

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**MODELAGEM DE CURVAMENTO A FRIO  
DE TUBULAÇÕES**

Marcelo Coelho Netto de Araujo

Prof. Orientador: Paulo Pedro Kenedi

**Rio de Janeiro  
Junho 2016**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**MODELAGEM DE CURVAMENTO A FRIO  
DE TUBULAÇÕES**

Marcelo Coelho Netto de Araujo

Projeto final apresentado em cumprimentos às  
normas do Departamento de Educação Superior  
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Mecânica

Prof. Orientador: Paulo Pedro Kenedi

**Rio de Janeiro  
Junho 2016**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A663 Araujo, Marcelo Coelho Netto de  
Modelagem de curvamento a frio de tubulações / Marcelo  
Coelho Netto de Araujo.—2016.  
27f. : il. (algumas color.) , grafs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2016.

Bibliografia : f. 27

Orientador : Paulo Pedro Kenedi

1. Engenharia mecânica. 2. Tensões residuais. 3. Tubos. 4.  
Tensões e deformações. 5. Resistência dos materiais. I. Kenedi,  
Paulo Pedro (Orient.). II. Título.

CDD 621

## **RESUMO**

Este trabalho tem como principal objetivo a proposição de um modelo analítico para a descrição mecânica do processo de curvamento de tubulações à frio. Para tal utiliza-se a teoria de Mecânica dos Sólidos para descrever as tensões e deformações durante o curvamento à frio de tubos. O material do tubo é representado tanto pela curva de Ramberg-Osgood quanto pelo Módulo Tangente. O resultado final foi a estimativa da distribuição de tensões residuais na seção transversal de um tubo curvado à frio.

# DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família,  
Maria Luiza e Pedro Henrique

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	vi
Capítulo 1 .....	7
1.1. Introdução.....	7
1.2. Motivação e Objetivo .....	8
1.3. Organização do Trabalho .....	8
Capítulo 2 .....	9
2. Revisão Bibliográfica .....	9
2.1.1. Expressão Matemática para a Curva de Escoamento de Materiais Metálicos .....	9
2.1.2. A Equação de Ramberg-Osgood .....	9
2.1.3. Teoria e equação do Módulo Tangente .....	11
2.1.4. Tensões Residuais.....	12
Capítulo 3 .....	15
3. Processo de Curvamento a Frio .....	15
3.1. Estrutura Analítica dos Esforços do Curvamento a Frio .....	16
3.1.1. Modelo construtivo dos esforços considerando a equações de Ramberg-Osgood 18	
3.1.2. Modelo construtivo dos esforços considerando o Módulo Tangente .....	20
Capítulo 4 .....	24
4.1 Exemplo de aplicação .....	25
4.2 Considerações Finais .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Referencias .....	29

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tubulações em terreno acidentado.....	8
Figura 2 - Curva de tensão x sem linearidade.....	12
Figura 3 - Gráfico Tensão x Deformação do módulo tangente.....	16
Figura 4 - Demonstração da tensão residual em gráfico Tensão x Deformação.....	18
Figura 5 - Análise gráfica das tensões residuais.....	18
Figura 6 - Máquina do tipo rotatória para curvamento a frio de tubulações.....	20
Figura 7 - Corte dos principais componentes da máquina do tipo rotatória para curvamento a frio de tubulações.....	21
Figura 8 - Modelo analítico - Parâmetros de curvamento a frio: (a) carga e (b) geometria. ....	21
Figura 9 - Gráfico da análise de Ramberg-Osgood.....	25
Figura 10 - Gráfico Tensão x Raio de Curvatura da módulo tangente.....	29
Figura 11 - Gráfico Tensão x Deformação da component tangente.....	30
Figura 12 - Gráfico da análise de Ramberg-Osgood.....	32
Figura 13 - Aproximação da parte elástica do gráfico da análise de Ramberg-Osgood.....	33
Figura 14 - Gráfico Tensão x Deformação da módulo tangente.....	34
Figura 15 - Aproximação da seção elástica do gráfico Tensão x Deformação da módulo tangente.....	35

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Propriedades do material API 5L X60 steel pipe (API, 2007).....	22
--	----



# Capítulo 1

Neste capítulo é introduzido a forma como o trabalho é estruturado, assim como seu objetivo e a motivação para sua realização

## 1.1. Introdução

Os meios atuais de escoamento de petróleo e seus derivados possuem uma ampla diversidade em relação ao tipo de materiais envolvidos e a forma como o transporte é feito, podendo ser por meios de transporte hidroviários, rodoviários e por tubulações, sejam terrestres ou submersas.

Com o aumento da produção das plataformas de petróleos e refinarias de petróleo, cresce uma maior necessidade para um transporte mais dinâmico, rápido e de menor custo, levando, muitas vezes, à escolha da utilização de tubulações para determinada tarefa. Há dois tipos de condições ambientais que as tubulações podem ser expostas: submersa, ou "offshore", e em terra, ou "onshore".

As tubulações em terra constituem um grande desafio para a engenharia. As condições de terreno geram grandes dificuldades, podendo inviabilizar um projeto de construção de um gasoduto ou necessitando o desvio do percurso originalmente planejado, gerando um maior gasto em tubulação, soldagem e mão de obra em geral. Esse tipo de tubulação pode ser responsável pelo transporte de diversas substâncias, como petróleo, gasolina, diesel, gás liquefeito do petróleo (GLP), entre outros.

O estudo realizado neste trabalho apenas considera condições das tubulações em terra, sem levar em consideração os efeitos viscosos internos dos fluidos, meio interno e externo não ácido e sem esforços externos além dos responsáveis pela curvatura da tubulação.

Na Fig. 1, mostra-se o layout de uma linha de tubulação onshore.



Figura 1 - Tubulações em terreno acidentado<sup>[8]</sup>

## **1.2. Motivação e Objetivo**

Durante o planejamento da construção de uma linha de transporte de fluidos, muitas considerações devem ser feitas para a elaboração de um projeto, e uma das mais importantes é a disponibilidade do terreno a ser utilizado e se a tubulação terá condições suficientes para ser implementada, analisando a resposta estrutural que a tubulação terá devido a essas condições adversas.

O objetivo principal do estudo é elaborar uma análise, o mais próximo possível da realidade, das condições em que as tubulações são curvadas a frio, com uma abordagem analítica conservativa, via mecânica dos sólidos, utilizando as equações constitutivas de Ramberg-Osgood e do Módulo Tangente para estimar a distribuição de tensões residuais na seção transversal de um tubo curvado à frio.

## **1.3. Organização do Trabalho**

Este projeto foi desenvolvido ao longo de quatro capítulos, com o intuito de formar uma apresentação sequencial e de fácil entendimento para o leitor.

No Capítulo 1 é introduzida a forma como o trabalho é estruturado, assim como seu objetivo e a motivação para sua realização.

No Capítulo 2 é feita uma revisão Bibliográfica para expor e revisar conceitos e ideias que serão utilizados ao longo do estudo, assim como obter um embasamento teórico dos tipos de análises que serão utilizadas.

No Capítulo 3 é realizado o desenvolvimento analítico.

No Capítulo 4 um exemplo de aplicação do desenvolvimento analítico é proposto e são realizadas as considerações finais sobre os resultados obtidos.

## Capítulo 2

No Capítulo 2 é feita uma revisão Bibliográfica para expor e revisar conceitos e ideias que serão utilizados ao longo do estudo, assim como obter um embasamento teórico dos tipos de análises que serão utilizadas.

### 2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, serão abordados os conceitos teóricos relacionados à área de resistência dos materiais, mais especificadamente o comportamento elástico não-linear proposto pela equação de Ramberg-Osgood e pela equação do Módulo Tangente.

#### 2.1.1. Expressão Matemática para a Curva de Escoamento de Materiais Metálicos

A curva de escoamento de muitos materiais na região de deformação plástica uniforme pode ser expressa pela simples relação que descreve um comportamento elastoplástico com encruamento isotrópico, conhecida por equação de Hollomon <sup>[4] [5]</sup>

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (1)$$

onde,  $n$  é o coeficiente de encruamento e  $K$  é o coeficiente de resistência ao escoamento. <sup>[5]</sup>

#### 2.1.2. A Equação de Ramberg-Osgood

O comportamento não linear da curva tensão-deformação também pode ser descrito em termos da expressão de Ramberg-Osgood: <sup>[5]</sup>

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + p \left( \frac{\sigma}{\sigma_p} \right)^n \quad (2)$$

A equação Ramberg-Osgood foi originalmente desenvolvida para ligas de alumínio, mas mostrou-se adequada também para outras ligas metálicas não-lineares. A equação envolve o módulo de Young inicial  $E_0$ , limite de proporcionalidade  $\sigma_p$  correspondente à deformação plástica do material  $p$  e o parâmetro  $n$ , que determina o incremento de tensão em função de deformação (forma da região de deformação plástica na curva tensão-deformação). Para aços estruturais, a tensão de escoamento é, por definição, adotada como sendo o limite de proporcionalidade em 0.2%. Para esta definição de limite de escoamento de 0,2 % da deformação, a relação tensão-deformação torna-se:<sup>[5]</sup>

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (3)$$

Também se tornou uma prática comum determinar o parâmetro  $n$  utilizando-se 0.01% e 0.2% de deformação permanente que leva à expressão (4):<sup>[5]</sup>

$$n = \frac{\text{Ln}(20)}{\text{Ln}(\sigma_{0.2}/\sigma_{0.01})} \quad (4)$$

Porém observa-se que quando as deformações excedem 0.2% da deformação total ( $\varepsilon_{0.2}$ ), a curva Ramberg-Osgood obtida baseada na definição de 0.01% e 0.2% de deformação torna-se imprecisa, e tende a valores muito altos de tensão, principalmente para metais que apresentam um baixo valor do coeficiente  $n$ .<sup>[5]</sup> Considerando esta restrição, Rasmussen<sup>[2]</sup> desenvolveu uma expressão, (5) e (6), para curva tensão deformação para ligas de aço inoxidável válida para toda a faixa de deformação:<sup>[5]</sup>

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n, \sigma \leq \sigma_{0.2} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_0} + \varepsilon_u \left( \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m + \varepsilon_{0.2}, \sigma \geq \sigma_{0.2} \quad (6)$$

Onde;

$$E_{0.2} = \frac{E_0}{1+0.002n/e} ; m = 1 + 3.5 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} \quad (7)$$

Além das equações (2), (3), (5) e (6), existe outra forma de apresentar a equação de Ramberg-Osgood. A equação (11) relaciona a tensão  $\sigma$ , deformação  $\varepsilon$ , expoente de encruamento  $h$ , coeficiente de encruamento  $H$  e o módulo de Young inicial  $E_0$ .

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \left(\frac{\sigma}{H}\right)^h \quad (8)$$

### 2.1.3. Teoria e equação do Módulo Tangente

A teoria do Módulo Tangente se baseia no comportamento linear da relação  $\sigma \times \varepsilon$  do material em resposta a uma tensão gerada por uma força aplicada. Este tipo de abordagem visa simplificar a análise da resposta estrutural que um determinado material possa ter.

A Fig. 3 mostra a representação gráfica do modelo analítico do Módulo Tangente, relacionando a tensão  $\sigma$  sofrida pelo material com a deformação  $\varepsilon$  resultante de tal esforço.

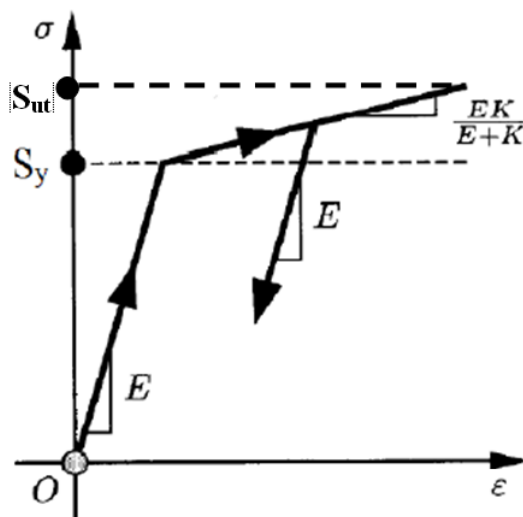


Figura 3 – Gráfico Tensão x Deformação com aplicação do módulo tangente<sup>[9]</sup>

Em relação à Fig. 4, o comportamento primário do material, até o ponto em que a tensão limite de escoamento  $S_y$  é alcançada, é caracterizada como deformação elástica, em que não há acúmulo de tensões internas e movimentações de planos cristalográficos do material. Quando a tensão atingida se encontra abaixo ou no limite de escoamento, a deformação sofrida pelo material é totalmente reversível para até sua característica antes de sofrer o esforço aplicado. Esta reta é representada pela constante de elasticidade  $E$  do material. Quando a tensão imposta ao material ultrapassa o valor da tensão limite de escoamento, o mesmo entra na zona plástica, onde o material começa a acumular tensões internas e pode elevar a tensão até a tensão última de tração  $S_{ut}$ . Esta zona de plastificação é representada pela equação de uma reta tangente - por isso o nome de Módulo Tangente - que é caracterizada em função do módulo de elasticidade  $E$  e o módulo de plasticidade  $K$ . A seguir, mostra-se as equações inerentes ao Módulo Tangente. A equação 9 representa o Módulo Elastoplástico Tangente ( $E_t$ ) e a equação 10 o Módulo de Plasticidade do material.

$$E_t = \frac{E.K}{E+K} \quad (9)$$

$$K = \frac{S_{ut} - S_y}{\varepsilon_{ut}} \quad (10)$$

À seguir é feita uma breve revisão sobre as Tensões Residuais.

#### 2.1.4. Tensões Residuais

As tensões presentes em um material ou componente estrutural na ausência de um carregamento externo ou de gradientes de temperatura são denominadas de tensões residuais, sendo o limite de escoamento o valor máximo alcançado por estas tensões.<sup>[6]</sup>

As tensões residuais podem ser geradas através das deformações elastoplásticas heterogêneas, ou seja, deformações distribuídas não uniformemente ao longo do volume do material. Estas deformações podem ser causadas, por exemplo, por transformações de fase ou por escoamento parcial de seções transversais.<sup>[6]</sup>

As tensões residuais são adicionadas algebricamente ao carregamento operacional, podendo majorá-lo significativamente. Sabe-se que regiões plastificadas podem ocorrer em vigas ou tubulações fletidas se o momento fletor for suficientemente grande. Quando o momento fletor é retirado, a parte elástica é aliviada, gerando o efeito chamado de “spring-back”, restando uma distribuição de tensões

residuais no material. Para um ponto na superfície inicialmente tracionado, a tensão residual resultante seria compressiva, como mostrado esquematicamente na Fig. 4.<sup>[7]</sup>

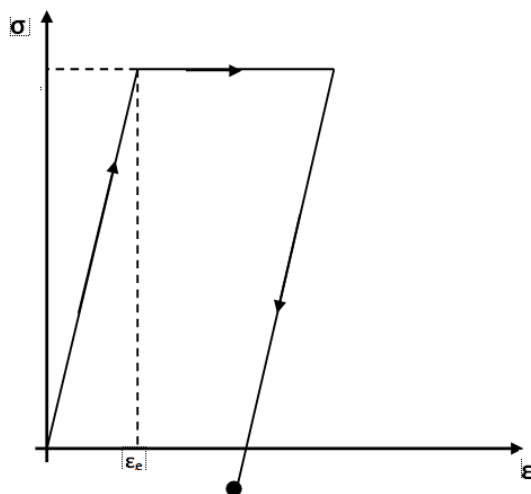


Figura 4 – Tensão residual em gráfico Tensão x Deformação.

Uma estimativa das distribuições das tensões residuais pode ser feita, por exemplo, através do princípio da superposição. Considera-se, por um lado, as tensões devidas à aplicação de um dado momento fletor  $M$  e, a retirada de  $M$  no descarregamento. Na fase de carregamento, as tensões descrevem o comportamento com plastificação parcial. Na fase de descarregamento, o comportamento do material é linear elástico. Adicionando-se as duas etapas, tem-se a estimativa da distribuição de tensões residuais na viga ou tubulação, conforme a Fig. 5.<sup>[7]</sup>

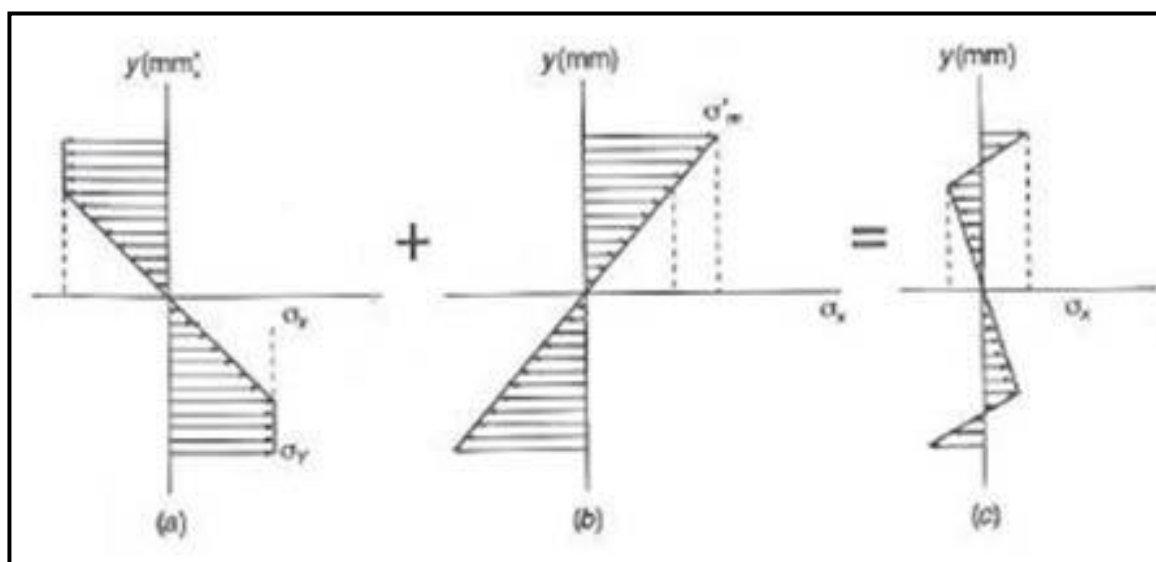


Figura 5 – Análise gráfica das tensões residuais<sup>[7]</sup>

Note que a Fig. 5 mostra uma análise gráfica da distribuição das tensões residuais para um material elasto-perfeitamente plástico, ou seja sem encruamento.

Ao se fazer um estudo sobre a influência das tensões residuais na análise de tensões, deve ser levado em consideração as possíveis origens de tais tensões residuais. Diversos efeitos devem ser considerados como causadores de tensões residuais, mas para fins de análise inicial, alguns possíveis indutores de tensões residuais são listados:<sup>[7]</sup>

- Fluxo plástico não homogêneo sob a ação de tratamento externo (“shot peening”, “autofretting”, rolo de polimento, “hammer peening”);
- Deformação plástica não homogênea durante aquecimento ou resfriamento não uniforme de moldagem de plásticos;
- Tratamentos superficiais, como esmaltagem, niquelagem e cromagem;
- Diferenças nos coeficientes de expansão e incompatibilidade mecânica dos diferentes componentes compósitos (compósitos de matrizes orgânicas e metálico e revestimento cerâmico);

No capítulo seguinte, apresenta-se o modelo analítico proposto.



## Capítulo 3

No Capítulo 3 é realizado o desenvolvimento analítico.

### 3. Processo de Curvamento a Frio

Neste capítulo, será introduzida a explicação em relação ao próprio processo de curvamento de tubos à frio, o estudo dimensional da tubulação que será necessário para a aplicação do modelo analítico proposto.

A Fig. 6 mostra uma máquina de curvamento de tubulações do tipo rotatória e a Fig. 7 mostra uma representação esquemática dos principais componentes responsáveis pela operação da máquina de curvamento. Esse tipo de máquina utiliza cilindros hidráulicos para aplicar cargas necessárias para promover o processo de curvamento a frio de tubulações em campo ou em fábricas. Para fixar a tubulação na máquina, os componentes “pin-up shoe” e “stiff Bach”, movidos pelos cilindros verticais e horizontais, empurram a tubulação até o final da máquina. Antes de começar o processo de curvamento, um mandril é posicionado e se expande dentro da tubulação. Somente então os cilindros verticais atuam, promovendo o curvamento em uma determinada seção da tubulação. A operação é repetida em diversas seções até que a tubulação atinja a curvatura requerida.<sup>[8]</sup>



Figura 6 - Máquina do tipo rotatória para curvamento a frio de tubulações<sup>[8]</sup>

A Fig. 6 mostra a máquina tipo rotatória para curvamento à frio de tubos. Na foto a máquina está sem o tubo.

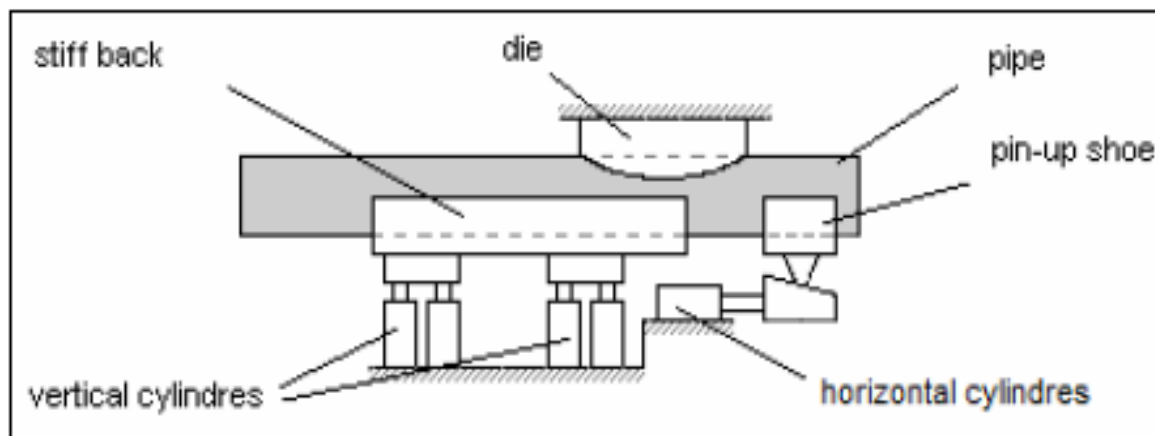


Figura 7 - Corte dos principais componentes da máquina do tipo rotatória para curvamento a frio de tubulações<sup>[8]</sup>

A Fig. 7 mostra os principais componentes da máquina tipo rotatória para curvamento à frio de tubo. Na figura não está mostrando mas antes de curvar o tubo um mandril expansível é colocado dentro do tubo e ao ser expandido antes do curvamento garante que a ovalização do tubo resultante de seu curvamento à frio não seja excessiva.

### 3.1. Estrutura Analítica dos Esforços do Curvamento a Frio

Um simples modelo analítico será utilizado para estimar as principais variáveis do processo de curvamento a frio da tubulação estudada. As hipóteses a seguir adotam os seguintes critérios: rotações muito pequenas, material com comportamento elasto com encruamento e somente atua esforços fletores. Esse modelo não considera fenômenos complexos, como ovalização da tubulação como resposta ao curvamento.

A Fig. 8.a mostra esquematicamente o desenho de uma tubulação submetida a um momento fletor  $M$ , aplicado em ambas as extremidades. A Fig. 8.b mostra as principais variáveis adotadas para o cálculo das tensões pelos modelos analíticos propostos.

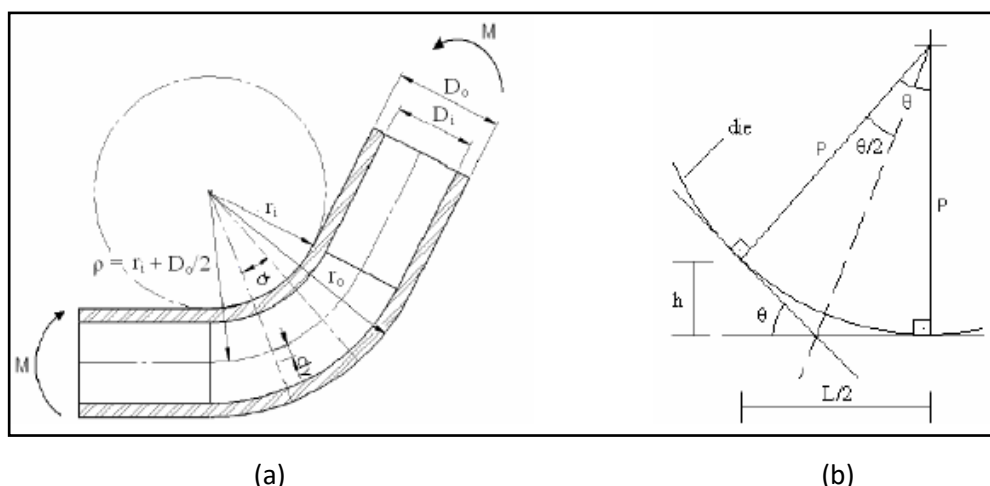


Figura 8 - Modelo analítico - Parâmetros de curvamento a frio: (a) carga e (b) geometria.<sup>[6]</sup>

Uma dada deformação linear  $\varepsilon$  ao longo do eixo axial é observada pela seção transversal da tubulação:

$$\varepsilon = -\frac{y}{\rho} ; \quad (11)$$

$$\rho = \frac{L/2}{\left( (1 + \cos(\theta)) \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)} \quad (12)$$

Onde,  $y$  é a distância do eixo neutro até o ponto de escolha,  $\rho$  é o raio de curvatura,  $L$  é o comprimento da tubulação submetida ao momento  $M$  e  $\theta$  é o ângulo de curvatura da tubulação na seção transversal.

A escolha do tipo de tubulação para a realização do estudo foi feita com o objetivo de se aproximar ao máximo das tubulações mais utilizadas no mercado “onshore” e “offshore”. Na Tabela 1, encontra-se tipo de tubulação que foi utilizado para aplicar-se o modelo analítico, com suas características geométricas e mecânicas.

Tabela 1 – Propriedades do material API 5L X60 steel pipe (API, 2007)

<b>Tipo de Material</b>	API 5L - X60
<b>Diâmetro Externo (<math>D_e</math>)</b>	20"
<b>Espessura de Parede (<math>t</math>)</b>	1,125"
<b>Módulo de Elasticidade (<math>E</math>)</b>	210 GPa
<b>Tensão Limite de Escoamento (<math>S_y</math>)</b>	478 MPa
<b>Tensão Última (<math>S_{ut}</math>)</b>	576 MPa
<b>Deformação Última (<math>\varepsilon_{ut}</math>)</b>	0.40
<b>Expoente de Encruamento (<math>h</math>)</b>	0,07
<b>Coefficiente de Encruamento (<math>H</math>)</b>	707 MPa

A análise será dividida em duas. A primeira considerando a utilização da teoria da equação de Ramberg-Osgood e a segunda considerando a utilização da teoria do Módulo Tangente.

### 3.1.1. Modelo construtivo dos esforços considerando a equações de Ramberg-Osgood

Para realizar a análise do comportamento do material submetido a um carregamento fletor utilizando a abordagem de Ramberg-Osgood, será desenvolvido um modelo analítico.

Como foi mostrado na equação (11), o raio de curvatura é função inversa da deformação, ou seja, quando menor o raio de curvatura, maior será a deformação sofrida pela tubulação. Considerando que o raio de curvatura final que será tomado como base para a análise seja 20 polegadas e o inicial considerando 10.000 polegadas (13a), os resultados das deformações em função da curvatura da tubulação são mostrados na Fig. 13.b:

$$\rho = 10000, 9990, \dots 20 \text{ pol} \quad (13a)$$

$$\varepsilon_m(\rho) = \begin{bmatrix} 7 \cdot 10^{-4} \\ 7.007 \cdot 10^{-4} \\ 7.014 \cdot 10^{-4} \\ 7.021 \cdot 10^{-4} \\ 7.028 \cdot 10^{-4} \\ 7.035 \cdot 10^{-4} \\ \vdots \\ 0.1 \\ 0.117 \\ 0.14 \\ 0.175 \\ 0.233 \\ 0.35 \end{bmatrix} \quad (13b)$$

Nota-se que, quando o raio de curvatura é considerado como 10.000 polegadas, no início do processo de curvamento, a deformação sofrida é considerada desprezível, mas, ao final, quando o raio

de curvatura chega em 20 polegadas, a deformação sofrida pela tubulação se torna significativa. Seguindo com a análise, será utilizada a equação (14).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \left(\frac{\sigma}{H}\right)^{1/h} \quad (14)$$

No modelo analítico apresentado, a parcela elástica da equação (14) não será considerada. Assim, substituindo-se (11) em (14) sem a parcela elástica obtem-se:

$$\sigma = \left(\frac{y}{\rho}\right)^h \cdot H \quad (15)$$

O último passo para a análise será aplicar na equação (15) os dados do vetor (13b), assim como as constantes do Expoente de Encruamento (h) e o Coeficiente de Encruamento (H) citados na Tabela 1. Assim, utilizando a equação (15) à seguir, acham-se os valores correspondentes da tensão em relação ao raio de curvatura.

$$\sigma(\rho) = \begin{bmatrix} 252.576 \\ 252.609 \\ 252.642 \\ 252.674 \\ 252.707 \\ \vdots \\ 481.425 \\ 491.17 \\ 502.951 \\ 517.755 \\ 537.484 \\ 566.575 \end{bmatrix} \text{MPa} \quad (16)$$

Com os dados resultantes da equação (15), pode-se construir o gráfico  $\sigma \times \varepsilon(\rho)$  do material escolhido. Na Fig. 9, mostra-se o gráfico correspondente ao resultado da equação constitutiva (15).

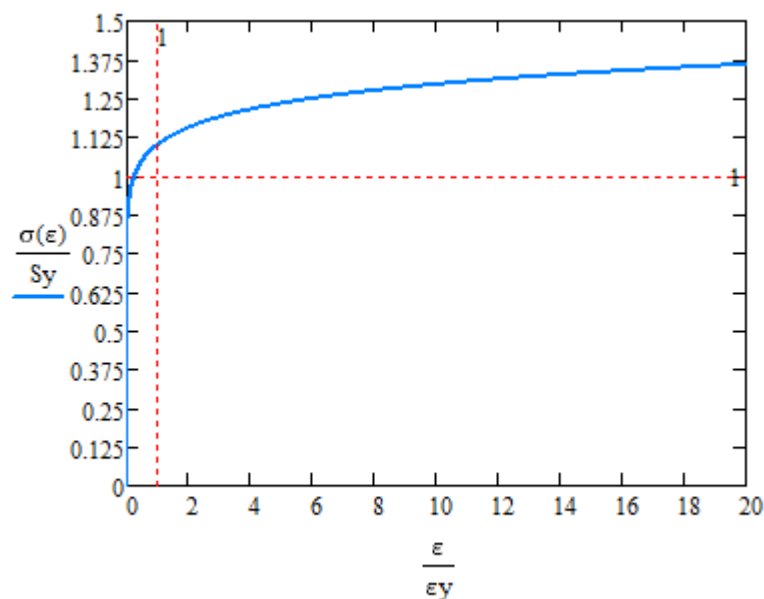


Figura 9 – Curva de Ramberg-Osgood

### 3.1.2. Modelo construtivo dos esforços considerando o Módulo Tangente

Neste tópico será feita a análise utilizando o Módulo Tangente. Assim como na análise utilizando o método de Ramberg-Osgood. Para analisar o comportamento do material durante o seu período plástico, utilizaremos a equação do Módulo Elastoplástico Tangente ( $E_t$ ) para modelar o encruamento do material. Abaixo será desenvolvido o cálculo feito para a elaboração do gráfico Tensão x Deformação previsto pelo Módulo Tangente.

Com os dados do diâmetro externo da tubulação e sua espessura, acha-se o valor de seu diâmetro interno, mostrado na equação (17)

$$D_i = D_e - 2 \cdot t = 0,298 \text{ m} \quad (17)$$

Utilizando os valores da tensão limite de escoamento  $S_y$ , tensão última  $S_{ut}$  e deformação última  $\epsilon_{ut}$  retirados da Tabela 1, acha-se o módulo de plasticidade  $K$ , que será utilizado na porção plástica da análise.

$$K = \frac{S_{ut} - S_y}{\epsilon_{ut}} = 431,43 \text{ MPa} \quad (18)$$

Utilizando-se a equação (18) com o valor do módulo de plasticidade  $K$  e o módulo de elasticidade  $E$  do material, acha-se o módulo tangente elastoplástico, que é a inclinação da reta tangente que rege o comportamento elastoplástico da análise.

$$E_t = \frac{E.K}{E+K} = 430,5 \text{ MPa} \quad (19)$$

Para estimar o raio de curvatura limite para o escoamento do material da tubulação, necessitaremos de padrões inerentes à geometria do material. A primeira propriedade a ser considerada será o momento de inércia de área da tubulação. O momento de inércia de área do material é definido pela equação (20)

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (D_e^4 - D_i^4) = 3,955 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 \quad (20)$$

O próximo passo é achar a distância entre a linha neutra e o ponto escolhido para a análise, que será o raio externo da tubulação, devido à sua maior tensão. Na equação (21) estima-se o valor desta distância.

$$y = \frac{D_e}{2} = 0,178 \text{ m} \quad (21)$$

Utilizando as equações (20), (21) e a tensão limite de escoamento do material  $S_y$ , estima-se o momento crítico de escoamento do material da tubulação. Ao ser aplicado à tubulação neste momento ocorre o início do escoamento, conforme mostrado na equação (22).

$$M_y = \frac{S_y \cdot I}{y} = 8,34 \cdot 10^5 \text{ N.m} \quad (22)$$

Utilizando as equações (20), (22) e o módulo de elasticidade  $E$  fornecida pela Tabela 1, acha-se o raio de curvamento crítico para o escoamento do material da tubulação  $\rho_y$ , conforme mostrado na equação (23):

$$\rho_y = \frac{E \cdot I}{M_y} = 93,8 \text{ m} \quad (23)$$

Adotando o raio de curvatura mínimo e máximo que será imposto pela máquina de curvamento à tubulação, tem-se o eixo das abscissas do gráfico da análise do módulo tangente. O raio de curvatura mínimo, máximo e o intervalo entre cada aumento do raio de curvatura:

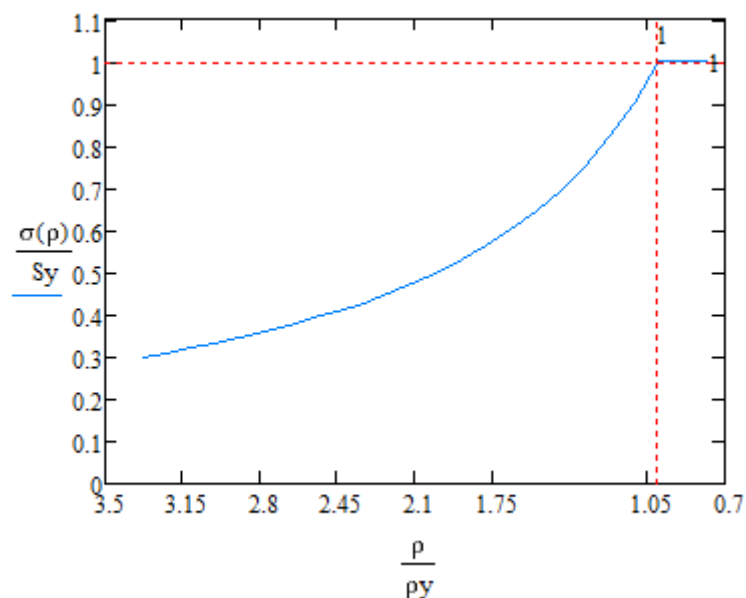
$$\rho = 70,80 \dots 300 \text{ m} \quad (23.a)$$

Com os dados encontrados ao longo do desenvolvimento da análise do módulo tangente, cria-se as condições de contorno para ser utilizadas para dividir a parte elástica da parte plástica do gráfico proposto. O gráfico do módulo tangente pode ser feito de duas formas. A primeira é propor a análise das tensões em função do raio de curvatura e a segunda é admitindo a análise das tensões em função da deformação do material.

Primeiramente será feito o gráfico levando em consideração a análise das tensões em função do raio de curvatura imposta à tubulação. Para isso, cria-se uma equação condicional em relação ao raio de curvatura, utilizando o raio de curvatura limite de escoamento como a condição. A equação (24), que será utilizada na formulação do gráfico, encontra-se as funções e condições relacionadas à tensão e ao raio de curvatura.

$$\sigma(\rho) = \begin{cases} \frac{E \cdot y}{\rho}, & \rho > \rho_y \\ S_y + \frac{E_t \cdot y}{\rho}, & \rho \leq \rho_y \end{cases} \quad (24)$$

A Fig. 10 mostra o gráfico resultante da equação (24)



**Figura 10 – Gráfico Tensão x Raio de Curvatura do Módulo Tangente**

Ao analisar o gráfico da Fig. 10, fica evidente que quanto menor for o raio de curvamento imposto na análise, maior serão as tensões relativas ao material.

A segunda análise a ser feita através do Módulo Tangente é relativa à colocação da tensão em função da deformação sofrida pelo material. Para isso, deve-se achar o valor da deformação limite de



escoamento  $\varepsilon_y$  para o material, equação (25), e a adoção dos valores assumidos como mínimo e máximo de deformação (26).

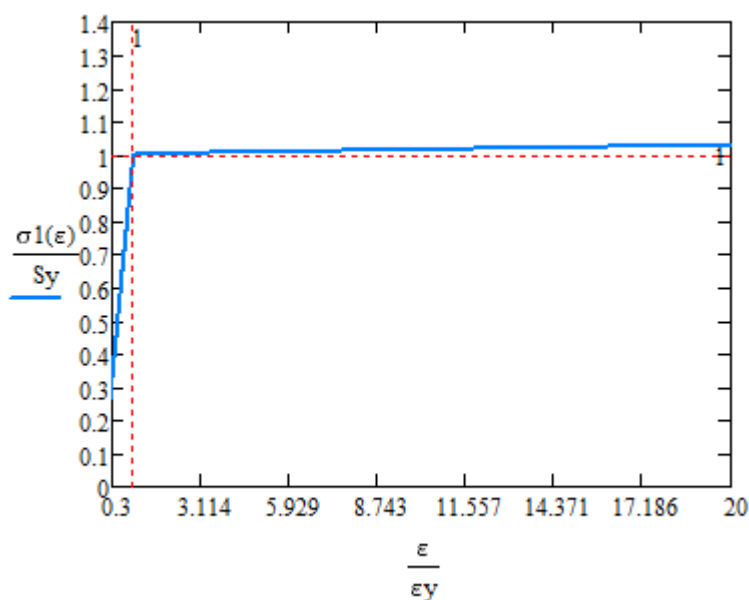
$$\varepsilon_y = \frac{S_y}{E} = 2,276 \cdot 10^{-3} \text{ m/m} \quad (25)$$

$$\varepsilon = 0, 0,001, \dots 0.1 \quad (26)$$

Com a escolha dos parâmetros de deformação a serem utilizados na análise, o próximo passo é montar a equação condicional, utilizando a deformação como função da tensão, equação (27).

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E \cdot \varepsilon, & \varepsilon < \varepsilon_y \\ S_y + E_t \cdot \varepsilon, & \varepsilon \geq \varepsilon_y \end{cases} \quad (27)$$

O gráfico da Fig. 11 mostra o resultado da análise da função  $\sigma(\varepsilon)$ , equação (27).



**Figura 11 – Gráfico Tensão x Deformação do Módulo Tangente**

Ao analisar o gráfico da Fig. 11, torna-se evidente que a resposta da tensão é diretamente ligada ao aumento da deformação sofrida pelo material. Quanto maior a deformação sofrida, maior será o nível de tensões sofrido pelo material.

A distancia perpendicular a linha neutra onde localiza-se a fronteira elasto-plástica na seção transversal do tubo  $y_e$  pode ser estimada como [7]:

$$y_e := \rho \cdot \frac{S_y}{E} \quad (28)$$

O momento fletor, em função do raio de curvatura pode ser estimado, para  $M_y \leq M(\rho) \leq M_p$  [7]:

$$M(\rho) := \frac{3}{2} \cdot M_y \cdot \left[ 1 - \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^2 \right] \quad (29)$$

A seguir, capítulo 4, será feita um exemplo de aplicação do desenvolvimento analítico.

## Capítulo 4

Neste capítulo um exemplo de aplicação do desenvolvimento analítico é proposto e são realizadas as considerações finais sobre os resultados obtidos

### 4.1 Exemplo de aplicação

Utilizando os parâmetros geométricos e de material constantes na Tabela 1, aplica-se o modelo analítico para obter-se a distribuição de tensões residuais na seção transversal.

Para a geração da distribuição das tensões normais na seção transversal no carregamento do tubo por momento puro  $M(\rho)$  pode ser estimado por [7]:

$$\sigma(y) := \begin{cases} E \cdot \frac{y}{\rho} & \text{if } 0 < y < y_e \\ Sy + (Et) \cdot \frac{y}{\rho} & \text{if } y > y_e \\ E \cdot \frac{y}{\rho} & \text{if } -y_e < y < 0 \\ -Sy + (Et) \cdot \frac{y}{\rho} & \text{if } y < -y_e \end{cases} \quad (30)$$

Para a geração da distribuição das tensões elásticas na seção transversal no carregamento do tubo pelo retorno elástico do tubo, uma vez cessado a aplicação do momento puro  $M(\rho)$  pode ser estimado por [7]:

$$\sigma_m(y) := \frac{-(M(\rho) \cdot y)}{I} \quad (31)$$

Para a geração da distribuição das tensões residuais na seção transversal no carregamento do tubo através da superposição das duas etapas anteriores pode ser estimado por [7]:

$$\sigma_r(y) := \begin{cases} E \cdot \frac{y}{\rho} + \frac{-(M(\rho) \cdot y)}{I} & \text{if } 0 < y < y_e \\ Sy + (Et) \cdot \frac{y}{\rho} + \frac{-(M(\rho) \cdot y)}{I} & \text{if } y > y_e \\ E \cdot \frac{y}{\rho} + \frac{-(M(\rho) \cdot y)}{I} & \text{if } -y_e < y < 0 \\ -Sy + (Et) \cdot \frac{y}{\rho} + \frac{-(M(\rho) \cdot y)}{I} & \text{if } y < -y_e \end{cases} \quad (32)$$

Nas Figs. 12, 13 e 14 são apresentados a distribuição das tensões na seção transversal do tubo para três raios de curvatura distintos utilizando-se as equações (30), (31) e (32). Para cada conjunto de três figuras horizontais, a mais a esquerda representa a distribuição de tensões normais na seção transversal para o carregamento de momento fletor puro aplicado, a figura central representa a distribuição de tensões normais elásticas referentes ao retorno do tubo ao se retirar os momentos fletores puros aplicados, também chamado de "spring-back". A figura mais a direita representa a distribuição de tensões residuais resultante na seção transversal do tubo.

A Fig. 12 mostra a sequencia de carregamento e descarregamento para a condição limite de carregamento de  $M_y$ , que é o maior momento fletor puro que pode ser aplicado para que não escoe a seção transversal em nenhum ponto. O resultado é a não geração de tensões residuais.

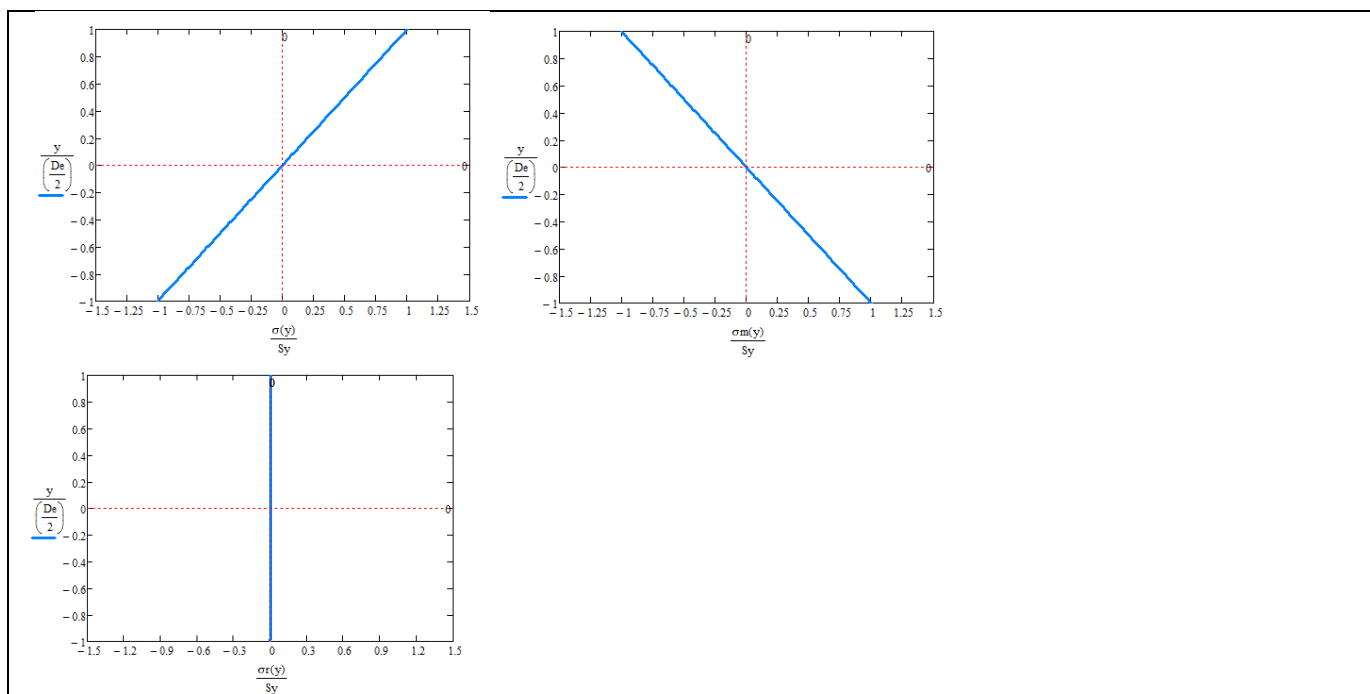


Figura 12 - Sequência de aplicação de momento fletor, "spring-back" e tensões residuais resultantes para o raio de curvatura:  $\rho = 90 \text{ m} = \rho_y$ .

A Fig. 13 mostra a sequencia de carregamento e descarregamento para uma condição de carregamento  $M_y \leq M(\rho) \leq M_p$ . O resultado mostra a geração de uma distribuição de tensões residuais.

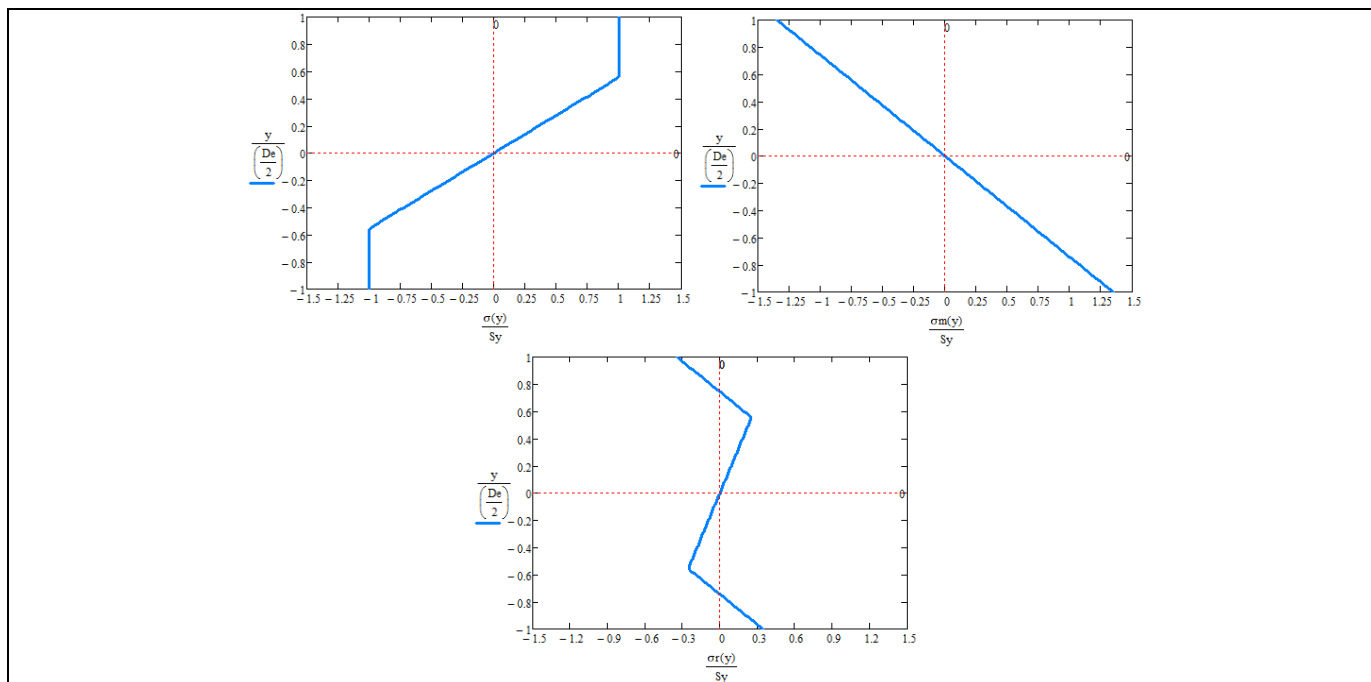


Figura 13 - Sequência de aplicação de momento fletor, "spring-back" e tensões residuais resultantes para o raio de curvatura:  $\rho = 50$  m.

A Fig. 14 mostra a sequencia de carregamento e descarregamento para uma condição de carregamento  $M_y \leq M(\rho) \leq M_p$ , porem mais severa que mostrado na Fig. 13. O resultado mostra a geração de uma distribuição de tensões residuais mais significativa.

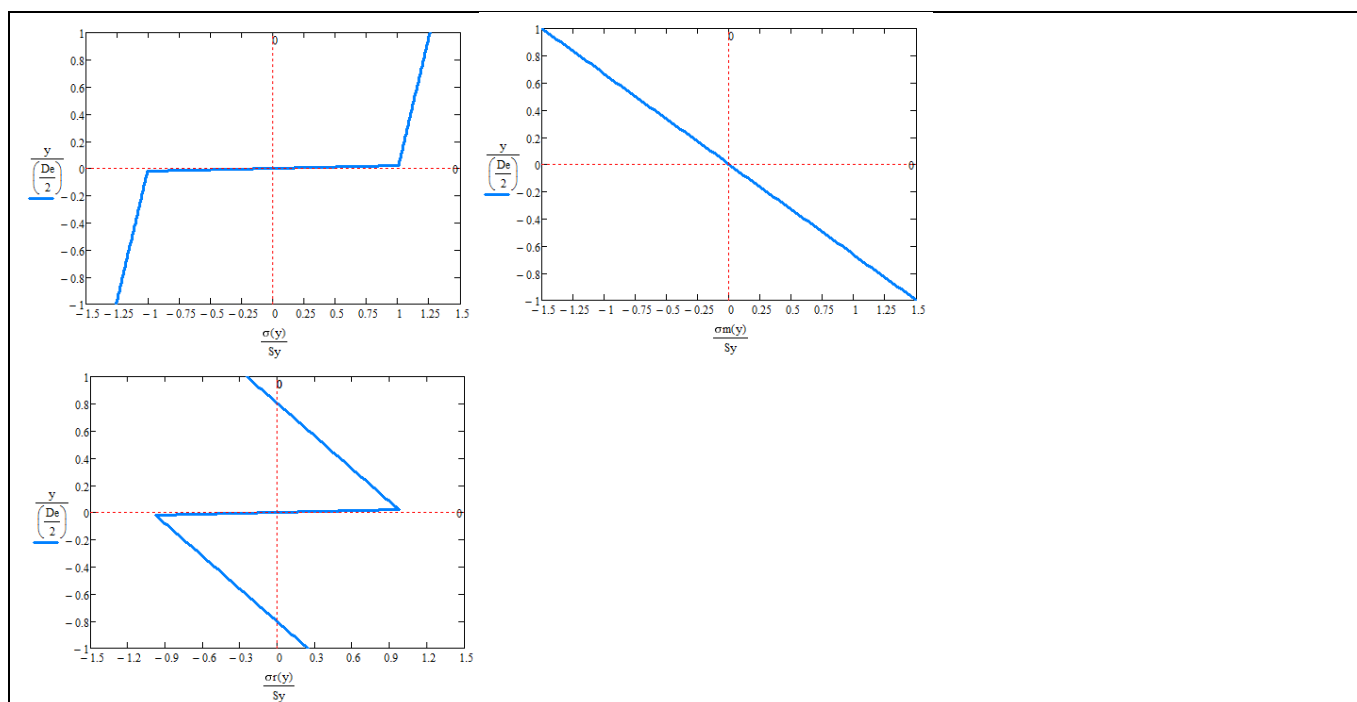


Figura 14 - Sequência de aplicação de momento fletor, "spring-back" e tensões residuais resultantes para o raio de curvatura:  $\rho = 0,5$  m.

## **4.2 Considerações Finais**

A modelagem analítica proposta neste trabalho mostrou que ao curvar à frio tubos, dependendo do momento aplicado ou do raio de curvatura imposto, pode-se gerar distribuições de tensões residuais significativas em suas seções transversais.

## Referencias

- [1] [https://pt.wikipedia.org/wiki/Elasticidade\\_%28mec%C3%A2nica\\_dos\\_s%C3%B3lidos%29](https://pt.wikipedia.org/wiki/Elasticidade_%28mec%C3%A2nica_dos_s%C3%B3lidos%29)
- [2] <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11377/2/Texto%20integral.pdf>
- [3] <http://www.atcp.com.br/images/stories/products/RT03-ATCP.pdf>
- [4] ASME INTERNATIONAL, 2002
- [5] <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/70685/000878157.pdf?sequence=1>
- [6] OGATA, Humberto Toshiaki da Silva; “Determinação da influência das tensões residuais nas propriedades de fadiga em aço SAE 8620 processado com diferentes profundidades de camada de cementação”, dissertação de mestrado, - Paraná, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2003.
- [7] Lopes, Diogo Garcia. Dissertação de Mestrado, Avaliação das tensões residuais na montagem de conectores em armaduras de tração de dutos flexíveis, 2013.
- [8] Modeling of Pipe Cold Bending: A Finite Element Approach, Riagusoff, I.I.T., Kenedi, P.P., Souza, L.F.G. and Pacheco, P.M.C.L., VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2010 - Campina Grande - Brasil.
- [9] Cladded Pipes Stress Analysis, Rody, P.H.C., Kenedi, P.P. and Pacheco, P.M.C.L., 25th National Congress on Maritime Transportation, Ship and Offshore Construction, Rio de Janeiro, Brasil.