

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Dimensionamento mecânico de tubulações:
Projeto normatizado, análise de flexibilidade e esforços atuantes.

por

Renan Pauletto

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.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

Porto Alegre, dezembro de 2012

DIMENSIONAMENTO MECÂNICO DE TUBULAÇÕES: PROJETO NORMATIZADO,
ANÁLISE DE FLEXIBILIDADE E ESFORÇOS ATUANTES.

Por

Renan Pauletto

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
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 17, dezembro de 2012.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais Pedro Luiz Pauletto e Ivanete Segalin Pauletto pelo amor e apoio incondicional além do incentivo ao estudo em todos seus níveis.

Aos meus tios João Paulo Dall`Agnol e Lizete Segalin Dall`Agnol por se tornarem segundos pais desde a chegada a Porto Alegre para realização do curso de graduação e a todo resto de minha família que estiveram sempre ao meu lado.

A toda família Bassin, em especial a Letícia por todo apoio, força, companheirismo e tudo que representa, tal como o Bohr nosso companheiro de estudos.

Aos amigos de infância, colégio, faculdade, do Rio Grande do Sul, do Rio de Janeiro e Paraíba pelo apoio, ajuda, companheirismo e amizade plena.

Ao professor Ignácio Iturrioz pelo apoio técnico ao longo do trabalho e interface com o meio.

A universidade e alguns seletos professores pelo conhecimento e conteúdo transmitido e desenvolvido.

PAULETTO, R. (P. R.) **Dimensionamento mecânico de tubulações: Projeto normatizado, análise de flexibilidade e esforços atuantes.** 2012. 20. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

Com a crescente demanda e investimentos na indústria de processo, sistemas de tubulações são utilizados em larga escala para viabilizar produções, armazenamento e distribuição de produtos. O dimensionamento de tubulações implica levar em conta a distribuição da flexibilidade do equipamento para que não se produzam grandes esforços em outros equipamentos aos quais a tubulação pode estar conectada. Observando esse contexto, o presente trabalho apresenta o estudo de uma linha com condições severas de operação por ser conectada a um forno com alta temperatura, necessitando assim de um arranjo com resistência e flexibilidade suficientes para distribuir os esforços atuantes sem transmiti-los com valores elevados aos equipamentos conectados a tubulação como bocais, curvas e suportes. Para realizar o projeto da tubulação foram utilizadas as normas ASME B31.3 (Code for Pressure Piping) e PETROBRÁS N-1673 (Critérios de Cálculo Mecânico de Tubulação). Como ferramenta auxiliar de análise foi empregado o software CAESAR II sistema de cálculo estrutural empregado costumeiramente no dimensionamento de tubulações. Durante o trabalho são discutidos os principais problemas apresentados no projeto estudado e as formas mais adequadas de solução.

PALAVRAS-CHAVE: (Flexibilidade em tubulações, Esforços em bocais, Tensões secundárias)

PAULETTO, R. (P. R.) **Mechanical dimensioning of pipes: standardized project, flexibility analysis and acting efforts.** 2012. 20. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

With the growing demand and investment in the process industry, piping systems are widely used to make production, storage and distribution of products feasible. The dimensioning of pipes entails taking into account the distribution of flexibility so that the equipment does not produce great efforts on other equipment to which the pipe can be connected. Observing this context, this paper presents the study of a line with severe operating conditions for being attached to a furnace with high temperature, thus requiring an arrangement with sufficient strength and flexibility to withstand stresses without transmitting them with high values to the attached equipment such as nozzles, bends and braces. To perform the project the standards ASME B31.1 (Code for Pressure Piping) and PETROBRAS N-1673 (Criteria for Calculation of Mechanical Piping) were used. As an auxiliary tool of analysis the software CAESAR II, a system customarily used in the structural dimensioning of pipes, was used. In this work the major issues presented in the project are discussed as well as the most suitable ways of solution.

KEYWORDS: (Piping Flexibility, Nozzle Efforts, Secondary stress)

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	1
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
3.2. TENSÕES PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS	2
3.3. TENSÕES ADMISSÍVEIS	2
3.4. SUPORTES EM TUBULAÇÕES.....	3
3.5. ANÁLISE DE FLEXIBILIDADE	4
3.6. FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO.....	4
4. METODOLOGIA.....	4
5. APLICAÇÃO.....	4
5.1. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ESTUDO	4
5.2. CONDIÇÕES DA TUBULAÇÃO.....	5
5.3. CONDIÇÕES E CASOS DE CARREGAMENTO	7
6. ANÁLISE DE FLEXIBILIDADE – AJUSTE DOS ARRANJOS DA TUBULAÇÃO	7
6.1. CONFIGURAÇÃO A.....	8
6.2. CONFIGURAÇÃO B.....	8
6.3. CONFIGURAÇÃO C.....	9
6.4. CONFIGURAÇÃO D.....	9
6.5. CONFIGURAÇÃO E.....	10
7. RESULTADOS.....	10
7.1. OBSERVAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS	10
7.2. TRABALHO DE ANCORAGEM – CONFIGURAÇÃO E.....	12
7.3. CONFIGURAÇÃO E – MODELO FINAL.....	13
7.3.1. ESFORÇOS NOS BOCAIS	13
7.3.2. TENSÕES ATUANTES	14
7.4. ANÁLISE MODAL.....	14
8. CONCLUSÕES.....	15
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
Anexo I.....	16
Apêndice I.....	17
Apêndice II.....	18
Apêndice III.....	19
Apêndice IV	20

LISTA DE ABREVIATURAS

PR	Casos de carga em condições de projeto	-
OP	Casos de carga em condições de operação	-
Esp.	Espessura da tubulação	in
Esp. Cor.	Espessura extra para corrosão	mm

LISTA DE SÍMBOLOS

F_x	Força na direção x do eixo de coordenadas do software Caesar II ®	N
F_y	Força na direção y do eixo de coordenadas do software Caesar II ®	N
F_z	Força na direção z do eixo de coordenadas do software Caesar II ®	N
M_x	Momento na direção x do eixo de coordenadas do software Caesar II ®	N.m
M_y	Momento na direção y do eixo de coordenadas do software Caesar II ®	N.m
M_z	Momento na direção z do eixo de coordenadas do software Caesar II ®	N.m
D_x	Deslocamento na direção x do eixo de coordenadas do software Caesar II ®	mm
D_y	Deslocamento na direção y do eixo de coordenadas do software Caesar II ®	mm
D_z	Deslocamento na direção z do eixo de coordenadas do software Caesar II ®	mm
f	Fator de correção para fadiga térmica	-
S_1	Máxima tensão principal	kPa
S_3	Mínima tensão principal	kPa
S_h	Tensão admissível a quente	kPa
S_a	Tensão admissível devido a dilatação	kPa
S_c	Tensão admissível a frio	kPa
S_y	Tensão admissível em teste hidrostático	kPa
S_{Tp}	Tensão resultante do critério de Tresca	kPa

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.1- Forno reformador da refinaria Landulpho Alves localizada na Bahia sem a tubulação conectada.....	5
Figura 5.2 - Modelagem do forno reformador da refinaria Landulpho Alves conectado com a tubulação a ser analisada.....	5
Figura 6.1 - Configuração A com as restrições de deslocamentos e angulações	8
Figura 6.2 - Configuração B com as restrições de deslocamentos e angulações	8
Figura 6.3 - Configuração C com as restrições de deslocamentos e angulações	9
Figura 6.4 - Configuração D com as restrições de deslocamentos e angulações	9
Figura 7.1 - Deformadas das configurações da tubulação (ampliação 15 vezes)	10
Figura 7.2 - Posicionamento da trava longitudinal formando a ancoragem de forças variando $dx = 250\text{mm}$ a cada ponto	12

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1 - Dados de processo do fluido e condições de temperatura e pressão	5
Tabela 5.2 - Materiais, Espessuras e tensões admissíveis.....	6
Tabela 5.3 - Esforços admissíveis nos bocais	6
Tabela 5.4 - Deslocamentos nos bocais.....	6
Tabela 5.5 - Combinações e casos de carregamentos.....	7
Tabela 7.1 - Esforços nos bocais nas configurações A, B, C e D	11
Tabela 7.2 - Esforços variando a posição da trava longitudinal a tubulação que forma a ancoragem conforme a figura 7.2.....	12
Tabela 7.3 - Lista dos esforços nos bocais para a configuração E	13
Tabela 7.4 - Máximas tensões atuantes para a configuração E.....	14
Tabela 7.5 - Primeiras duas frequências naturais das configurações D e E	14

1. INTRODUÇÃO

Denomina-se tubulações o conjunto de tubos e seus diversos acessórios constituintes, como válvulas, medidores de vazão, purgadores, conectores, entre outros. O emprego de tubulações pelo homem antecede provavelmente a história escrita; foram descobertos vestígios ou redes completas em diversas regiões como China antiga, Babilônia, entre outras. Os primeiros tubos metálicos eram feitos de chumbo, utilizados principalmente em Roma para água quente. Os tubos de ferro fundido começaram a ser produzidos na Europa central, por volta do século XV principalmente para água em palácios. Os tubos metálicos utilizados atualmente foram iniciados em cerca de 1825 na Inglaterra. Só em 1886, com a patente dos irmãos Mannesmann foi possível a fabricação de tubos sem costura viavelmente, muito necessários na época para resistirem aos vapores de alta pressão [Peng, 2009]

Com as recentes descobertas petrolíferas no Brasil, principalmente do pré-sal, a indústria de processo vem recebendo investimentos técnicos e econômicos muito significativos, tendo como perspectiva a triplicação da captação de óleo e gás até 2017. Para o processo de combustíveis fósseis e sua distribuição, são necessários equipamentos específicos e sistemas de transmissão seguros; sendo os realizados por tubulações mais eficientes e comuns.

Em uma planta petroquímica arranjos podem ser vistos em várias direções e elevações. Constituem de 25% a 35% dos materiais de uma planta, 30% a 40% do tempo de montagem e cerca de 50% do tempo de projeto [Peng, 2009]. Como o sistema envolve diversos componentes, falhas localizadas podem levar a ruína total de uma planta petroquímica. Para o transporte do produto final ou subprodutos tem-se uma gama de diversos quilômetros de tubulações, tal como para a extração em altas profundidades e diversas outras aplicações em geral. Desse modo faz-se necessário estudos para contribuir com o desenvolvimento de tubulações industriais e conseqüentemente elevar o potencial energético brasileiro.

2. OBJETIVOS

- Objetivo Geral

Aplicar critérios de análise estrutural na avaliação da flexibilidade de uma tubulação de grande porte de modo que os esforços na tubulação e seus componentes sejam inferiores a valores admissíveis normatizados. Desse modo são apresentadas etapas importantes para o dimensionamento de redes de tubulações.

- Objetivos específicos:

- Ilustrar as vantagens em realizar cálculos de flexibilidade utilizando como ferramenta auxiliar um software de análise.

- Estudar a metodologia comumente utilizada por empresas de engenharia para o dimensionamento de tubulações industriais.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

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 [Telles, 2006].

As principais cargas em tubulações são: pressão interna exercida pelo fluido; pressão externa (tubulações em ambientes sob pressão ou operando com vácuo); peso próprio da tubulação, do fluido contido, dos acessórios, válvulas, água para teste hidrostático, peso de outros tubos, isolamentos, plataformas e estruturas apoiadas nos tubos, entre outros; ações dinâmicas derivadas de movimento do fluido contido (golpes de aríete, acelerações, impactos); ações dinâmicas externas (ventos, terremotos, granizo); vibrações; dilatações térmicas (ou contrações) da própria tubulação ou de equipamentos ligados como bocais, turbinas, entre outros.

Uma tubulação deve ter uma configuração de flexibilidade que distribua os carregamentos ao longo dos componentes sem concentrar esforços em pontos de menor resistência, além de poder se deformar devido a variações de temperatura e movimento de outros equipamentos sem produzir esforços ou deslocamentos excessivos na mesma tubulação e em bocais e equipamentos aos quais ela está conectada.

O projeto de suportes de tubulações tem evoluído enormemente nos últimos anos, atualmente podem ser usadas guias, travas, ancoragens, apoios em diversas direções, suportes de mola com cargas constantes ou variáveis, pendurais, conexões a outros dutos, tal como utilizar diferentes materiais no contato com a tubulação manipulando assim os esforços decorrentes do atrito, que podem ser de auxílio ou dificuldade em conter deformações excessivas.

3.2. TENSÕES PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS

Segundo as normas ASME B31.3 e PETROBRÁS N-1673, as tensões atuantes em tubulações são divididas basicamente em dois grupos:

a) Tensões Primárias: oriundas de carregamentos como pressão, peso-próprio, vento; gerando esforços mecânicos de tração, compressão, flexão, torção; cuja variação do carregamento tem interação direta com a rigidez estrutural, afetando o nível de tensões internas do tubo.

b) Tensões Secundárias são as resultantes de restrições geométricas do sistema, que impedem ou limitam a livre dilatação, tal como de deslocamentos de equipamentos que geram esforços na rede de tubulação. Esse tipo de tensão é compensado pela flexibilização das linhas, de modo compensar os efeitos térmicos evitando esforços excessivos em equipamentos diversos.

3.3. TENSÕES ADMISSÍVEIS

Segundo a norma reguladora ASME B31.3 em seu item 302.3.5 estabelece as tensões admissíveis da seguinte forma:

a) Para as Tensões Primárias:

A contribuição dos esforços atuantes decorrentes da pressão interna ou externa, pesos do sistema de tubulação, sobrecargas decorrentes de condições extremas como esforços da natureza em geral (ventos, gelo, entre outros) permitiram calcular a tensão equivalente de tresca $S_{Tp} = S_1 - S_3$ (sendo S_1 a máxima tensão principal e S_3 a mínima), esse valor deve ser comparado com a tensão admissível a quente (S_h), presente na Tabela A-1 da mesma norma de acordo com o material empregado na tubulação e a temperatura de projeto. Desta forma a verificação a ser realizada para as tensões primárias será:

$$S_{Tp} \leq S_h \quad (3.1)$$

b) Tensões secundárias:

A contribuição das tensões secundárias devido a dilatação que remete esforços normais, momentos fletores e torsões permitem calcular a tensão equivalente de tresca S_{Ts} . O nível de tensões deve ser inferior a admissível decorrente do caso de tensões secundárias (S_a). Desse modo a verificação que deverá ser realizada será:

$$S_{Ts} \leq S_a \quad (3.2)$$

Definindo-se S_a como segue :

$$S_a < f(1.25 S_c + 0.25 S_h) \quad (3.3)$$

Sendo S_c a tensão admissível a temperatura ambiente, S_h a tensão admissível a quente e f o fator que reduz a tensão admissível no caso de operações cíclicas (Anexo I).

Em alguns casos essa tensão admissível secundária pode ser modificada dependendo do valor da tensão longitudinal primária. Outras expressões para determinar tensões admissíveis são apresentadas nas normas para levar em conta casos particulares (ação sísmica, ventos, estados de carga especiais que possam acontecer na montagem etc). Característica sobre estes carregamentos são encontradas nas normas ASME B31.3 e PETROBRÁS N-1673. Também nessas normas se estabelecem expressões para determinar a espessura das tubulações levando em conta a eficiência da solda e as tensões admissíveis impostas, tal como o aumento nas tensões devido a presença de curvas e outras descontinuidades típicas.

3.4. SUPORTES EM TUBULAÇÕES

Entre os pontos mais importantes para o dimensionamento de tubulações está a utilização de suportes corretos e eficientes, que representem fisicamente as restrições propostas no projeto e análise do sistema. Para isso, comumente, são utilizados perfis estruturais e placas, outras vezes é necessária a utilização de suportes mais complexos, que insiram forças de compensação ao sistema, ou que limitem a influência de alguns carregamentos. Esses suportes são conhecidos como *Hangers* (molas) que são uma série de componentes que podem ser compostos tanto por sistemas de molas de forças constantes, quanto variáveis; de modo a equilibrar os esforços no sistema e reduzi-los em pontos críticos. Detalhes dos suportes e apoios propostos podem ser vistos no Apêndice I.

Redes de tubulações com esforços elevados, principalmente decorrentes de efeitos de dilatação, devem ter seus efeitos desacoplados facilitando a flexibilização do sistema [Peng, 2009]. A suposição de Peng está atrelada com a utilização de um sistema de suporte do tipo ancoragem. Esse componente é similar a um engaste, restringindo deslocamentos e angulações em todas as direções em que está aplicado, limitando a transferência de esforços ao longo da tubulação, levando assim a uma desacoplagem da tubulação a nível de solicitações. Esse efeito contribui de maneira eficiente para a flexibilização do sistema já que limita esforços indesejados em um bocal decorrentes de modificações de traçado para reduzir esforços no outro.

Entretanto uma ancoragem total de forças e momentos é considerada inadequada segundo a PETROBRÁS-N-1673 por envolver muitas soldas, dificultando a inspeção dos equipamentos. Desse modo é comum a utilização de ancoragens apenas de forças, limitando assim a influência de esforços normais e de corte em pontos específicos da análise, deixando livre a transmissão de momentos. Assim não se utilizam componentes soldados a tubulação, atendo a norma em questão e utilizando a teoria da restrição de esforços por meio de suportes. A combinação de um apoio, grampo, guia e trava que podem ser visualizado no Apêndice I representam a configuração da ancoragem de forças.

3.5. ANÁLISE DE FLEXIBILIDADE

As tensões secundárias tem como característica serem auto equilibradas. Na medida que a tubulação tem sua flexibilidade elevada, o nível das tensões se reduz substancialmente; desse modo o principal desafio desse tipo de análise é realizar o traçado geométrico combinado com a localização e características dos suportes de forma que sejam obtidos esforços abaixo dos níveis admissíveis na tubulação e seus componentes.

3.6. FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO

Muitas vezes características de operação nas instalações industriais colocam limitações nas frequências naturais de vibração das estruturas, para evitar que em todo ou em parte se produzam efeitos dinâmicos e/ou amplificações das tensões pelo aumento das forças de inércia. Desse modo faz-se necessário calcular os modos e frequências do sistema proposto, que pode ser feito numericamente resolvendo um problema de autovalores. Detalhes da solução numérica podem ser encontrados em Bathe, 1996.

4. METODOLOGIA

Para a análise foi utilizado o software CAESAR II 5.10 desenvolvido pela empresa COADE. O programa consiste em um sistema de análise matricial de pórticos espaciais dedicado ao cálculo de tubulações, com possibilidade de introduzir carregamentos, imputar normas para verificações, realizar simulações estáticas e dinâmicas entre outras, sendo assim adequado para esse tipo de análise.

A empresa que lidera o contratação de projetos de tubulações industriais no Brasil é a PETROBRÁS, que recomenda a utilização deste software, marcando-o no mercado técnico a tendência de utilizar esta ferramenta no projeto de tubulações.

O fluido de processo é ar a alta temperatura, de modo que por não sofrer variações excessivas de pressão e possuir baixa densidade, efeitos de escoamento bifásico, variação de forças e turbulência são mínimos; não sendo necessárias análises por softwares do tipo CFD, que consideram tais efeitos.

5. APLICAÇÃO

5.1. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ESTUDO

Para a análise foi considerada uma tubulação conectada a um forno reformador. O fluido de processo é vapor de ar em alta temperatura, necessário para etapas de destilação do petróleo, que sai do forno para a tubulação por conexão em bocais. Pelas altas temperaturas no forno se tem um deslocamento inicial nos bocais, desse modo se salienta a necessidade em considerar tal solicitação por esta imprimir esforços elevados à tubulação. O forno possui componentes que operam produzindo solicitações cíclicas com frequências de até 2Hz, salientando-se assim a necessidade de restringir que os modos de vibração da tubulação a valores superiores evitando problemas de ressonância. A parada para manutenção do sistema é realizada uma vez ano. A figura 5.1 representa um equipamento similar ao analisado em fase de montagem, utilizado na refinaria Landulpho Alves, Bahia, propriedade da PETROBRÁS.



Figura 5.1- Forno reformador da refinaria Landulpho Alves localizada na Bahia sem a tubulação conectada

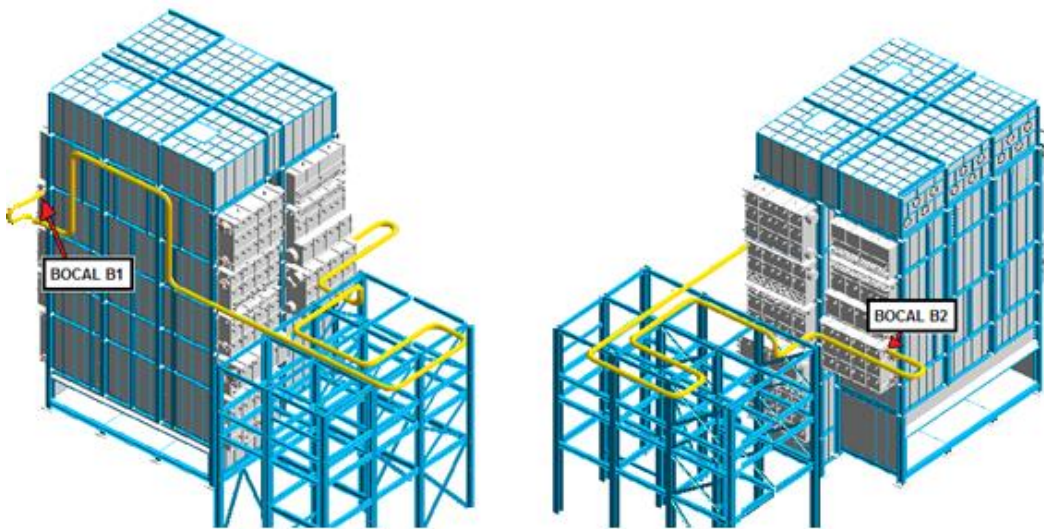


Figura 5.2 - Modelagem do forno reformador da refinaria Landulpho Alves conectado com a tubulação a ser analisada

5.2. CONDIÇÕES DA TUBULAÇÃO

Os dados que representam as condições da tubulação conectada ao forno são os seguintes:

- Condições de processo

Tabela 5.1 - Dados de processo do fluido e condições de temperatura e pressão

Tag da linha	Temperatura (°C)		Pressão (kgf/cm ²)		
	Operação	Projeto	Operação	Projeto	Teste
P16"	350	410	45	50	75

- Espessuras e tensões admissíveis

Na tabela 5.2 estão apresentadas a espessura do material e tensões admissíveis da tubulação; sendo essas calculadas empregando expressões que figuram na norma ASME 31.3, baseadas nas equações e fórmulas de Lamé para tubulação espessa, modificadas para levar em conta a eficiência da solda, conforme descrito no anexo I.

Tabela 5.2 - Materiais, Espessuras e tensões admissíveis

Material	Diâmetro (in)	Esp Parede (in)	Sobre Esp. Cor. (mm)	Eficiência da solda	S _c (kgf/cm ²)	S _h (kgf/cm ²)	S _a (kgf/cm ²)	S _y (kgf/cm ²)
ASTM A 335 GR P11	16	1	2	100%	1406	1055	1854	2109

Sendo S_y a tensão de escoamento do material na temperatura analisada. A eficiência da solda é decorrente de radiografia e inspeção em todos os pontos.

- Esforços admissíveis nos bocais

Na tabela 5.3 são apresentados os esforços considerados admissíveis para os bocais, que são as principais restrições na determinação da configuração da tubulação. Estes valores foram determinados seguindo as especificações da API 560 (2007) com fator de amplificação quatro pelo tipo de aplicação e alto nível de esforços, denotando assim a necessidade de bocais bastante resistentes.

Tabela 5.3 - Esforços admissíveis nos bocais

	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	M _x (Nm)	M _y (Nm)	M _z (Nm)
Esforços Admissíveis	F. radial	F. tangencial	F. longitudinal	M torsor	M. longitudinal	M. tangencial
	21351	21351	13344	6915	6915	9276

- Deslocamentos nos bocais

Com a operação do forno e suas altas temperaturas envolvidas, ocorre uma expansão acentuada que é transmitida aos bocais e conseqüentemente a tubulação por meio da dilatação dos componentes. Desse modo a tubulação deve ter flexibilidade suficiente para não sofrer esforços excessivos com essas condições e nem transmitir cargas excessivas aos bocais, restringindo esse deslocamento pela dilatação.

Tabela 5.4 - Deslocamentos nos bocais

Bocal	Condição	D _x (mm)	D _y (mm)	D _z (mm)
B1	Operação	-30.6	7.44	10.8
	Projeto	-37	9	13
B2	Operação	62.9	2.48	-10.8
	Projeto	76	3	-13

Os valores da tabela 5.4 são obtidos com base em temperaturas de fornos similares ao da refinaria Landulpho Alves, conjuntamente com a API560.

5.3. CONDIÇÕES E CASOS DE CARREGAMENTO

Para uma análise criteriosa, a tabela 5.5 apresenta todos os casos e combinações de carregamentos atuantes, de modo que todos esforços atuantes sejam reproduzidos nas análises.

Tabela 5.5 - Combinações e casos de carregamentos

CASO	CARREGAMENTOS NO CASO	CONDIÇÃO DOS CARREGAMENTOS
Hidrostático	Peso do tubo com água / Pressão do teste hidrostático / Esforços de molas	Teste
Operação-PR	Peso do tubo com gás / Deslocamentos no bocais / Expansão térmica / Efeito da Pressão / Esforços de molas	Projeto
Operação-OP	Peso do tubo com gás / Deslocamentos no bocais / Expansão térmica / Efeito da Pressão / Esforços de molas	Operação
Peso-PR	Peso do tubo e gás / Efeito da Pressão / Esforços de molas	Projeto
Peso-OP	Peso do tubo e gás / Efeito da Pressão / Esforços de molas	Operação
Expansão-PR	Expansão Térmica	Projeto
Expansão-OP	Expansão Térmica	Operação

A respeito dos casos presentes na tabela 5.5 são feitas as seguintes considerações:

- No caso de teste hidrostático a pressão foi definida como sendo 1.5 vezes a pressão de projeto, segundo recomendações da ASME B31.3 e PETROBRAS N-1673 e as tensões são calculadas e comparadas com a tensão de escoamento do material (S_y);
- Os casos de operação englobam tensões primárias e secundárias, não tendo um valor comparativo segundo a norma ASME B31, entretanto seu cálculo é importante para realizar a verificação de esforços atuantes em bocais, suportes e equipamentos; sendo fundamental na análise de flexibilidade pelas altas temperaturas envolvidas nesses tipos de carregamentos;
- Os casos de expansão permitem verificar as tensões e analisar os deslocamentos máximos.

6. ANÁLISE DE FLEXIBILIDADE – AJUSTE DOS ARRANJOS DA TUBULAÇÃO

A primeira etapa para o projeto e dimensionamento das configurações a serem analisadas é a verificação de pontos passíveis de posicionamento de restrições. Para isso foi modelado com o Software Google Sketchup® uma representação física de um forno reformador similar ao presente na refinaria Landulpho Alves e uma estrutura auxiliar (*piperaçk*) de modo a viabilizar os suportes da tubulação ao longo do forno e da estrutura; a representação está disponível na figura 5.2 e no apêndice IV.

Foram propostas cinco configurações diferenciadas, sendo realizadas modificações de traçado e suportes, de modo a reduzir os esforços até valores inferiores aos admissíveis. Os pontos de menor resistência do sistema são os bocais, pois imprimem um deslocamento na tubulação pela expansão dos componentes do forno e recebem grande parte dos esforços da dilatação da tubulação.

Para a modelagem no software CAESAR II® os suportes de mola foram representados por pontos na cor roxa, restrições de deslocamentos foram modelados utilizando setas verdes na direção da restrição e restrições de ângulos nos bocais por uma quadrado verde.

6.1. CONFIGURAÇÃO A

A primeira configuração da análise, ilustrada na Figura 6.1, foi modelada de modo a representar o fluxograma de processo da linha, inserindo os pontos passíveis de posicionamento de suportes e bocais, de modo a realizar as mudanças de traçado de maneira viável fisicamente nas configurações posteriores.

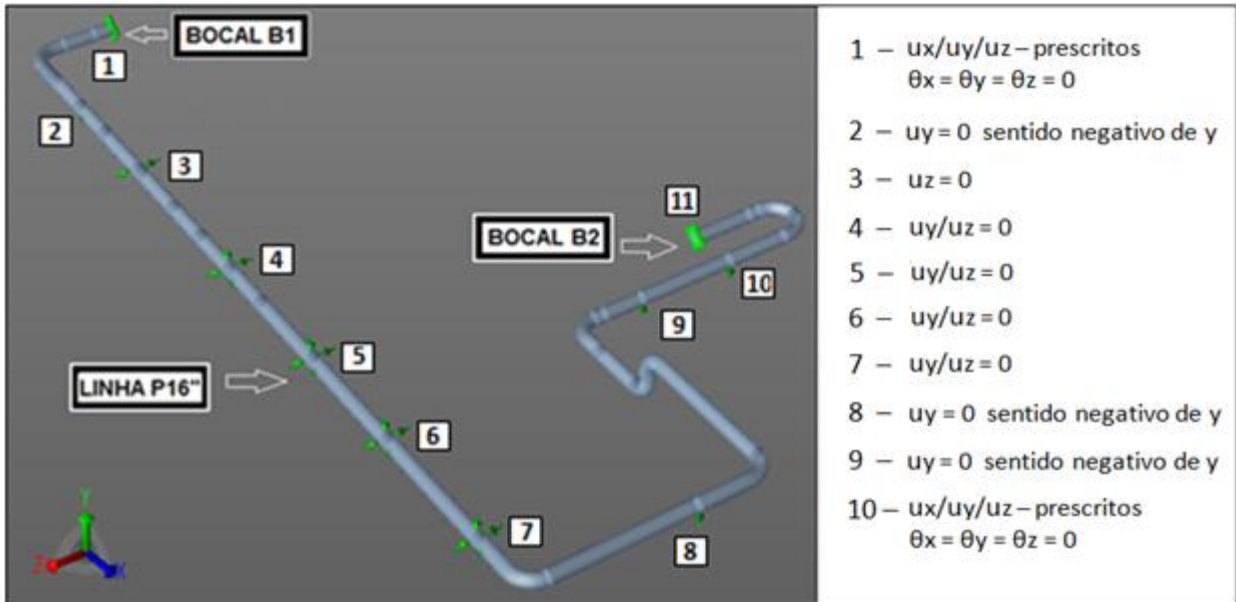


Figura 6.1 - Configuração A com as restrições de deslocamentos e angulações

6.2. CONFIGURAÇÃO B

A configuração B, ilustrada na Figura 6.2, teve como base o traçado da configuração A com a inserção de um loop próximo ao bocal B2 visando redução dos esforços no mesmo.

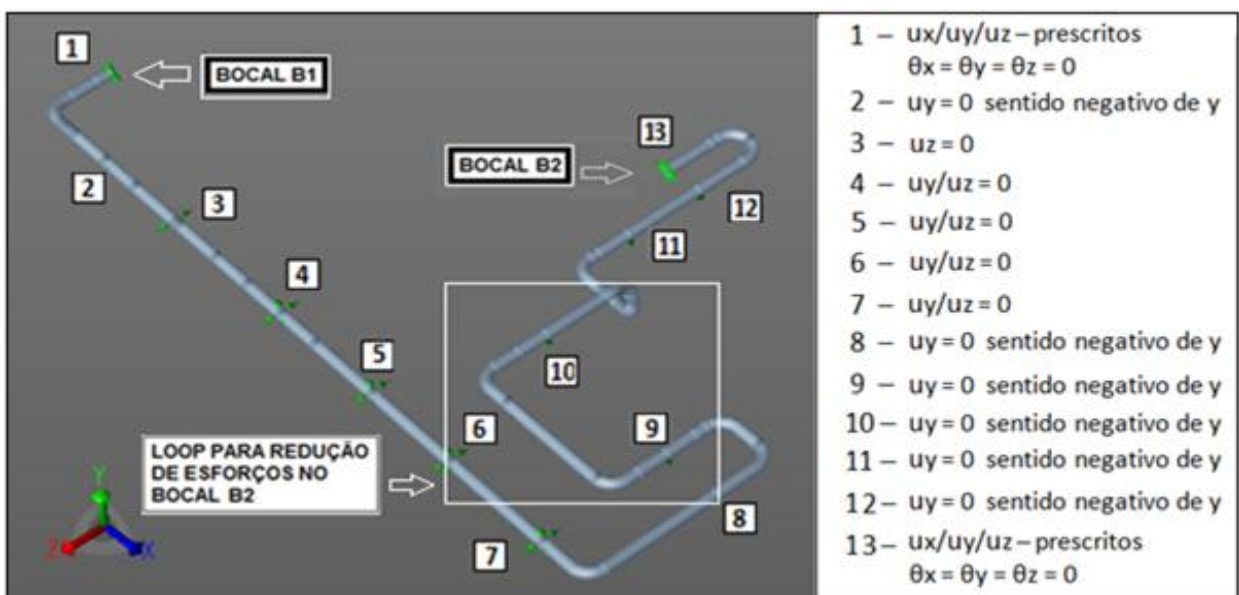


Figura 6.2 - Configuração B com as restrições de deslocamentos e angulações

6.3. CONFIGURAÇÃO C

A configuração C, ilustrada na figura 6.3, teve como base o traçado da configuração A com a inserção de dois loops próximos ao bocal B1, de modo a manter a posição dos bocais e reduzir os esforços na região.

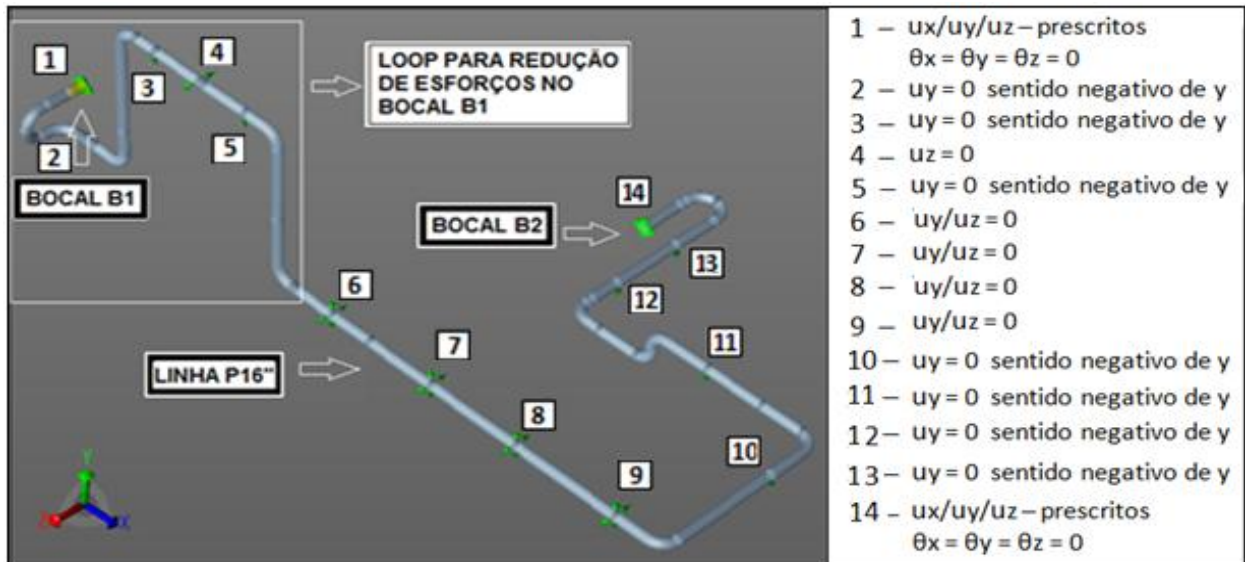


Figura 6.3 - Configuração C com as restrições de deslocamentos e angulações

6.4. CONFIGURAÇÃO D

A configuração D engloba as modificações feitas na configuração B e C, com a utilização de suportes de mola para equilibrar os esforços que acontecem nos dois Bocais. A Figura 6.4 apresenta a configuração D, os quadrados brancos com os componentes em roxo são a representação dos suportes tipo mola. O quadrado vermelho indica a posição em que será analisado o posicionamento da ancoragem na configuração E.

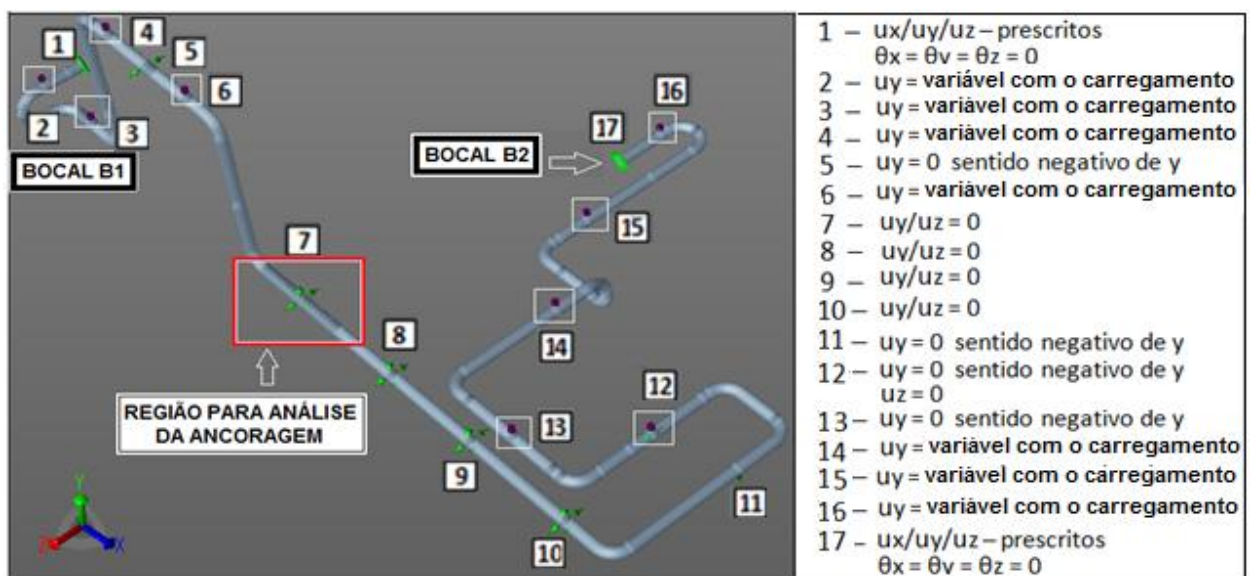


Figura 6.4 - Configuração D com as restrições de deslocamentos e angulações

6.5. CONFIGURAÇÃO E

A configuração E mantém o mesmo traçado da configuração D, com o diferencial de inserir uma trava longitudinal no trecho da região englobada pelo quadrado de indicação vermelho na figura 6.4 da configuração D. Essa nova configuração será abordada no item 7.3.

7. RESULTADOS

7.1. OBSERVAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS

Para o desenvolvimento das configurações apresentadas, foram analisadas as deformadas da tubulação, de modo a se verificar deslocamentos excessivos e angulações exageradas na tubulação perto de bocais, denotando altas solicitações nos bocais. O caso de carga analisado foi o de Operação-OP por envolver esforços devido a expansão térmica, pressão interna, esforços induzidos pelas molas, peso próprio e deslocamentos prescritos dos bocais na tubulação, levando a esforços mais elevados que os outros casos de carga. As imagens das configurações deformadas estão presentes na figura 7.1.

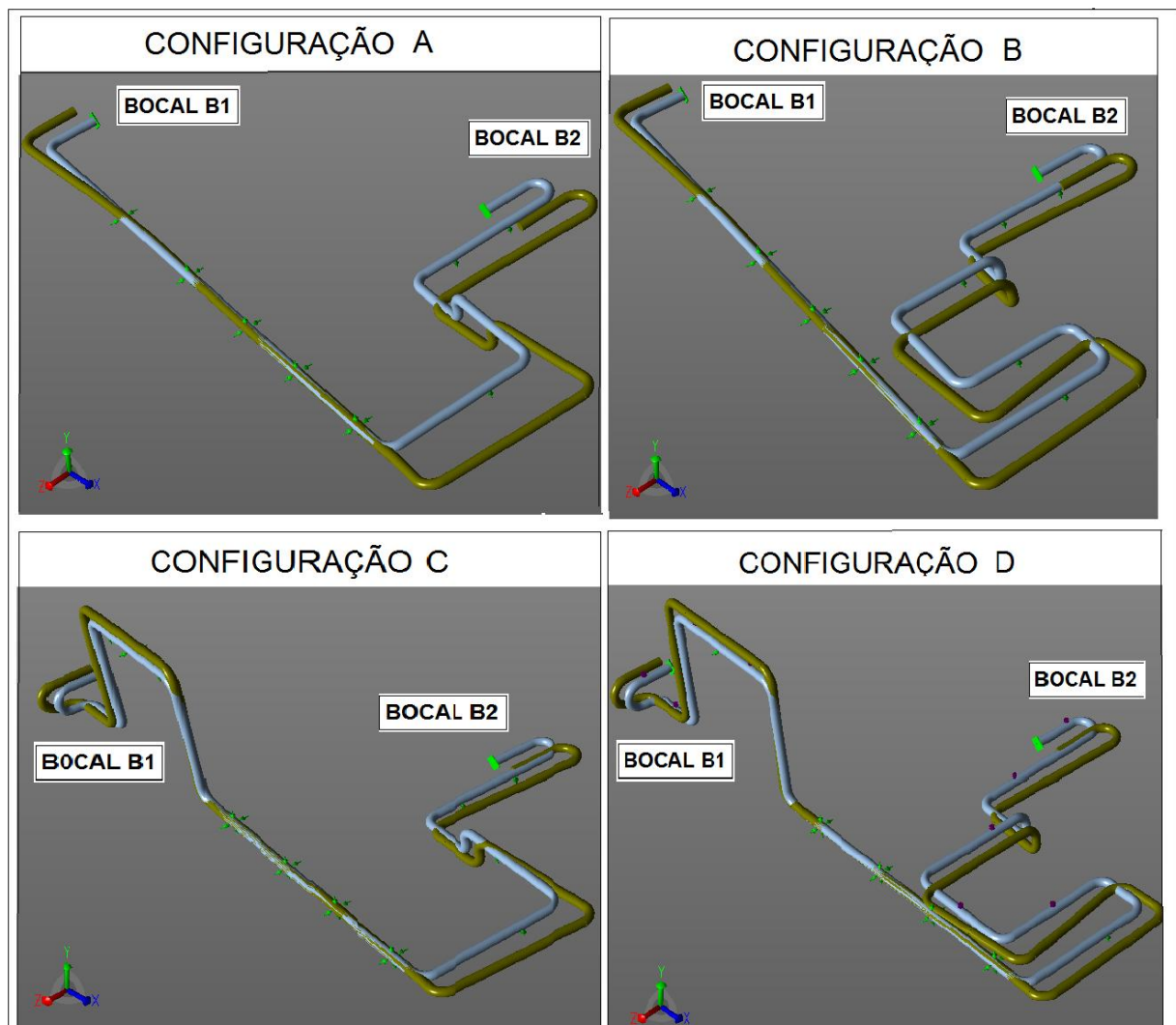


Figura 7.1 - Deformadas das configurações da tubulação (ampliação 15 vezes)

Observando a figura 7.1 é possível verificar como proceder na modificação do arranjo visando a redução dos esforços nos bocais por meio da análise de deslocamentos e angulações excessivas. A tabela 7.1 apresenta os valores dos esforços para cada configuração, fazendo-se assim as seguintes observações:

a) Na configuração A ocorrem deslocamentos excessivos ao longo da tubulação, gerando esforços elevados nos bocais. A angulação excessiva que se verifica na tubulação em torno do eixo y próximo ao bocal B1 representa falta de flexibilidade da tubulação na região levando a altos carregamentos e nível de tensões no bocal.

b) Na configuração B foram utilizadas mudanças de direção próximas ao bocal B2, reduzindo a angulação na região e permitindo a expansão aumentar no trecho de tubulação próximo ao bocal, levando a redução de esforços; entretanto o bocal B1 ficou solicitações elevadas.

c) A configuração C utilizou mudanças de traçado perto do bocal B1, levando a deslocamentos e angulações mais uniformes reduzindo assim os esforços na região, entretanto no bocal B2 a tubulação sofreu angulação excessiva levando a aumento dos esforços.

d) Com os resultados obtidos nas configurações B e C, as modificações propostas foram unidas no novo arranjo D, a imagem da deformada denota uma configuração com deslocamentos e angulações mais uniformes na tubulação, seguindo o deslocamento inicial imposto pelo forno; conseqüentemente os valores de esforços nos bocais chegaram a valores próximos aos admissíveis.

e) Mesmo com a configuração D tendo esforços próximos aos admissíveis, foi verificado que mudanças que minimizem esforços em um bocal produziram aumento de solicitações no outro, mesmo com a inclusão dos suportes de mola que compensam os esforços nas regiões onde foram localizados. Para evitar esta dependência, na configuração E se manteve o traçado e suportes do arranjo D, acrescentando uma ancoragem de forças que consiste em restringir esses esforços nas três direções do modelo, transferindo forças para os suportes e limitando as influências que modificações para reduzir esforços em um bocal levem a aumento no outro.

A tabela 7.1 apresenta os valores por nós de cálculo, sendo que os marcados em vermelho ultrapassam os valores admissíveis.

Tabela 7.1 - Esforços nos bocais nas configurações A, B, C e D

ESFORÇOS NO BOCAL B1					
	A	B	C	D	Admissível
Fx (N)	-1142563	-1142493	-24175	-19637	21351
Fy (N)	-24610	-24617	-43101	2801	21351
Fz (N)	-163580	-163501	-1755	-3636	13344
Mx (Nm)	49043	48862	49727	-4766	6915
My (Nm)	-1933068	-1933010	-19424	-9781	6915
Mz (Nm)	33746	-33787	-33271	3764	9276
ESFORÇOS NO BOCAL B2					
	A	B	C	D	Admissível
Fx (N)	-40246	-25515	-43861	-19467	21351
Fy (N)	-12801	-11863	3556	-2673	21351
Fz (N)	-19034	-13366	-39455	-14697	13344
Mx (Nm)	-17593	-12464	5159	-5429	6915
My (Nm)	-5281	-3333	42594	7716	6915
Mz (Nm)	-16151	-15004	-22206	-7157	9276

Analisando a figura e tabela 7.2 pode-se verificar que o Ponto VI é o ponto ideal para o posicionamento da trava longitudinal, pelo fato de que os esforços ficam abaixo dos valores admissíveis e está localizado exatamente em uma viga do forno reformador facilitando assim a suportaç o.

7.3. CONFIGURAÇÃO E – MODELO FINAL

Nesta se o são apresentados os esforos da configura o E. Os apêndices II e III apresentam respectivamente o isométrico de cáculo do modelo e os esforos atuantes nos suportes.

7.3.1. ESFORÇOS NOS BOCAIS

Englobando a restri o adicional na dire o longitudinal na configura o D, formando uma ancoragem de foras com as restri es já existentes, a configura o E se verificou dentro dos limites de esforos admissíveis para todos os casos analisados. A figura 7.3 apresenta as solicita es por caso de carga nos bocais, enfatizando os maiores valores e os comparando com os admissíveis.

Tabela 7.3 - Lista dos esforos nos bocais para a configura o E

BOCAL B1	CASO DE CARGA	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N).	Mx (N.m.)	My (N.m.)	Mz (N.m.)
	Hidrostático	588	2801	-74	-1149	1038	-1082
	Opera�o-PR	-10209	-147	-3594	-4372	361	-755
	Opera�o-OP	-16224	56	-3748	-4971	-6011	2152
	Peso-PR	511	515	-95	1701	1016	-486
	Peso-OP	511	515	-95	1701	1016	-486
	ADMISSÍVEL	21351	21351	13344	6915	6915	9276
BOCAL B2	CASO DE CARGA	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N).	Mx (N.m.)	My (N.m.)	Mz (N.m.)
	Hidrostático	75	1648	79	1257	-7	-7157
	Opera�o-PR	-17199	-2269	-12752	1497	-6894	-6498
	Opera�o-OP	-17980	-2496	-13343	2369	-4352	-6976
	Peso-PR	209	1333	349	-5258	-666	-4748
	Peso-OP	209	1333	349	-5258	-666	-4748
	ADMISSÍVEL	21351	21351	13344	6915	6915	9276

7.3.2. TENSÕES ATUANTES

As tensões máximas atuantes para a configuração E são visualizadas na tabela 7.4, que as compara com os valores admissíveis para cada caso, validando o arranjo.

Tabela 7.4 - Máximas tensões atuantes para a configuração E.

Caso de Carga	Tensão Máxima Atuante (kPa)	Tensão Admissível (kPa)	Percentual do Admissível (%)
Hidrostático	43790	206842	22.6
Peso	43809	103504	42.3
Expansão – PR	85280	181832	46.9

7.4. ANÁLISE MODAL

Foi realizado o cálculo das frequências naturais do sistema para verificar se nas configurações D e E para todos casos de carga para verificar se os valores eram superiores a 2Hz, exigência de projeto. Todos os casos de carga denotaram valores muito semelhantes, sendo que os mais baixos são dados no caso de OPERAÇÃO-OP.

Para a obtenção dos modos de vibração e as frequências naturais, foi utilizada uma análise do tipo modal, de modo que os autovetores representam os modos de vibração e os autovalores as frequências naturais. Detalhes adicionais podem ser vistos em Bathe, 1996.

A tabela 7.5 apresenta os resultados para os dois primeiros modos de vibração da análise, por estarem abaixo do limite na configuração D.

Tabela 7.5 - Primeiras duas frequências naturais das configurações D e E

MODO DE VIBRAÇÃO	CASO D (Hz)	CASO E (Hz)
1	1.185	2.140
2	2.327	2.327

A restrição longitudinal adicional da configuração E formando a ancoragem de forças, elevou significativamente a primeira frequência natural da tubulação com relação a configuração D, ficando acima do limite exigido de 2 Hz para o caso em análise. Desse modo a restrição adicional se mostrou efetiva tanto a nível estático quanto dinâmico, já que sua ausência na configuração D deixa a primeira frequência natural muito abaixo do limite inferior de 2Hz por exigência de projeto.

O detalhamento do arranjo da tubulação tal como os esforços nos suportes, estão presentes respectivamente nos apêndices III e IV, de modo que se possa avaliar o traçado da tubulação mais detalhado e avaliar o nível dos esforços na suportação.

8. CONCLUSÕES

Neste trabalho se realizou a análise de flexibilidade de uma tubulação de grande porte, estudando várias configurações de modo a minimizar os esforços. Ao longo da análise foram obtidas as seguintes conclusões:

- A análise estática com a utilização dos métodos propostos: ponto de ancoragem de forças em conjunto com a análise e observação dos deslocamentos, foi eficaz para facilitar o dimensionamento do sistema. Essas aplicações limitaram os esforços de modo que mudanças de traçado para reduzir esforços em um bocal não levassem a influências negativas no outro; validando assim a técnica e sendo eficaz para os mais diversos tipos de arranjos e casos de carga.
- A flexibilização do sistema foi realizada por meio de loops e mudanças de direção, de modo que a configuração final E visualmente tem um comportamento de deformações mais uniforme próximo aos bocais, compensando os deslocamentos impostos pelos bocais na tubulação, reduzindo assim a magnitude dos esforços.
- As tensões primárias e secundárias atuantes foram inferiores às admissíveis segundo as normas avaliadas e nenhum suporte foi submetido a valores excessivos de carga. Casos necessários como teste hidrostático ou condições eventuais foram contemplados e validados, desse modo se tem um projeto com vida útil de 20 anos perante as normas ASME B31.3 e PETROBRAS N-1673.
- Pela análise dinâmica e a configuração final do sistema, foi comprovado que a menor frequência natural foi de 2,14 hertz, sendo assim superior as maiores impostas pelos componentes do forno e eliminando o problema de ressonância.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API) 560 – **“Fired heaters for general refinery service”**. 2007
- Bailona, B. A.: Porto, F. S. A.: Camargo, J. R. **“Análise de Tensões em Tubulações Industriais”**, Ltc, 1ª edição, 2006
- Bathe, K. J.: **“Finite Element Procedures”**, Prentice hall, 1st edition, 1996
- Coade Caesar II v5.30®, <http://www.coade.com>. Acessado em 25/11/2012
- Google Sketchup®, manuais d software disponíveis em <http://sketchup.google.com/intl/pt-BR/>. Acessado em 25/11/2012
- Peng, L. C. and Peng, T. L. **“Pipe Stress Engineering”**, ASME Press (American Society of Mechanical Engineers); Houston, Texas, USA, 1st edition, 2009
- Petrobrás N-1673, **“Critérios de Cálculo Mecânico de Tubulação”** Rev.D
- Telles, P. C. S. **“Tubulações Industriais – Cálculo”**, Ltc, 9ª edição, 2012
- THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME) B31, **“Code for Pressure Piping”**. 2006.

Anexo I

FATOR DE CORREÇÃO PARA FADIGA TÉRMICA

ASME B31.3-2006

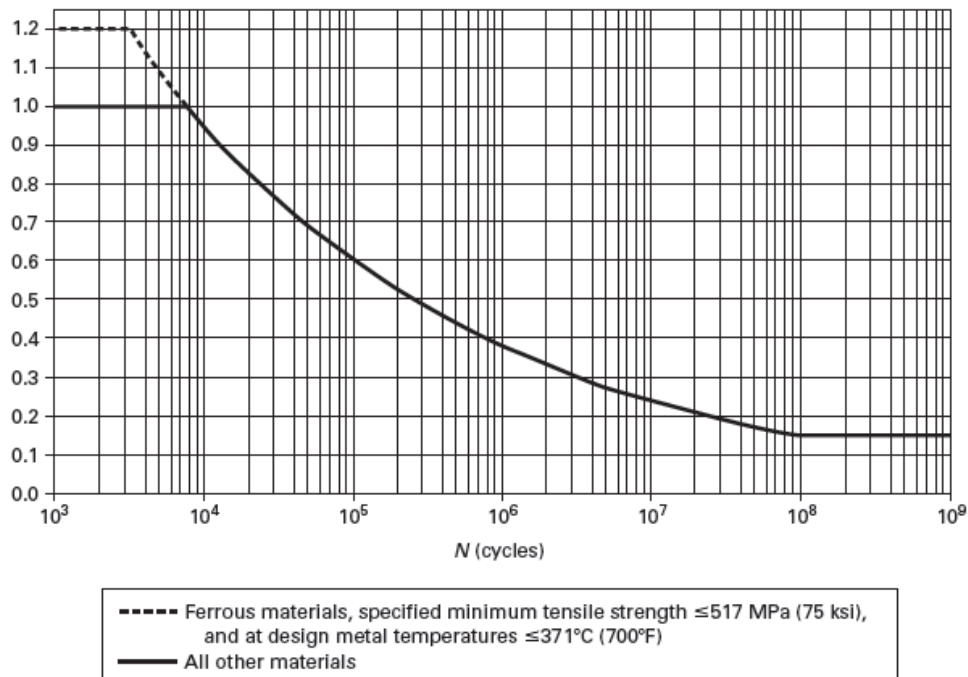
Fig. 302.3.5 Stress Range Factor, f 

Tabela de obtenção do fator de correção para fadiga térmica. Sendo o projeto com vida útil de 20 anos, ocorrem 20 ciclos levando a $f = 1$.

CÁLCULO DA ESPESSURA DA TUBULAÇÃO

De acordo com a norma ASME B31.1 a espessura mínima da tubulação é calculada pela expressão:

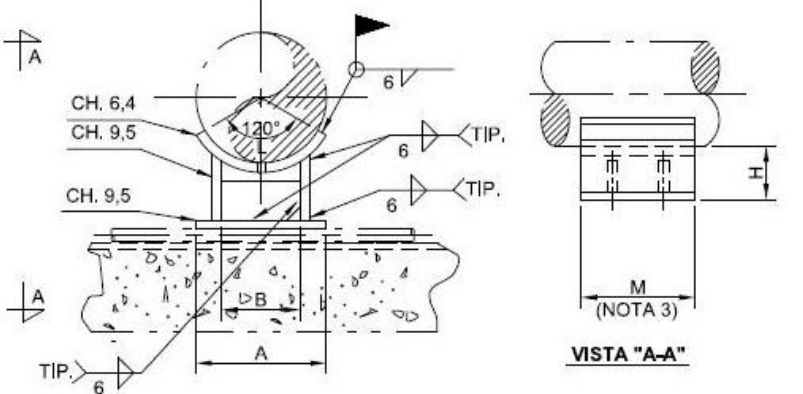
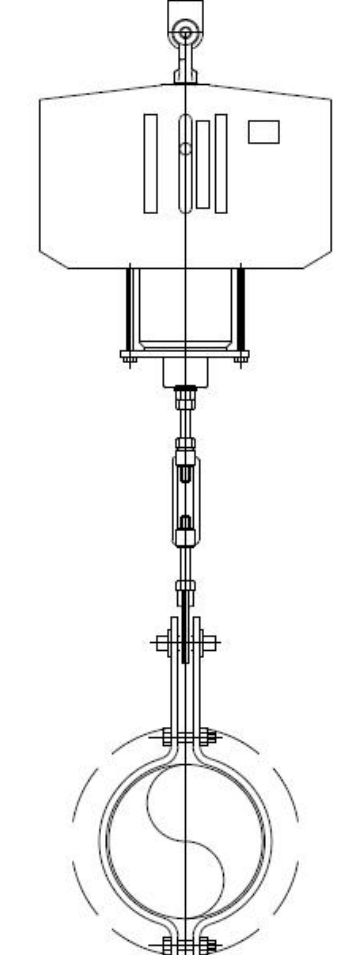
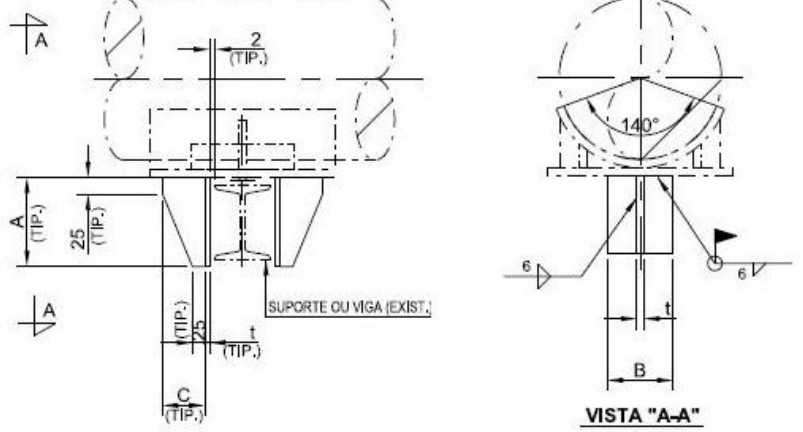
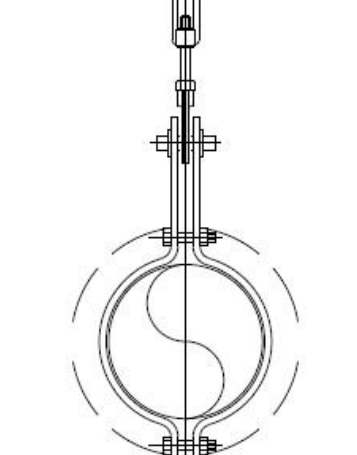
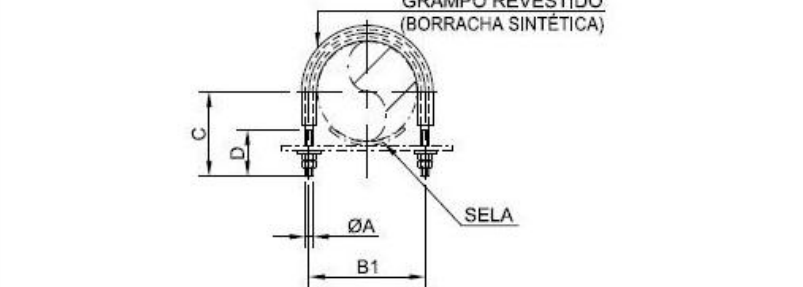
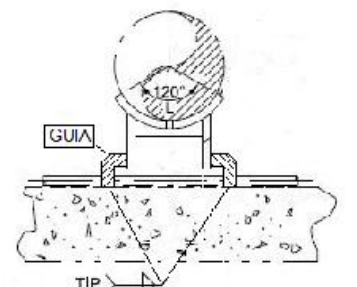
$$t = 1,143 \left(\frac{PD}{2(ShE + PY)} + C \right)$$

Sendo:

- P - Pressão interna de projeto;
- D - Diâmetro externo;
- Sh - Tensão admissível do material na temperatura de projeto;
- E - Coeficiente de eficiência de solda, válido para o caso de tubos com costura; para os tubos;
- C - Soma das margens para corrosão, erosão e abertura de rosca e chanfros;
- Y - Coeficiente de redução de acordo com o material e temperatura do tubo.

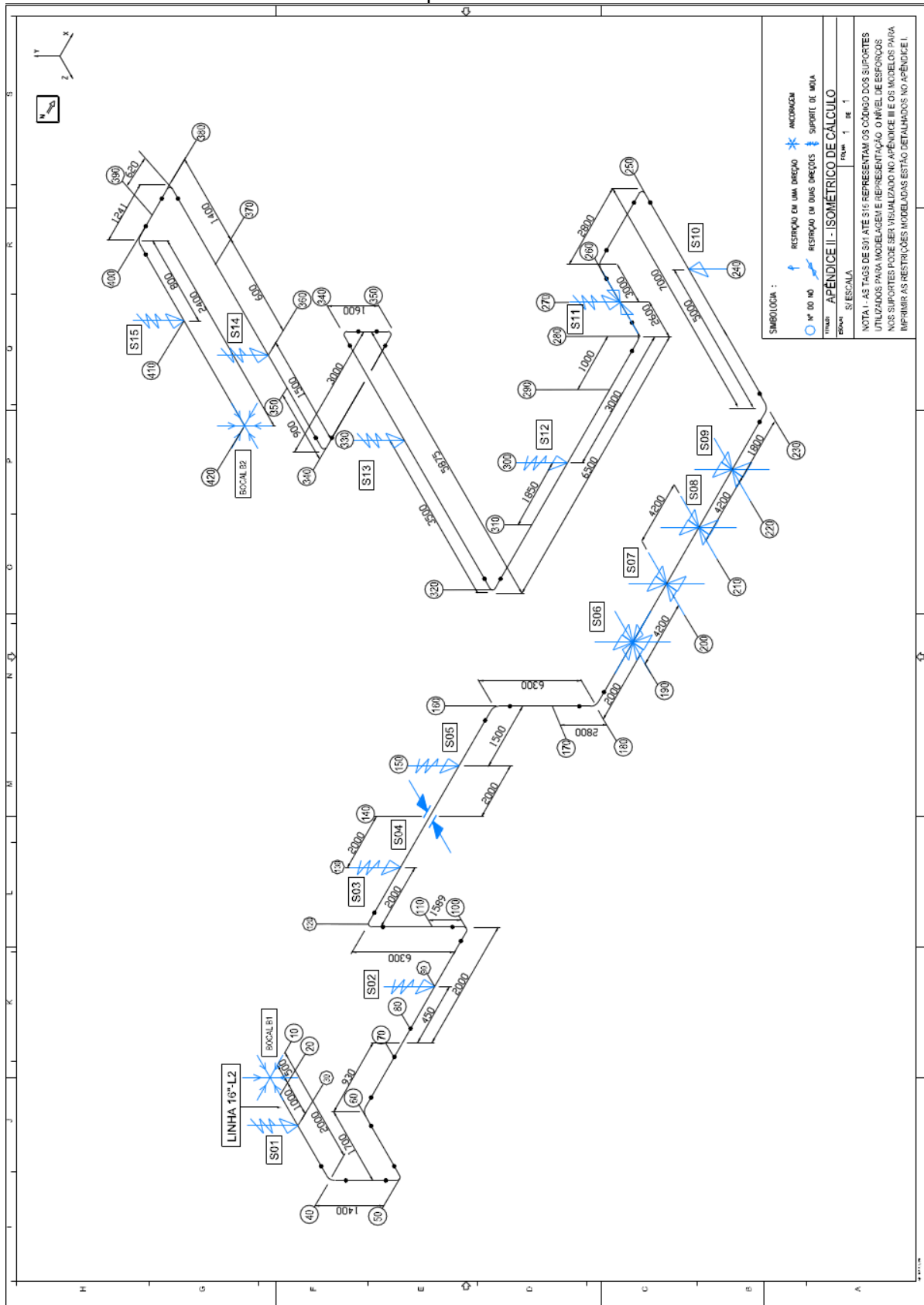
O termo multiplicador 1,143 leva em conta falhas na fabricação do duto.

Apêndice I

SUPORTE TIPO APOIO	SUPORTE TIPO MOLA
 <p>CH. 6,4 CH. 9,5 CH. 9,5 120° 6 6 6 TIP. TIP. TIP. A B M (NOTA 3) VISTA "A-A"</p>	 <p>VISTA "A-A"</p>
SUPORTE TIPO TRAVA	
 <p>2 (TIP.) A (TIP.) 25 (TIP.) t (TIP.) C (TIP.) SUPORTE OU VIGA (EXIST.) 140° 6 6 B VISTA "A-A"</p>	 <p>VISTA "A-A"</p>
SUPORTE TIPO GRAMPO	SUPORTE TIPO GUIA
 <p>GRAMPO REVESTIDO (BORRACHA SINTÉTICA) C D ØA B1 SELA</p>	 <p>120° L GUIA TIP. 6</p>

Suportes propostos para a viabilização da suportação e utilizados nas configurações propostas.

Apêndice II

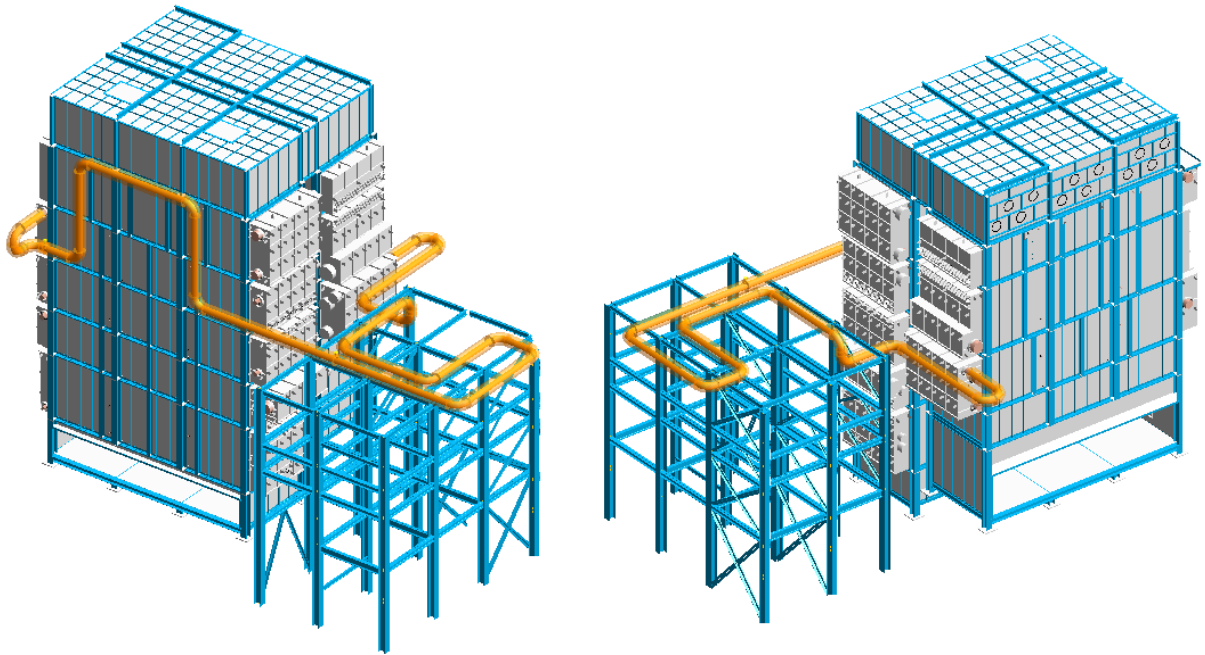


Isométrico de cálculo da configuração E.

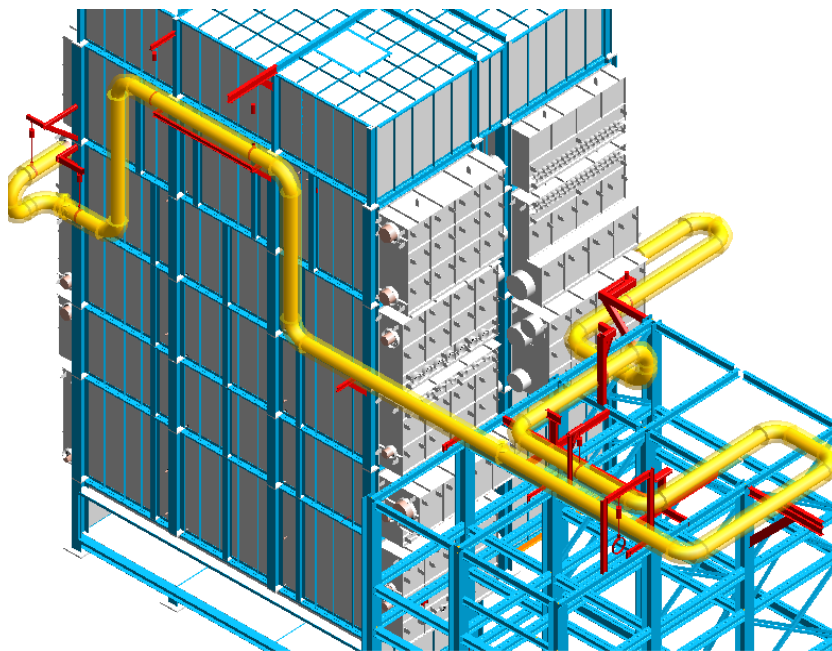
Apêndice III

TAG DO SUPORTE	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	COMBINAÇÃO DE SUPORTES
S-01	-	-13809	-	Suporte tipo Mola
S-02	-	-21632	-	Suporte tipo Mola
S-03	-	-22655	-	Suporte tipo Mola
S-04	-386	833	3001	Guia
S-05	-	-27444	-	Suporte tipo Mola
S-06	-2606	-22280	2887	Apoio + Grampo + Guia + Trava
S-07	8224	-26467	-947	Apoio + Grampo + Guia
S-08	5104	-12433	-11687	Apoio + Grampo + Guia
S-09	16710	-16380	41552	Apoio + Grampo + Guia
S-10	1770	-23654	647	Apoio
S-11	1783	-19630	-17846	Trava + Suporte tipo Mola
S-12	-	-17833	-	Suporte tipo Mola
S-13	-	-28208	-	Suporte tipo Mola
S-14	-	-21698	-	Suporte tipo Mola
S-15	-	-19272	-	Suporte tipo Mola

Esforços nos suportes na configuração E.



Acoplamento tubulação com o forno reformador na configuração E.



Vista da tubulação com a suportaç o nos pontos pass veis indicados ao longo da an lise.