

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO MECÂNICO

7,5 (pelo meio)

Armando de B. Salvagni

PROJETO DE TUBULAÇÃO:

ANÁLISE ESTÁTICA E DINÂMICA

Autor: ARMANDO CARLOS CARDOSO JULIANI

Orientador: Ronaldo de B. ^{Reyner} Salvagni

1 9 8 6

S U M Á R I O

O presente texto tem por objetivo desenvolver um projeto de tubulações fazendo sua análise estática (geometria das linhas e seus suportes) e dinâmica (prevenção à vibração que nelas possa ocorrer).

Este projeto será feito para as principais linhas de tubulação da Área de Compressão de Solvente de uma Unidade de Desasfaltação a Propano.

O projeto será apresentado em 3 partes:

PARTE 1 : Descrição do Sistema de Compressão de Solvente para Desasfaltação a Propano.

PARTE 2 : Análise Estática

PARTE 3 : Análise Dinâmica

Na PARTE 1 é feita uma descrição da área de compressão de solvente, especificando as limitações às quais o projeto deve submeter-se. Não serão descritos, em nenhuma parte do trabalho, os aspectos químicos e/ou petroquímicos do processo, exceto as pressões e temperaturas envolvidas.

Tendo definido o contorno, partimos para a PARTE 2, onde é feita a análise estática do sistema de tubulações, também chamada de análise de flexibilidade, onde será definida a geometria final e a suportaçãõ de cada linha.

Na PARTE 3, as linhas de maior responsabilidade, sujeitas à descarga do compressor, são analisadas dinamicamente visando prevenir a ocorrência de vibração.

Vale a pena mencionar ainda, que a execução / do projeto seguirá a orientação da norma ANSI B 31.3 (Chemícal Plant and Petroleum Refinery Piping).

Índice

PARTE 1 : Descrição do Sistema de Compressão de Solvente para Desasfaltação a Propano

1.1 - Considerações Gerais	1
1.2 - Memorial Descritivo	2
1.3 - O Compressor	4
1.4 - Os Equipamentos	7
1.5 - As Linhas de Tubulação	18
1.6 - Planta de Locação Geral	22
1.7 - Análise de Vibração	23

PARTE 2 : Análise Estática (Análise de Flexibilidade)

2.1 - Considerações Gerais	24
2.2 - Prê-Cálculo das Linhas	25
2.3 - Verificação das Linhas por Computador	37
2.4 - Suportes	59

PARTE 3 : Análise Dinâmica

3.1 - Considerações Gerais	78
3.2 - Determinação das Frequências Fundamentais	79
3.3 - Análise dos Resultados	83
3.4 - Verificação à Vibração	85
Conclusão	90

Anexos

Anexo I : Símbologia	91
Anexo II : Fluxograma de Processo	92
Anexo III : Fluxograma Mecânico	93
Anexo IV : Planta de Locação Geral	94
Anexo V : Tabelas para Cálculo de Flexibilidade	95
Anexo VI : Plantas de Tubulação	96
Anexo VII : Isométricos de Tubulação	97
Anexo VIII: Detalhamento de Suportes	98
Bibliografia	99

PARTE 1

DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE COMPRESSÃO

DE SOLVENTE PARA DESASFALTAÇÃO

A PROPANO

1.1 - Considerações Gerais:

Nas páginas a seguir será feita uma completa descrição das limitações e especificações a que o projeto deve submeter-se, dando ênfase para o compressor e outros equipamentos existentes na área. Também são especificadas as tubulações, seus extremos, diâmetros e outras condições.

Não serão descritos os aspectos químicos e/ou petroquímicos do processo, exceto as pressões e temperaturas envolvidas.

Nesta parte estão, portanto, listadas todas as condições necessárias ao desenvolvimento do projeto.

1.2 - Memorial Descritivo

O objetivo do sistema de Compressão de Solvente é armazenar o solvente à média pressão para ser posteriormente utilizado na área de processo.

Para tanto, a área dispõe dos seguintes equipamentos:

C-27401 A/B - Compressores de Solvente

P-27401 - Condensador de Solvente

P-27402 - Condensador de Vapor

V-27401- Vaso Acumulador de Solvente de Média Pressão

V-27402 - Vaso Separador de Condensado

V-27403 - Vaso de Sucção do Compressor

O processo é descrito a seguir: o solvente comprimido é misturado a outro que é oriundo de fora da área e, então, é condensado (P-27401) e lançado no vaso acumulador (V-27401) de onde passa para a área de processo. O abastecimento de solvente é feito da seguinte maneira: O solvente vindo de fora da área é condensado (P-27402) e lançado no vaso separador de condensado (V-27402) que separa a fase vapor da fase líquida, já que a condensação não é total; a fase vapor passa ao vaso de sucção do compressor (V-27403) onde é feita uma nova separação, na qual o vapor vai ao compressor e o condensado volta ao V-27402; além disso, vinda do compressor há uma linha que levando o condensado, produzido no processo de compressão entre um estágio e outro, até a linha que liga o P-27402 ao V-27402.

Há que se mencionar ainda dois fatos:

- A existência de dois compressores (C-27401 A/B), onde apenas um deles opera, sendo o outro utilizado para reserva em caso de manutenção a fim de não deter o processo.

- O condensador de solvente (P-27401) deve ser dividido em 8 devido à sua elevada carga térmica e conseqüente tamanho.

O processo pode ser melhor entendido acompanhando os fluxogramas apresentados em anexo:

Anexo II - Fluxograma de Processo

Anexo III - Fluxograma Mecânico.

1.3 - O Compressor (C-27401 A/B)

Apresentamos a seguir, sob a forma de tabelas, os dados relativos ao Compressor de Solvente C-27401 A/B

- Compressor Alternativo
- Motor assíncrono
- Rotação máxima : 450 rpm
- Rotação nominal : 443 rpm

Estágio	1	2
Gás	HC	HC
Corrosão devido a	H ₂ S	H ₂ S
Umidade Relativa (%)	86	100
Massa Molecular (kg/kmol)	51,335	52,654
Cp/Cv - sucção (CNTP)	1,1063	1,1001
Cp/Cv - descarga (CNTP)	1,1063	1,1001
Temperatura sucção (°C)	43	55
Pressão sucção (bars abs.)	1,21	5,88
Δp _{min.} interestágio (bars)	0,32	
Pressão descarga (bars abs.)	5,88	19,66
Temp. adiabática desc. (°C)	96	98
Compressibilidade sucção	0,9779	0,8990
Compressibilidade descarga	0,9344	0,7096
Vazão volumétrica (m ³ /h seco)	3836	786
Vazão vol. (Nm ³ /h, 0°C, 1 bar)	3508	3508
Vazão máxima (kg/h)	8573	8508
Potência no eixo (kw)	211,7	158,6
Potência total (kw)	420,3	

tab. 1.2.1 - Dados termodinâmicos do compressor C-27401.

Estágio	1	2
H ₂ O	6,64	3,57
Eteno	0,46	0,48
Propeno	2,06	2,13
Propano	1,39	1,44
i- Butano	9,08	9,38
n- Butano	35,80	36,98
Trans - 2 - buteno	23,67	24,45
Isobuteno	20,90	21,59
Total	100,0	100,0
M médio (kg/kmol)	53,895	55,074

tab. 1.2.2 - Composição do Gás (solvente)

Estágio	1	2
Número de Cilindros	1	1
Efeito	duplo	duplo
Diâmetro interno (mm)	785	390
Diâmetro externo (mm)	825	430
Curso (mm)	270	270
Volume deslocado (m ³ /h)	6911	1679
Espaço Nocivo (cabecote) (mm)	11,5	16
Espaço Nocivo (frame) (mm)	11,5	16
Rendimento Volumétrico (%)	68,5	70,3

tab. 1.2.3 - Dados de projeto do Compressor C-27401

Bocal	Bitola	Força (kN)	Momento (mkN)
A	16"-150 ^{FR}	9,24	7,25
B	6"-300 ^{FR}	5,08	2,72
C	1 1/2"-150 ^{FR}	1,81	0,91

tab. 1.2.4 - Esforços admissíveis nos bocais dos compressores.

(Os componentes devem ser considerados iguais)

Bocal	Norte	Leste	Elevação
A	3981488	5569889	2638
B	3974294	5569500	-146
C	3976530	5569219	-206

tab. 1.2.5 - Coordenadas dos bocais do compressor C-27401 A

Bocal	Norte	Leste	Elevação
A	3969488	5569889	2638
B	3962294	5569500	-146
C	3964530	5569219	-206

tab. 1.2.6 - Coordenadas dos bocais do compressor C-27401 B

1.4 - Os Equipamentos

Apresentaremos a seguir, também, sob a forma de tabelas, os dados relativos aos equipamentos e seus bocais, da área de compressão de solvente.

1.4.1 - Condensador de Solvente (P-27401 AaH)

Pressão Operação ($\text{kgf/cm}^2 \text{ M}$)	17,27
Pressão Projeto ($\text{kgf/cm}^2 \text{ M}$)	25,91
Temperatura Operação ($^{\circ}\text{C}$)	120
Temperatura Projeto ($^{\circ}\text{C}$)	180
Carga Térmica Total (kcal/kg)	$286,4 \times 10^6$
Carga Térmica Individual (kcal/kg)	$35,8 \times 10^6$
Área Total do Casco (m^2)	2920
Área Individual do Casco (m^2)	365
Diâmetro (mm)	1041
Comprimento (mm)	6026

tab. 1.4.1.1 - Dados de projeto - P-27401 AaH

Bocal	Bitola	Força (kN)	Momento (mkN)
C1	16"-300 ^{FR}	24,6	12,30
C4	10"-300 ^{FR}	15,4	7,70

tab. 1.4.1.2 - Esforços admissíveis nos bocais do P-27401 (as componentes devem ser consideradas iguais).

Grupo	Bocal	Norte	Leste	Elevação
P-27401	C1	3966650	5609180	20273
A/B	C4	3966650	5609180	16740
P-27401	C1	3963350	5609180	20273
C/D	C4	3963350	5609180	16740
P-27401	C1	3959650	5609180	20273
E/F	C4	3959650	5609180	16740
P-27401	C1	3956350	5609180	20273
G/H	C4	3956350	5609180	16740

tab. 1.4.1.3 - Coordenadas dos bocais do grupo P-27401.

1.4.2 - Condensador de vapor (P-27402)

Pressão de Operação ($\text{kgf/cm}^2\text{M}$)	0,30
Pressão de Projeto ($\text{kgf/cm}^2\text{M}$)	0,45
Temperatura Operação ($^{\circ}\text{C}$)	266
Temperatura Projeto ($^{\circ}\text{C}$)	266
Carga Térmica (kcal/kg)	$79,6 \times 10^6$
Área do Casco (m^2)	255,2
Diâmetro (mm)	864
Comprimento (mm)	6096

tab. 1.4.2.1 - Dados de projeto - P-27402

Bocal	Bitola	Força (kN)	Momento (mkN)
C1	8"-150 ^{FR}	11,2	5,8
C2	10"-150 ^{FR}	14,0	7,2

tab. 1.4.2.2 - Esforços admissíveis nos bocais do P-27402 (as componentes devem ser consideradas iguais).

Bocal	Norte	Leste	Elevação
C1	3963350	5614231	11430
C1	3963350	5609107	11430
C2	3963350	5611669	9930

tab. 1.4.2.3 - Coordenados dos bocais do P-27402

1.4.3 - Vaso Acumulador de Solvente de Média Pressão (V-27401)

Pressão de Operação ($\text{kgf/cm}^2\text{M}$)	16,87
Pressão de Projeto ($\text{kgf/cm}^2\text{M}$)	25,31
Temperatura de Operação ($^{\circ}\text{C}$)	69
Temperatura de Projeto ($^{\circ}\text{C}$)	185
Diâmetro (mm)	4200
Comprimento (mm)	16800

tab. 1.4.3.1 - Dados de projeto - V-27401

Bocal	Bitola	Força (kN)	Momento (mkN)
1	18"-300 ^{FR}	35,0	23,8

tab. 1.4.3.2 - Esforços admissíveis no bocal do V-27401 (as componentes devem ser consideradas iguais)

Bocal	Norte	Leste	Elevação
1	3980250	5608660	11856

tab. 1.4.3.3 - Coordenadas do bocal do V-27401

1.4.4 - Vaso Separador de Condensado (V-27402)

Pressão de Operação (kgf/cm^2_M)	0,27
Pressão de Projeto (kgf/cm^2_M)	3,00
Temperatura de Operação ($^{\circ}\text{C}$)	143
Temperatura de Projeto ($^{\circ}\text{C}$)	250
Diâmetro (mm)	1370
Comprimento (mm)	4100

tab. 1.4.4.1 - Dados de projeto do V-27402

Bocal	Bitola	Força (kN)	Momento (mkN)
1	12"-150 ^{FR} -FR	18,7	16,5
2	10"-150 ^{FR} -FR	15,6	14,6
3	2"-150 ^{FR} -FR	2,8	2,9

tab. 1.4.4.2 - Esforços admissíveis nos bocais do V-27402 (as componentes devem ser consideradas iguais)

Bocal	Norte	Leste	Elevação
1	3983500	5587889	5493
2	3983500	5584992	6552
3	3983500	5587239	5493

tab. 1.4.4.3 - Coordenadas dos bocais do V-27402.

1.4.5 - Vaso de Sucção do Compressor (V-27403)

Pressão de Operação ($\text{kgf/cm}^2\text{M}$)	0,27
Pressão de Projeto ($\text{kgf/cm}^2\text{M}$)	3,00
Temperatura de Operação ($^{\circ}\text{C}$)	143
Temperatura de Projeto ($^{\circ}\text{C}$)	250
Diâmetro (mm)	1070
Comprimento (mm)	3200

tab. 1.4.5.1 - Dados de projeto do V-27403

Bocal	Bitola	Força (kN)	Momento (mkN)
1	10"-150 ^{FF} -FR	15,6	14,6
2	10"-150 ^{FF} -FR	15,6	14,6
3	2"-150 ^{FF} -FR	2,8	2,9

tab. 1.4.5.2 - Esforços admissíveis nos bocais do V-27403(as componentes devem ser consideradas iguais)

Bocal	Norte	Leste	Elevação
1	3982980	5582020	7145
2	3982952	5580952	8565
3	3982663	5581500	5105

tab. 1.4.5.3 - Coordenadas dos bocais do V-27403

1.4.6 - Expansão Em Equipamentos

Nas cinco páginas a seguir são fornecidos para todos os equipamentos os deslocamentos surgidos em seus bocais devido ao efeito térmico.

Para efeito de cálculo foi considerada uma temperatura máxima (que é igual ou maior à temperatura de projeto) .

A expansão é calculada a partir da seguinte relação :

$$\Delta l = \frac{l_o}{1000} \cdot \frac{e}{100} \cdot 3,281$$

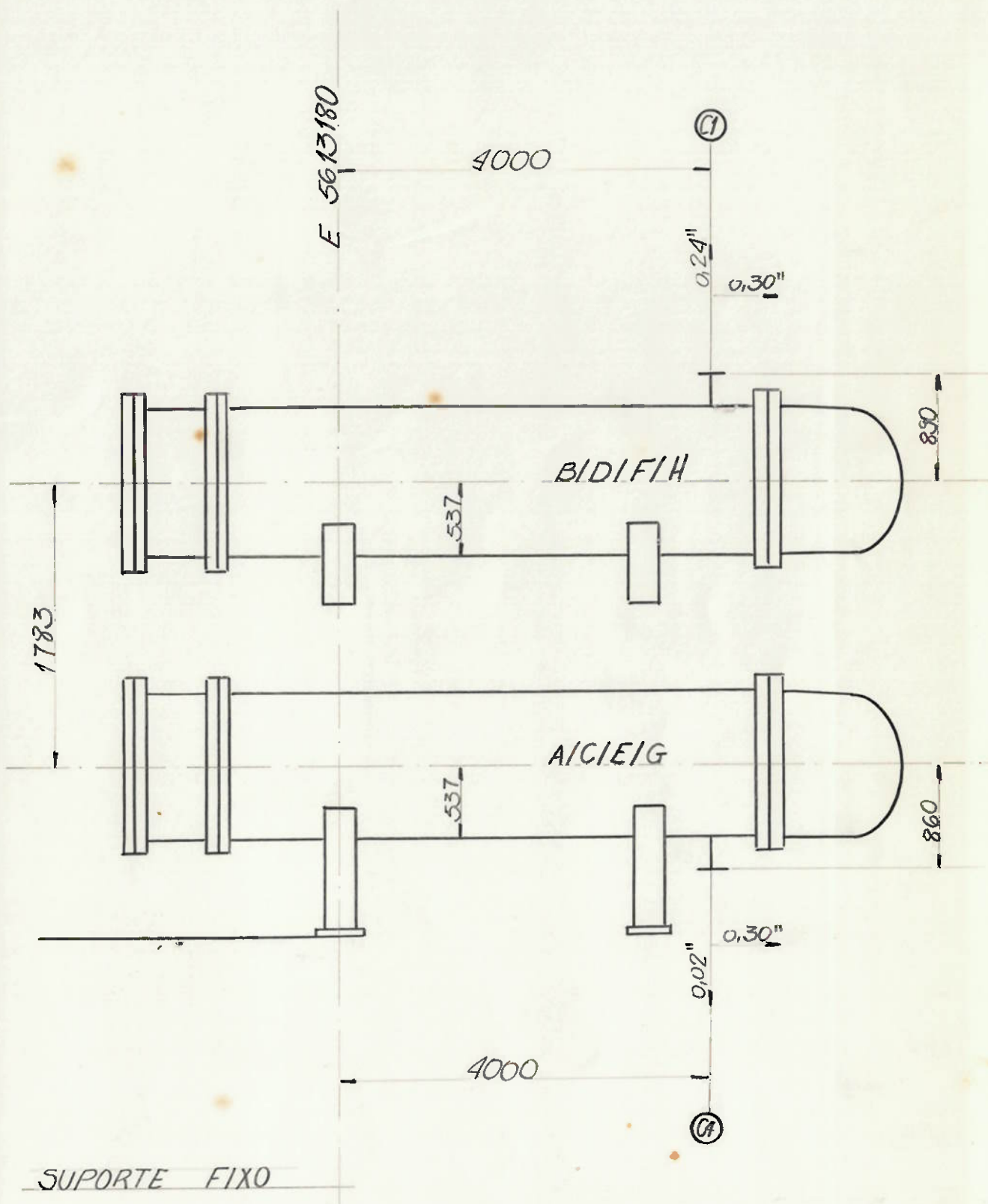
onde:

Δl : expansão do bocal (polegadas)

l_o : distância entre a referência (suporte fixo, linha de centro, etc...) e o bocal (mm)

e : coeficiente de expansão térmica, tirado da norma ANSI B31.3, para aço carbono à temperatura de cálculo (pol/100ft)

E ← ○ =

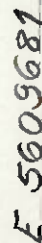


DESASFALTAÇÃO A PROPANO EXPANSÃO EM EQUIPAMENTOS

EPUSP

EQUIPAMENTO: P-27401 A a H
 $T_{max} = 180^{\circ}C = 356^{\circ}F$ $e = 2,31 \ln / 100 + t$
 Armando Juliani 01/07/86 PMC 581

Visto



EPUSP

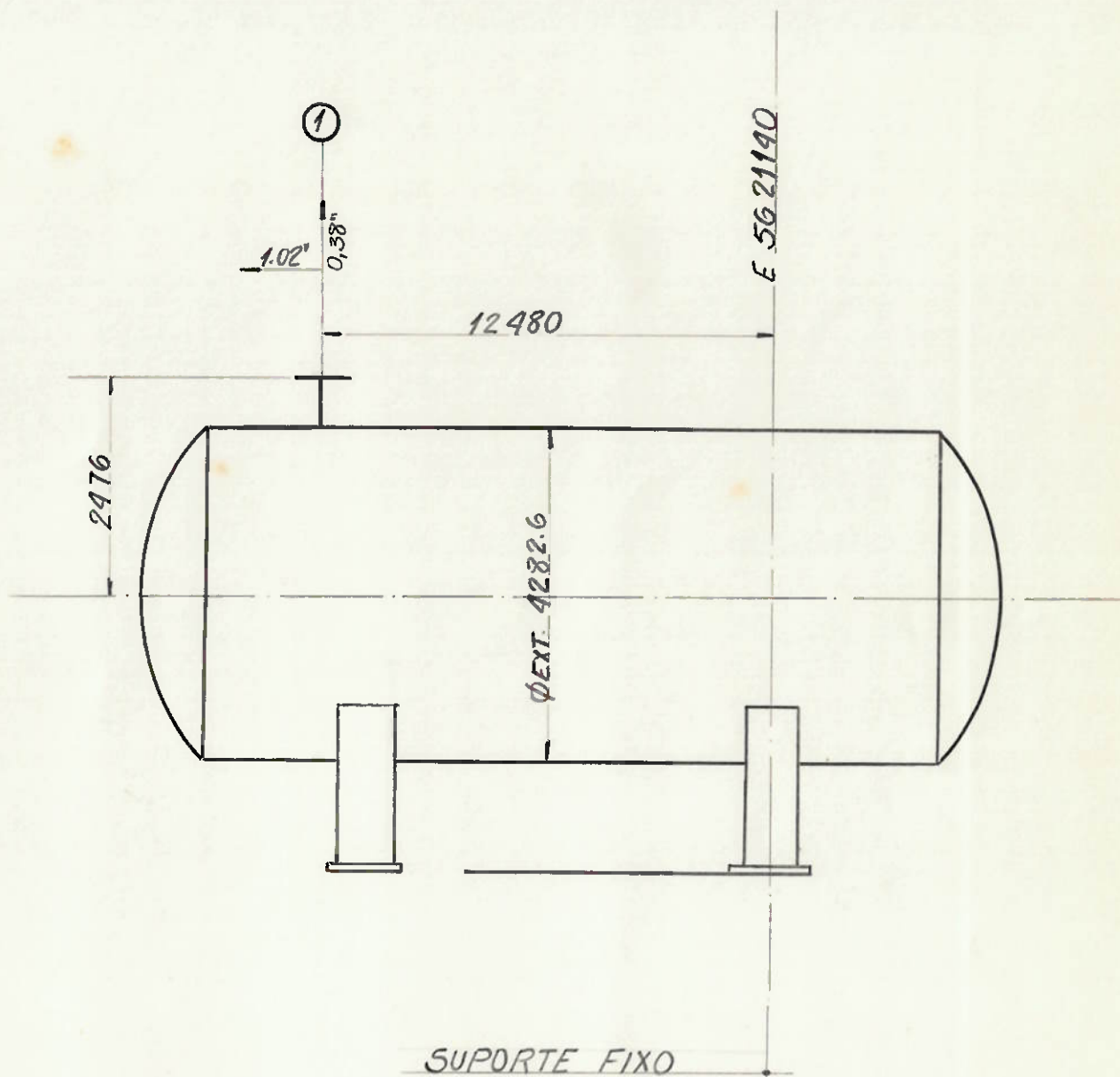
$$T_{max} = 266^{\circ}\text{C} = 511^{\circ}\text{F}$$
$$e = 3.73 \text{ in}/100ft$$

Armando Juliani

01/07/86

PMC 581

Visto



DESASFALTAÇÃO A PROPANO EXPANSÃO EM EQUIPAMENTOS

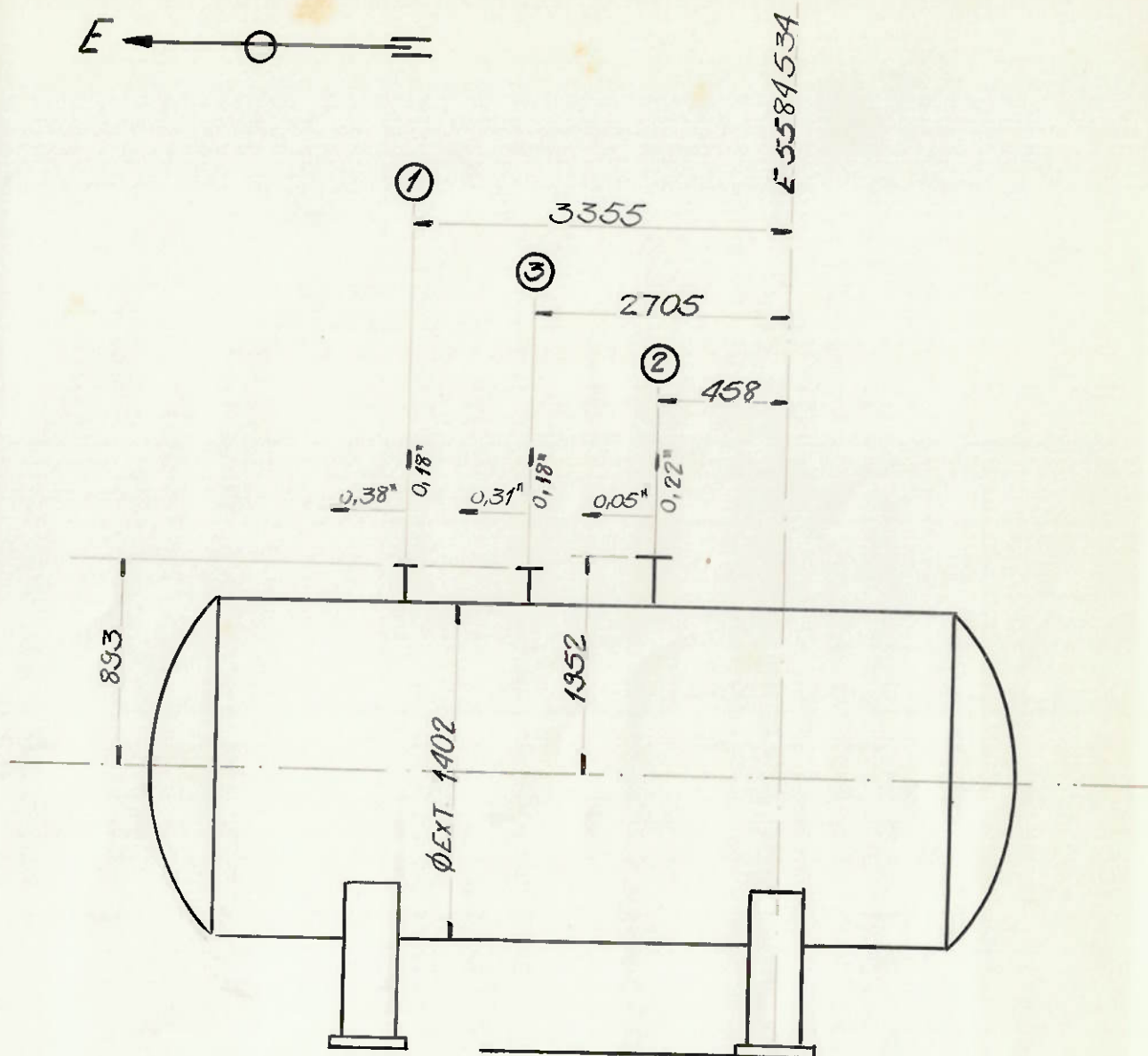
EPUSP

EQUIPAMENTO. V-27401

$$T_{max} = 185^{\circ}\text{C} = 365^{\circ}\text{F} \quad e = 2.39 \text{ in}/100 \text{ ft}$$

Armando Julian	01/07/86	PMC 581
----------------	----------	---------

Visto



SUPORTE FIXO

DESASFALTAÇÃO A PROPANO EXPANSÃO EM EQUIPAMENTOS

EPUSP

EQUIPAMENTO: V-27402

$T_{max} = 250^{\circ}C = 482^{\circ}F$

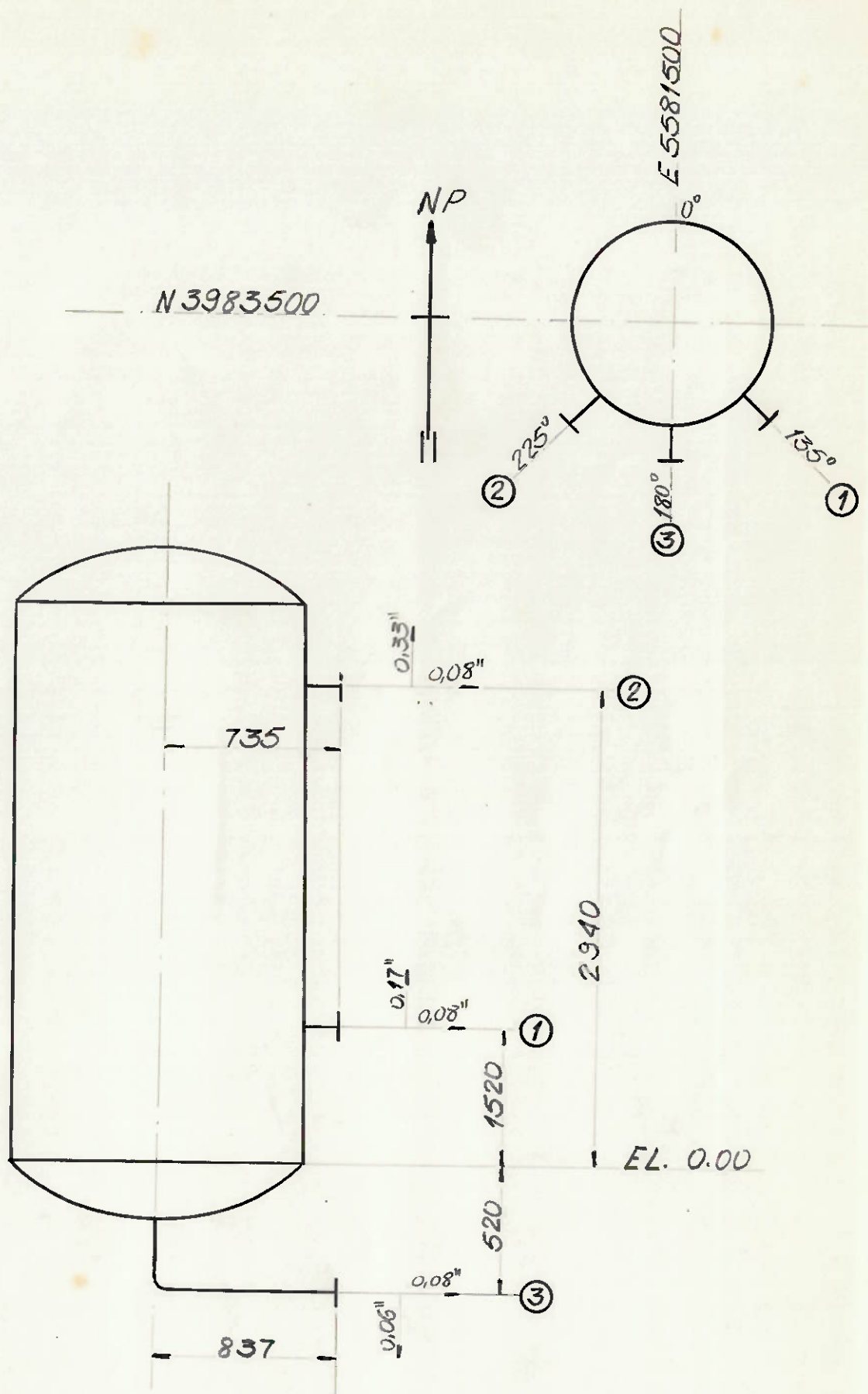
$e = 3,45 \text{ in/100ft}$

Armando Juliari

01/07/86

PMC581

Visto



DESASFALTAÇÃO A PROPANO EXPANSÃO EM EQUIPAMENTOS

EPUSP

EQUIPAMENTO: V-27403

$T_{max} = 250^{\circ}C = 482^{\circ}F$

$c = 3,45 \text{ cm/100 ft}$

Armando Juliani

01/07/86

PMC581

Visto

1.5 - As Linhas de Tubulação

Na tabela seguinte são apresentadas as linhas que fazem parte do sistema de compressão de solvente, suas propriedades e condições de operação.

As linhas mais importantes que devem ser objeto da análise de flexibilidade são as de hidrocarboneto (HC) listadas a seguir:

16"-HC-274-222-Ba
12"-HC-274-226-Ba
10"-HC-274-227-Ba
2"-HC-274-229-Ba
10"-HC-274-231-Ba
10"-HC-274-232-Ba
6"-HC-274-233-Ca
6"-HC-274-234-Ca
20"-HC-274-239-Ca
16"-HC-274-242-Ca
12"-HC-274-243-Ca
12"-HC-274-245-Ca
10"-HC-274-246-Ca
10"-HC-274-248-Ca
12"/16"-HC-274-249-Ca
11/2"-HC-274-291-Ba
11/2"-HC-274-292-Ba

Todas elas obedecem à seguinte especificação de materiais:

a) Especificação Ba

* Fluido : Hidrocarbonetos

* Faixa de variação de pressão e temperatura

-8,5 kgf/cm² a 180°C

-12 kgf/cm² a 40°C

* Norma de Projeto : ANSI B-31.3

* Classe de pressão nominal (ANSI B-16.5)

150 #

* Sobre -espessura para corrosão : 1,2mm

* Tubos:

Aço carbono, preto, com ou sem costura API 5L Gr B, pontas chanfradas, schedule standart.

* Flanges

Flanges de pescoço ou sobreposto, face plana, classe 150# (ANSI B-16.5), aço forjado ASTM A-181 Gr.I, espessura de acordo com o tubo

* Válvulas

Válvulas de ferro fundido ASTM A-126, classe 150 #, extremos com flanges de face plana, mecanismo interno de latão.

b) Especificação Ca

* Fluido: Hidrocarbonetos

* Faixa de variação de pressão e temperatura

-40 kgf/cm² a 100°C

-28 kgf/cm² a 400°C

* Norma de projeto: ANSI B-31.3

* Classe de pressão nominal (ANSI B-16.5)

300 #

* Sobre-espessura para corrosão: 1,2mm

* Tubos:

Aço carbono, preto, com ou sem costura API 5L Gr.B, pontas chanfradas, schedule standart.

* Flanges

Flanges de pescoço, face de ressalto, classe 300 # (ANSI B-16.5), aço forjado ASTM A-181 Gr I, espessura de acordo com o tubo.

* Válvulas

Válvulas de ferro fundido ASTM A-216 Gr WCB, extremos com flanges de face de ressalto 300 #, mecanismo interno de aço inoxidável ASTM A-182 Gr F-6.

A N E X O I I I

FLUXOGRAMA MECÂNICO

1.6 - Planta de Locação Geral

É apresentada no Anexo IV a Planta de Locação Geral, onde esta representada a Área de Compressão de Solvente com seus equipamentos e outras estruturas (tais como, pipe-racks e casa de permutadores), tendo-se, então, uma visão geral do contorno do problema.

1.7. Análise de Vibração

Após o cálculo de flexibilidade, algumas linhas devem ser verificadas com relação à vibração. Estas linhas são de descarga do compressor:

6"-HC-274-233-Ca

6"-HC-274-234-Ca

20"-HC-274-239-Ca

16"-HC-274-242-Ca

12"-HC-274-243-Ca

12"-HC-274-245-Ca

Esta análise de vibração deve prever, basicamente, duas possibilidades, quais sejam:

- Efeitos de ressonância devidos ao desbalanço de massas rotativas do compressor.
- Efeitos de ressonância devidos à pulsação ocasionada pelo escoamento do fluido.

No caso de algum desses efeitos apresentar resultados significativos, devem ser apontadas possíveis soluções.

PARTE 2

ANÁLISE ESTÁTICA

(ANÁLISE DE FLEXIBILIDADE)

2.1 - Considerações Gerais:

Tendo sido conhecidas as limitações a que o projeto deve submeter-se, passamos à determinação da trajetória a ser percorrida pelas linhas da área de compressão de solvente.

Para tanto serão utilizadas métodos simplificados de cálculos e programas, especialmente, desenvolvidos para isto.

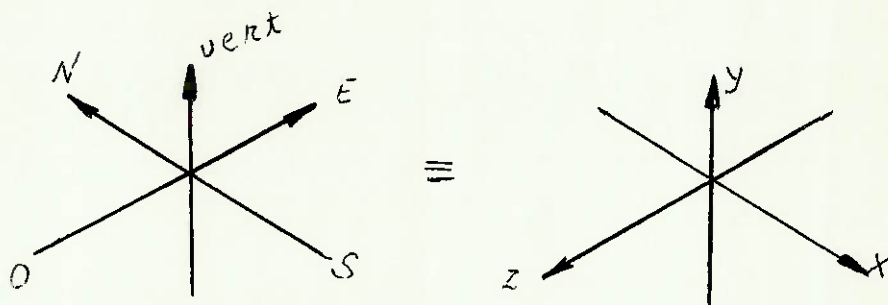
O sistema de referência a ser adotado d'ora em diante neste trabalho será o seguinte:

eixo X: direção N-S

eixo Y: direção vertical

eixo Z: direção E-O

assim:



X positivo: do Norte para o Sul

Y positivo: de baixo para cima

Z positivo: do Leste para o Oeste

2.2 - Prê-Cálculo das Linhas

2.2.1 - Considerações sobre o Método Utilizado.

O prê-cálculo das linhas será feito por meio das tabelas apresentadas no Anexo V. Essas tabelas dizem -nos qual o comprimento de "braço" necessário para que a linha seja suficientemente flexível, baseadas nas seguintes relações:

$$l = \{ 62,4 . \Delta l . D_e \}^{1/2} - \text{TAB. B}$$

$$l = \{ 20,8 . \Delta l . D_e \}^{1/2} - \text{TAB. C}$$

$$F = \frac{6 . \Delta l . E . I}{1728 l^3} - \text{TABS. E, F, G}$$

onde:

l : braço necessário para absorção (ft)

Δl : dilatação térmica (pol.)

D_e : diâmetro externo da linha (pol.)

E : módulo de elasticidade ($\approx 30 \times 10^6$ psi)

I : momento de inércia da seção (pol⁴)

F : força de expansão (lbf)

Deve-se ainda considerar o seguinte:

- Nas linhas em que há ramificações será considerada a maior distância entre os extremos.
- Nos casos onde houver necessidade de reiteração, será usado como força o maior dos valores dos esforços admissíveis nos bo cais.

- Todos os cálculos de flexibilidade serão feitos considerando-se a maior das temperaturas a que a linha estiver submetida (projeto ou limpeza com vapor).
- Quando o braço necessário for menor que o existente não há que se preocupar; quando não, tem-se que "criar" braços para que seja atendido o valor estipulado.
- O cálculo da força será feito considerando-se o maior valor dos braços: o necessário ou o existente.
- Quando, mesmo com o maior braço para absorção, o valor da força estimada ultrapassar a 60 % do valor do esforço admissível será feita uma reiteration, aumentando-se ainda mais o braço necessário.

2.2.2 - Linha: 12"-HC-274-226-Ba

Temperatura: $180^{\circ}\text{C} = 356^{\circ}\text{F}$

Coefficiente de Expansão: 2,31 pol/100ft

a) Extremidades e Coordenadas

- Extremidade A : P-27402 - Bocal C2

N= 3963350

E= 5611669

El= 9930

- Extremidade B : V-27402 - Bocal 1

$$N = 3983500$$

$$E = 5587889$$

$$El = 5493$$

b) Braços e Maior Expansão

$$lx = |Na - Nb| = 20150 \text{ mm}$$

$$ly = |E_{eA} - E_{eB}| = 4437 \text{ mm}$$

$$lz = |EA - EB| = 23780 \text{ mm}$$

- Maior Braço: $lz = 23780 \text{ mm} = 78,02 \text{ ft}$

- Expansão: $\Delta l = \frac{l}{1000} \cdot \frac{e}{100} \cdot 3,281 = 1,80 \text{ pol}$

c) Uso das Tabelas

- braço necessário (TAB B)

$$ln = 37,2 \text{ ft} = 11308 \text{ mm} < lx + ly$$

- força aproximada (TAB E)

$$F = lx \Delta l = 95 \text{ lbf} = 420 \text{ N}$$

2.2.3 - Linha: 2"-HC-274-229-Ba

$$\text{Temperatura: } 180^{\circ}\text{C} = 356^{\circ}\text{F}$$

$$\text{Coeficiente de Expansão: } 2,31 \text{ pol}/100 \text{ ft}$$

a) Extremidades e Coordenadas

- Extremidade A : V-27402 - Bocal 3

$$N = 3983500$$

$$E = 5587239$$

$$El = 5493$$

- Extremidade B: V-27403 - Bocal 3

$$N = 3982663$$

$$E = 5581500$$

$$El = 5105$$

b) Braços e Maior Expansão

$$lx = |N_A - N_B| = 837 \text{ mm}$$

$$ly = |El_A - El_B| = 388 \text{ mm}$$

$$lz = |E_A - E_B| = 5739 \text{ mm}$$

$$\text{Maior Braço} = lz = 5739 \text{ mm} = 18,836 \text{ ft}$$

$$\text{Expansão: } \Delta l = \frac{l \times e}{1000 \times 100} \times 3,281 = 0,43 \text{ pol}$$

c) Uso das Tabelas

- braço necessário (TAB B)

$$ln = 7,776 \text{ ft} = 2368 \text{ mm} > lx + ly$$

- força aproximada (TAB E)

$$F = lx \Delta l = 70 \text{ lbf} = 310 \text{ N}$$

2.2.4 - Linha: 10"-HC-274-227-Ba

$$\text{Temperatura: } 180^\circ \text{C} = 356^\circ \text{F}$$

$$\text{Coeficiente de Expansão: } 2,31 \text{ pol}/100 \text{ ft}$$

a) Extremidade e Coordenadas

- Extremidade A: V-27402 - Bocal 2

$$N = 3983500$$

$$E = 5584992$$

$$El = 6552$$

- Extremidade B: V-27403 - Bocal 1

$$N = 3982980$$

$$E = 5582020$$

$$El = 7145$$

b) Braços e Maior Expansão

$$lx = |N_A - N_B| = 520 \text{ mm}$$

$$ly = |El_A - El_B| = 593 \text{ mm}$$

$$lz = |E_A - E_B| = 2972 \text{ mm}$$

- Maior Braço = $lz = 2972 \text{ mm} = 9,75 \text{ ft}$

- Expansão: $\Delta l = \frac{l}{1000} \cdot \frac{e}{100} \cdot 3,281 = 0,23 \text{ pol}$

c) Uso das Tabelas

- braço necessário (TAB B)

$$ln = 7,05 \text{ ft} = 2150 \text{ mm} > lx + ly$$

- força aproximada (TAB E)

$$F = lx \cdot 4l = 11230 \text{ lbf} = 49,9 \text{ kN}$$

- reiterando para $F = 15,6 \text{ kN}$

$$ln = 10,5 \text{ ft} = 3200 \text{ mm}$$

2.2.5 - Linha: 16"-HC-274-222-Ba

Temperatura: $215^{\circ}\text{C} = 419^{\circ}\text{F}$

Coefficiente de Expansão: 2,87 pol/100 ft

a) Extremidades e Coordenadas

- Extremidade A: P-27402 - Bocal C1

N = 3963350

E = 5614231

El = 11430

- Extremidade B: Limite de Área

N = 3965850

E = 5593481

El = 11900

b) Braços e Maior Expansão

$$l_x = |N_A - N_B| = 2500 \text{ mm}$$

$$l_y = |E_{EA} - E_{EB}| = 470 \text{ mm}$$

$$l_z = |E_A - E_B| = 20750 \text{ mm}$$

- Maior Braço = $l_z = 20750 \text{ mm} = 68,10 \text{ ft}$

- Expansão: $\Delta l = \frac{l}{1000} \cdot \frac{e}{100} \cdot 3,281 = 1,95 \text{ pol}$

c) Uso das Tabelas

- braço necessário (TAB B)

$$l_n = 44,1 \text{ ft} = 13441 \text{ mm} > l_x + l_y$$

- força aproximada (TAB F)

$$F = f \times \Delta \ell = 1340 \text{ lbf} = 5,95 \text{ kN}$$

2.2.6 - Linha: 6"-HC-274-233/234-Ca

$$\text{Temperatura: } 180^{\circ}\text{C} = 356^{\circ}\text{F}$$

$$\text{Coeficiente de Expansão: } 2,31 \text{ pol}/100 \text{ ft}$$

a) Extremidades e Coordenadas

- Extremidade A: Linha 20"-HC-274-239-Ca

$$N = 3960500$$

$$E = 5606051$$

$$El = 21254$$

- Extremidade B: C-27401 A - Boca B

$$N = 3974294$$

$$E = 5569500$$

$$El = -146$$

b) Braços e Maior Expansão

$$\ell_x = |N_A - N_B| = 13794 \text{ mm}$$

$$\ell_y = |E_{LA} - E_{LB}| = 21400 \text{ mm}$$

$$\ell_z = |E_A - E_B| = 36551 \text{ mm}$$

- Maior braço: $\ell_z = 36551 \text{ mm}$

$$\text{- Expansão: } \Delta \ell = \frac{\ell}{1000} \times \frac{e}{100} \times 3,281 = 2,77 \text{ pol}$$

c) Uso das Tabelas

- braço necessário (TAB B)

$$l_n = 33,5ft = 10210 \text{ mm} < l_x + l_y$$

- força aproximada (TAB E)

$$F = f_x \Delta l = \text{desprezível}$$

2.2.7 - Linha: 10"-HC-274-231/232-Ba

$$\text{Temperatura: } 180^{\circ}\text{C} = 356^{\circ}\text{F}$$

$$\text{Coeficiente de Expansão: } 2,31\text{pol}/100\text{ft}$$

a) Extremidades e Coordenadas

- Extremidade A: V-27403 - Bocal 2

$$N = 3982952$$

$$E = 5580952$$

$$El = 8565$$

- Extremidade B: C-27401 B - Bocal A

$$N = 3969488$$

$$E = 5569889$$

$$El = 2638$$

b) Braços e Maior Expansão

$$l_x = |N_A - N_B| = 13464 \text{ mm}$$

$$l_y = |El_A - El_B| = 5927 \text{ mm}$$

$$l_z = |E_A - E_B| = 11063 \text{ mm}$$

- Maior Braço: $l_x = 13464 \text{ mm}$

- Expansão: $\Delta l = \frac{l}{1000} \times \frac{e}{100} \times 3,281 = 1,02''$

c) Uso das Tabelas

- braço necessário (TAB B)

$$l_n = 26,1 \text{ ft} = 7955 \text{ mm} < l_y + l_z$$

- força aproximada (TAB E)

$$F = f \times \Delta l = 99 \text{ lbf} \approx 440 \text{ N}$$

2.2.8 - Linha: $1\frac{1}{2}''$ -HC-274-291/292-Ba

Temperatura: $180^\circ\text{C} = 356^\circ\text{F}$

Coefficiente de Expansão: $2,31 \text{ pol}/100 \text{ ft}$

a) Extremidade e Coordenadas

- Extremidade A: Linha $12''$ -HC-274-226-Ba

$$N = 3983500$$

$$E = 5587889$$

$$El = 5768$$

- Extremidade B C-27401B - Boca C

$$N = 3964530$$

$$E = 5569219$$

$$El = - 206$$

b) Braços e Maior Expansão

$$l_x = |N_A - N_B| = 18970 \text{ mm}$$

$$l_y = |E_{lA} - E_{lB}| = 5974 \text{ mm}$$

$$l_z = |E_A - E_B| = 18670 \text{ mm}$$

- Maior Braço = $l_x = 18970 \text{ mm}$

- Expansão: $\Delta l = \frac{l}{1000} \times \frac{e}{100} \times 3,281 = 1,44''$

c) Uso das Tabelas

- braço necessário (TAB B)

$$l_n = 13,0 \text{ ft} = 3962 \text{ mm} < l_y + l_z$$

- força aproximada (TAB E)

$$F = f_x \Delta l = \text{desprezível}$$

2.2.9 - Linha 20"/16"/12"-HC-274-239/242/243/245-Ca

$$\text{Temperatura: } 180^\circ\text{C} = 356^\circ\text{F}$$

$$\text{Coeficiente de Expansão: } 2,31 \text{ pol}/100 \text{ ft}$$

a) Extremidades e Coordenadas

- Extremidade A: Limite de Área

$$N = 3960500$$

$$E = 5594680$$

$$E_l = 9890$$

- Extremidade B: P-27401 B - Bocal C1

$$N = 3966650$$

$$E = 5609180$$

$$El = 20273$$

b) Braços e Maior Expansão

$$lx = |N_A - N_B| = 6150 \text{ mm}$$

$$ly = |El_A - El_B| = 10383 \text{ mm}$$

$$lz = |E_A - E_B| = 14500 \text{ mm}$$

- Maior Braço = $lz = 14500 \text{ mm}$

$$\text{- Expansão: } \Delta l = \frac{l}{1000} \times \frac{e}{100} \times 3,281 = 1,10''$$

c) Uso das Tabelas

- braço necessário (TAB B)

$$ln = 37,0 \text{ ft} = 11277 \text{ mm} < lx + ly$$

- força aproximada (TAB F)

$$F = lx \Delta l = 2520 \text{ lbs} = 11,2 \text{ kN}$$

2.2.10 - Linha: 10"/12"/16"-HC-274-246/248/249- Ca

$$\text{Temperatura: } 180^\circ\text{C} = 356^\circ\text{F}$$

$$\text{Coeficiente de Expansão: } 2,31 \text{ pol}/100 \text{ ft}$$

a) Extremidades e Coordenadas

-Extremidade A P-27401 G - Bocal C4

$$N = 3956350$$

$$E = 5609180$$

$$El = 16740$$

- Extremidade B - V-27401 Bocal 1

$$N = 3980250$$

$$E = 5608660$$

$$El = 11856$$

b) Braços e Maior Expansão

$$lx = | N_A - N_B | = 23900 \text{ mm}$$

$$ly = | El_A - El_B | = 4884 \text{ mm}$$

$$lz = | E_A - E_B | = 520 \text{ mm}$$

- Maior Braço = $lx = 23900 \text{ mm}$

$$\text{- Expansão: } \Delta l = \frac{l}{1000} \times \frac{e}{100} \times 3,281 = 1,81''$$

c) Uso das Tabelas

- braço necessário (TAB B)

$$ln = 42,5ft = 12953 \text{ mm} > ly + lz$$

- força aproximada (TAB F)

$$F = lx \Delta l = 1381 \text{ lbf} = 6,13 \text{ kN}$$

2.3 - Verificação das Linhas por Computador

2.3.1 - Considerações Gerais

A maneira mais precisa para o cálculo de flexibilidade de tubulações é a utilização do Método Analítico Geral, que é uma rotina de cálculo deduzida a partir do Teorema de Castigliano.

Nos últimos anos foram desenvolvidos vários "softwares" que executam esta rotina, e neste trabalho será utilizado um deles.

O programa utilizado, no entanto, apresenta as seguintes limitações:

- considera a linha com apenas um diâmetro (linha sem redução)
- não admite ramais ou derivações na linha
- não admite restrições ou singularidades intermediárias, tais como, apoios, válvulas, flanges, etc.
- faz somente o cálculo dos esforços devidos a dilatação térmica.

Apesar dessas limitações, o programa é suficiente para o cálculo de quaisquer linhas, desde que sejam as seguintes considerações:

- quando a linha apresentar mais de um diâmetro num trecho significativamente longo, deve-se utilizar o maior valor (ou o médio), tornando-a mais rígida do que ela o é.

- quando houver ramais ou derivações, cada ramal deve ser calculado separadamente em trechos e, depois, combinados convenientemente.

- em termos práticos, o peso próprio sô é relevante nos bocais; assim esse cálculo deve ser feito separadamente e, depois, somado ao esforço térmico.

Todas as linhas que devem submeter-se ao cálculo de flexibilidade neste projeto serão verificadas com auxílio deste programa e seguindo-se as recomendações acima.

O cálculo do peso a ser aplicado entre bocais é feito da seguinte maneira.

$$P = L \cdot q$$

onde:

P: peso da tubulação a ser suportado pelo bocal (N)

L: metade do comprimento de tubo entre o bocal e o suporte mais próximo (m)

q: peso por comprimento de tubo cheio d'água (N/ m)

A sequência de cálculo é apresentada a seguir:

1º) traçado do "lay-out" das linhas

2º) Verificação da linha por meio do programa

3º) Em caso da verificação ter sido satisfatória, traçado das plantas de tubulação, marcando os suportes das linhas

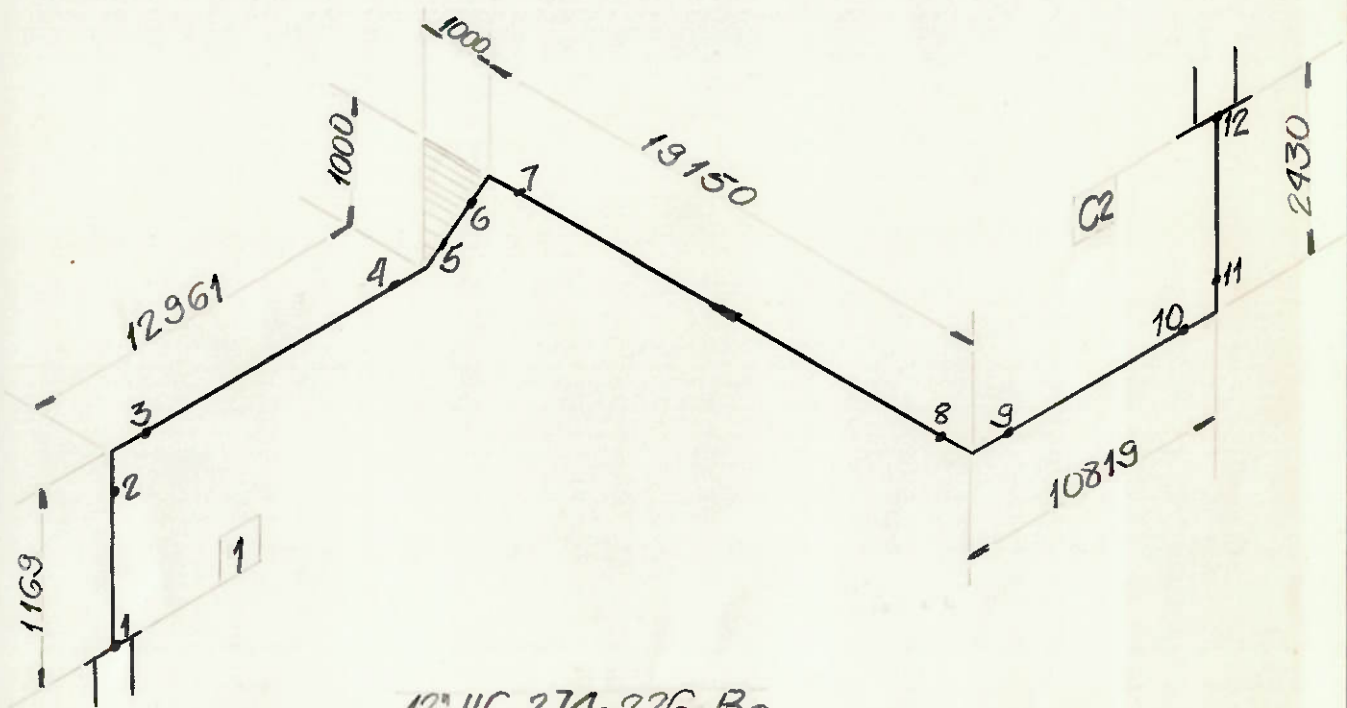
4º) Cálculo dos pesos sobre os bocais e suportes em função das plantas de tubulação.

5º) Verificação da combinação desses esforços com os valores

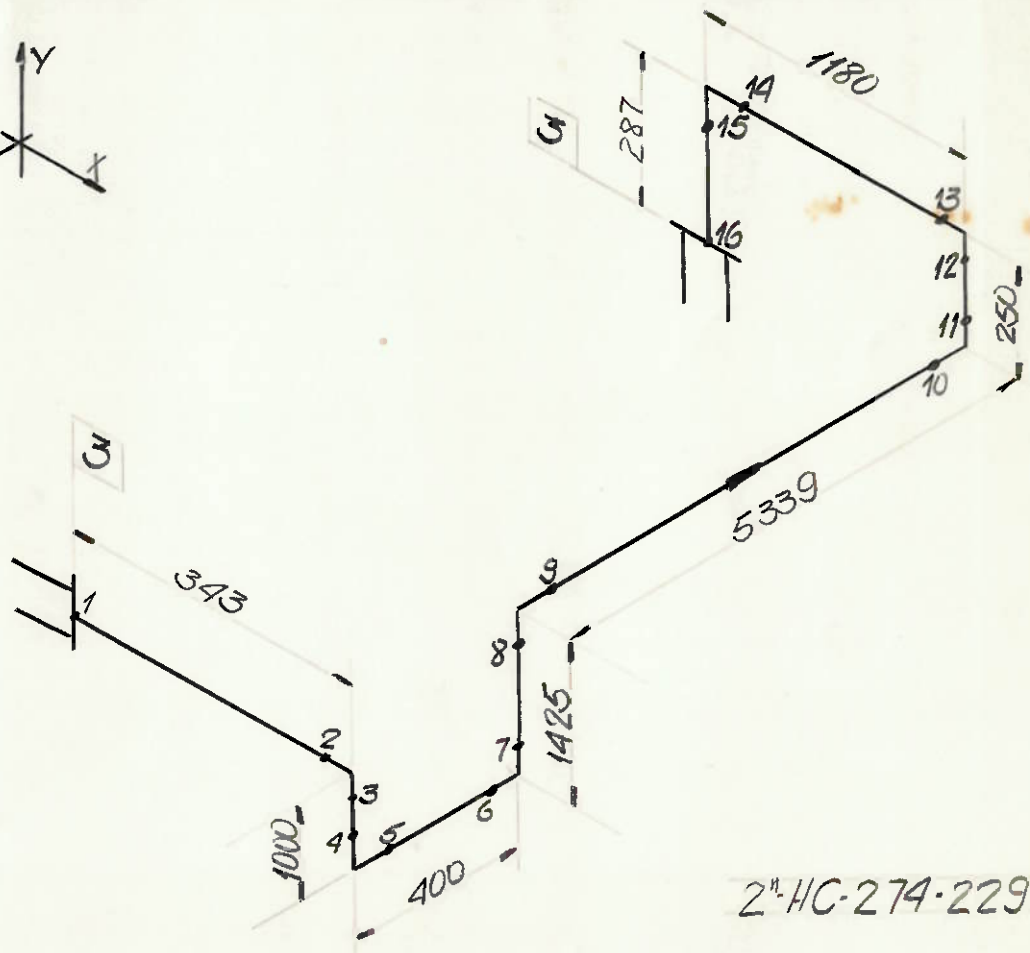
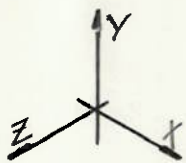
fornecidos na PARTE 1.

Apresentaremos nas páginas a seguir o "lay-out" das linhas, pontuadas de acordo com a numeração utilizada no cálculo por computador e um resumo dos esforços térmicos e de vidos ao peso, listando os esforços atuantes em cada bocal.

Podemos notar que os esforços calculados, nesta seção, são menores ou, aproximadamente, iguais aos valores previstos no capítulo anterior, como era de se esperar.

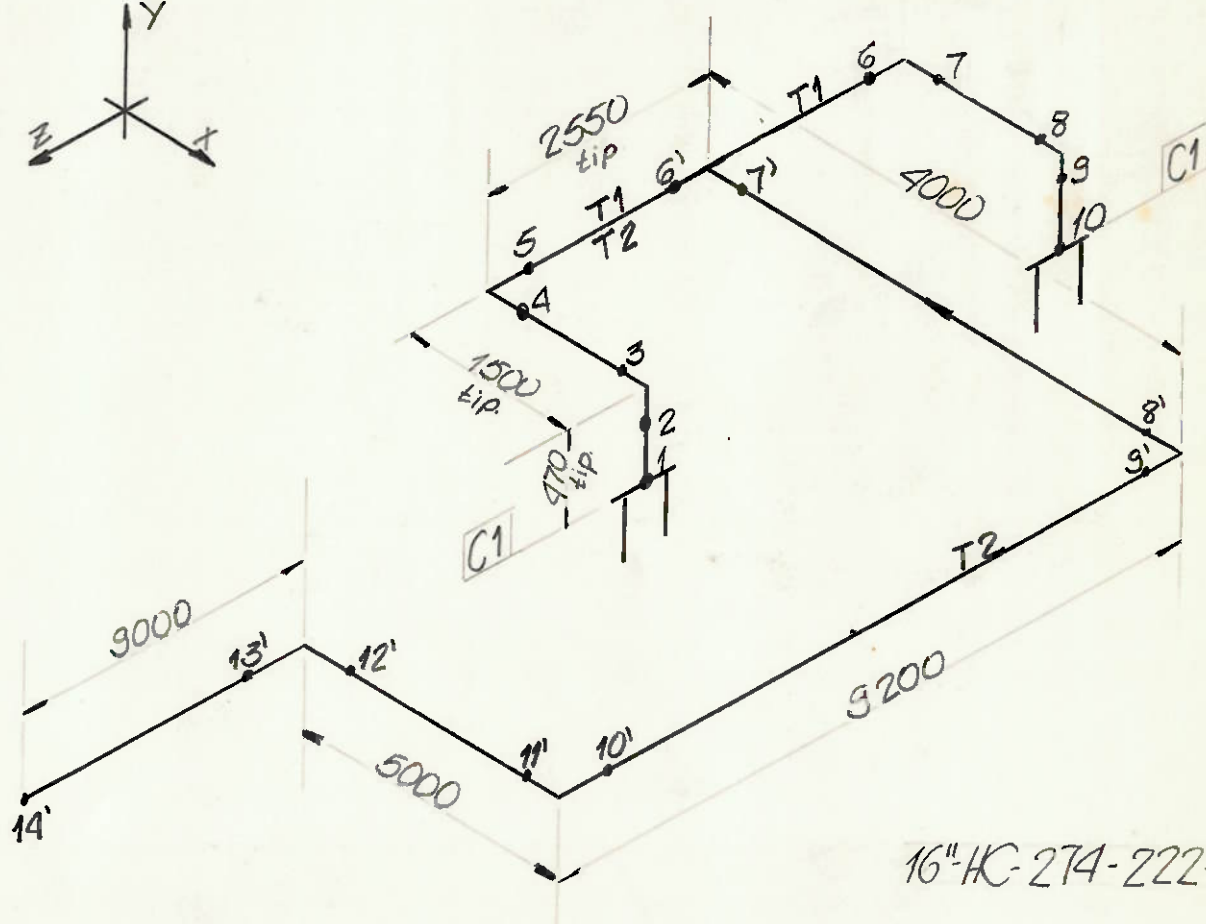
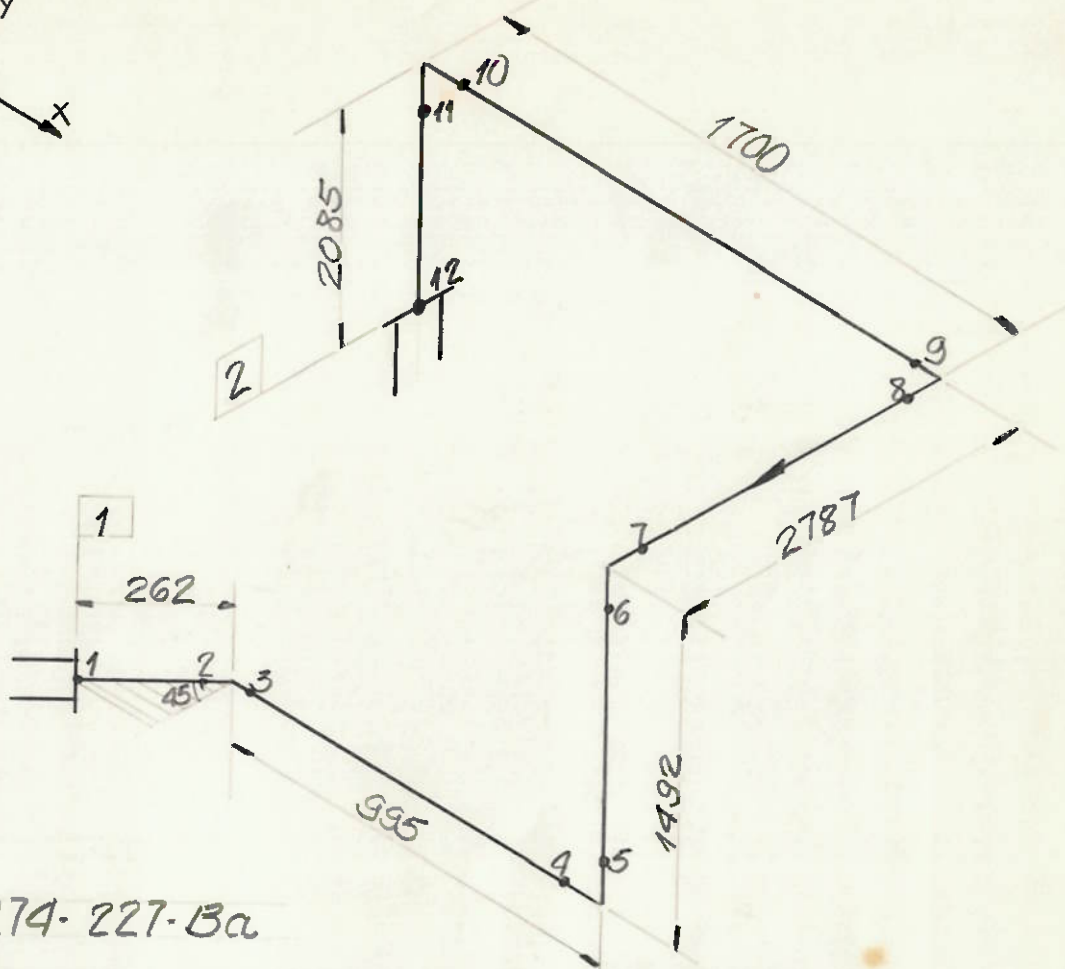
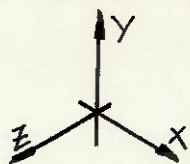


12° HC-274-226 Ba



2° HC-274-229-Ba

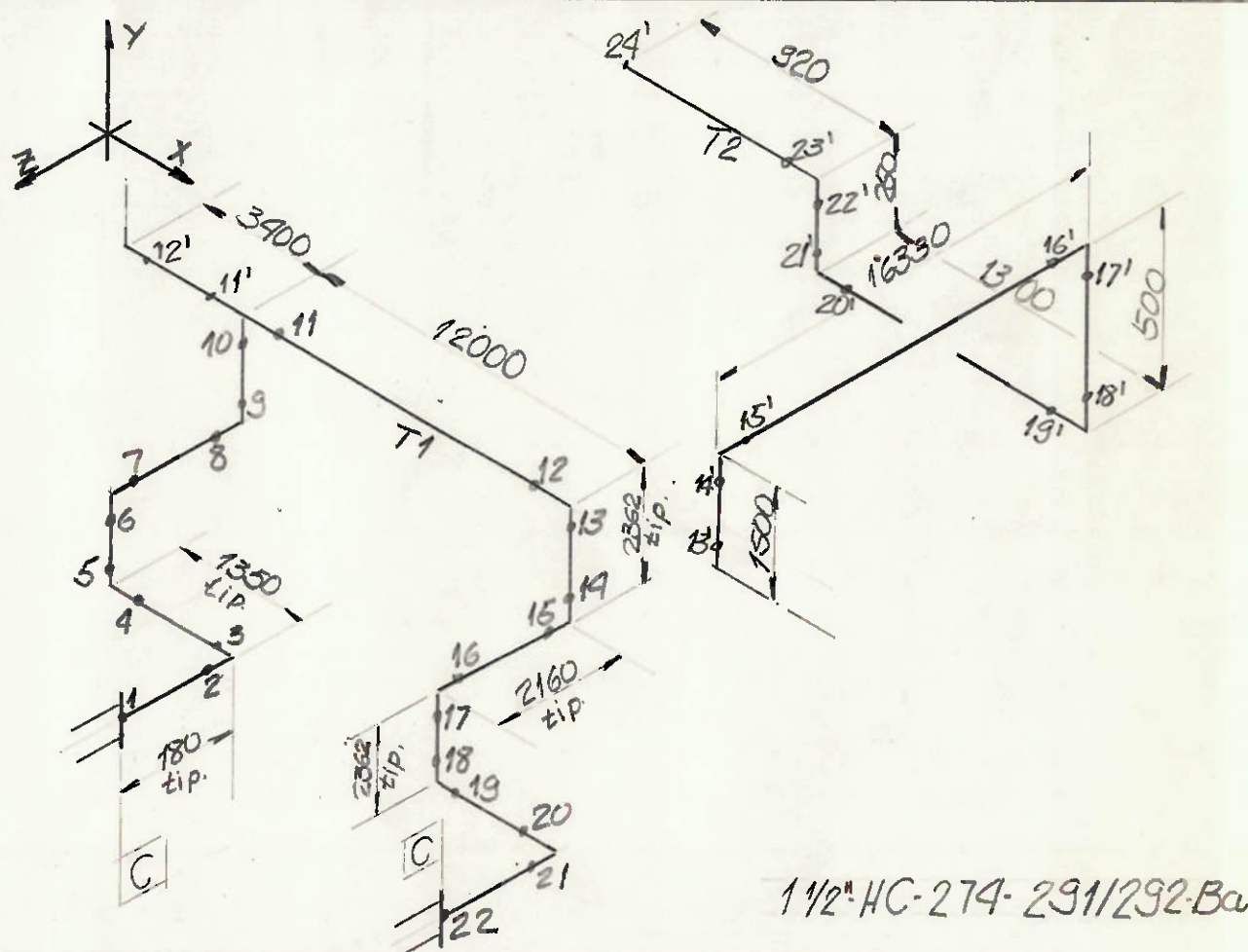
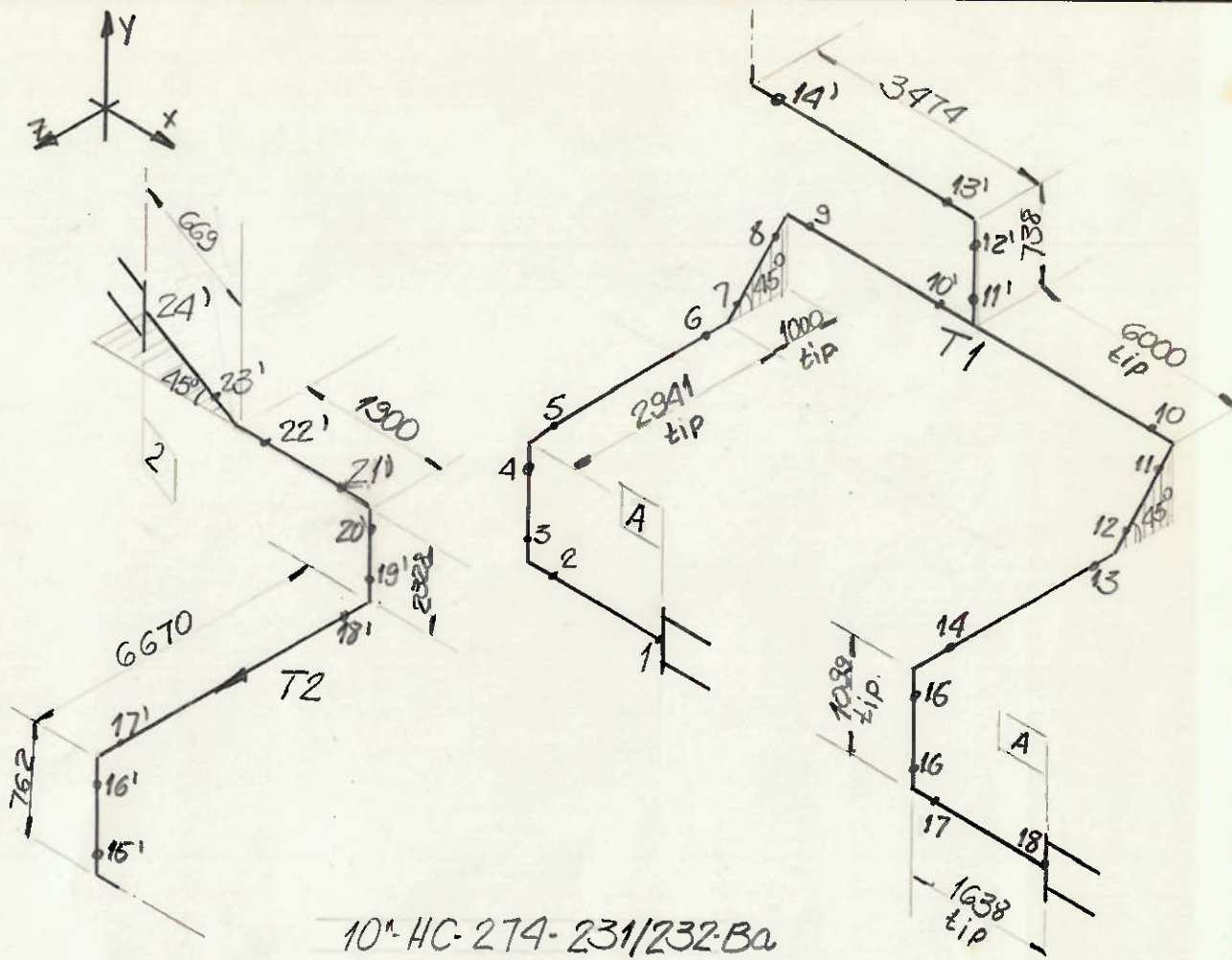
CÁLCULO DE FLEXIBILIDADE
LAY-OUT DE TUBULAÇÃO



CÁLCULO DE FLEXIBILIDADE
LAY-OUT DE TUBULAÇÃO



FORMATO = A-4 210 x 297 mm. MADE IN BRAZIL

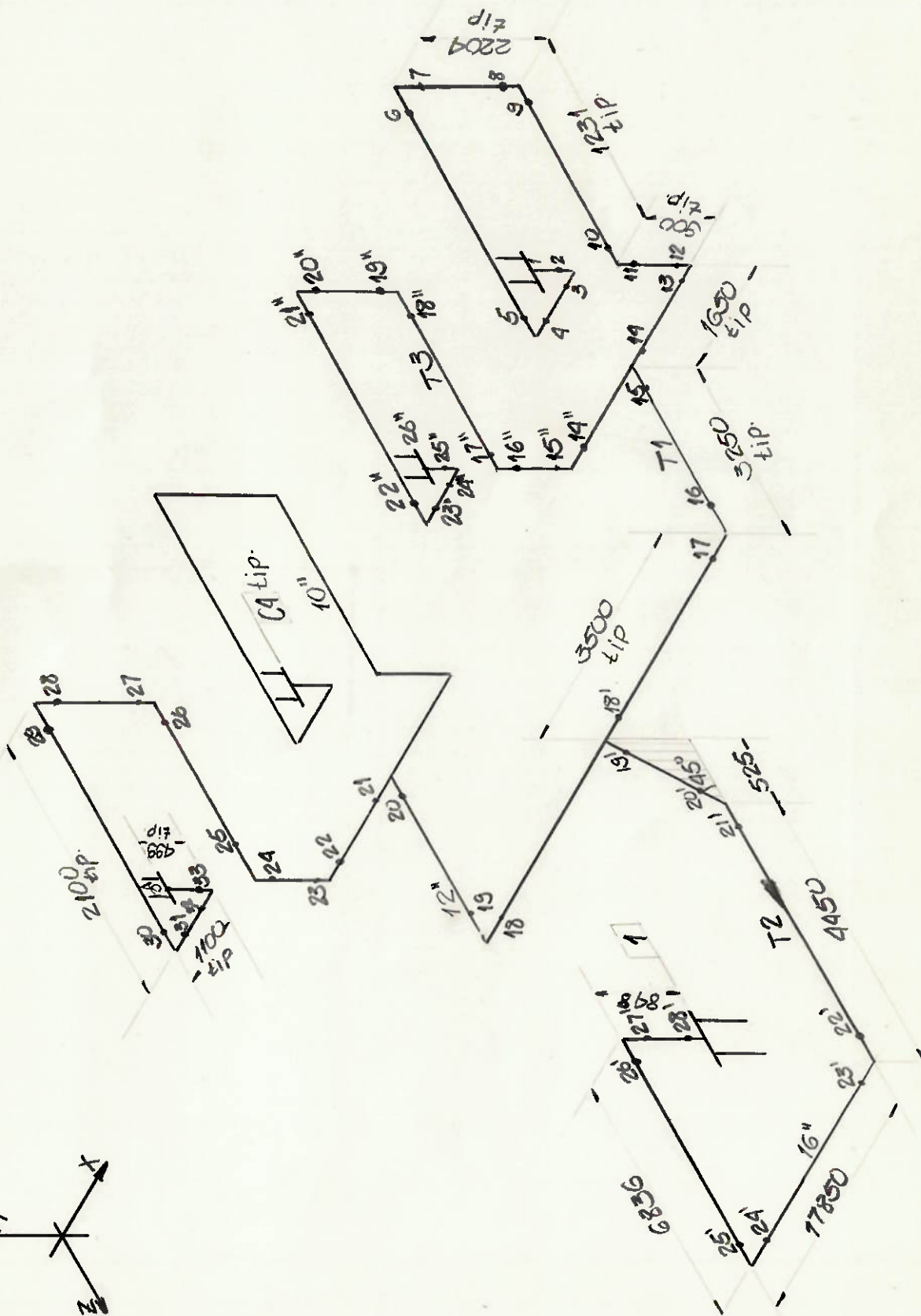
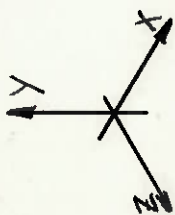


CÁLCULO DE FLEXIBILIDADE
LAY-OUT DE TUBULAÇÃO



FORMATO = A-4 210 x 297 mm.

MADE IN BRAZIL



10" / 12" / 16" - HC-274-246 / 248 / 249 - Ca

CÁLCULO DE FLEXIBILIDADE LAY-OUT DE TUBULAÇÃO

2.3.2 - Linha: 12"-HC-274-226-Ba

a) Esforços Térmicos:

a.1 - Tensão admissível: 215MPa

a.2 - Tensão máxima: 27MPa (pto 2)

a.3 - Reações nos Bocais

- Bocal 1 V-27402 (pto 1 - A1)

$F_x = 981,0 \text{ N}$

$M_x = 300 \text{ mN}$

$F_y = 98,0 \text{ N}$

$M_y = -6510 \text{ mN}$

$F_z = -607,0 \text{ N}$

$M_z = -970 \text{ mN}$

- Bocal C2 P-27402 (pto 12 - A2)

$F_x = -981,0 \text{ N}$

$M_x = -760 \text{ mN}$

$F_y = -98,0 \text{ N}$

$M_y = -4590 \text{ mN}$

$F_z = 607,0 \text{ N}$

$M_z = -1570 \text{ mN}$

b) Esforços devidos ao peso próprio

- Bocal 1 V-27402

$L = 3,5 \text{ m}$

$q = 1436,2 \text{ N/m (12")}$

portanto, $P = 5030,0 \text{ N}$

- Bocal C2 P-27402

$L = 3,5 \text{ m}$

$q = 1436,2 \text{ N/m (12")}$

portanto, $P = 5030,0 \text{ N}$

2.3.3 - Linha: 2"-HC-274-229-Ba

a) Esforços Térmicos:

a.1 - Tensão admissível: 215MPa

a.2 - Tensão máxima: 62MPa (pto 15)

a.3 - Reações nos Bocais:

- Bocal 3 V-27403 (pto 1 - A1)

$F_x = -22,0N$ $M_x = 79mN$

$F_y = 51,0N$ $M_y = 137mN$

$F_z = -360,0N$ $M_z = 17,4mN$

- Bocal 3 V-27402 (pto 16 - A2)

$F_x = 22,0N$ $M_x = 75mN$

$F_y = -51,0N$ $M_y = -312mN$

$F_z = 360,0N$ $M_z = -52mN$

b) Esforços devidos ao peso próprio

- Bocal 3 V-27403

$L = 5,2 m$

$q = 74,3 N/m$ (2")

portanto, $P = 386,0N$

- Bocal 3 V-27402

$$L = 5,2 \text{ m (2")}$$

$$q = 74,3 \text{ N/m}$$

$$\text{portanto, } P = 386,0 \text{ N}$$

2.3.4 - Linha 10"-HC-274-227-Ba

a) Esforços Térmicos

a.1 - Tensão admissível: 215 MPa

a.2 - Tensão máxima: 37,2 MPa (pto 2)

a.3 - Reações nos Bocais:

- Bocal 1 V-27403 (pto 1 - A1)

$$F_x = -365,0 \text{ N} \quad M_x = -5890 \text{ mN}$$

$$F_y = -430,0 \text{ N} \quad M_y = 3680 \text{ mN}$$

$$F_z = -5340,0 \text{ N} \quad M_z = 565 \text{ mN}$$

- Bocal 2 V-27402 (pto 12 - A2)

$$F_x = 365,0 \text{ N} \quad M_x = 7780 \text{ mN}$$

$$F_y = 430,0 \text{ N} \quad M_y = -5370 \text{ mN}$$

$$F_z = 5340,0 \text{ N} \quad M_z = -560 \text{ mN}$$

b) Esforços devidos ao peso próprio

- Bocal 1 - V-27403

$$L = 4,7 \text{ m}$$

$$q = 1086,6 \text{ N/m (10")}$$

$$\text{portanto, } P = 5107,0 \text{ N}$$

- Bocal 2 - V-27402

$$L = 4,7m$$

$$q = 1086,6N/m \text{ (10")}$$

$$\text{portanto, } P = 5107,0N$$

2.3.5 - Linha: 16"-HC-274-222-Ba

a) Esforços Térmicos

a.1 - Tensão admissível: 214MPa

a.2 - Tensão máxima: 50,8MPa

(pto 10 - trecho T2)

a.3 - Reações no Bocal C1 - P27402

- Combinação dos Esforços:

$$E_T = E_{T1} + \max \{ E_{T2}, E_{T3} \}$$

- Esforços:

$$F_x = - 696,0N$$

$$M_x = 2370mN$$

$$F_y = 87,0N$$

$$M_y = - 100mN$$

$$F_z = 6170,0N$$

$$M_z = 270mN$$

b) Esforço devido ao peso próprio:

$$L = 4,5m$$

$$q = 732,7N/m \text{ (8")}$$

$$\text{portanto, } P = 3300,0N$$

2.3.6 - Linha 6"-HC-274-233/234-Ca

a) Esforços Térmicos:

a.1 - Tensão admissível: 215MPa

a.2 - Tensão máxima: 19MPa

(pto 25, trecho T1)

a.3 - Reações no Bocal B - C27401A/B

- Combinação dos Esforços

$$E_T = E_{T1} + E_{T2}$$

- Esforços

$$F_x = 122,0N$$

$$M_x = 0mN$$

$$F_y = - 6,45N$$

$$M_y = -545mN$$

$$F_z = 24,5N$$

$$M_z = -560mN$$

b) Esforço devido ao peso próprio

$$L = 7,5m$$

$$q = 458,8N/m \text{ (6")}$$

$$\text{portanto, } P = 3440N$$

2.3.7 - Linha 10"-HC-274-231/232-Ba

a) Esforços Térmicos:

a.1 - Tensão admissível: 214MPa

a.2 - Tensão máxima: 53,4MPa

(pto 15 - trecho T3)

a.3 - Reações nos bocais

- Bocal A - C-27401A/B

$$F_x = -425,0N \quad M_x = -1470mN$$

$$F_y = 715,0N \quad M_y = -5200mN$$

$$F_z = -1780,0N \quad M_z = -1075mN$$

- Combinação dos Esforços: $E_T = E_{T1} + \max \{ E_{T2}, E_{T3} \}$

- Bocal 2 - V-27403

$$F_x = 425,0N \quad M_x = -1425mN$$

$$F_y = -715,0N \quad M_y = -1055mN$$

$$F_z = 1780,0N \quad M_z = 1055mN$$

- Combinação dos Esforços: $E_T = E_{T1} + \max \{ E_{T2}, E_{T3} \}$

b) Esforços devidos ao peso próprio

- Bocal A - C-27401A/B

$$L = 4,0m$$

$$q = 1086,6N/m \text{ (10")}$$

$$\text{portanto, } P = 4345,0N$$

- Bocal 2 - V27403

$$L = 5,0m$$

$$q = 1086,6N/m \text{ (10")}$$

$$\text{portanto, } P = 5435,0N$$

2.3.8 - Linha 1½"-HC-274-291/292-Ba

a) Esforços Térmicos

a.1 - Tensão admissível: 215MPa

a.2 - Tensão máxima: 6,6MPa

(pto 2 trecho T2)

a.3 - Reações no Bocal C - C27401A/B

- Combinação dos Esforços

$$E_T = E_{T1} + \max \{ E_{T1}, E_{T2} \}$$

- Esforços

$$F_x = 3,23N$$

$$M_x = - 18mN$$

$$F_y = 1,18N$$

$$M_y = - 18mN$$

$$F_z = -5,62N$$

$$M_z = - 12mN$$

b) Esforço devido ao peso próprio

$$L = 6,0m$$

$$q = 52,4N/m \text{ (1½")}$$

$$\text{portanto, } P = 315,0N$$

2.3.9 - Linha: 20"/16"/12"-HC-274-239/242/243/245-Ca

a) Esforços Térmicos

a.1 - Tensão admissível: 215MPa

a.2 - Tensão máxima: 22,5MPa

(pto 8, trecho T3)

a.3 - Reações no Bocal C1 - P27401

- Combinação dos Esforços

$$E_T = 1,5 (E_{T1} + E_{T2}) + E_{T3}$$

- Esforços

$$F_x = -1820,0N$$

$$M_x = -2350mN$$

$$F_y = -780,0N$$

$$M_y = -1950mN$$

$$F_z = 2180,0N$$

$$M_z = -3485mN$$

b) Esforço devido ao peso próprio

$$L = 4,0m$$

$$q = 1436,2N/m (12")$$

$$\text{portanto, } P = 5745,0N$$

2.3.10 - Linha: 10"/12"/16"-HC-274-246/248/249-Ca

a) Esforços Térmicos

a.1 - Tensão admissível: 215MPa

a.2 - Tensão máxima: 31,6MPa

(pto 27, trecho T2)

a.3 - Reações nos Bocais

- Bocal C4 - P27401

$$F_x = - 2560,0N$$

$$M_x = - 765mN$$

$$F_y = - 260,0N$$

$$M_y = - 285mN$$

$$F_z = 200,0N$$

$$M_z = -4770mN$$

- Combinação dos Esforços: $E_T = 1,5 (E_{T1} + E_{T3}) + E_{T2}$

- Bocal 1 - V27401

$$F_x = 1970,0N$$

$$M_x = -695mN$$

$$F_y = 355,0N$$

$$M_y = 10810mN$$

$$F_z = -425,0N$$

$$M_z = 2415mN$$

- Combinação dos Esforços: $E_T = 2E_{T2}$

b) Esforços devidos ao peso próprio

- Bocal C4 - P27401

$$L = 2,0m$$

$$q = 1086,6 (10")$$

$$\text{portanto, } P = 2170,0N$$

- Bocal 1 - V27401

$L = 4,0m$

$q = 2064,0N/m$ (16")

portanto, $P = 8255,0N$

2.3.11 - Esforços Atuantes nos bocais de Equipamentos

Resumiremos, agora, sob a forma de tabelas, os esforços atuantes nos bocais dos equipamentos, comparando-os com os valores admissíveis explicitados na PARTE 1 deste trabalho.

O cálculo da força e momento resultante em ca da bocal é feito da seguinte maneira:

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

$$M_R = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}$$

onde:

F_R : força resultante

F_x : Componente da força na direção x

F_y : Componente da força na direção y

F_z : Componente da força na direção z

M_R : momento resultante

M_x : componente do momento em torno do eixo x

M_y : componente do momento em torno do eixo y

M_z : componente do momento em torno do eixo z

	Bocal	F _x (kN)	F _y (kN)	F _z (kN)	F _R (kN)	Força admissível (kN)
C-27401	A	-0,425	-3,63	-1,78	4,07	9,24
	B	0,122	-3,446	0,025	3,45	5,08
	C	0,003	-0,313	-0,006	0,313	1,81
P-27401	C1	-1,82	-6,525	2,18	7,12	24,6
	C4	-2,56	-2,43	0,20	3,54	15,4
P-27402	C1	-0,696	-3,213	6,17	6,99	11,2
	C2	-0,981	-5,128	0,607	5,26	14,0
V-27401	1	1,97	-7,90	-0,425	8,15	35,0
V-27402	1	0,981	-4,932	-0,607	5,03	18,7
	2	0,365	-4,677	5,34	7,11	15,6
	3	0,022	-0,437	0,36	0,57	2,8
V-27403	1	-0,365	-5,537	-5,34	7,70	15,6
	2	0,425	-6,15	1,78	6,42	15,6
	3	-0,022	-0,335	-0,36	0,49	2,8

tab. 2.3.11.1 - Forças atuantes nos bocais dos equipamentos.

	Bocal	Mx (mkN)	My (mkN)	Mz (mkN)	M _R (mkN)	Momento admissível (mkN)
C27401	A	-1,47	-5,20	-1,075	5,51	7,25
	B	0	-0,545	-0,56	0,781	2,72
	C	-0,018	-0,018	-0,012	0,028	0,91
P27401	C1	-2,35	-1,95	-3,485	4,63	12,30
	C4	-0,765	-0,285	-4,77	4,84	7,70
P27402	C1	2,37	-0,10	0,27	2,39	5,8
	C2	-0,76	-4,59	-1,57	4,91	7,2
V27401	1	-0,695	10,81	2,415	11,10	23,8
V27402	1	0,30	-6,51	-0,97	6,59	16,5
	2	7,78	-5,37	-0,56	9,47	14,6
	3	0,075	-0,312	-0,052	0,325	2,9
V27403	1	-5,89	3,68	0,565	6,97	14,6
	2	-1,425	-1,055	1,055	2,06	14,6
	3	0,079	0,137	0,017	0,16	2,9

tab. 2.3.11.2 - momentos atuantes nos bocais dos equipamentos.

2.3.12 - Plantas de Tubulação e Isométricos.

Encerrando este capítulo são apresentadas no Anexo VI e Anexo VII as plantas de tubulação e isométricos / de tubulação respectivamente.

Estes desenhos permitem a visualização das linhas da área de compressão de solvente.

2.4 - Suportes

2.4.1 - Considerações Gerais

Nos itens seguintes encontram-se os cálculos relativos ao dimensionamento dos suportes metálicos (ST e S) deste projeto.

Os suportes são constituídos de perfis de aço laminados (material ASTM A36), apresentando as seguintes propriedades:

- módulo de elasticidade: 200 GPa
- tensão de escoamento à tração 250 MPa

O dimensionamento seguirá as seguintes recomendações:

- Para a estimativa das cargas será considerado um comprimento de tubo igual à metade da metragem existente entre o suporte dimensionado e o seguinte (e/ou anterior)
- Os suportes iguais serão dimensionados considerando -se / aquele que apresentar a maior carga
- Será utilizado um coeficiente de segurança ao escoamento igual a 2
- Os suportes ST serão superdimensionados, visando a colocação de cargas futuras
- Os suportes de concreto (SC) deverão ser calculados por/ engenheiro civil, visando apenas o apoio da tubulação sobre ele.

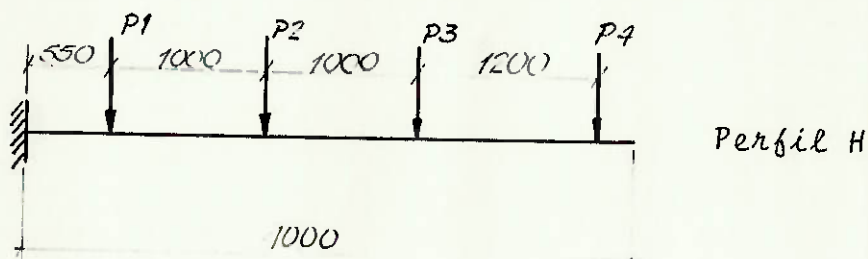
SC1 - apoio sobre viga

SC2 - apoio sobre laje

- As linhas de diâmetro nominal menor ou igual a duas polegadas devem ser, salvo indicação contrária, suportadas pelo campo.

Os desenhos de detalhamento dos suportes tipo ST, G, S e A são apresentados no Anexo VIII.

2.4.2 - Suporte ST1



a) Estimativa das cargas

- * $P_1 : L_1 = 8,5m, \text{ tubo } 1\frac{1}{2}'' \text{ (} q_1 = 52,4N/m \text{)}$
- * $P_2 : L_2 = 4,0m, \text{ tubo } 6'' \text{ (} q_2 = 458,8N/m \text{)}$
- * $P_3 : L_3 = 3,5m, \text{ tubo } 6'' \text{ (} q_3 = 458,8N/m \text{)}$
- * $P_4 : L_4 = 14,0m, \text{ tubo } 10'' \text{ (} q_4 = 1086,6N/m \text{)}$

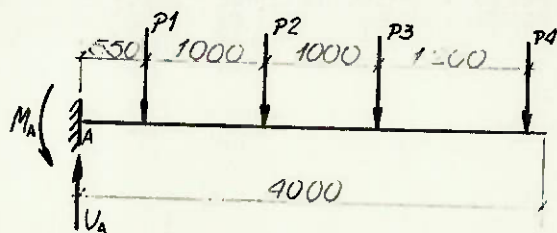
$$P_1 = L_1 q_1 = 445,4N$$

$$P_2 = L_2 q_2 = 1836,0N$$

$$P_3 = L_3 q_3 = 1607,0N$$

$$P_4 = L_4 q_4 = 15260,0N$$

b) Reações Externas e Esforços Solicitantes



$$\sum \vec{F}_V = \vec{0}$$

$$V_A = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

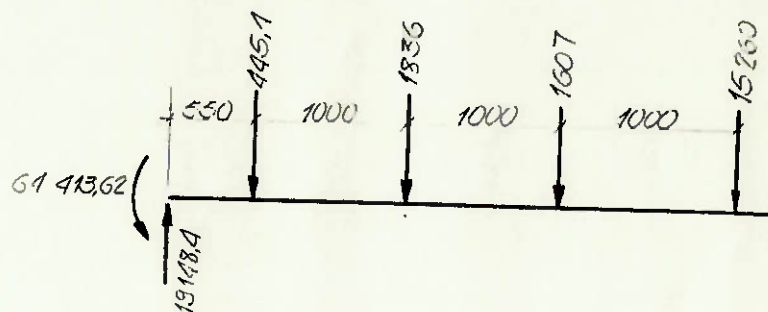
$$V_A = 19148,4 \text{ N } (\uparrow)$$

$$\sum \vec{M}_A = \vec{0}$$

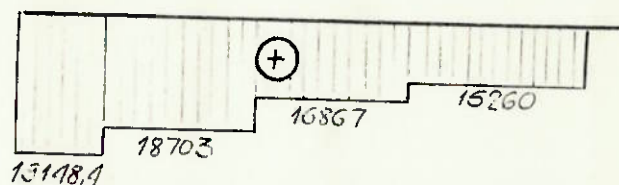
$$M_A = P_1 \times 550 + P_2 \times 1550 + P_3 \times 2550 + P_4 \times 3750$$

$$M_A = 64413,62 \text{ m.N } (\curvearrowleft)$$

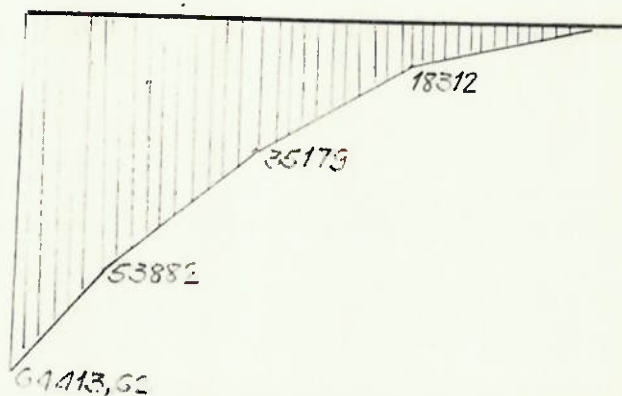
* Diagramas:



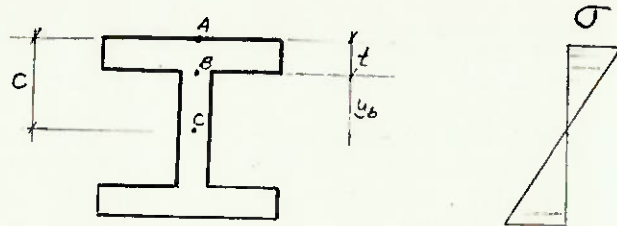
Força Cortante (Q)



Momento Fletor (Mf)



c) Análise de Tensões (seção A)

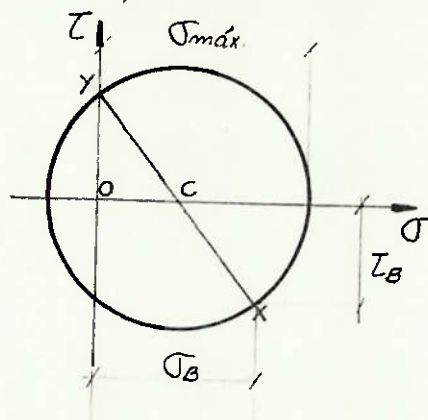


$$\sigma_A = \frac{M_A}{W} ; \sigma_B = \sigma_A \frac{y_b}{c}$$

$$I_a = 0 ; I_B = \frac{Q_A M_A}{I t}$$

Agora com o círculo de Mohr (Pto B)

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{2} \sigma_B + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \sigma_B\right)^2 + I_B^2}$$



d) Escolha do Perfil

Tomando $\bar{\sigma} = 125 \text{ MPa}$ (coeficiente de segurança ao escoamento / igual a 2), reiteramos até encontrar o perfil conveniente:

$$\begin{aligned} * \text{ Perfil W } 250 \times 167 \quad & \left\{ \begin{aligned} W &= 2060 \times 10^{-6} \text{ m}^3 & c &= 144,5 \text{ mm} \\ I &= 298 \times 10^{-6} \text{ m}^4 & t &= 31,8 \text{ mm} \\ y_b &= c - t = 112,7 \text{ mm} \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

$$M_s = 265 \times 31,8 \times \left(112,7 + \frac{31,8}{2} \right) = 108 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\sigma_B = \frac{M_A}{W} \frac{y_b}{c} = \frac{64413,62 \times 112,7 \times 10^{-3}}{2060 \times 10^{-6} \times 144,5 \times 10^{-3}} = 24,4 \text{ MPa}$$

$$\tau_B = \frac{Q M_s}{I t} = \frac{19148,4 \times 108 \times 10^{-5}}{298 \times 10^{-6} \times 31,8 \times 10^{-3}} = 2,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{2} \sigma_B + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \sigma_B \right)^2 + \tau_B^2} = \frac{24,4}{2} + \sqrt{\left(\frac{24,4}{2} \right)^2 + 2,2^2}$$

$$\sigma_{\max} = 24,6 \text{ MPa} < \bar{\sigma} = 125 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} * \text{ Profil W } 200 \times 86 \quad & \begin{cases} W = 855 \times 10^{-6} \text{ m}^3 & c = 111 \text{ mm} \\ I = 94,9 \times 10^{-6} \text{ m}^4 & t = 20,6 \text{ mm} \\ y_b = c - t = 90,4 \text{ mm} \end{cases} \end{aligned}$$

$$M_s = 209 \times 20,6 \times \left(90,4 + \frac{20,6}{2} \right) = 43 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\sigma_B = \frac{M_A}{W} \frac{y_b}{c} = \frac{64413,62}{855 \times 10^{-6}} \times \frac{90,4 \times 10^{-3}}{111 \times 10^{-3}} = 61,4 \text{ MPa}$$

$$\tau_B = \frac{Q M_s}{I t} = \frac{19148,4 \times 43 \times 10^{-5}}{94,9 \times 10^{-6} \times 20,6 \times 10^{-3}} = 4,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{61,4}{2} + \sqrt{\left(\frac{61,4}{2} \right)^2 + 4,2^2} = 61,7 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = 61,7 \text{ MPa} < \bar{\sigma} = 125 \text{ MPa}$$

$$* \text{ Perfil W } 150 \times 37,1 \quad \begin{cases} W = 274 \times 10^{-6} \text{ m}^3 & c = 81 \text{ mm} \\ I = 22,2 \times 10^{-6} \text{ m}^4 & t = 11,6 \text{ mm} \\ y_B = c - t = 69,4 \text{ mm} \end{cases}$$

$$M_s = 154 \times 11,6 \times \left(69,4 + \frac{11,6}{2} \right) = 13 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\sigma_B = \frac{M_A}{W} \frac{y_B}{c} = \frac{64413,62}{274 \times 10^{-6}} \times \frac{69,4 \times 10^{-3}}{81 \times 10^{-3}} = 201,4 \text{ MPa}$$

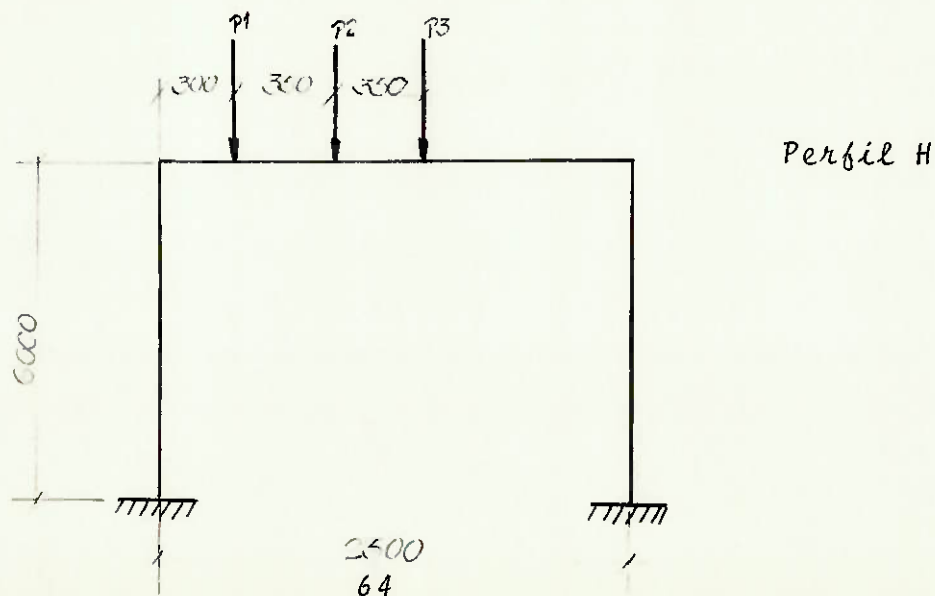
$$\tau_B = \frac{Q M_s}{I t} = \frac{19148,4 \times 13 \times 10^{-5}}{22,2 \times 10^{-6} \times 11,6 \times 10^{-3}} = 9,7 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{201,4}{2} + \sqrt{\left(\frac{201,4}{2} \right)^2 + 9,7^2} = 201,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = 201,9 \text{ MPa} > \bar{\sigma} = 125 \text{ MPa}$$

Conclusão: Utilizaremos o perfil W200x86, pois com ele ainda há folga para colocarmos outras cargas.

2.4.3 - Suporte ST2



a) Estimativa das Cargas

* P1: $L_1 = 3,8\text{m}$; tubo $1\frac{1}{2}"$ ($q_1 = 52,4\text{N/m}$)

* P2: $L_2 = 5,0\text{m}$; tubo $6"$ ($q_2 = 458,8\text{N/m}$)

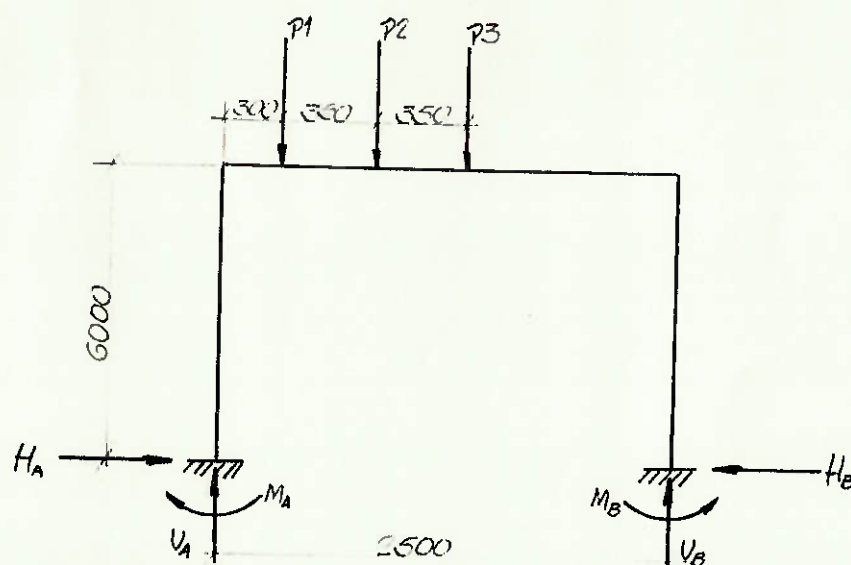
* P3: $L_3 = 9,0\text{m}$; tubo $10"$ ($q_3 = 1086,6\text{N/m}$)

$$P1 = L_1 q_1 = 199,1\text{N}$$

$$P2 = L_2 q_2 = 2295,0\text{N}$$

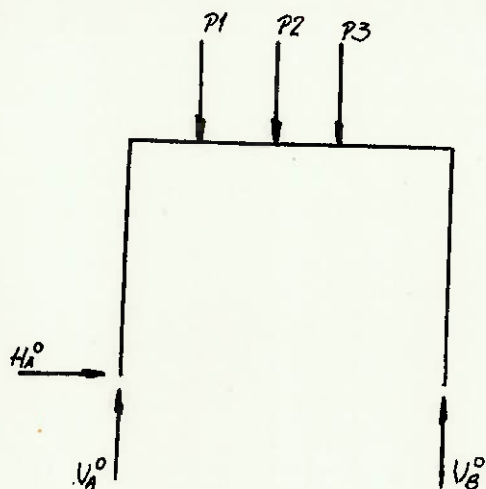
$$P3 = L_3 q_3 = 9810,0\text{N}$$

b) Reações Externas e Esforços Solicitantes



Trata-se evidentemente de um pórtico hiperestático e para resolvê-lo vamos utilizar o teorema de Castigliano.

* Isostático Fundamental (Sistema Zero)

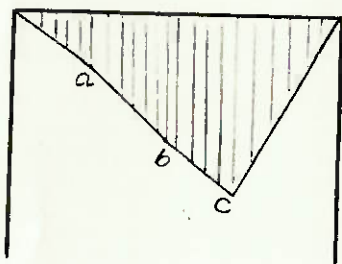


$$\sum \vec{F}_H = \vec{0} \Rightarrow H_A^\circ = 0$$

$$\sum \vec{F}_V = \vec{0} \Rightarrow V_A^\circ + V_B^\circ = 12304,1 \text{ N}$$

$$\sum \vec{M}_A = \vec{0} \Rightarrow V_B^\circ = 4544,6 \text{ N}$$

$$V_A^\circ = 7759,5 \text{ N}$$

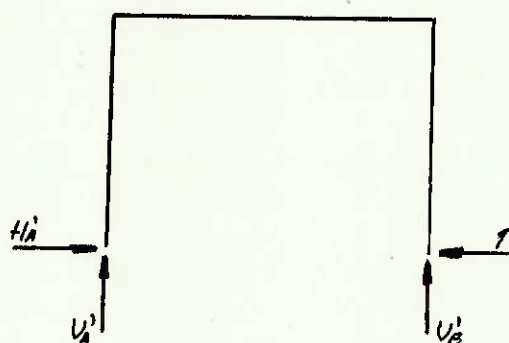


$$M_a = 2327,85 \text{ mN}$$

$$M_b = 4974,01 \text{ mN}$$

$$M_c = 6816,9 \text{ mN}$$

* Sistema Um

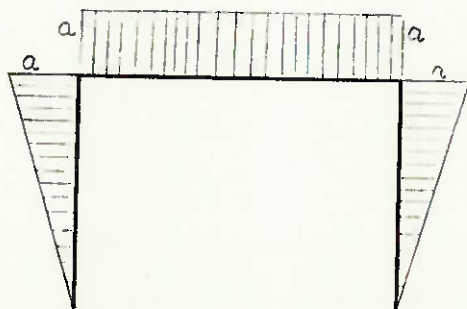


$$\sum \vec{F}_H = \vec{0} \Rightarrow H_A' = 1$$

$$\sum \vec{F}_V = \vec{0} \Rightarrow V_A' + V_B' = 0$$

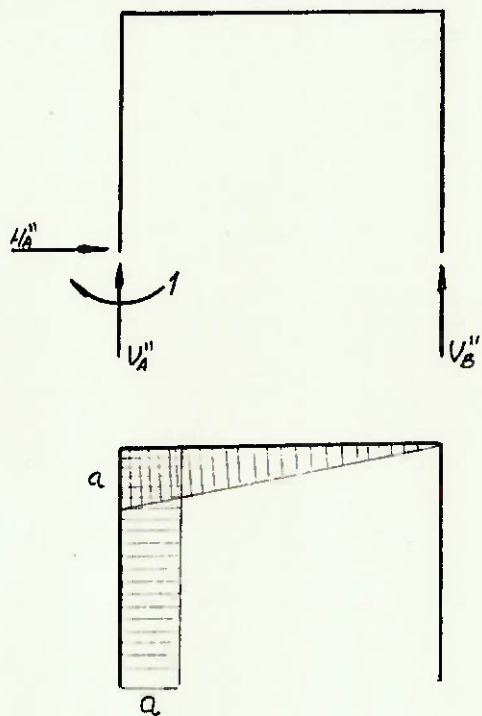
$$\sum \vec{M}_A = \vec{0} \Rightarrow V_B' = 0$$

$$V_B' = 0$$



$$M_a = 6 \text{ mN}$$

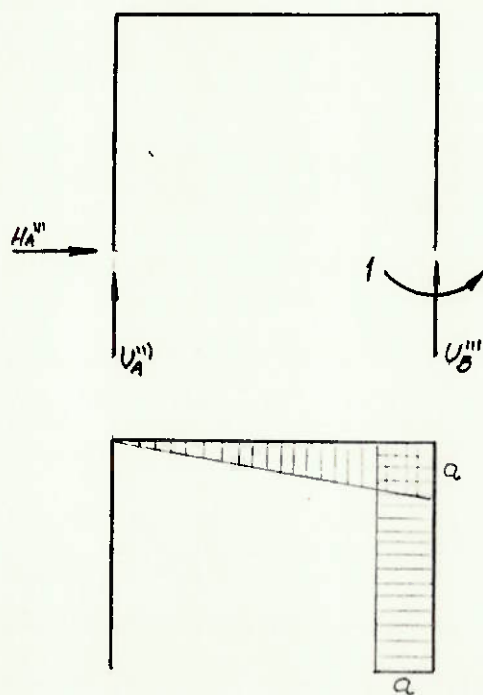
* Sistema Dois



$$\begin{aligned}\sum \vec{F}_H &= \vec{0} \Rightarrow H_A'' = 0 \\ \sum \vec{F}_V &= \vec{0} \Rightarrow V_A'' + V_B'' = 0 \\ \sum \vec{M}_A &= \vec{0} \Rightarrow V_B'' = 0,40 \\ V_A'' &= -0,40\end{aligned}$$

$$Ma = 1 \text{ mN}$$

* Sistema Três



$$\begin{aligned}\sum \vec{F}_H &= \vec{0} \Rightarrow H_A''' = 0 \\ \sum \vec{F}_V &= \vec{0} \Rightarrow V_A''' + V_B''' = 0 \\ \sum \vec{M}_A &= \vec{0} \Rightarrow V_B''' = -0,40 \\ V_A''' &= 0,40\end{aligned}$$

$$Ma = 1 \text{ mN}$$

* Equações de Font Violant

$$\delta_{10} + x\delta_{11} + y\delta_{12} + z\delta_{13} = 0$$

$$\delta_{20} + x\delta_{21} + y\delta_{22} + z\delta_{23} = 0$$

$$\delta_{30} + x\delta_{31} + y\delta_{32} + z\delta_{33} = 0$$

$$\delta_{10} = \frac{1}{EI} \left(-8803,1 \times 3 \right) = \frac{-26409,3}{EI}$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI} \left(\frac{6 \times 6}{2} \times \frac{2 \times 6}{3} + 6 \times 2,5 \times 3 + \frac{6 \times 6}{2} \times \frac{2 \times 6}{3} \right) = \frac{189}{EI}$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \frac{1}{EI} \left(\frac{-6 \times 6}{2} \times 0,5 - 6 \times 2,5 \times \frac{2}{3} \right) = -\frac{19}{EI}$$

$$\delta_{13} = \delta_{31} = \frac{1}{EI} \left(\frac{-6 \times 6}{2} \times 0,5 - 6 \times 2,5 \times \frac{2}{3} \right) = -\frac{19}{EI}$$

$$\delta_{20} = \frac{1}{EI} \left(8803,1 \times \frac{2}{3} \right) = \frac{5868,7}{EI}$$

$$\delta_{22} = \frac{1}{EI} \left(1 \times 6 \times 0,5 + \frac{1 \times 2,5}{2} \times \frac{2}{3} \right) = \frac{3,83}{EI}$$

$$\delta_{23} = \delta_{32} = \frac{1}{EI} \left(\frac{1 \times 2,5}{2} \times \frac{2}{3} \right) = \frac{0,83}{EI}$$

$$\delta_{30} = \frac{1}{EI} \left(8803,1 \times \frac{2}{3} \right) = \frac{5868,7}{EI}$$

$$\delta_{33} = \frac{3,83}{EI}$$

$$189x - 19y - 19z = 26409,3$$

$$-19x + 3,83y + 0,83z = -5868,7$$

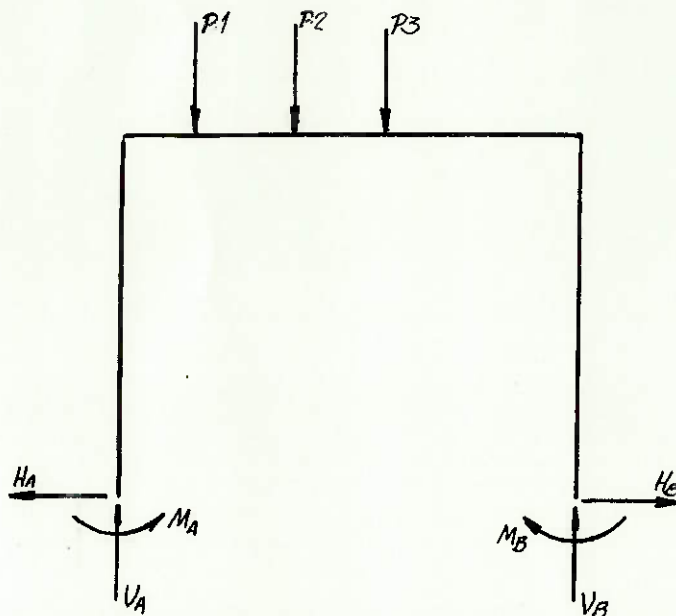
$$-19x + 0,83y + 3,83z = -5868,7$$

$$\text{resolvendo: } x = -629,6$$

$$y = -3826,4$$

$$z = -3826,4$$

* Reações Externas e Diagramas de Esforços Solicitantes



$$V_A = 7759,5 \text{ N } (\uparrow)$$

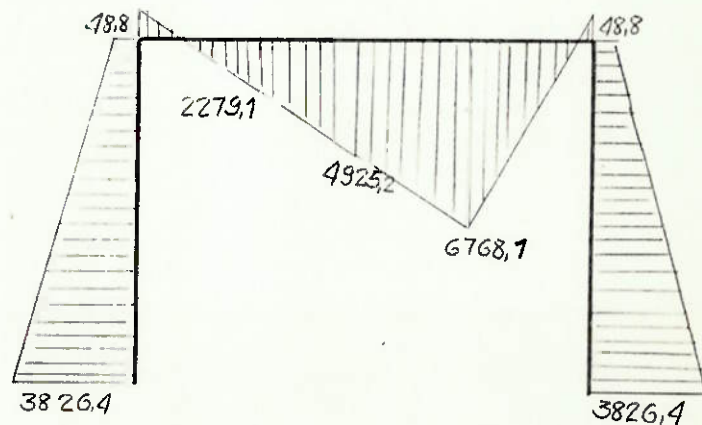
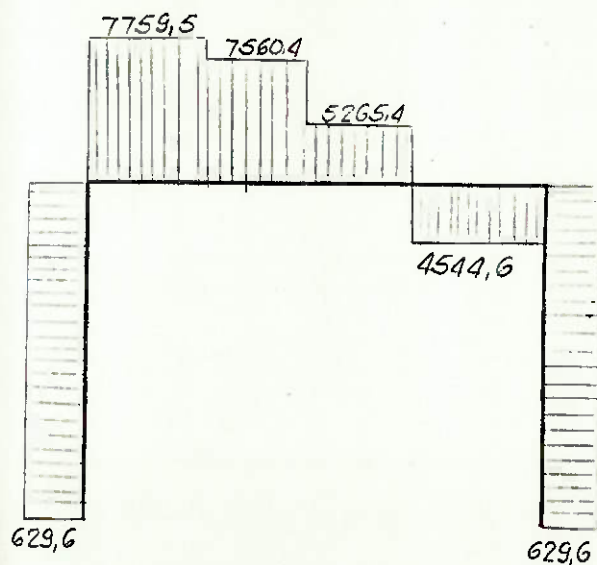
$$V_B = 4544,6 \text{ N } (\uparrow)$$

$$H_A = 629,6 \text{ N } (\leftarrow)$$

$$H_B = 629,6 \text{ N } (\rightarrow)$$

$$M_A = 3826,4 \text{ mN } (\curvearrowleft)$$

$$M_B = 3826,4 \text{ mN } (\curvearrowright)$$



Força Cortante

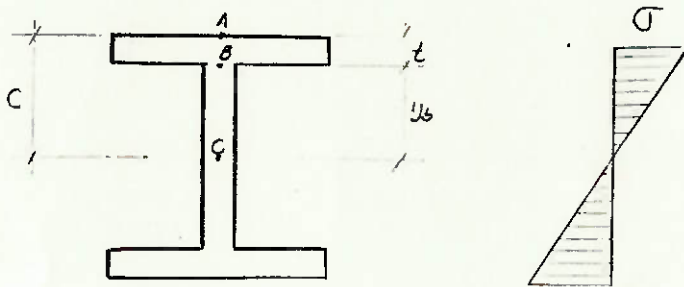
Momento Fletor

c) Análise de Tensões

Esforço máximo ocorre na seção onde:

$$M = 6768,1 \text{ mN}$$

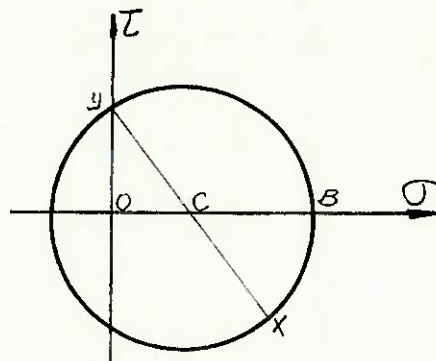
$$Q = 5265,4 \text{ N}$$



$$\sigma_A = \frac{M_A}{W} \quad , \quad \sigma_B = \sigma_A \frac{y_b}{C}$$

$$\tau_a = 0 \quad ; \quad \tau_b = \frac{QM_s}{It}$$

e com o círculo de Mohr (pto B)



$$\sigma_{max} = \frac{1}{2} \sigma_B + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \sigma_B\right)^2 - \tau_b^2}$$

d) Escolha do Perfil

Tomando $\bar{\sigma} = 125\text{MPa}$ (coeficiente de segurança igual a 2) reiteramos até encontrar o perfil conveniente.

$$\begin{aligned} * W 150 \times 37,1 : W &= 274, \times 10^{-6} \text{m}^3 & C &= 81\text{mm} \\ I &= 22,2 \times 10^{-6} \text{m}^4 & t &= 11,6\text{mm} \\ y_b &= c - t = 69,4\text{mm} \end{aligned}$$

$$M_s = 13 \times 10^{-5} \text{m}^3$$

$$\sigma_b = \frac{M}{W} \frac{y_b}{C} = \frac{6768,1}{274 \times 10^{-6}} \times \frac{69,4}{81} = 21,2\text{MPa}$$

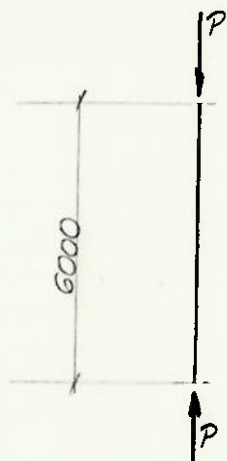
$$\tau_b = \frac{QM_s}{tI} = \frac{5265,4 \times 13 \times 10^{-5}}{11,6 \times 10^{-3} \times 22,2 \times 10^{-6}} = 2,6\text{MPa}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{21,2}{2} + \sqrt{\left(\frac{21,2}{2}\right)^2 + 2,6^2}$$

$$\sigma_{\max} = 21,5\text{MPa} < \bar{\sigma} = 125\text{MPa}$$

Conclusão: Utilizaremos o perfil W150x37,1, pois este perfil deve receber, futuramente, outras cargas.

e) Verificação à Flambagem



sendo: $P = 7759,5 \text{ N}$

$\sigma_e = 250 \text{ MPa}$

$E = 200 \text{ GPa}$

$r_y = 38,6 \text{ mm}$

$A = 4740 \text{ mm}^2$

perfil W 150x37,1

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_e}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 \times 200 \times 10^9}{250 \times 10^6}} = 125,7$$

$$\frac{l}{r_y} = \frac{6000}{38,6} = 155,4$$

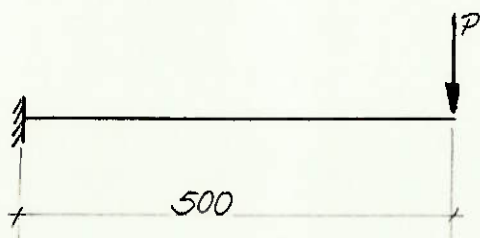
uma vez que $C_c < l/r_y$ temos:

$$\bar{P} = \sigma A = \frac{\pi^2 EA}{1,92 (L/r)^2} = \frac{\pi^2 \times 200 \times 10^9 \times 4740 \times 10^{-6}}{1,92 \times 155,4^2}$$

$$\bar{P} = 201,9 \text{ kN} > P$$

Conclusão: não há risco da coluna flambar

2.4.4 - Suportes S1 e S2



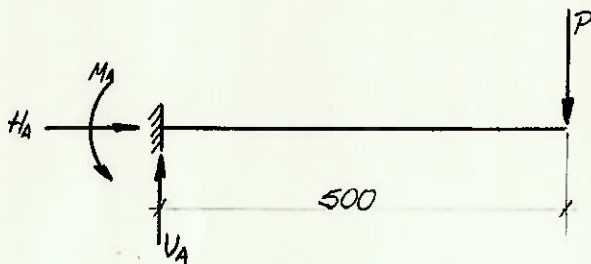
Perfil I

a) Estimativa da Carga

$$L = 6,5\text{m} \quad , \quad \text{tubo de } 16'' \quad (q = 2065\text{N/m})$$

$$P = qL = 2065 \times 6,5 \Rightarrow P = 13422,5\text{N}$$

b) Reações Externas e Esforços Solicitantes:



$$* \sum \vec{F}_V = \vec{0} \Rightarrow V_A = P$$

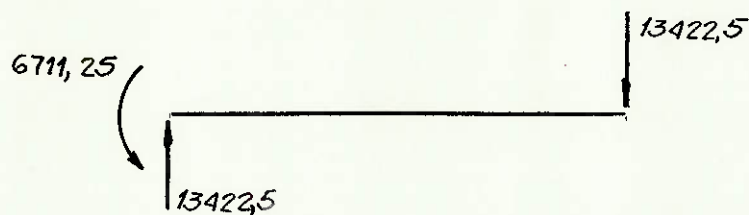
$$V_A = 13422,5\text{N} \quad (\uparrow)$$

$$* \sum \vec{F}_H = \vec{0} \Rightarrow H_A = 0$$

$$* \sum \vec{M} = \vec{0} \Rightarrow M_A = P \times 0,5$$

$$M_A = 6711,25\text{mN} \quad (\curvearrowleft)$$

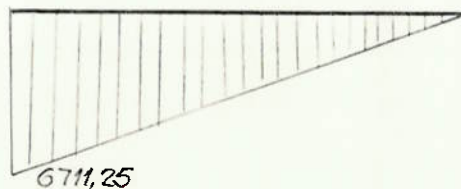
* Diagramas:



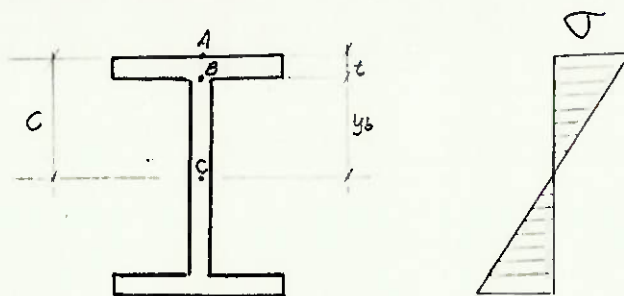
Força
Cortante (Q)



Momento
Fletor (M_f)



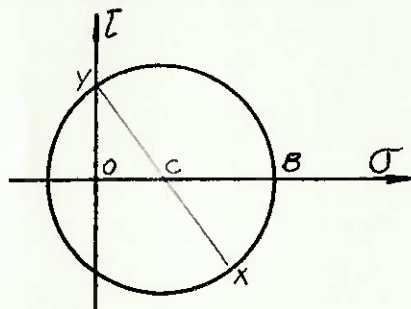
c) Análise de Tensões



$$\sigma_A = \frac{M_A}{W} \quad ; \quad \sigma_B = \sigma_A \frac{y_b}{C}$$

$$\tau_B = \frac{Q_A M_A}{I t}$$

e com o círculo de Mohr



$$\sigma_{max} = \frac{1}{2} \sigma_B + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \sigma_B\right)^2 + \tau_B^2}$$

d) Escolha do Perfil

Tomando $\bar{\sigma} = 125 \text{ MPa}$ (coeficiente de segurança ao escoamento igual a 2) reiteramos até encontrar o perfil / conveniente

* Perfil S 200x34 $W = 266 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ $C = 101,5 \text{ mm}$

$I = 27,0 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ $t = 10,8 \text{ mm}$

$y_b = C - t = 90,7 \text{ mm}$

$$M_A = 106 \times 10,8 \times \left(\frac{101,5 - \frac{10,8}{2}}{2} \right) = 11 \times 10^5 \text{ m}^3$$

$$\sigma_B = \frac{M}{W} \frac{y_B}{C} = \frac{6711,25}{266 \times 10^{-6}} \times \frac{90,7}{101,5} = 22,5 \text{ MPa}$$

$$\tau_B = \frac{QM_s}{It} = \frac{13422,5 \times 11 \times 10^{-5}}{27 \times 10^{-6} \times 10,8 \times 10^{-3}} = 5,1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{22,5}{2} + \sqrt{\left(\frac{22,5}{2}\right)^2 + 5,1^2} = 23,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = 23,6 \text{ MPa} < \bar{\sigma} = 125 \text{ MPa}$$

* Perfil S130x22 $W = 99,7 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ $C = 63,5 \text{ mm}$

$$I = 6,33 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$t = 8,3 \text{ mm}$$

$$y_b = c - t = 55,2 \text{ mm}$$

$$M_s = 83 \times 8,3 \times \left(63,5 - \frac{8,3}{2}\right) = 4,0 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\sigma_B = \frac{M}{W} \frac{y_B}{C} = \frac{6711,25}{99,7 \times 10^{-6}} \times \frac{55,2}{63,5} = 58,5 \text{ MPa}$$

$$\tau_B = \frac{QM_s}{It} = \frac{13422,5 \times 4,0 \times 10^{-5}}{6,33 \times 10^{-6} \times 8,3 \times 10^{-3}} = 10,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{58,5}{2} + \sqrt{\left(\frac{58,5}{2}\right)^2 + 10,2^2} = 60,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = 60,2 \text{ MPa} < \bar{\sigma} = 125 \text{ MPa}$$

* Perfil S100 x 14,1

$$W = 55,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \quad C = 51 \text{ mm}$$

$$I = 2,83 \times 10^{-6} \text{ m}^4 \quad t = 7,4 \text{ mm}$$

$$y_B = C - t = 43,6 \text{ mm}$$

$$M_s = 70 \times 7,4 \times \left(51 - \frac{7,4}{2} \right) = 2,0 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\sigma_B = \frac{M}{W} \frac{y_B}{C} = \frac{6711,25}{55,5 \times 10^6} \times \frac{43,6}{51} = 103,4 \text{ MPa}$$

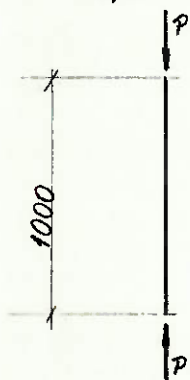
$$\tau_B = \frac{QM_s}{tI} = \frac{13422,5 \times 2,0 \times 10^{-5}}{7,4 \times 10^{-3} \times 2,84 \times 10^{-6}} = 12,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{103,4}{2} + \sqrt{\frac{103,4^2}{2} + \frac{12,8^2}{2}} = 105,0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = 105,0 \text{ MPa} < \bar{\sigma} = 125 \text{ MPa}$$

Conclusão: utilizaremos um perfil S 100x14,1.

2.4.5 - Suporte S3



perfil I

5,5m, tubo de 12" ($q = 1440 \text{ N/m}$)

a) Cálculo da Carga

$$P = Lq = 5,5 \times 1440 \Rightarrow P = 7920 \text{ N}$$

b) Verificação à Flambagem:

Tomando: $\sigma_e = 250 \text{ MPa}$
 $E = 200 \text{ GPa}$
perfil S 75x11,2
 $r_y = 13,11 \text{ mm}$
 $A = 1077 \text{ mm}^2$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_e}} = \sqrt{\frac{2 \times \pi^2 \times 200 \times 10^9}{250 \times 10^6}} = 125,7$$

$$\frac{l}{r_y} = \frac{1000}{13,11} = 76,3$$

uma vez que $l/r_y < C_c$ temos:

$$S = \frac{5}{3} + \frac{3}{8} \frac{l/r}{C_c} - \left(\frac{1}{8} \frac{l/r}{C_c} \right)^3 = 1,87$$

$$\sigma = \frac{\sigma_e}{S} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{l/r}{C_c} \right)^2 \right] = 109,1 \text{ MPa}$$

$$\bar{P} = \bar{\sigma} A = 117,5 \text{ kN} \Rightarrow \bar{P} > P$$

Conclusão: Não há risco de flambagem na coluna.

PARTE 3

ANĂLISE DINĂMICA

3.1 - Considerações Gerais

Nesta parte do trabalho será feito um estudo visando prevenir a ocorrência de vibração no sistema de descarga do compressor C-27401A/B.

Para tanto, utilizaremos recursos computacionais para a determinação da frequência natural do sistema, bem como de tantos modos de vibrar quantos forem possíveis.

Calculada a frequência natural da estrutura, a condição de ressonância será analisada, considerando-se / duas fontes:

- desbalanço de massas rotativas do compressor.
- pulsação ocasionada pelo escoamento do fluido.

As linhas que passarão por esta análise são as seguintes:

6"-HC-274-233/234-Ca

20"/16"/12"-HC-274-239/242/243/245-Ca

3.2 - Determinação das Frequências Fundamentais

3.2.1 Considerações Gerais

Para o cálculo das frequências críticas do sistema de tubulação, considerando-o como uma estrutura, foi utilizado o programa SAP4, implementado no Centro de Computação Eletrônica da USP.

O sistema de descarga do compressor C-27401 A/B foi modelado para análise da seguinte maneira:

- Sendo os trechos curvos muito curtos com relação aos trechos retos, aqueles não foram considerados. (o raio de curvatura é considerado uma vez e meia o diâmetro nominal do tubo, assim:

$$R = 1,5 \cdot DN \quad)$$

- O sistema foi dividido em dois trechos: o primeiro abrangendo o grupo 6"-HC-274-233/234-Ca e o segundo o conjunto 20"/16"/12"-HC-274-239/242/243/245-Ca.
- Em ambos os trechos, as extremidades foram consideradas completamente rígidas (três restrições à translação e três à rotação) e com restrições intermediárias indicadas nas plantas de tubulação.

Nas páginas a seguir, são exibidos os "layouts" dos trechos, explicitando assim o modelo utilizado.

3.2.2 - Resultados

Resumiremos nesta seção os resultados obtidos na análise dinâmica, feita como indicado na seção anterior; assim temos:

a) Trecho 6"-HC-274-233/234-Ca

Modo	f_n (Hz)
1º	0,3528
2º	0,5845
3º	0,8037
4º	1,062
5º	1,395
6º	1,969

tab. 3.2.2.a - Modos de vibração para o trecho 1

Infelizmente não foi possível obter mais valores devido ao cálculo exceder o tempo permissível de processamento.

b) Trecho 20"/16"/12"-HC-274-239/242/243/245-Ca

Frequência natural: 1,737 Hz

Neste trecho só foi conseguido o 1º modo (frequência natural) também devido ao tempo excessivo de processamento.

3.3 - Análise dos Resultados

A primeira coisa que nos chama a atenção nos resultados explicitados no capítulo anterior é o baixo valor de frequência natural apresentado em ambos os trechos. Isto é devido à grande flexibilidade da estrutura. De fato, observamos no cálculo de flexibilidade dessas linhas (capítulos 2.2 e 2.3) que os esforços devidos a efeitos térmicos são baixos, o que indica que as linhas em questão são bem / pouco rígidas, apresentando grandes comprimentos para absorção de esforços (braços). Sabemos que:

$$f_n = \frac{\alpha}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{q}}$$

onde :

f_n : frequência natural da estrutura (Hz)

α : constante dinâmica de proporcionalidade - função da geometria do sistema e do modo.

L : comprimento de tubo (m)

E : módulo de elasticidade (Pa)

I : momento de inércia (m⁴)

q : peso por comprimento de tubo (N/m)

Ora, da fórmula acima é evidente que quanto maior o braço (L) tanto menor será a frequência natural. Também o valor de α é diretamente proporcional às restrições impostas ao sistema (que são poucas visando tornar o siste-

ma bastante flexível).

Devido aos baixos valores encontrados para a frequência natural de ambos os trechos é de se esperar que o sistema opere bem acima de suas primeiras condições críticas o que dificultaria uma análise mais apurada.

Sendo assim, teremos de trabalhar imaginando/ a possibilidade de ocorrência de vibração, tentando minimizar seus efeitos sobre o sistema. Dessa maneira pode ser mais econômico prever dispositivos que inibam o fenômeno, caso ele venha a ocorrer por um ou outro motivo.

3.4 - Verificação à Vibração:

3.4.1 - Efeito devido ao Desbalanço das Massas Rotativas do Compressor

a) Cálculo da Frequência de Rotação

$$f_R = \frac{n}{60} \text{ onde}$$

f_R : frequência de rotação (Hz)

n : rotação do motor (rpm)

$$\text{assim: } f_R = \frac{443}{60} \Rightarrow f_R = 7,38 \text{ Hz}$$

b) Comentários:

Como havia sido previsto, a frequência de rotação é bastante superior às frequências calculadas no capítulo anterior, ou seja, o sistema é excitado num modo bastante alto que não pode ser verificado.

Assim, para prevenir o surgimento da vibração devida ao desbalanço de massas rotativas sugerimos:

- * Balanceamento dinâmico convenientemente das massas rotativas do conjunto moto-compressor.
- * Colocação do conjunto moto-compressor sobre uma base elástica adequada.
- * Se mesmo observadas as condições acima, ocorrer a vibra-

ção, sugere-se a colocação de juntas elásticas entre o bocal do compressor e a linha, visto haver espaço físico para isto e elas melhorarem a flexibilidade do sistema. No entanto, duas considerações fazem-se necessárias:

- Suportar a linha nos nós 86 e 96, visando impedir que o peso da estrutura atue sobre a junta.
- Uma manutenção bastante cuidadosa das juntas, pois elas são pontos críticos do ponto de vista estático.

3.4.2 - Efeito devido à Pulsação

a) Cálculo da Frequência de Pulsação

$$f_p = 2 \frac{n}{60}, \text{ onde}$$

f_p : frequência de pulsação (Hz)

n : rotação do compressor (rpm)

2 : pistão de duplo efeito

$$\text{assim : } f_p = 2 \times \frac{443}{60} \Rightarrow f_p = 14,77 \text{ Hz}$$

b) Verificação da Necessidade da Existência de Garrafas de Pulsação.

* Velocidade do Som no Gás

$$C = \sqrt{k \frac{R}{M} T}, \text{ onde:}$$

c : velocidade do som no gás (m/s)

k : constante adiabática

R : constante universal dos gases (J/kgmolK)

M : massa molecular do gás (kg mol)

T : Temperatura do gás (K)

então,

$$C = \sqrt{1,1 \times \frac{8314,5}{52,654} \times (98 + 273)}$$
$$C = 253,9 \text{ m/s}$$

* Comprimento de Onda

$$\lambda = \frac{C}{\delta p}, \text{ onde}$$

λ : comprimento de Onda (m)

assim: $\lambda = \frac{253,9}{14,77} \Rightarrow \lambda = 17,2 \text{ m}$

* Comprimento do "Chocke Tube"

$$\frac{\lambda}{12} \leq a \leq \frac{\lambda}{10}, \text{ onde}$$

a : comprimento do "Chocke Tube"

assim : $1,4 \leq a \leq 1,69$, $a = 1,6 \text{ m}$

Tubo 6", sc 40

Área da seção : $1,8 \times 10^{-2} \text{ m}^2$

* Cálculo do Volume Necessário

$$V = \frac{C^2 A}{2 \pi^2 f_p^2 a}, \text{ onde}$$

V : volume da garrafa (m^3)

C : velocidade do som no gás (m/s)

A : área da seção do "chocke tube" (m^2)

f_p : frequência de pulsação (Hz)

a : comprimento do "chocke tube" (m)

$$\text{assim: } V = \frac{253,9^2 \times 1,8 \times 10^{-2}}{2 \times \pi^2 \times 14,77^2 \times 1,6} \Rightarrow V = 0,168 m^3$$

Ora, para termos este volume com tubos de 6 pol, sc 40, necessitamos de um comprimento de:

$$L = \frac{V}{A} = \frac{0,168}{1,8 \times 10^{-2}} \Rightarrow L = 9,3 m$$

Este comprimento $\bar{e}$ existente (basta olhar o isométrico das linhas) portanto a garrafa de pulsação não $\bar{e}$ necessária.

c) Comentários:

Mais uma vez, a frequência de excitação do sistema $\bar{e}$ bem maior que as frequências calculadas no capítulo anterior.

Entretanto, mesmo que possa ocorrer vibração devido à pulsação, o sistema possui um "pulmão" capaz de neutralizá-la, uma vez que os compressores C-27401A e C-27401B não funcionam simultaneamente; assim o trecho de tubo entre a válvula de cada compressor até sua junção com o segmento principal tem um volume suficientemente grande para dispensar as garrafas de pulsação.

C O N C L U S ã O

Tendo em vista o objetivo exposto no SUMÁRIO, podemos verificar que ele foi alcançado.

A análise estática do sistema de compressão de solvente da área de desasfaltação a propano foi desenvolvida de tal forma que o tornou satisfatoriamente flexível mesmo em condições mais críticas que as de operação (limpeza com vapor). O método de cálculo utilizado foi o mesmo de empresas consultoras que atuam na área, baseado em princípios físicos amplamente seguros (Teorema de Castigliano-Método Analítico Geral).

Na análise dinâmica, embora não se conseguísse determinar o modo de operação do sistema, verificou-se que o sistema projetado tem condições de absorver efeitos danosos devidos à pulsação e também prevê a possível (desde que necessária e com os devidos cuidados) instalação de dispositivos de proteção ao previsível desbalanço das massas rotativas do conjunto moto-compressor.

Visto que o sistema em questão é estático e dinamicamente adequado, deve-se considerá-lo aprovado para execução.

A N E X O I

S I M B O L O G I A

S I M B O L O G I A

Maiúsculas:

A : área

C_p : calor específico à pressão constante

C_v : calor específico à volume constante

D_e : diâmetro externo

D_N : diâmetro nominal

E : módulo de elasticidade

F : força

I : momento de inércia

L : comprimento de tubo

M : massa molecular

M_f : momento fletor

M_s : momento estático

P : peso

Q : esforço cortante

R : constante universal dos gases perfeitos

T : temperatura

V : volume

W : módulo de resistência

Minúsculas:

a : comprimento do "Chocke Tube"

c : velocidade do som no gás

e : coeficiente de expansão térmica

f : frequência

f_n : frequência natural

g : aceleração da gravidade

k : expoente adiabático (C_p/C_v)

l : "braço" para absorção

l_0 : distância entre bocal e referência

n : rotação

p : pressão

q : peso por comprimento de tubo

s : coeficiente de segurança

t : espessura

Grego:

α : constante dinâmica de proporcionalidade

δ : deflexão

λ : comprimento de onda

ρ : densidade

σ : tensão de compressão

σ_e : tensão de escoamento

τ : tensão de cisalhamento

Misto:

Δl : expansão linear

Δp : variação de pressão

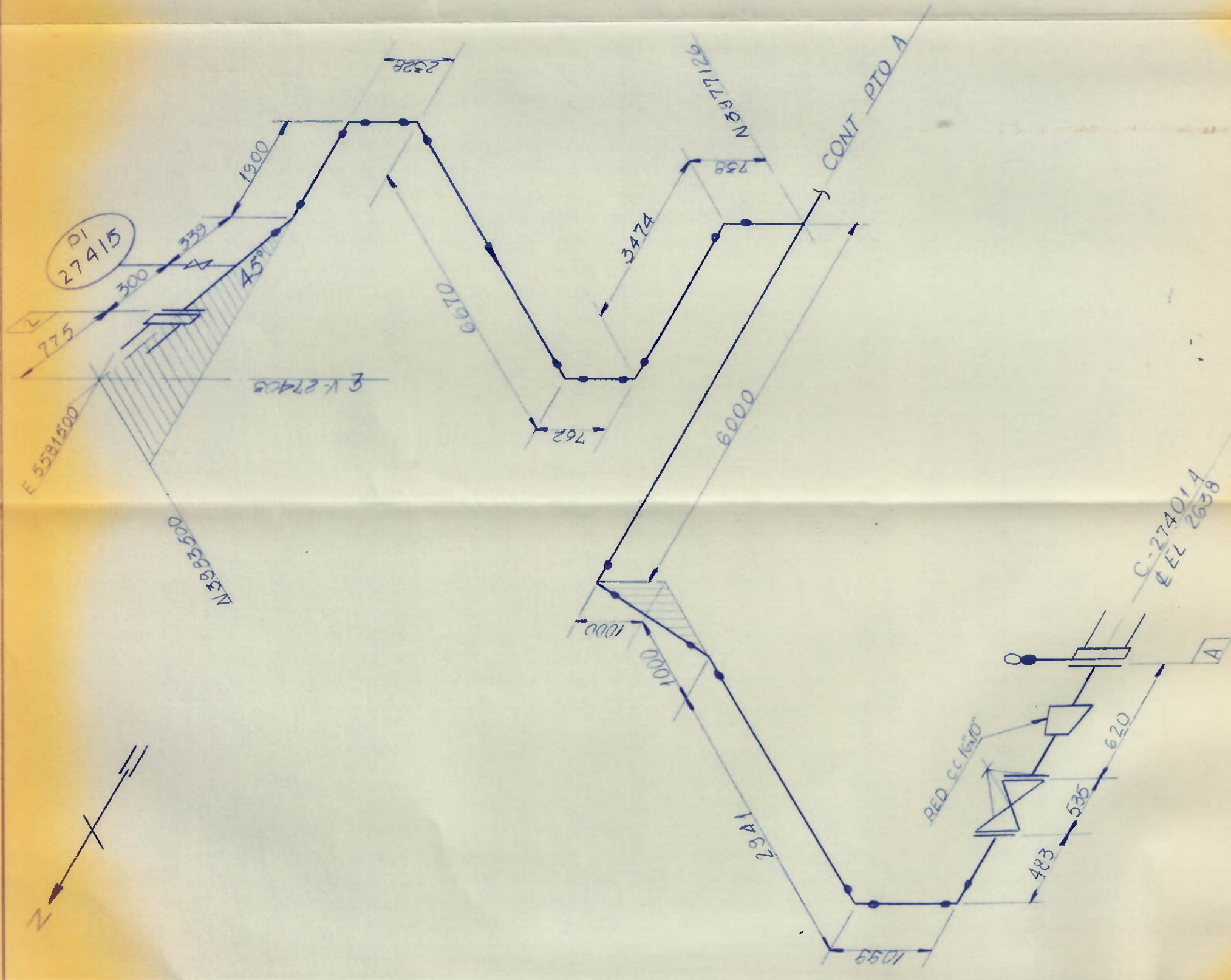
A N E X O I I

FLUXOGRAMA DE PROCESSO

QUADRO 1: ÍNDICE DE LINHAS - ÁREA DE COMPRESSÃO

LINHA	FLUIDO	EXTREMIDADES		TEMPERATURA (°C)			PRESSÃO (Kgf/cm²M)			V (m³/h)	P (Kgf/m²)
		DE	PARA	OPER.	PROJ.	*	OPER.	PROJ.	TESTE		
1 1/2" AI-274-003-AC	AR DE INSTRUMENTOS	LIMITE DE ÁREA	C-27401 A	25	40	N	7,0	10,5	15,7		8,02
1 1/2" AI-274-004-AC	AR DE INSTRUMENTOS	LIMITE DE ÁREA	C-27401 B	25	40	N	7,0	10,5	15,7		8,02
2" AM-274-033-AA	ÁGUA DE MÁQUINAS	LIMITE DE ÁREA	C-27401 A	32	75	N	4,0	7,8	11,7	19,3	1000
2" AM-274-034-AA		LIMITE DE ÁREA	C-27401 B	32							
2" AM-274-035-AA		C-27401 A	LIMITE DE ÁREA	45							
2" AM-274-036-AA		C-27401 B	LIMITE DE ÁREA	45							
4" AR-274-047-AA	ÁGUA DE EQUIPAMENTO	LIMITE DE ÁREA	C-27401 A	28	75	N	3,7	9,9	14,8	32	1000
4" AR-274-048-AA		C-27401 A	LIMITE DE ÁREA	45			1,8				
4" AR-274-049-AA		LIMITE DE ÁREA	C-27401 B	28			3,7				
4" AR-274-050-AA		C-27401 B	LIMITE DE ÁREA	45			1,8				
16" HC-274-222-Ba	HIDROCARBONETOS	LIMITE DE ÁREA	P-27402	175	215	S	0,5	3,0	4,5	309,1	28,37
12" HC-274-226-Ba		P-27402	V-27402	45	75					231,8	3442
10" HC-274-227-Ba		V-27402	V-27403							193,2	2837
2" HC-274-229-Ba		V-27403	V-27402							38,6	2837
10" HC-274-231-Ba		V-27403	C-27401 A							193,2	4,30
10" HC-274-232-Ba		10" HC-274-231-Ba	C-27401 B							289,4	2,40
6" HC-274-233-Ca		C-27401 A	20" HC-274-239-Ca	82	120		3,4	21,5	32,3	786	37,46
6" HC-274-234-Ca		C-27401 B	6" HC-274-233-Ca	82	120			21,5	32,3	786	37,46
20" HC-274-239-Ca		LIMITE DE ÁREA	16" HC-274-242-Ca	90	125			18,8	28,2	1788,0	21,71
16" HC-274-242-Ca		20" HC-274-239-Ca	12" HC-274-243/245-Ca							16256	21,69
12" HC-274-243-Ca		16" HC-274-242-Ca	P-27401 B/D							8128	
12" HC-274-245-Ca		16" HC-274-242-Ca	P-27401 F/H							8128	
10" HC-274-246-Ca		P-27401 A/C	12" HC-274-249-Ca	54	120		8,7			337	523,0
10" HC-274-248-Ca		P-27401 E/G	12" HC-274-249-Ca							337	
12/16" HC-274-249-Ca		10" HC-274-246/248-Ca	V-27401							674	
1 1/2" HC-274-251-Ba		C-27401 A	12" HC-274-226-Ba	55	80		0,3	3,0	4,5	28,9	34,42
1 1/2" HC-274-252-Ba		C-27401 B	1 1/2" HC-274-251-Ba	55	80		0,3			28,9	34,42
6" HC-274-737-Ba		C-27401 A	LIMITE DE ÁREA	60	120		0,5			84,2	2,34
4" HC-274-738-Ba		C-27401 A	LIMITE DE ÁREA							56,1	
3" HC-274-739-Ba		C-27401 A	LIMITE DE ÁREA							42,1	
6" HC-274-755-Ba		C-27401 B	LIMITE DE ÁREA							84,2	
4" HC-274-756-Ba		C-27401 B	LIMITE DE ÁREA							56,1	
3" HC-274-797-Ba		C-27401 B	LIMITE DE ÁREA							42,1	

* Lavagem com vapor a 180 °C , 1,0 Kgf/cm² M



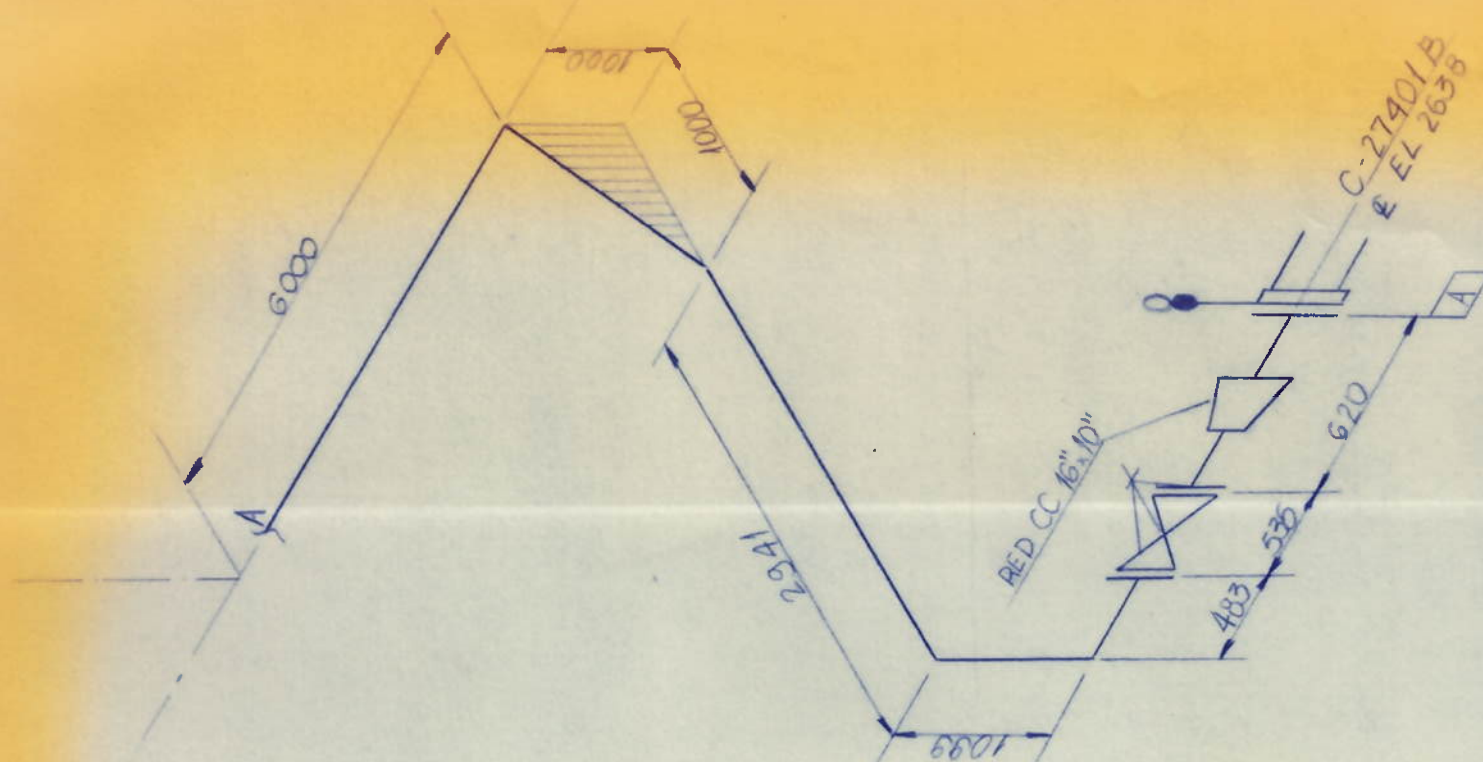
DI
27415

E 5581500
A 3983500
E V-27403

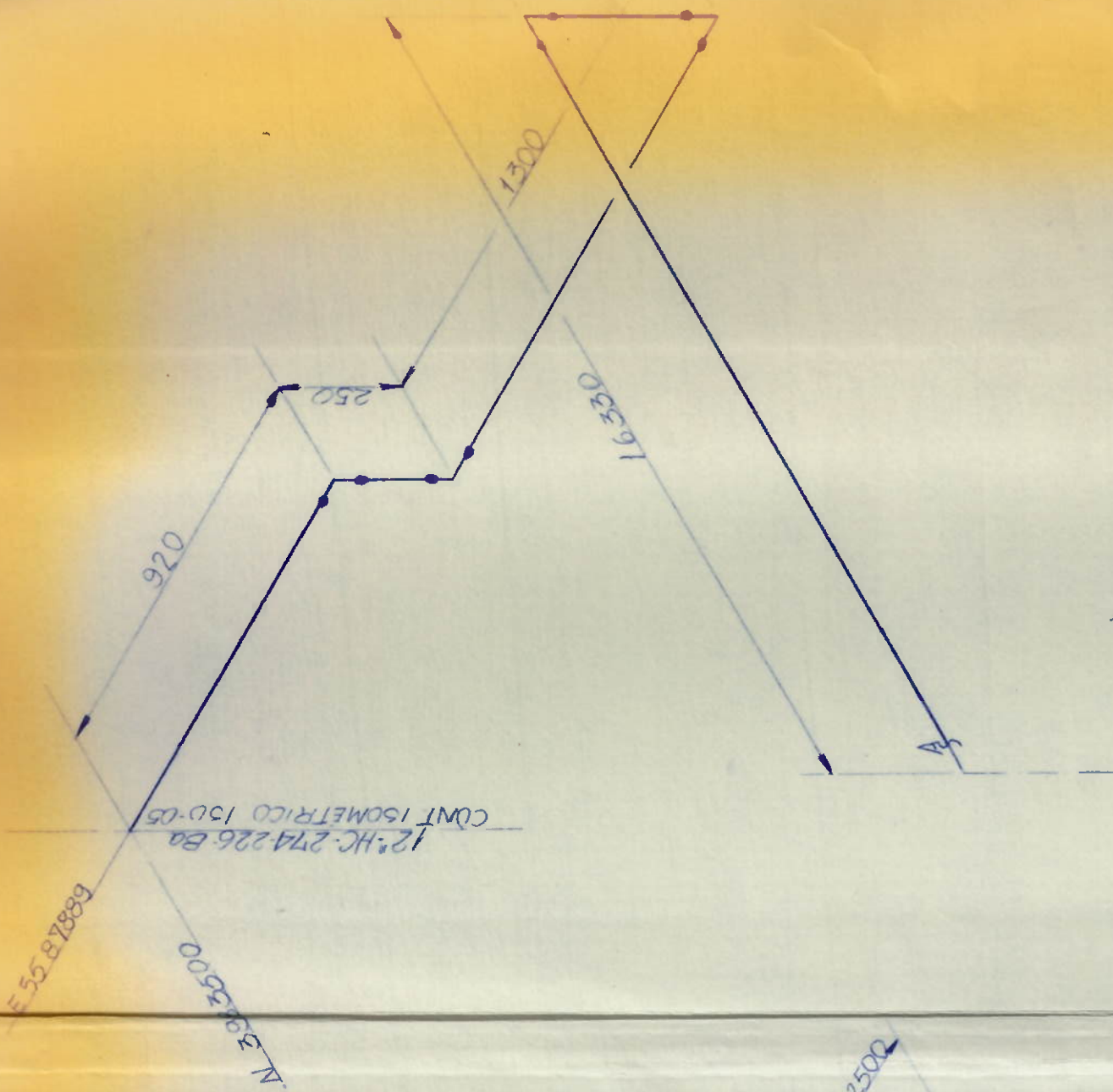
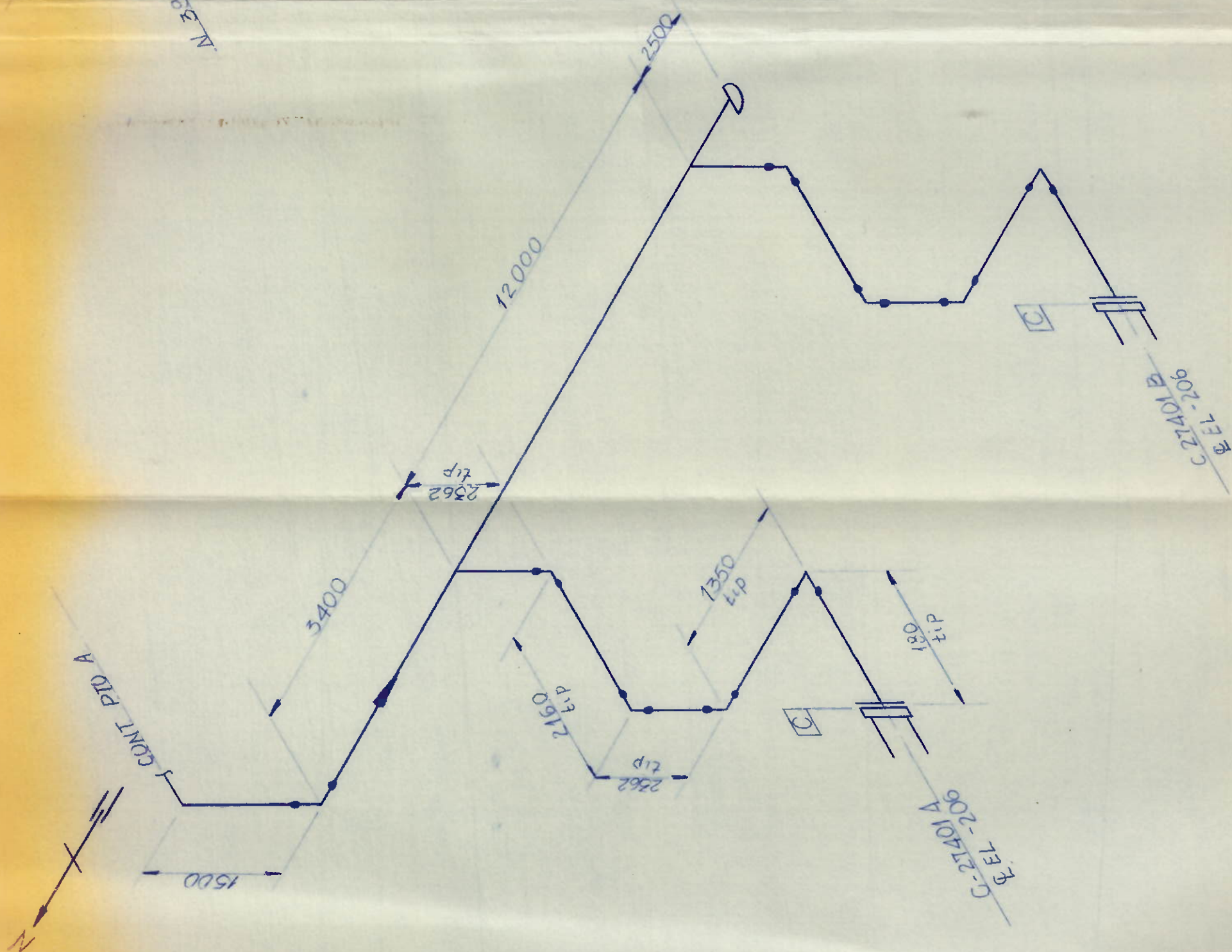
LINHA	10°-HC-274-231/232-230
DES. DE REFERENCIA	PLT 01
TEMP. OPERAÇÃO (°C)	43
TEMP. PROJETO (°C)	73
PRESSÃO OPER. (kgf/cm²M)	05
PRESSÃO PROJ. (kgf/cm²M)	30
PRESSÃO TESTE (kgf/cm²M)	45

DESASFALTAÇÃO A PROPANO
COMPRESSÃO DE SOLVENTE

EPUSP	ISOMETRICO	150-02	VISTO
	Armando Juliano	16/08/86	
	PMC-581-PROJETO MEC II		



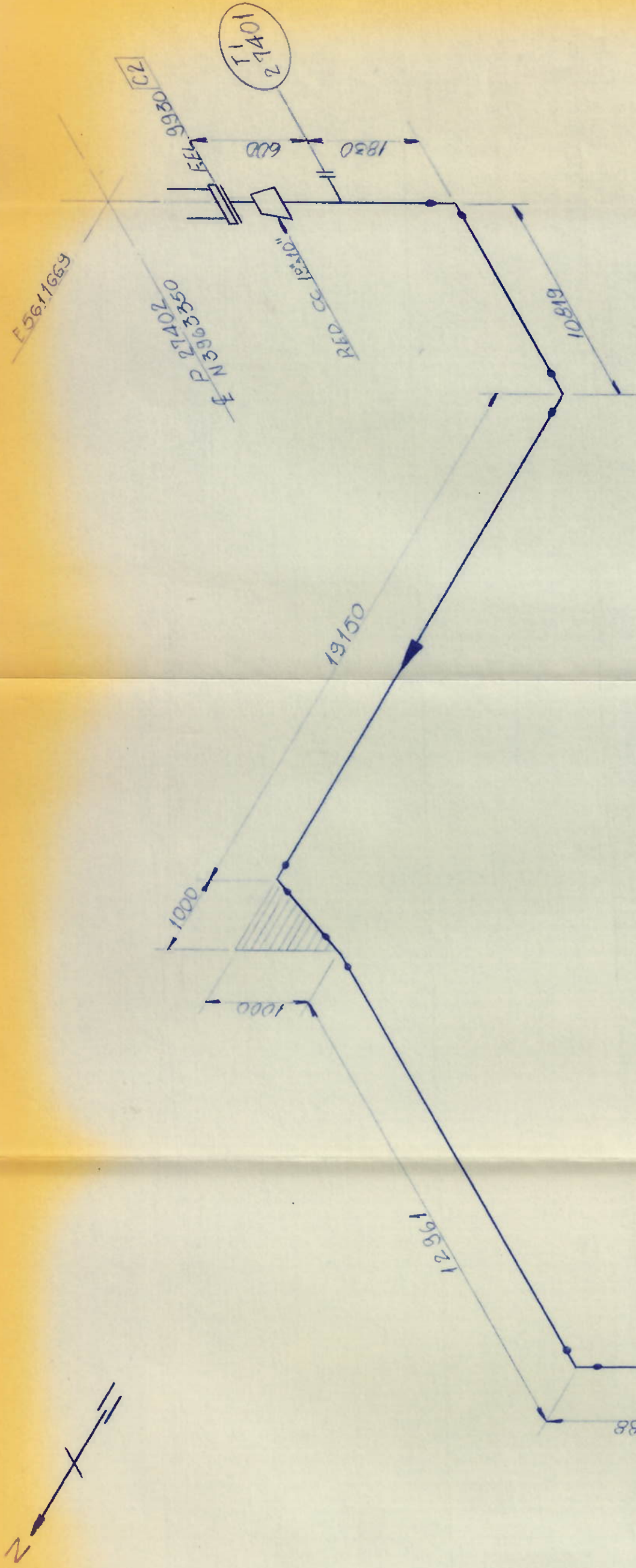
C-27401/B
E EL 2638



LINHA	112° HC 274-291/292-51
DES DE REFERENCIA	PLT 01
TEMP OPERAÇÃO (°C)	55
TEMP PROJETO (°C)	80
PRESSAO OPER (kgf/cm²M)	0,3
PRESSAO PROJ (kgf/cm²M)	3,0
PRESSAO TESTE (kgf/cm²M)	4,5

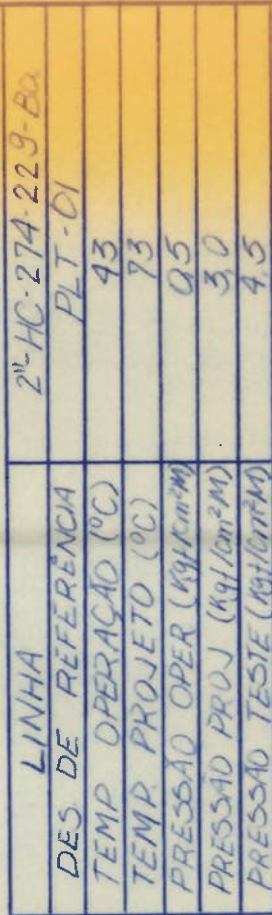
DESASFALTAÇÃO A PROPANO
COMPRESSÃO DE SOLVENTE

EPUSP	ISOMETRICO	150-03	VIC 76
Atendimento	17/08/86		
PMC-SBL - PROJ	MEC II		



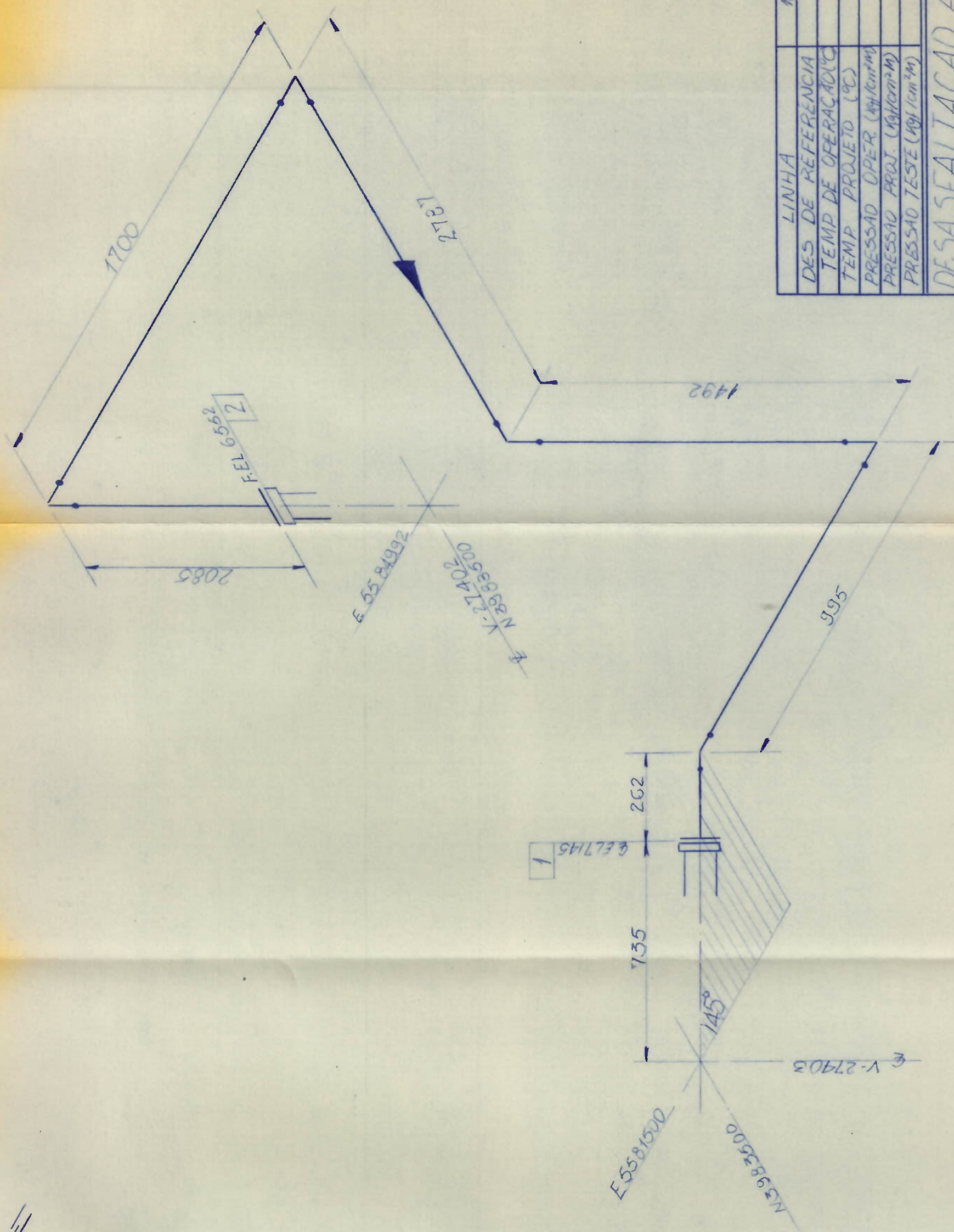
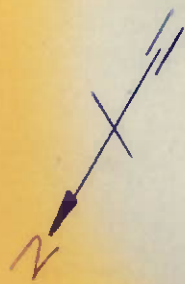
LINHA	12"-HC-274-226-Ba
DES. DE REFERENCIA	PLT-01102
TEMP. OPERAÇÃO (°C)	43
TEMP. PROJETO (°C)	73
PRESSÃO OPER. (kgf/cm²)	05
PRESSÃO PROJ. (kgf/cm²)	3,0
PRESSÃO TESTE (kgf/cm²)	4,5

DESASFALTAÇÃO A PROPANO	
COMPRESSÃO DE SOLVENTE	
EPUSP	ISOMETRICO 150-03
Armando Joliani	18/08/86
PMC 581	Proj. Mec II



DESASFALTAÇÃO A PROPANO
COMPRESSÃO DE SOLENTE

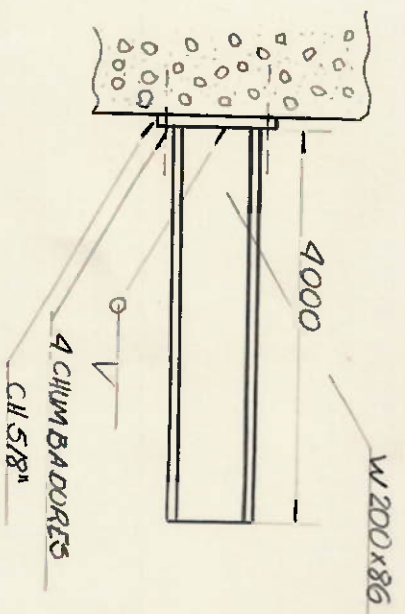
EPUSP	ISOMETRICO 150-06	V1370
	Armando Julião	18/08/86
	PMC-581	Piel Mec II



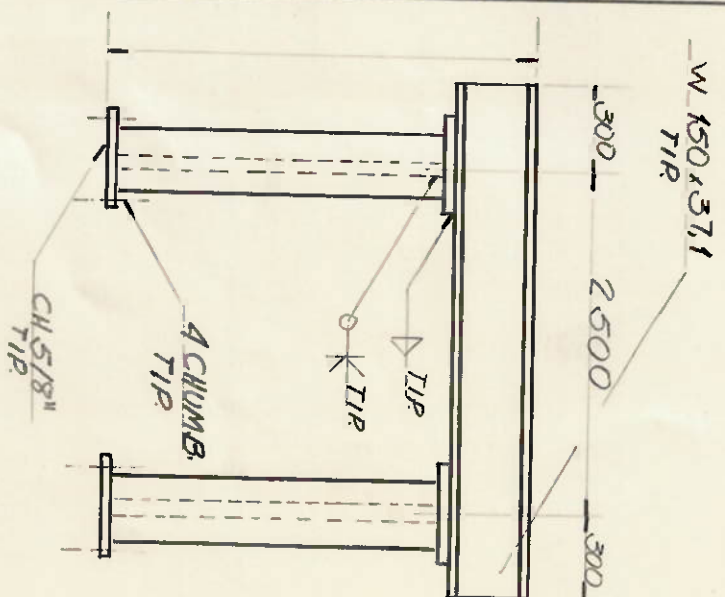
LINHA	10" HC-274-227-Ba
DES DE REFERENCIA	PLT-D1
TEMP DE OPERAÇÃO(°C)	43
TEMP PROJETO (°C)	73
PRESSAO OPER (kgf/cm²m)	0,5
PRESSAO PROJ. (kgf/cm²m)	3,0
PRESSAO TESTE (kgf/cm²m)	4,5

DESASFALTAÇÃO A PROPANO
COMPRESSÃO DE SOLVENTE

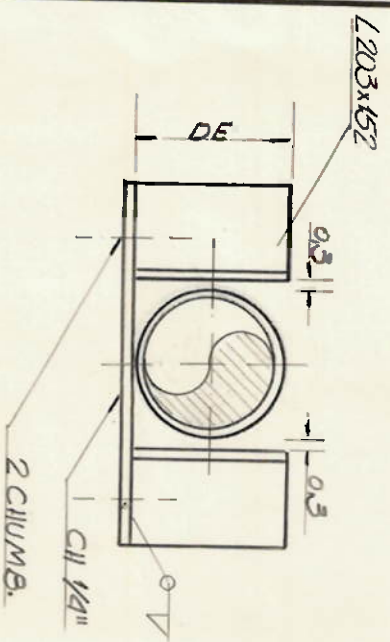
EDUSD	150 METRIC - 150-07	VISTO
	Amoroso Juliari	
	PMC-581	
	Proj. Mec. II	



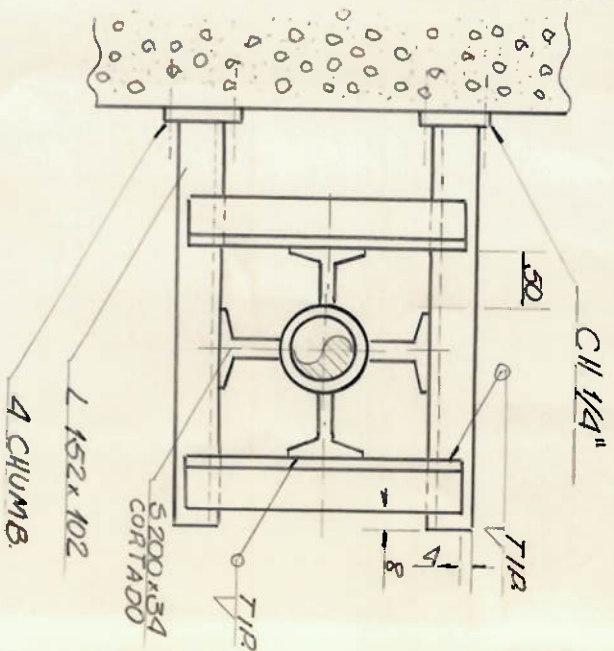
ST-1



ST-2



G-1



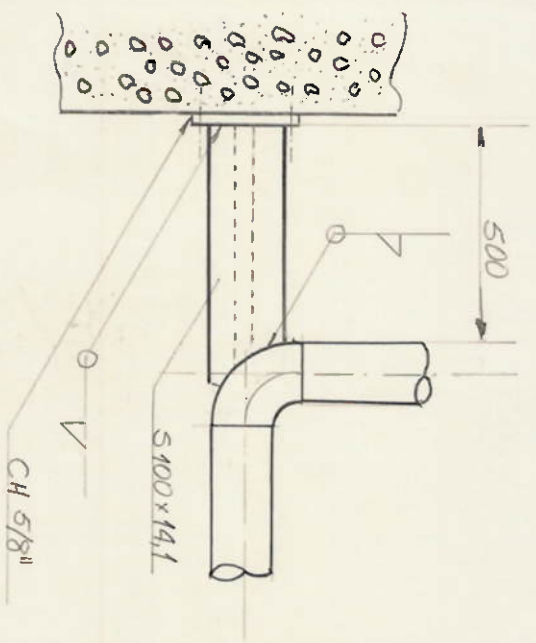
G-2

DESAFALTAÇÃO A PROPANO DETALHAMENTO DE SUPORTES

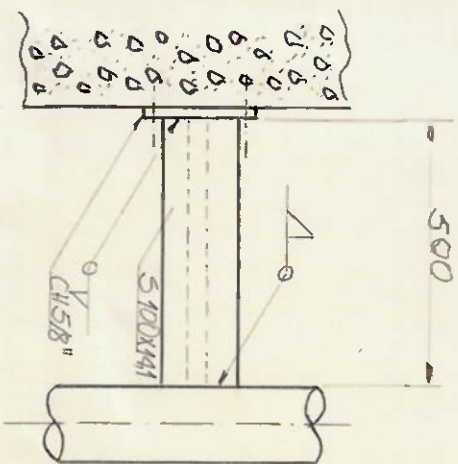
EPUSP

Armando Carlos Cardoso Juliari - nº 1258663
PMC 581 - Projeto Mecânico II

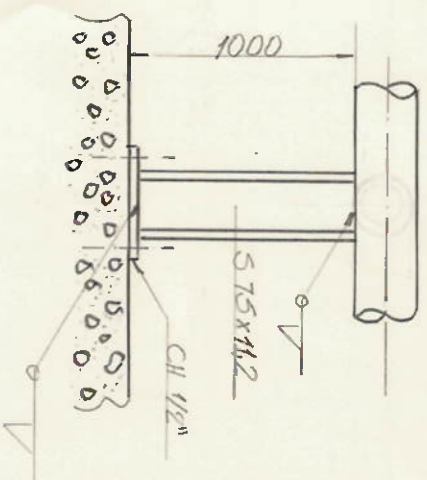
Visto



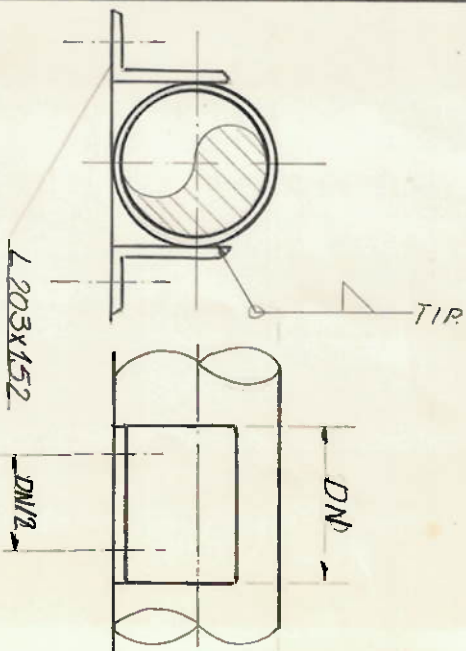
S-1



S-2



S-3



A-1

DESASFALTAÇÃO A PROPANO DETALHAMENTO DE SUPORTES

EPUSP

DES-SU-2

Visto

Armando Carlos C. Julianni - nº 1258663

PMC 581- Projeto Mecânico II 01/11/86

B I B L I O G R A F I A

- AMERICAN NATIONAL STANDART INSTITUTE (ANSI)
American national standart code for pressure piping.
ANSI.B.31.
- SILVA, Remi B., Tubulações, 2v., EPUSP, 1975
- SILVA TELLES, P.C., Tubulações Industriais, 2v.,
6a. ed., LTC, 1982
- THE M.W. KELLOG C^O - Design of Piping Systems,
2a. ed., John Wiley, 1961