

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

LETICIA PAIVA CAMPOS

**ANÁLISE DE TENSÕES NO CURVAMENTO DE UM *RISER* RÍGIDO
CLADEADO**

**Rio de Janeiro
Novembro 2019**

LETICIA PAIVA CAMPOS

**ANÁLISE DE TENSÕES NO CURVAMENTO DE UM *RISER* RÍGIDO
CLADEADO**

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
Novembro de 2019**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

C198 Campos, Leticia Paiva.

Análise de tensões no curvamento de um riser rígido cladeado /
Leticia Paiva Campos – 2019.
49f. +anexos. : il. color., grafs., tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2019.

Bibliografia: f. 47-49.

Orientadora: Paulo Pedro Kenedi.

1. Engenharia mecânica. 2. Corrosão. 3. Metais – Corrosão. 4.
Offshore – Engenharia. I. Kenedi, Paulo Pedro (Orient.). II. Título.

CDD 621

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes CRB-7/5281

AGRADECIMENTOS

Agradeço minha família e aos meus amigos por todo o carinho, amor, compreensão e incentivo por todo esse tempo que estive na faculdade. Sou grata, especialmente pelos meus pais, que sempre valorizaram a minha educação, não deixaram faltar nada e sempre me incentivaram a me capacitar cada vez mais.

Sou grata também aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado me apoiando, me ajudando e passando por todos os momentos comigo, bons e ruins.

Meus agradecimentos também ao CEFET/RJ, seu corpo docente, direção e administração, pela oportunidade de fazer um curso de Engenharia Mecânica. Não posso deixar de dedicar um agradecimento especial ao meu orientador de projeto final que me ajudou muito com todos os conhecimentos passados para que este trabalho fosse concluído.

RESUMO

O projeto consiste na análise de divisão de carregamentos entre o tubo de aço e o clad de um “riser” rígido cladeado durante o seu curvamento. Para este estudo, foi considerado um “riser” do tipo rígido que seja revestido internamente com Inconel 625 para minimizar os efeitos de corrosão interna. Considerando que a fabricação do “riser” rígido de material inerte a corrosão seja de alto custo, o cladeamento é uma alternativa mais econômica, pois o revestimento protege o “riser” rígido, feito de aço carbono, de corrosões internas causadas, por exemplo, por H₂S e/ou CO₂. Esse estudo foi feito para verificar a viabilidade do uso de cladeamento e o quanto de momento cada material do riser consegue receber.

Palavras-Chave: Cladeamento; “Riser”; Análise de tensões; Corrosão

ABSTRACT

The design consists of the analysis of load division between the steel pipe and the clad of a rigid riser clad during its bending. For this study, a rigid riser that was internally coated with Inconel 625 was considered to minimize the effects of internal corrosion. Since the manufacture of the rigid riser of corrosion inert material is costly, cladding is a more economical alternative because the coating protects the rigid carbon steel riser from internal corrosion caused, for example, by H₂S and CO₂. This study was done to verify the feasibility of cladding and the amount of momentum each riser material can receive.

Keywords: Cladding; Riser; Stress analysis; Corrosion

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Blocos em exploração e campos em desenvolvimento e produção no Brasil (2016)	14
Figura 2- Média de produção de petróleo dos poços no Brasil	15
Figura 3- Configuração de um “riser” flexível	16
Figura 4- Configuração de um “riser” rígido.....	17
Figura 5- Processo de cladeamento feito por laminação.....	21
Figura 6- Processo JCO de placas.....	21
Figura 7- Placas curvadas, a parte interior é de clad e a exterior feita de aço	22
Figura 8- Soldagem de um chapa cladeada pelo processo GTAW	23
Figura 9- Processo de explosão de chapas	23
Figura 10- Processo de cladeamento por explosão dentro de tubos imersos em água	24
Figura 11- Processo de cladeamento por laminação ou explosão e formação em conjunto do tubo.....	26
Figura 12- Processo de formação do tubo em separado e cladeamento por explosão	28
Figura 13- Gráfico de Tensão x Deformação com comportamento bilinear	31
Figura 14- Gráfico do modelo constitutivo bi-linear do aço API 5L X65	32
Figura 15- Gráfico do modelo constitutivo bi-linear do Inconel 625.....	32
Figura 16- Descrição de dAa.....	36
Figura 17- Descrição de dAb.....	36
Figura 18- Pipelay Vessel.....	38
Figura 19- Dimensões do “riser” rígido cladeado	39
Figura 20- Quantidade de momento do tubo.....	42
Figura 21- Quantidade de momento do clad	43
Figura 22- Comparação quantidade de momento tubo de aço x clad	44
Figura 23- Razão M_{tubo} e M_{clad}	44

LISTA DE TABELA

Tabela 1- Composição química do aço API 5L X65, conforme a PM International Suppliers	19
Tabela 2- Composição química da liga INCONEL 625, conforme a Special metals ..	20
Tabela 3- Propriedades mecânicas do API 5LX65.....	40
Tabela 4- Propriedades do Inconel 625.....	40
Tabela 5- Propriedades de deformação e de rigidez.....	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	11
1.2	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	12
1.3	OBJETIVO DO ESTUDO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	A INDÚSTRIA PETROLÍFERA	13
2.2	“RISERS”	15
2.3	PRINCIPAL MECANISMO DE DANO EM EXPLORAÇÃO “OFFSHORE”	17
2.4	MATERIAIS UTILIZADOS E PROPRIEDADES	18
2.4.1	API 5L X65	18
2.4.2	Inconel 625	19
2.5	CLADEAMENTO	20
2.5.1	Cladeamento por Laminação	20
2.5.2	Cladeamento Por Explosão	23
2.6	SEQUÊNCIA DE FABRICAÇÃO/UTILIZAÇÃO	24
3	MODELO ANALÍTICO	30
3.1	MODELO CONSTITUTIVO	30
3.2	EQUILÍBRIO	33
3.2.1	Divisão do Momento Fletor- Tensão Elástica	33
4	RESULTADOS	39
4.1	GEOMETRIA DO “RISER”	39
4.1.1	Dimensões do Tubo Cladeado	39
4.1.2	Momento de Inércia	40
4.2	Propriedades Mecânicas	40
4.3	CARREGAMENTO ELÁSTICO	41
4.4	DIVISÃO DE MOMENTO	41
4.4.1	Momento no Tubo de API 5L X65	41
4.4.2	Momentos do Clad de Inconel 625	42
4.5	APLICAÇÃO EM CARRETEL	45
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
ANEXO A- Memorial de Cálculo	49

1 INTRODUÇÃO

Os tópicos deste capítulo abordam as considerações históricas, a formulação do problema proposto e a motivação. O foco deste estudo é propor um “riser” cladeado com uma liga níquel que suporte as condições de alto mar e os esforços mecânicos no qual ele é submetido, visando também uma economia em relação ao tipo de material, pois tudo que é relacionado a exploração em alto mar significa um alto custo de produção, devido principalmente ao ambiente corrosivo e ao risco que essa operação gera.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a crescente demanda mundial em combustíveis fósseis, principalmente o petróleo, se fez necessário que novas tecnologias fossem desenvolvidas. O petróleo e seus derivados como diesel, GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), lubrificantes, entre outros, alimentam o mercado de transportes no Brasil e no mundo. A exploração é feita de duas formas: “onshore” e “offshore”, que significam na costa e fora da costa, respectivamente. Porém, o foco é em exploração fora da costa, pois no Brasil, esta é feita em larga escala e representa a maior parte da produção nacional da indústria petrolífera.

Historicamente o mundo tem utilizado como a sua principal matriz energética o petróleo e seus derivados. No Brasil especificamente, a descoberta é datada da década de 30, coincidindo com o esgotamento do perfil agroexportador (Soares *et al.*, 2012). Atualmente, a produção de petróleo nacional se concentra basicamente no eixo do Sudeste, nas bacias de Campos, Santos e do Espírito Santo.

A exploração desse petróleo é feita em águas rasas, profundas e ultra profundas, essa última é classificada como pré-sal. O pré-sal é uma área de reservas petrolíferas encontrada sob uma profunda camada de rocha salina. A lâmina d’água do pré sal pode chegar até aproximadamente 2 km de profundidade. (Fatos e Dados, 2015).

Para exploração do petróleo em águas profundas e ultra profundas, pode-se utilizar os “risers” rígidos, que são tubos de aço formados por uma série de juntas soldadas e que são resistentes aos carregamentos impostos. (LEÃO *et al.*, 2014)

O foco desse estudo será modelar o efeito da divisão de cargas que um revestimento interno do tipo “clad”, feito a base de Inconel 625, no tubo de aço carbono de um “riser” rígido durante seu curvamento.

1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A fim de diminuir os custos de produção, neste trabalho é proposto um modelo de “riser” com um tipo de revestimento chamado de “clad”, que consiste em revestir internamente o interior do tubo com um material resistente a corrosão para minimizar os efeitos de corrosão interna que o “riser” rígido ficaria sujeito principalmente devido a presença de H_2S e de CO_2 no petróleo produzido.

O estudo feito visa estimar a divisão de momentos fletores entre o tubo de aço e o clad para diversos raios de curvatura impostos. Para fazer esta estimativa da divisão de cargas será proposto um modelo analítico implementado em um software, como o Mathcad.

1.3 OBJETIVO DO ESTUDO

Este estudo tem como objetivo avaliar e analisar a divisão dos carregamentos entre as duas partes de “risers” rígidos cladeados: o tubo de aço carbono e o clad. O estudo será direcionado para a avaliação da divisão de momentos fletores através da utilização de modelos analíticos e as simulações foram feitas no software Mathcad.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo aborda-se a evolução da indústria petrolífera e os dois tipos de exploração de petróleo. O foco será a exploração feita em águas profundas, onde a lâmina d'água chega a dois quilômetros de profundidade e se tornou um grande desafio devido a condições extremas de mar e aos esforços mecânicos que atuam no “riser”.

Essa exploração abrange todo o petróleo que se encontra na área do pré-sal, que foi descoberto como uma das maiores reservas de petróleo do Brasil, que segundo a PETROBRAS, no ano de 2018 a produção foi de 1,5 milhões de barril por dia. Também será discutido o processo de fabricação do “riser” rígido cladeado, que consiste em revestir internamente um tubo de aço com uma liga de níquel, visando em uma melhor alternativa econômica.

2.1 A INDÚSTRIA PETROLÍFERA

A dependência do petróleo ainda é uma realidade. Ela é responsável por gerar energia, alimentar e energizar máquinas e promover a locomoção de pessoas e materiais em todo o planeta. A exploração do petróleo se tornou recentemente a maior indústria do Brasil e, com ela vieram os desafios para a produção do óleo. No Brasil, predomina é a exploração do tipo *Offshore*, porém, também existe a produção *Onshore*, que é menos desenvolvida. (O PETRÓLEO, 2017)

A exploração *Offshore* (fora da costa ou feita em alto mar), se concentra a maior produção de petróleo mundial. O gráfico da Fig. 2.1 mostra os campos que já existem no Brasil nas diversas fases, segundo dados do IBP de 2016.

Blocos em exploração e campos em desenvolvimento e produção no Brasil (2016)

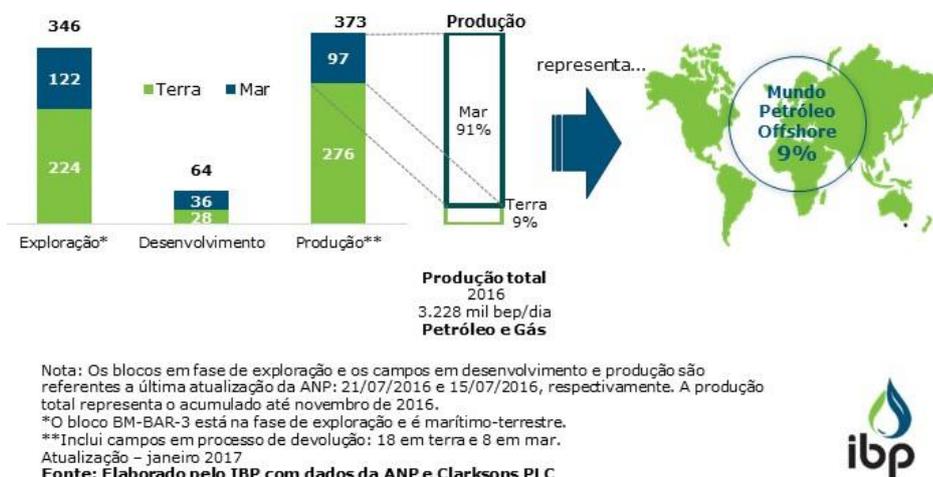


Figura 1- Blocos em exploração e campos em desenvolvimento e produção no Brasil (2016)

Fonte: Site IBP

A parte do gráfico que está marcada em verde, corresponde a atividades de exploração e produção *onshore*. Já a que está marcada em azul, mostra a porção de óleo e gás que é produzida *offshore*. Como é possível perceber, existem mais blocos de exploração e produção em terra do que em mar, porém a reserva em mar é muito maior e acaba correspondendo a 91% da produção nacional. O gráfico mostra também na coluna de blocos em desenvolvimento, que nos próximos anos, a produção continuará crescendo tanto em terra como em mar. A produção no ano de 2016 bateu a marca de 3.228 mil barris por dia de petróleo e gás.

A produção *Onshore*, ou mesmo em águas rasas, apresenta menos riscos operacionais e um custo inferior em relação a *Offshore*, devido a facilidade de instalação de uma plataforma. (O PETRÓLEO, 2017). No Brasil esse tipo de exploração se concentra de acordo com o gráfico da Fig.2., segundo dados do IBP.

Média de produção de petróleo dos poços *onshore* (barril por dia)

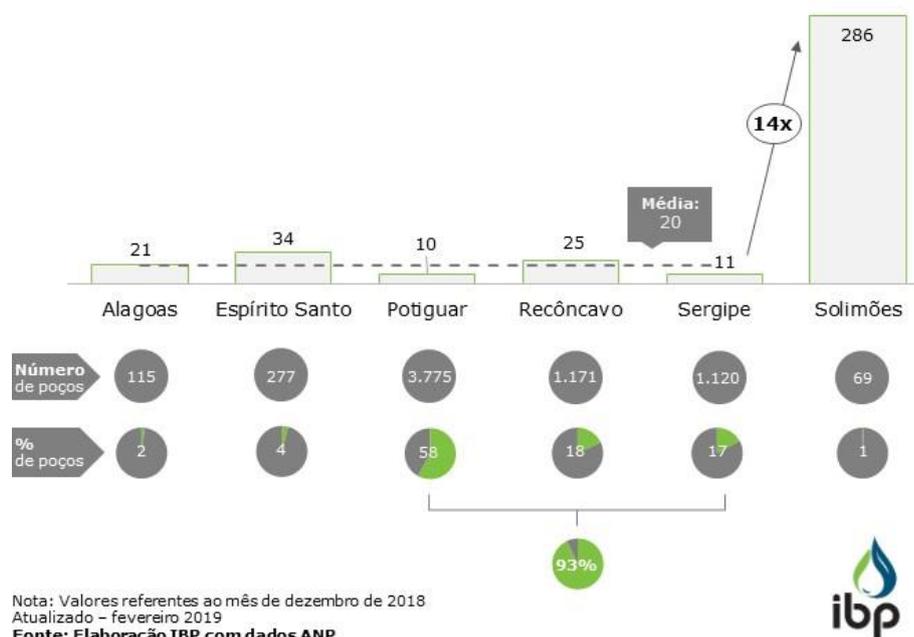


Figura 2- Média de produção de petróleo dos poços no Brasil

Fonte: Site IBP

Esse gráfico mostra que em dezembro de 2018, havia mais de 6.500 poços produzindo petróleo em terra no Brasil. Cada parte do gráfico corresponde a uma bacia. As bacias Potiguar, Recôncavo e Sergipe concentram 93% dos poços *onshore* enquanto a produção média da bacia do Solimões, a com menor nível de exploração, é 14 vezes maior que a média das demais bacias, que é de 20 barris por dia.

2.2 “RISERS”

Os “risers” são linhas que ligam a plataforma de exploração ao poço de óleo submarino. Essas estruturas ficam sujeitas às ações dinâmicas de ondas, as correntes marítimas e ao movimento da plataforma, ou seja, estão sujeitas a grandes esforços. (THOMAS, 2001).

Eles podem ser de dois tipos: flexíveis e rígidos. Os “risers” flexíveis são compostos por uma superposição de camadas plásticas e metálicas, responsáveis por resistir aos esforços solicitantes. Possuem “leveza”, flexibilidade e podem ser expostos as solicitações mecânicas sem que se rompam, porém, com o aumento da lâmina de água, tendem a ser inviáveis, técnica e economicamente.

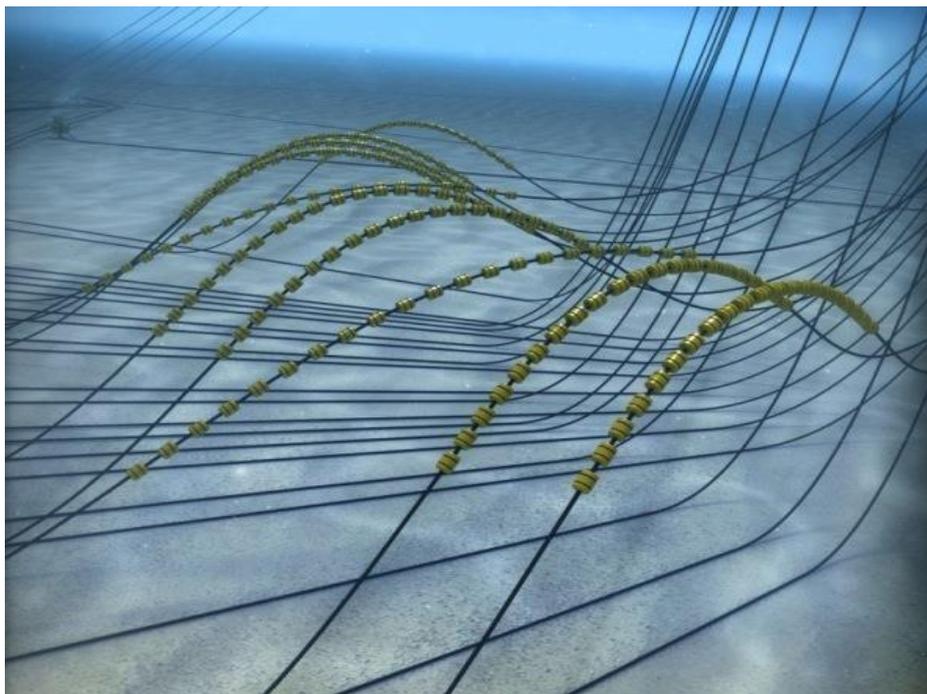


Figura 3- Configuração de um “riser” flexível

Fonte: Site IBP

Já os “risers” do tipo rígido são mais simples, consistindo de tubos de aço carbono soldados. (PRÉ SAL, 2019).

Embora o aço seja o material tradicionalmente empregado na produção de “risers” rígidos, em águas profundas e ultra profundas, os “risers” de aço tendem a atingir seus limites físicos, tornando-se dispendiosos. Isso porque, com o aumento da profundidade da lâmina d’água, o peso do “riser” sobrecarrega a plataforma e encarece o sistema como um todo, devido à necessidade de instalação de sistemas de flutuação maiores e mais eficazes. A utilização do cladeamento nesse tipo de “riser”, teria como a principal função de evitar o desgaste causado por corrosão, e assim retirar sobre-espessuras de corrosão do tubo de aço que poderia estar sobrecarregando desnecessariamente o sistema. Na Fig. 4, mostra-se um exemplo de utilização de “risers” rígidos.

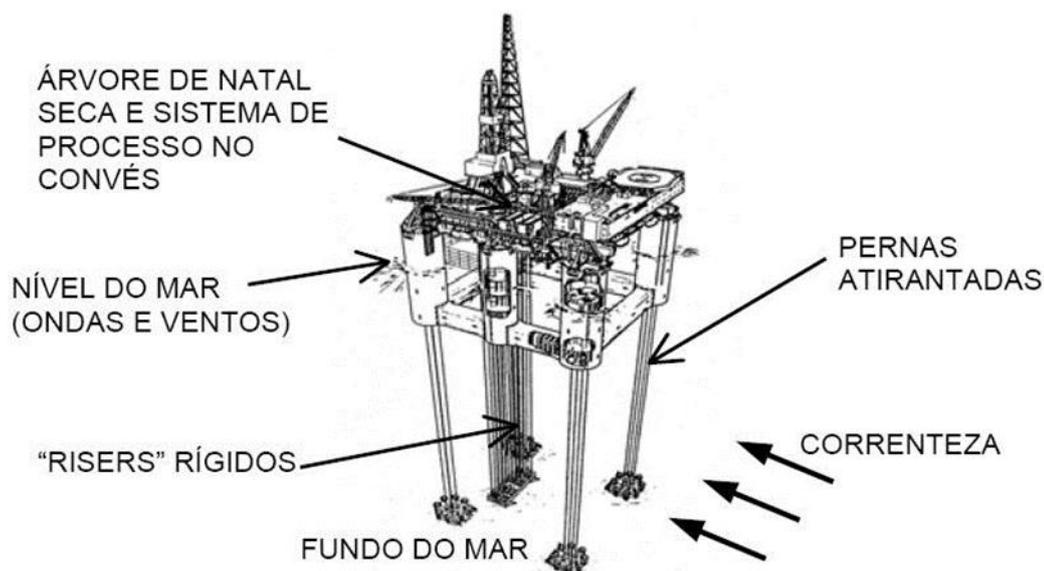


Figura 4- Configuração de um “riser” rígido

Fonte: Rodrigues, 2008

2.3 PRINCIPAL MECANISMO DE DANO EM EXPLORAÇÃO “OFFSHORE”

Com o crescimento do mercado petrolífero, torna-se necessário desenvolver tecnologias para fazer esse tipo de exploração. O ambiente marítimo é de grande risco operacional e muito agressivo, principalmente devido ao sal, que é um dos fatores que mais produzem corrosão.

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação física, química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos. Ela é, em geral, um processo espontâneo, e transforma os materiais metálicos de modo que a durabilidade e desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam.

A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o meio em que se encontra leva a alterações prejudiciais e indesejáveis, sofridas pelo material, tais como: desgaste, transformações químicas ou modificações estruturais, tornando o material inadequado para o uso. Grande parte das falhas de materiais na indústria “offshore” tem sido causada por esse mecanismo de dano.

A corrosão mais prejudicial a indústria petrolífera é a eletroquímica devido aos sais, os gases dissolvidos e micro-organismos, aliados a temperatura e pressão. Com a produção do óleo, quase sempre ele vem carregado com altas concentrações de H₂S e CO₂, que aumentam a acidez e a corrosão. (Mainier *et al.*, 2008).

2.4 MATERIAIS UTILIZADOS E PROPRIEDADES

Os materiais utilizados nesse estudo para a composição do “riser” cladeado é o aço API 5L X65 e a liga de níquel Inconel 625.

2.4.1 API 5L X65

O aço API 5L X65 faz parte especificação SPEC API 5L, que são tubos fabricados em aço carbono, com os padrões adequados para o transporte de gás, água e óleo da indústria petrolífera. Essa SPEC abrange tubos de aço sem costura e soldados. Inclui tubos de extremidade simples, com rosca e com extremidade de sino, também tubo com linha de fluxo (TFL) e tubo com extremidades para uso de acoplamentos especiais. A especificação API 5L classifica os tubos pelo limite de escoamento, sendo sucedido das letras A, B e X. Quando é utilizada a letra X, em maiúsculo, significa que o aço utilizado é de mais alta resistência.

Os requisitos para as notas API 5L X são rigorosos; as classes laminadas não são aceitáveis e o retrabalho não é permitido. Além disso, é dada especial atenção aos testes de tenacidade para serviços ácidos e classes de pressão e temperatura mais altas. (PM INTERNATIONAL SUPLIERS, 2019; JUNIOR *et. al.*, 2013).

A tabela 1 apresenta a composição do aço API 5L X65.

Tabela 1- Composição química do aço API 5L X65, conforme a PM International Suppliers

Grau	Elementos							
API 5L X65	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti
	0.16	0.45	1.65	0.020	0.010	0.09	0.05	0.06

2.4.2 Inconel 625

A liga de níquel de Inconel 625 é muito utilizada em ambientes com atmosfera salina por ser resistente a corrosão na água e a oxidação. Essas propriedades são adquiridas devido ao alto teor de elementos de liga em sua matriz. A adição de nióbio é responsável pela alta resistência e tenacidade e a adição de molibdênio é responsável por endurecer matriz da liga.

Também apresenta excelentes resultados em soluções aquosas de ácido sulfúrico, ácido clorídrico, ácido fluorídrico, ácido fosfórico, ácido nítrico, ácidos orgânicos e outras bases, sendo especialmente utilizado em ambientes com suscetível a corrosão por PIT ou alveolar. Essa liga é uma ótima escolha para aplicações em água salgada e operações sob alta pressão (VIDAL, 2014).

Tabela 2- Composição química da liga INCONEL 625, conforme a Special metals

Elementos	COMPOSIÇÃO Inconel 625
	% especificação SPECIAL METALS
Ni	58-mínimo
Cr	20- 23
Mo	8,0 - 10,0
Si	0,5 máximo
C	0,1 máximo
Fe	5,0 máximo
Nb	3,15 - 4,15
Mn	0,5 máximo
Oxigênio	Não especificado
Ti	0,4 máximo
Al	0,4 máximo

2.5 CLADEAMENTO

O processo de cladeamento é um método de revestimento usado para o controle de corrosão. O clad é feito com materiais que fornecem resistência ao meio corrosivo. Com apenas uma fina camada, entre 2 e 4 mm, é possível se obter resultados satisfatórios. Os materiais mais utilizados são o alumínio, o titânio e o níquel (GENTIL, 2012). Nesse estudo, utiliza-se como revestimento o Inconel 625 (Ni-Cr-Mo), feito à base de níquel.

Existem três processos de fabricação de “riser” cladeado (BUTTING, 2017) são eles: a explosão, a laminação e e preenchimento por solda.

A seguir descreve-se, de forma resumida, as etapas dos dois processos de cladeamento mais usados, à saber: por laminação e por explosão.

2.5.1. Cladeamento por Laminação

O processo de laminação consiste em laminar uma chapa de clad junto com uma chapa de aço, conforme a Fig.5.

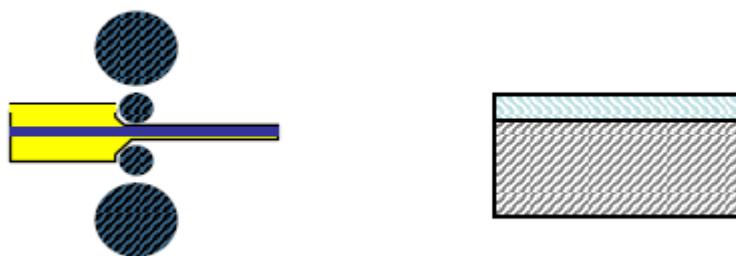


Figura 5- Processo de cladeamento feito por laminação

Fonte: Butting, 2017

As chapas de aço revestidas são curvadas em uma prensa, no chamado processo JCO, para a fabricação de um tubo de costura aberta.

O processo JCO, mostrado esquematicamente na Fig.6, é iniciado dobrando um lado da chapa de aço com as bordas inicialmente frisadas na forma de "J" por passes de dobra concêntricos. Depois, o outro lado é dobrado da mesma maneira e a chapa fica com o formato de um "C", e assim continua-se até o tubo estar em forma de "O" com uma costura aberta. (ZHIYUAN *et al.*, 2019)



Figura 6- Processo JCO de placas

Fonte: Butting, 2017

Nesse processo, os parâmetros são calculados de acordo com as propriedades do material e o tamanho do tubo alvo. A Fig. 7 mostra tubos após passarem pelo processo JCO.



Figura 7- Placas curvadas, a parte interior é de clad e a exterior feita de aço

Fonte: Butting, 2017.

A seguir, os tubos são soldados. Pode-se listar vários processos de soldagem que são usados para este fim:

Para o material de base:

- Soldagem a arco de plasma (PAW)
- Soldagem TIG com gás inerte (GTAW)
- Soldagem de arco submerso (SAW)
- Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa (GMAW)- MIG/MAG

Para o clad:

- Soldagem TIG com gás inerte (GTAW)
- Soldagem a arco transferido por plasma (PTA)
- Soldagem por arco submerso (SAW)
- Soldagem por eletroescória (ESW)
- Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa (GMAW)- MIG/MAG

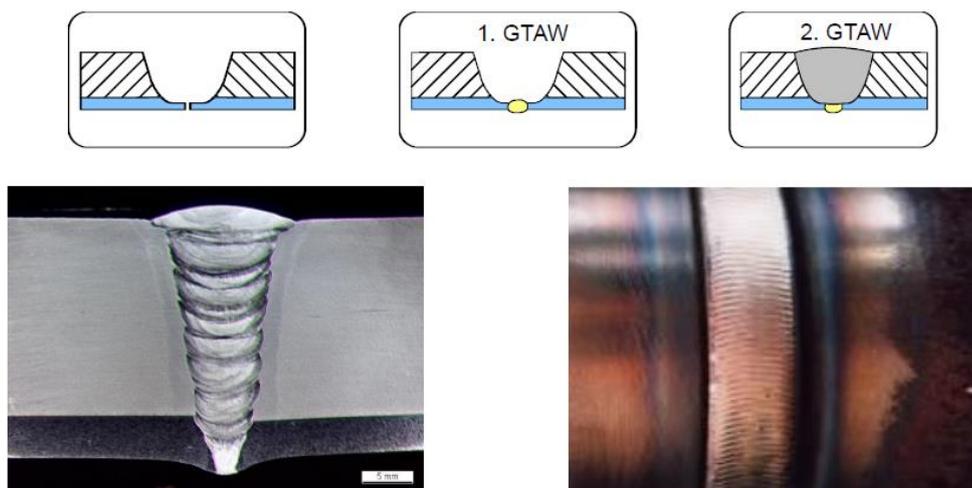


Figura 8- Soldagem de um chapa cladeada pelo processo GTAW

Fonte: Butting, 2017

Após a soldagem, é possível realizar um tratamento térmico nos tubos, dependendo do uso pretendido. Os procedimentos típicos de aquecimento para tubos revestidos metalurgicamente são: alívio de tensão, recozimento e tempera-revenido.

2.5.2. Cladeamento Por Explosão

O processo por explosão pode ser feito de duas formas: explosão da chapa ou explosão de um tubo já pronto. A explosão consiste na detonação de uma carga explosiva que provoca uma onda de choque cuja energia transmitida pela água deforma plasticamente a chapa ou o tubo, resultando na união dos dois materiais.

A Fig. 9, mostra, esquematicamente, o processo de explosão de uma chapa em outra de materiais diferentes.

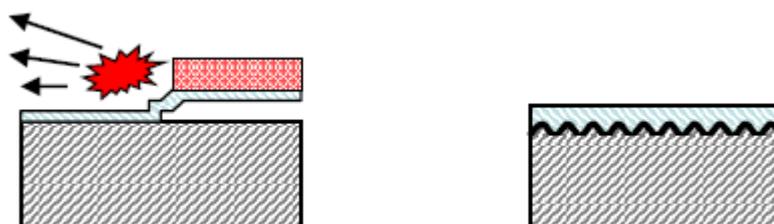


Figura 9- Processo de explosão de chapas

Fonte: Butting, 2017

Depois da explosão, a chapa é curvada pelo processo de JCO explicado anteriormente e soldada, por exemplo, conforme mostrado na Fig. 10. O outro processo por explosão, é a dos tubos já pré-fabricados, sendo eles um tubo de clad, onde a espessura é fina e um tubo de aço carbono, de maior espessura. O processo de explosão se inicia colocando o tubo de clad dentro do tubo de aço e, através de pressão hidrostática, o tubo de clad adere a parede interna do tubo de aço. Devido à maior resiliência elástica do tubo externo, o tubo interno é colocado em um estado de tensão residual compressiva, resultando é um sólido ancoramento mecânico. (BUTTING, 2017). A Fig. 10, mostra, esquematicamente, o processo de cladeamento explosão de tubos imersos em água.

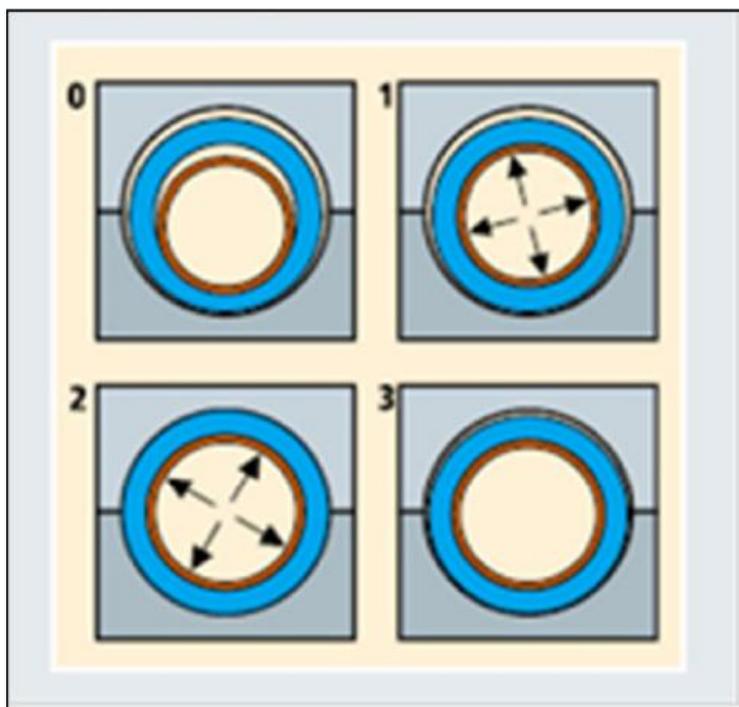


Figura 10- Processo de cladeamento por explosão dentro de tubos imersos em água

Fonte: Butting, 2017

2.6 SEQUÊNCIA DE FABRICAÇÃO/UTILIZAÇÃO

Para tornar mais claro as etapas do processo de cladeamento dividi-se estes em: preparação chapa base/clad, formação do tubo cladeado e operação do tubo cladeado propriamente dito.

Na etapa de preparação chapa base/clad da Fig. 11, a chapa de clad pode

ser “ancorada” na chapa de aço através de explosão ou de laminação. Esta etapa provoca, provavelmente, tensões residuais compressivas nas superfícies livres. A seguir, na etapa de formação do tubo cladeado, a chapa cladeada é submetida a um processo de curvamento em torno do seu eixo longitudinal, com a utilização de um processo de curvamento como o JCO.

Nesta etapa uma nova distribuição de tensões residuais é formada, que se superpõe as tensões residuais geradas na etapa anterior, e tem tensões residuais tanto trativas quanto compressivas. A seguir na etapa de operação o tubo cladeado pode ser curvado durante a sua instalação ou operação, em torno de um eixo transversal, o que pode gerar tensões residuais também. Note que a distribuição de tensões residuais nesta última etapa é perpendicular a distribuição de tensões residuais geradas na etapa anterior. A Fig.11, portanto, mostra a distribuição qualitativa das tensões residuais de cada etapa.

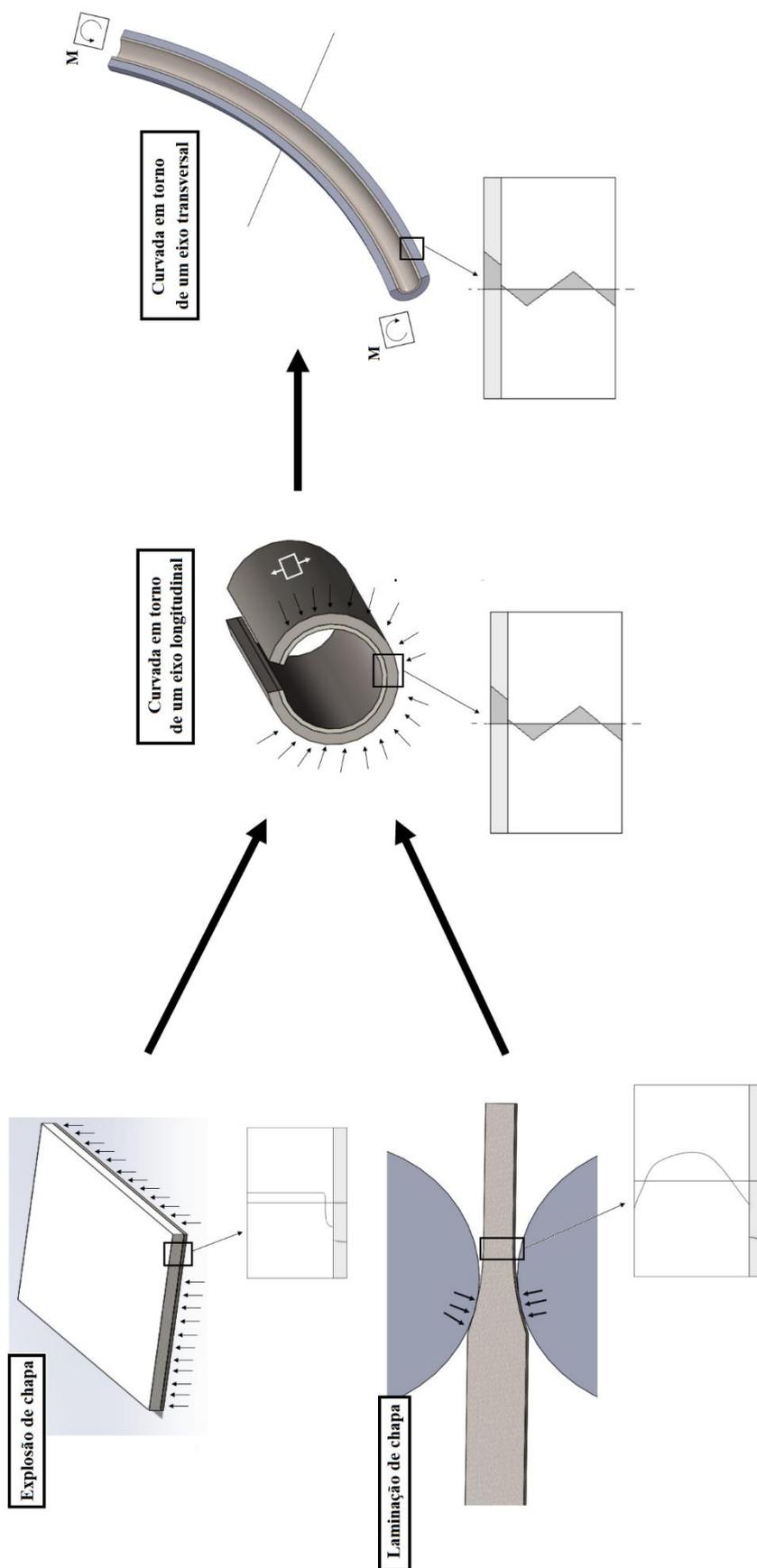


Figura 11- Processo de cladeamento por laminação ou explosão e formação em conjunto do tubo

Na etapa de preparação chapa base/clad da Fig. 12, tanto a chapa do clad quanto a chapa de aço são submetidas, cada qual, a um processo de curvamento em torno do seu eixo longitudinal, com a utilização de um processo de curvamento, como por exemplo processo JCO. Nesta etapa uma distribuição de tensões residuais é formada. A seguir, na etapa de formação do tubo cladeado, a chapa do clad é submetida a um processo explosão para “ancorar” no tubo de aço. Nesta etapa uma nova distribuição de tensões residuais é formada, que se superpõe as tensões residuais geradas na etapa anterior.

A seguir na etapa de operação o tubo cladeado pode ser curvado durante a sua instalação ou operação, em torno de um eixo transversal, o que pode gerar tensões residuais também. Note que a distribuição de tensões residuais nesta última etapa é perpendicular a distribuição de tensões residuais geradas na etapa anterior.

Note, ainda, que tanto na Fig. 11 quanto na Fig. 12, o gráfico, qualitativo, da distribuição das tensões residuais sofre um salto na região do clad. Isto pode ser explicado pela diferença dos módulos de elasticidade dos dois materiais (clad e aço).

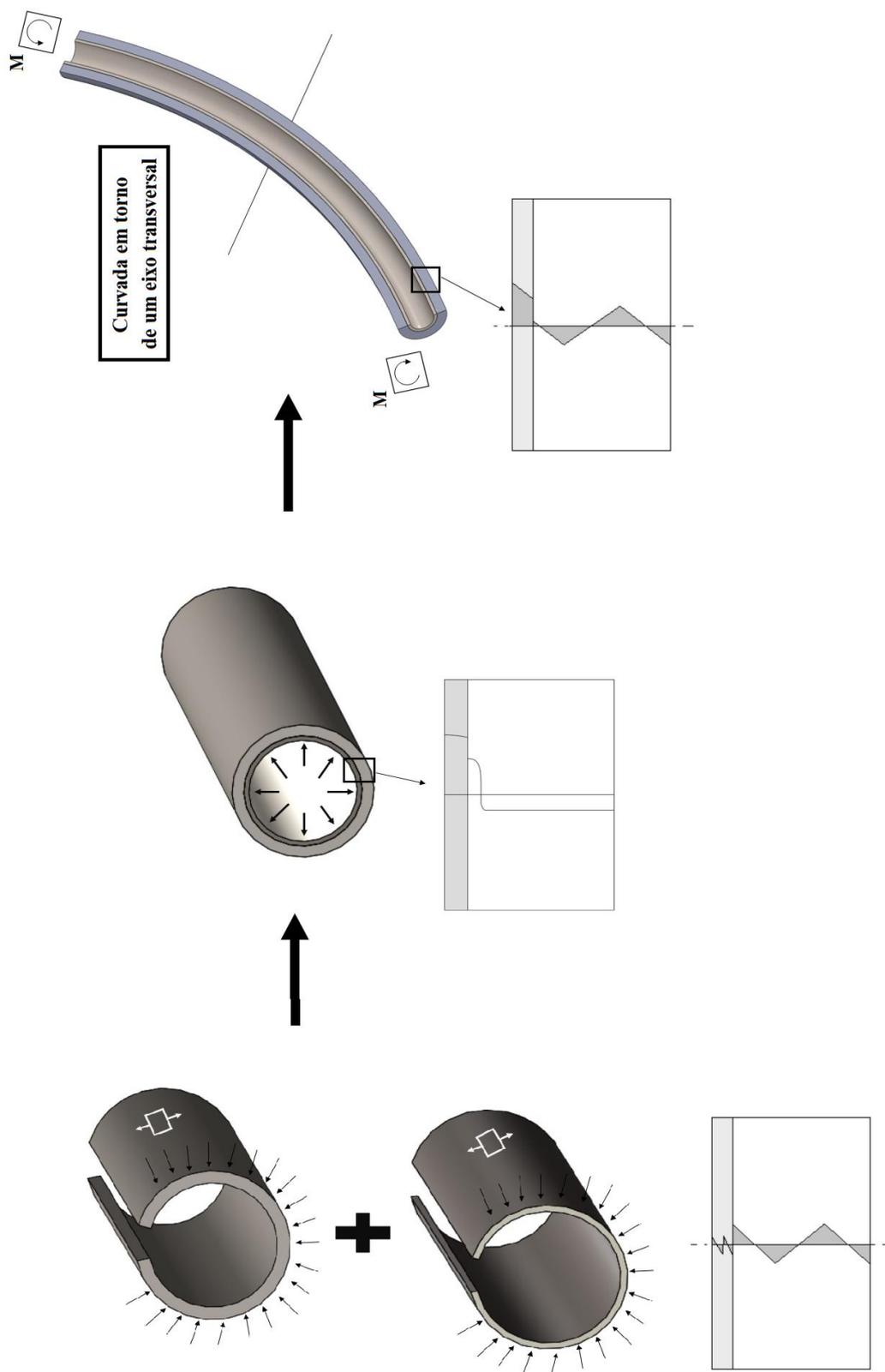


Figura 12- Processo de formação do tubo em separado e cladeamento por explosão

Neste trabalho analisa-se o “riser” rígido revestido com clad. A intenção é de diminuir os custos de produção com a utilização de um revestimento interno do tipo clad, que neste caso é feito com uma chapa de Inconel 625 a fim de evitar a corrosão do tubo de aço; e assim satisfazer os mais elevados requisitos de durabilidade, resistência à corrosão e economicidade. A sua utilização é recomendada em todas as áreas onde predominem tensões dinâmicas, altas pressões e elevada corrosividade dos meios transportados. Ao utilizar-se materiais cladeados, combinam-se a excelente resistência mecânica e a tenacidade dos aços carbono-manganês com a alta resistência à corrosão dos materiais tipo Inconel 625.

3 MODELO ANALÍTICO

Nesse capítulo, é proposto um modelo analítico, e para estimativa da divisão de momentos fletores na qual o “riser” cladeado é submetido. Serão abordadas as deformações elástica e plástica tanto para o Inconel 625 quanto para o aço API 5L X65 para a fase de operação do tubo cladeado.

3.1 MODELO CONSTITUTIVO

Para o modelo constitutivo proposto, será admitido que ambos os materiais sejam modelados como elasto-plástico bilinear. O módulo de Young ou módulo de elasticidade E é definido como um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido. Ele é usado até o limite de proporcionalidade, no regime elástico, e o módulo tangente elastoplástico para modelar o comportamento de endurecimento do material após o escoamento inicial. O módulo tangente elastoplástico, E_t é definido como (SIMO *et al.*, 1998):

$$E_t = \frac{EK}{E+K} \quad (1)$$

$$K = \frac{S_{ut}-S_y}{\varepsilon_{ut}} \quad (2)$$

Onde, S_y é a resistência ao escoamento, S_{ut} é a tensão última e ε_{ut} é a deformação última. A Fig. 13 mostra, esquematicamente, o modelo bilinear para ambos os materiais: o Inconel 625 e o aço API 5L X65.

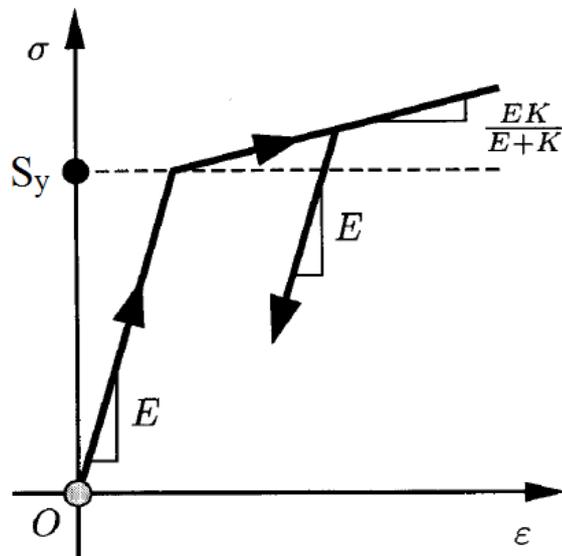


Figura 13- Gráfico de Tensão x Deformação com comportamento bilinear

Fonte: Simo et al.,1998

A curva de tensão x deformação do tubo de API 5L X65 é suposta ter um comportamento bi-linear, como mostra, esquematicamente, a Fig.14. Esse modelo foi feito no MathCad. A deformação varia de 0 a ϵ_{ut} :

$$\epsilon_1 = 0, \frac{\epsilon_{ut_tubo}}{100} \dots \epsilon_{ut_tubo} \quad (3)$$

A tensão varia, em função da deformação, com duas fases: a elástica e a plástica:

$$\sigma_tubo(\epsilon_1) = \begin{cases} \left(\frac{S_{y_tubo}}{\epsilon_{y_tubo}} \right) \epsilon_1, & \text{se } \epsilon_1 \leq \epsilon_{y_tubo} \\ [S_{y_tubo} + E_{t_tubo}(\epsilon_1 - \epsilon_{y_tubo})], & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4)$$

A Fig. 14 mostra a aplicação das expressões (3) e (4).

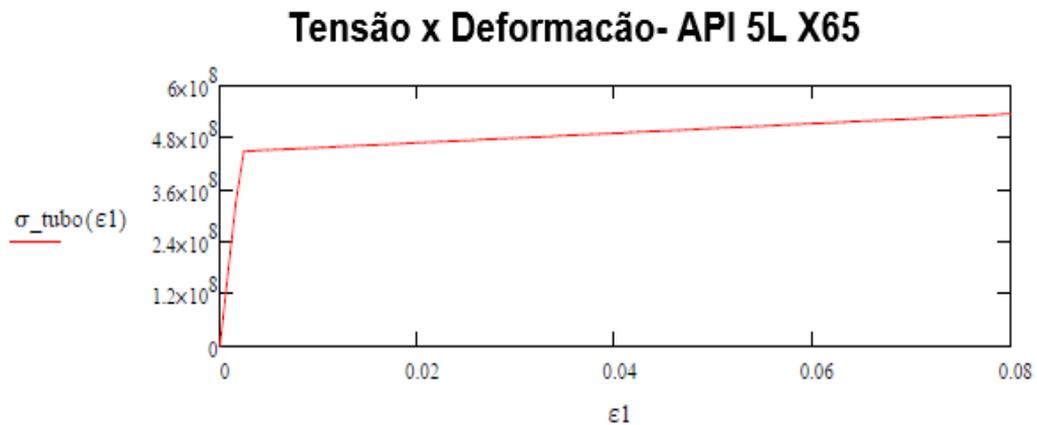


Figura 14- Gráfico do modelo constitutivo bi-linear do aço API 5L X65

De forma semelhante, para o material Inconel 625, com o modelo também implementado no MathCad.

A deformação varia de 0 a ε_{ut} :

$$\varepsilon_2 = 0, \frac{\varepsilon_{ut_clad}}{100} \dots \varepsilon_{ut_clad} \quad (5)$$

A tensão varia, em função da deformação, com duas fases: a elástica e a plástica:

$$\sigma_{clad}(\varepsilon_2) = \begin{cases} \left(\frac{S_{y_clad}}{\varepsilon_{y_clad}} \right) \varepsilon_2, & \text{se } \varepsilon_2 \leq \varepsilon_{y_clad} \\ \left[S_{y_clad} + E_{t_clad} (\varepsilon_2 - \varepsilon_{y_clad}) \right], & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6)$$

A Fig. 15 mostra a aplicação das expressões (5) e (6).

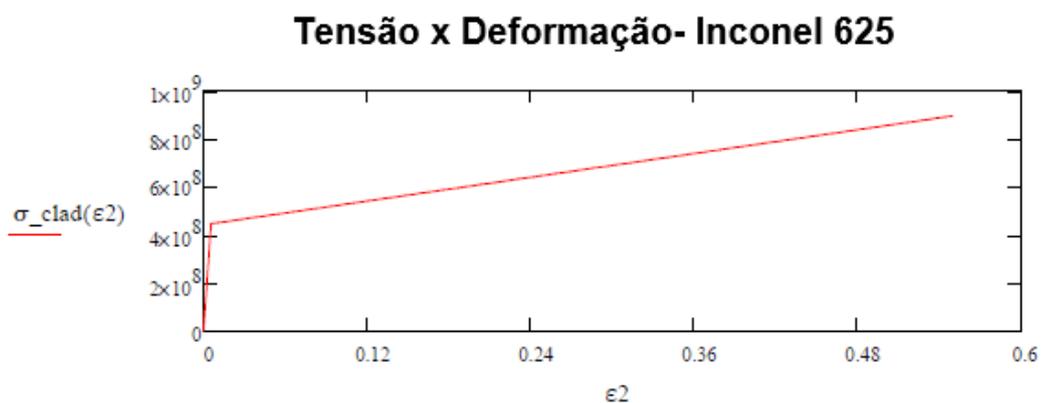


Figura 15- Gráfico do modelo constitutivo bi-linear do Inconel 625

3.2 EQUILÍBRIO

É suposto que o curvamento seja imposto por momento de flexão pura, M , aplicado no tubo de clad e no tubo de aço seja:

$$M = \int_A y \cdot \sigma \cdot dA \quad (7)$$

Onde y é a distância perpendicular entre o eixo neutro e um ponto da seção transversal, σ é a tensão normal e A é área da seção transversal.

3.2.1. Divisão do Momento Fletor- Tensão Elástica

Para momentos de flexão menores que M_y , o maior momento elástico em flexão, pode-se estimar a divisão do momento fletor entre os dois tubos (de clad e de aço). O momento total M é dividido entre o tubo de aço, M_t e o tubo de clad, M_c . É suposto que ambos os tubos sejam submetidos a mesma inclinação, em uma configuração paralela:

$$M = M_t + M_c \text{ e } M < M_y = \frac{S_y I}{R_{e_tubo}} \quad (8)$$

Onde R_{e_tubo} é o raio externo do tubo de aço e I o momento de inércia de área equivalente. A divisão do momento fletor pode ser feita da seguinte forma:

$$M_t = \frac{k_t}{k_t + k_c} M, \text{ para o tubo de aço API 5L X65} \quad (9)$$

$$M_c = \frac{k_c}{k_t + k_c} M, \text{ para o clad de Inconel 625} \quad (10)$$

Onde, k é a constante elástica.

$$k_t = \frac{E_{tubo} I_{tubo}}{L_{tubo}} \text{ e } k_c = \frac{E_{clad} I_{clad}}{L_{clad}} \quad (11)$$

O momento de inércia é:

$$I_t = \frac{\pi}{4} (R_{e_tubo}^4 - R_{i_tubo}^4) \text{ e } I_c = \frac{\pi}{4} (R_{e_clad}^4 - R_{i_clad}^4) \quad (12)$$

Note que $R_{i_tubo} = R_{e_clad}$.

3.2.2. Divisão do Momento Fletor- Tensão Elastoplástica

Para momentos fletores maiores que M_y é necessário usar um modelo um pouco mais complexo.

Para,

$$M = M_t + M_c \text{ e } M \geq M_y = \frac{S_y I}{R_{e_tubo}} \quad (13)$$

O modelo constitutivo usado neste modelo (vide a Fig. 13) é expresso por:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon < \varepsilon_y \\ S_y + E_t \cdot (\varepsilon - \varepsilon_y), & \varepsilon \geq \varepsilon_y \end{cases} \quad (14)$$

Uma vez que o momento de flexão é imposto pelo raio de curvatura do carretel, ρ , pode ser reescrito da seguinte forma:

$$\sigma(\rho) = \begin{cases} E \frac{y}{\rho}, & \rho < \rho_y \\ S_y + E_t \cdot (\frac{y}{\rho} - \varepsilon_y), & \rho \geq \rho_y \end{cases} \quad (15)$$

O raio mínimo de curvatura do tubo que a seção transversal permanece totalmente elástica ρ_y é:

$$\rho_y = \frac{EI}{M_y} \quad (16)$$

Onde o valor de M_y é definido por $M_y = \frac{S_y I}{R_{e_tubo}}$. A distribuição da deformação permanece linear mesmo após o início da seção transversal.

O cálculo da fronteira elastoplástica $y_y(\rho)$ é dada por:

$$y_y(\rho) = \varepsilon_y \cdot \rho \quad (17)$$

Onde ε_y é a tensão de escoamento e $y_y(\rho)$ é a fronteira elastoplástica da

seção transversal. Quando $\rho = \rho_y$ e $y_y(\rho_y) = R_e$, então:

$$R_e = \varepsilon_y \cdot \rho_y \quad (18)$$

Relacionando (17) e (18), temos:

$$y_y(\rho) = \frac{\rho}{\rho_y} \cdot R_e \quad (19)$$

Note, que para as equações (18) e (19) o raio externo serve tanto para o tubo de clad quanto para o tubo aço.

A equação (19), mostra como a distância da fronteira elastoplástica $y_y(\rho)$ varia em função do raio de curvatura aplicado, ρ .

O tubo foi dividido em regiões e estas foram analisadas separadamente. Uma vez que o material é submetido apenas à flexão pura, sua linha neutra permanece localizada no centróide da seção transversal. Isso torna as tensões simétricas em relação ao eixo neutro. Esse modelo é proposto para os tubos de ambos os materiais.

Para implementar as equações finais de divisão de momentos entre o tubo de clad e o tubo de aço para $M > M_y$ é necessário quantificar as diferentes áreas, devidamente identificadas. Por exemplo, a região *a* é cheia (como se fosse um tarrugo e não um tubo) e a região *b* é vazada reproduzindo a área da seção transversal de uma faixa de tubo.

A descrição do momento fletor na região *a* considera uma área, conforme mostrado na Fig. 16, na qual pode-se escrever x em função do raio externo e y . O diferencial da área dA_a é:

$$dA_a = 2 \cdot dy \sqrt{R_e^2 - y^2}. \quad (20)$$

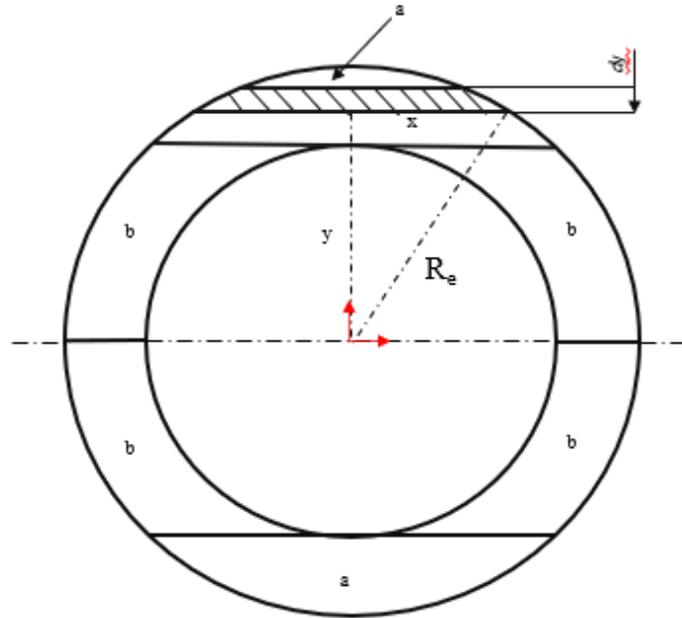


Figura 16- Descrição de dA_a

O momento fletor para a região a é:

$$M_a(\rho) = 2 \cdot \int_{R_i}^{R_e} y \left(S_{y_tubo} + E_t \left(\frac{y}{\rho} - \varepsilon_{y_tubo} \right) \right) dA_a \quad (21)$$

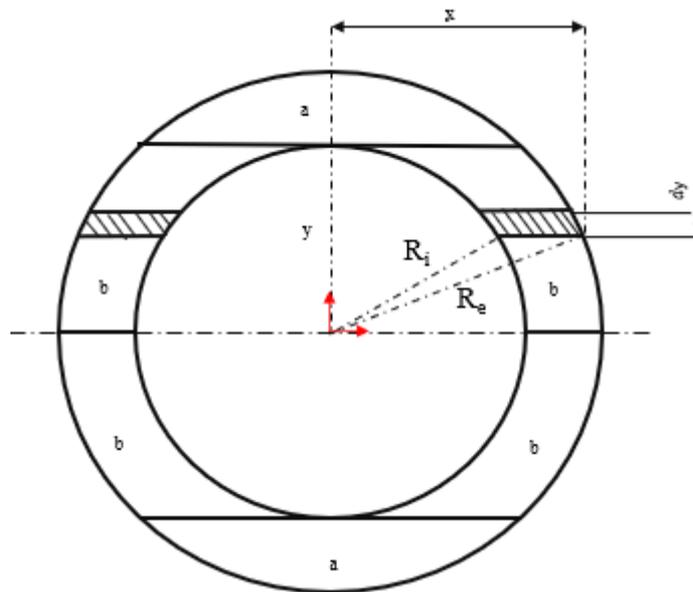


Figura 17- Descrição de dA_b

O elemento diferencial de área de dA_b é definido por:

$$dA_b = 2 \left[\sqrt{(R_{e_tubo})^2 - y^2} - \sqrt{(R_{i_tubo})^2 - y^2} \right] dy \quad (22)$$

O momento fletor para a região b pode ser definido através do primeiro termo da soma, que é relacionado a parte elástica e do segundo termo, que é relacionado a parte plástica.

$$M_b(\rho) = 2 \cdot \left[\int_0^{y_y(\rho)} y \left(\frac{y}{y_{y_tubo}} \right) S_{y_tubo} \cdot dA_b + \int_{y_y(\rho)}^{R_{i,t}} y \left(S_{y_tubo} + E_{t_tubo} \left(\frac{y}{\rho} - \varepsilon_{y_tubo} \right) \right) \cdot dA_b \right] \quad (23)$$

1º Observação: As equações (21) e (23) foram desenvolvidas para o tubo de aço, também valem para o tubo de clad apenas substituindo as variáveis correspondentes (onde tem o índice $_{tubo}$ substituir pelo índice $_{clad}$), além de adaptar os raios internos e externos respectivamente.

2º Observação: As expressões para a seção transversal elástica (maior valor de momento que a seção transversal permanece elástica) e as expressões para as seções totalmente plastificadas, são mostradas na sequência. As equações (24) e (25) para o tubo de aço e as equações (26) e (27) para o tubo de clad:

$$M_{t_elastico} = 2 \cdot \left[\int_0^{R_{i,tubo}} y \cdot \left(\frac{y}{R_{e,tubo}} \cdot S_{y_tubo} \right) \cdot 2 \left[\sqrt{(R_{e,tubo})^2 - y^2} - \sqrt{(R_{i,tubo})^2 - y^2} \right] + \int_{R_{i,tubo}}^{R_{e,tubo}} y \cdot \left(\frac{y}{R_{e,tubo}} \cdot S_{y_tubo} \right) \cdot 2 \left[\sqrt{(R_{e,tubo})^2 - y^2} \right] dy \right] \quad (24)$$

$$M_{t_plastico} = 2 \cdot \left[\int_0^{R_{i,tubo}} y \cdot (S_{y_tubo} + E_{t_tubo} \cdot y) \cdot 2 \left[\sqrt{(R_{e,tubo})^2 - y^2} - \sqrt{(R_{i,tubo})^2 - y^2} \right] dy + \int_{R_{i,tubo}}^{R_{e,tubo}} y \cdot (S_{y_tubo} + E_{t_tubo} \cdot y) \cdot 2 \left[\sqrt{(R_{e,tubo})^2 - y^2} \right] dy \right] \quad (25)$$

$$M_{c_elastico} = 2 \cdot \left[\int_0^{R_{i,clad}} y \cdot \left(\frac{y}{R_{e,clad}} \cdot S_{y_clad} \right) \cdot 2 \left[\sqrt{(R_{e,clad})^2 - y^2} - \sqrt{(R_{i,clad})^2 - y^2} \right] + \int_{R_{i,clad}}^{R_{e,clad}} y \cdot \left(\frac{y}{R_{e,clad}} \cdot S_{y_clad} \right) \cdot 2 \left[\sqrt{(R_{e,clad})^2 - y^2} \right] dy \right] \quad (26)$$

$$M_{c_plastico} = 2 \cdot \left[\int_0^{R_{i_clad}} y \cdot (S_{y_clad} + E_{t_clad} \cdot y) \cdot 2 \left[\sqrt{(R_{e_clad})^2 - y^2} - \sqrt{(R_{i_clad})^2 - y^2} \right] dy + \int_{R_{i_clad}}^{R_{e_clad}} y \cdot (S_{y_clad} + E_{t_clad} \cdot y) \cdot 2 \left[\sqrt{(R_{e_clad})^2 - y^2} \right] dy \right] \quad (27)$$

Uma aplicação para o modelo analítico proposto seria o cálculo da divisão de momentos entre o clad e o tubo de aço, quando transportado em um carretel. De fato, o “riser” rígido é transportado até as plataformas em alto mar pelo “Pipelay Vessel”, que é um tipo de embarcação responsável, principalmente, pelo lançamento e instalação de linhas e equipamentos necessários junto aos poços de petróleo.

Essa embarcação possui um carretel onde o “riser” rígido é enrolado para o transporte. (PEREIRA e SILVA, 2013). A Fig. 18 mostra um exemplo de Pipelay Vessel, e é possível ver também o carretel ao centro do navio.



Figura 18- Pipelay Vessel

Fonte: PEREIRA e SILVA, 2013.

No próximo capítulo será feita uma aplicação do modelo proposto para o caso de enrolamento do “riser” rígido em um carretel.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, apresenta-se uma aplicação do modelo analítico para estimativa da divisão de momentos fletores entre o tubo de clad e o tubo de aço para “risers” rígidos enrolados em carretel.

4.1 GEOMETRIA DO “RISER” CLADEADO

As diversas variáveis geométricas da seção transversal do “riser” cladeado são apresentadas a seguir.

4.1.1 Dimensões do Tubo Cladeado

Essa análise é feita para um trecho de “riser” rígido cladeado com comprimento de 12 metros, de 6 polegadas diâmetro e espessura de clad de 0,1 polegadas. A Fig. 19 mostra os as dimensões do tubo cladeado.

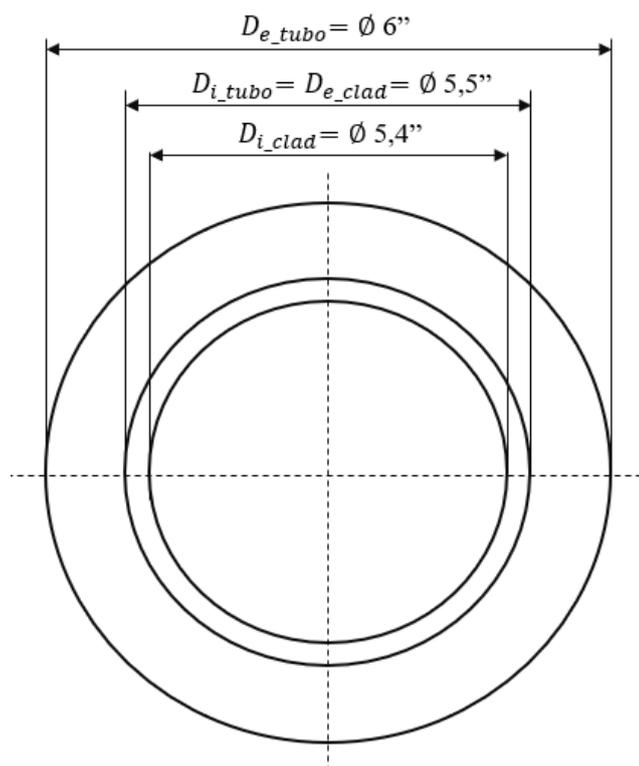


Figura 19- Dimensões do “riser” rígido cladeado

$$R_{e_tubo} = \left(\frac{Diam_{ext}}{2} \right) \cdot 25,4 \cdot 10^{-3} = 0,076 \text{ m}$$

$$R_{i_tubo} = R_{e_clad} = \left(\frac{Diam_{ext} - 0,5}{2} \right) \cdot 25,4 \cdot 10^{-3} = 0,07 \text{ m}$$

$$R_{i_clad} = \left(\frac{Diam_{ext} - 0,5 - esp_{clad}}{2} \right) \cdot 25,4 \cdot 10^{-3} = 0,069 \text{ m}$$

4.1.2 Momento de Inércia

A fórmula do momento de inércia para tubos foi definida em (12).

Aplicando-se as dimensões geométricas, tem-se: $I_{tubo} = 7,783 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$ e o do clad é $I_{clad} = 1,323 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$.

4.2 Propriedades Mecânicas

As Tabelas de 3 a 5 mostram as propriedades mecânicas do API 5L X65 e do Inconel 625.

Tabela 3- Propriedades mecânicas do API 5LX65

Propriedades API 5L X65	
Massa Específica	7850 kg/m ³
Módulo de Young	207 GPa
Limite de escoamento	448 MPa
Tensão Última	537 MPa
Coefficiente de Poisson	0,3

Fonte: Rody et al., 2014

Tabela 4- Propriedades do Inconel 625

Propriedades Inconel ® 625	
Massa específica	8440 kg/m ³
Módulo de Young	204,8 GPa
Limite de escoamento	442 MPa
Tensão Última	896 MPa
Coefficiente de Poisson	0,3

Fonte: Rody et al., 2014

Tabela 5- Propriedades de deformação e de rigidez

	Tubo de aço	Clad
Deformação de ruptura	0,08	0,55
Deformação de escoamento	$2,164 \cdot 10^{-3}$	$2,158 \cdot 10^{-3}$
Rigidez	$1,113 \cdot 10^9$ N/m	$8,255 \cdot 10^8$ N/m
Módulo tangente	$1,107 \cdot 10^9$ Pa	$8,221 \cdot 10^8$ Pa

4.3 CARREGAMENTO ELÁSTICO

As expressões do capítulo 3 foram implementadas através da utilização do software Mathcad. Foi calculado valores do momento máximo de flexão elástico (M_y), do raio de curvatura correspondente (ρ_y) e da máxima fronteira elastoplástica ($y_{y_elas_max}$); tanto para o clad quanto para o tubo de aço.

Para o momento máximo de flexão elástica M_y , utiliza-se a equação (8), para encontrar o valor de $4,576 \cdot 10^4$ N.m para o tubo e $8,372 \cdot 10^3$ N.m para o clad.

Para o cálculo de ρ_y foi utilizada a equação (16), onde foi encontrado 35,208 m para o tubo de aço e 32,365 m para o clad.

Para o cálculo de $y_{y_elas_max}$, foi utilizada a equação (17), onde ρ foi substituído pelo ρ_y encontrado anteriormente.

4.4 DIVISÃO DE MOMENTO

Neste item, foi calculado o valor de momento em que o tubo de aço e o clad começam a plastificar e o momento em que estão totalmente plastificados. Também, foi calculado a parcela de momento que vai para cada parte (tubo de aço e clad).

4.4.1 Momento no Tubo de API 5L X65

O cálculo do momento na qual começa a plastificar a seção transversal do tubo de aço foi utilizada a equação (24), com resultado de $4,576 \cdot 10^4$ N.m. Já para verificar o momento que plastifica a seção inteira do tubo de aço, foi utilizada a equação (25), com resultado de $7,199 \cdot 10^4$ N.m.

Foi feita uma análise que mostra o valor de momento que vai para o tubo

impondo raios de curvamento entre 36 m e 1 m, de metro em metro. Para isso, foi utilizada a equação (23). O momento no tubo, quando impostos diferentes raios de curvatura, é representado em preto na Fig.20. Os limites desta curva são: o momento elástico, representado na Fig. 20 como a linha em azul (linha contínua), obtido através da equação (24), o momento plástico, representado nesta mesma figura como uma linha em vermelho (linha tracejada) foi obtido através da equação (25).

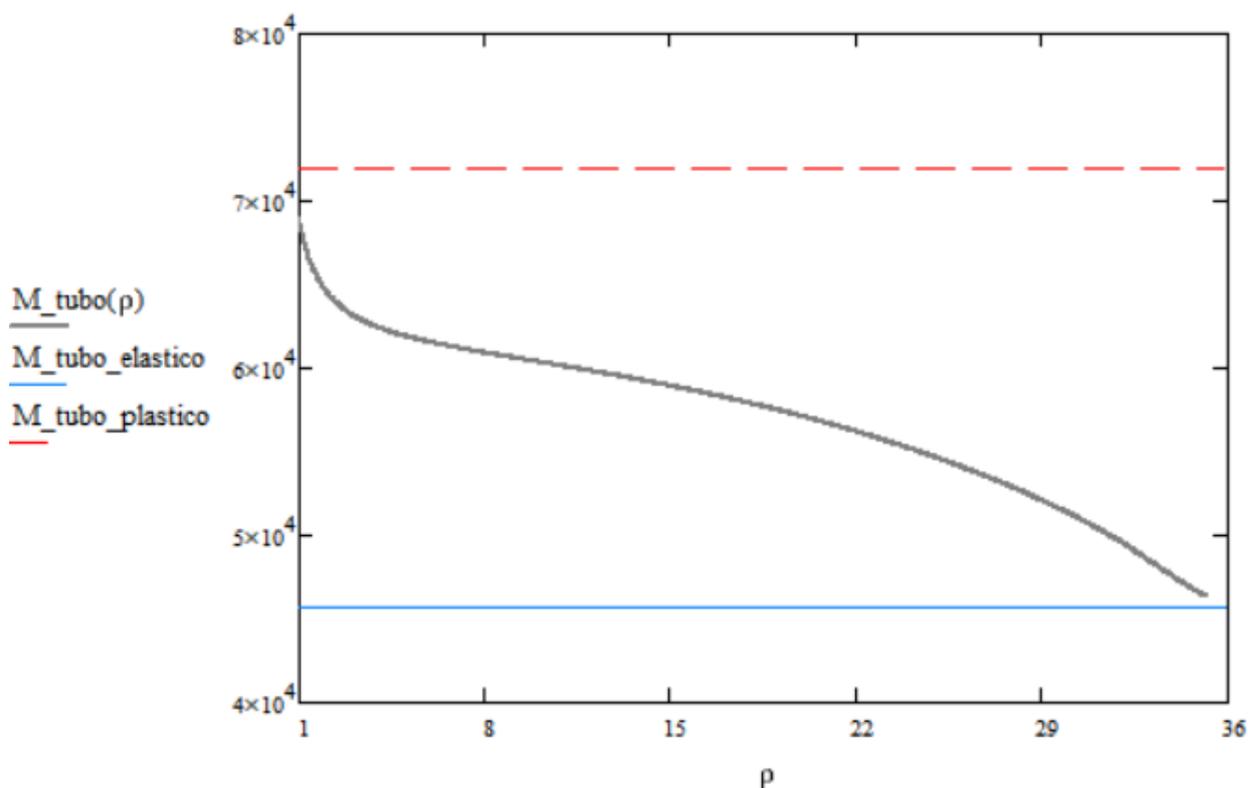


Figura 20- Quantidade de momento do tubo

4.4.2. Momentos do Clad de Inconel 625

O cálculo do momento na qual começa a plastificar a seção transversal do clad foi utilizada a equação (26), com resultado de $8,372 \cdot 10^3$ N.m. Já para verificar o momento que plastifica a seção inteira do clad, foi utilizada a equação (27), com resultado de $1,215 \cdot 10^4$ N.m.

Foi feita uma análise que mostra o valor de momento que vai para o tubo impondo raios de curvamento entre 36 m e 1 m, de metro em metro. Para isso, foi utilizada a equação (23) adaptada para clad. O momento no clad, quando impostos diferentes raios de curvatura, é representado em preto na Fig.21. Os limites desta curva são: o momento elástico, representado na Fig. 21 como na cor azul (linha

contínua), obtido através da equação (26), o momento plástico, representado nesta mesma figura na cor vermelho (linha tracejada) foi obtido através da equação (27).

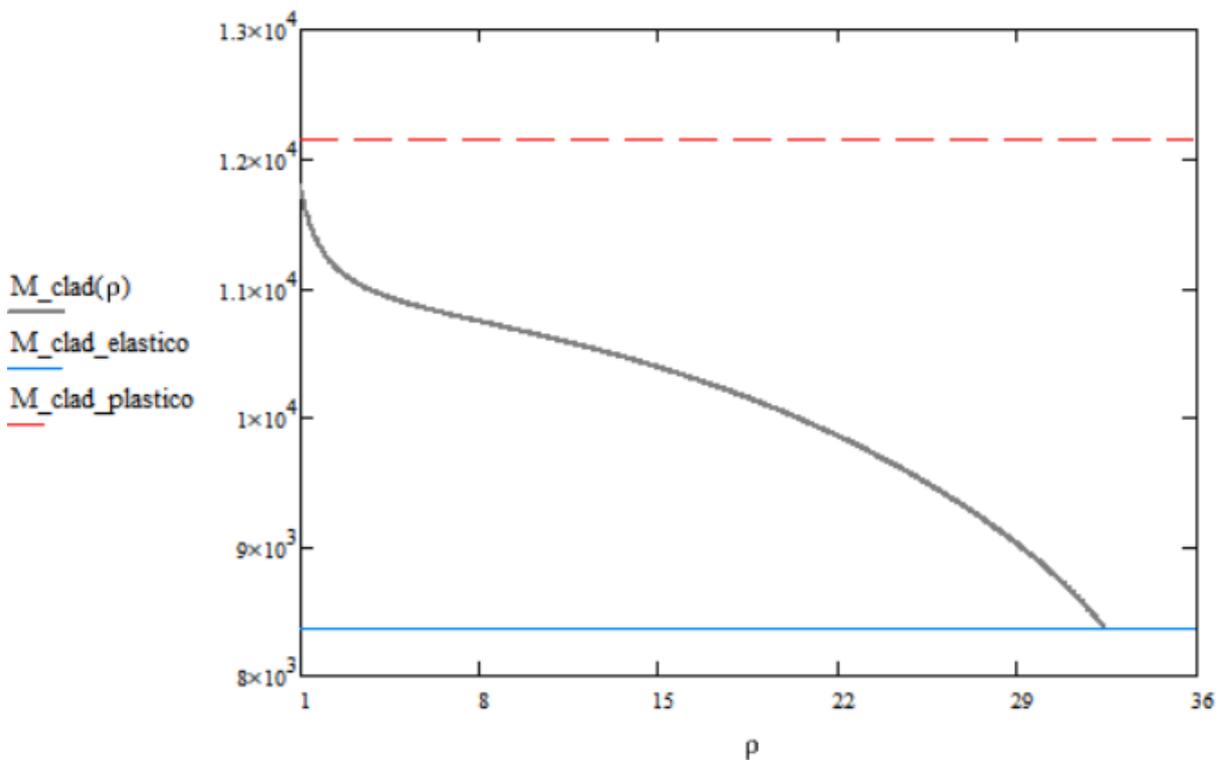


Figura 21- Quantidade de momento do clad

A Fig. 22 mostra que apesar dos gráficos das figuras 20 e 21 parecerem semelhantes, quando postos em mesma escala, é possível perceber que eles têm diferentes ordens de grandeza.

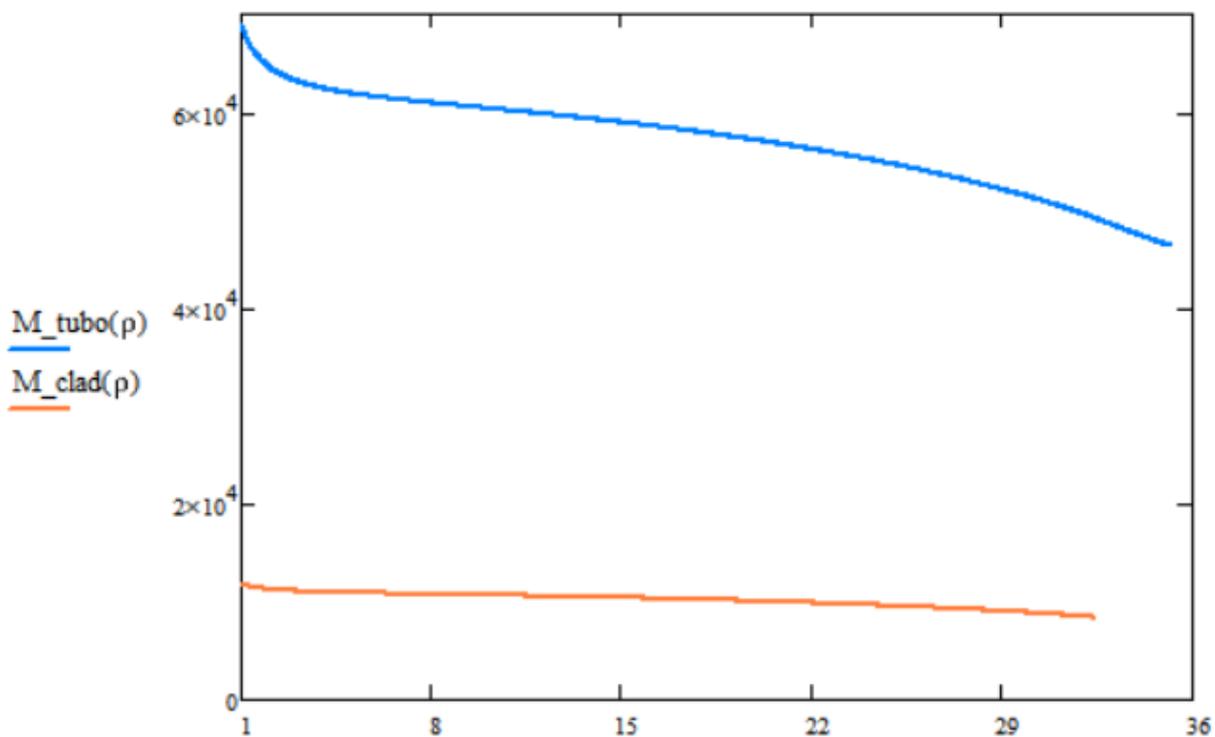


Figura 22- Comparação quantidade de momento tubo de aço x clad

Um resultado não trivial é mostrado na figura 23, onde os momentos do tubo e do clad são colocados em razão, mostrando a relação permanece apenas aproximadamente constante em função do raio de curvatura, e não uma relação fixa. Esse resultado não foi o esperado pois acreditava-se que a relação se permanecesse constante durante toda a análise.

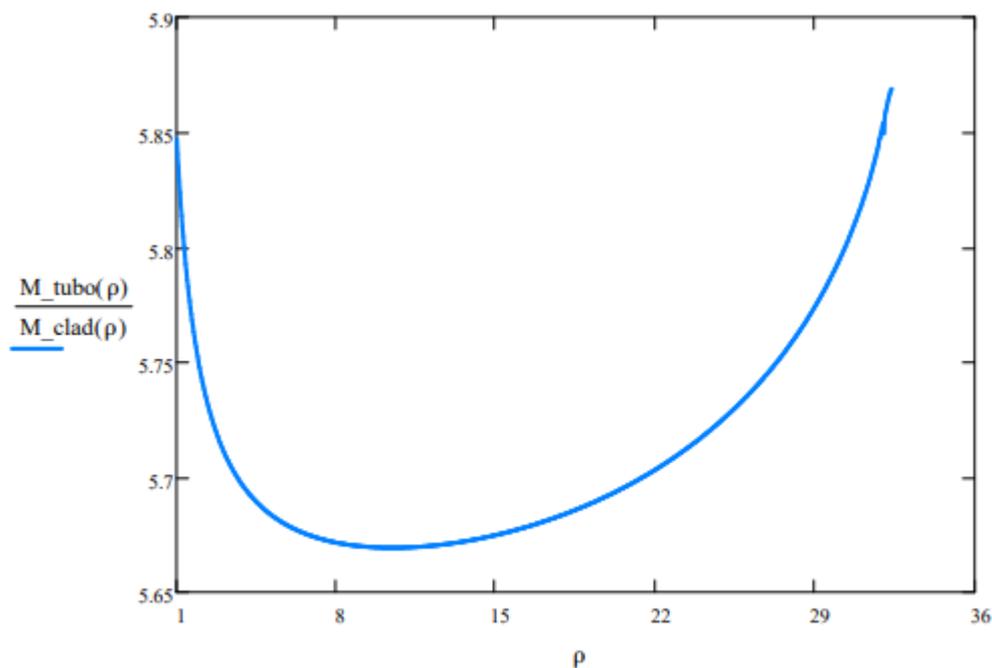


Figura 23- Razão M_{tubo} e M_{clad}

4.5 APLICAÇÃO EM CARRETEL

Para a aplicação em carretel em navios Pipelay, foi proposto $\rho = 8 \text{ m}$, aplicando esse valor nas equações (7) e (23) verifica-se que o momento do tubo começa a se plastificar é $1,157 \times 10^3 \text{ N.m}$ e quando ele está totalmente plastificado é $5,974 \times 10^4 \text{ N.m}$, sendo o momento total do tubo a soma deles que é $6,09 \times 10^4 \text{ N.m}$.

Analogamente para o clad, o momento em que ele começa a se plastificar é $2,27 \times 10^2 \text{ N.m}$ e quando ele está totalmente plastificado é $1,051 \times 10^4 \text{ N.m}$, sendo o momento total do tubo a soma deles que é $1,074 \times 10^4 \text{ N.m}$.

O momento total do tubo cladeado é a soma dos momentos totais do tubo e do clad que é $7,164 \times 10^4 \text{ N.m}$. Sendo assim, conclui-se que a maior parte do momento vai para o tubo que é de aproximadamente 85% e os 15% restantes, para o clad.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um modelo analítico foi proposto para estimar a divisão de carregamento, neste caso de momentos fletores, entre o tubo de aço e a camada de clad em um “riser” rígido cladeado quando enrolado em um carretel de transporte. Para esses cálculos, fez-se o uso do MathCad e as equações foram relacionadas de uma forma que é possível simular diferentes raios de curvatura, espessura, entre outros parâmetros.

Concluiu-se que embora a camada interna de revestimento de Inconel 625 seja relativamente fina em relação a espessura do tubo de aço, e tenha como objetivo principal a proteção à corrosão do tubo de aço; mecanicamente pode-se dizer que a camada de clad suporta uma parcela não desprezível do momento imposto ao tubo cladeado quando enrolado no carretel. No exemplo específico suportou em torno de 15% do momento fletor total aplicado.

Uma vez tendo feito o cálculo das distribuições de momentos fletores, entre o tubo de aço e o clad, a próxima etapa será o cálculo da distribuição de tensões elastoplásticas entre estes. E por fim, o cálculo de distribuição das tensões residuais entre o tubo de aço e o clad.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRISTOT, Daniel F.: **Influência do cladding de INCONEL® 625 no comportamento a fadiga do aço SAE 4140**, Caxias do Sul, 2014.

BUTTING, **Clad Pipes**. 2017- Recebido via *e-mail* em 01/09/2019.

BUTTING, **Metallurgically Clad Pipes**. 2017- Recebido via *e-mail* em 01/09/2019.

FATOS E DADOS, **Conheça curiosidades sobre equipamentos de nossos sistemas submarinos**. 2015. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-curiosidades-sobre-equipamentos-de-nossos-sistemas-submarinos.htm>> Acessado em 20/05/2019.

FATOS E DADOS, **Dez principais feitos tecnológicos do pré-sal**. 2015. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/dez-principais-feitos-tecnologicos-do-pre-sal.htm>> Acessado em 20/06/2019.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**: 6.ed. Rio de Janeiro:LTC,2012.

LEÃO, A.L et al.: **Análise dos sistemas de risers utilizados na produção de óleo em sistemas submarinos**, Ciências exatas e tecnológicas. Aracaju, 2014.

MAINIER, Fernando B.; Terzi, Rafael: **Monitoramento da corrosão interna em plataformas Offshore**, Santa Cruz do Sul, 2008.

JUNIOR, Jaime C. S.; ROCHA, David B.; BRAND, Sérgio D. **Uma Breve Revisão Histórica do Desenvolvimento da Soldagem dos Aços API para Tubulações**

O PETRÓLEO, **Afinal, o que é Onshore e Offshore?**.2017. Disponível em: <<https://www.opetroleo.com.br/afinal-o-que-onshore-e-offshore/>> Acessado em 21/05/2019.

OBSERVATÓRIO DO SETOR, **Blocos em exploração e campos em desenvolvimento e produção no Brasil**. 2016. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/atividade-de-ep-no-brasil/>>Acessado em 27/06/2019.

OBSERVATÓRIO DO SETOR, **Média de produção de petróleo dos poços onshore**. 2019. Disponível em :<<https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/media-de-producao-de-petroleo-dos-pocos-onshore/>> Acessado em 25/05/2019.

PEREIRA, Felipe P. B.; SILVA, Yuri C.T: **PLSV – Pipe Laying Support Vessel**. Rio de Janeiro, 2013.

PM INTERNATIONAL SUPLIERS, **API 5L X65**. 2019. Disponível em: <<https://www.api5lx.com/api5lx-grades/>> Acessado em 20/09/2019.

PRÉ SAL, **Desde as primeiras descobertas em águas profundas, temos trilhado uma longa jornada tecnológica**. 2019. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>> Acessado:17/05/2019.

ROBINSON, A. Longer life with welded cladding. **World pumps**. Elsevier, 2010.

RODRIGUES, Augusto de Barros: **Estudo da flexão não-linear de vigas retas aplicado a risers rígidos utilizando o método de elementos**. Brasil, 2008.

RODY, P.H.C.; KENEDI, P.P.; PACHECO, P. M. C.L.: **Cladded Pipes Stress Analysis**, Rio de Janeiro, 2014.

SIMO, J.C., HUGHES, T.J.R, **Computational Inelasticity**, Springer-Verlang, New York, 1998.

SOARES, P.M.; BERNI, M.D.; MANDUCA, P.C.: **A indústria de petróleo no Brasil: Avaliação histórica da concepção da empresa PETROBRAS**, Brasil, 2012.

SPECIAL METALS, **Inconel 625**. 2019. Disponível em <<https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>> Acessado em 29/09/2019.

TANAKA, R.L.: **Otimização da Configuração de risers rígidos**, São Paulo, 2009.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**, Petrobras, Rio de Janeiro, 2001.

VIDAL, Felipe A.: **Análise Composicional em revestimento de INCONEL 625 depositados por PTA-P em aço AÇO ASTM A36**, Vitória, 2014.

ZHANG, Z.; WANG, H.; YU, G.; ZHAO, J.: **Research on Four-Point Air Bending Process and Contour Detection Method for JCO Forming Process of LSAW Pipes**. Qinhuangdao City, 2019.

ANEXO A- Memorial de Cálculo

☑ Geometria

Supus diâmetro externo de 6 polegadas e espessura do clad de 0,1 polegadas)

$$\text{diam_ext} := 6$$

$$\text{espess_clad} := 0.1$$

$$\text{Ro_t} := \left(\frac{\text{diam_ext}}{2} \right) \cdot 25.4 \cdot 10^{-3} \quad \text{Ro_t} = 0.076$$

$$\text{Ri_t} := \left(\frac{\text{diam_ext} - 0.5}{2} \right) \cdot 25.4 \cdot 10^{-3} \quad \text{Ri_t} = 0.07$$

$$\text{Ro_c} := \text{Ri_t} \quad \text{Ro_c} = 0.07$$

$$\text{Ri_c} := \left(\frac{\text{diam_ext} - 0.5 - \text{espess_clad}}{2} \right) \cdot 25.4 \cdot 10^{-3} \quad \text{Ri_c} = 0.069$$

$$\text{Lt} := 12$$

$$\text{Lc} := 12$$

☑ Geometria

☑ Propriedades mecânicas

$$\text{E_tubo} := 207 \cdot 10^9 \quad \text{E_clad} := 204.8 \cdot 10^9$$

$$\text{Sy_tubo} := 448 \cdot 10^6 \quad \text{Sy_clad} := 442 \cdot 10^6$$

$$\text{Sut_tubo} := 537 \cdot 10^6 \quad \text{Sut_clad} := 896 \cdot 10^6$$

$$\text{eR_tubo} := 0.08 \quad \text{eR_clad} := 0.55$$

$$\text{ey_tubo} := \frac{\text{Sy_tubo}}{\text{E_tubo}} \quad \text{ey_tubo} = 2.164 \times 10^{-3}$$

$$\text{ey_clad} := \frac{\text{Sy_clad}}{\text{E_clad}} \quad \text{ey_clad} = 2.158 \times 10^{-3}$$

$$\text{K_tubo} := \frac{\text{Sut_tubo} - \text{Sy_tubo}}{\text{eR_tubo}} \quad \text{K_tubo} = 1.113 \times 10^9$$

$$\text{K_clad} := \frac{\text{Sut_clad} - \text{Sy_clad}}{\text{eR_clad}} \quad \text{K_clad} = 8.255 \times 10^8$$

$$\text{Et_tubo} := \frac{\text{E_tubo} \cdot \text{K_tubo}}{\text{E_tubo} + \text{K_tubo}} \quad \text{Et_tubo} = 1.107 \times 10^9$$

$$\text{Et_clad} := \frac{\text{E_clad} \cdot \text{K_clad}}{\text{E_clad} + \text{K_clad}} \quad \text{Et_clad} = 8.221 \times 10^8$$

☑ Propriedades mecânicas

Calculos Iniciais

$$A_t := \pi(Ro_t^2 - Ri_t^2)$$

$$A_t = 2.914 \times 10^{-3}$$

$$A_c := \pi(Ro_c^2 - Ri_c^2)$$

$$A_c = 5.523 \times 10^{-4}$$

$$I_t := \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot (Ro_t^4 - Ri_t^4)$$

$$I_t = 7.783 \times 10^{-6}$$

$$I_c := \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot (Ro_c^4 - Ri_c^4)$$

$$I_c = 1.323 \times 10^{-6}$$

$$J_t := \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot (Ro_t^4 - Ri_t^4)$$

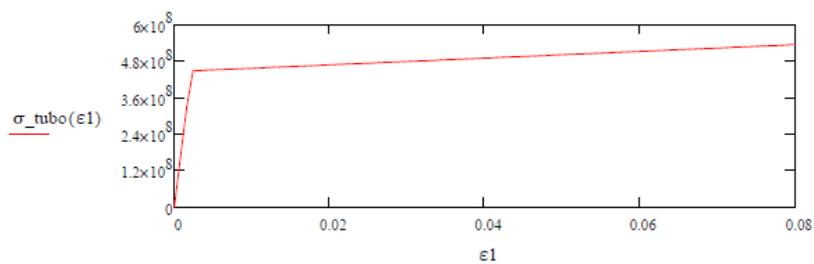
$$J_t = 1.557 \times 10^{-5}$$

$$J_c := \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot (Ro_c^4 - Ri_c^4)$$

$$J_c = 2.646 \times 10^{-6}$$

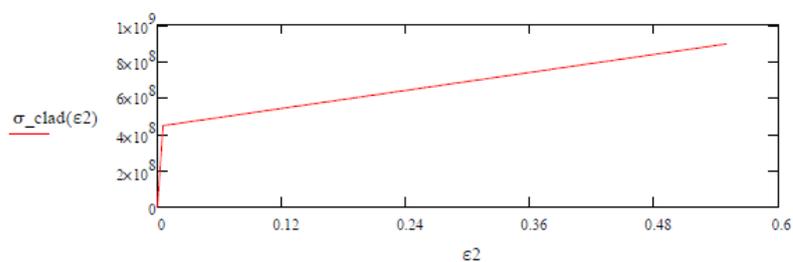
$$\epsilon_1 := 0, \frac{\epsilon R_{tubo}}{100} .. \epsilon R_{tubo}$$

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



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

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



Calculos Iniciais

Carregamento elástico

$$M_{y_tubo} := \frac{S_{y_tubo} \cdot I_t}{R_{o_t}} \quad M_{y_tubo} = 4.576 \times 10^4$$

$$M_{y_clad} := \frac{S_{y_clad} \cdot I_c}{R_{o_c}} \quad M_{y_clad} = 8.372 \times 10^3$$

$$\rho_{y_tubo} := \frac{E_{tubo} \cdot I_t}{M_{y_tubo}} \quad \rho_{y_tubo} = 35.208$$

$$\rho_{y_clad} := \frac{E_{clad} \cdot I_c}{M_{y_clad}} \quad \rho_{y_clad} = 32.365$$

$$M_{y_inicial} := M_{y_tubo} + M_{y_clad} \quad M_{y_inicial} = 5.413 \times 10^4$$

$$yy_elast_max_tubo := \epsilon_{y_tubo} \cdot \rho_{y_tubo} \quad yy_elast_max_tubo = 0.076$$

$$yy_elast_max_clad := \epsilon_{y_clad} \cdot \rho_{y_clad} \quad yy_elast_max_clad = 0.07$$

Carregamento elástico

Cálculo da divisão de momento

$$M_{tubo_elastico} := 2 \cdot \left[\int_0^{R_{i_t}} y \left(\frac{y}{R_{o_t}} \cdot S_{y_tubo} \right) \cdot 2 \left[\sqrt{(R_{o_t})^2 - y^2} - \sqrt{(R_{i_t})^2 - y^2} \right] dy + \int_{R_{i_t}}^{R_{o_t}} y \left(\frac{y}{R_{o_t}} \cdot S_{y_tubo} \right) \cdot 2 \sqrt{(R_{o_t})^2 - y^2} dy \right]$$

$$M_{tubo_elastico} = 4.576 \times 10^4$$

$$M_{tubo_plastico} := 2 \cdot \left[\int_0^{R_{i_t}} y \cdot (S_{y_tubo} + E_{tubo} \cdot R_{o_t}) \cdot 2 \left[\sqrt{(R_{o_t})^2 - y^2} - \sqrt{(R_{i_t})^2 - y^2} \right] dy + \int_{R_{i_t}}^{R_{o_t}} y \cdot (S_{y_tubo} + E_{tubo} \cdot y) \cdot 2 \sqrt{(R_{o_t})^2 - y^2} dy \right]$$

$$M_{tubo_plastico} = 7.199 \times 10^4$$

$$M_{clad_elastico} := 2 \cdot \left[\int_0^{R_{i_c}} y \left(\frac{y}{R_{o_c}} \cdot S_{y_clad} \right) \cdot 2 \left[\sqrt{(R_{o_c})^2 - y^2} - \sqrt{(R_{i_c})^2 - y^2} \right] dy + \int_{R_{i_c}}^{R_{o_c}} y \left(\frac{y}{R_{o_c}} \cdot S_{y_clad} \right) \cdot 2 \sqrt{(R_{o_c})^2 - y^2} dy \right]$$

$$M_{clad_elastico} = 8.372 \times 10^3$$

$$M_{clad_plastico} := 2 \cdot \left[\int_0^{R_{i_c}} y \cdot [S_{y_clad} + E_{clad} \cdot (R_{o_c})] \cdot 2 \left[\sqrt{(R_{o_c})^2 - y^2} - \sqrt{(R_{i_c})^2 - y^2} \right] dy + \int_{R_{i_c}}^{R_{o_c}} y \cdot (S_{y_clad} + E_{clad} \cdot y) \cdot 2 \sqrt{(R_{o_c})^2 - y^2} dy \right]$$

$$M_{clad_plastico} = 1.215 \times 10^4$$

$$\frac{M_{tubo_plastico}}{M_{tubo_elastico}} = 1.573$$

$$\frac{M_{clad_plastico}}{M_{clad_elastico}} = 1.452$$

$$\rho_{\text{menor}} := 1$$

$$\rho_{\text{maior}} := 36$$

$$\rho_{\text{.}} := \rho_{\text{maior}} \cdot \rho_{\text{maior}} - 1 \dots \rho_{\text{menor}}$$

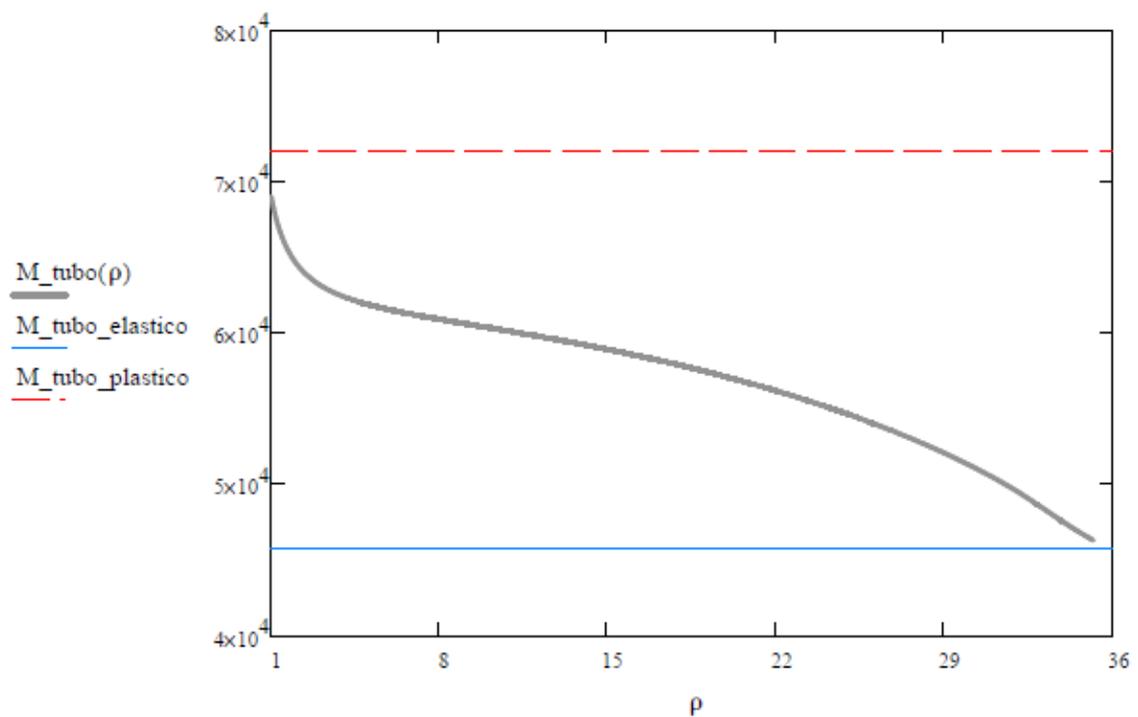
$$yy_t(\rho) := \epsilon y_{\text{tubo}} - \rho$$

$$M_{\text{tubo_elast}}(\rho) := 2 \cdot \int_0^{yy_t(\rho)} y \cdot \left[\left(\frac{y}{yy_t(\rho)} \right) \cdot S y_{\text{tubo}} \right] \cdot 2 \left[\sqrt{(R o_t)^2 - y^2} - \sqrt{(R i_t)^2 - y^2} \right] dy$$

$$M_{\text{tubo_plast_a}}(\rho) := 2 \cdot \int_{yy_t(\rho)}^{R i_t} y \cdot \left[S y_{\text{tubo}} + E t_{\text{tubo}} \cdot \left(\frac{y}{\rho} - \epsilon y_{\text{tubo}} \right) \right] \cdot 2 \left[\sqrt{(R o_t)^2 - y^2} - \sqrt{(R i_t)^2 - y^2} \right] dy$$

$$M_{\text{tubo_plast_b}}(\rho) := 2 \cdot \int_{R i_t}^{R o_t} y \cdot \left[S y_{\text{tubo}} + E t_{\text{tubo}} \cdot \left(\frac{y}{\rho} - \epsilon y_{\text{tubo}} \right) \right] \cdot 2 \sqrt{(R o_t)^2 - y^2} dy$$

$$M_{\text{tubo}}(\rho) := M_{\text{tubo_elast}}(\rho) + M_{\text{tubo_plast_a}}(\rho) + M_{\text{tubo_plast_b}}(\rho)$$



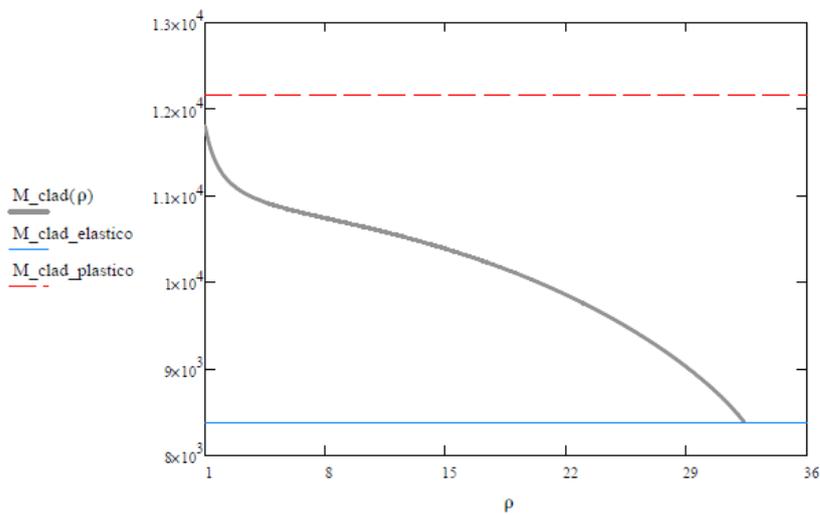
$$yy_c(\rho) := \epsilon y_{clad} \cdot \rho$$

$$M_{clad_elast}(\rho) := 2 \cdot \left[\int_0^{yy_c(\rho)} y \cdot \left[\left(\frac{y}{yy_c(\rho)} \right) \cdot Sy_{clad} \right] \cdot 2 \left[\sqrt{(Ro_c)^2 - y^2} - \sqrt{(Ri_c)^2 - y^2} \right] dy \right]$$

$$M_{clad_plast_a}(\rho) := 2 \cdot \left[\int_{yy_c(\rho)}^{Ri_c} y \cdot \left[Sy_{clad} + Et_{clad} \cdot \left(\frac{y}{\rho} - \epsilon y_{clad} \right) \right] \cdot 2 \left[\sqrt{(Ro_c)^2 - y^2} - \sqrt{(Ri_c)^2 - y^2} \right] dy \right]$$

$$M_{clad_plast_b}(\rho) := 2 \cdot \left[\int_{Ri_c}^{Ro_c} y \cdot \left[Sy_{clad} + Et_{clad} \cdot \left(\frac{y}{\rho} - \epsilon y_{clad} \right) \right] \cdot 2 \sqrt{(Ro_c)^2 - y^2} dy \right]$$

$$M_{clad}(\rho) := M_{clad_elast}(\rho) + M_{clad_plast_a}(\rho) + M_{clad_plast_b}(\rho)$$



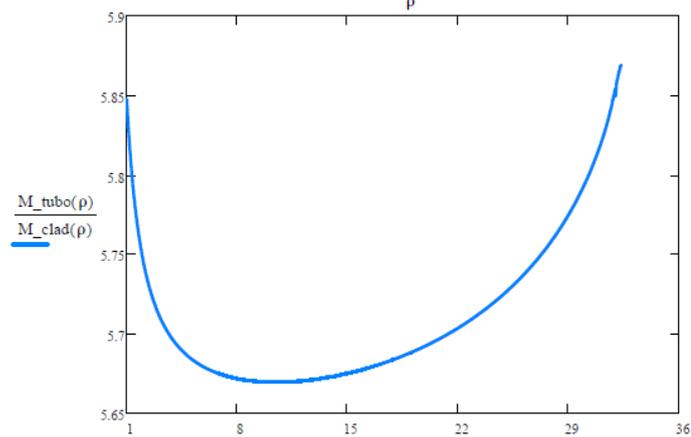
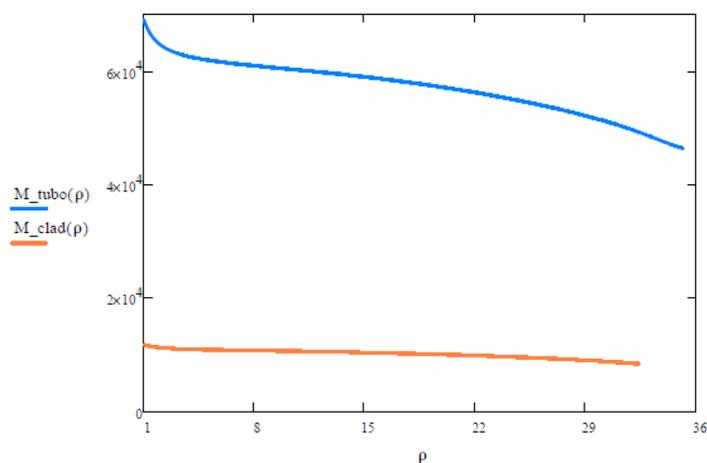
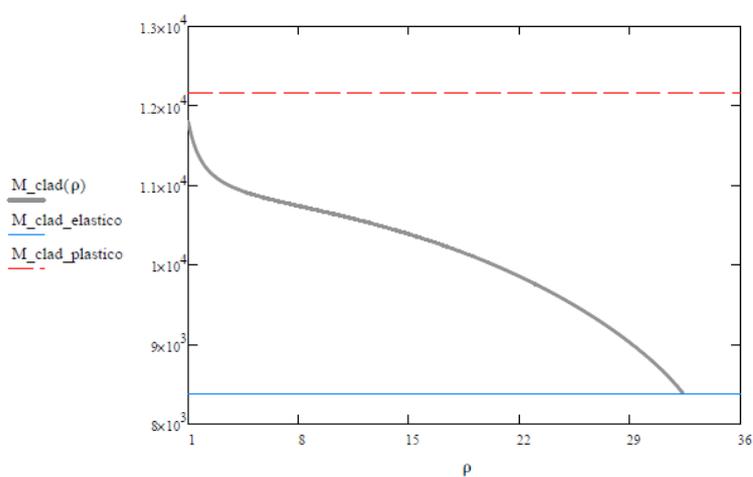
$$yy_{\alpha}(\rho) := \epsilon y_{\text{clad}} \cdot \rho$$

$$M_{\text{clad_elast}}(\rho) := 2 \int_0^{yy_{\alpha}(\rho)} y \left[\left(\frac{y}{yy_{\alpha}(\rho)} \right) \cdot Sy_{\text{clad}} \right] \cdot 2 \left[\sqrt{(Ro_c)^2 - y^2} - \sqrt{(Ri_c)^2 - y^2} \right] dy$$

$$M_{\text{clad_plast_a}}(\rho) := 2 \int_{yy_{\alpha}(\rho)}^{Ri_c} y \left[Sy_{\text{clad}} + Et_{\text{clad}} \cdot \left(\frac{y}{\rho} - \epsilon y_{\text{clad}} \right) \right] \cdot 2 \left[\sqrt{(Ro_c)^2 - y^2} - \sqrt{(Ri_c)^2 - y^2} \right] dy$$

$$M_{\text{clad_plast_b}}(\rho) := 2 \int_{Ri_c}^{Ro_c} y \left[Sy_{\text{clad}} + Et_{\text{clad}} \cdot \left(\frac{y}{\rho} - \epsilon y_{\text{clad}} \right) \right] \cdot 2 \sqrt{(Ro_c)^2 - y^2} dy$$

$$M_{\text{clad}}(\rho) := M_{\text{clad_elast}}(\rho) + M_{\text{clad_plast_a}}(\rho) + M_{\text{clad_plast_b}}(\rho)$$



$$M_{\text{tubo_elast}} := 2 \cdot \int_0^{yy_t} y \cdot \left[\left(\frac{y}{yy_t} \right) \cdot Sy_tubo \right] \cdot 2 \cdot \left[\sqrt{(Ro_t)^2 - y^2} - \sqrt{(Ri_t)^2 - y^2} \right] dy$$

$$M_{\text{tubo_elast}} = 1.157 \times 10^3$$

$$M_{\text{tubo_plast_a}} := 2 \cdot \int_{yy_t}^{Ri_t} y \cdot \left[Sy_tubo + Et_tubo \cdot \left(\frac{y}{\rho_carretel} - \epsilon y_tubo \right) \right] \cdot 2 \cdot \left[\sqrt{(Ro_t)^2 - y^2} - \sqrt{(Ri_t)^2 - y^2} \right] dy$$

$$M_{\text{tubo_plast_b}} := 2 \cdot \int_{Ri_t}^{Ro_t} y \cdot \left[Sy_tubo + Et_tubo \cdot \left(\frac{y}{\rho_carretel} - \epsilon y_tubo \right) \right] \cdot 2 \cdot \sqrt{(Ro_t)^2 - y^2} dy$$

$$M_{\text{tubo}} := M_{\text{tubo_elast}} + M_{\text{tubo_plast_a}} + M_{\text{tubo_plast_b}}$$

$$M_{\text{tubo}} = 6.09 \times 10^4$$

$$yy_c := \epsilon y_clad \cdot \rho_carretel$$

$$M_{\text{clad_elast}} := 2 \cdot \int_0^{yy_c} y \cdot \left[\left(\frac{y}{yy_c} \right) \cdot Sy_clad \right] \cdot 2 \cdot \left[\sqrt{(Ro_c)^2 - y^2} - \sqrt{(Ri_c)^2 - y^2} \right] dy$$

$$M_{\text{clad_plast_a}} := 2 \cdot \int_{yy_c}^{Ri_c} y \cdot \left[Sy_clad + Et_clad \cdot \left(\frac{y}{\rho_carretel} - \epsilon y_clad \right) \right] \cdot 2 \cdot \left[\sqrt{(Ro_c)^2 - y^2} - \sqrt{(Ri_c)^2 - y^2} \right] dy$$

$$M_{\text{clad_plast_b}} := 2 \cdot \int_{Ri_c}^{Ro_c} y \cdot \left[Sy_clad + Et_clad \cdot \left(\frac{y}{\rho_carretel} - \epsilon y_clad \right) \right] \cdot 2 \cdot \sqrt{(Ro_c)^2 - y^2} dy$$

$$M_{\text{clad_elast}} = 227.425$$

$$M_{\text{clad_plast_a}} = 9.12 \times 10^3$$

$$M_{\text{clad_plast_b}} = 1.39 \times 10^3$$

$$M_{\text{clad}} := M_{\text{clad_elast}} + M_{\text{clad_plast_a}} + M_{\text{clad_plast_b}}$$

$$M_{\text{clad}} = 1.847 \times 10^4$$

$$M_{\text{total}} := M_{\text{tubo}} + M_{\text{clad}}$$

$$M_{\text{total}} = 7.937 \times 10^4$$

$$\left(\frac{M_{\text{tubo}}}{M_{\text{total}}} \right) \cdot 100 = 76.732$$

$$\left(\frac{M_{\text{clad}}}{M_{\text{total}}} \right) \cdot 100 = 23.268$$

Aplicação de carretel