

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

APLICAÇÃO E COMPARAÇÃO ENTRE SOFTWARES DE ANÁLISE DE
FLEXIBILIDADE DE TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS

por

Rômulo Ceni Arioli

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Janeiro de 2024

CIP - Catalogação na Publicação

Ceni Arioli, Rômulo
APLICAÇÃO E COMPARAÇÃO ENTRE SOFTWARES DE ANÁLISE
DE FLEXIBILIDADE DE TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS / Rômulo
Ceni Arioli. -- 2024.
28 f.
Orientador: Ignacio Iturrioz.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Análise de flexibilidade. 2. Tubulações
industriais. 3. Estudo de tensões. I. Iturrioz,
Ignacio, orient. II. Título.

Rômulo Ceni Arioli

ANÁLISE DE FLEXIBILIDADE, E COMPARAÇÃO ENTRE SOFTWARES DE CÁLCULO
EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignácio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Ignácio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Daniel Milbrath De Leon

Dr. Cristiano João Brizzi Ubessi

Porto Alegre, janeiro de 2024

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer meus pais pelo apoio, carinho e confiança demonstrados ao longo de toda minha jornada e em especial durante o curso de engenharia mecânica.

Aos professores da UFRGS que se fizeram presentes ao longo de todo curso transmitindo conhecimento de forma prática e adequada, em especial ao professor Ignacio Iturrioz pelo suporte demonstrado na construção do trabalho

Aos meus colegas que compartilharam o esforço de se fazer presente e muitas noites de estudo em companheirismo, em especial ao colega Gabriel Simioni que foi de grande ajuda ao longo deste trabalho.

No geral a todos aqueles que compartilhei alguma experiência ao longo destes anos.

ARIOLI, R. C. **Aplicação e comparação entre softwares de análise de flexibilidade de tubulações industriais.** 2024. 30 Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

RESUMO

Neste trabalho foi conduzida uma análise detalhada da flexibilidade tubulação da Unidade de Processamento de Cabiúnas, localizada em Macaé, Rio de Janeiro. Utilizando o software TRIFLEX para análise estática e seguindo as normas ASME B31.3 e Petrobras N-0057, exploramos os aspectos cruciais do dimensionamento de tubulações industriais. Um ponto destacado neste estudo foi a verificação da possibilidade de alcançar resultados equivalentes utilizando o software MASTAN2. Além de proporcionar uma compreensão aprofundada da flexibilidade estrutural, o trabalho destaca considerações importantes contribuindo para uma compreensão abrangente dos desafios e complexidades envolvidos na análise de flexibilidade em tubulações industriais.

PALAVRAS-CHAVE: (Flexibilidade, Tubulação, Análise,)

ARIOLI, R. C. **Flexibility analysis, and comparison of industrial piping calculation softwares.** 2024. 28 Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

ABSTRACT

In this study, a detailed analysis of the piping flexibility at the Cabiúnas Processing Unit, located in Macaé, Rio de Janeiro was conducted. Using the TRIFLEX software for static analysis and adhering to the ASME B31.3 and Petrobras N-0057 standards, we explored crucial aspects of industrial piping design. A notable aspect of this study was the examination of the potential to achieve equivalent results using the MASTAN2 software. In addition to providing an in-depth understanding of structural flexibility, the study emphasizes important considerations, contributing to a comprehensive understanding of the challenges and complexities involved in analyzing flexibility in industrial pipelines.

KEYWORDS: (Flexibility, Piping, Analysis)

LISTA DE ABREVIATURAS

σ_R	tensão resultante (Von-Mises)	MPa
S_c	tensão admissível a frio	MPa
S_h	tensão admissível a quente	MPa
S_a	tensão admissível devida a Dilatação	MPa
S_y	tensão admissível em Teste Hidrostático	MPa
S_o	tensão admissível Ocasional	MPa
S_L	tensão longitudinal	MPa
S_{ct}	tensão circunferencial	MPa
S_e	tensão secundária	MPa
S_b	tensão resultante de flexão	MPa
S_t	tensão resultante de torção	MPa
WL	efeito devido a abertura da PSV	MPa
W_e	eficiência de solda longitudinal	-
$SIF:$	fatores intensificadores de tensão	kgf/cm ²
W	peso da tubulação	kgf/m
WW	peso da tubulação cheia de água	kgf/m
X	deslocamento na direção x do eixo de coordenadas do software Triflex	mm
Y	deslocamento na direção y do eixo de coordenadas do software Triflex	mm
Z	deslocamento na direção z do eixo de coordenadas do software Triflex	mm
α	coeficiente de expansão térmica	C ⁻¹)
T_1	efeito da temperatura no caso de operação	mm
T_2	efeito da temperatura no caso de projeto	mm
P_1	efeito da pressão no caso de operação	kgf/cm ²
P_2	efeito da pressão no caso de projeto	kgf/cm ²
HP	efeito da pressão no caso de teste hidrostático	kgf/cm ²
E	eficiência de solda	-
d_m	diâmetro médio	mm
t_m	espessura de parede	mm
t_{com}	espessura de parede comercial	mm
Y	variação geométrica da estrutura de tubulação	-
c	sobre-espessura de corrosão	mm

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
3. METODOLOGIA	3
3.1 ESPESSURA DE PAREDE MÍNIMA	3
3.2 TENSÕES PRIMÁRIAS	4
3.3 TENSÕES SECUNDÁRIAS	5
3.4 TENSÕES OCASIONAIS	6
4. APLICAÇÃO E RESULTADOS	6
4.1 APLICAÇÃO 1: VERIFICAÇÃO CRÍTICA DOS CALCULOS REALIZADOS COM O SOFTWARE COMERCIAL TRIFLEX	6
4.2 APLICAÇÃO 2: CASO REAL DE CARREGAMENTO	11
5. CONCLUSÕES	14
6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
ANEXO I	16
ANEXO II	17
ANEXO III	18
ANEXO IV	19

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplos de Tubulações	1
Figura 3.1 – Apresentação dos momentos atuantes em um sistema de tubulação e seus respectivos fatores de intensificação de tensão	4
Figura 4.1 – Tubulação estudada.....	7
Figura 4.2 - Nós onde foram calculados os valores de momento fletores e tensões axiais.....	9
Figura 4.3 – Modelo de cálculo no Software Triflex	13

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Dados de entrada de processo para modelo de cálculo.	7
Tabela 4.2 – Cálculo da espessura de parede mínima.	8
Tabela 4.3 - Resultados para momentos e tensões primárias obtidos nos softwares Mastan2 e Triflex.	9
Tabela 4.4 - Resultados para momentos e tensões secundárias obtidos nos softwares Mastan2 e Triflex.	10
Tabela 4.5 - Dados de Processo das tubulações analisadas.	11
Tabela 4.6 – Dados Geométricos da Tubulação.	12
Tabela 4.7 - Tensões Admissíveis do Material.	12
Tabela 4.8 - Resultados da análise estática.	14

1. INTRODUÇÃO

Denominam-se tubos os condutos fechados destinados principalmente ao transporte de fluidos, e o conjunto de tubos e seus acessórios chama-se tubulação. Acredita-se que o emprego de tubulações para todos os materiais escoáveis ocorreu na Babilônia, por volta de 1500 anos antes de Cristo. Os tubos metálicos do Império Romano, feitos de chumbo, eram utilizados para o transporte de água quente, o que causou diversos problemas de saúde na população da época devido ao fato de o chumbo ser um material tóxico. Exemplos dessas tubulações romanas de chumbo e cerâmica são apresentados na Fig. 1.1 (a) e (b). Por volta do século XV, tubulações de ferro fundido começaram a ser utilizadas na Europa Central. Em 1886, foi feita a primeira patente do tubo de aço para resistir a condições de pressão cada vez mais altas. Exemplos de tubulações de ferro fundido do século XIX são apresentados na Fig. 1.1 (c). Finalmente, na Fig. 1.1 (d), apresenta-se uma vista de uma tubulação em uma instalação industrial moderna. [Silva Teles, 2012]

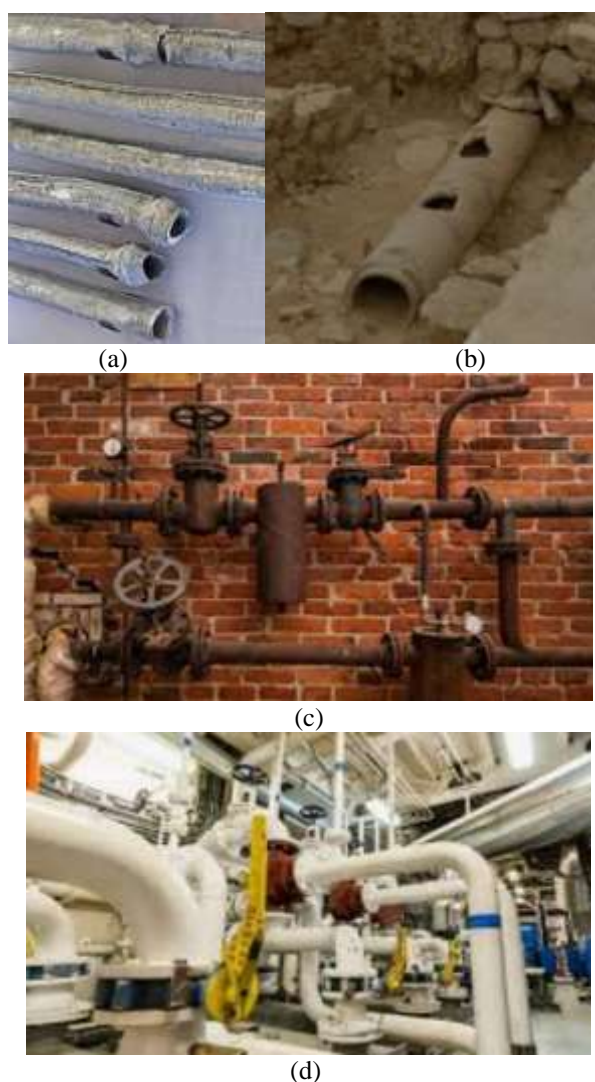


Figura 1.1 - Exemplos de tubulações, (a) trecho de tubulação de chumbo utilizado no império romano. (b) trecho de tubulação de cerâmica empregado no império romano (c) tubulação de ferro fundido de uma instalação industrial do século XIX. (d) vista de instalações industriais atuais.

A necessidade de utilização de tubulações para unidades de processamento de petróleo exige traçados geométricos complexos que demandam cuidados extremos com seu dimensionamento mecânico. O Brasil, por sua vez, tem um grande volume de trabalho na área de óleo e gás, pois além de ter petróleo extraído diretamente em solo nacional, conta com refinarias estatais que fazem parte de uma das maiores empresas do mundo nesse ramo de trabalho. A tubulação de uma planta petroquímica de grande escala pode chegar a 25% do custo total da instalação industrial, e a sua montagem até 50% deste valor total [LC Peng, 2008].

A importância de um adequado dimensionamento de tubulações, assim como um arranjo eficaz, a fim de evitar tensões acima do permitido, é crucial para preservar vidas e prevenir danos irreparáveis ao meio ambiente. Isso se torna ainda mais significativo devido ao aumento da complexidade e do nível de exigência enfrentados pelas tubulações, que incluem condições de temperaturas elevadas, altas pressões e, conseqüentemente, fluidos com nível elevado de toxicidade e potencial explosivo. Para o dimensionamento de tubulações industriais, a norma ASME B31.3 (2006) é amplamente adotada, sendo em instalações da Petrobras também utilizada a norma complementar N-0057 (2016) da empresa.

Em geral, o dimensionamento de tubulações industriais deve seguir os seguintes passos:

- 1) Dimensionar a espessura da tubulação em função da pressão interna aplicada;
- 2) Verificar a tubulação frente a diversos cenários de trabalho, dentre os mais comuns:
 - Ações de cargas primárias como peso próprio, peso de equipamentos (válvulas, plataformas, outras linhas apoiadas), peso do fluido, etc;
 - Solicitações secundárias como temperatura e apoios;
 - Solicitações especiais como ação do vento, sísmicas, dinâmicas e de fadiga.

Neste contexto, tubulações dimensionadas estruturalmente devem seguir estas premissas indicadas, cumprindo as características definidas pela função que vão realizar: determinada vazão de fluido a determinada pressão e temperatura em um espaço limitado com origem e destino definidos previamente.

No caso da operação das tubulações, as ações secundárias apresentam grande importância, de tal modo que sua ação sobre a tubulação não diminui com o aumento da geometria do tubo, mas sim com uma distribuição adequada da flexibilidade, que pode ser fornecida através da combinação de um traçado adequado e correta vinculação da estrutura em análise. A determinação desta flexibilidade do sistema deve ser tal que minimize as solicitações secundárias e, ao mesmo tempo, que essa flexibilidade não seja excessiva a ponto de produzir frequências naturais baixas que possam entrar em ressonância devido a fontes de vibrações existentes em plantas industriais, decorrentes do acionamento de compressores, bombas alternativas, entre outros equipamentos.

Para levar em conta todos estes aspectos ao mesmo tempo, existem programas comerciais que permitem facilitar o procedimento de cálculo. Entre estes softwares, destacam-se o Caesar II (versão 5.10) e o TRIFLEX (versão 4.1.5), que facilitam a análise de flexibilidade, a qual muitas vezes exige testar várias alternativas de análise e o dimensionamento da tubulação.

Em função do exposto anteriormente, é possível definir o objetivo geral do presente trabalho:

- Analisar diversos aspectos do dimensionamento estrutural de tubulações industriais.
- A partir deste objetivo geral, é possível definir os seguintes objetivos específicos:
- a) Realizar uma comparação entre os resultados obtidos no software comercial TRIFLEX e em um sistema de cálculo de aplicação geral, visando verificar a possibilidade de obtenção de resultados semelhantes. Destaca-se que no software

comercial, existem parâmetros específicos de tubulação, visando verificar a possibilidade de obtenção de resultados semelhantes.

- b) Aplicar os conhecimentos obtidos de análise de flexibilidade para um problema real de carregamento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Cada trecho de uma tubulação pode ser considerado um elemento estrutural, submetido a uma série de cargas e transmitindo outras ao sistema de suportes e equipamentos ligados ao arranjo [Silva Teles, 2012].

Conforme Silva Teles, denomina-se tensões primárias as tensões necessárias para satisfazer as condições de equilíbrio estático em relação aos diversos carregamentos externos agindo sobre a tubulação, tais como pressão interna e externa, pesos, sobrecargas, etc. As tensões primárias têm como característica não possuírem limites intrínsecos e terem um valor diretamente relacionado à carga de origem. Por exemplo, quanto maior a pressão interna, maior a tensão primária derivada desta pressão.

Por outro lado, as tensões secundárias são aquelas que resultam da tubulação não ser inteiramente livre para se dilatar, se contrair e se movimentar em consequência das variações de temperatura e/ou de movimentações de pontos externos à tubulação. Estas tendem a relaxar com o passar do tempo e dependem diretamente do valor limite de escoamento do material.

Ainda neste contexto, existem as tensões ocasionais que têm as características de serem primárias, mas seu acontecimento só ocorre em situações extremas, como abertura de válvula de segurança que atua para alívio de sobrepressões na tubulação, efeitos do vento, da neve, de sismos, entre outros. Como são ocasionais, a tensão limite para este tipo de carregamento é maior do que o limite considerado para as tensões primárias.

3. METODOLOGIA

3.1. CÁLCULO DA ESPESSURA DE PAREDE

O cálculo da espessura de parede do tubo é feito levando em conta um cilindro de parede delgada sujeito a uma pressão interna, teremos duas tensões geradas: a tensão longitudinal e a tensão circunferencial, as quais podem ser calculadas pelas equações da teoria de casca membranal para o caso de uma casca cilíndrica (3.1) e (3.2).

$$\sigma_c = \frac{P.D}{2.t} \quad (3.1)$$

$$\sigma_L = \frac{P.D}{4.t} \quad (3.2)$$

Como pode-se observar, a tensão circunferencial é o dobro da tensão longitudinal, ou seja, podemos igualar esta tensão a tensão admissível, obtendo então a equação 3.3.

$$t = \frac{P.D}{2.S_h} \quad (3.3)$$

Onde S_h é a tensão admissível frente a ações primárias que depende do material empregado e a temperatura na qual vai se realizar o dimensionamento.

A norma ASME B31.3 (2006) propõe para realizar o dimensionamento de elementos com variação geométrica da seguinte forma:

$$t = \frac{P.D}{2 (Se+P.Y)} \quad (3.4)$$

Onde P representa o valor da pressão interna, D o diâmetro externo, d o diâmetro interno, c indica a sobre-espessura de corrosão e imperfeições relacionadas ao método de fabricação da tubulação, E é um fator que depende do tipo de solda e qualidade da mesma, $Y = (d + 2c) / (D + d + 2c)$ é um fator que leva em conta distorções geométricas. É possível notar a similaridade das expressões 3.3 e 3.4, o que indicaria que a teoria de falha adotada pela norma ASME B31.3 é a teoria de Rankine ($S_{adm} \leq \text{Max} \{S1, S2, S3\}$). Sendo S1, S2 e S3 as tensões principais. A espessura assim determinada deve-se incrementar a sobre-espessura de corrosão de tal forma que a espessura determinada a partir da disponibilidade e comercial t_{com} deve cumprir a seguinte condição:

$$t_{com} \geq t + c \quad (3.5)$$

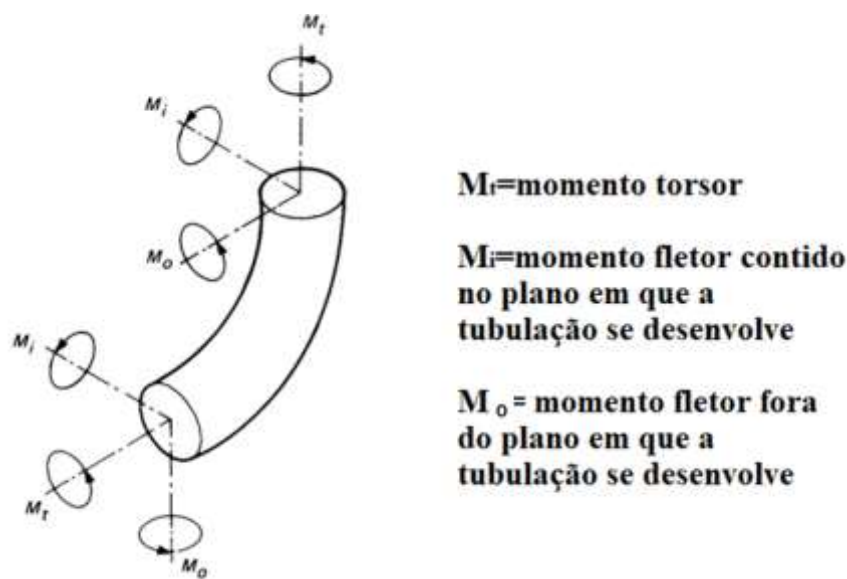
Dependendo do método de fabricação utilizado, a espessura calculada com a expressão 3.4 pode ser também corrigida com um fator de 1.125, segundo ASME B31.3 (2006), para levar em conta uma excentricidade dos diâmetros internos e externos.

3.2. TENSÕES PRIMÁRIAS

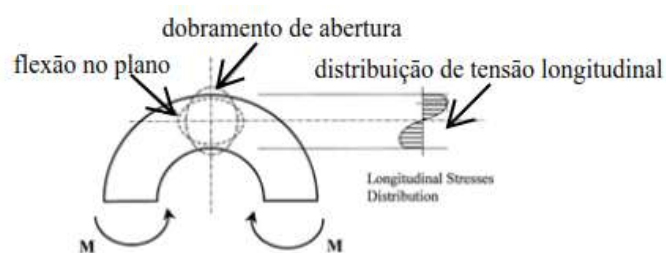
As tensões provenientes da pressão interna ou externa, do peso próprio e do peso das diversas fontes mencionadas no item 2 são comparadas com a tensão admissível determinada na temperatura de projeto $S_h = f(\text{temperatura de projeto, tipo de aço})$, que pode ser encontrada na Tabela A-1 da norma ASME B31.3. O procedimento para a verificação da tubulação diante de cargas permanentes, também consideradas primárias, é realizado seguindo a expressão indicada a seguir:

$$S_h \geq \sigma_L + \frac{0,75.i.Mz}{W} + \frac{N}{A} \quad (3.6)$$

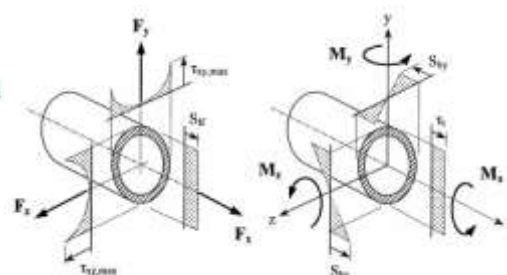
Onde σ_L foi calculada pela expressão 3.2, Mz representa o momento fletor contido no plano da tubulação e N seu esforço normal. W e A representam o módulo resistente e a área transversal da seção, calculados com a espessura comercial corroída ($t_{com} - c$). O fator i é um coeficiente que leva em conta o aumento da tensão devido ao tipo de mudança de geometria que possam ocorrer. Na Figura 1.2. (b), ilustra-se como a flexibilidade das conexões modifica as tensões devido a esse tipo de mudança; na Figura 1.2.(c), mostra-se também de forma esquemática os tipos de tensões atuantes numa tubulação. Os coeficientes i podem ser encontrados na Tabela D300 da norma ASME B31.3 (2006); este fator depende das características geométricas da conexão, como raio de curvatura, diâmetro do tubo e espessura de parede. É permitido utilizar um coeficiente de redução deste fator de 0,75, mas verificando que $(0,75.i > 1)$. Na Figura 1.2 (a), um esquema de conexão é apresentado, onde os momentos de torção e flexores no plano e fora do plano são indicados.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.1: (a) Esquema que apresenta a tubulação e os momentos atuantes sobre ela. (b) Esquema que apresenta o que corrige o fator de intensificação i , $i = S_{max}/(M/W)$, (c) esquema que mostra as tensões que podem atuar numa tubulação devido as cargas primarias.

3.3. TENSÕES SECUNDÁRIAS

As tensões secundárias são geradas por momentos fletores e torsões e ocorrem devido a restrições geométricas dos movimentos, gerados principalmente por dilatação térmica. A tensão secundária admissível S_a deve verificar as seguintes expressões determinadas pela norma ASME B31.3 (2006).

$$S_a = f(1.25S_c + 0.25S_h) \quad (3.7)$$

$$S_a < f[1.25(S_c + S_h) - S_L] \quad (3.8)$$

Onde f é um fator que leva em conta o efeito das cargas cíclicas, e S_c é a tensão admissível calculada a temperatura ambiente, e S_L é a tensão longitudinal devido a pressão interna mais cargas primarias.

A tensão secundária (S_e) é obtida a partir das tensões resultantes de flexão (S_b) e torção (S_t) que por sua vez são calculadas a partir dos momentos obtidos da análise devido a dilatação térmica, tendo como resultado a equação (3.8), que pode ser obtida com as equações (3.9) e (3.11).

$$S_e = \sqrt{(S_b)^2 + 4S_t} \quad (3.9)$$

Onde:

$$S_b = \frac{\sqrt{(i_1 M_1)^2 + (i_0 M_0)^2}}{z} \quad (3.10)$$

$$S_t = \frac{M_t}{2z} \quad (3.11)$$

3.4. TENSÕES OCASIONAIS

As tensões ocasionais são aquelas que ocorrem por um período de tempo considerado pequeno em relação à vida útil do sistema no qual estão instaladas, como a abertura de válvulas de segurança e eventos climáticos, como terremotos e ventos extremos. O procedimento de cálculo é o mesmo das tensões primárias no item 3.3, porém a sua tensão admissível S_o sofre um aumento de 33% em relação à tensão admissível para as tensões primárias, justamente por ser considerado que essas tensões ocorram ocasionalmente.

$$S_o = 1,33 S_h \quad (3.12)$$

4. APLICAÇÕES

No presente trabalho serão apresentadas duas aplicações, na primeira uma tubulação de traçado simples é analisada fazendo-se a comparação entre os Softwares TRIFLEX e MASTAN2, verificando se é possível chegar aos mesmos resultados de um software comercial específico em um software de aplicação geral. Na segunda aplicação é apresentado o cálculo de uma tubulação utilizando o Software TRIFLEX para ilustrar a sua potencialidade e as complexidades que surgem num problema real.

4.1. APLICAÇÃO 1: Verificação crítica dos Cálculos realizados com o Software Comercial TRIFLEX.

Para realizar essa verificação, considerou-se uma tubulação com três pontos de ancoragem, contendo um joelho e uma bifurcação em T. Nessa aplicação o objetivo é compreender o método de cálculo, sendo escolhido um modelo simples em que a tubulação se desenvolve em um plano. O traçado da tubulação estudada no TRIFLEX e no programa MASTAN2 é apresentado na Figura 4.1 (a) e (b), respectivamente. Observa-se que no modelo do MASTAN2, os nós utilizados são indicados. Ressalta-se que, tanto no joelho quanto na bifurcação em T, pequenos elementos são introduzidos para considerar a diminuição da rigidez nessas uniões.

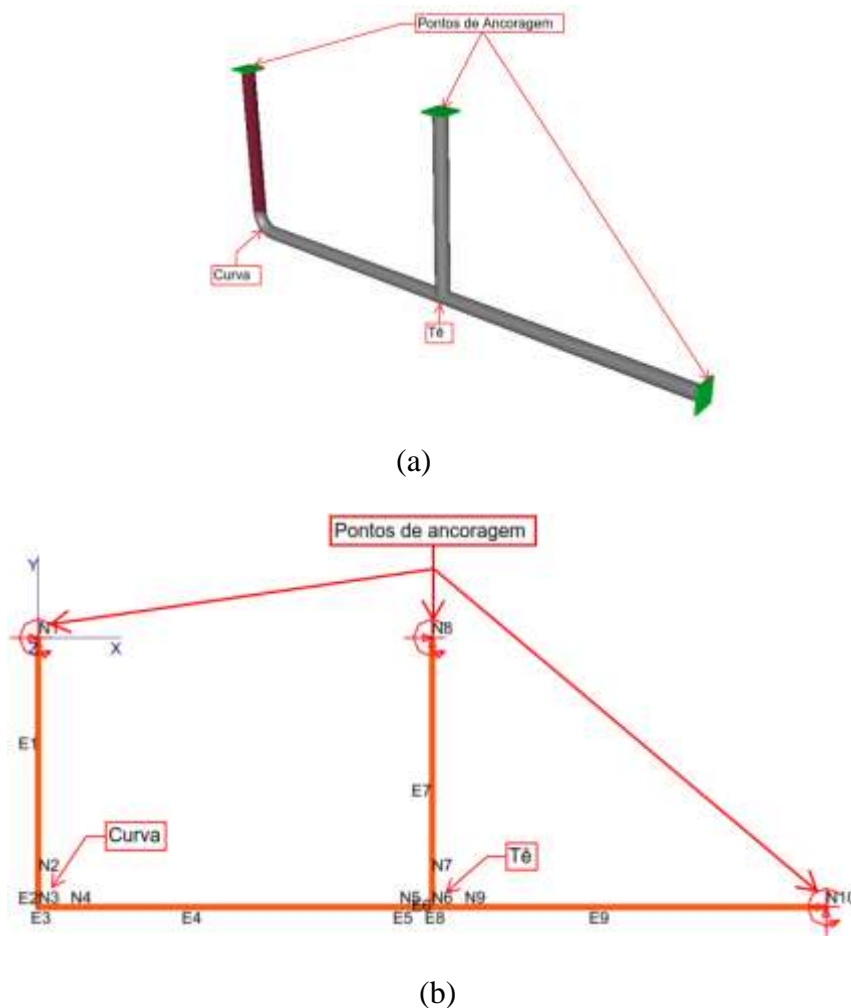


Figura 4.1 – Tubulação estudada. (a) o modelo realizado no TRIFLEX. (b) Modelo construído no programa MASTAN 2.

Na Tabela 4.1 se apresentam os dados de entrada que definem o cálculo da tubulação desta aplicação.

Tabela 4.1 - Dados de entrada de processo para modelo de cálculo

Temperatura (°C)	Pressão	Densidade relativa	Coefficiente de expansão térmica (°C ⁻¹)	Módulo de Elasticidade (Mpa)
121,00	29,16 kgf/cm ² 2.86Mpa	1,2	8,3x10 ⁻⁶	203401
Material	Diâmetro (mm)	Esp Parede comercial (mm)	Sobre Esp. Cor. (mm)	Eficiência da solda
API 5L, Grade B	273,1	9,27	3,2	100%

Estes dados correspondem a uma tubulação de diâmetro D=10" schedule 40, com as seguintes propriedades geométricas: A=7.68x10⁻² m², J=6.69x10⁻³m⁴, W=4,9x10⁻⁴m³. Para a temperatura de projeto considerada (121°C), a tensão admissível foi de Sh=137,90 MPa. No cenário de carga primária, será considerado o peso próprio da tubulação, levando em conta também a tubulação cheia de fluido com uma densidade 20% maior que a da água.

a) Verificação da espessura da tubulação adotada devido a pressão interna

Tendo os parâmetros de entrada das condições de processo, bem como as propriedades geométricas e do material da tubulação utilizada, é possível iniciar o processo de cálculo e posterior verificação dos resultados, realizando-o de forma analítica através da expressão (3.4) e utilizando diretamente o Software Comercial TRIFLEX

A primeira etapa consiste em calcular a espessura de parede mínima para verificar se a espessura de parede do tubo adotado atende aos requisitos exigidos. Essa verificação foi realizada analiticamente utilizando a expressão 3.4, somando a este valor a sobre espessura de corrosão. Ao realizar o cálculo utilizando o Software TRIFLEX, os resultados foram idênticos, como observado na Tabela 4.2. Esse valor idêntico foi obtido utilizando a tolerância de fabricação, critério estabelecido pela norma ASTM, o qual também é mencionado na norma ASME B31.3: "a espessura mínima da parede em qualquer ponto não deve ser inferior a 12,5% da espessura nominal da parede especificada". Este fator de tolerância leva em consideração possíveis excentricidades na fabricação do tubo e faz uma previsão conservativa de que, em qualquer ponto da tubulação, a espessura de parede não seja menor que a espessura mínima.

Tabela 4.2 – Cálculo da espessura de parede mínima

Software	Espessura de parede mínima
Triflex	6,81
Utilizando exp (3.4)	6,81

b) Verificação da tubulação adotada frente a cargas primarias

As tensões primárias foram calculadas utilizando os momentos obtidos pelo software MASTAN2, juntamente com a equação 3.6. Os nós a serem utilizados na comparação estão indicados na Figura 4.3 abaixo e seguem o mesmo padrão para MASTAN2 e para o TRIFLEX. Os resultados obtidos para momentos e tensões encontram-se na Tabela 4.3.

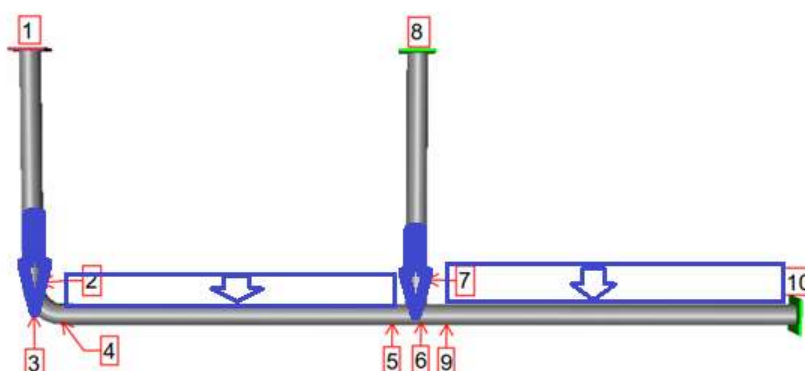


Figura 4.2 – Nós onde foram calculados os valores de momento fletores e tensões axiais dos softwares TRIFLEX e MASTAN2 no cenário de solicitações primarias.

As cargas distribuídas e concentradas foram obtidas utilizando o peso do tubo em quilogramas por metro, somado à densidade do fluido utilizado, com seu valor citado na Tabela 4.1, aplicada a toda a área livre do tubo. A força peso vertical aplicada nos nós 3 e 6 é a carga que representa o peso vertical acumulado, calculado utilizando o peso do fluido mais o peso do próprio tubo neste trecho vertical.

Tabela 4.3 – Resultados para momentos e tensões primárias obtidos nos softwares Mastan2 e TRIFLEX.

Nó	i	σ_l [Mpa]	Momentos fletores (N.m)			Tensões (Mpa)		
			Triflex	Mastan2	$(T_{rf}-Mas)/Mas) \times 100$	Triflex	Mastan2 e eq. (3.6)	$(T_{f-Mas)/Mas) \times 100$
1	1,33	31,60	500,7	412,1	21%	32,26	33,28	3%
2	2,37	31,60	693,5	679,6	2%	33,76	34,43	-2%
3	2,37	31,60	515,1	548,6	-6%	32,65	34,91	-7%
4	2,37	31,60	45,0	237,0	-81%	29,82	32,50	-9%
5	4,12	31,60	2676,0	1819,0	32%	54,42	43,11	20%
6	4,12	31,60	3053,8	3139,0	-3%	57,96	51,43	11%
7	4,12	31,60	377,7	359,0	-5%	32,12	35,23	-10%
8	1,33	31,60	184,9	220,0	19%	31,80	33,42	-5%
9	4,12	31,60	1690,3	1558,0	8%	33,02	32,44	2%
10	1,33	31,60	2408,0	2460,0	-2%	36,79	36,51	1%

Como foi possível verificar na Tabela 4.3, há pontos onde mesmo com valores de tensão muito próximos, os valores de momento divergem significativamente, como é o caso dos nós 1 e 10. Onde há o maior momento, há maior tensão, o fato de a variação não ser significativamente alta é que os momentos contribuem como uma parcela da tensão total, a qual é intensificada pelo fator de intensificação de tensão demonstrado também na tabela. Este valor de intensificação de tensão é o mesmo para os dois casos, significando assim que o valor de momento tem sua contribuição no aumento da tensão, porém este aumento não é de grande magnitude. Para estes casos em que o fator de intensificação de tensão é o mínimo possível, o fator de tensão longitudinal σ_L , calculado a partir da equação 3.2 contribui como a parcela mais significativa do resultado de tensão primária obtido.

As diferenças dos momentos levantadas em vários pontos da tubulação como se ilustra na Tabela 4.3 devem ser investigada. Esta diferença provavelmente se deva a diversos coeficientes de flexibilidade utilizados nos dois softwares testados. As tensões devido aos esforços normais não são consideradas aqui por serem de importância insignificativa.

c) Verificação da tubulação adotada frente a cargas secundárias

As tensões secundárias foram calculadas utilizando as equações 3.9, 3.10 e 3.11 utilizando os momentos retirados do MASTAN2 para cálculo analítico e obtidos computacionalmente utilizando o TRIFLEX com os mesmos dados de entrada citados no item 4.1. Foi possível verificar que existem diferenças significativas de momentos e tensões

secundárias entre análise no MASTAN2 e TRIFLEX. As diferenças entre os momentos obtidos deve-se novamente ao fato da construção de ambos os softwares onde o Triflex apresenta os parâmetros de flexibilidade de conexões e elementos automaticamente. Já no Mastan 2 estes parâmetros são de difícil obtenção e aplicação.

Os valores de momentos fletores assim como os de tensão encontrados nos dois softwares encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados para momentos e tensões secundárias obtidos nos softwares Mastan2 e Triflex

Nó	i	Momentos fletores (N.m)			Tensões (Mpa)		
		Triflex	Mastan2	(Trf-Mas)/Mas) x100	Triflex	Mastan2 e expr. (3.9)	(Trf-Mas)/Mas) x100
1	1,00	34639	33830	2%	71,18	69,04	3%
2	2,37	5337	3703	30%	26,29	17,91	32%
3	2,37	8463	8828	-4%	42,50	42,64	<1%
4	2,37	8908	7428	16%	44,80	35,88	20%
5	4,12	8719	6854	21%	75,03	57,62	23%
6	4,12	11280	8253	27%	97,87	94,83	3%
7	4,12	16171	16300	-1%	136,09	137,03	<1%
8	1,00	24685	25260	-2%	50,50	51,55	-2%
9	4,12	13030	11650	11%	113,05	97,94	13%
10	1,00	11027	11470	4%	25,99	23,41	10%

Neste caso também ocorreram divergências significativas nos valores dos momentos comparando-se os dois softwares mencionados, como se observa na Tabela 4.4. Este fator de divergência deveria ser investigado, suspeita-se que a flexibilidade das conexões seja responsável pelas divergências

4.2. APLICAÇÃO 2: CASO REAL DE CARREGAMENTO

O Ativo de Processamento de Cabiúnas (APCAB) localizado na cidade de Macaé, Rio de Janeiro – Brasil faz o processamento de condensado de gás natural. Isso significa que essa unidade da Petrobras faz a separação das impurezas presentes no gás natural extraído do solo.

Dentro deste ativo há diversas unidades em que cada uma faz uma etapa deste processamento. Na U-298 do APCAB encontram-se a unidade de recuperação de gás residual, no qual há equipamentos responsáveis por pegar este gás que como o nome propriamente diz, estava como resíduo de outras operações e fazer com que volte ao processo, assim sendo separado das impurezas e posteriormente vendido como produto.

Um dos equipamentos responsáveis por fazer esta readmissão de gás residual para o processo é um compressor alternativo com duas garrafas de sucção, o de primeiro e segundo

estágio. Estas garrafas de sucção podem ser consideradas como vasos de pressão segundo a NR-13 (2022), e segundo o item 13.5.1.3 desta referida norma “todos os vasos de pressão devem ser dotados de válvula de segurança com pressão de abertura ajustada em valor igual ou inferior a pressão máxima de trabalho permitida”.

Verificou-se então que o sistema de alívio de pressão via válvula de segurança das garrafas de sucção de um compressor de ar localizado na U-298 estava obsoleto devido a uma válvula de segurança atender duas garrafas de sucção sendo que há bloqueios entre estas duas garrafas e a válvula de segurança, como indica o croqui do fluxograma no Anexo II – Figura (a). Como esse sistema de alívio era considerado salvaguarda dos compressores, solicitou-se a utilização de uma válvula de segurança para cada garrafa de sucção sem haver bloqueios entre eles, como poder ser observado no Anexo II – Figura (b). No cenário de alteração de tubulações ligadas a compressores e instalação de válvula de segurança é necessário que seja realizada análise de flexibilidade computacional do sistema de tubulação [Norma N-0057 – Petrobras].

Para verificar o espaço dentro da instalação na situação atual, foi solicitada a realização de escaneamento da área, mapeando assim os possíveis pontos de apoio para que não houvesse vãos grandes entre os suportes e o arranjo ficasse com flexibilidade adequada. No Anexo III – figuras (a) e (b) estão demonstradas imagens desse escaneamento.

Os dados de temperatura, pressão e massa específica das linhas em análise estavam definidos e encontram-se na Tabela 4.5

Tabela 4.5 – Dados de Processo das tubulações analisadas

Número da Linha	Dados de projeto		Teste Hidrostático		Massa Espec. (kgf/m ³)
	T1/T2 (°C)	P1/P2 (MPa)	T (°C)	HP (Mpa)	
1	15/137	1,37/1,60	21	2,35	3,0
2	25/65	0,05/0,49	21	0,74	3,0
3	15/65	1,37/1,60	21	2,65	3,0
4	25/65	0,05/0,49	21	0,74	3,0

Onde P1 é o valor da pressão para o caso de operação, P2 é o valor de pressão para o caso de projeto, e HP é o valor de pressão para teste hidrostático. Da mesma forma, T1 é a temperatura para o caso de operação, e T2 é a temperatura para o caso de projeto.

Os dados geométricos também foram definidos pela especificação de material adotada, denominada Bm, e estão listados na tabela 4.6. Um recorte da especificação Bm pode ser encontrado no Anexo I.

Tabela 4.6 – Dados Geométricos da tubulação.

Material	DN (mm)	Espessura de Parede (mm)	Eficiência de solda	Sobre-espessura de corrosão (mm)
AC ASTM A106 Gr B.	323,9	6,35	1,0	1,6
AC ASTM A106 Gr B.	168,3	7,11	1,0	1,6
AC ASTM A106 Gr B.	114,3	6,02	1,0	1,6
AC ASTM A106 Gr B.	88,9	5,49	1,0	1,6

Na Tabela 4.7 encontram-se as tensões admissíveis para cada caso de carregamento necessário na análise devido ao material empregado.

Tabela 4.7 – Tensões Admissíveis do Material

Temperaturas (°C)	Sc (kgf/cm ²)	Sh (kgf/cm ²)	Sa (kgf/cm ²)	Sy (kgf/cm ²)	So (kgf/cm ²)
15/25/65/137	137,9	137,9	206,84	137,9	183,4

A tensão admissível varia de caso a caso e será utilizada conforme seu nome sugere em relação aos casos de carregamento citados abaixo: Para os casos de tensão primária, será utilizado o Sc; para tensões secundárias, será utilizado o Sa; para teste hidrostático, Sy; e para forças ocasionais, será utilizado o S₀, que, como citado anteriormente, representa 133% da Sh.

- 1.0 – Caso de operação – tensões primárias e secundárias = (W+P1+T1)
- 1.1 - Caso de operação para tensões primárias = (W+P1)
- 1.2 - Caso de operação para tensões secundárias = (T1)
- 2.0 – Caso de projeto – tensões primárias e secundárias = (W+P2+T2)
- 2.1 - Caso de projeto para tensões primárias = (W+P2)
- 2.2 - Caso de projeto para tensões secundárias = (T2)
- 3.0 – Caso de operação da PSV - tensões primárias e secundárias = (W+WL+P2+T2)
- 3.1 – Caso de operação da PSV para tensões primárias = (W+WL+P2)
- 4.0 – Caso de teste hidrostático para tensões primárias = (WW+HP)

Onde WW representa o peso da tubulação cheia de água e WL o cenário da abertura da PSV. Definidos os casos de carregamento, foram consideradas as condições de contorno do arranjo em questão. As condições de contorno são importantes para determinar o quanto a tubulação em análise é afetada pelos arranjos conectados a ela. Boas condições de contorno são representadas quando essas estão isoladas do arranjo em análise, impedindo que outras tubulações influenciem no cálculo de tensões e deslocamentos da tubulação analisada.

Dito isso, foi possível definir quatro condições de contorno suficientes para isolar o sistema. Como a tubulação em análise é uma linha de alívio de uma garrafa de sucção de um compressor e esse compressor está fixo ao chão, foi posicionada uma âncora juntamente ao compressor como uma das condições de contorno. A linha da garrafa de sucção (3) apresenta restrições horizontais nos dois eixos, sendo assim uma condição de contorno completa. A linha (2) de descarga da PSV se conecta à linha (4) de tocha, onde em uma extremidade está o final dela, com flange cego, e do outro encontra-se restrições nos dois sentidos horizontais, onde foi definida a última condição de contorno do sistema. Uma imagem do modelo com suas condições de contorno pode ser observada na Figura 4.4.

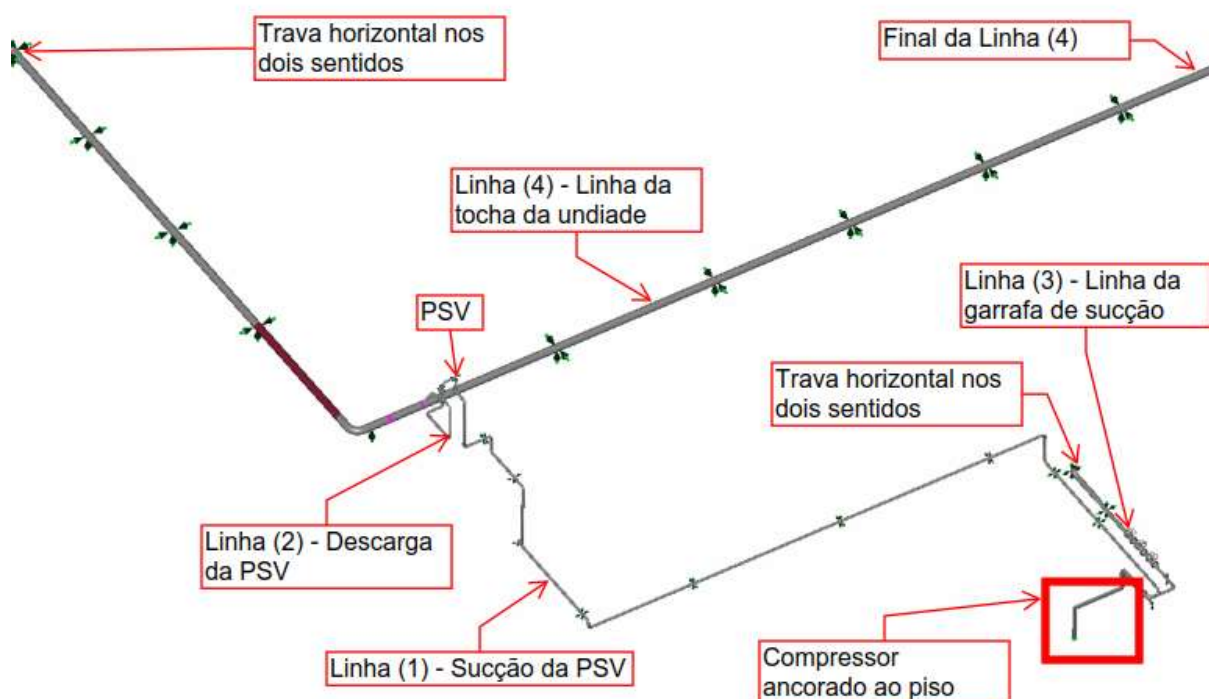


Figura 4.3 – Modelo de Cálculo no Software TRIFLEX e suas condições de contorno

Durante a análise de flexibilidade, foram consideradas duas alterações no tipo de suporte para minimizar as tensões.

- Utilizar grampo sem folga em todos os suportes possíveis. Como estas linhas são linhas de alívio de compressores, foi recomendado a utilização de suportes com grampo para evitar vibrações na tubulação provenientes do compressor. No Anexo IV – Figura (a) encontram-se os pontos onde foi solicitado posicionamento dos grampos e nas figuras (b) e (c) exemplos desse tipo de suporte
- O suporte da linha de entrada da válvula de segurança ser um pedestal ancorado ao piso para evitar que a força de abertura da válvula de segurança se propague para o restante do arranjo, assim como evitar que o seu deslocamento cause tensões elevadas.

Na Tabela 4.8 abaixo seguem os resultados de maior magnitude obtidos para os critérios de espessura mínima de parede, tensões primárias, tensões secundárias e flecha máxima.

Tabela 4.8 – Resultados da análise estática

Caso de Carregamento	Espessura mínima (mm)	Tensão primária (MPa)	Tensão Secundária (MPa)	Flecha máxima (mm)
1.0 (OPE)	5,01	49,82	8,22	1,51
2.0 (PRO)	5,26	52,46	106,04	3,69
3.0 (OCC)	5,26	95,31	106,04	3,69

Os resultados de espessura mínima apresentaram valores satisfatórios e coerentes, visto que seus valores de espessura crescem com o aumento da pressão interna do tubo, e ambas as espessuras mínimas estão abaixo das espessuras de parede fornecidas pela especificação de tubulação da norma N-0076 da Petrobrás.

Os valores de tensão primária admissível estão todos abaixo da tensão admissível do material para este tipo de sollicitação. No caso 3.0 (OCC), a tensão primária apresentou um aumento em torno de 80%. Esses valores são resultado da força de abertura da PSV, indicando que mesmo com essa força, as tensões permanecem abaixo das admissíveis, e o suporte ancorado na linha de sucção da PSV absorve essa força de abertura com êxito.

As tensões secundárias são quase nulas no caso 1.0 (OPE) devido às temperaturas baixas, estando muito próximas à temperatura de montagem considerada. Nos casos 2.0 (PRO) e 3.0 (OCC), essas tensões aumentam acompanhando o significativo aumento de temperatura e a consequente maior dilatação da tubulação. Essa tensão ainda está próxima da metade da tensão admissível, indicando que o sistema apresenta uma flexibilidade adequada para este arranjo. Os valores de flecha máxima estão abaixo dos 6 milímetros recomendados pela norma N-0057, indicando novamente uma boa suportação do arranjo.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, exploramos as capacidades do programa TRIFLEX, inicialmente aplicando-o a uma tubulação de traçado simples, comparando os resultados com o software de análise estrutural MASTAN2 e fórmulas analíticas de normas. Os resultados obtidos para a determinação da espessura, bem como a verificação frente a cargas primárias e secundárias, foram satisfatórios. Em uma segunda aplicação, realizamos a análise de flexibilidade em uma tubulação real, destacando as potencialidades do software comercial utilizado.

A principal conclusão ressalta a importância de os usuários realizarem verificações críticas, seja por meio de outros softwares ou de maneira analítica, a fim de manter o controle sobre o projeto da estrutura em análise. É crucial cruzar informações como medida de segurança em sistemas de alta complexidade, atingindo esse objetivo por meio de análises com softwares que adotam metodologias diversas. Na primeira aplicação, foram observadas diferenças significativas tanto no cálculo dos momentos das cargas primárias quanto secundárias. Uma investigação se faz necessária para explicar a origem dessas discrepâncias.

Na aplicação dos conceitos de análise de flexibilidade em um caso real, foi possível verificar que compreender os conceitos de forma mais intrínseca permite encontrar soluções de maneira mais rápida e clara. Quanto aos resultados de cálculo obtidos neste modelo, é possível afirmar que:

- O arranjo de flexibilidade apresentou espessura de parede superior a espessura de parede mínima em todos os pontos do sistema;
- As tensões primárias obtidas estão consideravelmente abaixo do admissível pelo material, assim como a tensão primária ocasional gerada pela abertura da PSV;
- As tensões secundárias estão próximas a metade da tensão admissível para este critério de dilatação, confirmando uma flexibilidade adequada;
- Os valores de flecha estão baixos quando comparado com os valores recomendados pela norma Petrobrás N-0057.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bailona, B. A.: Porto, F. S. A.: Camargo, J. R. “**Análise de Tensões em Tubulações Industriais**”, Ltc, 1ª edição, 2006

NR-13 – “Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações”

Peng, L. C. and Peng, T. L. “**Pipe Stress Engineering**”, ASME Press (American Society of Mechanical Engineers); Houston, Texas, USA, 1st edition, 2009

PETROBRAS N-0057 – “**Projeto Mecânico de Tubulações Industriais**” Rev. H

PETROBRAS N-0076 – “**Materiais de Tubulação para Instalações de Refino e Transporte**” Rev. H

Telles, P. C. S. “**Tubulações Industriais – Cálculo**”, Ltc, 9ª edição, 2012

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME) B31.3. “**Code for Pressure Piping**”. 2006

Anexo I – Recorte da Norma N-0076 – Materiais de tubulação.

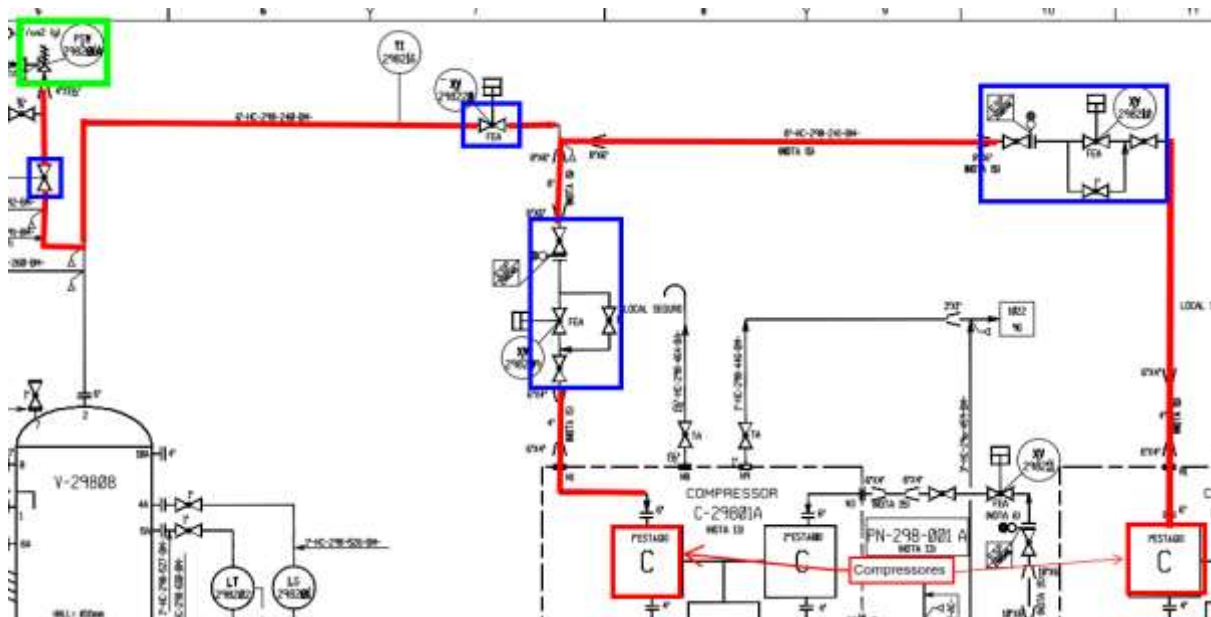
-PUBLICO-

BR PETROBRAS	N-76	REV. J	Padronização :	Bm
MATERIAIS DE TUBULAÇÃO			Data: 02 / 2020	

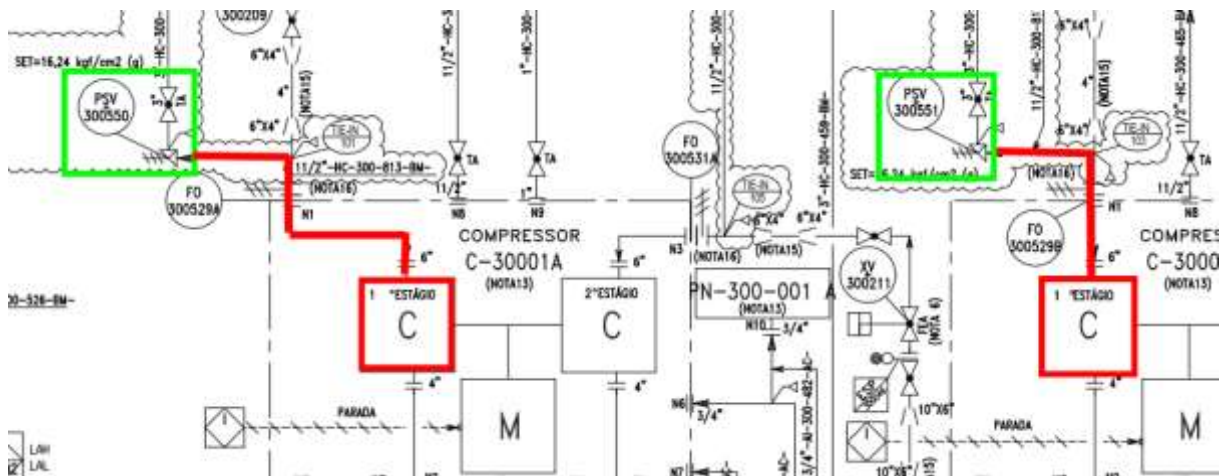
NORMA BÁSICA ASME B31.3	CLASSE 150 FR	MATERIAL DO TUBO Aço-carbono Acalvado	TEMP. MÁXIMA: 400 °C TEMP. MÍNIMA: -29 °C	CORROSÃO ADM. 1,6 mm			
SERVIÇO: Hidrocarbonetos em baixas temperaturas.							
MAT.	DIÂMETRO (NPS)		CLASSE OU ESP.	EXTR.	DESCRIÇÃO	CÓDIGO	
	DE	ATE					
VÁLVULAS (Anexo A)	BLOQUEIO (73)	1/2	1 1/2	800	ES	VGA de AFO ASTM A105, Trim G (cobtur. AISI 304, sede Stellite, haste 17-4PH), HARE, CA, API 602.	VGA-800-13
		2	10	150	FLG FR	VGA de AFO ASTM A216 Gr WCB, Trim G (cobtur. AISI 304, sede Stellite, haste 17-4PH), HARE, CA, API 600.	VGA-150-11
		12	24	150	FLG FR	Idea. c/engr. de redução.	VGA-150-11
		30	-	150	FLG FR	Idea. API 600, ASME B16.47.	VGA-150-11
		1/2	1 1/2	800	ES	VES de AFO ASTM A105, Trim R (cobtur. AISI 316, sede resil., haste 17-4PH), alavanca, testada a fogo, ISO 17292. (90)	VES-800-03
		2	4	150	FLG FR	VES de AFO ASTM A216 Gr WCB, Trim R (cobtur. AISI 316, sede resil., haste 17-4PH), alavanca, API 6D. (90)	VES-150-02
	6	30	150	FLG FR	Idea. c/engr. de redução. (90)	VES-150-02	
	REGULAÇÃO	1/2	1 1/2	800	ES	VGL de AFO ASTM A105, Trim G (cobtur. AISI 304, sede Stellite, haste 17-4PH), HARE, CA, API 602.	VGL-800-13
		2	6	150	FLG FR	VGL de AFO ASTM A216 Gr WCB, Trim G (cobtur. AISI 304, sede Stellite, haste 17-4PH), HARE, CA, BS 1873.	VGL-150-11
		8	12	150	FLG FR	Idea. c/engr. de redução.	VGL-150-11
	RETENÇÃO	1/2	1 1/2	800	ES	VRE pistão de AFO ASTM A105, Trim C (cobtur. AISI 304, sede Stellite), TAP, API 602.	VRE-800-03
		2	24	150	FLG FR	VRE portinhola de AFO ASTM A216 Gr WCB, Trim G (cobtur. AISI 304, sede Stellite, eixo 17-4PH), TAP, BS 1868.	VRE-150-12
TUBOS (Anexo B)	1/2	1 1/2	SCH 160	PL	AC ASTM A106 Gr B, SC, ASME B36.10. (70)	T-103	
	2	-	SCH 80	PC	Idea.	T-103	
	3	6	SCH 40	PC	Idea.	T-103	
	8	12	SCH 20	PC	Idea.	T-103	
	14	-	0.250"	PC	Idea.	T-103	
	16	24	0.250"	PC	AC ASTM A672 Gr C60 CL 22, CC, ASME B36.10.	T-104	
	26	30	0.375"	PC	Idea. (344)	T-104	
NIPLES (Anexo D)	1/2	1 1/2	SCH 160	REP/UER	Niple Reto, ASTM A106 Gr B, ASTM A733. (82)	N-02	
	1/2	1 1/2	SCH 160	REP	Niple Red. C., ASTM A234 Gr WPB, MSS SP-95.	N-03	
	1/2	1 1/2	SCH 160	REP	Niple Red. E., Iden, MSS SP-95.	N-04	
CONEXÕES (Anexo C)	1/2	1 1/2	6000	ES	AFO ASTM A105, ASME B16.11/MSS SP-97. (82)	COX-02	
	2	30	(8)	PC	AC ASTM A234 Gr WPB, ASME B16.9. (8)(82)	COX-03	
	2	30	150	FR	Peças de inserção entre Flanges, AC ASTM A516 Gr 60, N-120. (82)	COX-03	
FLANGES (Anexo F)	1/2	1 1/2	150	ES FR	AFO ASTM A105, ASME B16.5. (8)	F-150-J2	
	2	24	150	PE FR	Idea. (8)	F-150-K2	
	26	30	150	PE FR	Idea, ASME B16.47 serie A. (8)	F-150-K2	
	1/2	24	150	CE FR	Idea, ASME B16.5.	F-150-L2	
	26	30	150	CE FR	Idea, ASME B16.47 serie A.	F-150-L2	
	2	24	300	OR FR	Idea, ASME B16.36. (8)(283)	F-300-M2	
PARAF. (Anexo E)	1/2	30	-	-	Tipo estojo, AL ASTM A193 Gr B7, parcas ASTM A194 Gr 2H, Hex, série pesada, ASME B16.5.	P-150-01	
	2	24	-	-	Idea. (283)	P-300-01	
JUNTAS (Anexo G)	1/2	30	4.4 mm	FR	Espiralada, AISI 304, enchia, grafite flexível, anel ext. AC/int. AISI 304, ASME B16.20.	J-150-EE	
	2	24	4.4 mm	FR	Idea. (283)	J-300-EE	

Anexo I – Figura (a) – Recorte da especificação de material “Bm” utilizada no projeto.

Anexo II – Fluxogramas de processo (a) antes das alterações do projeto (b) após alterações do projeto

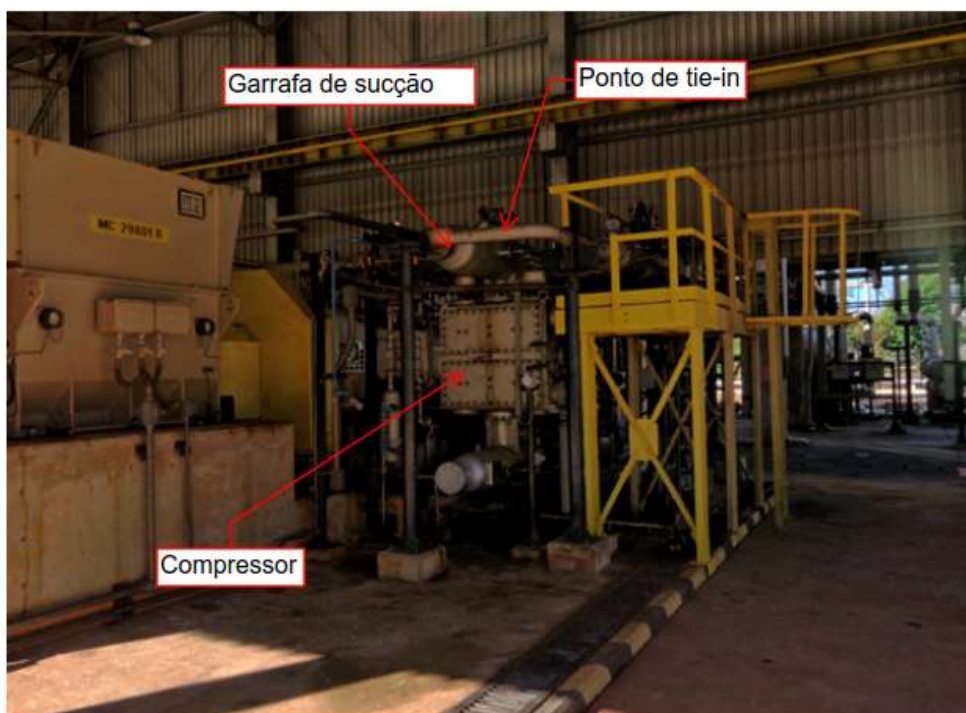


Anexo II – Figura (a) – Encaminhamento da linha de alívio de pressão das garrafas de sucção de primeiro estágio anterior a mudança de arranjo. Em verde a PSV, em vermelho o encaminhamento atual e compressores e em azul os bloqueios.



Anexo II – Figura (b) – Encaminhamento da linha de alívio de pressão das garrafas de sucção de primeiro estágio após a mudança de arranjo. Em verde a PSV, em vermelho o encaminhamento atual e os compressores.

Anexo III – Anexo com imagens do scanner realizado na área

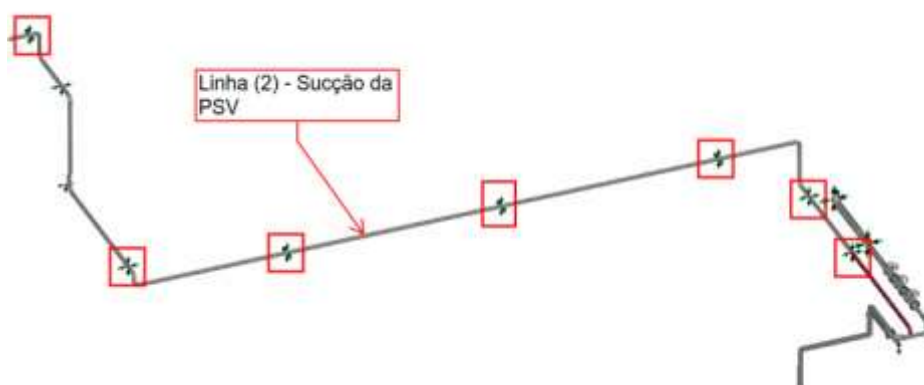


Anexo III – Figura (a) – Imagem de scanner 3D onde aparecem o compressor, a garrafa de sucção e o ponto de intervenção do projeto, chamado de tie-in



Anexo III – Figura (b) – Imagem de scanner 3D onde aparece o encaminhamento da linha onde será o tie-in e possíveis pontos de suportaço

Anexo IV – Ajustes propostos na suportação



Anexo IV – Figura (a) – Solicitação de grampos sem folga nos pontos demonstrados



Anexo IV – Figura (b) – Exemplo de grampo sem folga