

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

**ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES
RESIDUAIS EM RISER RÍGIDO CLADEADO.**

Gustavo Borcard da Silva
Pedro Palmeirim Athayde Martins
Rodrigo Braga da Silva

**Rio de Janeiro
Maio 2021**

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

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES
RESIDUAIS EM RISER RÍGIDO CLADEADO.**

Gustavo Borcard da Silva

Pedro Palmeirim Athayde Martins

Rodrigo Braga da Silva

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do
Departamento de Educação Superior do Centro Federal de
Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca,
CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: Paulo Pedro Kenedi.

**Rio de Janeiro
Maio 2021**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S586 Silva, Gustavo Borcard da
Análise da distribuição de tensões residuais em riser rígido cladeado / Gustavo Borcard da Silva, Pedro Palmeirim Athayde Martins [e] Rodrigo Braga da Silva – 2021.
71f. : il.color. + anexo ; enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2021.

Bibliografia: f. 70-71

Orientador: Paulo Pedro Kenedi.

1. Engenharia mecânica. 2. Tensões residuais. 3. Dutos flexíveis. 4. Engenharia de materiais. 5. Materiais – Fadiga. I. Martins, Pedro Palmeirim Athayde. II. Silva, Rodrigo Braga da. III. Kened, Paulo Pedro. (Orient.). IV. Título.

CDD 620.1

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho não será o ponto final de uma fase, mas sim uma vírgula que traz espaço para o início de uma nova. Diante de um momento que confere à nós o tão sonhado título de Engenheiros Mecânicos, precisamos sem dúvida expressar nossos agradecimentos àqueles que nos fizeram estar aqui.

Durante todo o percurso foram vividos dias difíceis, noites sem dormir, dúvidas sobre o futuro e questionamentos sobre se seríamos capazes. Em muitos momentos parecia faltar força e por isso deixamos o nosso agradecimento registrado à nossas famílias que sempre estiveram conosco, dando apoio a cada reclamação, estendendo a mão para nos ajudar na caminhada e sempre nos abraçando em nossas escolhas.

Aos amigos, agradecemos por toda ajuda neste processo de desenvolvimento que foi a passagem pela faculdade. Pelos passos que deram juntos conosco, sempre nos fazendo enxergar as melhores possibilidades, usando seu tempo para nos ensinar e mostrando que ninguém faz nada grandioso sozinho.

O CEFET/RJ foi sem dúvida um marco em nossas vidas, toda as experiências que tivemos jamais seriam obtidas em outro ambiente. Graças à todo o empenho dos professores, coordenadores e cada funcionário da instituição que trabalha sabendo que está ali para ajudar na formação não só profissional, mas também pessoal de cada aluno. Com a entrega deste documento temos a certeza de que deu certo e que o CEFET/RJ estará formando não só três novos Engenheiros, mas também três grandes pessoas.

Encerramos esta página agradecendo principalmente à Deus que nos proporcionou todas essas oportunidades e vivências citadas. Foi ele quem nos trouxe até aqui, colocando cada um na posição que precisava para que a cada dia pudéssemos acordar com saúde, sair da cama e lutar por nossos sonhos.

RESUMO

Os dutos rígidos cladeados são estruturas tubulares que possuem uma camada interna, cuja finalidade principal é protegê-lo da corrosão. Esses tubos conhecidos como *risers* têm atuação na extração de petróleo de poços , principalmente em águas profundas e ultra profundas. Neste projeto será analisada a distribuição de tensões residuais geradas dutos rígidos cladeados a partir do enrolamento e posterior desenrolamento do carretel que servirá para levá-lo até o local de instalação. Serão realizadas comparações quanto a percentual de tensão e momento aplicado no tubo e no clad, além de destaque para as tensões residuais geradas na fronteira elastoplástica como possível ponto de maior tensão residual na estrutura.

Palavras-Chave: risers, clad, tensões residuais

ABSTRACT

Cladded rigid ducts are tubular structures that have an internal layer, which the main purpose is protect it from corrosion. These tubes known as risers are used in the oil extraction of wells, especially in the deep and ultra-deep waters. In this project, will be analyzed the distribution of residual stresses generated in cladded rigid ducts from the winding and subsequent unwinding of the spool that will serve to take it to the installation location, considering the structural impact of the clad. Comparisons will be made as to the percentage of stress and the bending moment applied to the tube and clad, in addition to highlighting the residual stresses generated at the elastoplastic frontier as a possible point of higher residual stress in the structure.

Keywords: risers, clad, residual stress

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1 - Distribuição da produção de petróleo por operador. Fonte: ANP/SDP/SIGEP, 2019. | 52 |
| Fig. 2- Tipos de exploração petrolífera. Fonte: CBIE | 55 |
| Fig. 3- Investimentos estimados em E&P. Fonte: RI Petrobras, 2020 | 55 |
| Fig. 4 - (a) <i>Riser</i> rígido cladeado (b) <i>Riser</i> flexível Fonte: (a) Agüero, 2015 (b) setofextensiveblogs.wordpress.com, 2015 | 57 |
| Fig. 5 - Comparativo lançamento <i>S-Lay</i> x <i>J-Lay</i> Fonte: Adaptado Rody (2014)..... | 60 |
| Fig. 6 – Desenho esquemático de uma embarcação para lançamento Reel Lay | 60 |
| Fig. 7 - Processo de cladeamento por soldagem Sulzer (Weld overlay) | 62 |
| Fig. 8- Representação de viga sob um momento fletor. Fonte: R.C. Hibbeler, 2015..... | 64 |
| Fig. 9 - (a) Viga submetida a um momento fletor; (b) Seção transversal da viga. Fonte: Autor | 66 |
| Fig. 10 - Sequência de carregamento. Fonte: Criado pelo autor | 70 |
| Fig. 11 - Módulo Tangente. Fonte: <i>Cladded Pipe Stress Analysis</i> , 2014..... | 33 |
| Fig. 12 - Região "a" com elemento de área diferencial dA_a | 36 |
| Fig. 13 - Região "b" com elemento de área diferencial dA_b | 37 |
| Fig. 14 - Fronteira elastoplástica "imaginária" | 38 |
| Fig. 15 - Definição da fronteiras elastoplásticas para: (a) $\rho_0 > \rho > \rho_i$; (b) $\rho < \rho_i$ | 40 |
| Fig. 16 – Gráfico normalizado de distribuição de momentos do tubo. | 43 |
| Fig. 17 - Gráfico normalizado de distribuição de momentos do clad..... | 44 |
| Fig. 18 - Gráfico normalizado da distribuição de momentos sobrepostos de tubo e clad..... | 45 |
| Fig. 19 - Gráfico normalizado da distribuição de momentos do tubo, clad e riser..... | 46 |
| Fig. 20 - Viga submetida à flexão pura (vista lateral) -(a) sem deformação (b) carregamento com $M_y \leq M(\rho) \leq M_p$ e (c) descarregamento. | 47 |
| Fig. 21 - Gráfico Tensão x Deformação (a) Superfície "a" (b) Superfície "b" | 48 |
| Fig. 22- Distribuição de tensão de carregamento elastoplástico | 49 |
| Fig. 23 - Seção transversal separada em áreas..... | 50 |
| Fig. 24 - Distribuição de tensão de carregamento elastoplástico com encruamento..... | 50 |
| Fig. 25 - Gráfico de distribuição de carregamento e sping-back elásticos | 52 |
| Fig. 26 - Gráfico distribuição das tensões residuais em carregamento elástico | 52 |
| Fig. 27 - Gráfico da distribuição de carregamento e spingback elastoplásticos..... | 53 |
| Fig. 28 - Gráfico da distribuição de tensões residuais em carregamento elastoplásticos..... | 53 |
| Fig. 29 - Gráfico de distribuição de carregamento e de spingback | 54 |

| | |
|---|----|
| Fig. 30 - Gráfico de tensão residual em carregamentos elastoplásticos | 54 |
| Fig. 31 - Seção transversal do riser no caso estudado | 55 |
| Fig. 32 - Carretel de enrolamento e transporte. Adaptada de (Cho, Joo, Cho, & Moon, 2017) | 57 |
| Fig. 33 - Gráfico momento no tubo em função do raio de curvatura | 58 |
| Fig. 34 - Gráfico momento no clad em função do raio de curvatura..... | 58 |
| Fig. 35 - Gráfico sobreposto do momento do tubo e do clad em função do raio de curvatura | 59 |
| Fig. 36 - Gráfico percentual da parcela de momento recebida pelo clad em função do momento imposto ao <i>riser</i> | 59 |
| Fig. 37 - Gráfico da distribuição de tensões na seção transversal, resultantes do carregamento no tubo | 60 |
| Fig. 38 - Gráfico da distribuição de tensões na seção transversal resultantes do carregamento no clad..... | 61 |
| Fig. 39 - Gráfico da distribuição de tensões na seção transversal resultantes do carregamento tubo e clad..... | 61 |
| Fig. 40 - Gráfico da distribuição de tensões de springback no tubo..... | 62 |
| Fig. 41 - Gráfico da distribuição de tensões de springback no clad | 63 |
| Fig. 42 - Gráfico sobreposto da distribuição das tensões de springback do tubo e do clad | 63 |
| Fig. 43 - Gráfico de distribuição da tensão residual no tubo | 64 |
| Fig. 44 - Gráfico de distribuição das tensões residuais do clad..... | 65 |
| Fig. 45 - Gráfico sobreposto da distribuição de tensões residuais do tubo e do clad..... | 65 |
| Fig. 46 - Variação do pico de tensão residual..... | 66 |
| Fig. 47 - Área plastificada da seção transversal (a) $\rho = 49m$ (b) $\rho = 10m$. Fonte: Autor | 67 |
| Fig. 48 - Relação entre pico de tensão residual em y_y e em R_o | 68 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Composição química para tubos PSL2..... | 40 |
| Tabela 2 - Requisitos mínimos para os resultados dos testes de tração em tubos PSL 2..... | 43 |
| Tabela 3 - Propriedades mecânicas do Inconel ® 625 recozido..... | 47 |
| Tabela 4 - Composição química do Inconel 625 | 48 |
| Tabela 5 - Propriedades mecânicas do aço API 5L X52 | 49 |
| Tabela 6 - Propriedades mecânicas Inconel 625 | 51 |

LISTA DE ABREVIações

API – *American Petroleum Institute*

θ - Ângulo central

L - Comprimento do objeto

ε - Deformação longitudinal

ε_{ut} - Deformação última

c - Distância da superfície em relação à linha neutra

y - Distância em relação à linha neutra

y_y - Distância entre a linha neutra e a fronteira elastoplástica

E - Módulo de elasticidade

K - Módulo de plasticidade

E_t - Módulo tangente

M_y - Momento elástico

M_p - Momento plástico

M - Momento resultante

ρ - Raio de curvatura

R_o - Raio externo

R_i - Raio interno

S_y - Resistência ao escoamento

σ - Tensão

S_{ut} - Tensão última

δ - Variação de deslocamento

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 1.1. Histórico e desenvolvimento..... | 14 |
| 1.2. Importância e aplicação | 15 |
| 1.3. Objetivo do estudo | 17 |
| CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 18 |
| 2.1 <i>Risers</i> | 18 |
| 2.2 Tubos de Aço Carbono ARBL | 21 |
| Norma API | 21 |
| Composição Química | 22 |
| Propriedades mecânicas | 23 |
| Processos de fabricação..... | 25 |
| 2.3 Estruturas cladeadas | 25 |
| Material de adição | 26 |
| Processos de fabricação..... | 27 |
| 2.4 Conceitos Básicos/ Análise de Carregamentos | 28 |
| Flexão Elástica. | 28 |
| Material elástico perfeitamente plástico..... | 32 |
| Material Elástico com Encruamento | 33 |
| 2.5 Tensões Residuais..... | 34 |
| Geradores de tensão residual..... | 34 |
| CAPÍTULO 3 - DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS FLETORES | 36 |
| 3.1 Cálculo dos momentos aplicados em estruturas tubulares | 36 |
| Momento Elástico..... | 40 |
| Momento Plástico | 40 |
| 3.2 Análise gráfica da distribuição de momentos..... | 43 |
| CAPÍTULO 4 - DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS | 47 |
| Carregamento elástico | 48 |

| | |
|--|----|
| Carregamento elastoplástico | 49 |
| <i>Spring-Back</i> | 51 |
| Distribuição das Tensões Residuais | 52 |
| CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE CASO | 55 |
| Propriedades geométricas e mecânicas..... | 55 |
| 5.1 Distribuição de momentos | 57 |
| 5.2 Distribuição das tensões residuais | 60 |
| Tensões de carregamento | 60 |
| Tensões de <i>Springback</i> | 62 |
| Tensões Residuais | 64 |
| 5.3 Análise de picos de tensão..... | 66 |
| CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO..... | 69 |
| Bibliografia..... | 70 |
| Anexo A | 72 |

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O setor de óleo e gás representa cerca de 60% das fontes primárias que compõe a matriz energética mundial. O combustível que move diversos meios de transporte, indústrias e cadeias logísticas, até plásticos e borrachas são produzidos à partir do petróleo, gás e seus derivados. A utilização desse meio energético, viabilizou inúmeras tarefas cotidianas da população e alimentou o desenvolvimento econômico, devido aos avanços tecnológicos que só puderam existir graças à sua utilização.

Este setor vem se apresentando com grande relevância devido à grande dependência da matéria prima obtida. As demandas estão apresentando-se de maneira crescente e isso gerou uma necessidade ainda maior de desenvolvimento tecnológico para extrações de petróleo cada vez mais complexas. Levando em consideração a grande demanda por melhorias dos equipamentos, o estudo orientou-se para a área de extração.

O projeto busca trazer uma análise sobre as tensões residuais encontradas em risers rígidos cladeados, decorrentes do seu enrolamento e posterior desenrolamento do carretel de transporte. Para isso, no primeiro capítulo será introduzido sobre a importância do setor e os objetivos do estudo, seguido de um maior detalhamento de conceitos importantes para a compreensão do estudo, no capítulo dois. Nos capítulos três e quatro é realizada uma abordagem genérica sobre a análise da distribuição de momento e tensões, seguida de uma aplicação prática sobre um tubo selecionado, no capítulo cinco.

1.1. Histórico e desenvolvimento

Tendo em vista o poder gerado à quem produz o “ouro negro”, é natural que surjam muitos participantes no setor, tornando-o cada vez mais competitivo. Devido ao grande número de *players* em busca da mesma matéria-prima e cadeia produtiva, aliado ao fato de serem *commodities* e, portanto, terem precificação à Mercado, acarreta numa preocupação muito grande com os custos e as margens. Devido à essa enorme preocupação, para que seja avaliada a viabilidade de novos projetos, são necessárias análises muito específicas e meticulosas.

Contudo, essa competição no setor tem um grande ponto positivo que é a ativação do desenvolvimento tecnológico. Este setor atrai uma enorme quantidade de capital para investimento ao redor do mundo, buscando sempre novas tecnologias para que os processos de extração e a cadeia de distribuição se tornem mais baratos e rentáveis. Durante esta corrida por

desenvolvimento, algumas empresas conseguem acompanhar e dominar determinados segmentos deste setor, assim tendo mais fôlego e maiores retornos por serem líderes em suas áreas de atuação.

A Petrobras, é sem dúvida um grande exemplo dessa liderança. No Brasil, conforme a Fig. 1, domina a distribuição e a exploração de petróleo e gás, além disso é uma das maiores referências mundiais em extração em bacias offshore. Sua relevância é consequência do grande investimento em pesquisa e do elevado desenvolvimento tecnológico gerado por ela, o que deu à empresa uma enorme capacidade produtiva.

A grande especialização da Petrobras no processo *offshore* ocorreu devido à grande oferta presente neste modal no território brasileiro, em detrimento de uma baixa oferta nas bacias *onshore*.

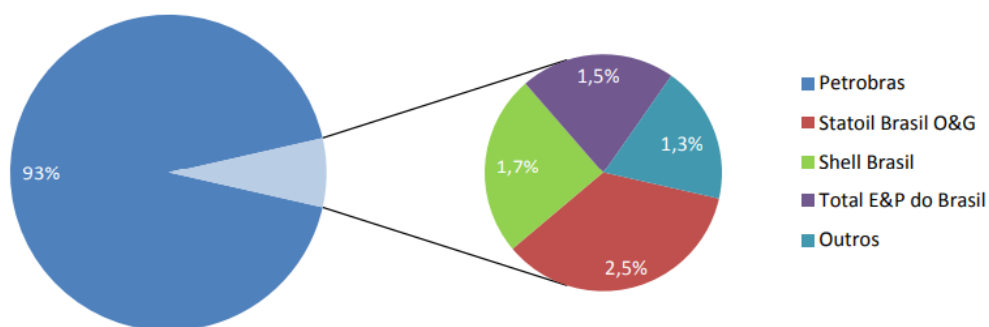


Fig. 1 - Distribuição da produção de petróleo por operador. Fonte: ANP/SDP/SIGEP, 2019

1.2. Importância e aplicação

Atualmente, os processos de extração são classificados em *offshore* e *onshore* como representado na Fig. 2. Esta classificação está relacionada ao local de extração, se é em terra (*onshore*) ou fora da costa (*offshore*), ou seja, em alto mar.

Historicamente, as primeiras explorações de petróleo realizadas foram em terra. Contudo, como as extrações e o uso do combustível foram se intensificando, a demanda por novos poços também foi se elevando. Em um dado momento as bacias de extração em terra já não eram suficientes e a procura por petróleo fora da costa aumentou. Essa mudança não foi simples, a tecnologia para se extrair petróleo de bacias cada vez mais profundas, e ainda mais em alto mar, precisava ser muito mais avançada e robusta para que os custos de extração fossem compensados em relação ao modelo *onshore*.

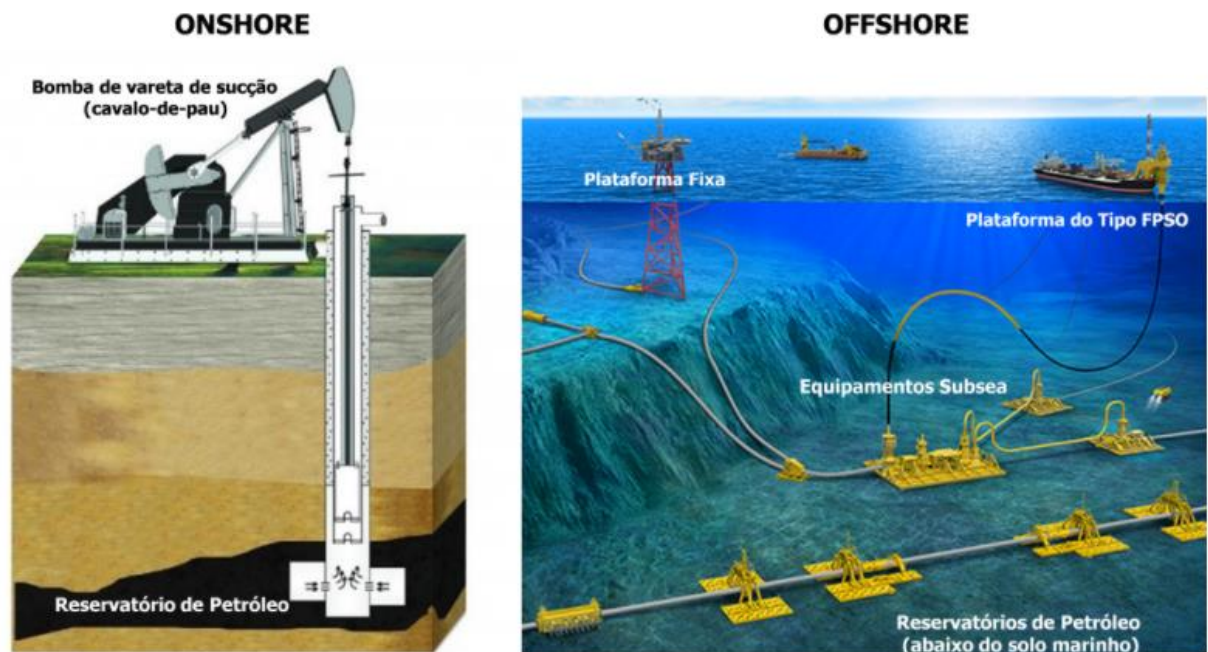


Fig. 2- Tipos de exploração petrolífera. Fonte: CBIE

O desenvolvimento dos campos *offshore*, principalmente em águas profundas e ultra profundas se intensificou conforme apresentado na Fig. 3, gerando um aumento na demanda por dutos rígidos. O mercado sentiu essa mudança e precisou se adequar a essa nova realidade, reduzindo as barreiras competitivas existentes e expandindo a capacidade dos parques industriais capazes de atender a essa demanda de forma eficiente.

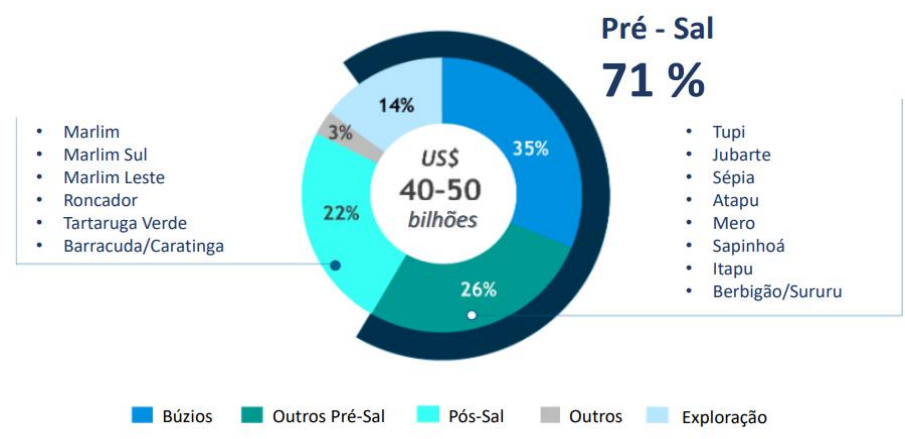


Fig. 3- Investimentos estimados em E&P. Fonte: RI Petrobras, 2020

Contudo, essa logística possui grandes complexidades, principalmente no que tange à produção dos equipamentos, que em geral precisam ser robustos e possuir grandes tamanhos. Devido ao riser rígido ser um tubo de aço de grandes dimensões, formado por uma série de

juntas soldadas ou roscadas, a sua montagem possui grande número de especificidades. Para que cheguem até o seu local de instalação e realizem a extração do petróleo, é necessária uma cadeia produtiva de elevado grau de complexidade.

Para tornar mais simples os processos de transporte dos equipamentos e devido ao processo utilizado na montagem desses dutos, as fabricantes de risers rígidos costumam se localizar próximo à costa.

Durante a produção, quando utilizado o método de lançamento *Reel lay*, os tubos vão sendo soldados dentro de um galpão longitudinal e, conforme avançam nas etapas de produção. Na saída do galpão, já na água se localiza o navio com o carretel. Conforme a tubulação vai sendo fabricada, este carretel passa a enrolar o tubo para então armazená-lo e posteriormente se direcionar ao ponto onde será instalado.

1.3.Objetivo do estudo

Devido ao aumento da demanda por extração em águas profundas e ultra profundas, a utilização de risers rígidos vem se tornando cada vez mais acentuada e, conforme esse crescimento na procura pelo equipamento vai ocorrendo, também crescem os estudos em prol dos desenvolvimentos tecnológicos para eles.

A abordagem estudada relaciona-se ao processo de enrolamento do tubo no carretel, processo que é realizado para que se possa transportá-lo até o local desejado, e o seu posterior desenrolamento. O objetivo é analisar a geração de tensões residuais em dutos rígidos cladeados, que ocorrem devido a este processo de enrolamento/desenrolamento. Será proposto um modelo analítico para estimar a distribuição das tensões residuais geradas, levando em consideração as propriedades mecânicas dos risers rígidos produzidos de aço API 5L com cladeamento feito em liga de Inconel ® 625.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será feita uma breve revisão da bibliografia que embasa o presente trabalho. Aborda-se os componentes que caracterizam o *riser* como as estruturas tubulares e a camada de revestimento. Serão abrangidos também, conceitos básicos da resistência dos materiais que darão uma base para introdução dos conceitos de tensões residuais.

2.1 Risers

Os *risers* são elementos primordiais para garantir o transporte do petróleo e de gás, dos reservatórios até a plataforma. Estes elementos, estão constantemente expostos a carregamentos dinâmicos, promovidos pelas correntes marítimas e pelo vento que atua sobre a plataforma, além ataques químicos, promovidos, em sua superfície externa, pela água do mar e internamente pelo produto extraído. Por este motivo, os *risers* são considerados elementos críticos de uma instalação de extração de petróleo e possuem propriedades específicas que serão abordadas a frente.

Os *risers* podem ser classificados quanto à sua estrutura em rígidos e em flexíveis, conforme ilustra a Fig. 4. Os *risers* rígidos são formados por tubos de aço unidos por juntas soldadas ou roscadas. Estes elementos apresentam grande rigidez e resistência mecânica para carregamentos axiais, radiais e de flexão. Em determinadas aplicações, podem ser envolvidos por flutuadores a fim de reduzir o carregamento gerado pelo próprio peso na plataforma de petróleo (SILVA, 2018).

Os *risers* flexíveis são caracterizados pela sua baixa rigidez a flexão. Para isso, eles são formados por diversas camadas sobrepostas, de diferentes materiais, que interagem entre si. As camadas formadas por polímeros, são responsáveis por fornecer estanqueidade interna e externa. Já as camadas metálicas, são responsáveis por fornecer as propriedades mecânicas necessárias para que o *riser* resista aos carregamentos mecânicos que estará sujeito ao longo de sua utilização (SILVA, 2018).

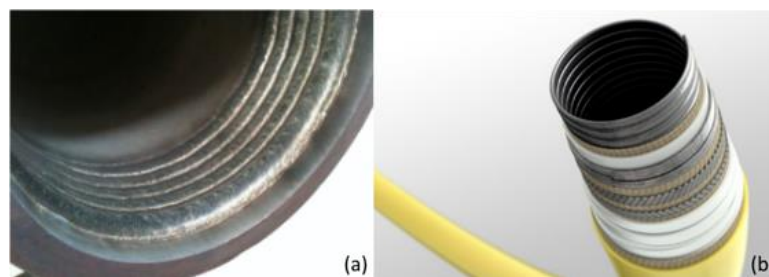


Fig. 4 - (a) *Riser* rígido cladeado (b) *Riser* flexível
 Fonte: (a) Agüero, 2015 (b) setofextensiveblogs.wordpress.com, 2015

Em instalações de *risers* é fundamental o entendimento do tipo de lançamento o qual a estrutura fabricada estará exposta. A partir deste dado é possível compreender quais os carregamentos que a linha estará sujeita. Dentre os métodos de lançamentos utilizados para tubos rígidos, quatro se destacam como os mais utilizados, são eles: *S-Lay*, *J-Lay*, *Towing* e *Reeling*.

No método *S-Lay*, existe uma estrutura no próprio navio para a preparação do tubo para o lançamento. Dentro da embarcação as estruturas são soldadas, inspecionadas, reparadas e revestidas. Com a linha pronta, o tubo é lançado ao mar por uma rampa chamada *stinger*, se curvando em direção ao solo submarino (Rody, 2014). Ao tocar o solo, o tubo se curva novamente, porém na direção horizontal, adquirindo a forma da letra “S” (vide Fig. 5 - Comparativo lançamento *S-Lay* x *J-Lay*).

Ainda segundo (Rody, 2014), a fim de evitar o curvamento do tubo na saída da embarcação em direção ao solo, foi desenvolvido o método de lançamento *J-Lay*. Neste método o tubo é lançado aproximadamente na posição vertical, até tocar o solo, adquirindo a forma da letra “J” Fig. 5 - Comparativo lançamento *S-Lay* x *J-Lay*.

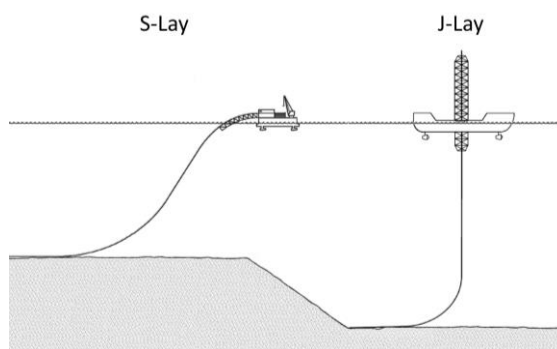


Fig. 5 - Comparativo lançamento *S-Lay* x *J-Lay*
 Fonte: Adaptado Rody (2014)

Utilizados desde a década de 60, o lançamento de risers rígidos por *towing*, é um dos métodos mais antigos. Também conhecido como método de arraste, surgiu do simples princípio de arrastar o duto terrestre, por rebocadores, até a posição desejada (Rody, 2014). Neste lançamento, são utilizadas boias que atuam suspendendo a linha de dutos na água e ao atingir o local de instalação, as boias são removidas ou inundadas, levando o tubo ao solo submarino.

O método que será analisado neste trabalho é o *reeling* ou *Reel lay*. Neste método, ainda numa base *onshore*, os tubos são preparados (soldados, inspecionados e revestidos) e enrolados em uma bobina que será levada à embarcação e o transportará ao local de lançamento e instalação da estrutura. Antes de serem lançados, os tubos são desenrolados e retificados pelo *straightener*, como mostrado na Fig. 6, a fim de retirar a curvatura gerada no *riser* no transporte. No lançamento, existem rampas em diferentes angulações e os tubos são suspensos por tensionadores, que atuam controlando a velocidade de lançamento dos risers (Rody, 2014).

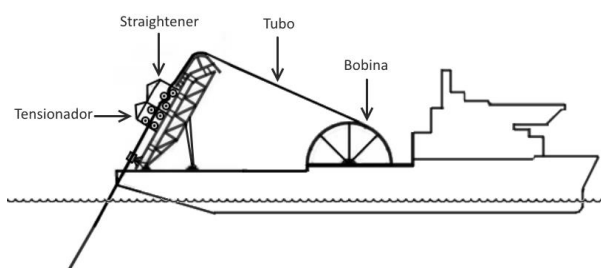


Fig. 6 – Desenho esquemático de uma embarcação para lançamento Reel Lay

Ainda segundo (Rody, 2014), este método se diferencia por apresentar maior eficiência e menor tempo de instalação, já que a embarcação já recebe os tubos rígidos prontos para serem instalados. Além do ganho em produtividade, com o uso do *Reel lay* se obtém uma grande redução do custo operacional, devido ao processo de soldagem e revestimento ser feito *onshore*.

Os tubos são submetidos a deformações plásticas no processo de enrolamento e desenrolamento na bobina, necessário para que a estrutura esteja pronta para o lançamento. Este processo impacta diretamente na distribuição de tensões nas seções transversais dos risers, devido ao escoamento parcial em que estas seções transversais são expostas. Esses curvamentos sucessivos podem gerar tensões, deformações residuais em seções transversais do tubo, que são objeto de estudo deste trabalho.

2.2 Tubos de Aço Carbono ARBL

Durante a crise do petróleo, houve uma busca maior por novas fontes e explorações de jazidas em locais até então não exploradas. Neste período, os aços ARBL (Alta Resistência e Baixa Liga), foram responsáveis por otimizar os projetos de *risers* até então desenvolvidos, tendo registro das primeiras utilizações dos aços API 5L X-70, na Alemanha, para construção de dutos de transporte de gás, (CALOI, 2008).

Os aços ARBL, devido a sua alta resistência mecânica, possibilitaram uma redução significativa das espessuras das paredes dos tubos estruturais, amplamente utilizados na indústria do petróleo. Esta diminuição na espessura, influenciou diretamente os custos envolvidos nas construções dos dutos. Possibilitando, uma redução nos custos de transporte e os custos de material. Além de viabilizar projetos em que se era necessário que os tubos admitissem maiores pressões internas, aumentando o volume de gás ou petróleo transportado.

Devido às suas propriedades de alto limite de resistência, boa conformabilidade, boa tenacidade a baixas temperaturas e boa soldabilidade, os aços ARBL são amplamente utilizados pelos diversos setores industriais. Estes aços, são resultado de um processo de manufatura que incorpora conceitos de endurecimento por precipitação, refino de grão, adição de elementos microligantes e laminação a quente.

Norma API

Neste trabalho, o estudo realizado utilizará os aços segundo a norma API 5L para análise. A API (American Petroleum Institute), é uma organização cuja as normas são utilizadas pelo segmento de petróleo e gás natural como um todo. As normas geradas pela API, são reconhecidas pelo seu rigor técnico e por este motivo, utilizadas como referência para diversas outras normas ao redor do mundo.

A norma API 5L abrange tubos de aço sem costuras e soldados, podendo estes possuírem ou não metal de adição. Nela também estão inclusas diferentes terminações para as tubulações.

Nas especificações, os aços são separados quanto a especificação de processo (PSL). A PSL-1 e PSL-2 se diferem quanto ao teor de cada elemento químico presente na mistura e conseqüentemente as propriedades mecânicas, além exigir diferentes condições de teste.

Composição Química

A composição química dos aços, influencia diretamente suas características e conseqüentemente sua aplicação. O teor de cada elemento acarreta num aumento ou redução de determinada propriedade mecânica, conforme descrito brevemente a seguir:

- Carbono: O aumento do teor de carbono contribui com a dureza a quente, uma das formas mais econômicas de aumentar-se a resistência mecânica do aço;
- Manganês: Reduz a temperatura de transformação ferrita -> austenita. Desta forma se obtém um maior refinamento dos grãos e conseqüente aumento da resistência mecânica (MONTE, 2013);
- Silício: Promove aumento da resistência mecânica através do endurecimento da solução sólida (PORTO, et al., 2017);
- Enxofre: Elemento indesejado, influência de forma prejudicial às propriedades mecânicas (MONTE, 2013);
- Fósforo: Em determinados casos, pode ser considerado impureza e causar aumento do tamanho de grão e fragilidade a frio. Porém, em quantidades adequadas, influencia positivamente com o aumento da resistência mecânica (para aços de baixo carbono), aumento da resistência à corrosão e melhora da usinabilidade (MONTE, 2013);
- Nitrogênio: Devido a afinidade aos elementos Nb, Al, V, Ti, pode causar endurecimento por precipitação e não deve apresentar alto teor no aço (MONTE, 2013);
- Nióbio: Um dos principais elementos de ligas presentes nos aços liga, atua aumentando a resistência ao escoamento, quando utilizado de forma apropriada (PORTO, et al., 2017);
- Titânio: Reduz a temperabilidade e a dureza martensítica;

Os elementos de liga S, N, P não são adicionados de forma proposital ao aço e podem ser considerados como impurezas. A norma API 5L, define os teores máximos de cada um dos elementos descritos anteriormente, conforme a Tabela 1

Tabela 1 - Composição química para tubos PSL2

| Sem Costura e Tubos Soldados - Temperados e revenido (%) | | | | | | | | |
|--|------|------|------|-------|-------|------|--------|------|
| Grau | C | Si | Mn | P | S | V | Nb | Ti |
| X42 | 0.18 | 0.45 | 1.20 | 0.025 | 0.015 | 0.05 | 0.05 | 0.04 |
| X46 | 0.18 | 0.45 | 1.40 | 0.025 | 0.015 | 0.05 | 0.05 | 0.04 |
| X52 | 0.18 | 0.45 | 1.50 | 0.025 | 0.015 | 0.05 | 0.05 | 0.04 |
| X56 | 0.18 | 0.45 | 1.50 | 0.025 | 0.015 | 0.07 | 0.05 | 0.04 |
| X60 | 0.18 | 0.45 | 1.70 | 0.025 | 0.015 | | 0.15 * | |
| X65 | 0.18 | 0.45 | 1.70 | 0.025 | 0.015 | | 0.15 * | |
| X70 | 0.18 | 0.45 | 1.80 | 0.025 | 0.015 | | 0.15 * | |
| X80 | 0.18 | 0.45 | 1.90 | 0.025 | 0.015 | | 0.15 * | |

* A soma dos teores de V + Nb + Ti possui valor máximo de 0.15%

Fonte: Adaptado da norma *API SPECIFICATION 5L* (2018)

Propriedades mecânicas

Os aços definidos pela API 5L, são conhecidos por possuírem características essenciais para suas aplicações, como a soldabilidade. Esta propriedade garante que os tubos de aço ARBL, tenham sua fabricação e instalação facilitada. Esta característica pode ser avaliada a partir da análise de seu carbono equivalente. Quanto maior o carbono equivalente, maior a sua temperabilidade e consequentemente, menor sua soldabilidade. Para o cálculo, segundo a proposta realizada por Ito-Bessyo e citado por (Bastian & Castrodeza, 2016), a equação (1) deve ser utilizada.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{6} \quad (1)$$

Na norma, são definidos os valores máximos de Carbono equivalente. São eles, 0,43% para aços que possuam $C > 0,12\%$ e 0,25% para aços que possuam $C \leq 0,12\%$.

Apesar de o teor de elementos de liga ditarem as propriedades mecânicas do material, os aços API 5L tem muitas de suas características adquiridas devidos ao processo de fabricação. A alta resistência mecânica e a boa tenacidade à fratura, resultam de uma sequência de

processamento, que inclui tratamentos termomecânicos, a fim de garantir o refino de grão e o endurecimento por precipitação e por solução sólida do material.

Os aços de alta resistência referenciados pela API 5L, os que se iniciam com a letra “X”, carregam em seu grau de resistência ao escoamento mínimo em ksi, definido pela norma, conforme mostrado na Tabela 2. Como exemplo, o aço API 5L X52, cuja a sua resistência ao escoamento é da ordem de 52,2 ksi (360 MPa).

Tabela 2 - Requisitos mínimos para os resultados dos testes de tração em tubos PSL 2

| Sem Costura e Tubos Soldados - Temperados e revenido | | | | |
|--|---------------------------|---------|-------------------|---------|
| Grau | Resistência ao Escoamento | | Limite de Ruptura | |
| | MPa (kpsi) | | MPa (kpsi) | |
| | min | max | min | max |
| X42 | 290 | 495 | 415 | 655 |
| | (42,1) | (71,8) | (60,2) | (95,0) |
| X46 | 320 | 525 | 435 | 655 |
| | (46,4) | (76,1) | (63,1) | (95,0) |
| X52 | 360 | 530 | 460 | 760 |
| | (52,2) | (76,9) | (66,7) | (110,2) |
| X56 | 390 | 545 | 490 | 760 |
| | (56,6) | (79,0) | (71,1) | (110,2) |
| X60 | 415 | 565 | 520 | 760 |
| | (60,2) | (81,9) | (75,4) | (110,2) |
| X65 | 450 | 600 | 535 | 760 |
| | (65,3) | (87,0) | (77,6) | (110,2) |
| X70 | 485 | 635 | 570 | 760 |
| | (70,3) | (92,1) | (82,7) | (110,2) |
| X80 | 555 | 705 | 625 | 825 |
| | (80,5) | (102,3) | (90,6) | (119,7) |

Fonte: Adaptado da norma API SPECIFICATION 5L (2018)

Processos de fabricação

Anteriormente ao desenvolvimento dos aços ARBL, o aumento da dureza era conseguido pela adição de carbono e manganês, desta forma, o material resultante apresentava péssima soldabilidade e tenacidade. Os aços API 5L passaram a apresentar uma melhora destas propriedades a partir dos avanços tecnológicos envolvidos nos processos de fabricação.

Os tubos de aço, quanto a fabricação, podem ser divididos em dois grupos, os inteiriços e os soldados. Para a produção dos tubos inteiriços, sem costura, são utilizados tarugos de aço que podem passar por diversos processos como, extrusão e mandrilagem (CHIAVERINI, 2005). Já os tubos soldados, com costura, são fabricados a partir de chapas laminadas e foi no processo de fabricação destas chapas onde houve os maiores avanços tecnológicos.

Até a década de 70, os aços ARBL eram produzidos por laminação a quente com subsequente normalização, gerando aços a resistência ao escoamento S_y de até 60 ksi. Neste período, eram utilizados aços de alto carbono e o processo de laminação era realizado com o objetivo único de adequação dimensional (GORNI & SILVEIRA, 2010). As propriedades mecânicas desejadas eram atingidas posteriormente com o tratamento térmico.

Os aços com S_y superior à 60 ksi, como o API 5L X70, só foram introduzidos ao mercado com a início da utilização de uma nova rota de produção para as chapas, a laminação controlada. Neste processo ocorre um intenso refino de grão e a precipitação dos elementos microligantes, em nitretos e carbonetos (GORNI & SILVEIRA, 2010). Desta forma, o material apresenta um aumento da sua tenacidade e resistência mecânica, sem a necessidade de aumento do teor de carbono.

2.3 Estruturas cladeadas

A necessidade de elementos estruturais que possuam resistência a ambientes corrosivos é uma realidade de diversos setores da indústria. Porém, a confecção de componentes totalmente em material que possua essa resistência, pode apresentar um custo elevado e, em muitos projetos, inviabilizar sua aplicação.

A fim de atender aos requisitos de resistência à corrosão e menor custo, foram desenvolvidos processos de proteção superficial. Dentre eles, destaca-se o cladeamento (*cladding*), que consiste na deposição superficial de um material mais nobre

sobre o substrato. Assim, é possível conciliar a resistência à corrosão, fornecida pelo revestimento, à resistência mecânica, fornecida pelo material de base (BRISTOT, 2014).

Apesar da tecnologia de cladeamento já ser amplamente utilizada na indústria nuclear e bélica, desde a década de 60, nos últimos anos, estruturas cladeadas também começaram a serem utilizadas na indústria do petróleo (Bastian & Castrodeza, 2016).

Material de adição

Um dos materiais mais utilizados para o cladeamento de estruturas empregadas em plataformas offshore é a liga de níquel Inconel ® 625. Não há um sistema de classificação para estas ligas, por este motivo, são conhecidas pelos números ou nomes atribuídos originalmente pelo seu fabricante (SILVA, 2018).

A liga Inconel ® 625, apresenta endurecimento por solução sólida, ocorrendo a adição substitucional ou intersticial de elementos de liga (SILVA, 2018). Fator que garante uma boa integridade estrutural a componentes confeccionados com este material. Algumas de suas propriedades mecânicas são expostas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do Inconel ® 625 recozido

| Limite de resistência a tração (MPa) | Resistência ao escoamento (MPa) | Alongamento (%) |
|---|------------------------------------|--------------------|
| 827 | 414 | 30 |

Fonte: Adaptado da norma ASTM B444 (1998)

Embora seja possível considerar as chapas cladeadas como contribuição para a resistência mecânica da estrutura, é prática usual o dimensionamento supor que o material de base resista a todos os carregamentos sofridos pelo conjunto. Dessa forma, a chapa de revestimento apenas é considerada como uma proteção anticorrosiva.

Na Tabela 4, é possível verificar os teores máximos e mínimos, quando aplicáveis, de cada elemento químico que forma a liga níquel-cromo-ferro que abordamos neste trabalho. Os valores utilizados foram obtidos a partir da ASTM B444 (1998).

Tabela 4 - Composição química do Inconel 625

| Composição química (%) | | | | | | | | | | | |
|------------------------|----|-----|------|-----|-----|-------|-----|------|------|-----|-----|
| Ni | Cr | Fe | Mo | Al | C | Nb+Ta | Si | S | P | Ti | Mn |
| Bal. | 20 | < | 8.0 | < | < | 3.15 | < | < | < | < | < |
| | 23 | 5.0 | 10.0 | 0.4 | 0.1 | 4.15 | 0.5 | 0.15 | 0.15 | 0.4 | 0.5 |

Fonte: Adaptado da norma ASTM B444 (1998)

Nas aplicações em plataformas *offshore*, estas ligas se destacam por apresentar excelente resistência contra corrosão por pite. Dessa maneira, essas estruturas revestidas exigem uma frequência de manutenção menor, impactando diretamente na redução dos custos operacionais (BRISTOT, 2014).

Processos de fabricação

Anteriormente ao desenvolvimento dos aços ARBL, o aumento da dureza era conseguido pela adição de carbono e manganês, desta forma, o material resultante apresentava péssima soldabilidade e tenacidade. Os aços API passaram a apresentar uma melhora destas propriedades a partir dos avanços tecnológicos envolvidos nos processos de fabricação dos aços.

No cladeamento mecânico, os materiais de base e de revestimento são unidos por deformação mecânica. Dentre os processos que podem ser utilizados para a realização desta união, destaque para a extrusão e a laminação. Segundo (BRISTOT, 2014), no processo de cladeamento por extrusão, o material de adição deve ser extrudado sobre o material base e por esse motivo, é indicado para materiais não ferrosos.

No cladeamento metalúrgico, obtém-se uma união permanente entre o metal base e o revestimento, onde ocorre uma forte ligação metalúrgica, podendo ser aplicado em uma ou nas duas faces da chapa. Este processo é realizado por soldagem (Fig. 7), sendo os mais utilizados TIG, MIG, arco submerso e *laser* (Bastian & Castrodeza, 2016). Segundo (BRISTOT, 2014), os processos não convencionais como o de soldagem por explosão, tiveram sua aplicação reduzida e substituída pelo processo de soldagem por arco elétrico, devido a sua maior flexibilidade produtiva.



Fig. 7 - Processo de cladeamento por soldagem Sulzer (Weld overlay)

Após o processo de cladeamento, pode ser realizado uma inspeção visual seguida de ensaio por líquido penetrante, a fim de validar a qualidade do revestimento confeccionado. O objetivo do ensaio é apenas verificar possíveis defeitos superficiais.

2.4 Conceitos Básicos/ Análise de Carregamentos

Esta parte do presente trabalho destina-se à revisão de conceitos básicos da mecânica dos sólidos, passando pelos carregamentos fletores elásticos, elastoplástico e por tensões residuais que são o objeto de estudo.

Flexão Elástica.

Nesta seção analisa-se o comportamento de uma viga prismática reta de material homogêneo sob solicitação de flexão. A viga, originalmente reta, se deforma sob um perfil gerador de uma curvatura, e pode ser definida como a variação do ângulo de inclinação da curva em relação a distância ao longo dessa curva.

Considera-se a barra reta mostrada na Fig. 8.a, marcada longitudinalmente e transversalmente por linhas de grade, quando é aplicado um momento fletor, é possível observar que as linhas longitudinais tendem a aumentar ou reduzir de tamanho, enquanto as linhas transversais permanecem retas Fig. 8.b.

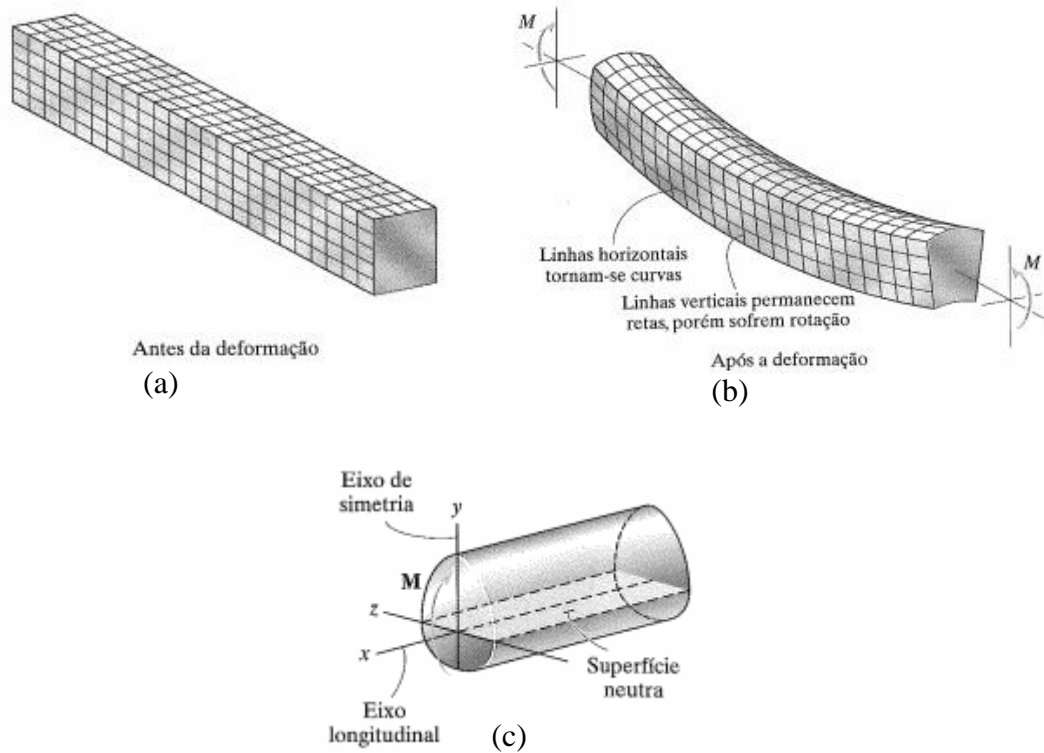


Fig. 8- Representação de viga sob um momento fletor. Fonte: R.C. Hibbeler, 2015.

Desta forma, quando momento fletor positivo é aplicado a qualquer barra deformável, provoca um alongamento (tração) na parte mais afastada do raio de curvatura (extradorso) e uma compressão na porção mais próxima do raio de curvatura (intradorso) (Hibbeler, 2010). Por definição, a deformação longitudinal ε é dada por (2):

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{L' - L}{L} \quad (2)$$

onde L' é o comprimento final, L é o comprimento inicial e δ é a variação de deslocamento.

Na Fig. 9 continua-se a explicação.

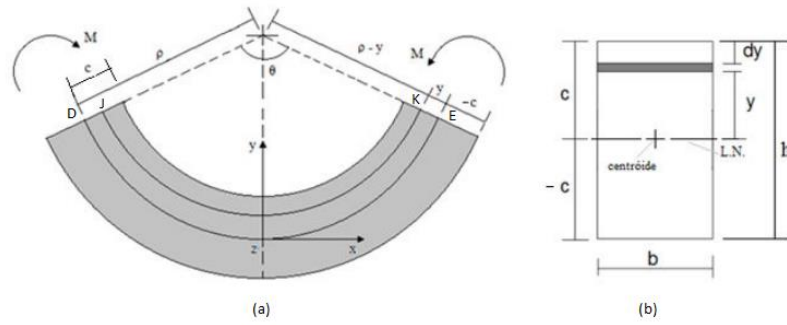


Fig. 9 - (a) Viga submetida a um momento fletor; (b) Seção transversal da viga. Fonte: Autor

O comprimento do arco DE, de raio de curvatura ρ e ângulo central θ é mostrado da equação (3). O comprimento do arco JK localizado a uma distância y acima da superfície neutra é mostrado na equação (4) (Beer, 2015):

$$L = \rho\theta \quad (3)$$

$$L' = (\rho - y)\theta \quad (4)$$

Como o comprimento inicial do trecho DE e do trecho JK eram os mesmos, pode-se substituir (3) e (4) em (2):

$$\varepsilon = -\frac{y}{\rho} \quad (5)$$

O sinal de menos da equação (5), atende a suposição de que se o momento fletor aplicado for positivo, a viga terá concavidade positiva. A deformação longitudinal atinge seu maior valor quando o valor de y é o mais distante da linha neutra possível. Em muitos casos esta distância é chamada de c .

$$\varepsilon_{max} = \frac{c}{\rho} \quad (6)$$

Pode-se reescrever as deformações como:

$$\varepsilon = -\frac{y}{c}\varepsilon_{max} \quad (7)$$

Considerando que, nesse primeiro momento, apenas carregamentos elásticos são aplicados a viga de material linear elástico, chega-se a equação que relaciona a tensão longitudinal de uma viga, com o momento fletor que age na seção transversal. Utilizando a lei de Hooke $\sigma = \varepsilon E$ e substituindo em (7), obtém-se a equação (8). É importante pontuar que, assim como a variação da deformação longitudinal, a tensão σ variará linearmente do valor zero, no eixo neutro, até o seu valor máximo de tensão máxima σ_{max} , à distância c , mais afastada do eixo neutro.

$$\sigma = -\frac{y}{c}\sigma_{max} \quad (8)$$

A equação (8) descreve a distribuição de tensões na área da seção transversal a uma dada distância y da sua linha neutra. A tensão na viga pode ser determinada, a partir do equilíbrio, pelo fato de o momento resultante M ter de ser igual ao momento produzido pela distribuição de tensão em torno do eixo neutro, conforme equação (9).

$$M = \frac{\sigma_{max}}{c} \int y^2 dA \quad (9)$$

Sabendo-se que a integral da equação anterior representa o momento de inércia de área da seção transversal em torno do eixo neutro, pode-se reescrever as equações tensão máxima σ_{max} e tensão σ a qualquer distância da linha neutra na seção transversal da viga como:

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (10)$$

Substituindo-se (8) em (10):

$$\sigma = \frac{-My}{I} \quad (11)$$

A análise feita até este ponto abrange apenas a fase elástica do material, ou seja, o caso que a resistência ao escoamento do material não foi ultrapassada e a seção transversal não se encontra plastificada em ponto algum.

Material elástico perfeitamente plástico

Supondo uma viga sob a solitação de um momento de valor $M(x)$, a Fig. 10 mostra de forma esquemática, a distribuição de tensões normais perpendiculares à seção transversal da viga em função do valor de $M(x)$ aplicado. Neste caso será considerado um material de comportamento elástico perfeitamente plástico, ou seja, não há encruamento na fase plástica.

É importante ressaltar a natureza inversa que os parâmetros raio de curvatura ρ e momento aplicado $M(x)$ possuem, uma vez que, quando a viga não estiver sendo solicitada o raio de curvatura de seu perfil tende a infinito, e o decréscimo desse raio de curvatura acontece conforme o momento aplicado na viga vai se elevando (Rody, 2014).

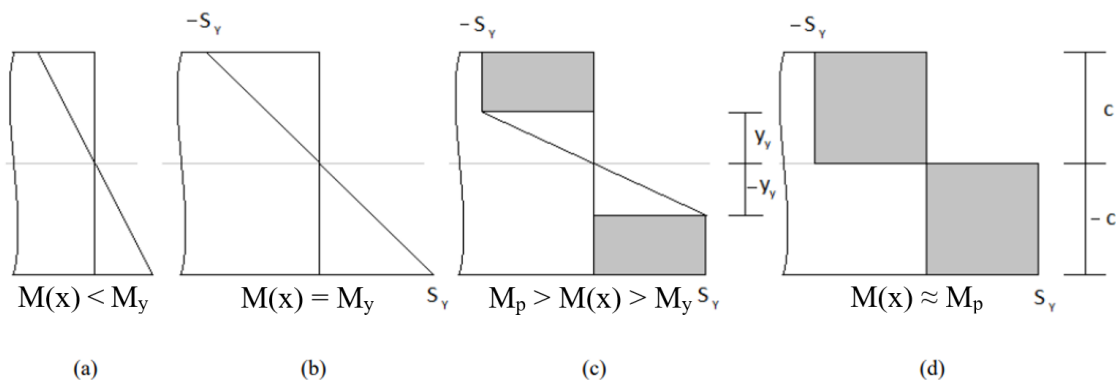


Fig. 10 - Sequência de carregamento. Fonte: Criado pelo autor

Quando a viga sob condições de baixo carregamento, a sua seção transversal permanece se comportando elasticamente na sua totalidade, conforme mostrado na Fig. 10.a. Quando o momento aplicado à viga alcança o valor da resistência ao escoamento, que causa o início da plastificação da seção transversal, dá-se o nome de momento elástico M_y , conforme a Fig. 10.b.

A linha imaginária que divide a área da seção transversal já plastificada da área que ainda se comporta elasticamente é chamada de fronteira elasto-plástica. Quando o momento elástico é atingido, a fronteira elasto-plástica se encontra à maior distância da linha neutra possível, distância essa com valor igual a c . O incremento no carregamento após o momento elástico ser alcançado, faz com que a altura da fronteira elasto-plástica y_y se reduza conforme Fig. 10.c e quando toda a seção estiver plastificada, a viga se encontrará sob o carregamento de um momento plástico M_p , nesta condição y_y é aproximadamente igual a zero. (Araujo, 2016).

Material Elástico com Encruamento

A teoria do módulo tangente visa simplificar a análise da resposta estrutural de um material com encruamento. Ela se baseia no comportamento bi-linear que existe entre a tensão σ e deformação ϵ (Araujo, 2016). A Fig. 11 mostra graficamente o modelo analítico do módulo tangente.

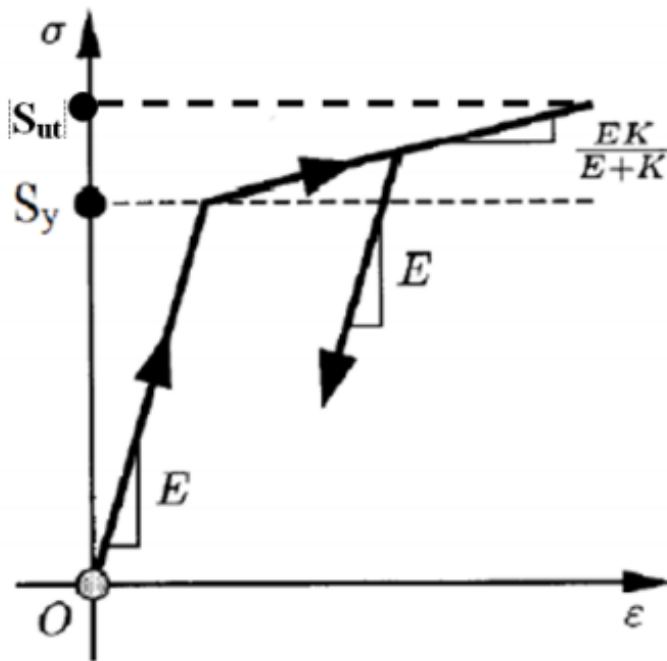


Fig. 11 - Módulo Tangente. Fonte: *Cladded Pipe Stress Analysis*, 2014

Quando um determinado material é solicitado, seu comportamento primário é caracterizado como deformação elástica, onde as tensões internas não são acumuladas e os planos cristalográficos não sofrem grandes distorções. Esse comportamento elástico permanece até que a resistência ao escoamento S_y seja alcançada, e o coeficiente angular desta reta é representada pelo módulo de elasticidade E do material.

Se a tensão sobre o material vai além da resistência ao escoamento, o material começa acumular tensões internas podendo chegar até o maior valor de tensão de interesse do material, a esse valor dá-se a denominação tensão última S_{ut} . Chama-se essa zona entre o S_y e S_{ut} de zona plástica ou zona de plastificação, que é representada pela equação de uma reta tangente como uma função do módulo de elasticidade E e o módulo de plasticidade K . A equação (12) representa o módulo tangente E_t e a equação (13) o módulo de plasticidade K (Araujo, 2016).

$$E_t = \frac{E \cdot K}{E + K} \quad (12)$$

$$K = \frac{S_{ut} - S_y}{\epsilon_{ut}} \quad (13)$$

2.5 Tensões Residuais

Tensões residuais são aquelas que permanecem na peça mesmo após todas as suas solicitações externas terem sido removidas. As tensões residuais são acumuladas no componente como consequência de deformações e efeitos térmicos. Uma das principais causas de seu aparecimento é a ocorrência de deformações plásticas não uniformes ao longo de uma seção da peça, as quais podem ser originadas por efeitos mecânicos ou térmicos. Estas tensões representam um dos principais efeitos geradores para diversos problemas, como a formação de trincas, falta de estabilidade dimensional e uma maior tendência para a estrutura sofrer fratura frágil. Esses efeitos não só diminuem a vida útil do componente, como também podem comprometer seu desempenho mecânico.

Geradores de tensão residual.

As tensões residuais geradas por efeitos térmicos, principalmente pelo processo de soldagem, são resultado de variações térmicas não homogêneas que ocorrem ao longo do objeto.

Se a variação térmica não for uniforme ao longo do objeto ou se este não puder se dilatar e contrair livremente durante o ciclo térmico, tensões residuais e/ou distorções podem se desenvolver. Isto é exatamente o que ocorre na soldagem, pois pelo fato de o aporte de calor ser extremamente intenso e localizado, cada região se comporta de forma diferente, com temperaturas diferentes, taxas de resfriamento diferentes, e, portanto, microestruturas diferentes. (MODENESI, 2008)

Após o processo de soldagem se o material não passar por um processo de alívio de tensões, o material ficará mais suscetível ao escoamento ou até mesmo à ruptura. No primeiro caso, a deformação plástica ocasionada no objeto pode acabar aliviando as tensões, o que

impede o contínuo aumento na magnitude dela, assim evitando que chegue ao limite de resistência. Já no segundo caso, por exemplo para um material frágil, pode atingir o seu limite de resistência após crescimento de deformações puramente elásticas.

Já as tensões residuais originadas por efeitos mecânicos acontecem por uma deformação plástica heterogênea ao longo do material. Caso ainda existam tensões na peça após a retirada do carregamento, pode-se dizer que alguma região do material foi solicitada além do seu limite elástico e, portanto, ocorreram deformações plásticas. Ou falando-se de outra forma, se não ocorrer deformações plásticas, as tensões residuais não serão geradas.

Dentre as principais causas do aparecimento de tensões residuais, estão os seguintes processos de fabricação (Sousa, 2012):

- Conformação: Laminação, trefilação, extrusão, forjamento e estampagem;
- Tratamento térmico: Têmpera, Endurecimento, nitretação e cementação;
- Usinagem: Torneamento, furação, fresamento, retificação e aplainamento;
- Revestimento: Galvanização e deposição.
- Carregamento elastoplástico: Tração, compressão, flexão e torção.

Os tubos em particular, que são os objetos de estudo no presente trabalho, sofrem carregamentos elastoplásticos provenientes do enrolamento e desenrolamento nos carretéis de transporte.

CAPÍTULO 3 - DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS FLETORES

Nesse capítulo, serão apresentadas as análises que definem a distribuição dos momentos fletores que incidem sobre o riser pros diferentes raios de curvatura impostos sobre ele durante o enrolamento.

3.1 Cálculo dos momentos aplicados em estruturas tubulares

Para realizar o cálculo dos momentos na seção transversal é necessário levar em consideração a geometria do tubo. Conforme mostrado na Fig. 12, a região "a" é cheia e sua área é calculada como se fosse uma seção circular maciça, já a área "b" representada na Fig. 13 considera uma seção circular vazada.

O elemento infinitesimal de área "a" é obtido através da equação (14).

$$dAa = 2 \cdot \sqrt{R_o^2 - y^2} dy \quad (14)$$

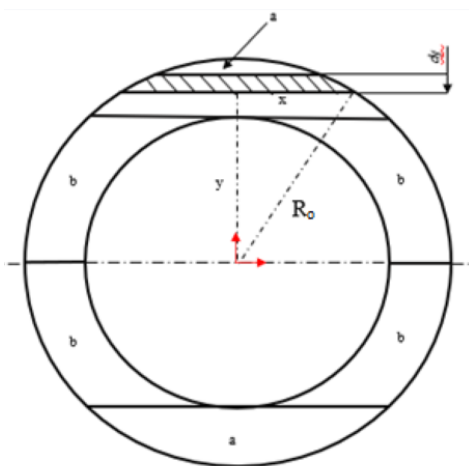


Fig. 12 - Região "a" com elemento de área diferencial dAa

Para a região "a" o momento fletor é calculado a partir da equação (15).

$$Ma(\rho) = 2 \cdot \int_{Ri}^{Ro} y \left(Sy_{tubo} + Et_{tubo} \left(\frac{y}{\rho} - \epsilon_{y_{tubo}} \right) \right) dAa \quad (15)$$

Já a região "b" tem o seu elemento infinitesimal de área calculado com duas parcelas, conforme apresentado pela equação (16).

$$dAb = 2 \left[\sqrt{(R_{o_{tubo}})^2 - y^2} - \sqrt{(R_{i_{tubo}})^2 - y^2} \right] dy \quad (16)$$

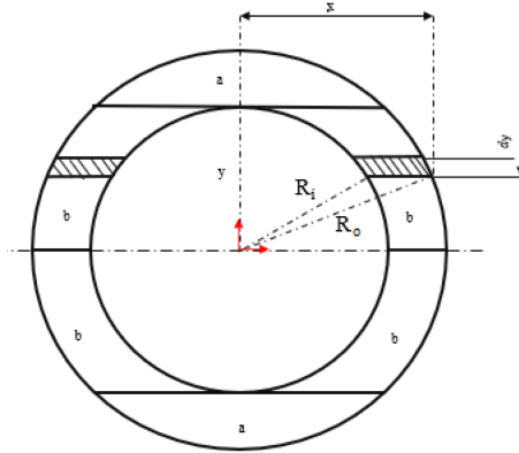


Fig. 13 - Região "b" com elemento de área diferencial dAb

O cálculo de momento fletor para a região "b" é resultado da soma de dois termos que estão devidamente representados na equação (17), sendo o primeiro relacionado à parte elástica e o segundo termo que está ligado à parte plástica.

$$Mb(\rho) = 2 \cdot \left[\int_0^{y_{y(\rho)}} y \left(\frac{y}{y_{y_{tubo}}} \right) S y_{tubo} \cdot dAb + \int_{y_{y(\rho)}}^{R_{i_t}} y \left(S y_{tubo} + E t_{tubo} \left(\frac{y}{\rho} - \varepsilon_{y_{tubo}} \right) \right) dAb \right] \quad (17)$$

De modo a apresentar de maneira mais detalhada e visual, as equações para o cálculo de momentos foram separadas a fim de enquadrar o perfil mais adequado do tubo para cada uma delas.

Para chegar ao resultado efetivo do momento aplicado, é necessário somar a equação (15) que representa a parcela da área sólida do tubo, com a (17) que é resultado da análise da parte vazada. Desse modo, é possível chegar a equação (18), conforme descrito à seguir.

$$M_t(\rho) = M_a(\rho) + M_b(\rho) \quad (18)$$

A análise para o clad é análoga, serão utilizadas equações similares as equações deste sub-item, porém incluindo os dados pertinentes à geometria e dimensões do clad.

Conforme citado no início do presente capítulo, estudo de momento começa considerando a geometria do riser e fazendo uma análise da seção transversal além da curvatura imposta a ele, definida pelo raio de curvatura ρ .

A fronteira elastoplástica, para o caso de carregamentos elásticos, é considerada inexistente. Entretanto, de maneira didática, para casos de M menor que M_y , pode-se considerar uma linha imaginária acima de R_o calculada a partir da equação (24), conforme mostrado na Fig. 14, que confirma a natureza elástica na seção transversal por completo.

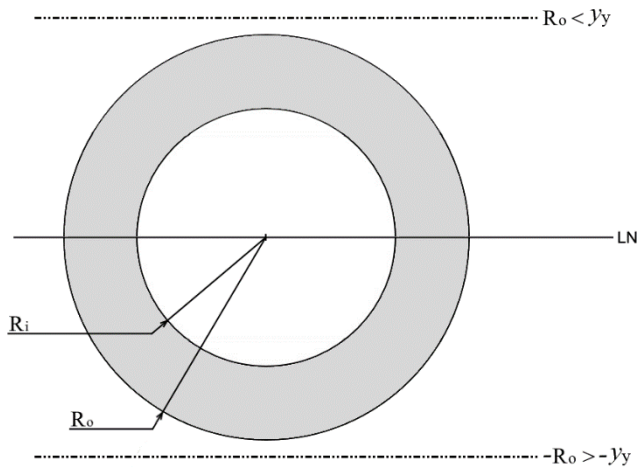


Fig. 14 - Fronteira elastoplástica "imaginária".

Quando se trata de momentos de flexão inferiores à M_y , o valor pode ser encontrado a partir da equação (19). Contudo, é importante levar em consideração que o momento total sobre o componente será o somatório resultante das parcelas obtidas para M_t (parcela do momento total que cabe ao tubo) e M_c (parcela do momento total que cabe ao clad), sendo tanto o tubo quanto o clad submetidos a uma mesma curvatura, em uma configuração paralela:

$$M_{Riser} = M_{tubo} + M_{clad} ; M_{Riser} < M_{elástico}(y) = \frac{S_y \cdot I}{y} \quad (19)$$

Para alcançar o momento elástico, é necessário que seja imposto ao tubo um raio de curvatura com valor expresso pela fórmula (20(22)):

$$\rho_y = \frac{E \cdot I}{M_y} \quad (20)$$

O ρ_y encontrado também é conhecido como ρ_o , pois é o raio de curvatura associado ao y_y que coincide com o ponto mais externo do tubo R_o . De maneira análoga, o ρ_i , é o raio de curvatura que gera a fronteira elastoplástica a uma distância da linha neutra igual ao raio interno R_i .

O momento de inércia do tubo pode ser obtido através da equação (21):

$$I = \frac{\pi(R_o^4 - R_i^4)}{4} \quad (21)$$

O S_y representa a resistência ao escoamento do material. Foram selecionados para estudo o tubo de aço API cladeado, cujos limites de escoamento se encontram nas Tabela 2 e Tabela 3.

Após a análise da geometria da seção transversal, é preciso estruturar o cálculo para que se consiga analisar o comportamento da distribuição do momento nos diferentes raios de curvatura aplicados. Para seguir com o cálculo da parcela elastoplástica, é necessário levar em consideração os momentos elásticos e a plastificação que estarão presentes no tubo.

Para o cálculo do momento total sobre o componente, com momento superior a M_y , o comportamento do tubo começa a ter uma distribuição heterogênea. Tal distribuição apresenta regiões diferentes, sendo uma parte com plastificação e outra ainda apresentando o comportamento elástico.

Durante o carregamento, é formado um núcleo elástico onde não há deformação plástica. A metade da altura deste núcleo é chamada de fronteira elastoplástica, ela indica o ponto de transição entre a região plástica e elástica da seção transversal. Sendo assim, o núcleo elástico compreende a região entre $-y_y$ e $+y_y$. As regiões mais distantes da linha neutra, que ultrapassem o valor de y_y , representam as áreas onde a seção transversal é deformada plasticamente. Na Fig. 15 a fronteira elastoplástica é destacada pela linha tracejada e indica três cenários.

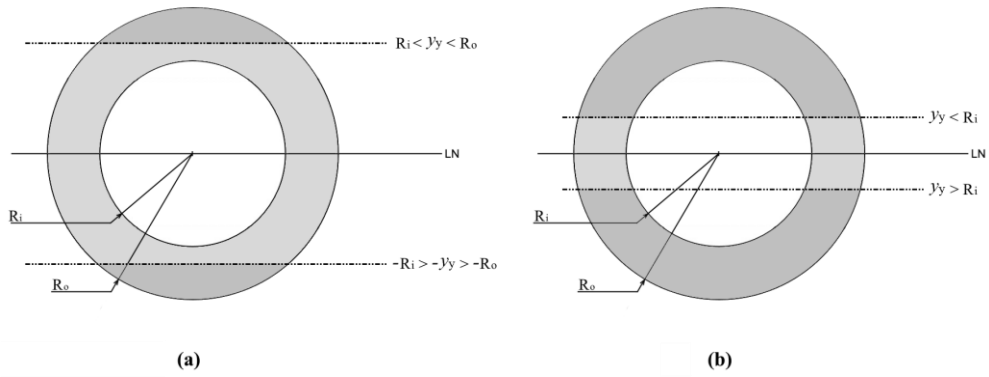


Fig. 15 - Definição da fronteiras elastroplásticas para: (a) $\rho_0 > \rho > \rho_i$; (b) $\rho < \rho_i$.

Para compreensão dos cenários descritos na Fig. 14 e na Fig. 15 , é necessário definir que:

$$\begin{aligned}
 y_y &> c && , \text{ para } M(\rho) < M_y \\
 y_y &= \varepsilon_y * \rho && , \text{ para } M_y \leq M(\rho) < M_p \\
 y_y &\approx 0 && , \text{ para } M_p \approx M(\rho)
 \end{aligned}$$

Momento Elástico

O valor de M_y pode ser calculado como mostrado:

$$\begin{aligned}
 M_y = 2. \left[\int_0^{R_{i_t}} y \left(\frac{y}{R_{O_t}} \right) S y_{tubo} \cdot 2 \left[\sqrt{(R_{O_{tubo}})^2 - y^2} - \sqrt{(R_{i_{tubo}})^2 - y^2} \right] dy \right. \\
 \left. + \int_{R_{i_t}}^{R_{O_t}} y \left(\frac{y}{R_{O_t}} \right) S y_{tubo} \cdot 2 \cdot \sqrt{R_o^2 - y^2} dy \right] \quad (22)
 \end{aligned}$$

Momento Plástico

O valor de M_p pode ser calculado como mostrado:

$$\begin{aligned}
 M_p = 2. \left[\int_0^{R_{i_t}} y \left[S y + E t \left(\frac{y}{\rho} - \varepsilon_y \right) \right] \cdot 2 \left[\sqrt{(R_{O_{tubo}})^2 - y^2} - \sqrt{(R_{i_{tubo}})^2 - y^2} \right] dy \right. \\
 \left. + \int_{R_{i_t}}^{R_{O_t}} y \left[S y + E t \left(\frac{y}{\rho} - \varepsilon_y \right) \right] \cdot 2 \cdot \sqrt{R_o^2 - y^2} dy \right] \quad (23)
 \end{aligned}$$

Momento Elastoplástico

Importante destacar que há uma relação direta entre o raio de curvatura e a posição da fronteira elastoplástica. Visto que quanto menor o raio de curvatura, maior será o $M(\rho)$. Sendo assim, quanto menor o raio de curvatura, menor será o valor de y_y , ou seja, menor será o núcleo elástico. O valor de y_y pode ser determinado a partir da equação (24), para $M_y \leq M(\rho) < M_p$.

$$y_y(\rho) = \varepsilon_y \cdot \rho \quad (24)$$

O momento elástico, também chamado de M_y terá seu valor alcançado no ponto de maior distância em relação à linha neutra do tubo c . Como a geometria trabalhada neste estudo é uma seção circular vazada, pode-se considerar que o Raio externo R_o é equivalente a c . A partir desta consideração, é possível estimar qual o raio de curvatura elástico máximo ρ_y , pela equação(25)

$$\rho_y = \frac{E \cdot c}{S_y} \quad (25)$$

A equação (26) representa o ρ_o , que é o raio de curvatura associado ao início da plastificação na região “a”, onde y_y se encontra exatamente a uma distância da linha neutra igual ao raio externo R_o . Já a equação (27) descreve o raio de curvatura no início da plastificação da região “b”, onde o y_y está a uma distância igual ao raio interno do tubo em relação a linha neutra.

$$\rho_o = \frac{R_o}{\varepsilon_y} \quad (26)$$

$$\rho_i = \frac{R_i}{\varepsilon_y} \quad (27)$$

Quando o ρ aplicado ainda se encontra acima do ρ_y , apenas carregamentos elásticos incidem sobre o riser. Portanto, momento associado a esse estágio pode ser calculado a partir da equação (28).

$$M(\rho) = \frac{E \cdot I}{\rho} \quad (28)$$

Uma vez que o enrolamento no carretel gera um raio de curvatura igual ou inferior à ρ_y , inicia-se a plastificação. Neste estágio, como mostrado na Fig. 12, o y_y se encontra na região “a”, sendo a parte plastificada a que se encontra acima do y_y e a elástica à seguir.

$$\begin{aligned} M(\rho) = & 2 \left[\int_0^{R_i} y \left[\frac{y}{(\rho \cdot \varepsilon_y)} \cdot S_y \right] \cdot 2 \left[\sqrt{|R_o^2 - y^2|} - \sqrt{|R_i^2 - y^2|} \right] dy \right. \\ & + 2 \left[\int_{R_i}^{\rho \cdot \varepsilon_y} y \left[\frac{y}{(\rho \cdot \varepsilon_y)} \cdot S_y \right] \cdot 2 \left[\sqrt{|R_o^2 - y^2|} \right] dy \right] \\ & + 2 \left[\int_{\rho \cdot \varepsilon_y}^{R_o} y \left[S_y + E_t \left(\frac{y}{\rho} - \varepsilon_y \right) \right] \cdot 2 \left[\sqrt{|R_o^2 - y^2|} \right] dy \right] \end{aligned} \quad (29)$$

Com o contínuo enrolamento do tubo no carretel mantém-se a redução do raio de curvatura. Quando ρ passa a ser menor que ρ_i a fronteira elastoplástica se encontrará abaixo do raio interno, conforme Fig. 13, na região “b”. Nesta etapa o y_y se encontra entre a linha neutra e o raio interno do tubo, sendo a parte em regime elástico a que se encontra abaixo do y_y e a plástica acima.

$$\begin{aligned} M(\rho) = & 2 \left[\int_0^{\rho \cdot \varepsilon_y} y \left[\frac{y}{\rho \cdot \varepsilon_y} \cdot S_y \right] \left[2 \left[\sqrt{|R_o^2 - y^2|} - \sqrt{|R_i^2 - y^2|} \right] \right] dy \right] \\ & + 2 \left[\int_{\rho \cdot \varepsilon_y}^{R_i} y \left[S_y + E_t \left(\frac{y}{\rho} - \varepsilon_y \right) \right] \cdot 2 \left[\sqrt{|R_o^2 - y^2|} - \sqrt{|R_i^2 - y^2|} \right] dy \right] \\ & + 2 \left[\int_{R_i}^{R_o} y \left[S_y + E_t \left(\frac{y}{\rho} - \varepsilon_y \right) \right] \cdot 2 \left[\sqrt{|R_o^2 - y^2|} \right] dy \right] \end{aligned} \quad (30)$$

A partir das equações (29) e (30) é possível entender que a variação na distribuição de momentos em relação ao raio de curvatura utiliza diferentes equações de acordo com estágio do enrolamento em que a estrutura do tubo se apresenta.

3.2 Análise gráfica da distribuição de momentos.

Diante do exposto nas seções anteriores, é possível apresentar graficamente o comportamento variável da estrutura do riser em decorrência do aumento no momento aplicado enquanto o enrolamento acontece. Esta variação pode ser explicada em decorrência da diferença existente na modelagem das análises elástica e plástica.

Utilizando-se a equação (28) para a fase elástica e as equações (29) e (30) para a fase plástica, pode-se mostrar na Fig. 16, a relação existente entre o momento normalizado imposto ao tubo $M(\rho)/M_y$ e o raio normalizado de curvatura (ρ_y/ρ)

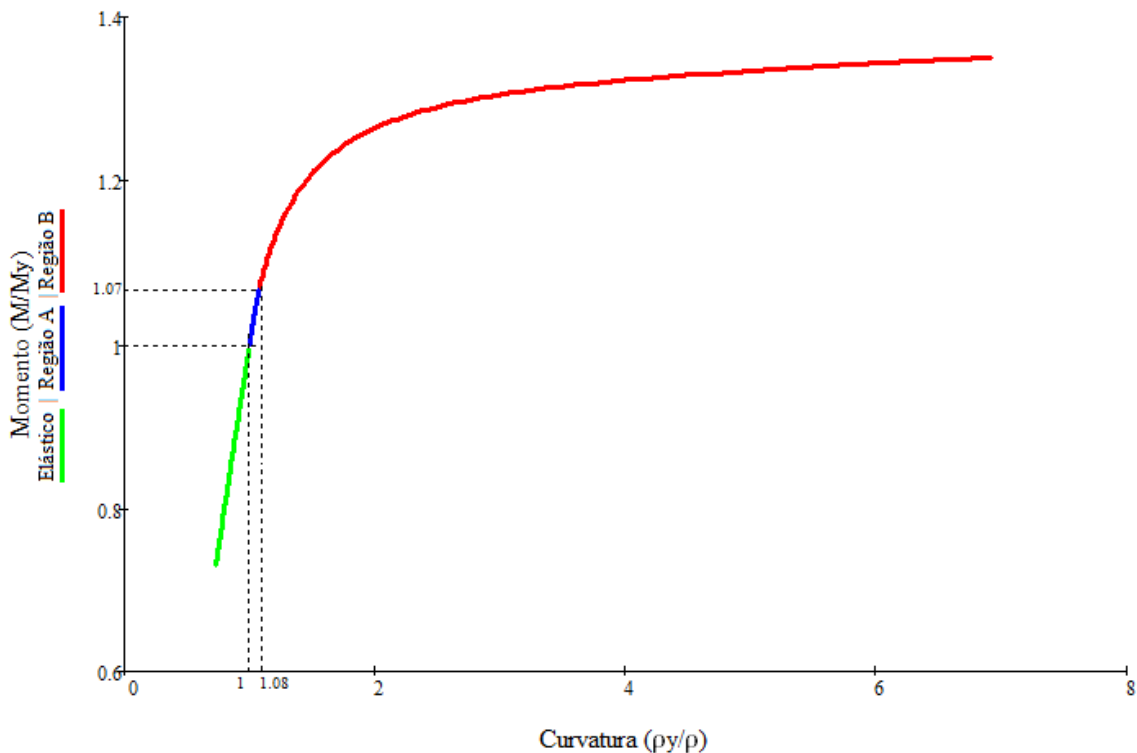


Fig. 16 – Gráfico normalizado de distribuição de momentos do tubo.

A parte elástica (linha verde) do gráfico da Fig. 16 corresponde a sequência de carregamento conforme Fig. 10.a. O gráfico é normalizado em M_y no eixo y e em ρ_y no eixo x , portanto o ponto (1,1) é o ponto em que divide o gráfico entre momentos elásticos e plásticos.

Já a parte plástica se divide em duas, a primeira (em azul) correspondem a momentos que geram um y_y entre o raio interno do tubo e o raio externo, também chamada de região “a”. A parcela em vermelho do gráfico considera momentos geradores de um y_y abaixo do raio interno do tubo, região essa conhecida como região “b”.

É possível notar que, para que a região “b” inicie seu processo de plastificação é necessário um momento cerca de 7% acima de M_y , momento esse que é consequência de um raio de curvatura aplicado cerca de 8% menor que ρ_y .

De maneira análoga ao tubo, pode ser feita a análise da distribuição de momentos em função do raio de curvatura sobre a camada de revestimento contra a corrosão, o clad, conforme Fig. 17.

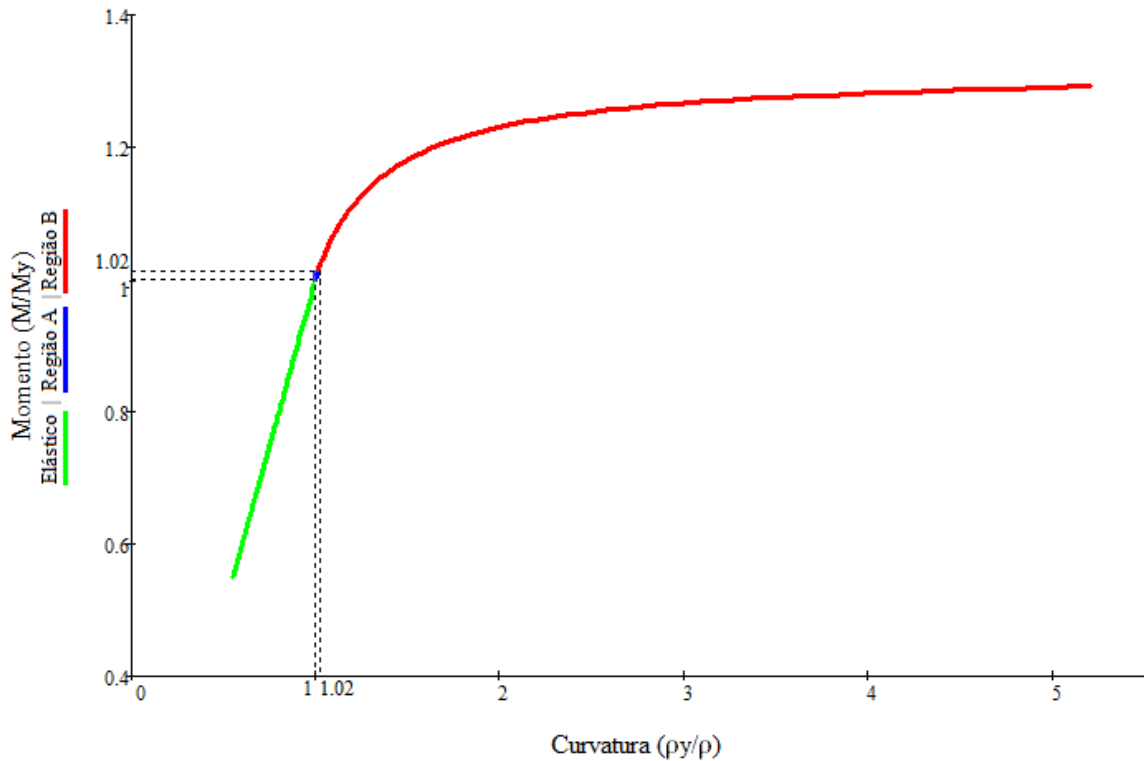


Fig. 17 - Gráfico normalizado de distribuição de momentos do clad.

Fica claro que, a partir da Fig. 17, que os gráficos entre tubo e clad se assemelham quando normalizados sob seus respectivos limites elásticos (M_y e ρ_y). Em contrapartida pela geometria diferente entre os dois, o resultado é que a região em azul seja diminuída, já que a espessura da camada de Inconel ® 625 é pequena, em comparação com a espessura do tubo.

Para o clad, tem momento com apenas 2% acima de M_y e raios de curvatura apenas 2% menor que ρ_y do clad são suficientes para que o encruamento supere a região “a” e alcance a região “b”.

A Fig. 18 apresenta o gráfico normalizado pelo M_y do tubo da distribuição de momentos em função do curvamento aplicado para o tubo e o clad.

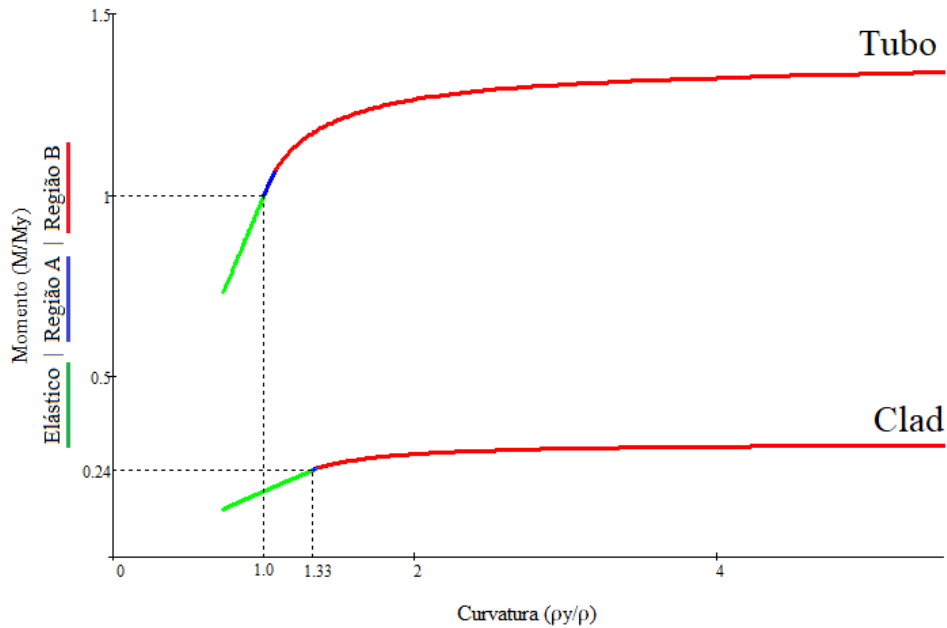


Fig. 18 - Gráfico normalizado da distribuição de momentos sobrepostos de tubo e clad

A apresentação do gráfico da Fig. 18 traz uma visualização mais simples sobre o comportamento das estruturas durante a distribuição de momentos. Contudo, deve-se ressaltar que o clad e o tubo de aço se apresentam unidos e vão funcionar fisicamente como uma única estrutura.

É possível perceber que, analisando o componente riser, o momento sobre o clad é relativamente baixo, isso se deve ao fato do ρ_y do clad ser menor que o valor de ρ_y do tubo. O que justifica o início da plastificação no tubo, e posteriormente no clad.

Conforme foi dito, apesar das semelhanças entre as curvas, os materiais apresentam propriedades distintas e isso traz ao estudo a relevância sob a ótica de uma análise do comportamento de duas estruturas diferentes sendo trabalhadas de maneira unificada.

A Fig. 19 traz o estudo da variação da distribuição normalizada de momentos no Riser em relação ao raio de curvatura do carretel a partir de uma análise unificada da estrutura

tubo/clad. A normalização do eixo y é feita sobre o momento elástico do tubo, e no eixo x , o raio de curvatura elástico do tubo foi utilizado como parâmetro de normalização.

Assim como nas análises anteriores feitas separadamente, as cores separam os tipos de carregamento para cada região. Destaca-se nesse gráfico o momento total sobre o *riser*, que é o resultado da soma dos momentos de tubo e clad, a distância que ele se encontra em relação as outras duas distribuições (tubo e clad). Percebe-se visualmente que o tubo tem uma parcela maior no momento resistido se comparado com o clad.

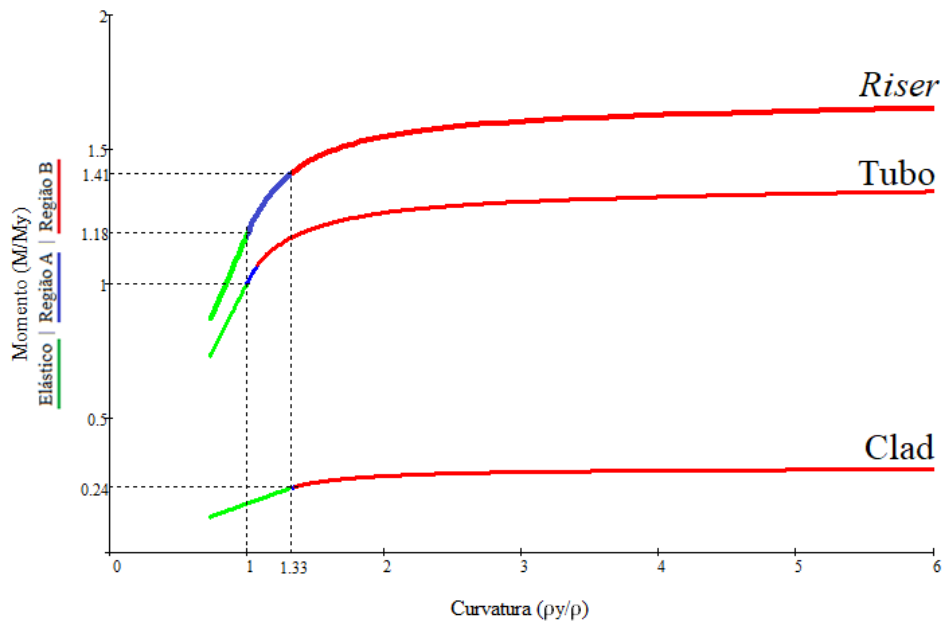


Fig. 19 - Gráfico normalizado da distribuição de momentos do tubo, clad e riser

A curva em verde no gráfico do momento do riser representa os valores pelos quais os momentos não são suficientes para gerar plastificação no componente. Portanto o início da plastificação no momento riser inicia quando o momento atingido é igual a soma dos momentos de tubo e clad para tal raio de curvatura. Esse valor de momento corresponde a 18% acima do valor de M_y do tubo

A curva em azul é caracterizada pelo início da plastificação da região “a” que ocorre primeiro no tubo e permanece até que o ponto de raio interno do clad inicie sua plastificação. O início do encruamento da região “b” do riser ocorre a 41% acima de M_y do tubo.

Uma vez ultrapassado esse valor, a região “b” continua encruando e o núcleo elástico reduzindo até que o raio atinja seu valor mínimo, a região vermelha representa esse processo.

CAPÍTULO 4 - DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS

Neste capítulo, desenvolve-se a forma analítica a distribuição das tensões residuais geradas por uma viga de seção tubular, submetida ao esforço de flexão pura. Vale destacar que o estudo realizado considera apenas um ciclo de carregamento e descarregamento e será considerado o encruamento do material.

Para o transporte dos riser até o local de lançamento, os tubos são enrolados em carretéis de raio ($\rho_{carretel}$). Para isso, um tubo inicialmente reto, é curvado para que assumo, como raio de curvatura, o raio do carretel. Após a retirada da carga, o raio verificado (ρ_{final}) é maior do que $\rho_{carretel}$, conforme ilustra a Fig. 20.

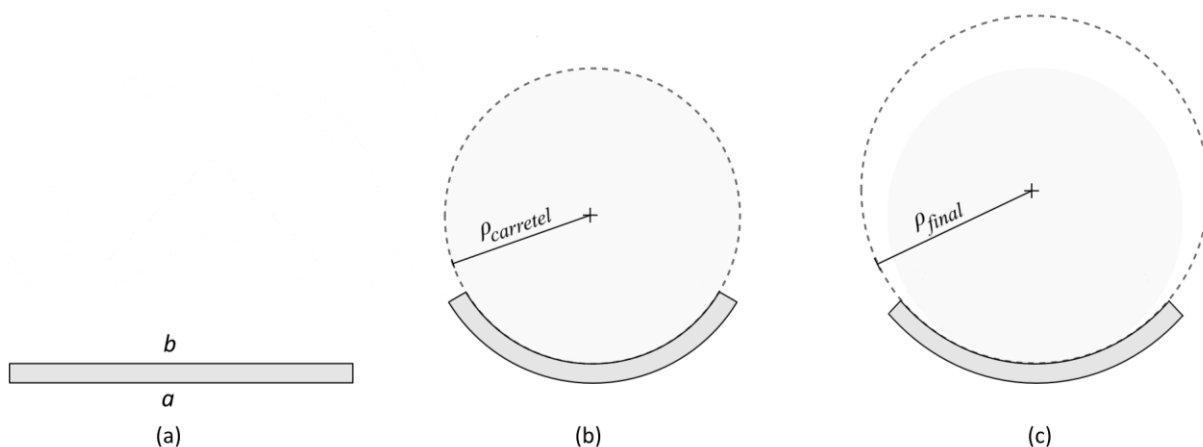


Fig. 20 - Viga submetida à flexão pura (vista lateral) - (a) sem deformação (b) carregamento com $M_y \leq M(\rho) \leq M_p$ e (c) descarregamento.

Na análise de momentos, a variação do raio de curvatura determina qual será o momento aplicado ao longo da estrutura. Desta forma, o valor de momento será igual ao longo de todas as seções transversais deste componente. Já a evolução das tensões e das deformações variam na seção transversal da viga. Onde, na linha neutra a tensão e a deformação são nulas e os pontos mais afastados da superfície apresentam, os maiores valores de deformação e de tensão gerada pelo carregamento. Na Fig. 20.a, os planos definidos por “a” e “b” representam respectivamente as superfícies inferior e superior da viga que será submetida ao carregamento de flexão pura.

Nos gráficos, ilustrados na Fig. 21, pode ser acompanhado como ocorre a variação de σ x ϵ nas superfícies mencionadas, com carregamentos que superem o limite elástico do material.

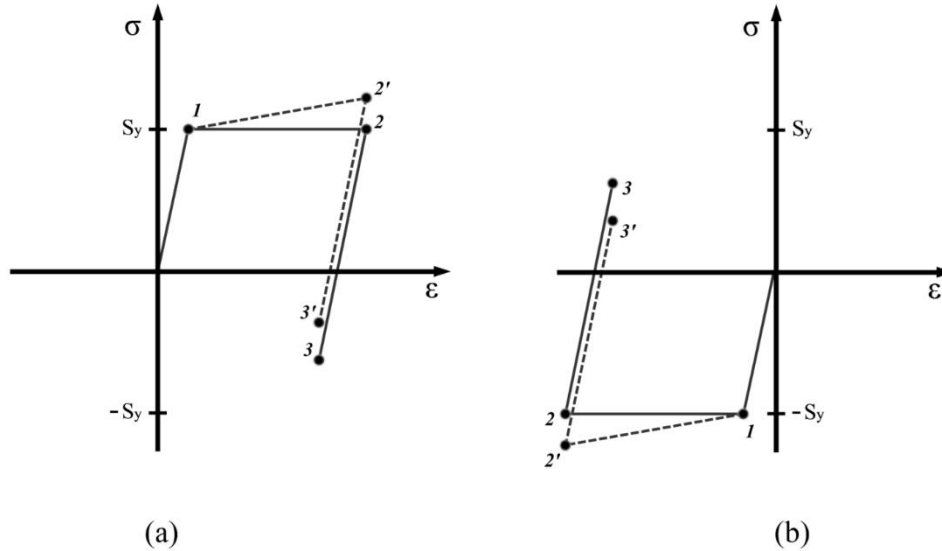


Fig. 21 - Gráfico Tensão x Deformação (a) Superfície “a” (b) Superfície “b”

Note que na Fig. 21, para o material elástico perfeitamente plástico, o trecho que parte da origem até o ponto 2, representa a etapa de carregamento enquanto o trecho que se inicia em 2 e termina em 3, representa a etapa de descarregamento. Estas duas etapas irão gerar tensões referentes ao carregamento e ao *spring back*, que somadas resultam na tensão residual sobre o componente.

De forma equivalente, na etapa de carregamento, o ponto 1 corresponde ao início do escoamento. A partir deste ponto, para o material elástico com encruamento, o trecho tracejado, que passa pelos pontos 2' considera o encruamento gerado pela deformação plástica do material e 3' considera o *spring-back*.

É interessante notar que a superfície “a”, que começa submetida a tensões trativas no carregamento, após o descarregamento as tensões residuais tornam-se compressivas. Já no ponto b, o inverso acontece, com tensões compressivas geradas pelo carregamento, e tensões residuais trativas após o descarregamento.

Carregamento elástico

A distribuição das tensões na seção transversal pode ser acompanhado na seção 2.4.

Carregamento elastoplástico

Supondo uma viga sob a solitação de um momento de valor $M(\rho)$, a Fig. 22 mostra de forma esquemática, a distribuição de tensões normais perpendiculares à seção transversal da viga em função do valor de $M(\rho)$ aplicado, desconsiderando a influência do encruamento.

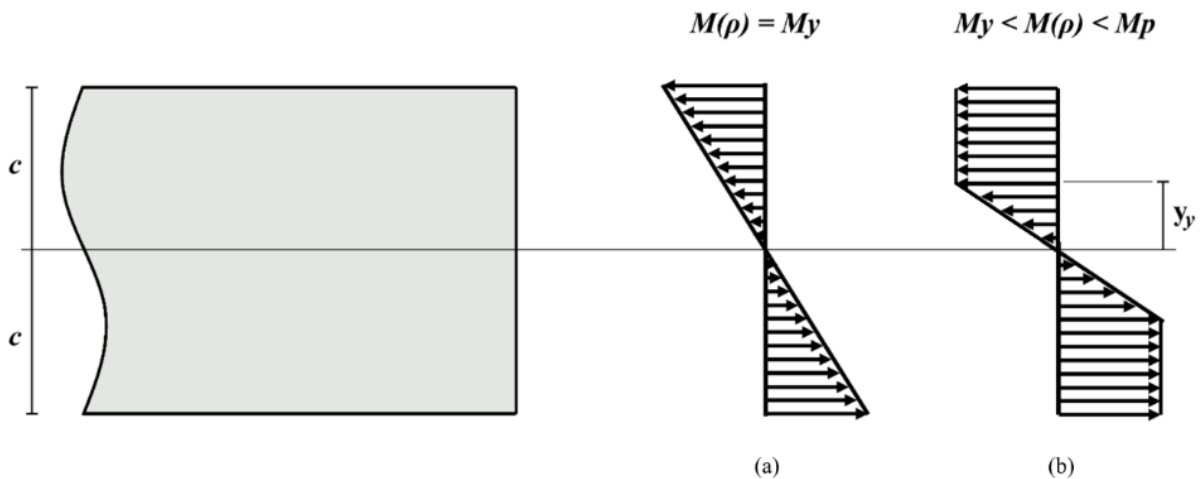


Fig. 22- Distribuição de tensão de carregamento elastoplástico

Na Fig. 22.a, é ilustrado a distribuição de tensão de carregamento quando a viga é curvada em seu raio de curvatura elástico (ρ_y). Portanto, $y_y = c$ e a tensão gerada na superfície externa é igual à resistência ao escoamento (S_y). Na Fig. 22.b o momento aplicado sobre a viga supera o M_y , de forma que seja possível observar uma parcela da deformação elástica e uma parcela plástica. Para um modelo elástico perfeitamente plástico (EPP), as tensões normais geradas em toda a superfície superior a y_y , são iguais a $-S_y$.

Na parcela da seção transversal formada pelo núcleo elástico, a distribuição das tensões apresenta comportamento linear. Nesta condição a tensão possui valor zero, na linha neutra e de S_y na fronteira elastoplástica.

Para formulação deste problema, é necessário que se divida a seção transversal em três áreas de análise, conforme ilustra a Fig. 23.

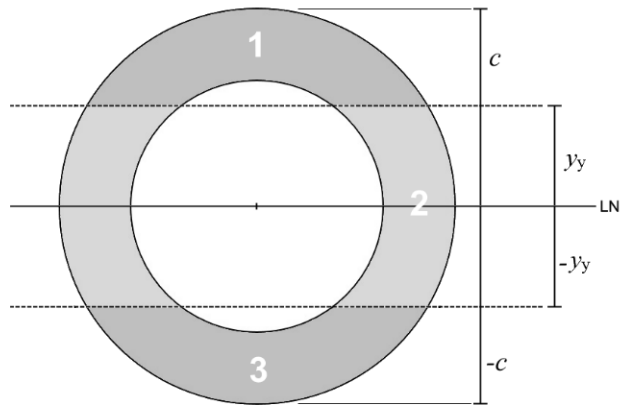


Fig. 23 - Seção transversal separada em áreas

Supõe-se que a seção superior a linha neutra está sujeita a compressão e, portanto, tensão negativa, enquanto para valores negativos de y , a seção estará sujeita a tração e, portanto, a tensão será positiva.

A primeira e a terceira área, compreendem a parte da seção transversal que sofrerá a deformação plástica e, considerando um modelo EPP, tem seu valor constante e igual a S_y . Em uma análise um pouco mais detalhada, é possível considerar a influência do encruamento na distribuição de tensões da área deformada plasticamente. Este encruamento atua de forma a aumentar a tensão gerada e seguirá uma distribuição conforme a Fig. 24.

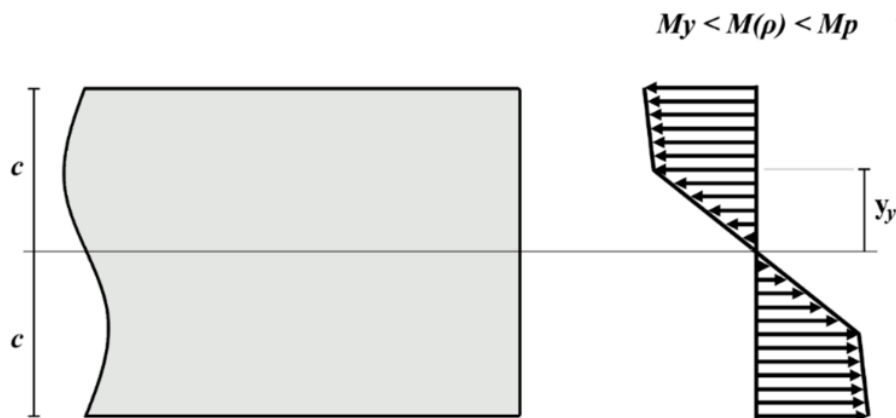


Fig. 24 - Distribuição de tensão de carregamento elastoplástico com encruamento

Quando o encruamento do material é considerado, a tensão de carregamento gerada, supera a resistência ao escoamento. Esse aumento de tensão é modelado pela teoria do módulo tangente e apresenta comportamento linear quanto a relação $\sigma \times \epsilon$, conforme mostra a Fig. 11.

Desta forma, a primeira e a terceira área sofrerão a influência da plastificação e, portanto, deve-se acrescentar a parcela do encruamento.

$$\sigma(\rho, y) = const . (S_y + E_t \frac{y}{\rho}) \quad (31)$$

Onde $const = -1$ para momento positivo e $const = 1$ para momento negativo. O núcleo elástico é formado na segunda área, para y com valores entre y_y e $-y_y$. Os valores variam linearmente da linha neutra à $|y_y|$. Para se estimar a distribuição de tensões no núcleo elástico usa-se a equação (32).

$$\sigma(\rho, y) = const . \left(\frac{y}{y_y} . S_y \right) \quad (32)$$

Onde $const = -1$ para momento positivo e $const = 1$ para momento negativo.

Spring-Back

Nas operações de conformação mecânica em aços, a energia acumulada durante o carregamento é moderadamente aliviada durante o descarregamento. Este alívio gerado faz com que o corpo encontre uma nova configuração de equilíbrio.

Como o *springback* se refere ao retorno elástico do material, sua variação ao longo da seção transversal apresenta comportamento linear. A indicação de que este fenômeno realiza um retorno ao carregamento sinaliza que a distribuição de tensões de *springback* têm sentido oposto a distribuição de tensões gerada inicialmente.

A equação (11) define o valor da distribuição de tensões de *spring back*, que por se tratar do retorno elástico do material, possui sentido contrário a tensão de carregamento sobre a estrutura.

$$\sigma(y) = \frac{-My}{I} \quad (11)$$

Distribuição das Tensões Residuais

A tensão residual que permanecerá no material após a flexão, será o resultado da soma das tensões de carregamento e de *springback*. As tensões geradas pelo processo de carregamento e descarregamento são diretamente relacionadas ao raio de curvatura em que o riser estará sujeito e conseqüentemente, ao momento aplicado à estrutura.

Na Fig. 25, o carregamento a qual a estrutura está exposta gera um momento inferior à M_y . Neste caso, a fronteira elastoplástica se posiciona fora do diâmetro externo do tubo, $y_y > c$, indica que a seção transversal do tubo não sofreu plastificação.

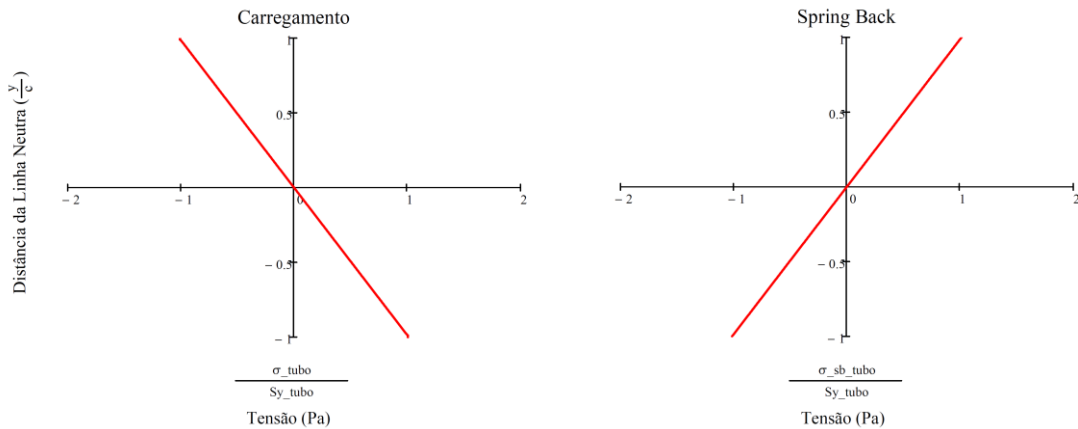


Fig. 25 - Gráfico de distribuição de carregamento e sping-back elásticos

Nessa condição, a tensão de carregamento máxima apresenta mesmo valor em módulo da tensão de *springback* máxima, porém com sentidos opostos, resultando em uma tensão residual nula, como ilustra a Fig. 26.

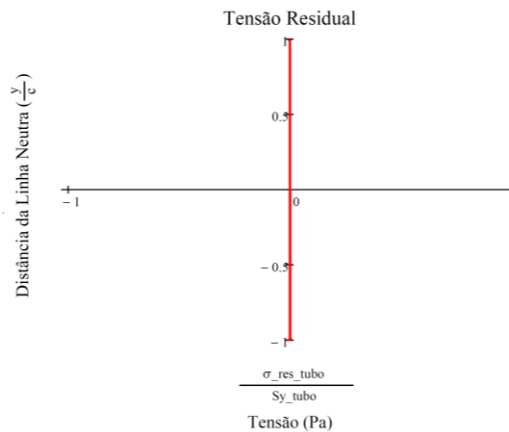


Fig. 26 - Gráfico distribuição das tensões residuais em carregamento elástico

Para raio de curvatura menor, uma segunda situação é observada, quando a fronteira elastoplástica se encontra entre o raio externo do tubo e a linha neutra, $c \geq y_y > 0$. Nesta condição, o tubo apresentará a parte mais distante da linha neutra deformada plasticamente e a formação do núcleo elástico. Essa condição gera distribuições de tensões de carregamento e de *spring back*, conforme a Fig. 27.

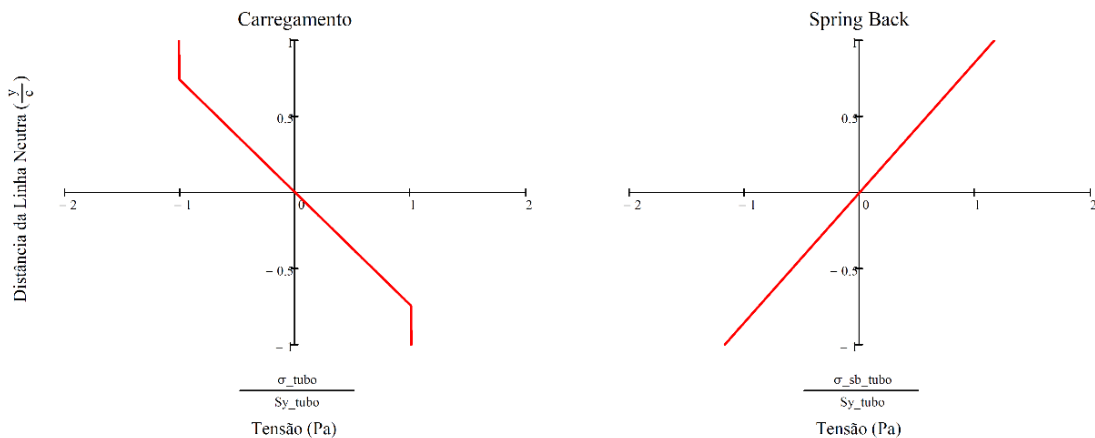


Fig. 27 - Gráfico da distribuição de carregamento e spingback elastoplásticos.

A soma das destas distribuições das tensões da Fig. 27 gera uma distribuição de tensão conforme a Fig. 28. Neste caso, verificou-se que a tensão residual em $+c$ e $-c$ são maiores que em $+y_y$ e $-y_y$.

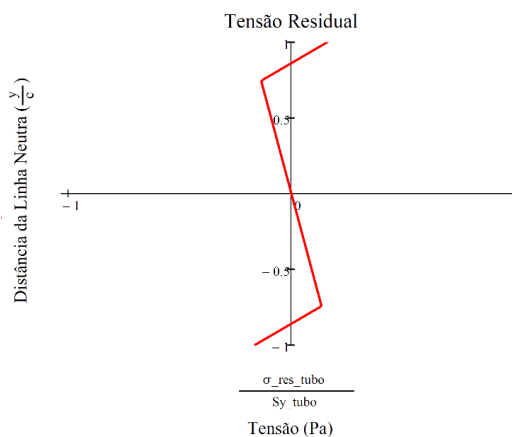


Fig. 28 - Gráfico da distribuição de tensões residuais em carregamento elastoplásticos

É possível observar que para raios de curvatura ainda menores, com y_y bem pequenos, as tensões residuais na fronteira elasto-plástica tendem a apresentar um valor maior que as tensões residuais em +c e -c. Esse comportamento justifica-se pela resistência ao escoamento (S_y), durante o carregamento, ser observada mais próxima a linha neutra, onde a tensão de *spring back* apresenta menor valor. A Fig. 29 apresenta a distribuição de tensões de carregamento e de *spring back*.

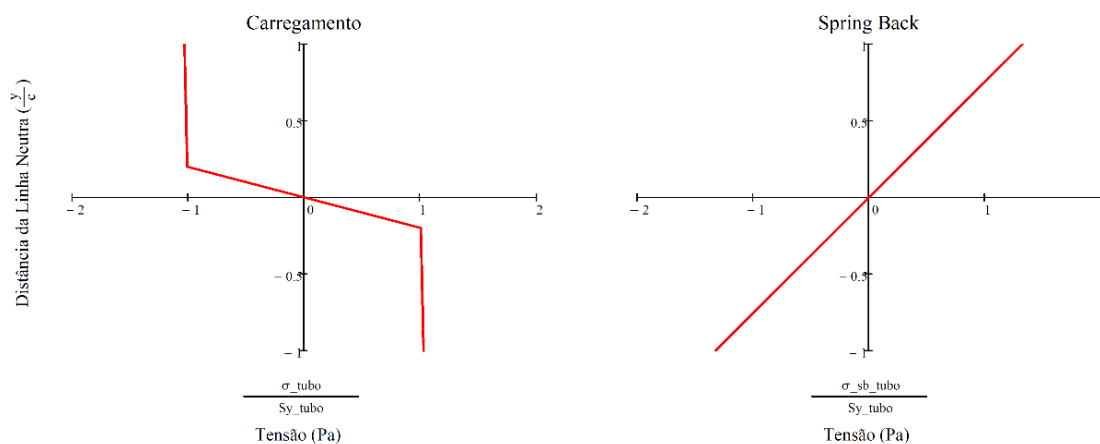


Fig. 29 - Gráfico de distribuição de carregamento e de spingback

A Fig. 30 ilustra como a distribuição de tensões residuais ocorre para pequenos raios de curvatura.

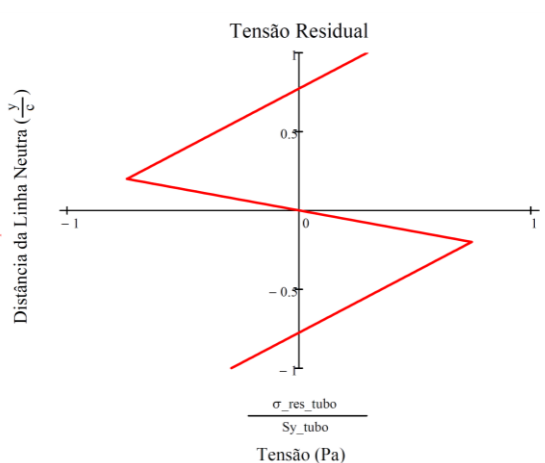


Fig. 30 - Gráfico de tensão residual em carregamentos elasto-plásticos

CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE CASO

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos desenvolvimentos apresentados nos capítulos anteriores, aplicados a casos específicos de geometria e carregamento. Será analisada a sequência de carregamento do riser no carretel, a distribuição de momentos fletores e a distribuição de tensões residuais, tanto no tubo quanto no clad.

Propriedades geométricas e mecânicas

Considera-se, para as análises a seguir, um trecho de riser rígido cladeado inicialmente retilíneo que sofrerá um enrolamento no carretel para que seja transportado. O riser apresenta uma configuração conforme mostrado na Fig. 31. Comercialmente os tubos apresentam uma variedade de opções quanto seu diâmetro externo e sua espessura, já a camada de proteção contra a corrosão possui uma variação pequena de espessura, podendo ir de 2 a 6 milímetros.

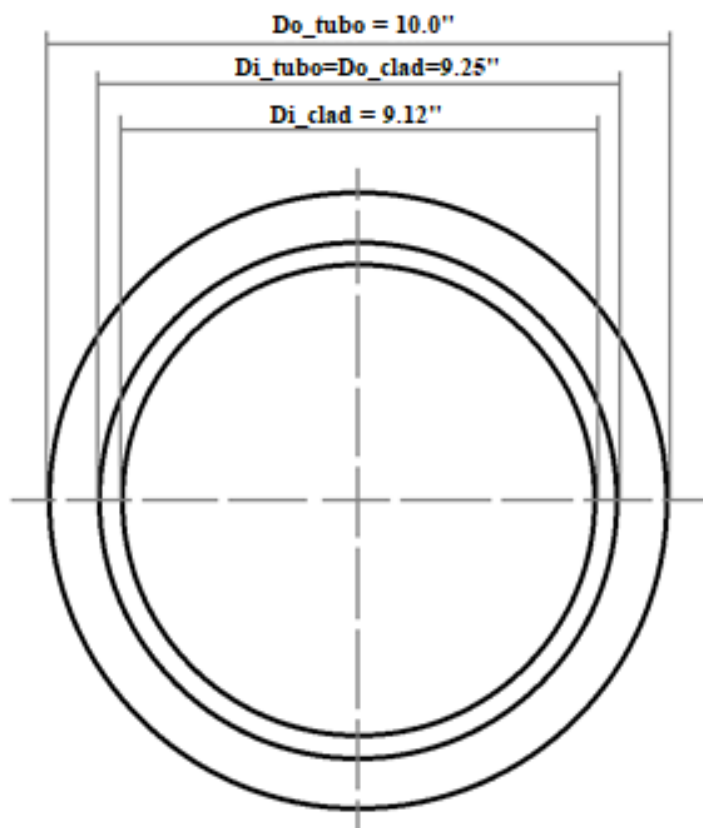


Fig. 31 - Seção transversal do riser no caso estudado

O material selecionado para o tubo foi o aço API 5L X52 e para o clad o Inconel ® 625, ambos apresentados no Capítulo 2. A Tabela 5 e a Tabela 6 apresentam propriedades gerais, do tubo e do clad respectivamente, que foram utilizadas para a confecção desse estudo de caso.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do aço API 5L X52

| Tubo de aço API 5L X52 | | |
|---|----------------------|----------|
| Módulo de Elasticidade (E) | 207 | GPa |
| Módulo Tangente (E_t) | 1,24 | GPa |
| Coefficiente de Poisson (ν) | 0,3 | - |
| Momento de Inércia (I) | $5,47 \cdot 10^{-5}$ | m^4 |
| Massa Específica (μ) | 7860 | kg/m^3 |
| Resistência ao Escoamento (S_y) | 360 | MPa |
| Tensão última (S_{ut}) | 460 | MPa |
| Deformação de Escoamento (ϵ_y) | $1,74 \cdot 10^{-3}$ | - |
| Deformação última (ϵ_{ut}) | 0,08 | - |

Fonte: Autor.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas Inconel 625

| Tubo de aço Inconel 625 | | |
|---|----------------------|----------|
| Módulo de Elasticidade (E) | 207 | GPa |
| Módulo Tangente (E_t) | 0,82 | GPa |
| Coefficiente de Poisson (ν) | 0,297 | - |
| Momento de Inércia (I) | $9,92 \cdot 10^{-6}$ | m^4 |
| Massa Específica (μ) | 8440 | kg/m^3 |
| Resistência ao Escoamento (S_y) | 442 | MPa |
| Limite de Ruptura (S_{ut}) | 896 | MPa |
| Deformação de Escoamento (ϵ_y) | $2,13 \cdot 10^{-3}$ | - |
| Deformação Última (ϵ_{ut}) | 0,55 | - |

Fonte: Autor.

5.1 Distribuição de momentos

Para o transporte de dutos rígidos, os carretéis ou bobinas possuem um diâmetro relativamente grande, quando comparados com os diâmetros de risers flexíveis e de umbilicais. As embarcações atuais deste gênero comportam diâmetros internos de carretéis de cerca de 15 metros.

O presente estudo de distribuição de momentos leva em consideração o carregamento imposto ao componente para um raio de curvatura, quando atinge seu menor valor, de 10 metros, resultante de um diâmetro interno (D_{i_reel}) igual a 20 metros e um raio máximo de enrolamento no valor de 16 metros, resultante do diâmetro externo do carretel (D_{o_reel}) igual a 32 metros, conforme representado na Fig. 32.

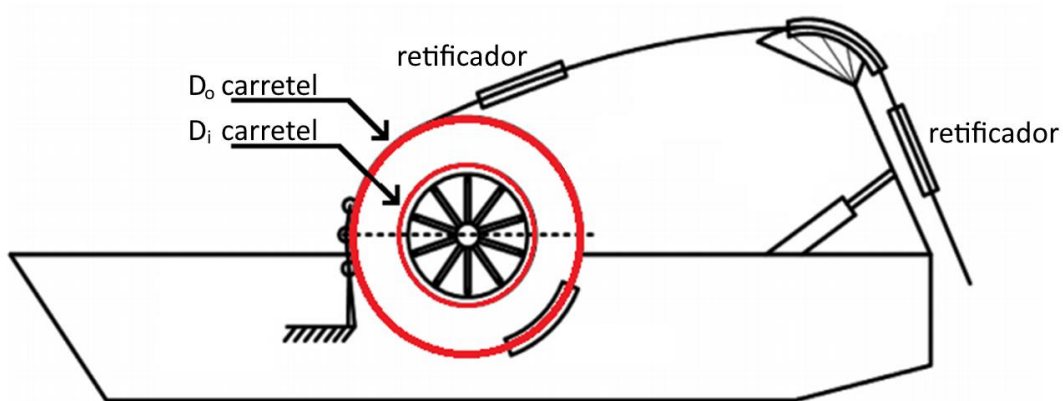


Fig. 32 - Carretel de enrolamento e transporte. Adaptada de (Cho, Joo, Cho, & Moon, 2017)

Utilizando a geometria apresentada e a partir da equação (18), sendo $\rho = \rho_y$, é possível concluir que o momento máximo de flexão elástica $M_{y_riser}(\rho)$ sobre o riser tem valor de $192,50 \text{ kN.m}$. Onde, desse valor total, é recebido pelo tubo um valor de $M_{y_tubo} = 155,16 \text{ kN.m}$ e pelo clad o valor de $M_{y_clad} = 37,34 \text{ kN.m}$.

A sequência na redução do raio de curvatura aplicado no riser passa pela curvatura onde o limite elastoplástico coincide com o raio interno do tubo. Nesse ponto, quando $\rho = \rho_{i_tubo} = \rho_{o_clad}$, o momento de flexão elastoplástico $M_{riser}(\rho_{i_tubo}) = M_{riser}(\rho_{o_clad})$ sobre o componente é igual a $196,38 \text{ kN.m}$. Sendo $165,97 \text{ kN.m}$ para o tubo e $30,41 \text{ kN.m}$ para o clad.

Quando o limite elastoplástico atinge a distância igual ao raio interno do clad, um raio de curvatura $\rho = \rho_{i_clad}$ teve de ser imposto pela sequência de curvamento, resultando num

valor de momento fletor $M_{riser}(\rho_{i_clad})$ igual a $220,58 \text{ kN.m}$. Nesta fase, o tubo recebe $182,64 \text{ kN.m}$ de momento fletor, enquanto o clad recebe $37,94 \text{ kN.m}$.

Uma vez que o enrolamento é completado, o raio de curvatura imposto sobre o riser é igual ao raio mínimo (ρ_{min}) do diâmetro externo do carretel de enrolamento (Do_{reel}). O momento que incide sobre o riser para tal raio é igual a $M_{riser}(\rho_{min}) = 258,11 \text{ kN.m}$, onde $209,82 \text{ kN.m}$ é a parcela do tubo e $48,29 \text{ kN.m}$ é parcela recebida pelo clad

Na Fig. 33 e Fig. 34 estão apresentados os gráficos de momento sob cada componente, tubo e clad respectivamente, sob a variação do raio de curvatura aplicado.

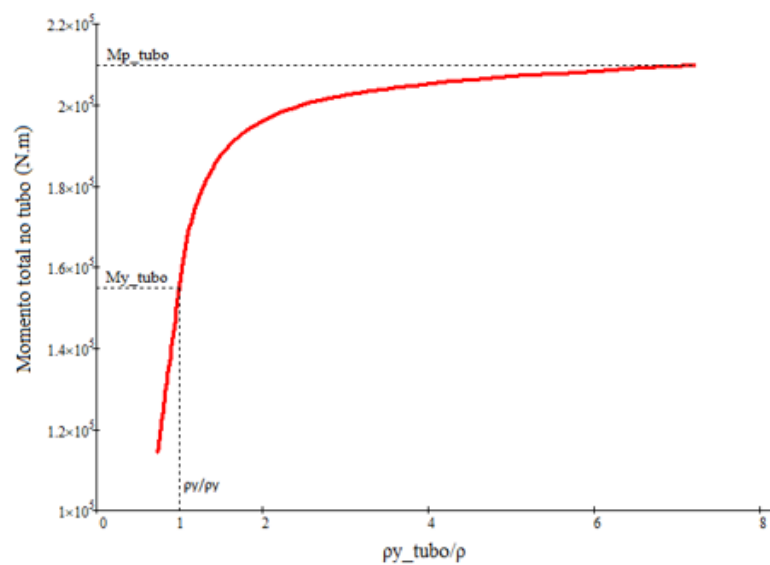


Fig. 33 - Gráfico momento no tubo em função do raio de curvatura

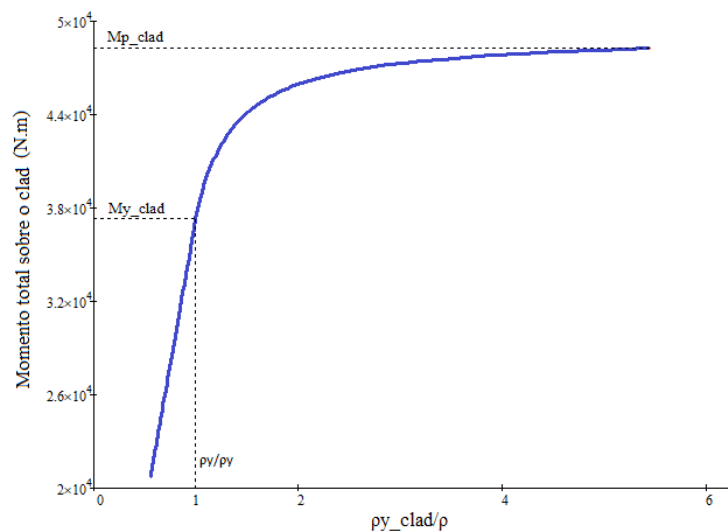


Fig. 34 - Gráfico momento no clad em função do raio de curvatura

Utilizando-se a Fig. 18, chega-se a Fig. 35 em que pode-se visualizar graficamente a parcela de momento recebido pelo tubo e pelo clad para os diferentes raios de curvatura impostos.

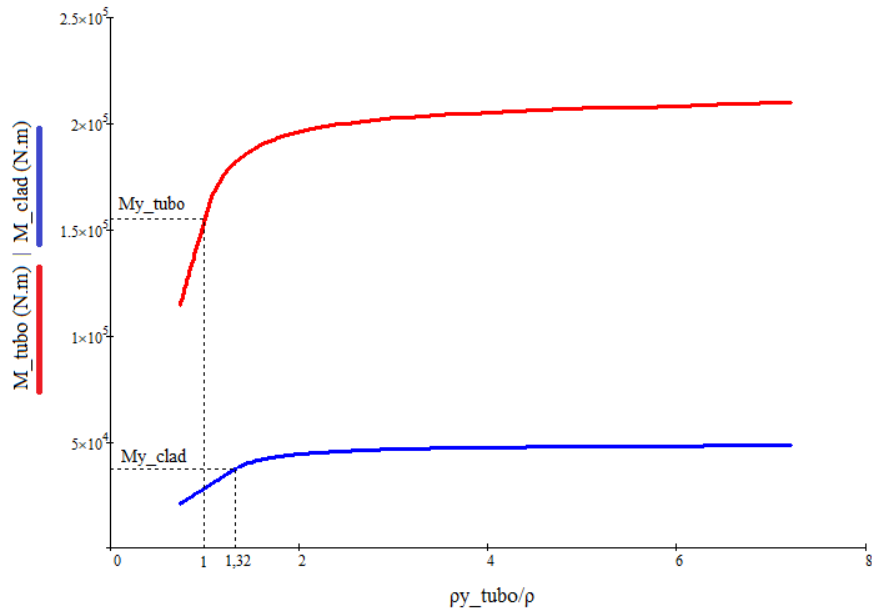


Fig. 35 - Gráfico sobreposto do momento do tubo e do clad em função do raio de curvatura

Pode-se analisar percentualmente a distribuição do momento fletor no componente. Diante do valor total de momento fletor imposto ao que *riser*, sabe-se que parte desse momento fletor é suportado pelo tubo e outra parte pelo clad. Na Fig. 36 está disposto graficamente a porcentagem de momento fletor que o clad recebe em relação ao momento total no componente.

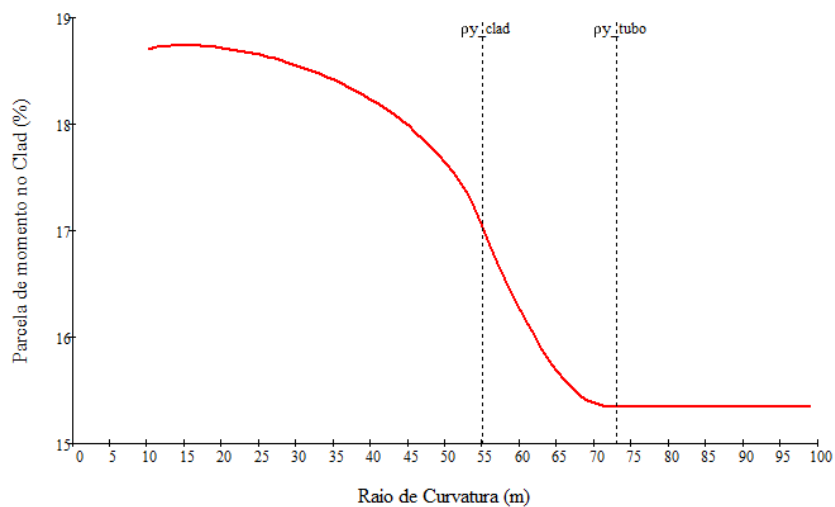


Fig. 36 - Gráfico percentual da parcela de momento recebida pelo clad em função do momento imposto ao *riser*.

É interessante notar que, nas normas de dimensionamento de risers rígidos, a camada de proteção contra corrosão não é levada em consideração como componente estrutural. Entretanto, diante do exposto, para o caso analisado, o clad recebe cerca de 18% do momento total sobre o riser, concluindo-se que as normas ainda se apresentam bastante conservativas, no que diz respeito ao dimensionamento deste componente e seus fatores de segurança.

5.2 Distribuição das tensões residuais

Para a análise da distribuição das tensões residuais que se acumulam no riser após seu desenrolamento do carretel, utiliza-se os conceitos desenvolvidos no Capítulo 4, apresentando graficamente os valores de distribuição das tensões de carregamento, de *springback* e por fim das tensões residuais. Para tal, será utilizada a geometria apresentada na Fig. 31 e o raio de curvatura mínimo aplicado sobre o componente.

Tensões de carregamento

Na Fig. 37 mostra-se a distribuição de tensões de carregamento no tubo. Para o resultado dessa distribuição de carregamentos são considerados cargas de momento fletor referente ao curvamento mínimo do carretel igual a um ρ de 10 metros conforme subtópico 5.1.

Nos gráficos apresentados a seguir, estão ilustrados por uma vista normal as seções transversais do tubo e ou do clad apenas uma representação de maneira didática das distâncias referentes aos raios e os limites elasto-plásticos bem como as mudanças nas distribuições que coincidem com essas alturas.

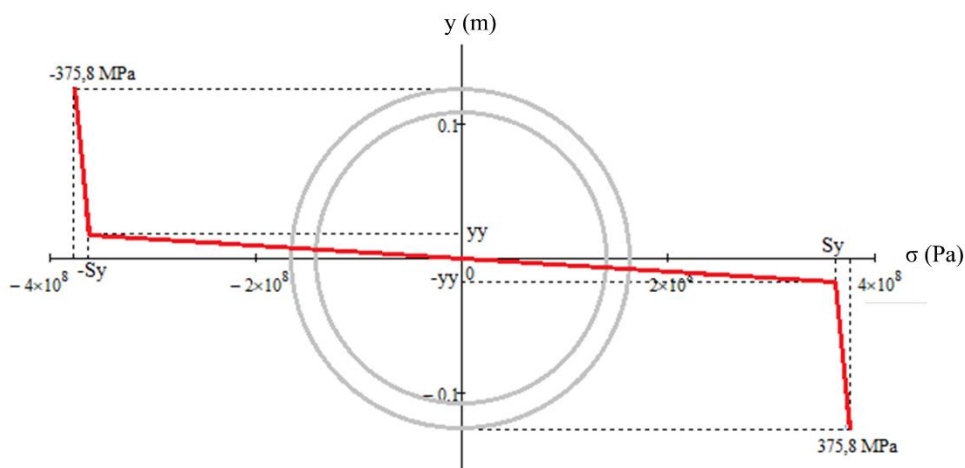


Fig. 37 - Gráfico da distribuição de tensões na seção transversal, resultantes do carregamento no tubo

Na Fig. 38 mostra-se a distribuição de tensões de carregamento no clad sob as mesmas condições de curvamento do tubo.

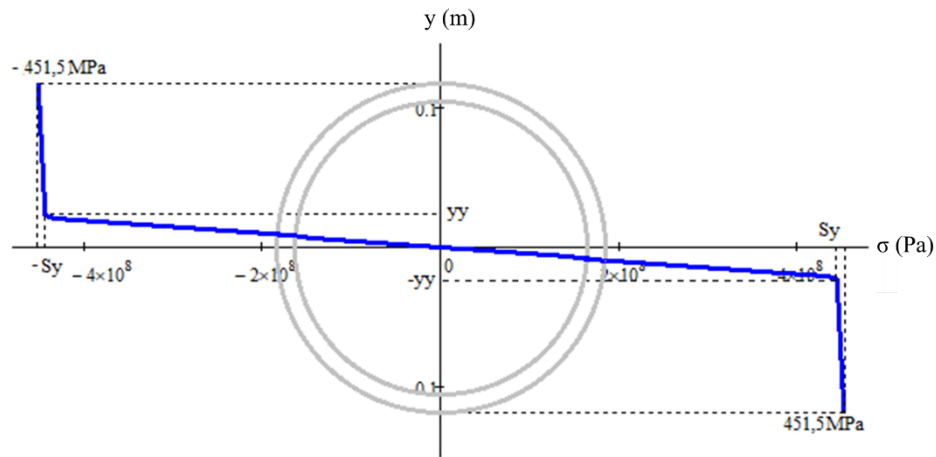


Fig. 38 - Gráfico da distribuição de tensões na seção transversal resultantes do carregamento no clad

A Fig. 39 apresenta o gráfico com as duas curvas de distribuição de tensões de carregamento, do tubo e do clad, sobrepostas.

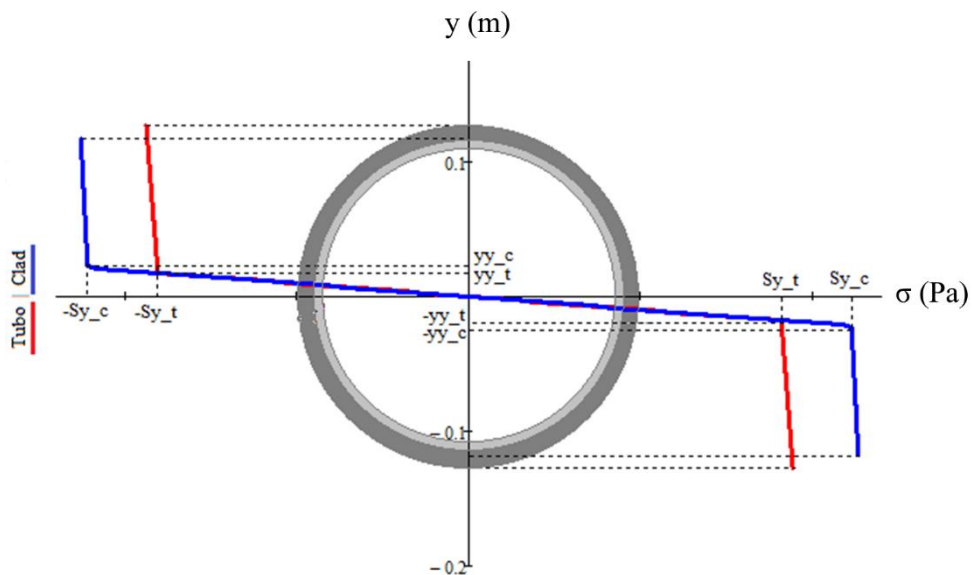


Fig. 39 - Gráfico da distribuição de tensões na seção transversal resultantes do carregamento tubo e clad

A partir desse gráfico da Fig. 39 é possível reparar que, por conta do tubo e do clad apresentarem o mesmo valor de coeficiente de elasticidade (E), as curvas de ambos os carregamentos se apresentam colineares na região de seus núcleos elásticos. O ponto de

transição acontece quando a resistência ao escoamento de cada material é atingida, uma vez que o S_y do clad é maior que o do tubo, a linha azul que representa o clad tem sua transição ocorrendo após a transição do tubo.

Uma vez ultrapassados as resistências ao escoamento de cada material, as curvas apresentam o coeficiente angular igual ao seu respectivo módulo tangente (E_t). Essa parte das curvas descrevem o comportamento plástico considerando o encruamento de cada material e tem como limite os pontos de seus respectivos raios externos.

Tensões de *Springback*

Utilizando-se os conceitos apresentados no Capítulo 4 sobre as tensões de *springback* pode-se descrever graficamente a curva do retorno elástico para o tubo e para o clad com a geometria de interesse.

Na Fig. 40 está disposto o gráfico de tensão de *springback* referente ao tubo, gerada pela equação (11).

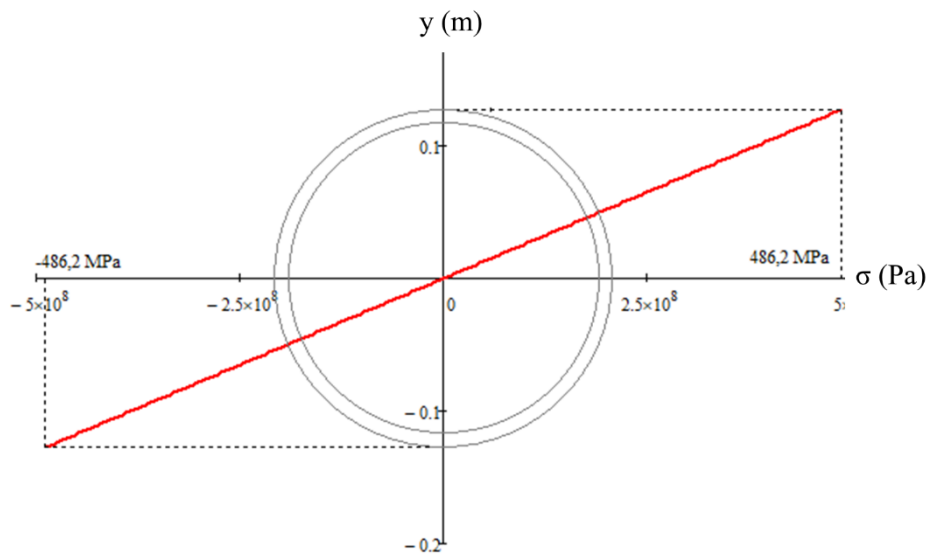


Fig. 40 - Gráfico da distribuição de tensões de *springback* no tubo

De forma análoga ao tubo, pode-se apresentar o gráfico do clad, na Fig. 41. O ponto de máxima tensão de *springback* nessa camada de proteção corrosiva se encontra nos pontos extremos de raio externo do clad e tem valor em módulo igual a 571,6 Mpa.

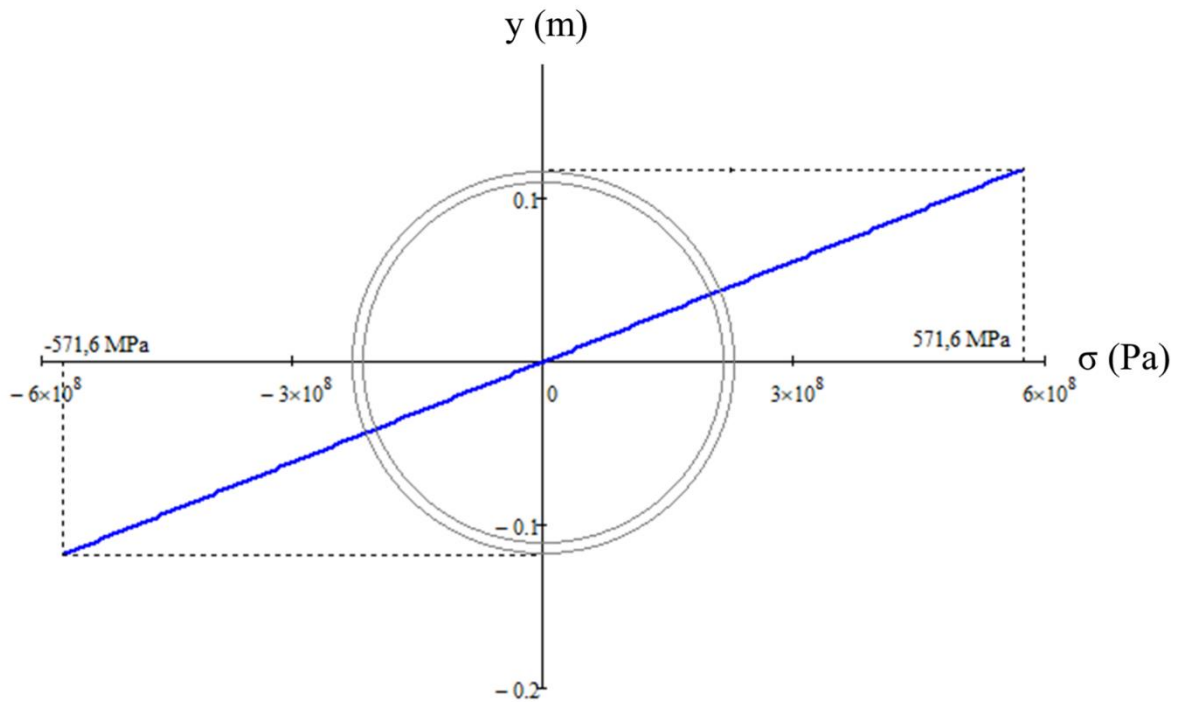


Fig. 41 - Gráfico da distribuição de tensões de springback no clad

Se dispostas as curvas de *springback* do tubo e do clad sobre o mesmo gráfico, encontra-se o resultado presente na Fig. 42.

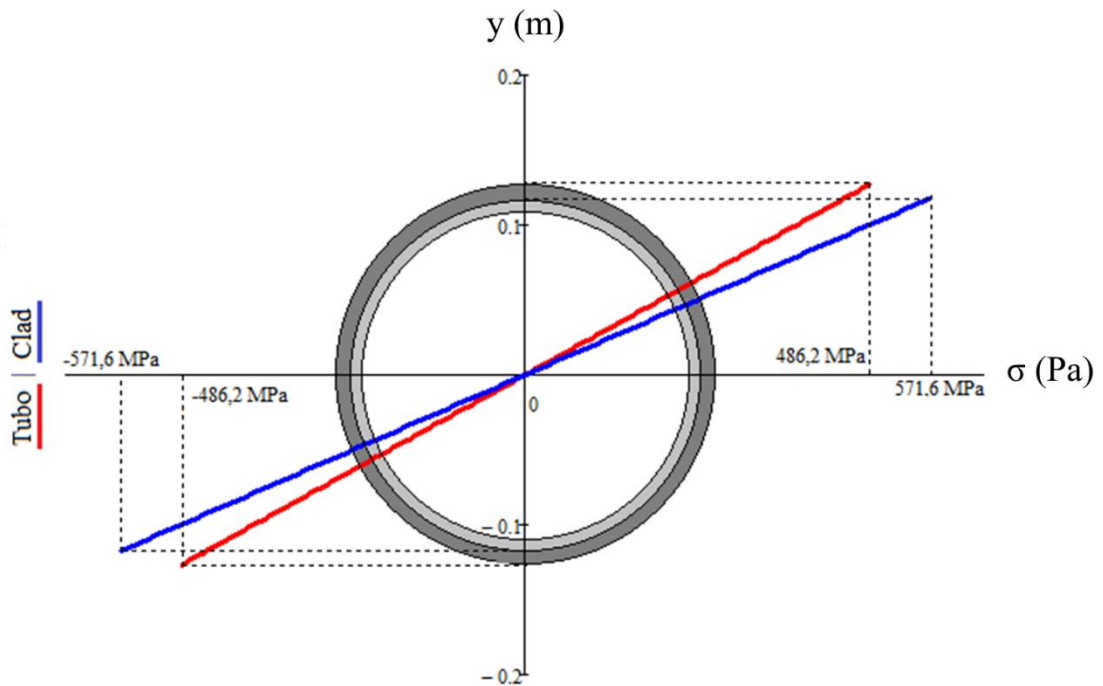


Fig. 42 - Gráfico sobreposto da distribuição das tensões de springback do tubo e do clad

Repara-se que, mesmo se tratando do retorno elástico de dois componentes que possuem valores iguais de módulo de elasticidade, as curvas de tubo e clad possuem coeficientes angulares diferentes.

É interessante notar também que, apesar do momento que incide sobre o clad ser de cerca de 18% do momento aplicado em todo o riser, a tensão de *springback* sobre o clad (curva azul) apresenta um valor maior em relação ao tubo (curva vermelha). Essa diferença de tensão acontece pelo fato de que o momento de inércia do clad é cerca de 10 vezes menor que o momento de inércia do tubo e, conforme equação (11).

Tensões Residuais

A partir da distribuição das tensões de carregamento e do *springback*, como verificado no Capítulo 4, obtém-se a distribuição das tensões residuais a partir da soma dessas tensões distribuídas ao longo da seção transversal do componente.

Para o tubo, a tensão residual presente nos pontos extremos do tubo à distância c da linha neutra, tem seu valor em módulo igual a $\sigma(R_o) = 111,2$ MPa, entretanto o ponto de maior tensão acumulada após o descarregamento se encontra na altura de $y_y(\rho_{min}) = 0.01778$ m e tem seu valor igual a $\sigma(y_y) = 294,0$ MPa.

Na Fig. 43 está disposto o gráfico de distribuição das tensões residuais do tubo ao longo de sua seção transversal.

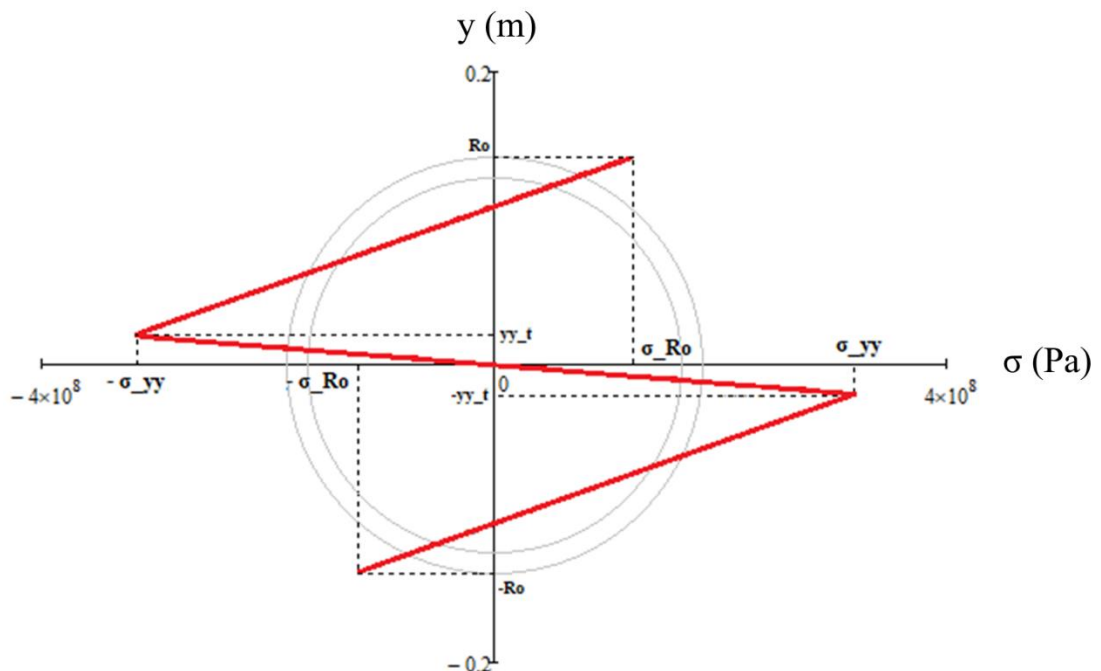


Fig. 43 - Gráfico de distribuição da tensão residual no tubo

A análise feita para o clad é similar a do tubo, portanto, os valores de tensão residual à distância c (R_o_c) é igual, em módulo, a $\sigma(R_o) = 120,0$ MPa. Analogamente ao tubo, o pico de tensão residual na camada de revestimento também se encontra à altura igual ao limite elástico $y_{y_c}(\rho_{min}) = 0,02232$ m e tem seu valor em módulo igual a $\sigma(y_y) = 335,2$ MPa. A Fig. 44 apresenta a distribuição de tensões ao longo da sessão transversal do clad.

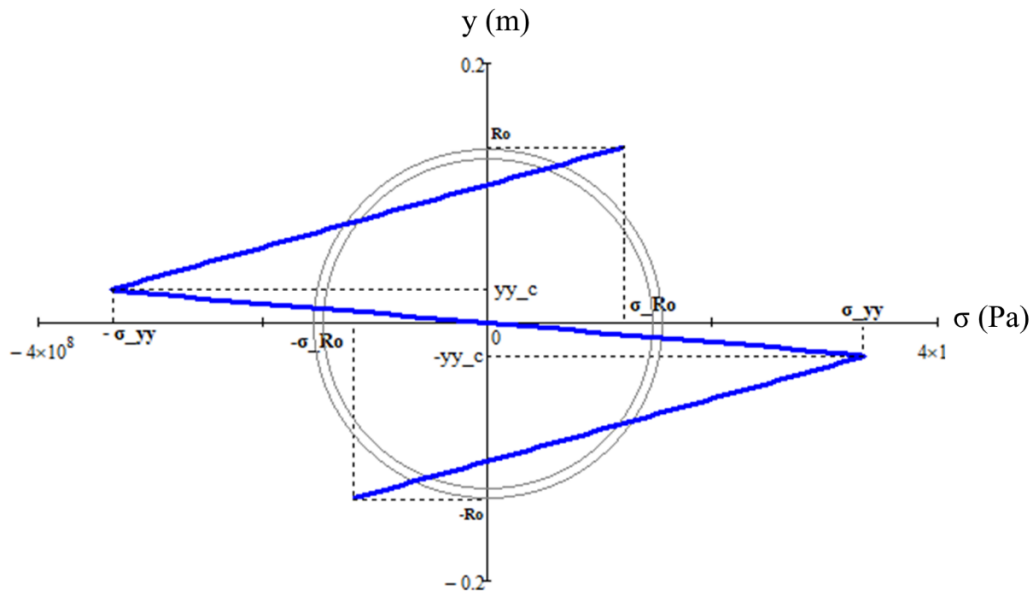


Fig. 44 - Gráfico de distribuição das tensões residuais do clad

Se colocadas as duas distribuições de tensões residuais sobrepostas sob os mesmos eixos, obtém-se o que está apresentado na Fig. 45.

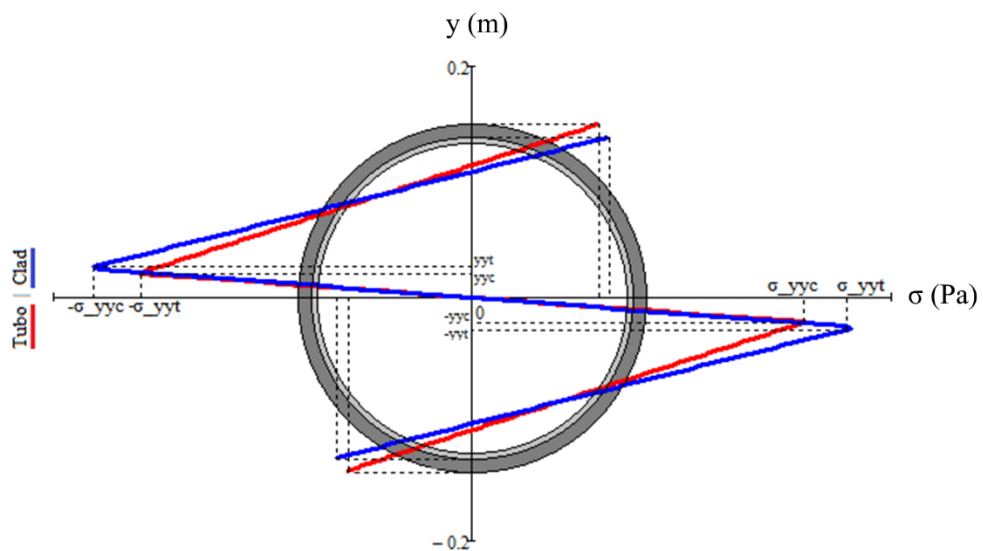


Fig. 45 - Gráfico sobreposto da distribuição de tensões residuais do tubo e do clad

5.3 Análise de picos de tensão.

Já foi citado que a distribuição das tensões residuais presentes no riser está diretamente relacionada ao raio de curvatura imposto a ele. Quanto menor for o ρ maior será a plastificação do tubo e conseqüentemente a distribuição das tensões residuais resultantes.

Existe uma singularidade que deve ser analisada: a localização do pico de tensão em função do ρ aplicado. Conforme mostrado na Fig. 46, para a geometria analisada, pode-se observar que a partir do início da plastificação com $\rho = 73m$ até o $\rho = 49m$ o pico de tensão se localiza a uma distância igual a R_o em relação a linha neutra, e a partir deste valor de curvatura, o pico passa a ser localizado no y_y .

Mesmo com essa variação, o foco do estudo se encontra entre os raios de 10m e 40m, pois este é o *range* dos carretéis que as embarcações normalmente comportam. A partir desta informação, é possível então concluir que diante dos parâmetros viabilizados industrialmente o pico de tensão sempre se encontrará na fronteira elastoplástica y_y do riser.

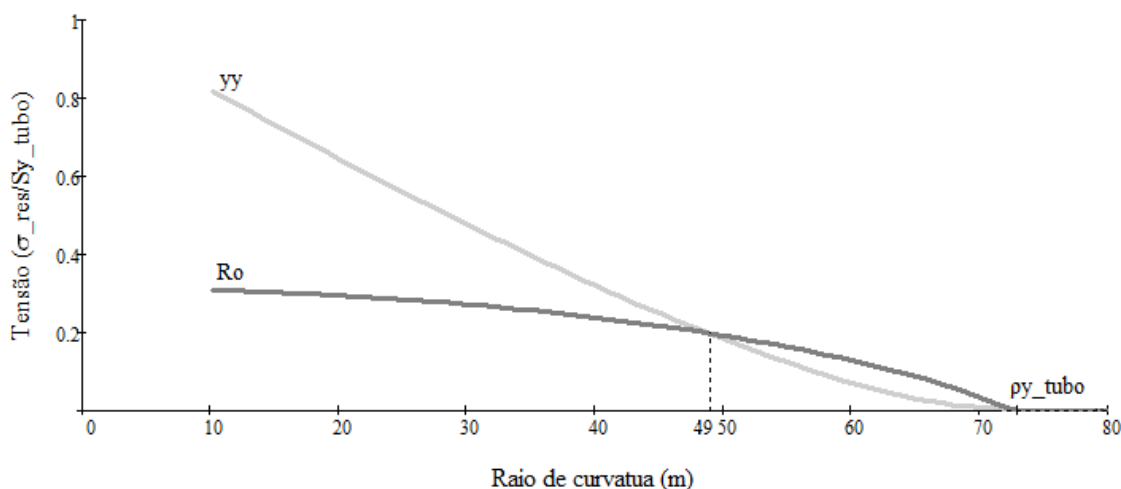


Fig. 46 - Variação do pico de tensão residual

Se analisarmos os diferentes pontos onde o $y_y(\rho)$ se encontra em decorrência da sequência de enrolamento do tubo sobre o carretel, destacam-se os raios de curvatura que atingem o valor de 49 metros e o raio de curvatura mínima de 10 metros.

Neste exemplo a transição entre os picos de tensão em R_o e picos de tensão em y_y dá-se a um raio de 49 metros. A partir dessa curvatura imposta, o pico de tensão acompanhará a distância de $y_y(\rho)$.

É importante analisar que, já que são as tensões que estão sendo discutidas, a quantidade da superfície plastificada para cada um desses casos é um parâmetro importante e tem diferenças consideráveis sobre o total da área da seção transversal do tubo. Essa diferença é apresentada na Fig. 47 em escala.

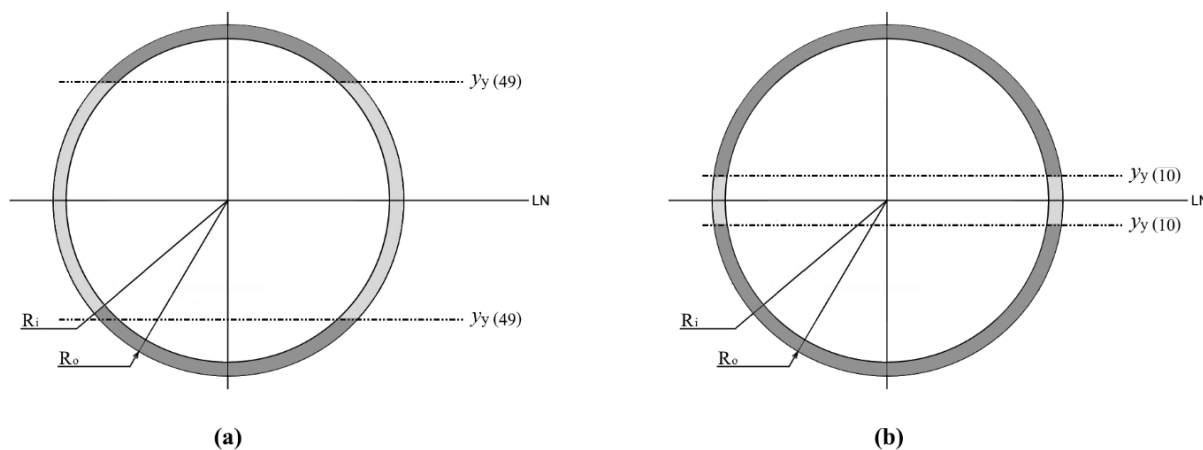


Fig. 47 - Área plastificada da seção transversal (a) $\rho = 49\text{m}$ (b) $\rho = 10\text{m}$. Fonte: Autor

A Fig. 47.a apresenta o total da seção transversal do tubo plastificada para um raio de curvatura de 49 metros. Nesse ponto de transição, onde o y_y atinge uma altura de 0,0852 metros de distância para a linha neutra, a área encruada plastificada 51% do total da seção transversal completa. No caso apresentado na Fig. 47.b, o y_y atinge um valor mais próximo da linha neutra igual a 0,0174 metros, e uma considerável parcela da superfície total da seção, que apresenta neste caso 91% de plastificação.

Fica nítido, por esta análise, que o pico das tensões residuais localizadas na fronteira elastoplástica tem uma relevância no caso estudado pois é nessa configuração que se encontram os carregamentos presentes na indústria, sendo assim, é importante observar a amplitude da diferença entre $\sigma_{residual}(y_y)$ e em $\sigma_{residual}(R_o)$.

É interessante analisar também que, pros casos de carregamento que acontece na prática, quando a tubulação se encontra em operação e vertical em relação à lâmina d'água recebe um alto valor de tensões axiais. Sabe-se que a distribuição dessas tensões axiais acontecem uniformemente ao longo da seção transversal do tubo. Se o pico de tensão residual se apresenta na parte mais próxima da linha neutra e não mais no raio externo da seção, o colapso do sistema pode ocorrer sem que essa grave condição seja prevista por projeto.

Na Fig. 48 é apresentado um gráfico de áreas, onde cada cor representa uma relação entre a tensão residual na fronteira elastoplástica y_y e em R_o . As cores variam de verde à

vermelho, onde verde indica que a diferença percentual dos valores das tensões residuais entre y_y e R_o são próximos e vermelho indica que a diferença percentual destes podem chegar até 200% .

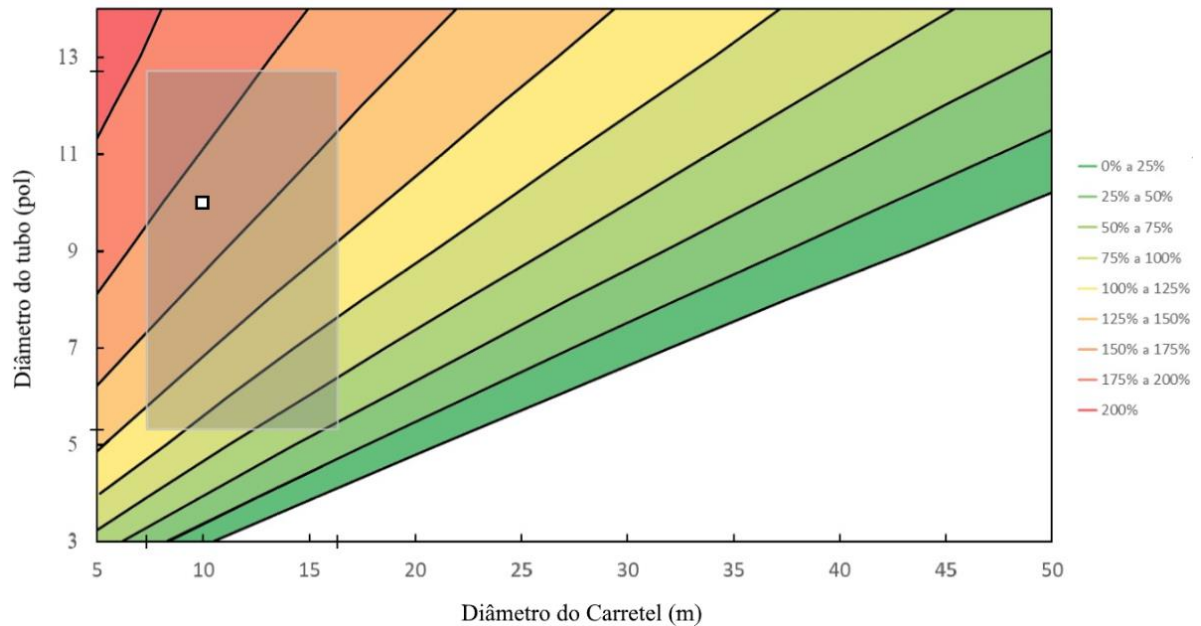


Fig. 48 - Relação entre pico de tensão residual em y_y e em R_o

O retângulo destacado na Fig. 48 tem como função indicar o *range* de combinações de tubos comerciais e carretéis mais usuais. A partir da análise do gráfico, é possível verificar que mesmo para a condição de menor sollicitação, a tensão residual gerada na primeira camada de enrolamento, pode chegar a ser 50% superior na fronteira elastoplástica y_y em relação a R_o .

A geometria analisada neste trabalho, é indicada por um quadrado branco na Fig. 48, apontando que na primeira camada de enrolamento a tensão residual em y_y é de cerca de 150% a 175% acima da tensão residual verificada em R_o . De fato a tensão residual em y_y é 164% superior a tensão em R_o .

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO

Diante do modelo analítico proposto, foi possível calcular a divisão de momentos fletores entre o tubo e o clad ao longo da sequência de enrolamento, e a distribuição das tensões residuais que se acumulam no componente riser rígido cladeado após seu descarregamento. Para tais cálculos, foi utilizado o software Mathcad de forma a permitir que diferentes variáveis fossem introduzidas e diversas análises fossem feitas para diferentes parâmetros.

Pôde-se confirmar que, a camada de proteção contra corrosão para o caso estudado possui relevância estrutural no componente riser, recebendo até cerca de 18% do momento total sobre o clad.

Percebeu-se também que, apesar de diversas literaturas apresentarem o pico de tensão residual no ponto mais externo a linha neutra, para os casos de enrolamento industrialmente viáveis, o ponto de pico da tensão residual sempre aparecerá a uma distância $y_y(\rho)$, numa parcela mais interna da seção transversal do riser.

Bibliografia

- Araujo, M. C. (2016). *Modelagem de curvamento a frio de tubulações*. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suco da Fonseca, Rio de Janeiro.
- Bastian, F. L., & Castrodeza, E. M. (2016). *Curvas de resistência CTOD-R da interface metal-clad de tubos API X52 cladeados por soldagem com Inconel 625*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Beer, F. P. (2015). *Mecânica dos Materiais-7ª Edição*. AMGH Editora, 2015.
- BRISTOT, D. F. (2014). *Influência do Cladding de inconel 625 no comportamento a fadiga do aço SAE 4140*. Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.
- CALOI, G. (2008). *Análise da soldabilidade do aço API 5L X-80 por meio dos Testes Tekken e de Implante*. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro.
- Campos, L. P. (2019). *ANÁLISE DE TENSÕES NO CURVAMENTO DE UM RISER RÍGIDO CLADEADO*. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suco da Fonseca, Rio de Janeiro.
- Castro, F. A. (2018). *ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS EM ESTRUTURAS HIPERESTÁTICAS*. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro.
- CHIAVERINI, V. (2005). *Aços e ferros fundidos*. São Paulo: Associação brasileira de metalurgia e materiais.
- Cho, J. R., Joo, B., Cho, J., & Moon, Y. H. (2017). Finite element analysis of the offshore reel-laying operations for double-walled pipe. *Advances in Mechanical Engineering*.
- GORNI, A., & SILVEIRA, J. &. (Março de 2010). Metalurgia dos aços microligados usados em tubos soldados de grande diâmetro. *Corte & Conformação de Metais*.
- Hibbeler, R. C. (2010). *Resistência dos materiais*. Pearson.
- MODENESI, P. J. (2008). *Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico*. Minas Gerais, Pampulha: Dissertação – Universidade Federal de Minas Gerais.
- MONTE, I. R. (2013). *Caracterização microestrutural do aço API 5L X65 soldado por feixe de elétrons com diferentes aportes térmicos*. Dissertação, Universidade de São Paulo, Lorena.
- PORTO, R., SOUZA, M. V., MOHALLEM, J. A., STORCH, B. T., Murad, B. B., Henriques, B. R., & Pereira, N. L. (2017). *Desenvolvimento do aço laminado a quente para atender*

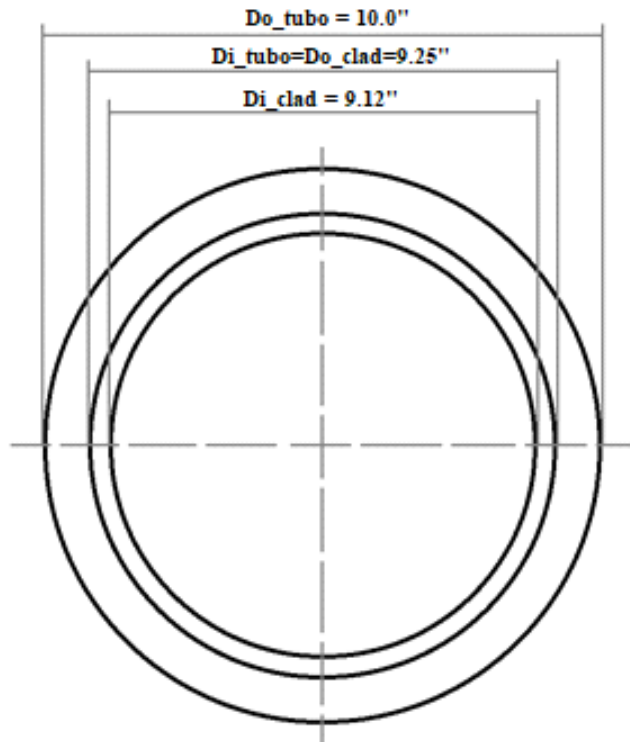
aos requisitos grau S700 da norma EN10149 na arcelormittal tubarão. São Paulo: 72nd ABM Annual Congress.

- Riagusoff, I. I., Souza, L. F., Kenedi, P. P., & Pacheco, P. M. (2010). *Modeling of Pipe Cold Bending: A Finite Element Approach*. Campina Grande - PB: VI National congress of mechanical engineering.
- Rody, P. H. (2014). Cladded Pipes Stress Analysis. *National Congress on Maritime Transportation, Ship and offshore Construction*.
- SILVA, R. D. (2018). *Estudo de liga de níquel alternativa na união de tubos de aço API 5L X65 revestidos internamente com Inconel 625*. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Simões, T. M. (2014). *Curvas S-N da camada de inconel 625 depositada por soldagem em tubos cladeados*. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Rio de Janeiro.
- Sousa, D. A. (2012). *Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por meio de Ensaio de Dureza*. Pós-Graduação, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei.

ANEXO A - Memorial de Cálculo

ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM RISER RÍGIDO CLADEADO

GEOMETRIA



Tubo : $espess_{clad} := 0.0787$

$Do_t := 10$ $Do_t = 10$ Diâmetro externo do tubo

$t_t := .375$ $t_t = 0.375$ Espessura do Tubo

$Ro_t := \left(\frac{Do_t}{2}\right) \cdot 25.4 \cdot 10^{-3}$ $Ro_t = 0.127$ Raio externo do tubo

$Ri_t := Ro_t - (t_t \cdot 25.4 \cdot 10^{-3})$ $Ri_t = 0.11747$ Raio interno do tubo

Clad :

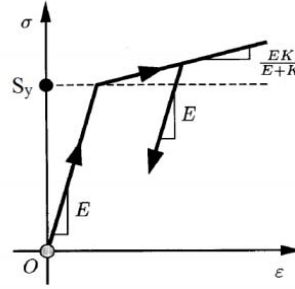
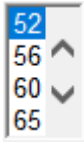
$t_c := 0.0787$ $t_c = 0.0787$ Espessura do clad

$Ro_c := Ri_t$ $Ro_c = 0.11747$ Raio externo do Clad

$Ri_c := Ro_c - (t_c \cdot 25.4 \cdot 10^{-3})$ $Ri_c = 0.11548$ Raio interno do tubo

GEOMETRIA

Classe_tubo :=



Classe do tubo: API 5L X52

$$\text{Sy_tubo} := \begin{cases} 290 \cdot 10^6 & \text{if Classe_tubo} = 42 \\ 320 \cdot 10^6 & \text{if Classe_tubo} = 46 \\ 360 \cdot 10^6 & \text{if Classe_tubo} = 52 \\ 390 \cdot 10^6 & \text{if Classe_tubo} = 56 \\ 415 \cdot 10^6 & \text{if Classe_tubo} = 60 \\ 450 \cdot 10^6 & \text{if Classe_tubo} = 65 \\ 485 \cdot 10^6 & \text{if Classe_tubo} = 70 \end{cases}$$

$$\text{Sut_tubo} := \begin{cases} 415 \cdot 10^6 & \text{if Classe_tubo} = 42 \\ 435 \cdot 10^6 & \text{if Classe_tubo} = 46 \\ 460 \cdot 10^6 & \text{if Classe_tubo} = 52 \\ 490 \cdot 10^6 & \text{if Classe_tubo} = 56 \\ 520 \cdot 10^6 & \text{if Classe_tubo} = 60 \\ 535 \cdot 10^6 & \text{if Classe_tubo} = 65 \\ 570 \cdot 10^6 & \text{if Classe_tubo} = 70 \end{cases}$$

$$E_tubo := 207 \cdot 10^9$$

$$E_clad := 207 \cdot 10^9$$

Módulo de Elasticidade

$$Sy_tubo = 3.6 \times 10^8$$

$$Sy_clad := 442 \cdot 10^6$$

Tensão de Escoamento

$$Sut_tubo = 4.6 \times 10^8$$

$$Sut_clad := 896 \cdot 10^6$$

Tensão de Ruptura

$$\epsilon R_tubo := 0.08$$

$$\epsilon R_clad := 0.55$$

Deformação de Ruptura

$$\epsilon y_tubo := \frac{Sy_tubo}{E_tubo}$$

$$\epsilon y_tubo = 1.73913 \times 10^{-3}$$

Deformação de Escoamento Tubo

$$\epsilon y_clad := \frac{Sy_clad}{E_clad}$$

$$\epsilon y_clad = 2.13527 \times 10^{-3}$$

Deformação de Escoamento Clad

$$K_tubo := \frac{Sut_tubo - Sy_tubo}{\epsilon R_tubo}$$

$$K_tubo = 1.25 \times 10^9$$

Módulo de Plasticidade Tubo

$$K_clad := \frac{Sut_clad - Sy_clad}{\epsilon R_clad}$$

$$K_clad = 8.25455 \times 10^8$$

Módulo de Plasticidade Clad

$$Et_tubo := \frac{E_tubo \cdot K_tubo}{E_tubo + K_tubo}$$

$$Et_tubo = 1.2425 \times 10^9$$

Módulo Tangente Elastoplástico Tubo

$$Et_clad := \frac{E_clad \cdot K_clad}{E_clad + K_clad}$$

$$Et_clad = 8.22176 \times 10^8$$

Módulo Tangente Elastoplástico Clad

▾ CARREGAMENTO ELÁSTICO

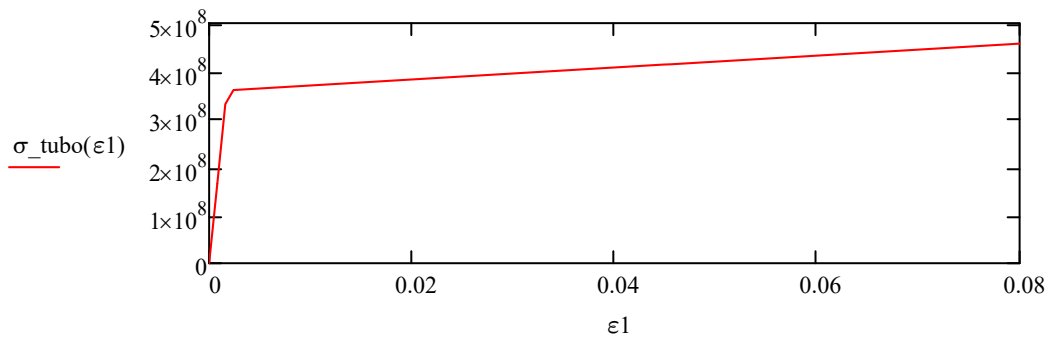
| | | |
|---|------------------------------------|---|
| $A_t := \pi(Ro_t^2 - Ri_t^2)$ | $A_t = 7.31559 \times 10^{-3}$ | Área seção transversal Tubo |
| $A_c := \pi(Ro_c^2 - Ri_c^2)$ | $A_c = 1.46293 \times 10^{-3}$ | Área seção transversal Clad |
| $I_t := \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot (Ro_t^4 - Ri_t^4)$ | $I_t = 5.47378 \times 10^{-5}$ | Momento de inércia Tubo |
| $I_c := \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot (Ro_c^4 - Ri_c^4)$ | $I_c = 9.92417 \times 10^{-6}$ | Momento de inércia Clad |
| $J_t := \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot (Ro_t^4 - Ri_t^4)$ | $J_t = 1.09476 \times 10^{-4}$ | Momento polar de inércia Tubo |
| $J_c := \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot (Ro_c^4 - Ri_c^4)$ | $J_c = 1.98483 \times 10^{-5}$ | Momento polar de inércia Clad |
| $My_{tubo} := \frac{Sy_{tubo} \cdot I_t}{Ro_t}$ | $My_{tubo} = 1.55162 \times 10^5$ | Momento mínimo de escoamento Tubo |
| $My_{clad} := \frac{Sy_{clad} \cdot I_c}{Ro_c}$ | $My_{clad} = 3.73397 \times 10^4$ | Momento mínimo de escoamento Clad |
| $My_{riser} := My_{tubo} + My_{clad}$ | $My_{riser} = 1.92502 \times 10^5$ | Momento mínimo de escoamento Tubo + Clad |
| $\rho y_{tubo} := \frac{E_{tubo} \cdot I_t}{My_{tubo}}$ | $\rho y_{tubo} = 73.025$ | Raio de Curvatura mínimo para escoamento Tubo |
| $\rho y_{clad} := \frac{E_{clad} \cdot Ro_c}{Sy_{clad}}$ | $\rho y_{clad} = 55.01657$ | Raio de Curvatura mínimo para escoamento Clad |
| $yy_t := \rho y_{tubo} \cdot \epsilon y_{tubo}$ | $yy_t = 0.127$ | Altura do limite elastico máximo Tubo (igual ao raio externo) |
| $yy_c := \rho y_{clad} \cdot \epsilon y_{clad}$ | $yy_c = 0.11747$ | Altura do limite elastico máximo Clad (igual ao raio externo) |

▴ CARREGAMENTO ELÁSTICO

▾ CÁLCULOS INICIAIS

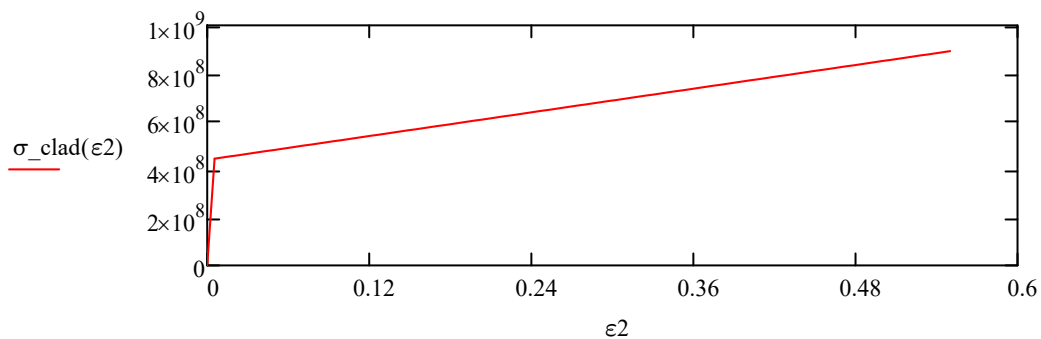
$$\epsilon_1 := 0, \frac{\epsilon R_{\text{tubo}}}{100} \dots \epsilon R_{\text{tubo}}$$

$$\sigma_{\text{tubo}}(\epsilon_1) := \begin{cases} \left(\frac{S_{y_{\text{tubo}}}}{\epsilon_{y_{\text{tubo}}}} \right) \cdot \epsilon_1 & \text{if } \epsilon_1 \leq \epsilon_{y_{\text{tubo}}} \\ [S_{y_{\text{tubo}}} + E_{t_{\text{tubo}}} \cdot (\epsilon_1 - \epsilon_{y_{\text{tubo}}})] & \text{otherwise} \end{cases}$$



$$\epsilon_2 := 0, \frac{\epsilon R_{\text{clad}}}{100} \dots \epsilon R_{\text{clad}}$$

$$\sigma_{\text{clad}}(\epsilon_2) := \begin{cases} \left(\frac{S_{y_{\text{clad}}}}{\epsilon_{y_{\text{clad}}}} \right) \cdot \epsilon_2 & \text{if } \epsilon_2 \leq \epsilon_{y_{\text{clad}}} \\ [S_{y_{\text{clad}}} + E_{t_{\text{clad}}} \cdot (\epsilon_2 - \epsilon_{y_{\text{clad}}})] & \text{otherwise} \end{cases}$$



▢ CÁLCULOS INICIAIS

$$\rho_{\text{carretel}} := 10$$

Raio do Carretel de transporte

$$\rho_{\text{min}} := \rho_{\text{carretel}} + R_{o_t}$$

$$\rho_{\text{min}} = 10.127$$

Raio total do conjunto carretel/tubo

$$\rho := \rho_{\text{min}}, \rho_{\text{min}} + 0.99881 \dots 100$$

Variação do raio de curvatura

Análise da distribuição de Momentos no Tubo:

$$\rho_{y_tubo} := \frac{R_{o_t}}{\epsilon_{y_tubo}}$$

$$\rho_{y_tubo} = 73.025$$

Curvatura mínima para início do escoamento em R_{o_t}

$$\rho_{i_tubo} := \frac{R_{i_t}}{\epsilon_{y_tubo}}$$

$$\rho_{i_tubo} = 67.54812$$

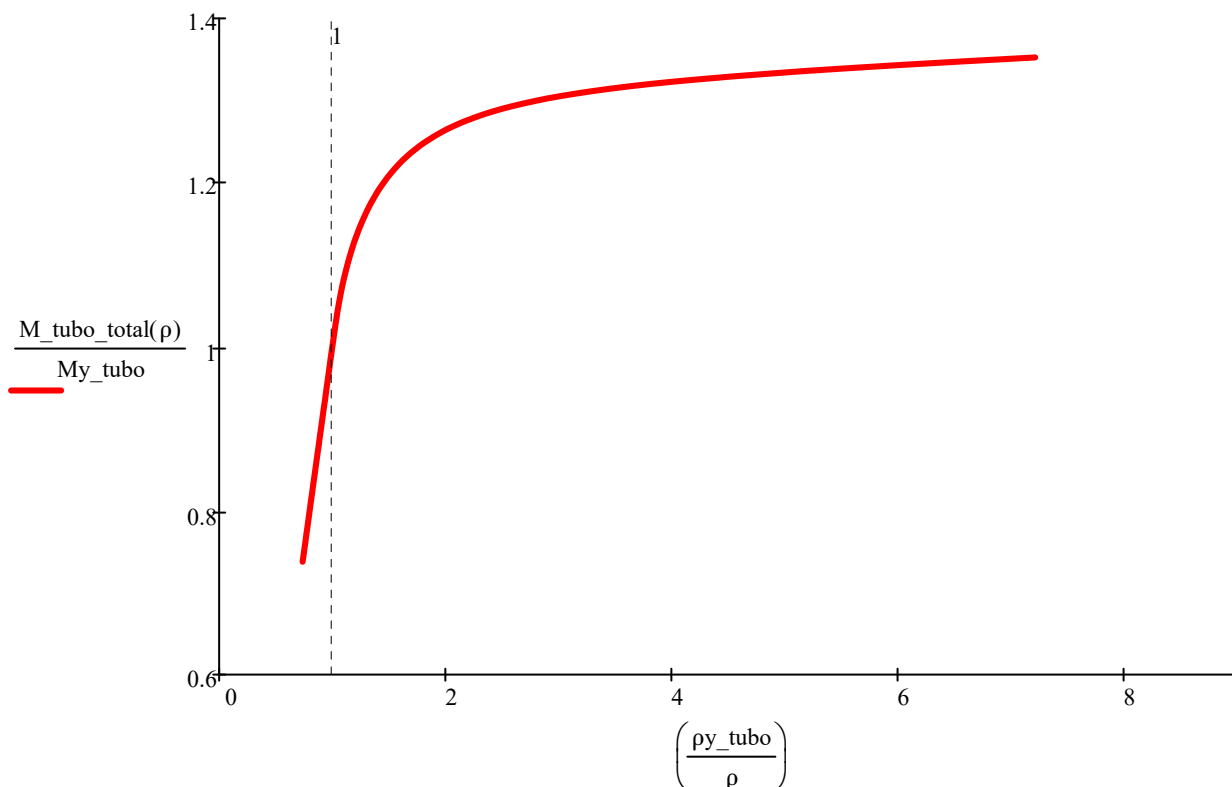
Curvatura mínima para início do escoamento em R_{i_t}

$$yy_t(\rho) := \epsilon_{y_tubo} \cdot \rho$$

Varição da fronteira elasto-plástica do tubo em função de ρ

$$M_{\text{tubo_total}}(\rho) := \begin{cases} \frac{E_{\text{tubo}} \cdot I_{\text{t}}}{\rho} & \text{if } 100 \geq \rho \geq \rho_{y_tubo} \\ 2 \cdot \int_0^{R_{i_t}} y \cdot \left[\frac{y}{yy_t(\rho)} \cdot Sy_{\text{tubo}} \right] \cdot \left[2 \sqrt{(R_{o_t})^2 - y^2} - \sqrt{(R_{i_t})^2 - y^2} \right] dy + 2 \cdot \int_{R_{i_t}}^{yy_t(\rho)} y \cdot \left[\frac{y}{yy_t(\rho)} \cdot Sy_{\text{tubo}} \right] dy \\ 2 \cdot \int_0^{yy_t(\rho)} y \cdot \left[\frac{y}{yy_t(\rho)} \cdot Sy_{\text{tubo}} \right] \cdot \left[2 \sqrt{(R_{o_t})^2 - y^2} - \sqrt{(R_{i_t})^2 - y^2} \right] dy + \left[2 \cdot \int_{yy_t(\rho)}^{R_{i_t}} y \cdot \left[Sy_{\text{tubo}} + \right. \right. \end{cases}$$

OBS: As equações cortadas acima estão apresentadas nas equações 28, 29 e 30 do Capítulo 3



Análise da distribuição de Momentos no Clad:

$$\rho_{y_clad} := \frac{R_{o_c}}{\epsilon_{y_clad}}$$

$$\rho_{y_clad} = 55.01657$$

Raio de curvatura mínimo para início do escoamento no raio externo do Clad

$$\rho_{i_clad} := \frac{R_{i_c}}{\epsilon_{y_clad}}$$

$$\rho_{i_clad} = 54.0804$$

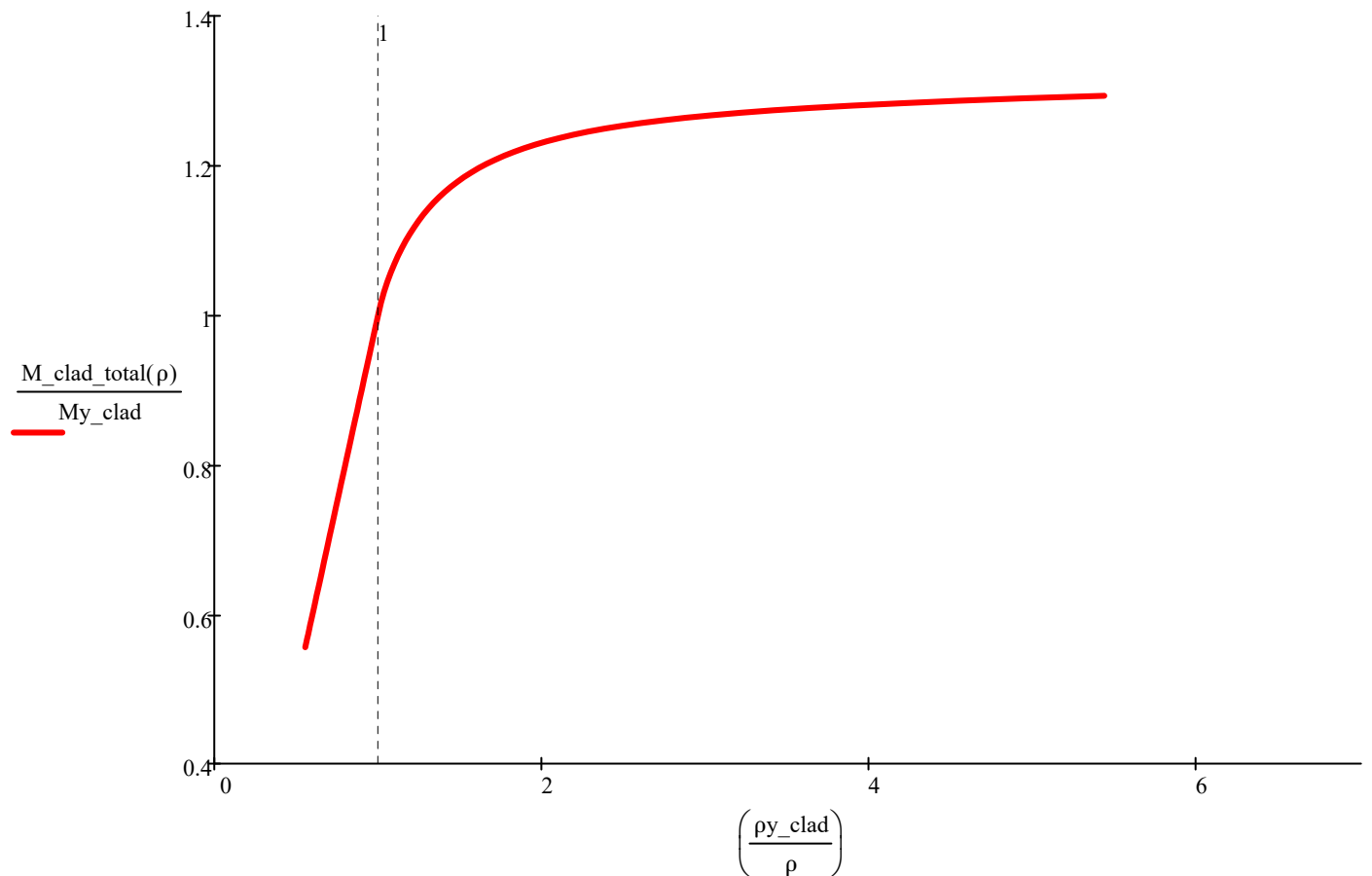
Raio de curvatura mínimo para início do escoamento no raio interno do Clad

$$yy_c(\rho) := \rho \cdot \epsilon_{y_clad}$$

Variação da fronteira elasto-plástica do clad em função de ρ

$$M_{clad_total}(\rho) := \begin{cases} \frac{E_{clad} \cdot I_c}{\rho} & \text{if } 100 \geq \rho > \rho_{y_clad} \\ \left[2 \cdot \int_0^{R_{i_c}} y \cdot \left[\frac{y}{(yy_c(\rho))} \cdot Sy_{clad} \right] \cdot \left[2 \left[\sqrt{(R_{o_c})^2 - y^2} \right] - \sqrt{(R_{i_c})^2 - y^2} \right] dy + 2 \cdot \int_{R_{i_c}}^{yy_c(\rho)} y \cdot \left[\frac{y}{(yy_c(\rho))} \cdot Sy_{clad} \right] \cdot \left[2 \left[\sqrt{(R_{o_c})^2 - y^2} \right] - \sqrt{(R_{i_c})^2 - y^2} \right] dy \right] + \left[2 \cdot \int_{yy_c(\rho)}^{R_{i_c}} y \cdot \left[Sy_{clad} \cdot \left[2 \left[\sqrt{(R_{o_c})^2 - y^2} \right] - \sqrt{(R_{i_c})^2 - y^2} \right] \right] dy \right] \end{cases}$$

OBS: As equações cortadas acima estão apresentadas nas equações 28, 29 e 30 do Capítulo 3



Distribuição de Momentos: Tubo & Clad

$$M_{\text{riser}}(\rho) := M_{\text{tubo_total}}(\rho) + M_{\text{clad_total}}(\rho)$$

Momento aplicado ao riser em função da curvatura

$$M_{\text{riser}}(\rho_{\text{tubo}}) = 1.96387 \times 10^5$$

Momento aplicado ao riser para raio igual a 67.55m

$$M_{\text{tubo_total}}(\rho_{\text{tubo}}) = 1.65975 \times 10^5$$

Momento aplicado ao Tubo para raio igual a 67.55m

$$M_{\text{clad_total}}(\rho_{\text{tubo}}) = 3.04124 \times 10^4$$

Momento aplicado ao Clad para raio igual a 67.55m

$$M_{\text{riser}}(\rho_{\text{clad}}) = 2.20581 \times 10^5$$

Momento aplicado ao riser para raio igual a 54.08m

$$M_{\text{tubo_total}}(\rho_{\text{clad}}) = 1.82636 \times 10^5$$

Momento aplicado ao Tubo para raio igual a 54.08m

$$M_{\text{clad_total}}(\rho_{\text{clad}}) = 3.79451 \times 10^4$$

Momento aplicado ao Clad para raio igual a 54.08m

$$M_{\text{riser}}(\rho_{\text{min}}) = 2.58114 \times 10^5$$

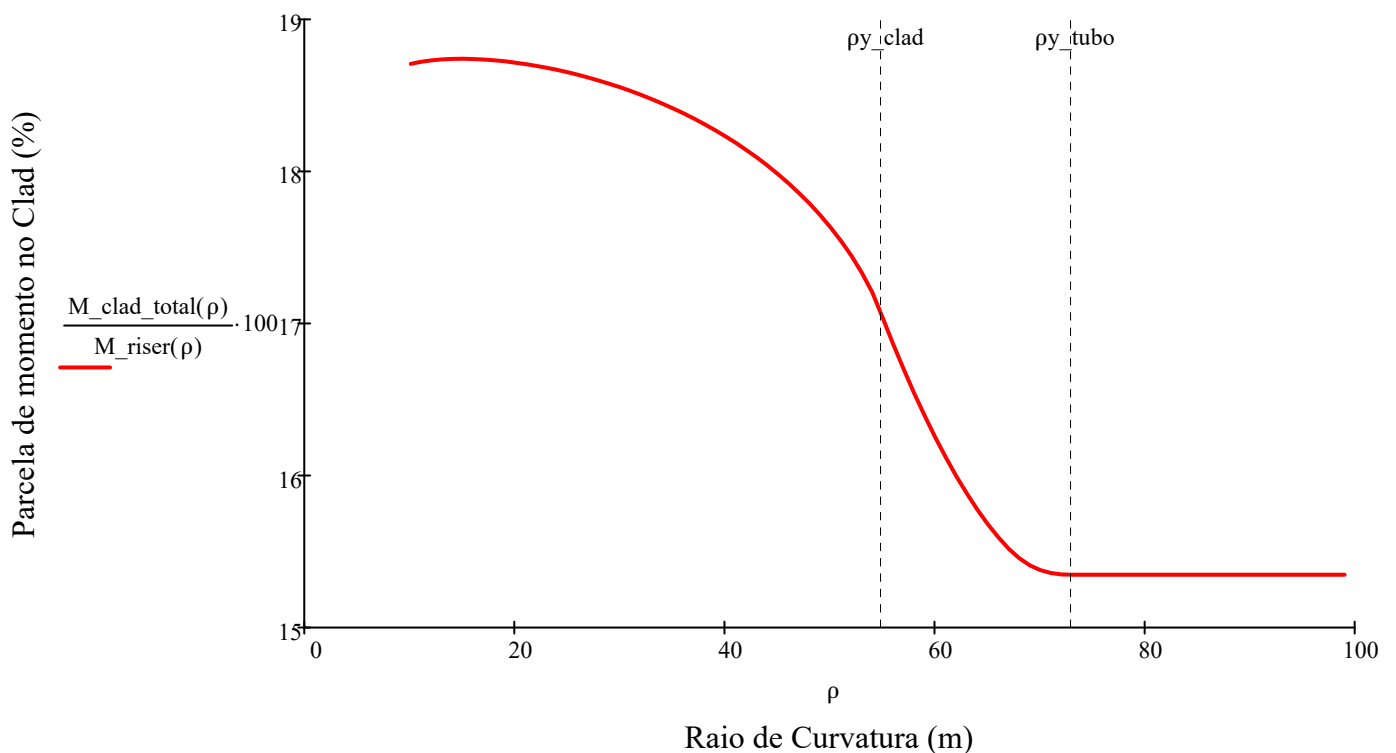
Momento máximo aplicado ao riser

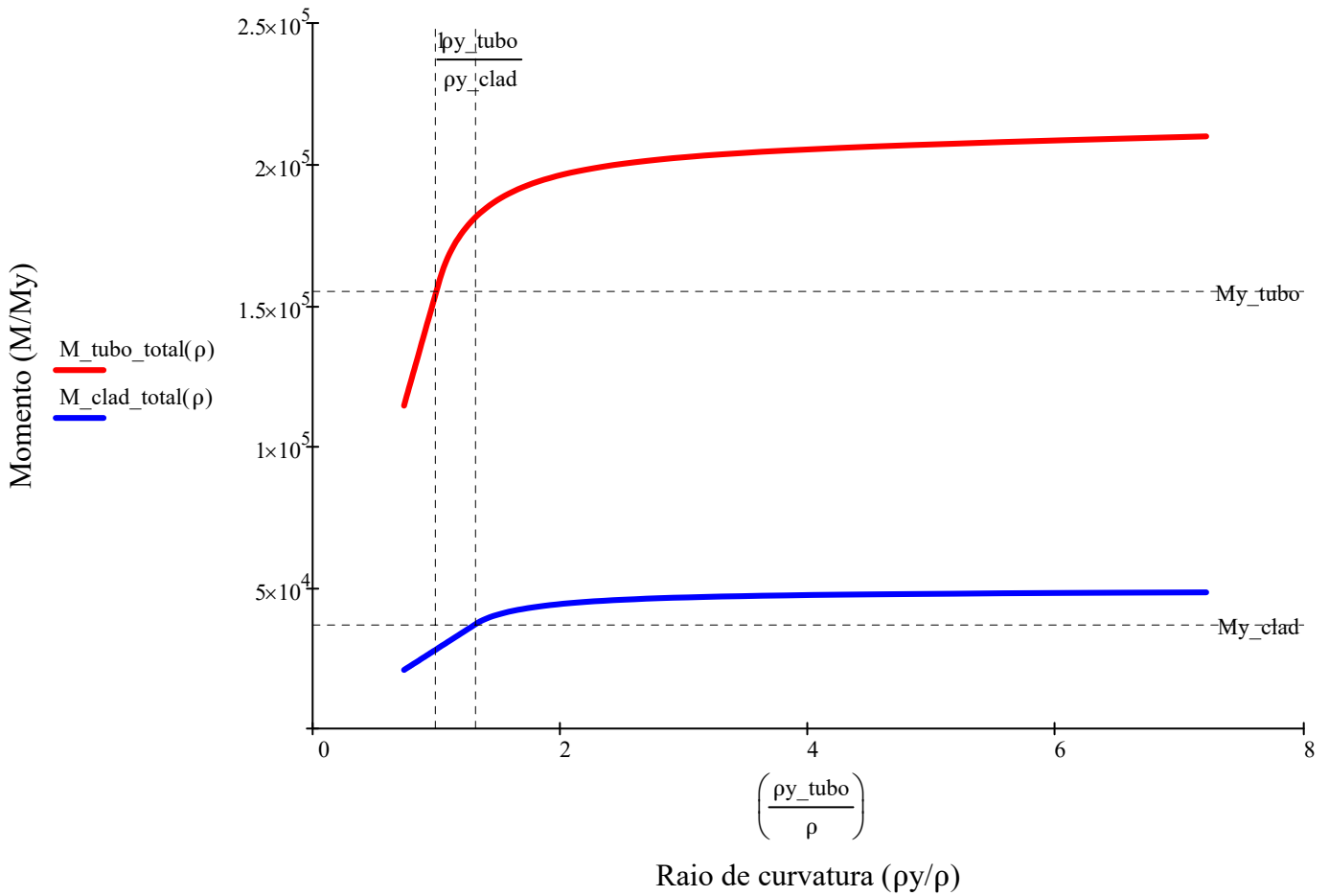
$$M_{\text{tubo_total}}(\rho_{\text{min}}) = 2.09826 \times 10^5$$

Momento máximo aplicado ao Tubo

$$M_{\text{clad_total}}(\rho_{\text{min}}) = 4.82875 \times 10^4$$

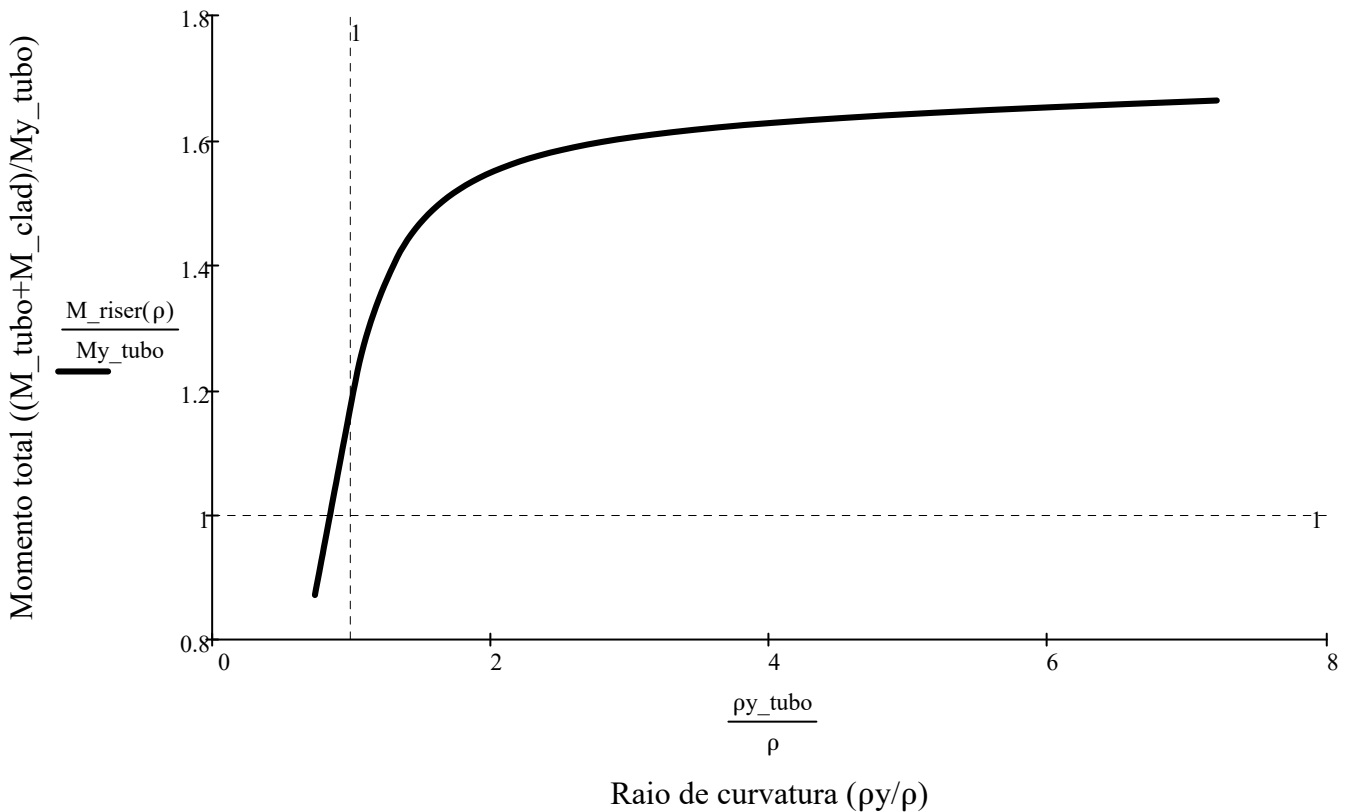
Momento máximo aplicado ao Clad





Soma dos momentos de tubo + clad - Distribuição de momento no componente Riser

Distribuição de momento total sobre o componente Riser (Tubo + Clad)



Tubo

$$y1 := -Ro_t, -Ro_t + \left(\frac{Ro_t}{100}\right) .. Ro_t$$

Variação da altura entre raios externos tubo

$$yy_t(\rho) := \epsilon y_tubo \cdot \rho$$

Variação da fronteira elastoplástica do tubo em função de ρ

Tensão de carregamento no tubo:

$$\sigma_tubo(y1, \rho) := \begin{cases} -Sy_tubo - \left(\frac{Et_tubo \cdot y1}{\rho}\right) & \text{if } yy_t(\rho) \leq y1 \leq Ro_t \\ -\left(\frac{y1}{\epsilon y_tubo \cdot \rho}\right) \cdot Sy_tubo & \text{if } -(yy_t(\rho)) \cdot \rho \leq y1 < yy_t(\rho) \\ Sy_tubo - \frac{Et_tubo \cdot y1}{\rho} & \text{if } -Ro_t \leq y1 \leq -(yy_t(\rho)) \end{cases}$$

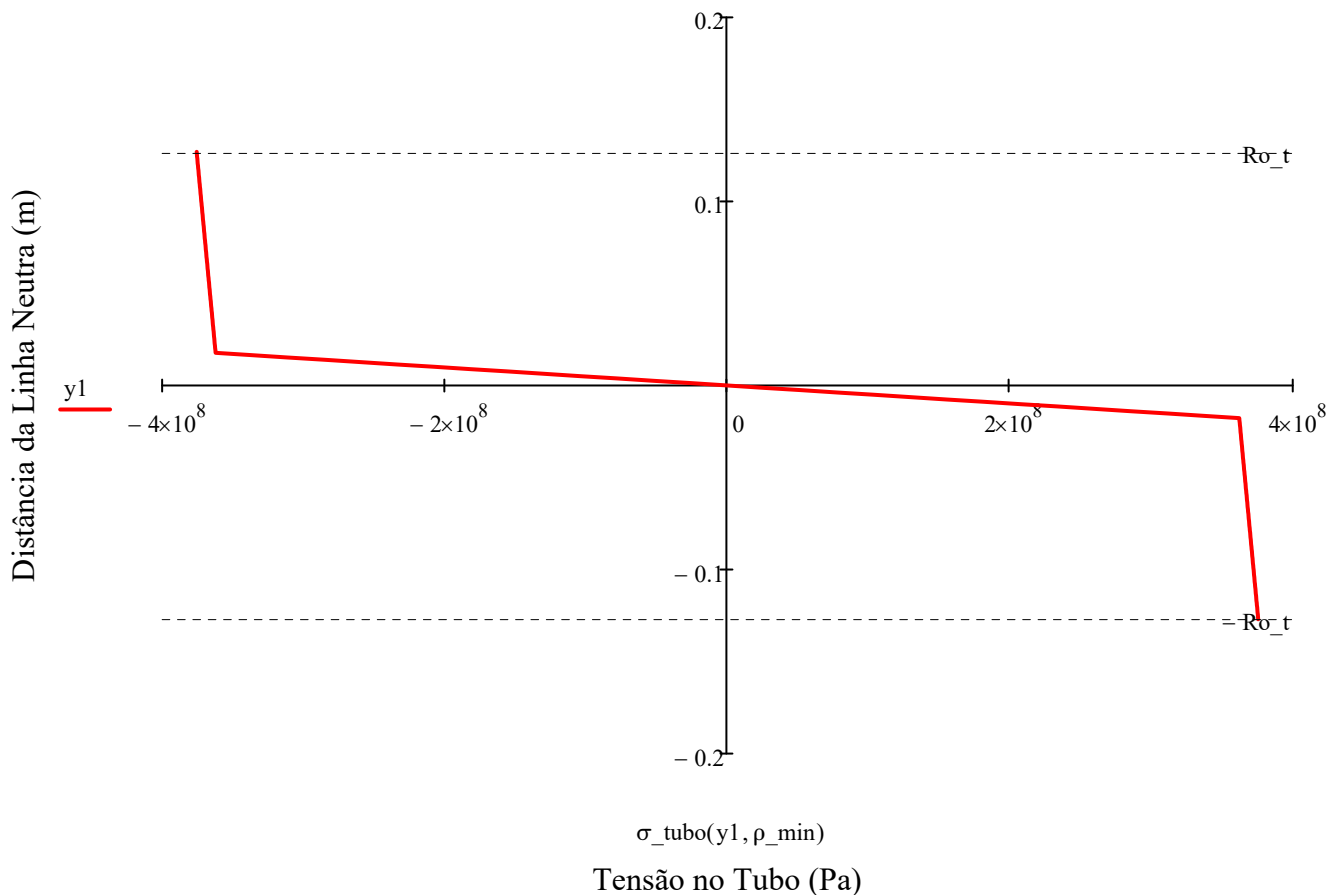
Tensão de Spring-Back no tubo:

$$\sigma_sb_tubo(\rho, y1) := \frac{M_tubo_total(\rho) \cdot y1}{I_t}$$

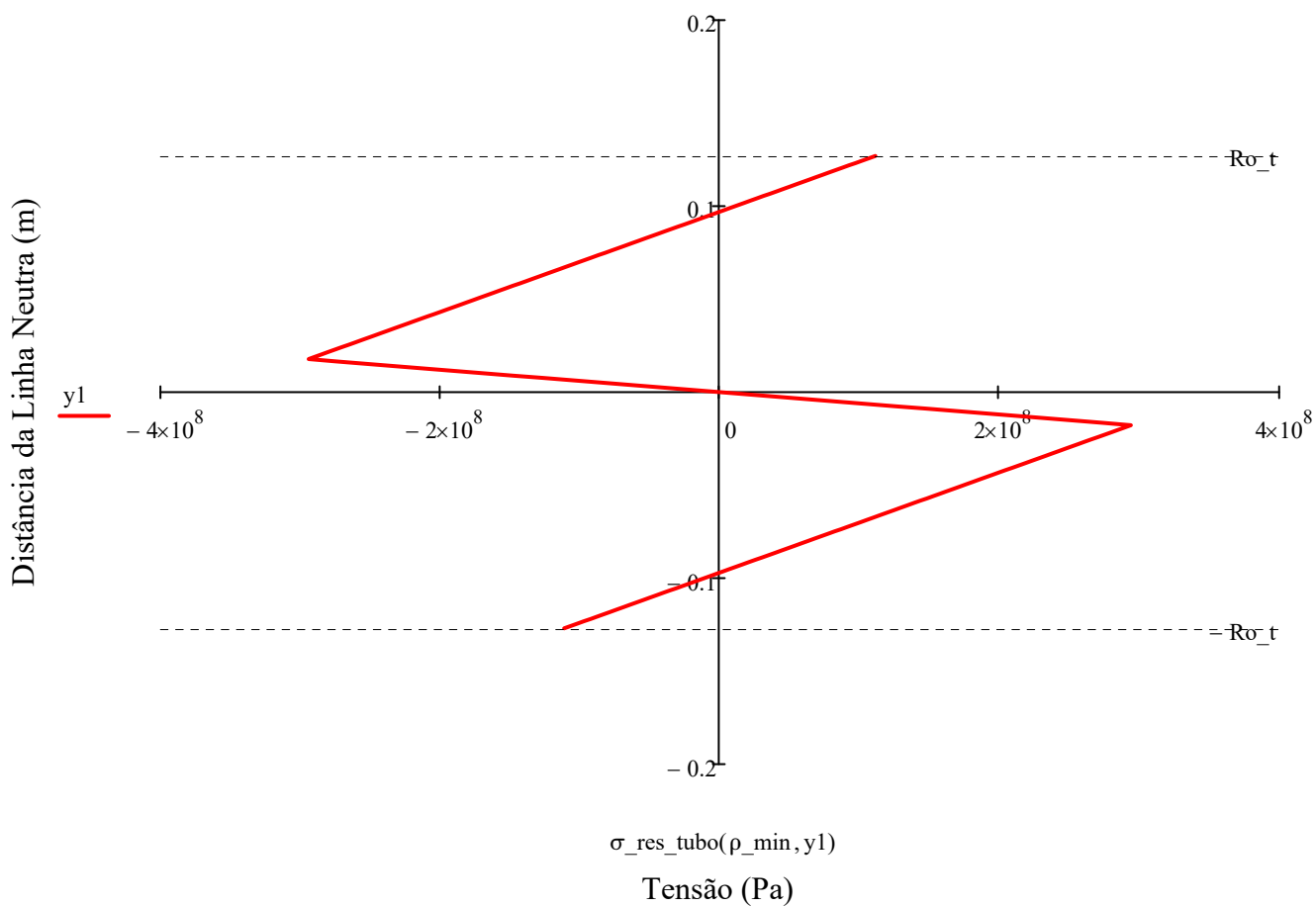
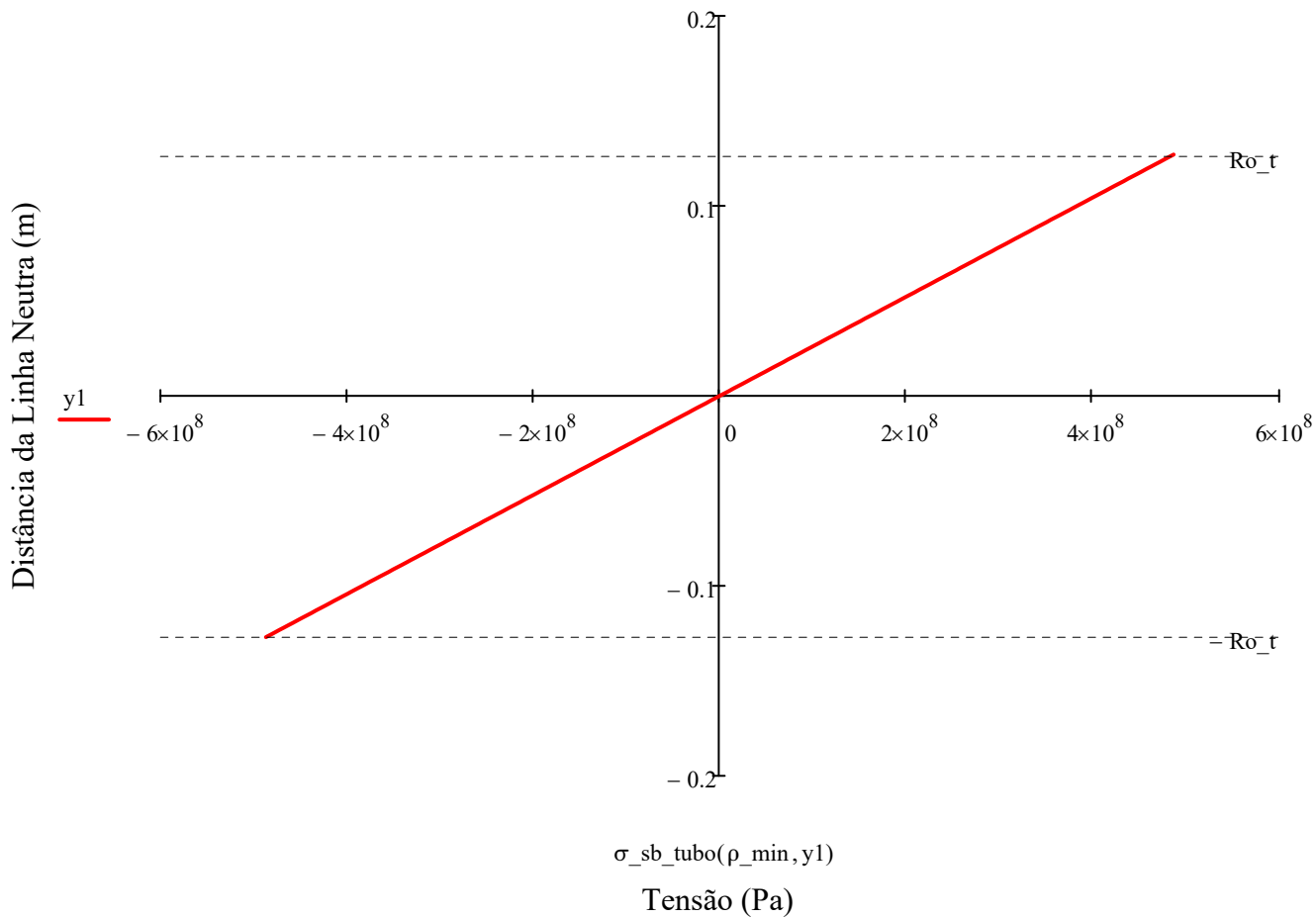
Tensão residual no tubo:

$$\sigma_res_tubo(\rho, y1) := \sigma_tubo(y1, \rho) + \sigma_sb_tubo(\rho, y1)$$

Gráficos de Tensões (Carregamento + Spring Back = Residual)



Spring Back



Clad

$$y2 := -Ro_c, -Ro_c + \left(\frac{Ro_c}{100} \right) .. Ro_c$$

Varição da altura entre raios externos do clad

$$yy_c(\rho) := \varepsilon y_clad \cdot \rho$$

Varição da fronteira elasto-plástica do clad em função de ρ

Tensão de carregamento no clad:

$$\sigma_clad(y2, \rho) := \begin{cases} -Sy_clad - \left(\frac{Et_clad \cdot y2}{\rho} \right) & \text{if } yy_c(\rho) \leq y2 \leq Ro_t \\ -\left(\frac{y2}{\varepsilon y_clad \cdot \rho} \cdot Sy_clad \right) & \text{if } -yy_c(\rho) \leq y2 < yy_c(\rho) \\ Sy_clad - \frac{Et_clad \cdot y2}{\rho} & \text{if } -Ro_t \leq y2 \leq -(yy_c(\rho)) \end{cases}$$

$$\sigma_clad(Ro_c, \rho_min) = -4.51537 \times 10^8$$

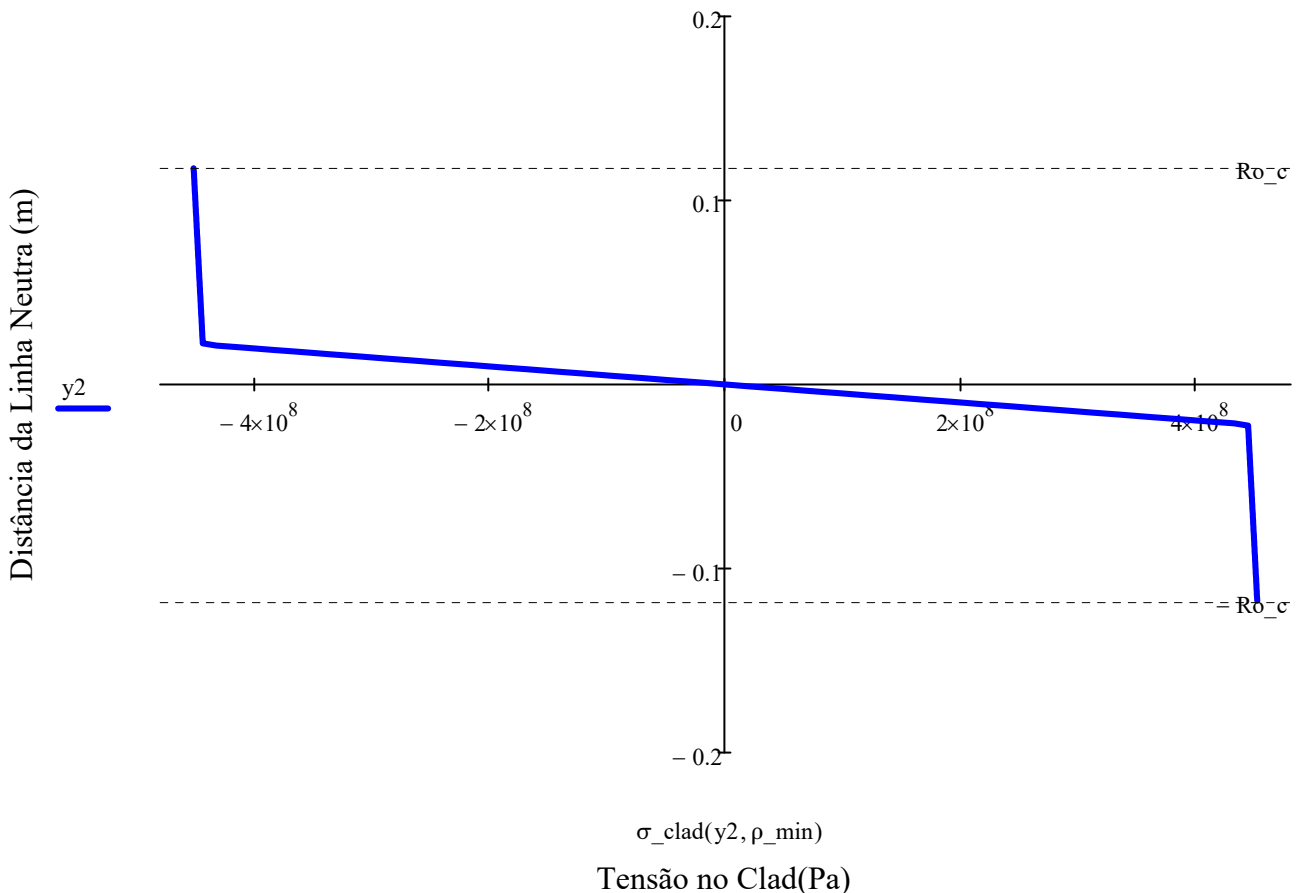
Tensão de Spring-Back no clad:

$$\sigma_sb_clad(\rho, y2) := \frac{M_clad_total(\rho) \cdot y2}{I_c}$$

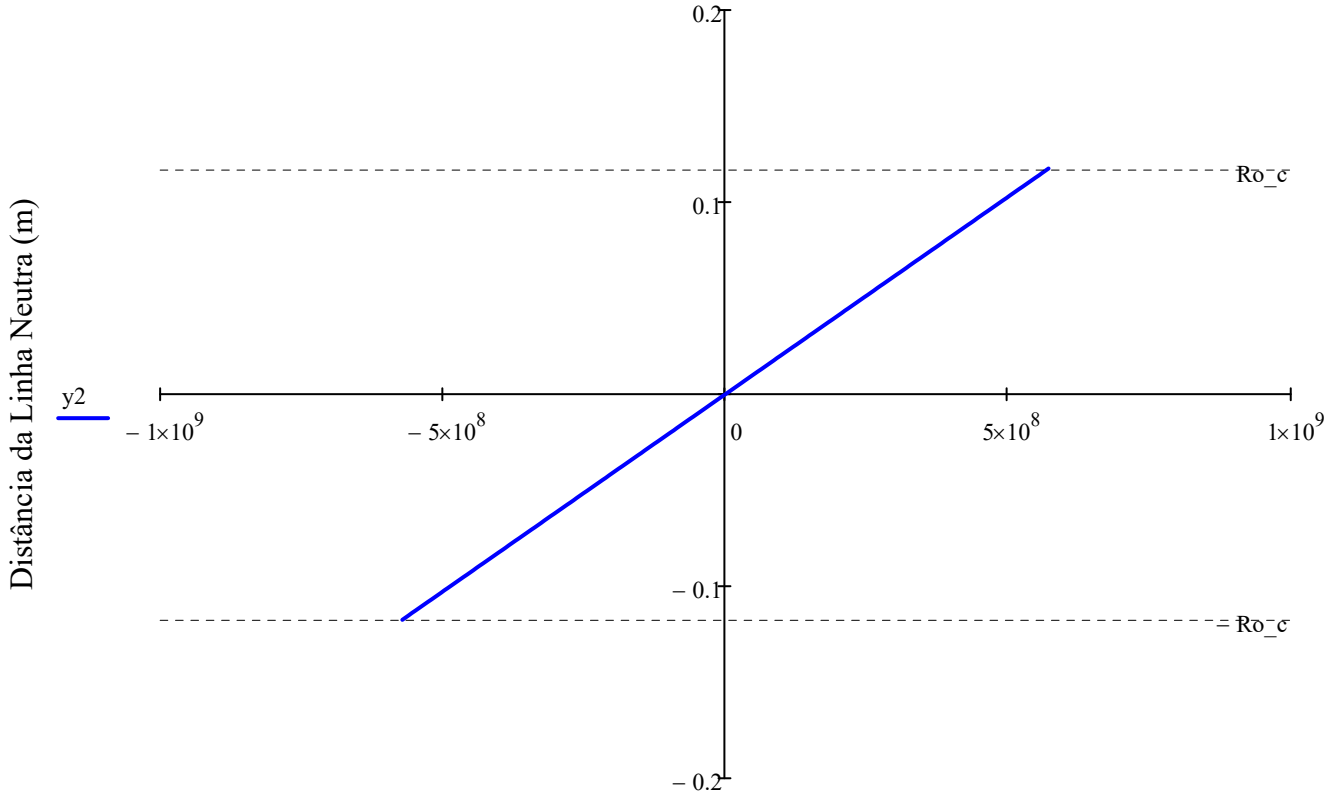
Tensão residual no clad:

$$\sigma_res_clad(\rho, y2) := \sigma_clad(y2, \rho) + \sigma_sb_clad(\rho, y2)$$

Gráficos de Tensões (Carregamento + Spring Back = Residual)



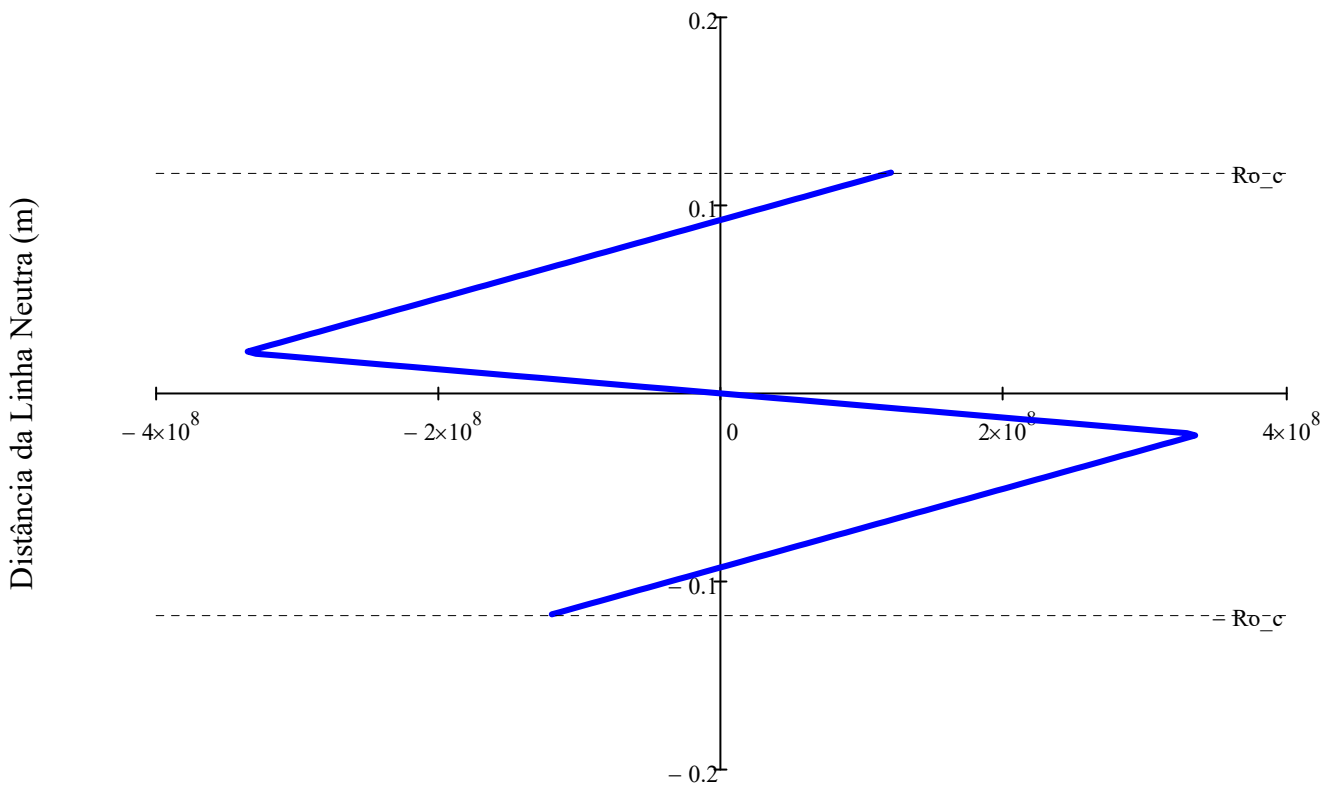
Spring Back



$$\sigma_{sb_clad}(\rho_{min}, y_2)$$

Tensão (Pa)

Tensão Residual



Tensão (Pa)

Distribuição de momento no componente Riser

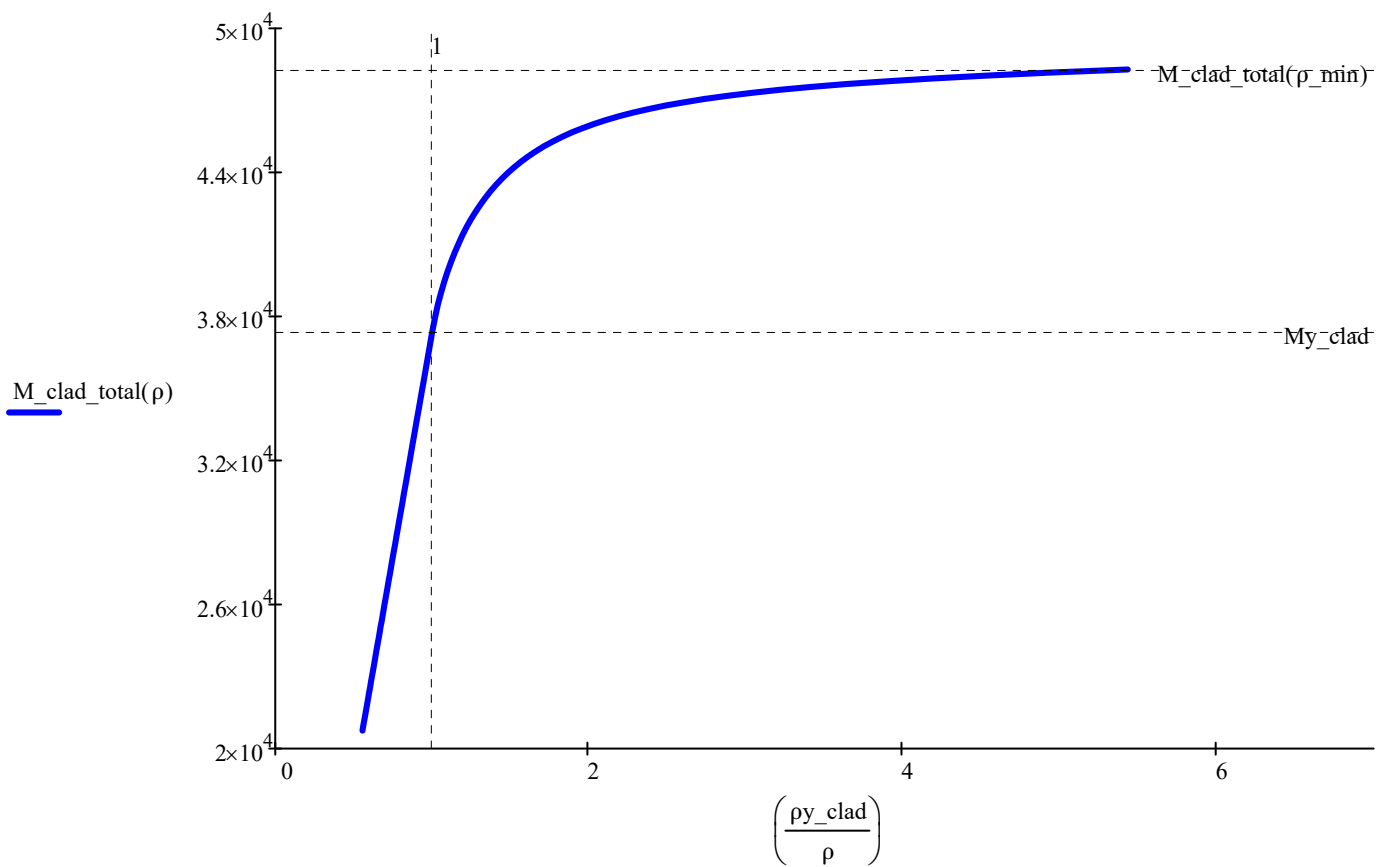
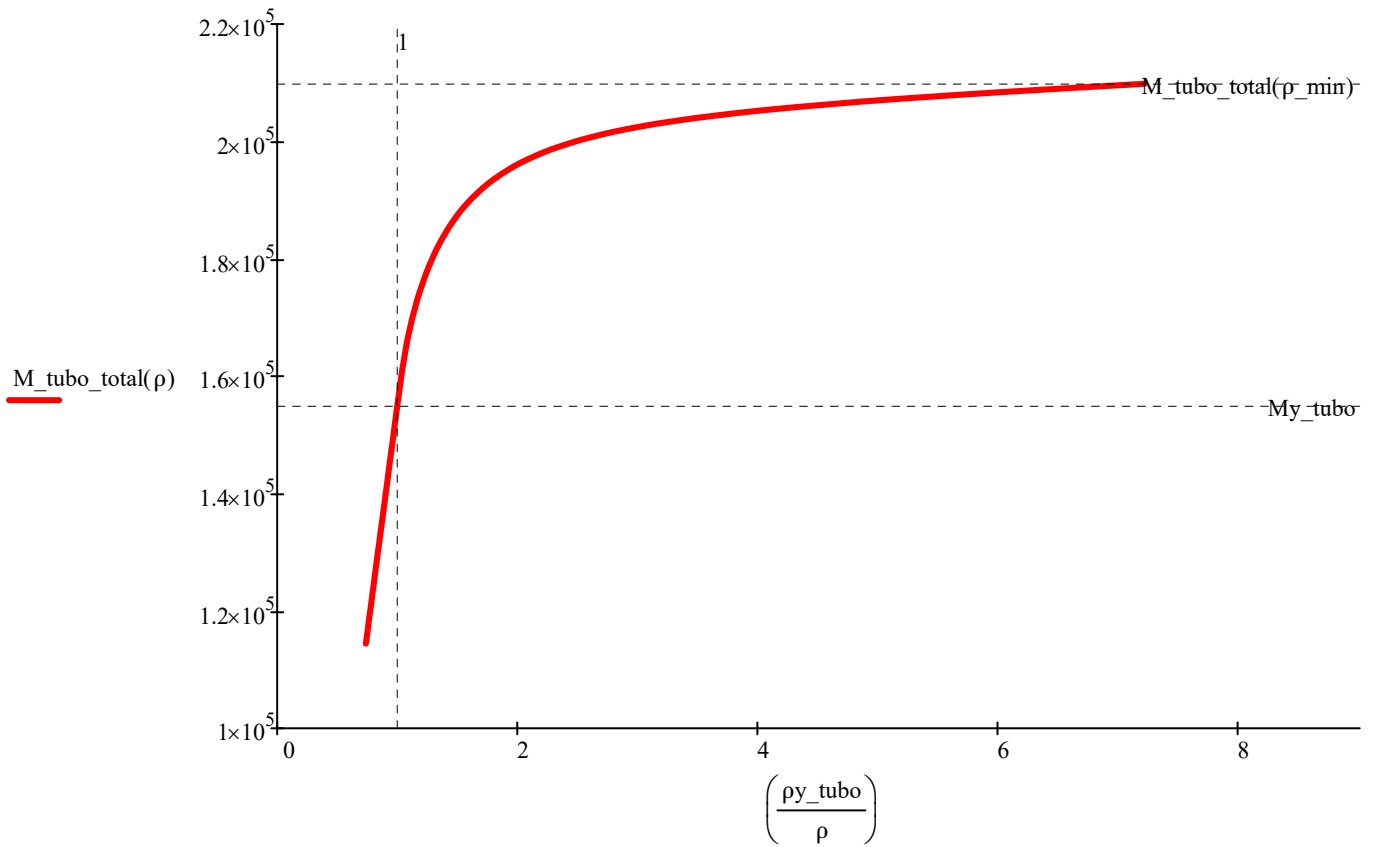


Gráfico de distribuição de momentos - Tubo & Clad

