

2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO ESTRUTURAL DE DUTOS ENTERRADOS

2.1 Introdução

Para o apoio ao projeto de dutos enterrados são desenvolvidos códigos (normas) e especificações para o sistema solo-duto de tal forma que em funcionamento a estrutura não atinja os limites de execução. A Figura 2.1 apresenta a definição da seção transversal de um duto enterrado.

O limite de execução¹ é a deformação sob a qual o sistema solo-duto não atende mais o propósito para o qual foi projetado. Pode ser uma deformação no solo, tais como inclinação, curvatura ou fratura na superfície do solo sobre o duto, de tal forma que a deformação é inaceitável. A inclinação e a curvatura dependem do adensamento relativo tanto do solo diretamente sobre o duto como do solo nas laterais (ver Fig. 2.2).

Freqüentemente, o limite de execução é a deformação excessiva do duto que ocasiona vazamentos ou restringe a capacidade de fluxo. Se o duto colapsa devido ao vácuo interno ou à pressão hidrostática externa, a interrupção do fluxo é necessária. Por outro lado, se a deformação ocasiona uma pequena deflexão no duto (ovalização do duto), geralmente a restrição do fluxo não é significativa. Por exemplo se a seção transversal do duto fletir para uma elipse de tal forma que a diminuição do menor diâmetro é 10% do diâmetro circular original, a diminuição na área da seção transversal é de somente 1%.

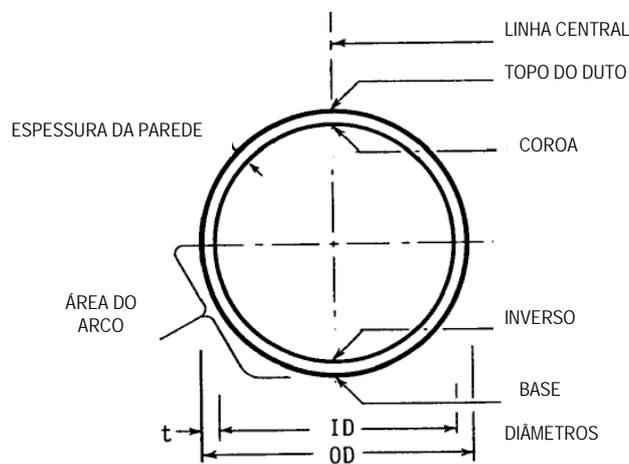
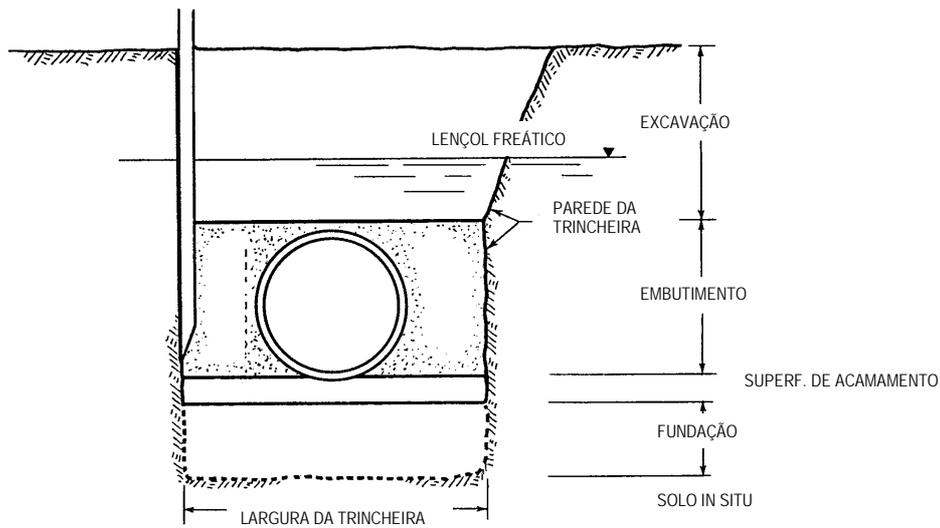


Figura 2.1 – Esquema da definição da seção transversal de dutos enterrados

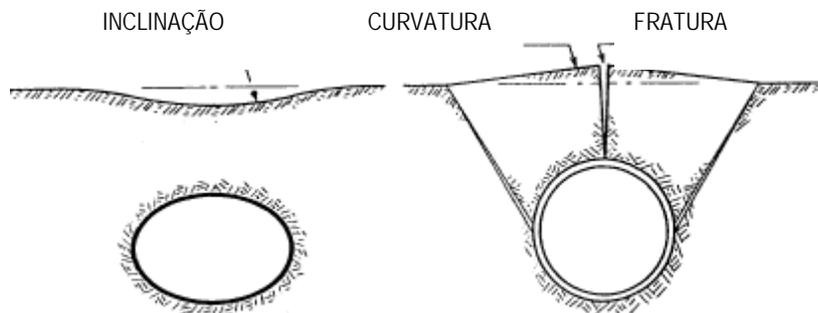


Figura 2.2 – Possíveis limites de execução do sistema solo-duto¹

O limite de execução mais comum para um duto é a deformação na qual o duto não pode resistir a qualquer acréscimo de carga. O mais óbvio é o caso do rompimento de um duto devido à pressão interna e o menos óbvio e mais complicado é a deformação devido à pressão externa do solo. Na Fig. 2.3 mostram-se exemplos de limites de execução para o duto. Estes limites de execução não implicam em colapso ou ruína. É possível que, o solo absorva qualquer acréscimo de carga pela ação de arqueamento ao duto, protegendo assim o duto do colapso total. O duto pode até mesmo continuar em serviço, mas geralmente não se considera explicitamente a ação do solo para preservar a seção transversal do duto. Qualquer contribuição do solo para resistir a pressões externas pela ação de arqueamento é tratada como uma reserva de segurança.

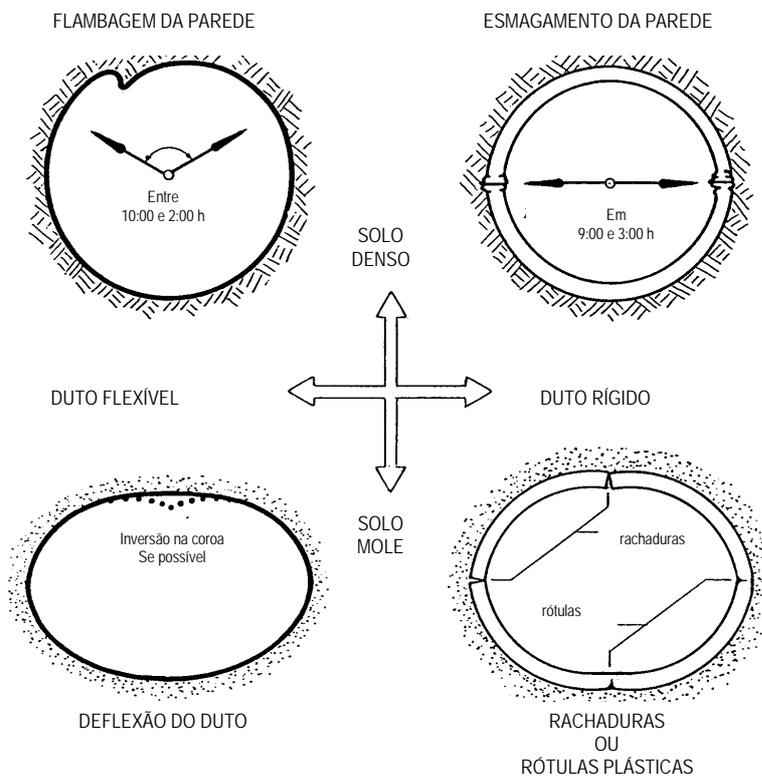


Figura 2-3 – Limites de Execução do duto enterrado devido à pressão externa do solo¹

No projeto estrutural de dutos enterrados são considerados os estados a seguir: a) resistência à pressão interna, isto é, resistência dos materiais e a espessura mínima da parede do duto; b) resistência para o transporte e instalação, isto é, máxima carga admissível no duto; c) resistência à pressão externa e ao

vácuo interno, isto é, a rigidez do anel e a resistência do solo; d) deflexão do anel, isto é rigidez do anel e a rigidez do solo; e) tensões longitudinais e deflexões; f) verificações adicionais referentes à flutuação do duto, cargas de construção, técnicas de instalação, etc.

Os primeiros três estados lidam com a resistência às cargas. Cargas no duto enterrado podem ser complexas, especialmente quando acontece a ovalização do duto. A análise pode ser simplificada se adotada uma seção transversal como circular. Para dutos rígidos, a deflexão é desprezível. Para dutos flexíveis, as deflexões do anel são geralmente limitadas a vários valores não maiores que 5%.

2.2 Pressão Interna

Para o cálculo da menor área da parede do anel por unidade de comprimento, considera-se o diagrama de corpo livre da metade do duto com pressão interna devido ao fluido (ver Fig. 2.4). A força máxima de ruptura é $P'(ID)$, onde P' é a pressão interna e ID é o diâmetro interno. Esta força de ruptura é resistida pela tensão de tração na parede do duto. Igualando a força de ruptura e a força resistente, onde A é a seção transversal do duto, obtém-se:

$$\sigma = \frac{P'(ID)}{2A} \quad (2.1)$$

O limite de execução é atingido quando a tensão σ é igual à força de escoamento S . Para o projeto, a força de escoamento da parede do duto é reduzida pelo fator de segurança sf . Assim,

$$\sigma = \frac{P'(ID)}{2A} = \frac{S}{sf} \quad (2.2)$$

Esta é a equação básica para o projeto do duto para resistir a pressão interna. Aplica-se com adequada precisão a dutos de parede fina, onde a razão $D/t \gg 0$; onde D é o diâmetro médio e t é a espessura da parede do duto.

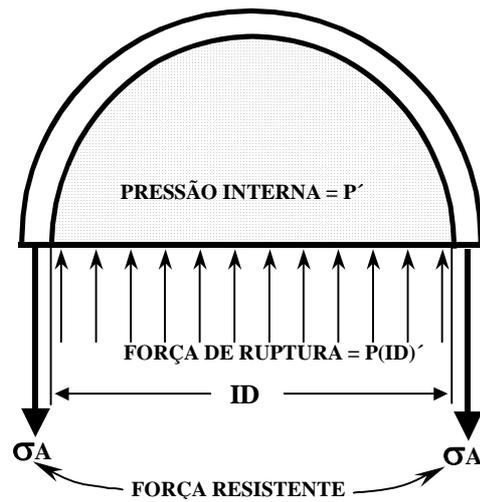


Figura 2.4 - Diagrama de corpo livre da seção transversal (metade) incluindo pressão interna

2.3 Transporte/Instalação

A carga mais comum imposta ao duto durante o seu transporte e instalação é a carga diametral F . Esta carga ocorre quando os dutos são empilhados ou quando o solo é compactado nas laterais ou no topo dos dutos (ver Fig. 2.5).

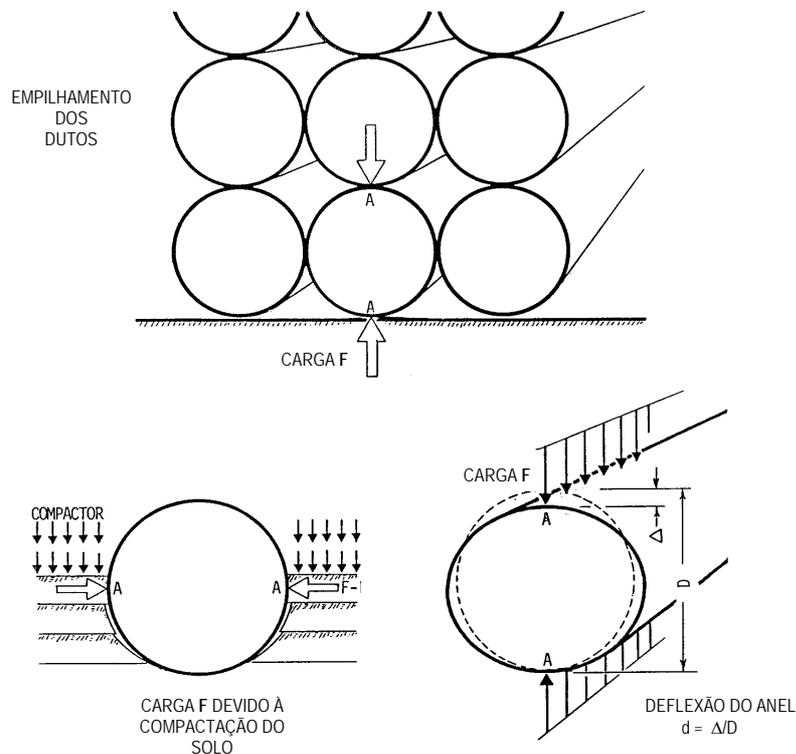


Figura 2.5 – Cargas mais comuns nos dutos devido ao transporte/instalação¹

Se a tensão de escoamento do material é excedida devido à carga F , o duto pode fissurar ou a seção transversal do duto deformará de forma permanente podendo uma dessas situações ser inaceitável. Os fabricantes de dutos limitam a carga F em função da deflexão máxima admissível do anel,

$$d = \frac{\Delta}{D} \tag{2.3}$$

onde Δ é a redução do diâmetro D devido à carga F .

Assim, duas análises são necessárias para o transporte e instalação, com dois limites de execução: força de escoamento e deflexão do anel (ver Fig. 2.6). Em geral, a força de escoamento é limitante para dutos rígidos (dutos de concreto) e a deflexão do anel para dutos flexíveis (ver Fig. 2.7).

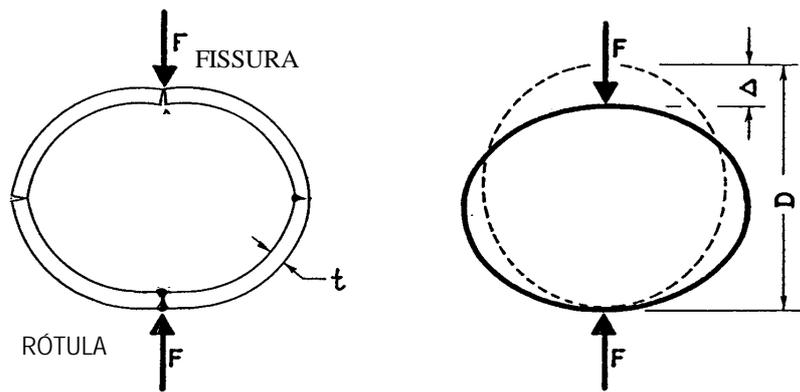


Figura 2.6 - Diagramas de corpo livre do duto: rígido e flexível sujeito à força F.

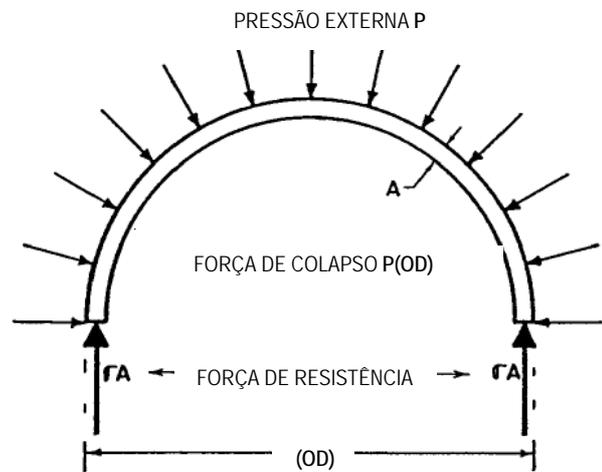


Figura 2.7 - Diagrama de corpo livre da seção transversal (metade) incluindo pressão externa

2.4 Deformações do Anel

A deformação no anel do duto ocorre sob qualquer carga. Para a maioria das análises de dutos enterrados, esta deformação é tão pequena que pode ser desprezada. Porém, para algumas análises a deformação do anel tem que ser considerada. Este é o caso da instabilidade do anel, o colapso hidrostático do duto devido ao vácuo interno ou pressão externa. O colapso pode ocorrer mesmo que a tensão não tenha atingido a tensão de escoamento, mas ele pode ocorrer quando o anel se deforma. Análises de colapso requerem um conhecimento da seção transversal do anel deformado.

Para pequenas deflexões do anel de um duto circular enterrado, a seção transversal defletida é uma elipse. Considerando-se um meio infinito (solo) com um círculo imaginário, se o solo é compactado (deformado) uniformemente numa direção, o círculo torna-se uma elipse. Supondo que esse círculo imaginário seja um anel flexível, quando o solo é compactado, o anel deflete com a forma aproximada de uma elipse com pequenos desvios. Se a circunferência do anel permanece constante, a elipse tem que se expandir para fora, dentro do meio, aumentando as tensões compressivas entre o anel e o meio e assim o anel torna-se um ponto rígido no meio. Por outro lado, se a circunferência do anel é reduzida, o anel torna-se um ponto frágil e a pressão de contato entre o anel e o solo é diminuída. Em qualquer caso, a deformação básica de um anel enterrado é uma elipse com pequenas modificações relativas às diminuições nas áreas dentro ou fora do anel. A seção transversal é também afetada pela não uniformidade do solo (como mostrado na Fig. 2.8).

2.5

Deflexão do anel devido à pressão interna

Quando o anel é sujeito à pressão interna uniforme, o duto expande. O raio aumenta. A deflexão do anel é igual ao aumento do raio em percentagem, assim,

$$d = \frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta D}{D} = \frac{2\pi r \varepsilon}{2\pi r} = \varepsilon \quad (2.4)$$

onde d é a deflexão do anel (percentagem); Δr e ΔD são acréscimos devido à pressão interna; r é o raio médio; D é o diâmetro médio; ε é a deformação; E é o módulo de Elasticidade e σ é a tensão circunferencial, com $\sigma = E\varepsilon = Ed$

Se:

$$\sigma = \frac{P'(ID)}{2A} \quad (2.5)$$

Então:

$$d = \frac{P'(ID)}{2AE} \quad (2.6)$$

2.6

Pressão Vertical do solo (P)

Para a análise e projeto de dutos enterrados, a pressão externa do solo tem que ser conhecida (ver Fig. 2.10). A pressão vertical do solo no topo do duto é ocasionada por:

- a) a carga permanente correspondente ao peso do solo no topo do duto (P_d);
- b) as cargas acidentais correspondentes às cargas da superfície (P_l).

Assim:

$$P = P_d + P_l \quad (2.7)$$

onde P é a pressão vertical total do solo no topo do duto.

Se o solo circunvizinho ao duto é densamente compactado, a pressão vertical do solo no topo do duto é reduzida pela ação do arqueamento do solo sobre o duto, caso contrário esta pressão vertical do solo pode aumentar pelas concentrações de pressão devida à área de relativamente baixa compressibilidade a uma distância do anel em solo folgado compressível. Para projeto, é necessário

que seja especificado ou o fator de concentração de pressão ou a densidade mínima do solo. Para um longo período de tempo, as concentrações de pressão no duto podem ser reduzidas pela deformação na parede do duto (dutos plásticos).

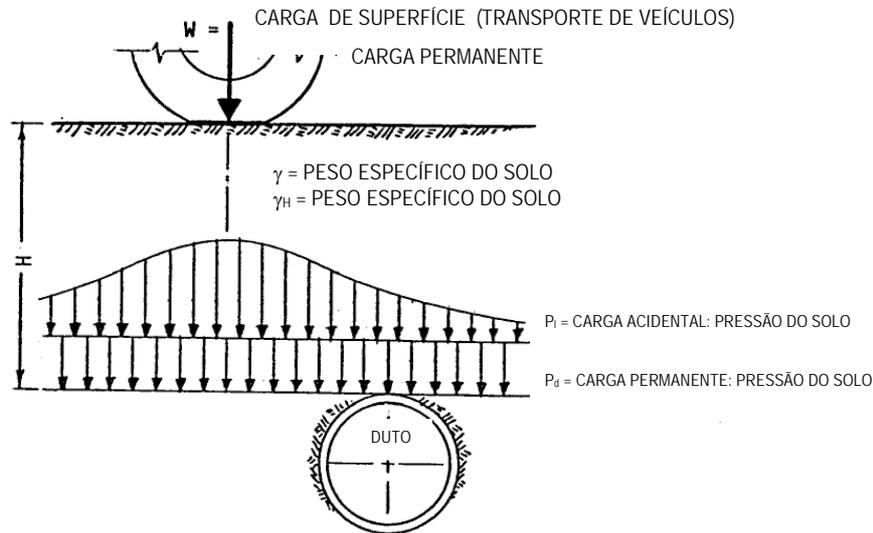


Figura 2.10 – Pressão vertical do solo no nível do topo de um duto enterrado (P)

2.7 Resistência do solo

A falha de um duto enterrado está muitas vezes associada com a falha do solo no qual o duto está embutido. Para a análise é usualmente empregado o modelo clássico bidimensional de resistência ao cisalhamento. O modelo compreende três elementos: círculo de tensões; diagrama de orientação e envoltórias de resistência.

2.8 Mecanismos do Duto

No projeto de dutos enterrados as simplificações adotadas são justificadas devido às inevitáveis imprecisões tais como a variação da geometria, a não uniformidade do solo e a indeterminação das cargas. A análise longitudinal e a análise do anel (transversal) são consideradas de forma independente uma da outra. Cargas concentradas são o pior caso de carga, porque, de fato, as cargas são distribuídas sobre uma área finita. A instabilidade do anel é o pior caso de análise

de colapso porque a instabilidade é reduzida pela interação da rigidez do anel com a rigidez longitudinal.

2.8.1 Análises longitudinais

As análises longitudinais básicas são a axial e a de flexão. A análise axial considera os efeitos longitudinais de mudanças de temperatura, tensão catenária, empuxo nas válvulas e joelhos e o efeito Poisson da pressão radial. A análise de flexão considera o efeito longitudinal de curvatura da viga. Estas análises longitudinais da viga de dutos enterrados seguem os procedimentos clássicos. Comprimentos de seções de dutos são limitados pelo fabricante para prevenir a irregularidade longitudinal.

2.8.2 Análise do anel: tensão, deformação e estabilidade

A análise do anel compreende a análise de tensão, deformação e estabilidade da seção transversal. A teoria da tensão fornece uma análise aceitável para anéis rígidos e a teoria de deformação fornece uma melhor análise para dutos flexíveis. A tensão circunferencial compreende: tensão decorrente da compressão do anel e a tensão decorrente da deformação do anel. A análise da tensão circunferencial é análoga à análise da tensão de uma coluna curta com uma carga excêntrica (ver Fig. 2.11).

Usualmente, para um anel flexível, o controle da deformação é melhor opção comparada ao controle da pressão do solo. Quando é necessário prever a deformação do anel, a deformação básica do anel do duto circular enterrado é de círculo para elipse.

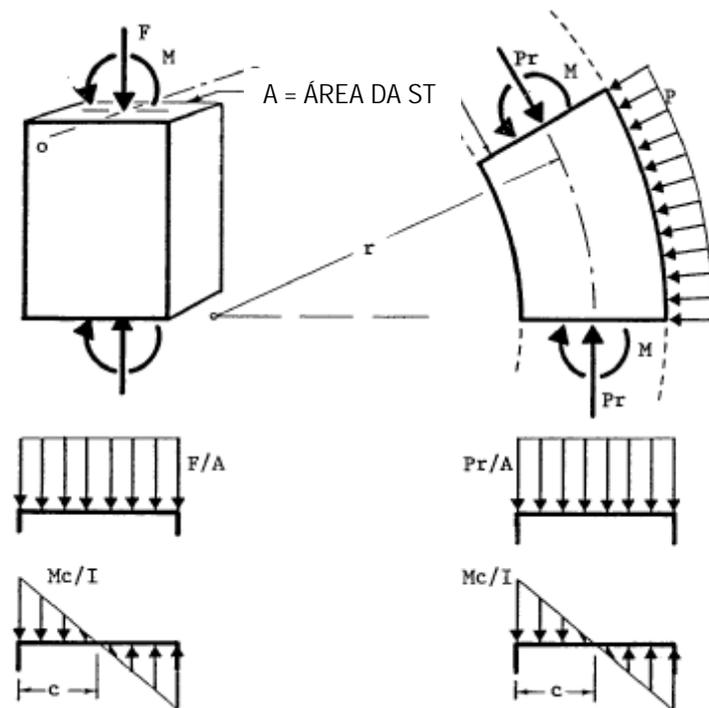


Figura 2.11 – Comparação da análise de tensão: coluna curta x anel de duto

A estabilidade do anel é função da resistência a deformações progressivas devidas a cargas freqüentes. Estas cargas podem ser causadas por pressões internas, carregamento na viga ou pressão externa. A ruína é repentina e catastrófica. A falha associada à pressão interna é dada pela ruptura. O diâmetro do anel aumenta enquanto que a espessura da parede diminui. A falha ocasionada pelo carregamento da viga se dá por fratura ou flambagem do duto sempre que a curvatura provocada pelo momento é excessiva. A falha devida à pressão externa é o colapso. O termo instabilidade, freqüentemente implica em colapso devido à pressão externa P (ver Fig. 2.12). Se o duto é enterrado (restrito lateralmente), o solo de suporte tem um efeito predominante na estabilidade. A pressão no duto não é uniforme. Além disso, o duto enterrado sofrerá uma ovalização.

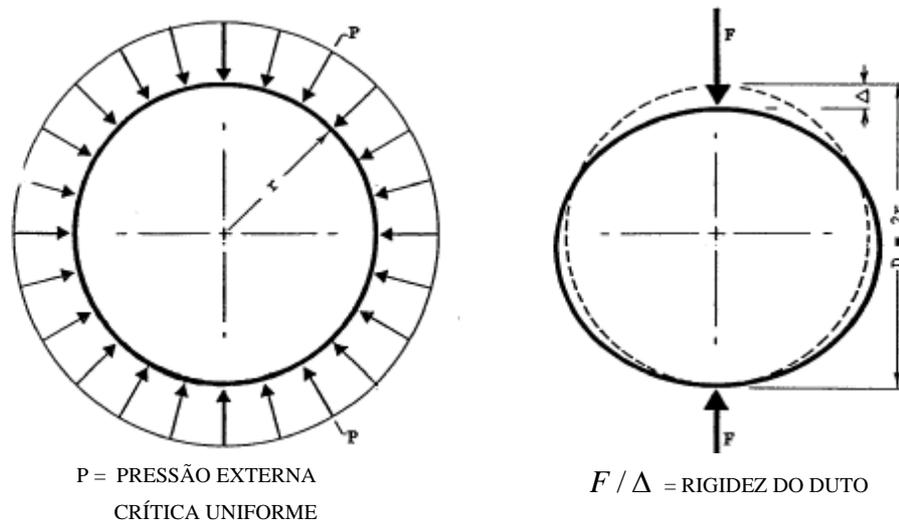


Figura 2.12 – Colapso de um anel circular flexível devido à pressão externa baseado na rigidez do duto

2.9 Mecanismos Longitudinais

Mecanismos longitudinais de dutos enterrados referem-se às análises de deformações longitudinais comparados aos limites de execução de deformação. As principais causas da tensão longitudinal são: 1) mudanças na temperatura e na pressão, que ocasionam o alongamento e o encurtamento relativos do duto em relação ao solo e restrições de empuxo; 2) empuxo axial, que é o resultado da pressão interna ou do vácuo nas válvulas, diafragmas, redutores, etc.; 3) curvatura da viga, que ocasiona tensões de flexão. As possíveis causas da curvatura da viga podem ser entre outras, a disposição das seções do duto sobre madeiras, deslizamentos, movimentos massivos ou assentamentos do solo.

Cada uma das três causas da tensão longitudinal é analisada individualmente. Os resultados são combinados para a análise.