

## **Análise de Flexibilidade de linha de utilidades em uma FPSO**

**Peter Rezende Diedrich, peter\_serafim@yahoo.com.br**

CEFET/RJ. Rua do Senado, 311/408. Centro, Rio de Janeiro.

**Alexandre Silva de Lima, alexandre.silva.lima@gmail.com**

CEFET/RJ. Av. Maracanã, 229. Maracanã, Rio de Janeiro.

### **RESUMO:**

As FPSO's proporcionam maior mobilidade e capacidade de armazenar o petróleo, aumentando a eficiência da exploração em sua área. Com a crescente demanda e investimentos na indústria de processo, sistemas de tubulações são utilizados em larga escala para viabilizar a produção, armazenamento e distribuição de produtos. O presente trabalho tem a finalidade de analisar uma linha de utilidades em condições normais de operação. Essa linha tomada como estudo de caso é conectada a um *header* (Linha principal) e está localizada no módulo de Utilidades. É utilizada para perder calor para um trocador de calor. Será proposto um arranjo com resistência e flexibilidade suficientes para distribuir os esforços atuantes, sem transmiti-los com valores acima dos especificados pela norma vigente. Para realizar o dimensionamento da tubulação são utilizadas as normas ASME B31.3 (Tubulações de Processo) e API 5L Gr. B como norma de fabricação de tubos para plantas de processo. É feita a construção de um modelo matemático baseado na teoria de viga para determinar os valores esperados de tensão e deflexão. Os resultados da análise em elementos estruturais foram confrontados com os do modelo matemático para checar a confiabilidade do Software adotado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tensões, Análise, FPSO

### **ABSTRACT:**

The FPSOs provide more mobility and capacity to store Petroleum, increasing efficiency on the exploration on the field. With the increasing demands of investments at the process industry, piping systems are used at large scale to provide the production, storage and distribution of products. The work presented has the purpose to analyze a utility line under normal operating conditions. The line in question is connected to the piping header, located in the utilities module, and its function is to provide heat to a heat exchanger. We will propose an arrangement that offers flexibility and resistance to the distribution of the acting forces, without transmitting strains above the limits according to the current regulations. To size the pipe, the ASME B31.3 norm (process piping) is used, and the API 5L Gr. B is used as the fabrication norm for process plants. A mathematics model is created based on the beam theory to determine the values of stress and deflection. The results of the analysis of the software adopted are compared with the results of the mathematics model to check the reliability of the software that we adopted.

**KEYWORDS:** *Stress, Analysis, FPSO*

## **INTRODUÇÃO**

Nos processos de transformação em plantas industriais, diversos equipamentos formam uma cadeia e operam submetidos a severas condições de trabalho exigindo o máximo de segurança e confiabilidade.

O dimensionamento e arranjo de uma tubulação representa uma parcela significativa dos custos do projeto e podem operar em condições severas devido ao manuseio de fluidos com propriedades variadas e em função da pressão e temperatura de operação e projeto.

Uma FPSO consiste em um navio com módulos de processamento no convés. São navios construídos para isso ou convertidos de antigos petroleiros que adquirem a capacidade de ser uma unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência de petróleo e gás natural. O objetivo dessas plataformas é economizar tempo e reduzir custos, pois a utilização desse sistema permite um

menor investimento para transportar o óleo bruto para uma refinaria em terra antes de transferi-lo para as áreas industriais necessárias.

A P-43 e P-48, exemplos de FPSO, possuem a capacidade de produzir 150 mil barris de petróleo por dia, localizadas na Bacia de Campos operando nos campos de Barracuda e Caratinga, elas representam um acréscimo de 20% na produção diária nacional. Essas plataformas são responsáveis pela exploração do petróleo que se encontra a mais de 1000 metros de lâmina da água no oceano. Além de estocar e transferir o petróleo, a FPSO tem a função também de processá-lo, retirando do óleo encontrado, a água e o gás.

O escoamento pode ser realizado por outras embarcações em locais de produção distantes da costa com inviabilidade de ligação por oleodutos ou gasodutos para armazenar petróleo e gás natural.

O presente trabalho tem por objetivo o dimensionamento de uma linha que fica localizada no módulo de utilidades em uma FPSO. A análise é feita em condições normais de operação e durante o

transporte do navio até o poço de exploração. A linha que será feita a análise de flexibilidade será a linha de água quente. Ela perde calor para o trocador de calor que é refrigerado pela água do mar.

A tubulação é apresentada com o objetivo de não ocorrer falha em função da temperatura e pressão de projeto, peso do próprio tubo e peso do fluido que está sendo transportado. Será feito um arranjo com resistência e flexibilidade suficiente para distribuir os esforços atuantes sem transmiti-los com valores acima dos especificados pela norma vigente.

## METODOLOGIA

Para o dimensionamento da tubulação são utilizadas as normas ASME B31.3 (Tubulações de Processo) e API 5L Gr. B como norma de fabricação de tubos para plantas de processo.

### Software utilizado para a análise de flexibilidade

Para a análise de flexibilidade é utilizado o programa CAESAR II 5.10. Neste programa é possível elaborar o modelo 3D do arranjo requerido, inserir as cargas impostas à tubulação, inserir elementos que compõem a tubulação, realizar a análise estática e dinâmica e gerar relatórios que apresentam o resultado da análise requerida, assim como é possível gerar também o isométrico que será utilizado para a montagem.

### Confiabilidade do Software adotado

Como estudo preliminar, foram executados alguns cálculos analíticos de tubo reto para avaliar a confiabilidade do Software adotado.

### Estudo de caso

Na figura 1 é apresentada a linha de tubulação que será adotada para executar o estudo de análise de flexibilidade.

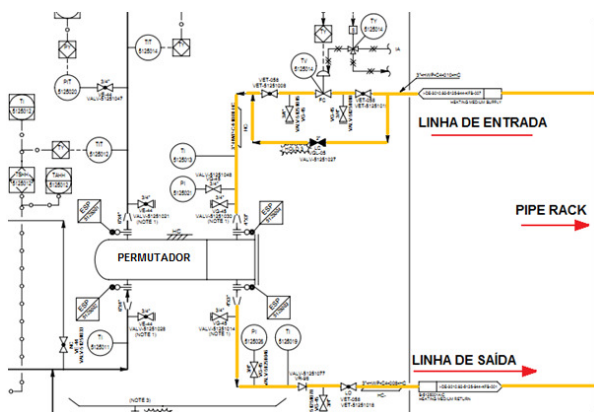


Figura1. Fluxograma de Processo

A linha de estudo é aquela que sai do Pipe-Rack entra em um trocador de calor. Essa água de circulação sai do trocador de calor e entra em um header (linha tronco ou principal), passando depois pelas bombas de água quente de circulação, dando continuidade ao processo que ocorre em ciclo fechado. As linhas de entrada e saída do trocador são o objeto de

estudo deste projeto (estão apresentadas no anexo III) que visa à análise de flexibilidade em função das tensões primárias, secundárias e condições de operação.

### Considerações gerais sobre tubulação

Cada trecho de uma tubulação pode ser considerado um elemento estrutural, submetido a uma série de cargas e transmitindo outros ao sistema de suportes e equipamentos ligados ao arranjo “Silva Telles, 2006”.

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 às variações de temperatura e movimento de tubulação e em bocais e equipamentos aos quais ela está conectada. A partir dessa premissa, podemos fazer a análise de tensões de uma tubulação com a finalidade de avaliar a sua flexibilidade e resistência.

No caso deste projeto, fatores externos são importantes, pois o interesse é avaliar o comportamento de uma linha que fica em uma FPSO, que em determinadas situações atua em condições adversas. 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 tubulação e em bocais e equipamentos aos quais ela está conectada.

### Categoria de tensões

Na figura 2 é apresentado um tubo com a representação das tensões atuantes, é importante ter o conhecimento dessas tensões e para onde estão direcionadas para que seja possível interpretar da melhor maneira os resultados obtidos ao executar a análise de flexibilidade e buscar aprimorar os resultados.

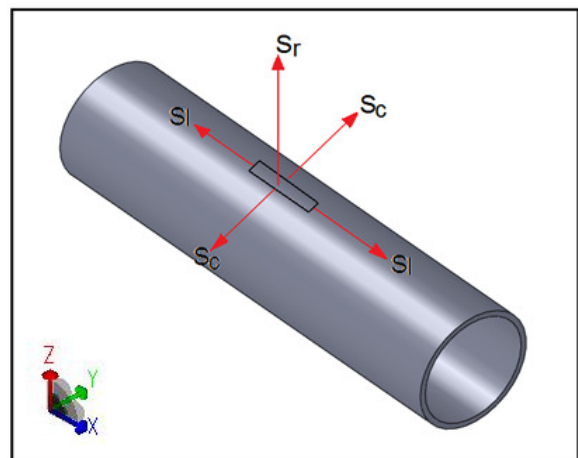


Figura 2. Categoria de Tensões

Direção X: Tensão Longitudinal ou axial  
Direção Y: Tensão Radial  
Direção  $\Theta$ : Tensão circunferencial (*Hoop Stress*)

Quando se refere a tensões atuantes em um tubo, estamos nos referindo basicamente à tensão Axial, Normal, e cisalhante. Os esforços em tubulações são decorrentes do peso, da pressão e da temperatura.

A tensão longitudinal tende a romper o tubo ao longo de uma circunferência. É composta da tensão resultante da pressão, das cargas axiais e localizada devido às restrições ou derivações soldadas aos tubos. Esses esforços podem ser de tração ou de compressão.

### Limites admissíveis de tensões

Os limites admissíveis de tensão têm os seguintes objetivos principais:

- Para as tensões primárias: evitar a deformação plástica e criar um fator de segurança para o colapso do tubo por pressão;
- Para as tensões secundárias: evitar que o acúmulo de deformação plástica conduza progressivamente à falha;
- Um terço do limite de resistência à tração na temperatura considerada ou na temperatura ambiente para os aços carbono;
- Até 90% do limite de escoamento na temperatura considerada, sem ultrapassar 2/3 do limite de escoamento na temperatura ambiente, para aços inoxidáveis austeníticos e para alguns aços, liga ao níquel, com comportamento similar na curva tensão x deformação;
- Outros limites de influência menor na determinação da tensão admissível básica do material são computados a partir da tensão média para uma taxa de fluência determinada.

Na figura 3, é apresentado um gráfico que relaciona a tensão versus deformação de um material.

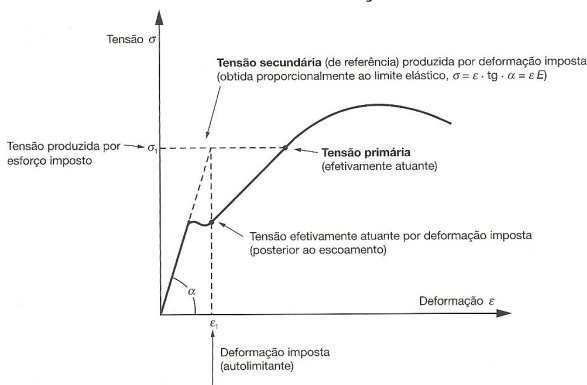


Figura 3. Relação entre tensões primárias e secundárias  
"França Filho, 2013"

A análise de tubulações Offshore exige outros parâmetros a serem considerados além das estudadas no projeto *onshore*, tais como a aceleração, deflexão da plataforma, vento, fadiga e explosão, quando a plataforma não for do tipo fixa, as acelerações também devem ser utilizadas para as direções (X,Y,Z) e para cada tipo de onda. Os valores das acelerações são obtidos por classificadoras.

O efeito da carga de vento deve ser levado em conta na concepção de um sistema de tubulação

exposta. Quando feita a análise, deve constar o caso de carga de transporte, incluindo a aceleração da FPSO.

De acordo com a norma, a análise terá como parâmetro a pressão de projeto, temperatura de projeto, o fator de qualidade do fundido ( $E_c$ ), fator de qualidade da junta soldada, fator de redução da resistência da junta soldada ( $W$ ) e os cálculos de espessura ( $t$ ).

### Dimensionamento

A ASME aponta como modelo de cálculo para espessura de parede de tubos submetidos à pressão interna a seguinte fórmula:

$$t = \frac{PD}{2(SEW+PY)} \quad (1)$$

Onde:

$t$  - Espessura para pressão de projeto;

$P$  - Pressão interna de projeto;

$D$  - Diâmetro externo;

$S$  - Tensão admissível do material;

$E$  - Fator de qualidade de moldagem;

$W$  - Fator de redução de tensão na solda;

$Y$  - Coeficiente em função do material e temperatura;

$C$  - Soma das tolerâncias mecânicas, margens para corrosão ou erosão, profundidade de rosca, ou tolerâncias de fabricação.

O cálculo feito utilizando esse modelo é apresentado no anexo I.

### Flexibilidade de tubulações

Todas as tubulações devem ter um traçado que proporcione uma flexibilidade própria, capaz de absorver as dilatações térmicas por meio de flexões ou torções dos diversos trechos. A flexibilidade de uma tubulação é maior conforme as tensões provenientes das deformações forem menores, assim como as forças e momentos de reação sobre os pontos de fixação (bocais de equipamentos e outras linhas), ou de restrição de movimentos.

Todas as tubulações estão sujeitas à diferença de temperatura, inclusive as dilatações devidas ao sol e chuva, inverno e verão, logo, o controle de dilatação térmica é requerido em tubulações que não estão apenas fazendo o escoamento de fluidos quentes. Na figura 4 é apresentado o comportamento de um tubulação em função da flexibilidade.

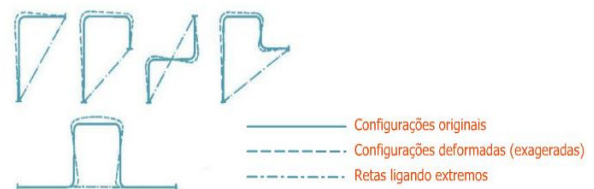


Figura 4. Flexibilidade de tubulação "Silva Telles, 2012"

Em um projeto, as etapas em que são utilizados os critérios mencionados são consideradas como dados de entrada para efetuar a análise de um arranjo executado pela equipe de detalhamento. Esses dados são inseridos em um software que faz a análise da estrutura, os resultados são avaliados, e as condições

mais críticas são consideradas como as condições de projeto. Na figura 5, é ilustrado um método sequencial de como é feita a análise de flexibilidade.

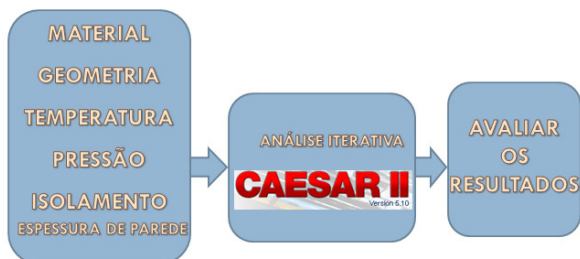


Figura 5. Condições de contorno

## CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Condição do Fluido de trabalho (Água quente)

Operação:

- Temperatura: 130°C
- Pressão: 893,1 kPa
- Massa específica: 958,5 kg/m<sup>3</sup>

Projeto:

- Temperatura: 160 °C
- Pressão: 1278,5 kPa
- Massa específica: 1917,75 kg/m<sup>3</sup>

Material da tubulação:

- API 5L Gr B
- Diâmetro externo: 3"
- Espessura de Parede: SCH 40
- Corrosão Admissível: 1.6 mm
- Classe: 300
- Sc: 137895,1 kPa
- Sh: 137895,1 kPa

Os movimentos do navio em função das ondas do mar geram uma aceleração dos módulos (conforme apresentados na tabela 1), portanto foi considerada neste projeto a aceleração do módulo ocasionada pela movimentação do navio e cargas de vento. Os dados foram fornecidos da sociedade classificadora de projetos offshore.

No caso desta análise de flexibilidade não será considerado a deflexão do casco do navio por se tratar de uma análise dentro da estrutura de um módulo e as linhas analisadas possuir um comprimento em relação ao eixo longitudinal muito pequeno, que pode ser considerado desprezível neste estudo.

- Velocidade do vento = 34 m/s
- Fator de resistência aerodinâmica: 0,5

Tabela 1. Aceleração do módulo

X (g)	Y (g)	Z (g)
0,166	0,290	-0,305

Foi adotado nos suportes o coeficiente de atrito de 0.3 determinados para condição de metal por metal.

### Deslocamento do bocal do trocador de calor

Com as especificações técnicas do trocador de calor (figura 6), fornecido pelo fabricante do mesmo (GEA), foi possível calcular o deslocamento dos bocais em função das condições de projeto (temperatura de 160 °C). Os cálculos são apresentados no anexo II e os resultados obtidos são apresentados na tabela 2.

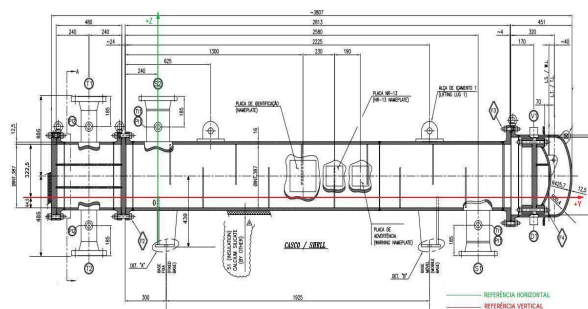


Figura 6. Trocador de Calor

Tabela 2. Deslocamentos do bocal

Trocador de calor	DX (m)	DY (m)	DZ (m)
Linha de entrada	0	-0,802	1,266
Linha de saída	0	-0,802	-0,354

Para executar o dimensionamento do tubo foi feito um estudo em todo o Fluxograma gerado pela disciplina de processos de um projeto real voltado para uma linha de mesma finalidade. O tubo foi dimensionado em função da vasão e velocidade disponível. Depois foi feito o cálculo de espessura de parede e foi possível chegar à conclusão de que o cálculo convencional da espessura em função da pressão interna de parede para uma linha de 3" polegadas não leva ao valor disponível no mercado e equivalente ao Sch 40. Entretanto, o que classifica a linha ser analisável é a sua condição de operação e a busca de não gerar esforços superiores aos admissíveis no equipamento a qual está conectada. Esses cálculos estão disponíveis no anexo I, conforme foi dito anteriormente ao apresentar o método de cálculo.

Devido à alta temperatura foi determinada a utilização de isolamento, no caso de 51 mm de espessura e densidade de 1260 N/m<sup>3</sup> (Lã mineral/ fibra de vidro em manta).

Um dos critérios adotados no início do projeto foi estudar o espaço disponível dentro do módulo de utilidades e determinar um arranjo que forneça boa flexibilidade à linha, no primeiro trecho de tubo já foi determinado que fosse necessário uma curva para compensar as forças causadas pelo alongamento do

tubo reto em função da temperatura, conforme vemos na figura 7:

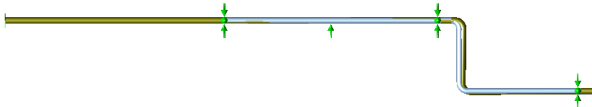


Figura 7. Curva para compensar as forças

O posicionamento das válvulas na linha de entrada também foi feito seguindo dois critérios, são eles: Colocar em um local que não seja prejudicial à análise em função do seu peso e de modo que tenha o melhor acesso para manobras e manutenção dos equipamentos, assim a válvula pneumática fica localizada no ponto baixo do by-pass e a válvula globo no ponto mais alto, visto que somente é utilizada em caso de manutenção. As válvulas esferas ficam posicionadas do lado. Conforme figura 8.

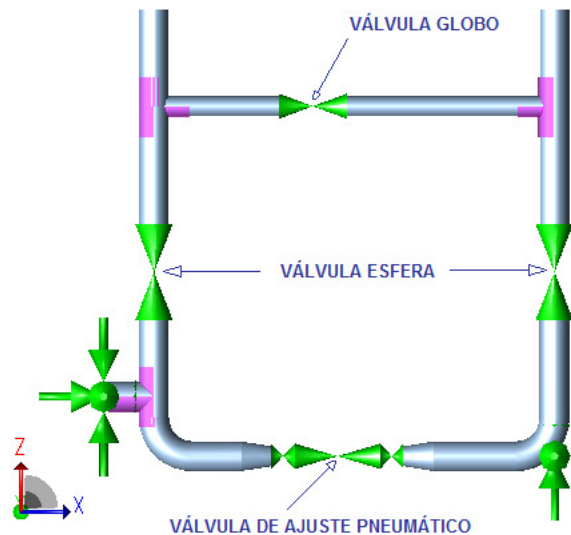


Figura 8. Lay-Out das válvulas

Através dos dados de input (pressão, temperatura, vazão, isolamento, acelerações, foi feita a análise de flexibilidade, visando melhorias no arranjo e posterior suportaçõ. A finalidade da análise é não atingir cargas que sejam superiores as admissíveis, definidas pela norma API 660 que se refere a trocadores de calor casco e tubo. Cargas que sejam superiores a estas deverão induzir ao melhor traçado e suportaçõ da linha modelada para o transporte do fluido de aquecimento, no caso a água, do módulo de geração de energia ao trocador de calor e do mesmo para o header, que fará a conexão deste fluido com o resto do sistema de arrefecimento e aquecimento.

Nas tabelas a seguir, serão apresentados os valores de tensões encontrados após a análise de flexibilidade no *Software* adotado (CAESAR II). Esses valores foram gerados pelo *Software*.

Tabela 3. Tensões máximas na linha de entrada

Caso	Nó	Tensão (Kpa)	
		Calculado	Admissível
HYD	330	16745,7	45000,0
SUS	330	50658,9	137895,1
EXP	119	63310,7	332202,3

Tabela 4. Tensões máximas na linha de saída

Caso	Nó	Tensão (Kpa)	
		Calculado	Admissível
HYD	10	18530,1	45000,0
SUS	10	52126,0	137895,1
EXP	118	68051,1	302422,7

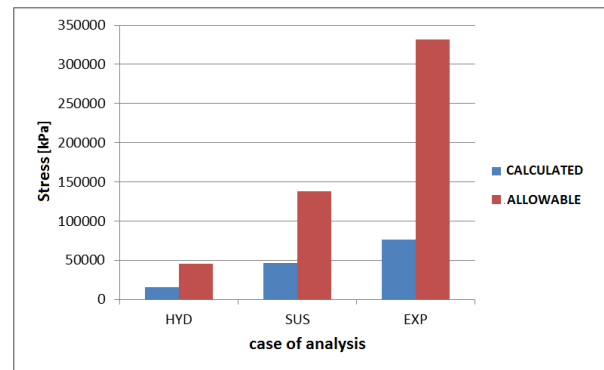


Figura 9. Valores de tensões calculadas e admissíveis

Tabela 5. Tensões máximas no bocal do equipamento

Diam. 4"	Esforços no bocal					
CLASSE: 300#	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Mx (Nm)	My (Nm)	Mz (Nm)
Admissível	4200	5600	5600	1456	1120	1680
Entrada	341	1128	-1223	-439	-299	666
Saída	831	-122	1252	152	-54	-139

## CONCLUSÃO

O intuito do artigo desenvolvido foi atingindo, apresentando os conhecimentos básicos que um Engenheiro Mecânico precisa ter para desenvolver um projeto de tubulações industriais, buscando o desenvolvimento de um projeto que atenda às normas vigentes e que tenha um bom desempenho diante das condições de operação.

Os resultados das tensões nos diferentes casos analisados foram satisfatórios, pois estão abaixo dos admissíveis na condição de projeto. Isso foi obtido através da suportaçõ feita após ser definido um arranjo prévio da linha, buscando evitar altas deflexões na direção vertical (eixo z) e transmitir o menor esforço ao trocador de calor.

Este estudo foi voltado no dimensionamento de um tubo para uma determinada utilidade e a sua análise de acordo com a condição de operação. Para

futuros trabalhos, que possam dar ênfase aos conceitos aqui abordados e fatores considerados que estão presentes na área offshore, é interessante desenvolver um estudo semelhante com maior deflexão ocasionada pela movimentação do navio (uma linha longitudinal ao navio e de maior comprimento) e com equipamentos que geram vibrações a ponto de serem consideradas no projeto. Isso iria gerar um estudo mais aprofundado de uma linha localizada em uma FPSO.

Foi possível observar que os conhecimentos de Softwares voltados para a Engenharia é algo de grande valor do desenvolvimento de projetos mais complexos, entretanto também deve ser considerado o embasamento teórico das diversas matérias praticadas no ambiente acadêmico, os Engenheiros seniores podem mostrar que isso é fundamental na solução de um problema que surge no decorrer de um projeto, especificamente no nosso caso da análise de flexibilidade de uma tubulação voltada para a indústria de processos.

Definir o tipo de tubo a ser utilizado, qualseráacondição de operação e local de serviço é o primeiro passo para saber qual é o tipo de análise a ser realizada, ou seja, quais os parâmetros que devem ser considerados.

Os dados referentes à temperatura, pressão e vazão são obtidos da equipe de processo. Dados que são utilizados em projetos e processos semelhantes foram utilizados para nosso estudo.

Além das cargas impostas à tubulação, também foi considerada a espessura e o peso do isolamento utilizado, visto que uma temperatura de operação de 130°C pode ser considerada alta, caso não tenha o isolamento pode provocar riscos aos operadores do módulo e perda de calor do fluido transportado.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos aqueles que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Engenheiros que atuam na área de exploração de petróleo e autores que desenvolveram bibliografias tomadas como referência para o estudo na área de análise de flexibilidades de tubulações.

## REFERÊNCIAS

- ANSI/API Specification, 2007.  
ASME B31.3, “Process Piping”, 2012.  
Bailona, B. A.; Porto, F. S. A.; Camargo, J. R. “Análise de Tensões em Tubulações Industriais”, LTC, 1ª edição, 2006.  
CoadeCaesarIIv5.10@,http://www.coade.com.  
Acessado em 15/12/2013.  
França Filho, José Luiz de, “Manual para análise de tensões de tubulações industriais - Flexibilidade”, 2013.

LOBÃO, Bruno; BRIZZO, Pablo – “Análise Estática de Flexibilidade de uma Linha de Descarga de Hidrocarboneto”, março de 2013.

Petrobrás N-1673, “Critérios de Cálculo Mecânico de Tubulação” Rev. D.

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

Telles, P. C. S. “Tubulações Industriais – Materiais, Projeto, Montagem”, LTC, 10ª edição, 2012.

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

Porto Alegre, dezembro de 2012.

Disponível em:

<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/66462/000871309.pdf?sequence=1>>

Acesso em: 08 Dez. 2013.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo artigo.

## ANEXO I

# Memória de Cálculo:      **CONTROLE DE DIÂMETRO E DE ESPESSURA DA PAREDE DO TUBO de 3" SCH40.**

## 1. Dados

### 1.1 Linha de Entrada no Trocador de Calor:

Condição:	Pressão:	Temperatura:
Operação	$P_{o_1} := 1040 \text{ kPa}$	$T_{o_1} := 130 \text{ grd C}$
Projeto	$P_{p_1} := 1279 \text{ kPa}$	$T_{p_1} := 160 \text{ grd C}$
Teste hidrostático	$P_{t_1} := 1918 \text{ kPa}$	

### 1.2 Linha de Saída do Trocador de Calor:

Condição:	Pressão:	Temperatura:
Operação	$P_{o_2} := 465 \text{ kPa}$	$T_{o_2} := 100 \text{ grd C}$
Projeto	$P_{p_2} := 556 \text{ kPa}$	$T_{p_2} := 160 \text{ grd C}$
Teste hidrostático	$P_{t_2} := 833 \text{ kPa}$	

### 1.3 Vazão e Velocidade na Entrada e Saída do Trocador de Calor

Vazão	$Vol := 33 \text{ m}^3/h$
Velocidade	$v := 1.9 \text{ m/s}$
Densidade da água	$\rho := 1000 \text{ kg/m}^3$

## 2. Controle do Diâmetro interno

$$d_i := \sqrt{4 \cdot \frac{Vol}{\pi \cdot v \cdot 3600}} \quad \text{em [m]}$$

$$d_i := 1000 \cdot d_i \quad \text{em [mm]}$$

$$d_i = 78.376 \quad \text{em [mm]}$$

**OBS.: O Dimensionamento do Diâmetro interno com NPS=3" está comprovado com o cumprimento de condições de fluxo de Água de Aquecimento do Trocador de Calor.**



### 3. Controle de Espessura de Parede do Tubo conforme ASME B31.3

#### Dados da Linha:

NPS = 3" SCH 40

D := 88.91    **Diametro externo em [mm]**

d := 77.93    **Diametro interno em [mm]**

#### Tubo de precisão sem Costura

Fator de Qualidade da Moldura    E := 1.0

Fator de Redução por Solda    Ws := 1.0

Temperatura do Projeto    Tp = 160°C

Coefficiente material/temperatura    Y := 1.0

Pressão de Projeto    P := 1279 [kPa]

#### Características do Material:

Material:    API 5L GRB

$\sigma_b := 415$     limite de ruptura em [N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_s := 245$     limite de escoam. em [N/mm<sup>2</sup>]

**Tensão admissível na Temperatura de Projeto é 1/3 da Tensão de ruptura e no máximo 2/3 da Tensão de escoamento.**

$$\sigma_{adm} := \frac{\sigma_b}{3} \leq \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \sigma_s$$

$$S := \frac{\sigma_b}{3} \cdot 10^3 \quad \text{em [kPa]}$$

#### Espessura de Parede do Tubo:

$$t_o := \frac{P \cdot D}{2 \cdot (S \cdot E \cdot W_s + P \cdot Y)}$$

$$t_o = 0.407 \quad \text{[mm]}$$

#### Correção da espessura:

1.) 12.5% de Tolerância da Fabricação para a Parede do Tubo

$$C1 := 0.125 \cdot t_o \quad \text{em [mm]}$$

2.) Corrosão e Erosão esperada durante a vida útil

$$C2 := 1.6 \quad \text{em [mm]}$$

$$t := t_o + C1 + C2$$

$$t = 2.058 \quad \text{[mm]}$$

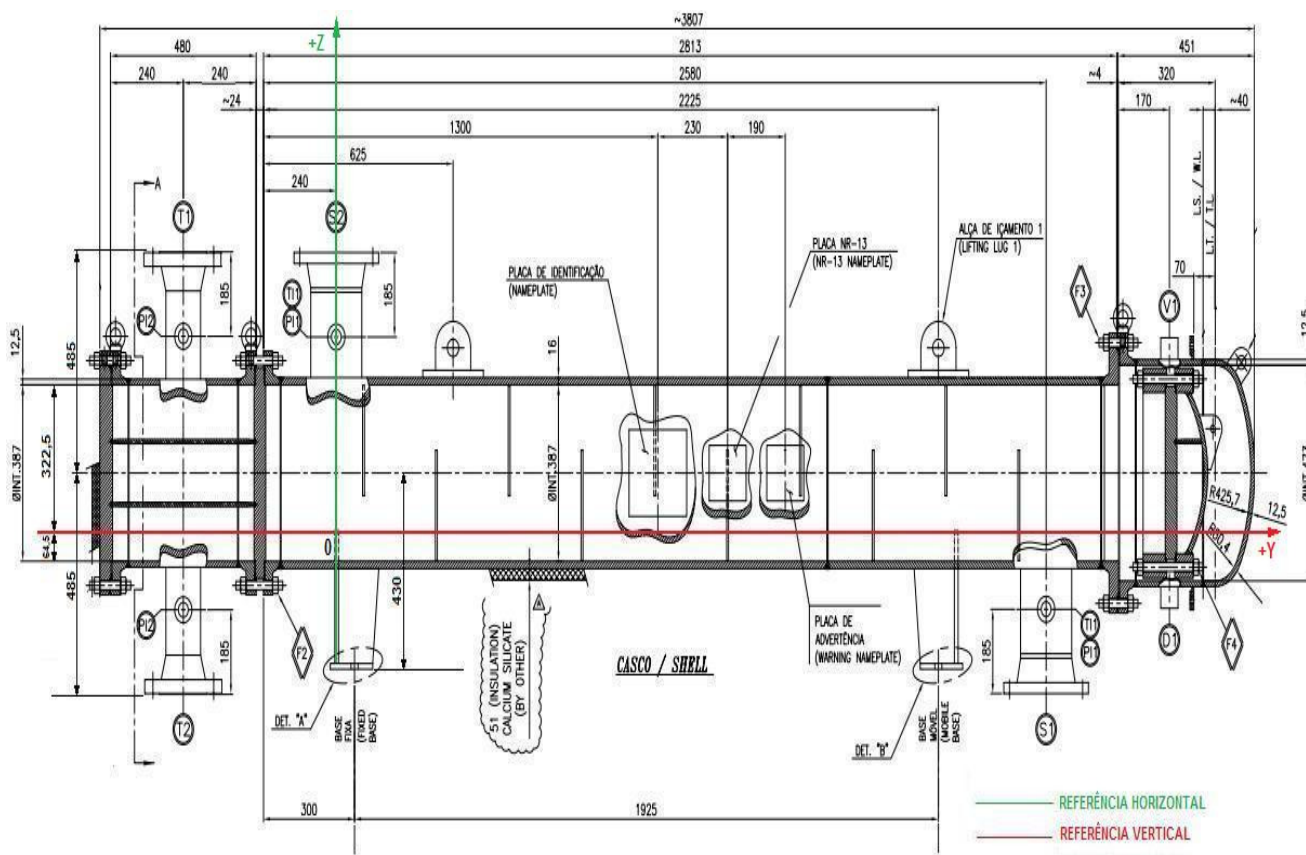
**NOTA:** Neste Caso o Critério para a Escolha de Espessura do Tubo não é a Pressão interna. As Razões para o Dimensionamento de Schedule 40 são de natureza estrutural, de padronização e comercial.

## ANEXO II

# Memória de Cálculo: Deslocamento dos Bocais do Trocador de Calor em consequência de Dilatação térmica do Equipamento.

Base das Dimensões do Trocador de Calor e dos Bocais em questão e o Desenho do Fabricante GEA (Vide abaixo).

A Entrada de água de aquecimento é por cima no Bocal T1, a saída é pelo bocal T2.



Considerando as Referências Horizontais e Verticais, acima indicadas, como base fixo de dilatação, calcula-se os Deslocamentos dos Bocais e o acréscimo do Suporte.

Dados dimensionais:

Comprimento do Bocal  $LB := 485 - \frac{387}{2} \quad LB = 291.5 \quad [\text{mm}]$

Distância Vertical do Bocal T1  $DVT1 := LB + 322.5 \quad DVT1 = 614 \quad [\text{mm}]$

Distância Vertical do Bocal T2  $DVT2 := -(LB + 64.5) \quad DVT2 = -356 \quad [\text{mm}]$

Distância Horizontal do Bocal T1  $DHT1 := -(240 + 240) \quad DHT1 = -480 \quad [\text{mm}]$

Distância Horizontal do Bocal T2  $DHT2 := -(240 + 240) \quad DHT2 = -480 \quad [\text{mm}]$

Comprimento do Suporte  $LS := 430 - \frac{387}{2} + 64.5 \quad LS = 301 \quad [\text{mm}]$

Distância Vertical do Suporte  $DVS := LS \quad DVS = 301 \quad [\text{mm}]$

Distância Horizontal do Suporte  $DHS := 0 \quad \text{Por se tratar do Suporte fixo.}$

O Suporte móvel sofre Deslocamento horizontal, porém sem importância para os Bocais T1 e T2. O crescimento vertical do Suporte móvel é igual ao do Suporte fixo, o que garante o Paralelismo do Equipamento em relação à Base do Módulo ou até com o Convés.

O Fator de expansão térmico linear na Temperatura do Projeto  $T=160^{\circ}\text{C}$  para Aço Carbono

$$T_p := 160 \text{ em } [^{\circ}\text{C}] \quad e_p := 1.67 \text{ em } [\text{mm/m}]$$

Temperatura do Ambiente

$$T_a := 20 \text{ em } [^{\circ}\text{C}]$$

Cálculo de Expansão radial e longitudinal:

Deslocamento Vertical:

$$\text{Bocal T1} \quad \Delta Z_{10} := e_p \cdot DVT1 \cdot 10^{-3} \quad \Delta Z_{10} = 1.025 \text{ [mm]}$$

$$\text{Bocal T2} \quad \Delta Z_{20} := e_p \cdot DVT2 \cdot 10^{-3} \quad \Delta Z_{20} = -0.595 \text{ [mm]}$$

Deslocamento Horizontal:

$$\text{Bocal T1} \quad \Delta Y_{10} := e_p \cdot DHT1 \cdot 10^{-3} \quad \Delta Y_{10} = -0.802 \text{ [mm]}$$

$$\text{Bocal T2} \quad \Delta Y_{20} := e_p \cdot DHT2 \cdot 10^{-3} \quad \Delta Y_{20} = -0.802 \text{ [mm]}$$

Expansão do Suporte:

$$\text{Temperatura média do Suporte} \quad T_m := \frac{T_p + T_a}{2}$$

O Fator de expansão térmico linear na Temperatura média  $T_m=90^{\circ}\text{C}$  para Aço Carbono

$$T_m = 90 \text{ em } [^{\circ}\text{C}] \quad e_m := 0.80 \text{ em } [\text{mm/m}]$$

$$\Delta Z_S := e_m \cdot DVS \cdot 10^{-3} \quad \Delta Z_S = 0.241 \text{ [mm]}$$

O Acrescimento ou Deslocamento Vertical dos Suportes resulta em um Deslocamento vertical paralelo do Trocador de Calor e deverá ser superposicionado ao Deslocamento Vertical dos Bocais.

Resultado:

Deslocamento Vertical:

$$\text{Bocal T1} \quad \Delta Z_1 := \Delta Z_{10} + \Delta Z_S \quad \Delta Z_1 = 1.266 \text{ [mm]}$$

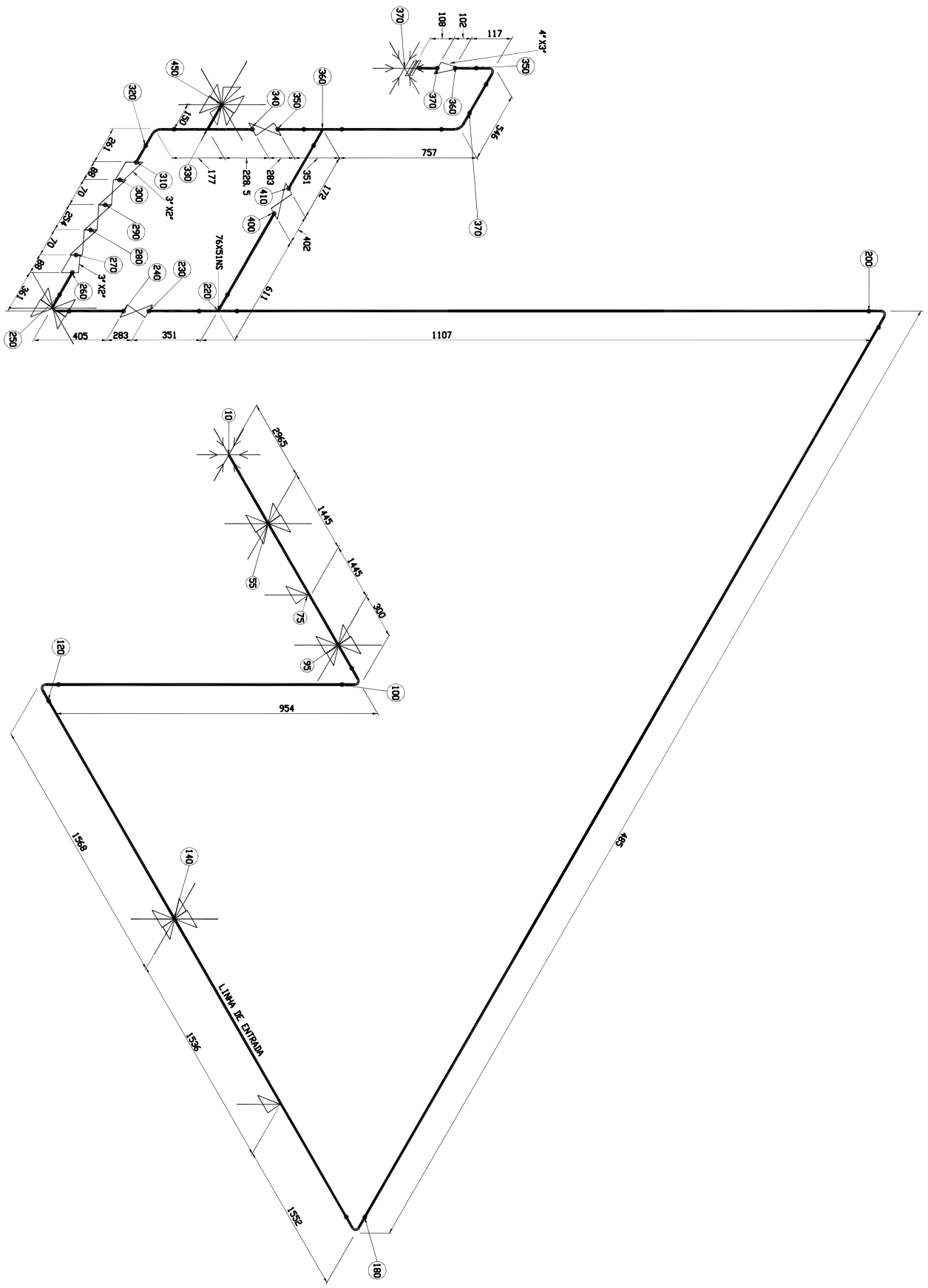
$$\text{Bocal T2} \quad \Delta Z_2 := \Delta Z_{20} + \Delta Z_S \quad \Delta Z_2 = -0.354 \text{ [mm]}$$

Deslocamento Horizontal:

$$\text{Bocal T1} \quad \Delta Y_1 := \Delta Y_{10} \quad \Delta Y_1 = -0.802 \text{ [mm]}$$

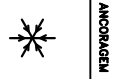
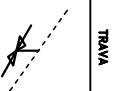
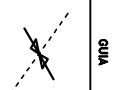
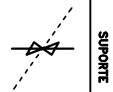
$$\text{Bocal T2} \quad \Delta Y_2 := \Delta Y_{20} \quad \Delta Y_2 = -0.802 \text{ [mm]}$$

## ANEXO III



CEFET/RJ

PROJETO FINAL



SUPORTE  
GUIA  
TRAVA  
ANCORAGEM

DIMENSIONAMENTO DE LINHA DE UTILIDADES

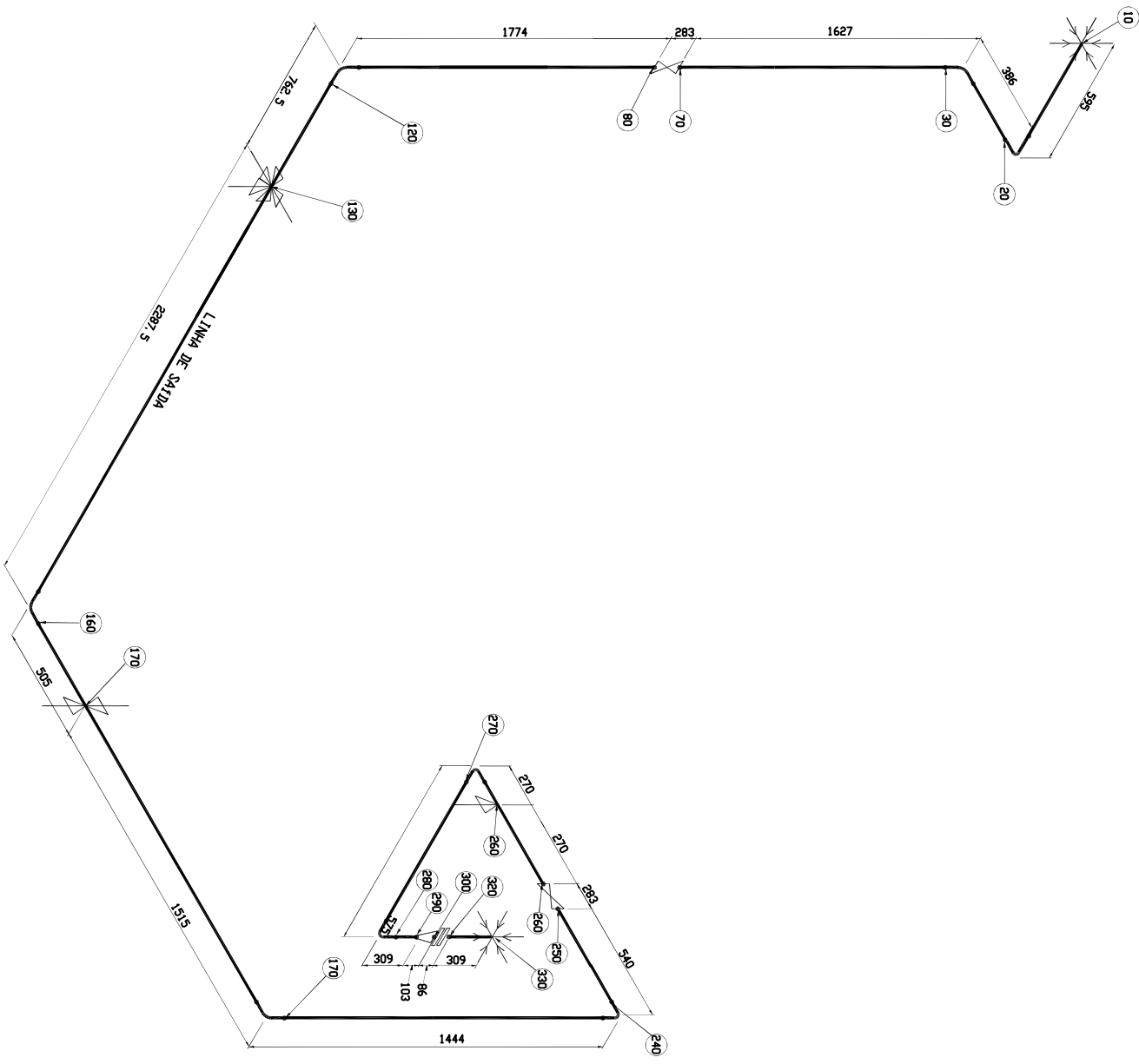
LINHA DE ENTRADA

23/DEZ/13

DATE

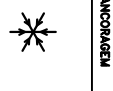
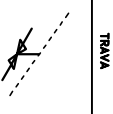
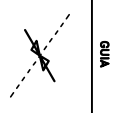
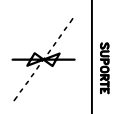
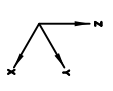
SHEET

1 OF 2



CEFET/RJ

PROJETO FINAL



DIMENSIONAMENTO DE LINHA DE UTILIDADES

LINHA DE SAÍDA

23/DEZ/13

DATE

SHEET  
1 OF 1