



# 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

## ANÁLISE GEOTÉCNICA DE DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS EM TUBULAÇÕES ENTERRADAS E SEMI-ENTERRADAS.

Talles Moura Mendonça, Aldo Durand Farfán

UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Laboratório de Engenharia Civil, Centro de Ciências e Tecnologia, Av. Alberto Lamego, 2000 – Parque Califórnia – Cep: 28013600, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.e-mail: [tallesmm@uenf.br](mailto:tallesmm@uenf.br), [aldo@uenf.br](mailto:aldo@uenf.br).

**Resumo:** Este trabalho apresenta a continuação de um estudo numérico e analítico do mecanismo de comportamento de tubulações, junto a um teste experimental. O teste experimental, o qual foi realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), reproduz aproximadamente as condições reais de uma tubulação que repousa no fundo marinho, a qual é utilizada para o transporte de óleo e gás das plataformas semi-submersíveis de exploração até os navios de estocagem. Durante o transporte a tubulação de aço é submetida a pressões internas e cargas laterais devido a vibrações das operações de transporte, ações de ondas e correntes marítimas. A condição crítica para a tubulação é verificada durante a operação resultante das ações de cargas horizontais. As soluções (analíticas e numéricas) discutidas aqui tratam do estudo do comportamento de tubulações submetidas a tal condição.

O método de análise limite foi utilizado na determinação de uma solução analítica e numérica. Também foi utilizada como simulação numérica, Método de Elementos Finitos (MEF), através do programa PLAXIS. O critério de deformação foi definido como: elástico perfeitamente plástico (Mohr-Coulomb), em ambas as análises. A conclusão obtida com este estudo poderá ser utilizada na previsão de futuros comportamentos de tubulações enterradas e semi-enterradas.

**Palavras-Chave:** tubulações, método de elementos finitos (MEF), método de análise limite.

**Abstract.** *This work presents a continuation of an analytic and numeric study of the mechanical behavior of a pipeline, together with an experimental test. The experimental test, which has been carried out by the Institute of Technological Researches of São Paulo (IPT), reproduces closely, the real conditions of a pipeline lying in the sea bed, transporting oil from the exploitation semi-submersible platforms to the stock ships. During the operation the steel pipeline is submitted to internal pressure and lateral loads from vibrations of transport, waves and sea currents. The critical conditions during the operation of pipelines result from lateral loads. The solutions (analytic and numeric) discussed hereafter treat the study of the behavior of pipelines when submitted to those conditions. Limit analysis method has been used to find out the analytic and numerical solution and also the numeric simulation is performed using Finite Elements Method (FEM) through the PLAXIS program. Elastic perfectly plastic yield criterion (Mohr-Coulomb) is used in both analyses. The conclusions drawn from this study can be used to foresee futures behaviors of other load states.*

**Keywords:** Pipelines, MEF Analysis, Limit Analysis Method.

## 1. Introdução

O presente trabalho mostra resultados preliminares do estudo do comportamento de dutos enterrados. O estudo trata da avaliação e comparação de dois métodos de resolução: o método de análise limite numérica (ALN) e método de elementos finitos (MEF). O problema escolhido para a aplicação destes dois métodos é um ensaio experimental realizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) em 1999, o qual, foi descrito por Rosas (2001). Este ensaio reproduz aproximadamente as condições reais de uma tubulação que repousa no fundo marinho, a qual é utilizada para o transporte de óleo e gás das plataformas de exploração até os navios de estocagem.

O transporte de óleo e gás das plataformas de exploração semi-submersíveis, até as unidades de armazenamento (navios) é realizado através de dutos, os quais são formados por dois tipos: dutos rígidos em catenária (Risers Rígidos) e dutos sub-horizontais que repousam no leito marinho. Estas últimas tubulações cobrem grandes distâncias e encontram-se submetidas à ação de cargas ambientais, tais como ondas e correntes marinhas; e cargas operacionais, tais como flambagem por dilatação térmica e vibrações (Rosas, 2001).

## 2. Análise física experimental

O modelo físico foi realizado em escala real no laboratório, considerando os efeitos num metro de tubulação para o qual foi utilizado uma caixa de ensaio de 1,5m de comprimento por 1,0m de altura e 1,0m de profundidade, preenchida de solo retirado do fundo do mar, em águas profundas *offshore*.

O ensaio no IPT consiste em um duto rígido de 12cm de diâmetro externo, 9cm de diâmetro interno e 0,95m de comprimento, apoiado no solo em duas posições distintas de enterramento, com 50% e 100% do diâmetro enterrado. O duto foi submetido a cargas laterais (horizontais) aplicadas através de um sistema de cargas controladas, acompanhado da leitura de deslocamentos.

## 3. Resolução através do método dos elementos finitos

As condições básicas necessárias para a resolução de problemas de engenharia segundo a mecânica dos corpos deformáveis são: as equações de equilíbrio, as equações de compatibilidade e as relações tensão-deformação. A formulação do método dos elementos finitos se baseia no equacionamento destas relações.

A aplicação do método convencional dos elementos finitos ao tipo de análise (tensão-deformação) foi através do programa comercial PLAXIS, considerando elementos finitos triangulares formados por 6 nós. (O Este programa permite a simulação de cinco diferentes comportamentos mecânicos, tais como: Mohr-Coulomb, Linear Elástico, materiais com endurecimento, materiais com amolecimento e materiais com comportamento dependentes do tempo "Creep") (Durkee e Wythes, 2001 e Brinkgreve, 1998).

Em função do tipo de solo e do tipo de carregamento imposto pelo duto sobre o solo marinho, considerou-se um carregamento não drenado, ou seja, para o solo argiloso o carregamento é aplicado muito rapidamente sem que haja tempo para ocorrer drenagem. Para o modelo elástico perfeitamente plástico adotou-se o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

As propriedades do solo e do duto foram obtidas do trabalho de Rosas (2001). As tabelas 1 e 2 apresentam estas propriedades assim como dados da geometria do ensaio experimental realizado.

Tabela 1. Parâmetros do solo (Argila Marinha)

Peso Específico dos Sólidos ( $\gamma_s$ )	27,63 kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico Saturado ( $\gamma_{sat}$ ) *	16,67 kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico Aparente Seco ( $\gamma_d$ ) *	10,46 kN/m <sup>3</sup>
Umidade (h)	59,4 %
Cisalhamento não-drenado (Su)	3 kN/m <sup>2</sup>
Módulo de Elasticidade (E) ( $E \approx 550Su$ )	1650 kN/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )*	0,49

Tabela 2: Parâmetros da tubulação (Riser Rígido)

Peso específico	0,261 kN/m <sup>3</sup>
Módulo de Elasticidade do Aço (E)	2,1E+08 kN/ m <sup>2</sup>
Momento de Inércia (I)	6,95E-6 m <sup>4</sup>
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,33
Diâmetro do duto (externo)	0.12 m

Na Figura 1, são apresentados os campos de deslocamentos obtidos pelo programa PLAXIS. Os mecanismos de ruptura definidos por estes vetores mostram que o deslocamento da tubulação é através de uma trajetória aproximadamente circular (superfície de ruptura).

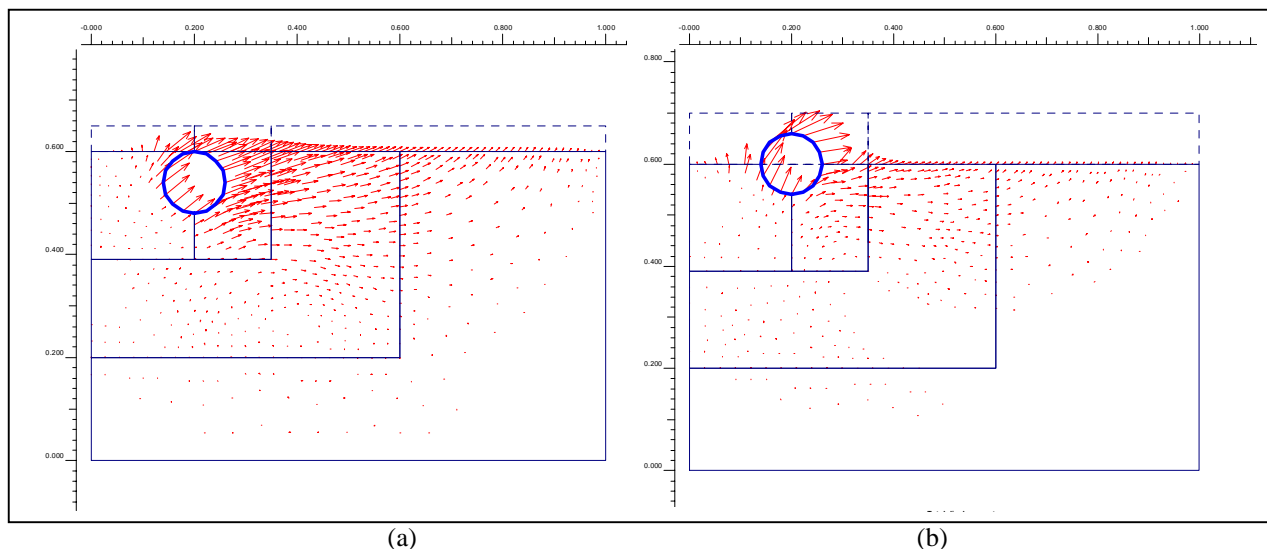


Figura 1 – Campo de deslocamentos obtido pelo programa PLAXIS. a) Com embutimento de 100%D. b) Com embutimento de 50%D.

#### 4. Resolução através do método da Análise Limite Numérica ( ALN )

O método da análise limite considera a relação tensão-deformação dos solos de forma idealizada, pressupondo um fluxo plástico associado (Finn, 1967 e Chen e Lui, 1990). Esta suposição permite a demonstração dos teoremas limite. Os teoremas limite (teoremas do limite superior e inferior) aplicados convenientemente a problemas geotécnicos de estabilidade (ex: problemas de capacidade de carga, estabilidade de taludes, etc.), servem para obter soluções aproximadas que se aproximam tanto pela região superior ou inferior à carga de colapso da estrutura analisada. Durand (2000) mostra a formulação numérica da análise limite, para o qual utiliza uma malha de elementos finitos e relações matemáticas derivadas dos teoremas superior e inferior.

Para análise numérica através deste método foi utilizado o programa LIMAG (Limit Analysis for Geotechnics), desenvolvido por Durand (200) na Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro.

Do ponto de vista matemático, o problema formulado pela análise limite é definida como um problema de otimização que busca determinar a carga de colapso do sistema. Assim, o problema de otimização da análise limite passa a ser resolvido por meio de técnicas de programação matemática (Durand 2000).

Na otimização foi utilizado o programa MINOS, o qual é utilizado para resolver problemas de otimização com restrições não-lineares. Foi utilizado o pré-processador e pós-processador MTOOL e MVIEW respectivamente para a visualização da malha de elementos finitos bem como os resultados após aplicação de carregamento, como pode ser visto na Figura 2.

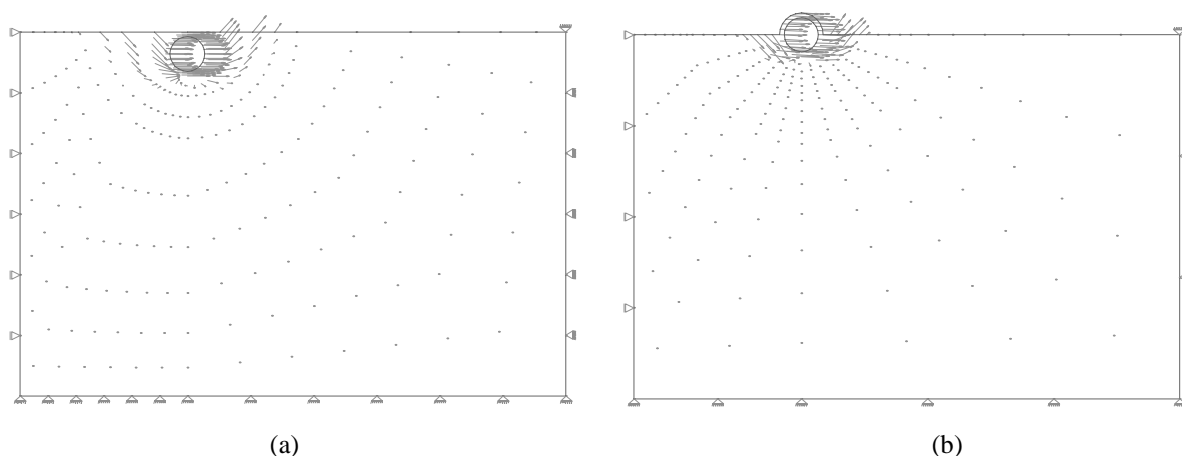


Figura 02 - Campo de velocidades através do programa LIMAG. a) Com embutimento de 100%D. b) Com embutimento de 50%D.

## 5. Resolução analítica

Dada a simplicidade do problema e a homogeneidade do material, a superfície de ruptura será aproximadamente circular (campo cinemático previsível). Portanto, uma possível solução analítica para o problema pode ser a aplicação do teorema superior da análise limite, o qual é definido como:

O fator de carga de colapso determinado pela igualdade da taxa de trabalho externo e a taxa de dissipação interna de um campo de velocidades cinematicamente admissíveis ( $\dot{\mathbf{u}}$ ), ou seja, que satisfaz: (a) A condição de contorno em velocidades; e (b) a relação de compatibilidade entre deformação e velocidade, não é menor que o fator de carga de colapso da estrutura (Finn, 1967).

Para obter uma solução analítica através do teorema superior da análise limite, foi assumido para cada caso (tubulação enterrada a 100%D e 50%D), campos de deslocamentos/velocidades cinematicamente compatíveis com as condições de contorno figuras 3-b e 4-b. Na avaliação do trabalho realizado pelas forças externas ( $W_{ext}$ ), foram consideradas as forças devidas ao peso do solo mobilizado, peso da tubulação e a força horizontal ( $P_h$ ) ver as figuras 3 e 4. Devido à geometria do problema em estudo, o cálculo da energia de dissipação interna ( $D_{int}$ ) considera somente a energia dissipada ao longo da superfície de ruptura, sendo assumida nula a parcela corresponde à energia de dissipação radial. Da aplicação do teorema do limite superior, a força horizontal necessária para levar o sistema à iminência de ruptura, será determinado da igualdade do trabalho externo com a energia de dissipação interna.

### 5.2. Análise da tubulação a 100%D:

A Figura 3, mostra a geometria do problema analisado, a superfície de ruptura assumida, assim como, todas as grandezas necessárias para a obtenção do trabalho externo e a energia de dissipação interna. A Equação 1 mostra o trabalho externo realizado pelas forças de peso e a força horizontal em questão e a Equação 2, mostra a energia de dissipação na superfície AB “Figura 1-b”.

$$W_{ext} = \langle P_h, -(W_s + W_d) \rangle \left\{ \begin{matrix} V_o \\ V_o \end{matrix} \right\} \quad (1)$$

$$W_{ext} = P_h \cdot V_o - \left( \frac{1}{8} \pi \cdot D^2 \gamma + W_d \right) V_o \quad (2)$$

$$D_{int} = S_u \cdot D \cdot \left( \frac{\pi}{2} \right) \cdot V_o \quad (3)$$

Onde:

$W_d$ : Peso do duto;	$D$ : Diâmetro do duto.	$W_{ext}$ : Trabalho das forças externas.
$W_s$ : Peso do solo;	$\gamma$ : Peso específico do solo.	$D_{int}$ : Energia interna de dissipação.
$S_u$ : Resistência não drenada ao cisalhamento.	$P_h$ : Força horizontal;	
	$V_o$ : Velocidade de deslocamento	

Da igualdade das equações 2 e 3, pode-se obter o valor da carga de ruptura do sistema (Equação. 4):

$$P_h = S_u \cdot D \cdot \left( \frac{\pi}{2} \right) + \left( \frac{1}{8} \pi \cdot D^2 \gamma + W_d \right) \quad (4)$$

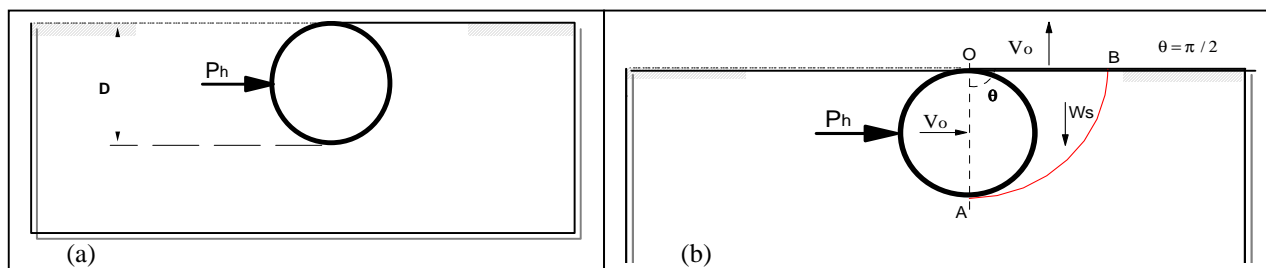


Figura 3 – Tubulação enterrada 100% D. (a) Geometria do problema. (b) Mecanismo de colapso circular e campo de velocidades cinematicamente admissíveis.

### 5.3. Análise da tubulação a 50%D:

De forma similar ao problema com 100%D, a Figura 4, mostra a geometria do problema, a superfície de ruptura assumida, assim como, todas as grandezas necessárias para a obtenção do trabalho externo e a energia de dissipação interna, considerando 50% de enterramento. Nas equações 5 e 8 estão respectivamente as expressões correspondentes ao trabalho externo e a energia de dissipação interna na superfície AB (Fig. 4-b).

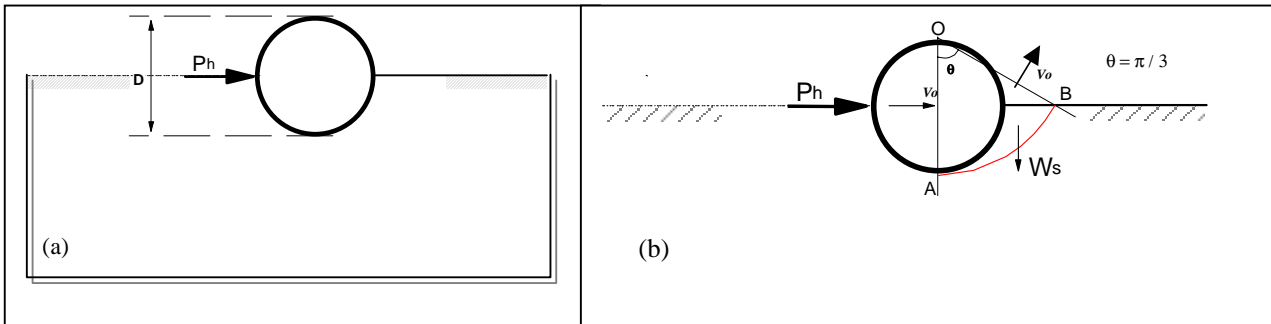


Figura 4 – Tubulação enterrada 50% D. (a) Geometria do problema. (b) Mecanismo de colapso circular e campo de velocidades cinematicamente admissíveis.

$$W_{ext} = \langle P_h, -(W_s + W_d) \rangle \left\{ \begin{matrix} V_o \\ V_o \sin(\theta) \end{matrix} \right\} \quad (5)$$

$$W_{ext} = P_h \cdot V_o - ((0,11) \cdot D^2 \gamma + W_d) \cdot V_o \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (6)$$

$$D_{int} = S_u \cdot D \cdot \left( \frac{\pi}{3} \right) \cdot V_o \quad (7)$$

Igualando as equações (6) e (7), para obter o valor da carga  $P_h$ :

$$P_h = S_u \cdot D \cdot \left( \frac{\pi}{3} \right) + ((0,11) \cdot D^2 \gamma + W_d) \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (8)$$

A Tabela 3 mostra os valores obtidos para as cargas de colapso, para as duas profundidades de enterramento. As cargas de colapso determinadas experimentalmente no IPT são também incluídas nesta tabela para efeitos de comparação.

Tabela 3 – Resultados do Ensaio Físico (IPT) e Análise Limite Analítica.

% D enterrado	Análise Limite (LIMAG)	Análise Limite (Analítico)	Ensaio Físico
	Força (kN)	Força (kN)	Força (kN)
50% D enterrado	0,54	0,57	0,48
100% D enterrado	0,93	0,81	0,98

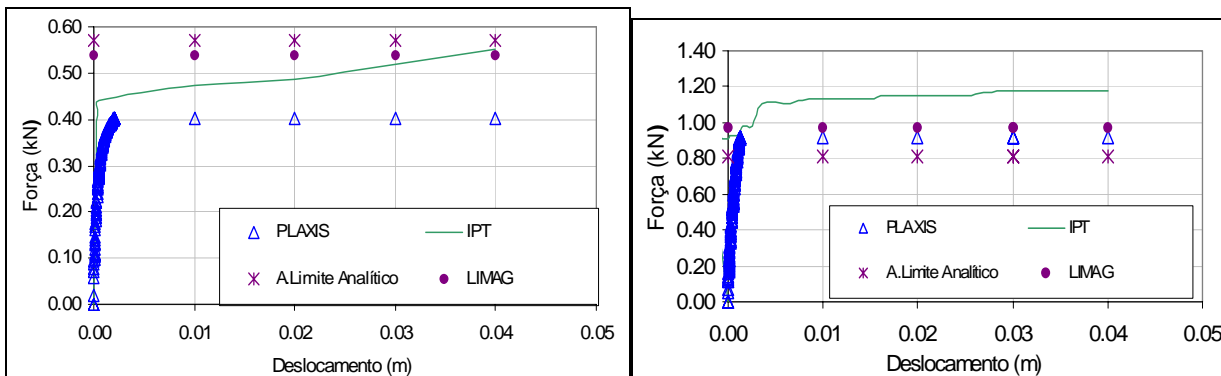
## 5. Conclusões

A Figuras 5 mostra em resumo os resultados obtidos. Nesta figura estão apresentada as curvas carga x deslocamento obtidas tanto experimentalmente, analiticamente e numericamente, para as duas profundidades de embutimento da tubulação de transporte de gás/óleo.

Pode-se concluir que os resultados das análises numérica e analítica mostram-se próximos ao resultado experimental. Destes resultados, nos casos estudados, pode-se afirmar que: a ruptura ocorre pelo material argiloso e não na interface solo-tubulação.

As distintas metodologias aplicadas mostram-se como boas ferramentas na previsão do comportamento da resistência mecânica dos solos à movimentação de tubulações rígidas enterradas e semi-enterradas. Através dessas

previsões pode-se aplicar processos de otimização da tubulação e obter tubos mais econômicos para o processo de transporte.



(a)

(b)

Figura 5 – Comparação dos resultados obtidos através das três metodologias com a curva obtida experimentalmente pelo IPT. a) Análise com 50%D. b) Análise com 100%D (b).

## 6. Referências

- [1] M.M.C. Rosas, “Um estudo numérico e experimental para avaliação da interação solo-duto”, Dissertação M.Sc., PUC-RIO, (2001).
- [2] W.D.L Finn, “Applications of limit Plasticity in soil mechanics”, *Jornal of the Soil mechanics and foundations division*, September, 1967, pp.101-120.
- [3] W.F. Chen and X.L. Liu, “Limit analysis in soil mechanics”, American Elsevier Publishing Company, New York, Vol.52, 1990.
- [4] L. Araújo, “Estudo numérico de problemas de estabilidade em materiais geotécnicos através da análise limite”, Tese PhD., PUC-RIO, (1997).
- [5] A.F. Durand, “Aplicação da análise limite a problemas geotécnicos modelados como meios contínuos convencionais e meios de Cosserat”, Tese PhD., PUC-RIO, (2000).
- [6] B. Joshi, D.B. Durkee, T.J. Wythes, “Finite element modeling of a PE pipe heap leachate collection system”, *Finite Elements in analysis and design* 37 (2001), 979-996.
- [7] R.B.J. Brinkgreve and P.A. Vermeer, “Finite element code for soil and rock analyses, Version 07, A.A. Balkema, Rotterdam, 1998.