Observa-se que o formato das curvas de superfície de fluência de todos os ensaios é aproximadamente parabólico. As forças verticais e axiais que regem a resistência do *breakout* aumentam conforme o incremento do enterramento do duto. Uma comparação das envoltórias de fluência dos ensaios axiais 8, 9 e 11 é apresentada na Figura 6.40, em que as resistências axiais atingiram o pico para os mesmos valores de força vertical de aproximadamente 24% das forças máximas verticais relativas à cravação do duto. As correspondentes forças axiais na ocorrência do *breakout* atingiram valores de 3 a 5% das forças máximas verticais.

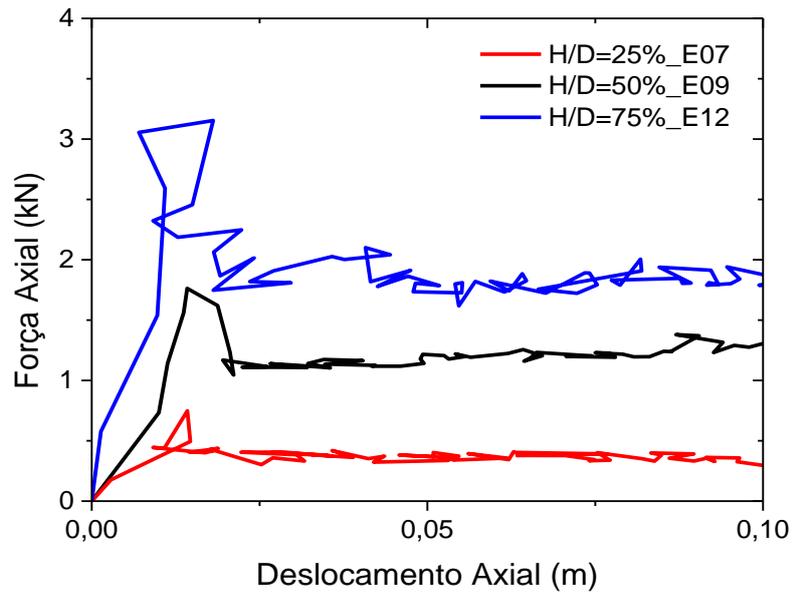


Figura 6.33 – Comparação das forças axiais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios 7, 9 e 12.

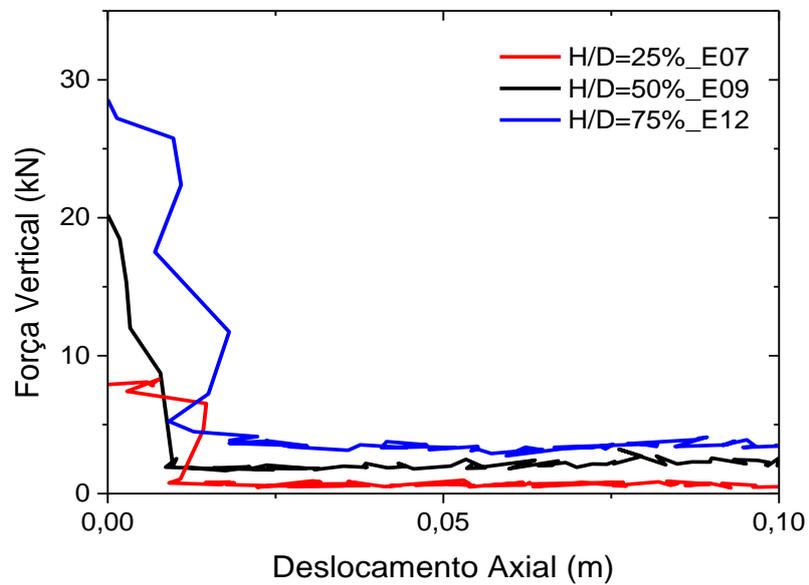


Figura 6.34 - Comparação das forças verticais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios 7, 9 e 12.

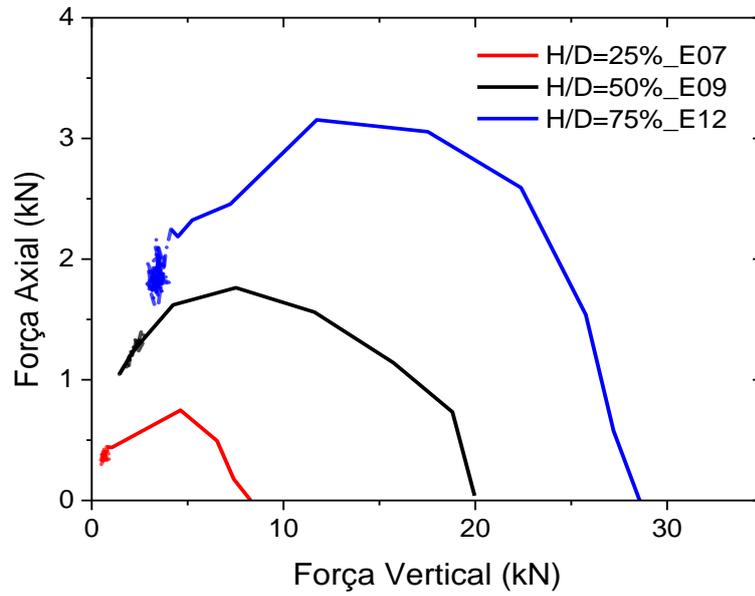


Figura 6.35 - Comparação das Superfícies de fluência dos ensaios 7, 9 e 12.

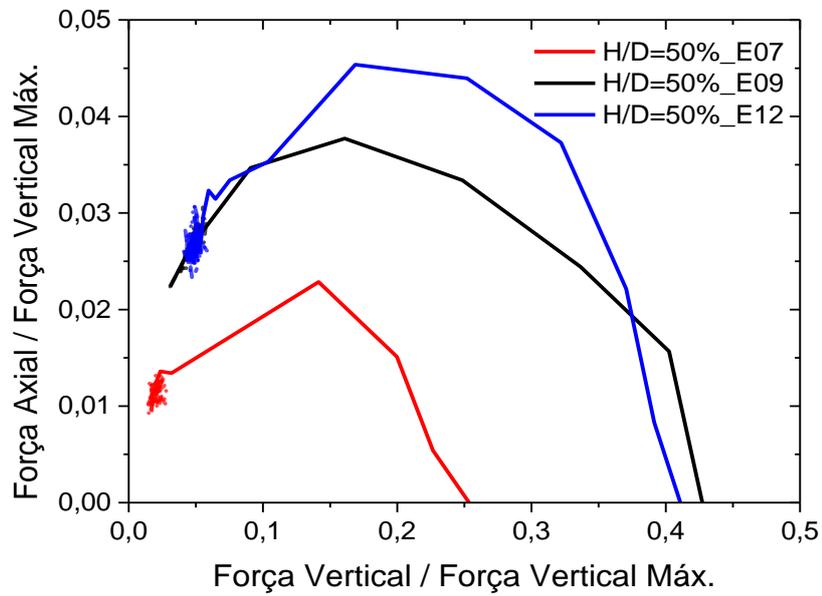


Figura 6.36 - Comparação das Superfícies de fluência normalizadas dos ensaios 7, 9 e 12.

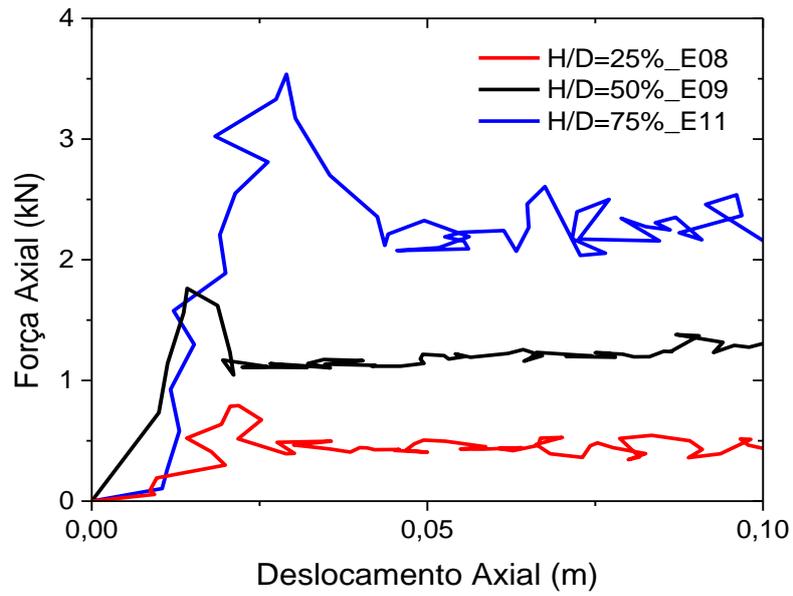


Figura 6.37 - Comparação das forças axiais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios 8, 9 e 11.

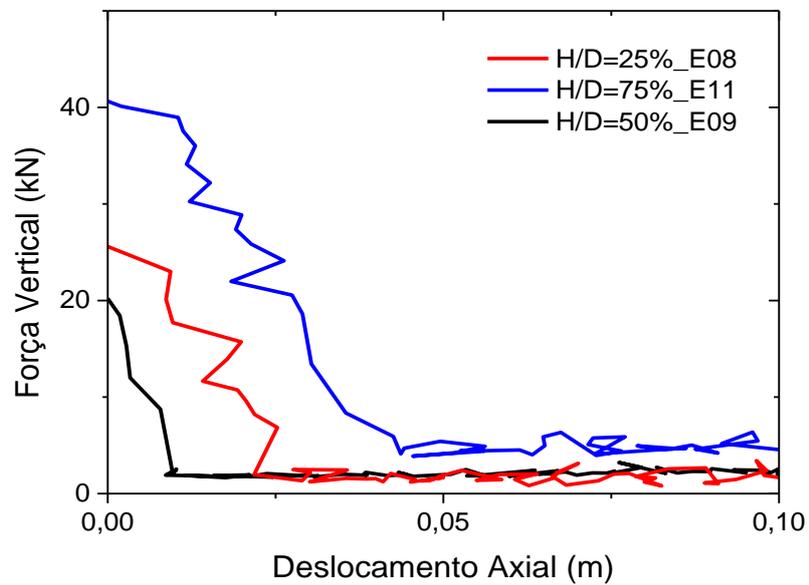


Figura 6.38 - Comparação das forças verticais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios 8, 9 e 11.

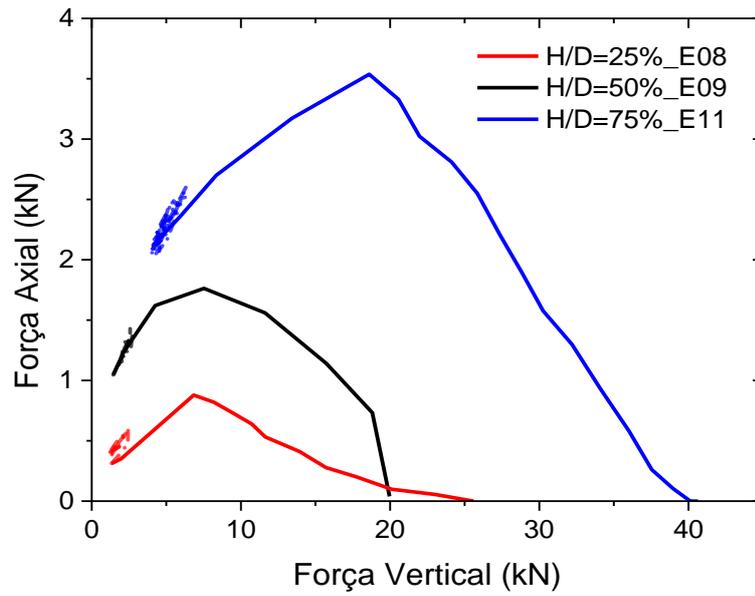


Figura 6.39 - Comparação das Superfícies de fluência dos ensaios 8, 9 e 11.

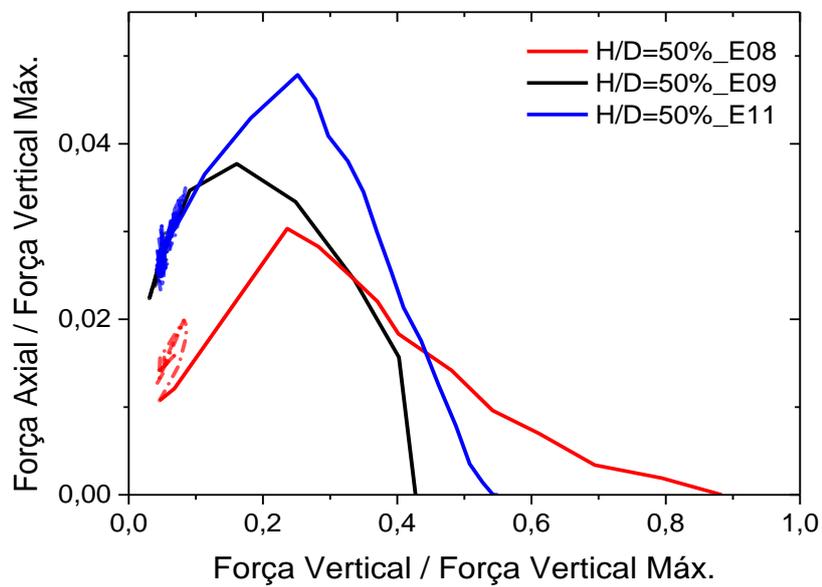


Figura 6.40 - Comparação das Superfícies de fluência normalizadas dos ensaios 8, 9 e 11.