

3 Critérios de avaliação

3.1.Geral

Na engenharia, projetos que precisam ter sua confiabilidade garantida são submetidos à certificação de terceiros através do uso de diversas normas disponíveis no mercado. Isto se tornou uma exigência básica dos clientes que contratam empresas prestadoras de serviço, como forma de melhorar e nivelar a qualidade do trabalho oferecido pelas mesmas.

As seções seguintes visam apresentar e avaliar alguns dos critérios de normas e outras referências disponíveis. A avaliação destes está direcionada para a aplicação de efeitos de flambagem localizada.

3.2.DNV OS-F101 – Flambagem localizada com deslocamento controlado

Atualmente a DNV OS-F101 (2000) é a norma mais utilizada no mercado brasileiro. Esta norma possui um conteúdo atualizado com forte embasamento científico. No entanto, outras normas como API RP 1111 (1999) e BS 8010 (1993) são bastante utilizadas no mercado internacional. Na finalização deste trabalho, a DNV ainda não havia emitido a revisão 2007 da norma acima citada.

A DNV apresenta na OS-F101 (2000) duas possibilidades de critérios de avaliação da flambagem localizada em dutos. Os critérios são de carregamento controlado (“Load controlled condition”) e deslocamento controlado (“Displacement controlled condition”). Para análises que envolvem enrolamento de dutos, a DNV (2000) orienta que seja utilizado o critério de carregamento combinado com deslocamento controlado. A razão desta orientação é dada pelo fato de que o processo de enrolamento descreve um deslocamento controlado determinado através da curvatura fixa do carretel e dos demais componentes envolvidos no processo dentro da embarcação PLSV. A formulação de carregamento controlado refere-se a dutos sujeitos a forças axiais efetivas,

momentos devido à flexão e pressões internas ou externas. A carga efetiva mencionada é resultante dos esforços axiais no duto durante a sua instalação offshore. Portanto, este critério de avaliação não deve ser o aplicado ao processo de enrolamento.

O critério de deslocamento controlado é baseado na equação (11) que calcula o valor da deformação característica “ ε_c ”.

$$\varepsilon_c = 0.78 \cdot \left(\frac{t}{DE} - 0.01 \right) \cdot \left(1 + 5 \frac{\sigma_h}{S_y} \right) \cdot \alpha_h^{-1.5} \cdot \alpha_{gw} \quad (11)$$

Onde:

$$\sigma_h = \Delta p_d \cdot \left(\frac{DE - t}{2 \cdot t} \right) \quad (12)$$

e:

- α_h = Razão entre tensão de escoamento e ruptura
- α_{gw} = Fator de solda circumferencial
- Δp_d = Pressão diferencial de projeto

A deformação característica “ ε_c ”, segundo a DNV (2000), representa a deformação do limite plástico do duto. Valores superiores implicam na flambagem localizada do duto.

Como no processo de enrolamento, o duto não está sujeito a diferenciais de pressões “ Δp_d ”, o termo σ_h se torna igual a zero. Desta forma, a equação (11) pode ser reescrita especificamente para estudos de enrolamento. A equação reduzida está apresentada abaixo.

$$\varepsilon_c = 0.78 \left(\frac{t}{DE} - 0.01 \right) \cdot \alpha_h^{-1.5} \cdot \alpha_{gw} \quad (13)$$

A DNV (2000), no critério de deslocamento controlado, indica uma verificação de projeto em relação a “ ε_c ”, como indicado na equação seguinte.

$$\varepsilon_d \leq \frac{\varepsilon_c}{\gamma_\varepsilon} \quad (14)$$

Este critério é válido para relações DE/t menores ou iguais a 45. “ γ_ε ” é o fator de resistência à deformação e pode ser considerado como um fator de segurança.

Neste trabalho os valores de deformação longitudinal provenientes de cálculos analíticos e de análises de elementos finitos são comparados com o valor da deformação admissível “ ε_{adm} ”. O valor desta deformação é calculado a partir da definição da deformação de projeto “ ε_d ”, apresentada na equação seguinte.

$$\varepsilon_d = \varepsilon_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C + \varepsilon_E \cdot \gamma_E + \varepsilon_A \cdot \gamma_A \cdot \gamma_C \quad (15)$$

Como para o processo de enrolamento o duto não está sujeito à carregamentos ambientais e acidentais, os termos de deformação com índices “E” (ambientais) e “A” (acidentais) têm seus valores igualados a zero. Os termos “ γ ” são fatores de ajuste da formulação da DNV (2000) e estão vinculados aos tipos de carregamentos aplicados. A equação da deformação de projeto fica reduzida, como apresentado a seguir.

$$\varepsilon_d = \varepsilon_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C \quad (16)$$

O termo de deformação funcional “ ε_F ”, para o processo de enrolamento refere-se somente as deformações longitudinais que ocorrem devido a flexão do duto. Portanto pode ser afirmado que:

$$\varepsilon_{adm} = \varepsilon_F \quad (17)$$

Reorganizando a equação (16) e substituindo “ ε_F ” a partir da equação (17), o valor da deformação admissível pode ser definido como:

$$\varepsilon_{adm} = \frac{\varepsilon_d}{\gamma_F \cdot \gamma_C} \quad (18)$$

Substituindo a equação (14) na (18), o valor de “ ε_{adm} ” é reescrito.

$$\varepsilon_{adm} = \frac{\varepsilon_C}{\gamma_\varepsilon \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C} \quad (19)$$

Portanto, definem-se as relações seguintes como valor de critério dos resultados obtidos nos cálculos analíticos e através do método de elementos finitos.

$$\varepsilon_{analítico} \leq \varepsilon_{adm} \text{ e } \varepsilon_{FEA} \leq \varepsilon_{adm} \quad (20)$$

Para o método de enrolamento, alguns fatores apresentados possuem valores definidos e serão utilizados ao longo do desenvolvimento do trabalho.

O fator de condição de efeito de carga “ γ_C ” é referente ao tipo de superfície a qual o duto irá se acomodar. Para processos de enrolamento este valor é igual a 0.82.

O fator de efeito de carregamento para cargas funcionais “ γ_F ” é aplicado como segurança junto aos carregamentos funcionais. O seu valor é definido através do estado limite do duto. Este é o ponto onde a estrutura do duto não mais atende aos requisitos especificados. Caso os carregamentos sejam superiores ao valor permitido, o duto tem sua integridade estrutural comprometida. Desta forma, de acordo com a DNV OS-F101 (2000) seção 5 D100, esta característica se enquadra no Estado Limite Último (“Ultimate Limit State – ULS”). De acordo com a tabela 5-6 da DNV (2000) existem duas classificações possíveis para esta condição denominadas de “a” e “b”. Existe uma discussão sobre qual valor utilizar, pois este item não está apresentado de forma clara na norma. Na seção 5 D302 é dito que fator relativo à condição de carregamento “a”, não é necessário ser aplicado quando os “efeitos de sistema” estão presentes. Na seção 1 C307, a norma define que “efeitos de sistema” são

relevantes quando muitas seções de dutos estão sujeitas a uma condição de carregamento constante. O processo de enrolamento pode ser interpretado como diversas seções de dutos submetidas a uma curvatura constante, e conseqüentemente a uma deformação constante. Portanto, a condição “a” deveria ser aplicada. No entanto, os efeitos que estão sendo estudados neste trabalho são relativos à deformações localizadas, e possivelmente a condição “b” seria melhor aplicável. Devido a esta dúvida, com o objetivo de obter resultados mais seguros e conservativos para projetos de tubulações será aplicada a condição “a”, cujo valor de “ y_F ” é de 1.2. O valor da condição “a” é mais conservativo que o da condição “b”.

O valor de “ α_h ” representa a relação entre os valores máximos de tensão de escoamento do material e da tensão de ruptura. Dentro de um projeto de engenharia, este valor normalmente é fornecido pelo fabricante dos dutos. A DNV (2000) na seção 6 apresenta valores de acordo com o material utilizado na fabricação dos dutos. Estes estão reproduzidos na Tabela 5. Todos os cálculos deste relatório consideram o material API 5L X60, cujo SMYS é de 415MPa. Para este material, o valor de “ α_h ” a ser considerado é de 0.92. No entanto, na DNV (2000) Seção 6 D300 é informado que para tubos sem costura C-Mn o valor de “ α_h ” não deve exceder 0.85. Observando a equação (13), o valor de “ ϵ_c ” aumenta quando “ α_h ” diminui, pois “ ϵ_c ” e “ α_h ” são grandezas inversamente proporcionais. A Vallourec-Mannesmann, fabricante de dutos rígidos API sem costura apresenta o valor de 0.88. No entanto, isto varia de acordo com as exigências do comprador. Com o objetivo de obter respostas mais conservativas, será adotado ao longo do trabalho o valor de 0.92.

SMYS (MPa) (T+L) ⁽²⁾	SMTS (MPa) (T) ⁽³⁾	$\frac{YS (Rt 0.5)}{UTS (Rm) \max}$ (α_h)(T) ⁽⁴⁾	Notas:
245	370	0.90	1) Os requisitos são aplicáveis para testes nas direções transversal (T) e longitudinal (L) como apresentado entre parênteses em cada coluna.
290	415	0.90	2) A tensão de escoamento atual não deve exceder o SMYS em mais que 120MPa.
360	460	0.90	3) SMTS na direção longitudinal pode ser 5% menor que os valores requeridos na direção transversal.
415	520	0.92	4) A razão YS/UTS na direção longitudinal não deve exceder o máximo valor especificado na direção transversal, em mais que 0.020 para materiais padrões, e mais que 0.030 para materiais submetidos a presença de H ₂ S (“sour service”).
450	535	0.92	
485	570	0.92	
555	625	0.92	

Tabela 5 – Propriedades Mecânicas de dutos API 5L [Tabela 6-3, DNV OS-F101 (2000)]

O valor de " α_{GW} " é referente ao fator de solda circumferencial ("Girth weld factor"). A DNV (2000) informa que diversas pesquisas relativas a flambagem de dutos têm demonstrado um grande impacto na capacidade de deformações compressivas. Isto ocorre em função das imperfeições existentes nas soldas no lado compressivo. Para relações DE/t na ordem de 60, o fator de redução é de 40%. O valor de " α_{GW} " é dependente da relação de DE/t . Os valores podem ser determinados a partir da curva apresentada na DNV (2000) Seção 12. A Figura 31 reproduz o gráfico mencionado.

O valor de " y_ϵ " é um fator de segurança que considera desalinhamentos dos dutos, ovalizações, entre outras imperfeições mecânicas. Este fator é dependente do nível NDT ao qual a tubulação está sendo fabricada, e da classe de segurança do duto. A Tabela 6 apresenta os valores para utilização nos cálculos. Para as análises de enrolamento deve ser considerada a classe de segurança "baixa" aplicável para fases de instalação dos dutos. De acordo com a DNV (2000) Seção 6 B102, para aplicação dos critérios de flambagem local com deslocamento controlado deve ser utilizado o nível NDT 1, mais restritivo quanto ao desenvolvimento dos ensaios. No nível 1 o fator é dependente do uso ou não do requisito suplementar "U". Este não é aplicável no processo de enrolamento, pois é referente a uma alta utilização do duto em condições operacionais. Portanto, o valor assumido para " y_ϵ " é de 2.1.

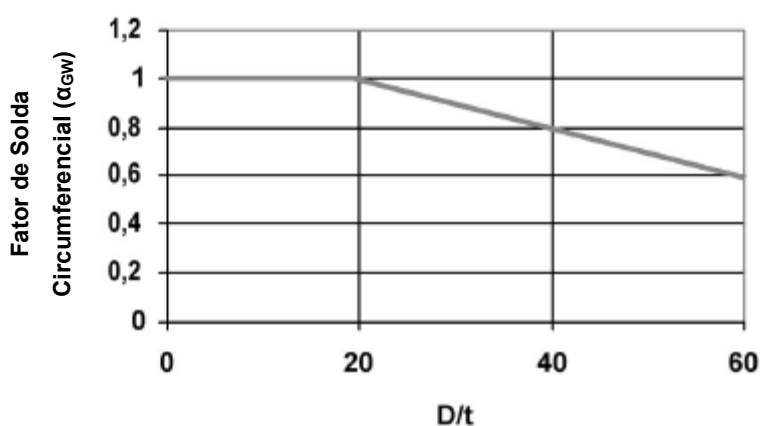


Figura 31 – Gráfico de " α_{GW} " versus a relação DE/t [Figura 12-1, DNV OS-F101 (2000)]

Nível NDT	Requisitos Suplementares	Classe de Segurança		
		Baixa (Low)	Normal (Normal)	Alta (High)
I	U	2	2.5	3.3
I	-	2.1	2.6	3.5
II	N/A			

Tabela 6 - Fator de resistência à deformação [Tabela 5-8, DNV OS-F101 (2000)]

Todos os fatores da DNV (2000) utilizados na aplicação do critério foram apresentados em relação ao processo de enrolamento de dutos. Observando a equação (13) e aplicando os fatores mencionados é possível gerar uma curva de “ ϵ_c ” versus DE/t como apresentado na Figura 32. No gráfico está assinalada a região que será avaliada neste trabalho, com a relação DE/t variando entre 7 e 20.

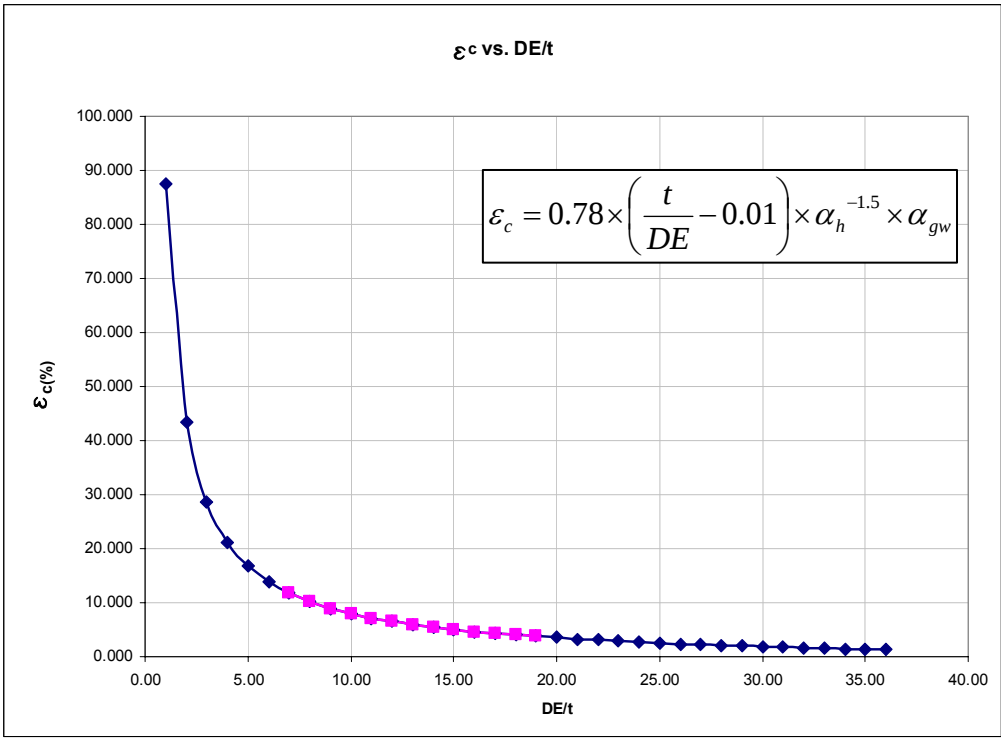


Figura 32 – Gráfico da deformação característica versus a relação DE/t

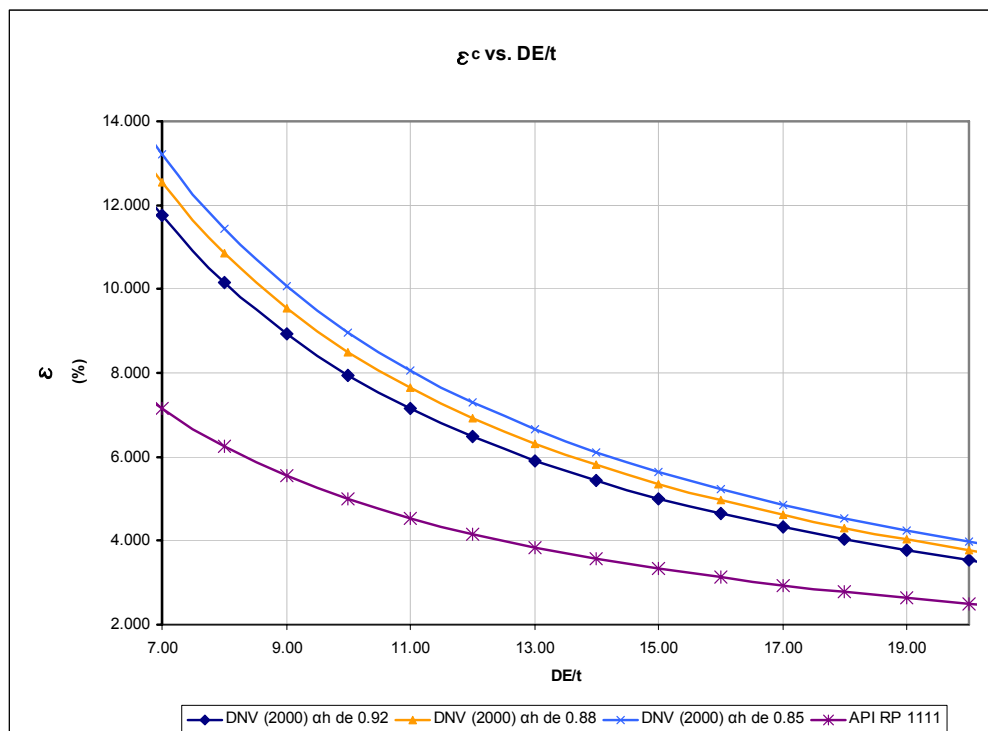


Figura 33 – Gráfico das deformações versus DE/t para diferentes valores de “ α_h ” na DNV (2000) e para o critério API (1999)

A Figura 33 apresenta o gráfico das deformações versus a relação DE/t variando para valores de 7 a 20. Nesta figura, são comparadas curvas para diferentes valores de “ α_h ” com o objetivo de avaliar a sensibilidade deste parâmetro. Como pode ser observado valores menores de “ α_h ” resultam em valores de “ ϵ_c ” maiores como mencionado anteriormente. Portanto reduzir este parâmetro pode aprovar ou não um determinado projeto de acordo com a DNV (2000) e isto justifica exigir valores menores de “ α_h ” dos fabricantes de dutos. Na figura ainda é apresentada a curva do critério da API (1999), a qual é abordada na Seção 3.4.

O critério de deslocamento controlado foi modificado ao longo das revisões na norma DNV referente a projeto de dutos. Projetos como SUPERB (1996) da empresa “Snamprogetti” em união com a DNV avaliaram e desenvolveram, com base em testes experimentais, a equação da deformação característica em relação às apresentadas em outras normas. No entanto, fatores de “0.78”, “ α_{gw} ” e “ α_h ” somente foram inseridas na equação a partir da revisão de 2000. Isto demonstra o esforço da DNV em aumentar o conservadorismo nos cálculos de deformação analíticos. Em uma avaliação utilizando elementos finitos pode ser

verificado o comportamento de um determinado duto em particular caso este não seja aceito pelos critérios da DNV. Uma validação do critério é apresentada na Seção 5.4 deste trabalho.

Um exemplo de validação analítica deste critério em relação ao processo de enrolamento de dutos está apresentado no APÊNDICE I – Cálculo das deformações admissíveis sob efeito de flambagem localizada utilizando a DNV OS-F101 (2000).

3.3.DNV OS-F101 - Ovalização

A DNV (2000) sugere uma avaliação adicional de ovalização para validação de projetos de dutos submetidos à flexão. No entanto, o critério é referente a ovalização final após o processo instalação. Isto inclui todo o processo de enrolamento/ desenrolamento e também o processo de instalação. A DNV (2000) Seção 8 D800 apresenta o seguinte critério.

$$f_o = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \leq 0.03 \quad (21)$$

Para este trabalho o valor de ovalização somente será avaliado na análise de ciclo completo apresentada na Seção 5.11, onde é possível mensurar a ovalização final após o ciclo do processo de enrolamento e desenrolamento.

3.4.API RP 1111

Apesar deste trabalho estar baseado na DNV (2000), a recomendação prática da API (1999) foi avaliada com o objetivo de comparar critérios e observar o grau de conservadorismos que ambas apresentam. A API (1999) apresenta o seu cálculo de critério de uma maneira mais simplificada, se comparada com a DNV (2000).

O critério é apresentado na seção 4.3.2.2 da API (1999) e é referente a “Flambagem devido à combinação dos efeitos de flexão e pressão externa”. A combinação destes efeitos deve satisfazer a equação apresentada abaixo.

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} + \frac{(P_o - P_i)}{P_c} \leq g(\delta) \quad (22)$$

Os termos P_o , P_i e P_c são referentes às pressões externas, internas e de colapso respectivamente. Como o duto no processo de enrolamento encontra-se em uma situação de equilíbrio no diferencial de pressão, este termo ficará igual a zero, e conseqüentemente a equação (22) pode ser reescrita como apresentado abaixo.

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} \leq g(\delta) \quad (23)$$

“ ε ” é o valor da deformação calculada “ ε_b ” é a deformação de flambagem sob flexão pura. Este valor é calculado a partir da equação apresentada abaixo.

$$\varepsilon_b = \frac{t}{2 \cdot DE} \quad (24)$$

O termo “ $g(\delta)$ ” é o fator de redução ao colapso e é definido em função da ovalização do duto.

$$g(\delta) = (1 + 20 \cdot \delta)^{-1} \quad (25)$$

Onde:

$$\delta = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \quad (26)$$

“ δ ” corresponde ao valor de ovalização definido pela API (1999) e sua definição é diferente da DNV (2000).

Definindo o termo “ ε_{admAPI} ” como sendo a deformação admissível pela API (1999), e igualando ao valor de “ ε ” na equação (23), é possível calcular o valor da deformação admissível.

$$\varepsilon_{admAPI} = \varepsilon_b \cdot g(\delta) \quad (27)$$

Logo, o valor encontrado através de cálculos analíticos e de elementos finitos deve ser menor que “ ε_{admAPI} ”. No entanto, a API informa que para evitar a flambagem, as deformações localizadas devido à flexão devem ser limitadas como proposto a seguir.

$$\varepsilon_{admAPI} \geq f_2 \cdot \varepsilon_{analítico,FEA} \quad (28)$$

Onde “ f_2 ” é o fator de segurança para flexão com deformações localizadas. O valor sugerido para este fator é normalmente igual a 2. A API (1999) faz uma ressalva especificando que para processos de enrolamento o valor de “ f_2 ” pode ser menor que 2. O valor de 2 é relativo a efeitos dinâmicos da embarcação que ocorrem durante a instalação do duto. Para o processo de enrolamento, isto não é razoável já que o duto está no interior da embarcação acompanhando os movimentos da mesma, sem haver nenhuma amplificação das cargas envolvidas. No entanto, não é especificado qual deveria ser o valor utilizado. Portanto, o valor de “ ε_{admAPI} ” já contém diversos fatores de segurança incluídos no desenvolvimento de sua formulação. Este valor pode ser considerado como satisfatório para uma avaliação do cálculo dos valores analíticos e vem sendo utilizado desta forma no mercado.

Um exemplo de validação analítica deste critério em relação ao processo de enrolamento de dutos está apresentado no APÊNDICE II – Cálculo das deformações admissíveis sob efeito de flambagem utilizando os critérios da API RP 1111 (1999)

Em relação à DNV (2000), a API (1999) demonstra ser menos conservativa. Observando os exemplos apresentados nos Apêndices I e II, onde as normas foram aplicadas para um mesmo duto de diâmetro externo igual a 12.75” e espessura de parede de 17.5mm, é possível apresentar a tabela abaixo.

Norma	$\epsilon_{\text{analítico}}$ [equação (36)]	ϵ_{adm}
DNV (2000)	1.767%	1.884%
API (1999)		2.204%

Tabela 7 – Comparação dos valores de deformação admissíveis apresentados nas normas

O cálculo da deformação analítica é apresentado na Seção 4.2 deste trabalho.

Na Figura 33, o valor de deformação calculado pela API (1999) de acordo com a equação (24) é apresentado no gráfico em conjunto com os resultados de deformação característica da DNV (2000). Apesar da curva API apresentar valores menores que a DNV, os fatores de segurança para o cálculo da deformação admissível “ ϵ_{adm} ” apresentam diferenças resultando em valores comparáveis aos apresentados na Tabela 7. A apresentação de um gráfico das deformações admissíveis de ambas as normas não foi realizada, em virtude da API (1999) utilizar como fator de segurança um valor dependente da ovalização do duto. Desta forma seria necessário realizar diversas análises variando a relação DE/t para medir a ovalização do duto, o que não é parte do escopo deste trabalho. Análises realizadas no cotidiano apresentam valores de deformações admissíveis da API (1999) maiores que os da DNV (2000).

Como pode ser observado na Tabela 7, para um duto de mesmo diâmetro, pela DNV (2000) este está qualificado, porém com uma margem de segurança muito pequena, enquanto para a API a margem de segurança é relativamente maior. Quando inseridos fatores de concentração de deformação (SNCF), os valores admissíveis não são suficientes para a aprovação de um duto. No entanto, como mencionado anteriormente existe uma série de fatores de segurança inseridos dentro do desenvolvimento das equações. O critério da DNV (2000) será avaliado neste trabalho com mais detalhe utilizando o método de elementos finitos a fim de entender qual o limite aceitável de deformações para flambagem localizada em comparação com a norma. A Seção 5.4 apresenta esta validação.

Uma outra norma bastante utilizada no mercado internacional é a BS 8010 (1993). Ela possui uma abordagem similar à API. No entanto, esta norma não será avaliada neste trabalho.

Em resumo, extraindo os valores das normas relativos aos fatores de segurança ou imperfeições de solda, uma análise teórica ou de elementos finitos deve ter seus resultados comparados com a norma definida por quem está solicitando os serviços de instalação de dutos. De acordo com a escolha, os critérios de deformações admissíveis para o enrolamento podem ser mais ou menos conservativos.

3.5.Momento limite plástico – Yong Bai / Relatório SUPERB (1996)

De acordo com os conceitos de resistência dos materiais apresentado por Bai (2005), o momento devido à flexão na seção transversal de um duto é diretamente proporcional à curvatura do mesmo. Um comportamento típico do momento em relação à curvatura é apresentado na Figura 34.

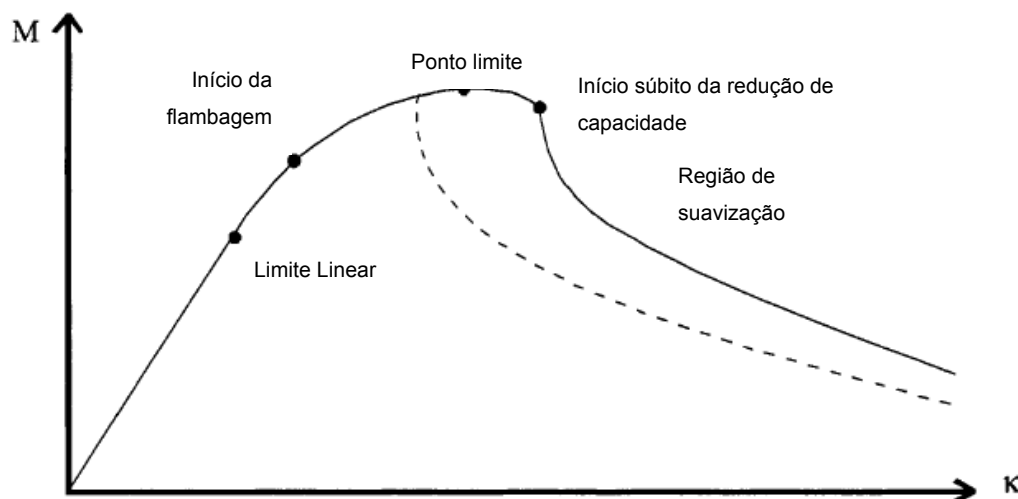


Figura 34 – Exemplo da relação do momento devido à flexão versus a curvatura em um duto

O gráfico da Figura 34 apresenta a resposta de um duto com uma dada relação DE/t (< 60) sujeito ao incremento curvatura ao longo do tempo. Alguns pontos são significativos na relação momento curvatura. No início do incremento de curvatura, o duto deforma-se dentro da região elástica do material e nenhuma

deformação permanente é aplicada. Nesta região, o duto tem suas deformações caracterizadas como globais, ou seja, a distribuição de deformação é uniforme dentro de uma dada região. Com a continuidade do incremento de curvatura, o material do duto chega ao “limite linear”, e a partir deste ponto as deformações tornam-se permanentes. No entanto, um pouco após este ponto as deformações ainda são caracterizadas como globais. Se a curvatura continua a ser incrementada, o material do duto passa do ponto do “início de flambagem”. As imperfeições no duto terão influência em que posição e em que curvatura ocorrerá o início da flambagem. Quanto menor for uma imperfeição, menor será a influência na capacidade do momento limite. Após este ponto, a deformação global irá continuar a crescer, porém mais energia devido à flexão será acumulada no ponto de flambagem localizada até chegar ao “ponto limite”. Neste ponto, a máxima resistência à flexão do duto chega ao seu limite e um colapso geométrico ocorrerá, caso a curvatura continue aumentando. Até o ponto de “início súbito da redução de capacidade”, o colapso geométrico ocorrerá lentamente e as mudanças na geometria da seção transversal são desprezíveis. Depois deste ponto o tubo colapsará até que suas faces internas se toquem.

Muitas publicações demonstram que a relação momento curvatura é suficiente para o projeto de dutos contra falha devido à flexão. Qualquer um dos pontos apresentados pode ser considerado como ponto de limite de projeto. Por exemplo, se um duto faz parte de uma estrutura mecânica, não é desejado que o mesmo ultrapasse o limite elástico. Desta forma, este será o ponto de projeto que deve ser respeitado pelo projetista. No caso de dutos rígidos, onde deformações acima do escoamento são exigidas, este ponto de limite elástico se torna extremamente conservativo, pois existe uma grande região elasto-plástica do material que poderia ser aproveitada em projeto. Sendo assim, praticamente nenhum duto poderia ser instalado offshore. Um projeto de duto submarino menos conservativo pode ser atingido tendo como base critérios de projeto baseados nos níveis de tensão/ deformação alcançados no início da flambagem localizada ou mesmo no ponto limite.

Bai (2005) demonstra que o valor do momento limite é função de muitas propriedades, como por exemplo:

- A relação diâmetro pela espessura (DE/t);
- Curva tensão-deformação do material;

- Imperfeições no material;
- Imperfeição circunferencial;
- Redução da espessura;
- Descontinuidades na geometria, como por exemplo revestimentos, juntas de transição, etc.,
- Carregamentos adicionais.

O passo seguinte é determinar o valor onde ocorre o “ponto limite”, uma vez realizado o entendimento do mecanismo de evolução do momento com o crescimento da curvatura. Um duto sujeito à flexão pura irá falhar como resultado do aumento da ovalização da seção transversal, ao mesmo passo da redução da inclinação da curva tensão-deformação quando iniciado o escoamento. Até um certo nível de ovalização, a redução do momento de inércia irá ser contrabalançada pelo aumento das tensões na parede do duto devido ao efeito de “endurecimento” das deformações. Quando a redução do momento de inércia não mais puder ser compensada pelo “endurecimento” das deformações, o valor momento limite é atingido e o colapso rapidamente ocorrerá caso a curvatura seja aumentada. Bai (2005) menciona que imperfeições geométricas não influenciam o valor do momento limite em dutos sujeitos à flexão pura. O valor do momento limite ou crítico pode ser calculado como apresentado na SUPERB (1996).

$$M_c = \left(1.05 - 0.0015 \cdot \frac{DE}{t} \right) \cdot SMYS \cdot DE^2 \cdot t \quad (29)$$

A equação (29) somente se aplica quando os esforços longitudinais e pressões forem iguais a zero. Esta será utilizada na Seção 5.4 para comparação dos valores de momento limite obtidos nas análises de elementos finitos utilizadas para validação do critério de flambagem localizada da DNV (2000).