

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO MECÂNICO

PROJETO ESTRUTURAL DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO

autor: Carlos Henrique Gomes

orientador: Ronaldo B. Salvagni

-1988-

INDICE

CAPITULO	PAGINA
INTRODUÇÃO	01
I - ESTIMATIVA DA ESPESSURA DO COSTADO	02
II - DIMENSIONAMENTO DA SAIA, CHUMBADORES, ANEL DE APOIO E TAMPOS	28
III- CALCULO DAS TENSÕES NA JUNÇÃO SAIA-COSTADO	40
IV - FREQUÊNCIA NATURAL	42
V - BIBLIOGRAFIA	56

Serviço de Bibliotecas
Biblioteca de Engenharia Mecânica

INTRODUÇÃO

Este trabalho consiste no projeto estrutural de uma coluna de destilação destinada a purificar cumeno, um subproduto da fabricação do alfa-metil-estireno.

O cumeno purificado é enviado à fabricação do fenol, que por sua vez é matéria-prima na fabricação do nylon.

O processo de purificação exige:

Temperatura de Projeto : 210°C

Pressão de Projeto : $2,2 \text{ kgf/cm}^2$

Altura da Coluna : 38,07 m

Diâmetro Interno : 0,78 m

Um croquis da coluna e maiores informações podem ser obtidas na Especificação Técnica em anexo.

I - ESTIMATIVA DA ESPESSURA DO COSTADO

O procedimento para cálculo da espessura do costado consiste em adotar espessuras arbitrárias para as chapas e, em seguida, efetuar a verificação das tensões atuantes e a máxima deflexão no topo da coluna.

I.1 - Determinação dos Esforços Devidos aos Vento

Os valores mínimos das pressões de vento para o cálculo das cargas sobre o equipamento são baseados na norma NBR-6123, e os esforços resultantes são avaliados conforme o parágrafo a seguir.

I.1.1 - Avaliação dos Esforços

$$V_k = V_o . S_1 . S_2 . S_3$$

$$q = V_k^2 / 16$$

$$F_k = C_k . q . A_e$$

onde: V_k = velocidade característica do vento (m/s)

V_o = velocidade básica do vento (NBR-6123,
parágrafo 5.1, m/s)

S_1 = fator topográfico (NBR-6123, parágrafo 5.2)

S_2 = fator de localização (NBR-6123, parágrafo 5.3)

S_3 = fator estatístico (NBR-6123, parágrafo 5.4)

q = pressão dinâmica do vento (kgf/cm²).

Corresponde à velocidade característica V_k ,
nas seguintes condições:

- pressão = 1 atm

- temperatura = 15°C

F_a = força de arrasto (kgf)

C_a = coeficiente de arrasto (NBR- 6123,
parágrafo 6.3)

A_e = Área da projeção ortogonal do equipamento num
plano normal à direção do vento (cm²)

Para este projeto adotamos*:

$V_o=45$ m/s

$S_1=1,0$

$S_3=1,0$

$S_z = f$ (Categoria, Classe, Altura em Relação ao Solo)

Categoria 2 (Terreno aberto com poucas obstruções)

Classe B (Construção com altura entre 20 e 50 m)

* Conforme padrão Rhodia MO-CD-0-16

Temos então:

H (m)	S_z	V_k (m/s)	q (Kgf/cm ²)
0 - 3	0,67	30,15	56,8
3 - 5	0,74	33,30	69,3
5 - 10	0,88	39,60	98,0
10-15	0,95	42,75	114,2
15-20	0,98	44,10	121,2
20-30	1,03	46,35	134,3
30-40	1,06	47,70	142,2
40-50	1,08	48,60	147,6

- Cálculo dos Esforços:

$$F = C_a \cdot q \cdot A_a$$

Tendo em vista que nesta fase do projeto da coluna muitos parâmetros (tubulações, bocais, escadas, etc.) ainda são desconhecidos a área projetada A_a é multiplicada por um fator de majoração (K_d).

Conforme recomendação da Padrão de Construção Rhodia MO-CO-0-16 para coluna com diâmetro menor que 0,9 m adota-se $K_d=1,5$.

$$L/D_a = 38,07/0,78 > 20 \text{ assim da NBR-6123 } C_a = 0,6$$

OBS.: Não consideraremos o fator de majoração da área projetada para o trocador de calor e para a saia cônica.

Material das Chapas : SA-285C

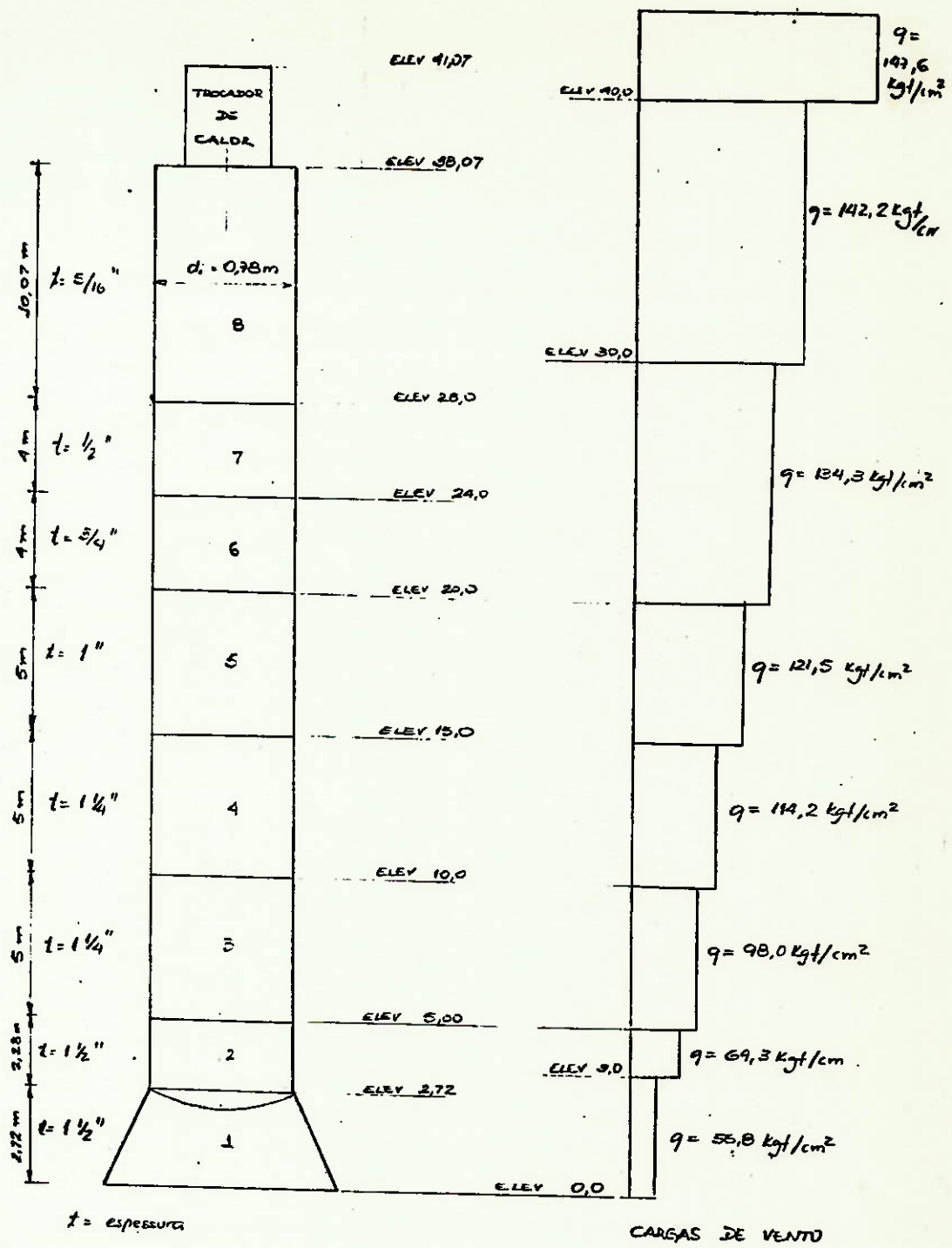
Módulo de Elasticidade = 1930000 Kgf/cm² (à 210°C)
(Conforme TEMA)

I.2-Determinação da deflexão na coluna

I.2.1-Como primeira estimativa dividiremos a coluna em 8 secções (incluindo a saia) , conforme esquema a seguir.

As espessuras (t) adotadas para as secções foram as seguintes:

SECÇÃO 1 (SAIA)	$t=1 \frac{1}{2}"$	=	38,10 mm
SECÇÃO 2	$t=1 \frac{1}{2}"$	=	38,10 mm
SECÇÃO 3	$t=1 \frac{1}{4}"$	=	31,75 mm
SECÇÃO 4	$t=1 \frac{1}{4}"$	=	31,75 mm
SECÇÃO 5	$t=1"$	=	25,40 mm
SECÇÃO 6	$t=3/4"$	=	19,05 mm
SECÇÃO 7	$t=1/2"$	=	12,70 mm
SECÇÃO 8	$t=5/16"$	=	7,94 mm



1.2.2- Método de Cálculo:

O cálculo da deflexão é feito considerando-se a coluna como uma viga engastada sujeita aos esforços devidos ao vento.

Para isso dividimos a coluna em seguimentos conforme esquema no memorial de cálculo à seguir.

As equações para cálculo das deformações e dos ângulos para cada seguimento foram deduzidas a partir da equação da linha elástica:

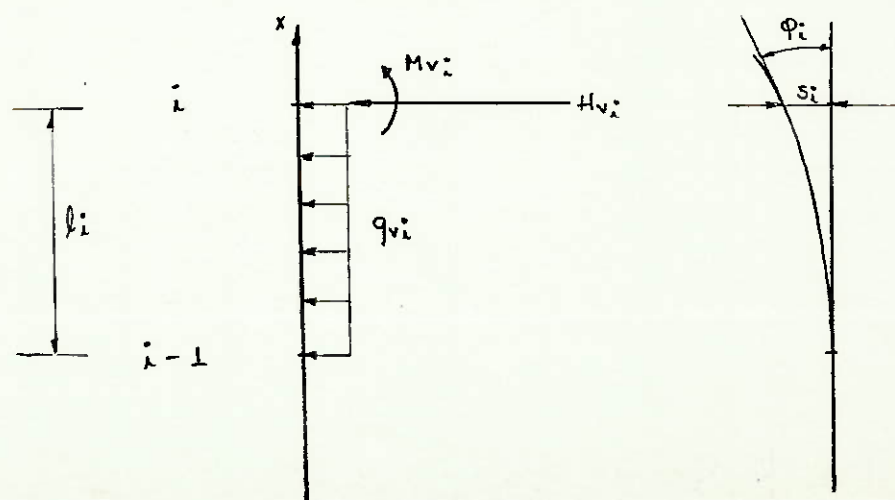
$$d^2y/dx^2 = M/EJ$$

Consideremos o seguimento genérico "i", ou seja, da secção "i-1" até a secção "i" sujeito aos seguintes esforços:

H_{vi} = força cortante na secção "i" (Kgf)

M_{vi} = momento fletor em "i" (Kgf.cm)

q_{vi} = carga distribuída no segmento "i" (Kgf/cm)



Considerando somente o efeito da força cortante Hv_i , temos:

$$s_i = \frac{Hv_i l_i^3}{3E_i J_i} \quad \text{e} \quad \varphi_i = \frac{Hv_i l_i^2}{2E_i J_i}$$

Devido ao momento Mv_i , temos:

$$s_i = \frac{Mv_i l_i^2}{2E_i J_i} \quad \text{e} \quad \varphi_i = \frac{Mv_i l_i}{E_i J_i}$$

Devido à carga distribuída q_i , temos:

$$s_i = \frac{q_i l_i^4}{8E_i J_i} \quad \text{e} \quad \varphi_i = \frac{q_i l_i^3}{6E_i J_i}$$

Pelo princípio da superposição temos:

$$s_i = \frac{Hv_i l_i^3}{3E_i J_i} + \frac{Mv_i l_i^2}{2E_i J_i} + \frac{q_i l_i^4}{8E_i J_i}$$

reagrupando:

$$s_i = l_i^2 (Hv_i l_i + 3(Hv_i l_i + M_i + q_i l_i^2/2 + M_i)) / 12E_i J_i$$

mas,

$$M_{i-1} = Hv_i l_i + M_i + q_i l_i^2/2$$

logo:

$$s_i = l_i^2 (3(M_i + M_{i-1}) + Hv_i l_i) / (12E_i J_i)$$

que é a equação utilizada no memorial de cálculo.

Para os deslocamentos angulares temos:

$$\varphi_i = \frac{Hv_i l_i^2}{2E_i J_i} + \frac{Mv_i l_i}{E_i J_i} + \frac{q_i l_i^3}{6E_i J_i}$$

ou seja:

$$\varphi_i = l_i (Hv_i l_i/2 + 2M_i + Hv_i l_i + M_i + q_i l_i^2/2) / 3E_i J_i$$

logo:

$$\varphi_i = l_i (2M_i + M_{i-1} + Hv_i l_i/2) / (3E_i J_i)$$

I.2.3-Resultados

Para cálculo da deflexão a coluna foi dividida em 10 segmentos:

segmento	da cota	até	l. (m)
1 (saia)	0	2,72	2,72
2	2,72	3,00	0,28
3	3,00	5,00	2,00
4	5,00	10,00	5,00
5	10,00	15,00	5,00
6	15,00	20,00	5,00
7	20,00	24,00	4,00
8	24,00	28,00	4,00
9	28,00	30,00	2,00
10	30,00	38,07	8,07

OBS.: 1- O momento de inércia da saia cônica foi estimado à partir do diâmetro médio da mesma :

$$d_{\text{médio}} = (d_{\text{base}} + d_{\text{topo}}) / 2 = (78 + 174) / 2 = 126 \text{ cm}$$

$$J_{\text{saia}} = 3,14 \times ((126 + 2 \times 3,81)^4 - (126)^4) / 64 = 3275542 \text{ cm}^4$$

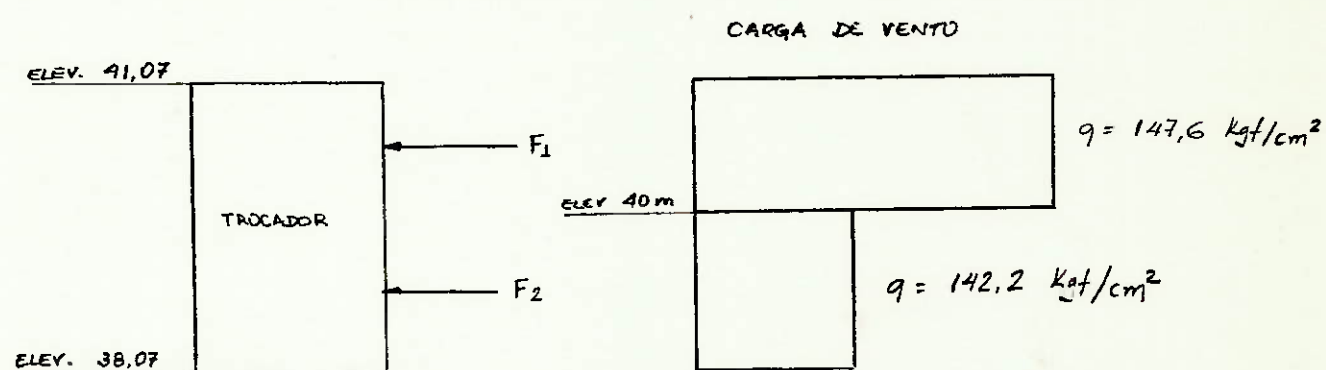
2- No topo da coluna existe um trocador de calor com formato cilíndrico e as seguintes características:

Peso: 1.5 ton

Diâmetro: 0,5 m

Altura: 3,0 m

- Cálculo dos esforços devidos ao trocador de calor



$$F = C_e \cdot A \cdot q$$

$$C_e = 0,5 \quad (\text{tabela 10 NBR-6123})$$

$$F_1 = 0,5 \times 147,6 \times 0,5 \times 1,07 = 39,5 \text{ Kgf}$$

$$F_2 = 0,5 \times 142,2 \times 0,5 \times 1,93 = 68,6 \text{ Kgf}$$

$$M_R = 68,6 \times 193/2 + 193 + 107/2 = 16300 \text{ Kgf.cm}$$

$$F_R = 68,6 + 39,5 = 108 \text{ Kgf}$$

Portanto, no topo do segmento 10 teremos um momento fletor de 16300 Kgf.cm e uma força cortante de 108 Kgf.

	ORIGINAL	REV 1	REV 2	REV 3	REV 4
000					
00100					

19-02-2

CARGAS EXTERNAS EM COLUNAS E TORRES

1 - NOMENCLATURA:

Z1 - ELEVACÃO DA RECÇÃO EM RELAÇÃO A BASE

C = FATOR DE FORMA

DI = DYNAMISCHES EQUIVALENZ

PI - PÃO DE CONJUNDAÇÕES, REFRESCADORES, ETC.

Mel: MOMENTO EXTERNO DEVIDO A REFERVEDOR POR EXEMPLO

H = FORÇA CONSTANTE NA SECÇÃO

11 • DISEÑO INTERNO DE TORRES

ti = ESPESURA DE CHAPA DA TORRE

EEI - MÓDULO DE ELASTICIDADE À TEMPERATURA DE PROJETO (SAIA ---TEMPERTURA AMBIENTE)

MI • MOMENTO RESULTANTE NA SECÇÃO

y : NOTAÇÃO

3 : FLECHA

OBSERVAÇÃO:

1 - OS DADOS DE ENTRADA ORTÉM-DE DAS CARREIRAS NACHURADAS

2 - AS SETAS INDICAM A ORDEM DE PREENCHIMENTO DE CADA CARREIRA (ONDE NÃO HÁ SETA A OR--

DEM I' CONDIZIONE)

3 - NA SEÇÃO "1", O SEGMENTO DA YONNE CONSIDERADO É DE "1" ATÉ "1-1" (CONFORME ESQUEMA)

NOTES:

Index

3. A. A. 1944

ITEM: 4 F

DATA	Q3:
------	-----

DATA

0 FOLHA 1 DE 3

[illegible]

3 - AÇÃO DE CARGAS LOCALIZADAS

3 - AÇÃO DE CARGAS LOCALIZADAS

1	$\Delta\psi_1$ (rad)	Δs_1 (CM)	ψ_1 (rad)	s_1 (CM)	M_1 (100F x CM)
0					0
1	0.284	39.66	0.284	39.66	1
2	0.113	1.584	0.397	52.36	2
3	0.760	77.3	1.157	208.06	3
4	1.415	502.8	3.072	1250.36	4
5	1.375	364.5	4.447	3190.86	5
6	1.175	915.8	5.622	5730.16	6
7	0.812	174.1	6.434	8153.66	7
8	0.743	163.2	7.177	10390.46	8
9	0.363	30.6	7.540	12364.46	9
10	0.467	265.6	8.007	18714.27	10
11					11
12					12
13					13
14					14
15					15
16					16
17					17
18					18
19					19
20					20

1000 + 1000 + 1000

$$15\Delta + (1-9A)\pi + (1-1)z = 1z$$

$$108\Delta + 148\Delta = 15\Delta$$

MEMORIAL DE CÁLCULO
DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS E DESLOCAMENTOS, EM COLUNAS E TORRES,
DEVIDO A CARGAS EXTERNAS

DATA	Q.S.:
------	-------

FOLHA 3 DE 3

Do memorial de cálculo obtemos que a deflexão no topo da coluna (segmento 10) é igual à 18,7 cm.

O Padrão de Construção Rhodia MO-CO-0-16 recomenda que o máximo deslocamento horizontal no topo do equipamento seja menor que $L/200$ onde L é a altura do equipamento.

Assim :

$$s_{max} = 38070/200 = 190,35 \text{ mm}$$

Portanto, o resultado obtido é satisfatório.

1.3-Análise das Tensões

1.3.1 As tensões atuantes no costado da coluna devem-se a três fatores principais:

1. Peso Próprio
2. Pressão Interna
3. Momento Fletor devido à ação do vento

Para uma determinada secção da coluna as tensões atuantes podem ser calculadas através das seguintes relações:

- 1) Tensão Devida ao Peso Próprio (S_1)

$$S_1 = W_i / A_i$$

onde: W_i = Peso da secção "i"

A_i = Area da secção "i"

- 2) Tensão Devida à Pressão Interna:

- 2a - Tensão Axial (S_3)

$$S_3 = p.D / 4.t$$

- 2b - Tensão Circunferencial (S_4)

$$S_4 = p.D / 2.t$$

onde: p = pressão interna

D = diâmetro da coluna

t = espessura da chapa

3) Tensão Devido ao Momento Fletor (S_2)

$$S_2 = M \cdot y_{max} / J = M \cdot D_E / 2J$$

onde: M = momento fletor atuante na secção

J = momento de inércia da secção

D_E = diâmetro externo da secção

Assim:

- Tensão Longitudinal Atuante na Secção

$$\text{lado do vento} \quad S = -S_1 + S_2 + S_3$$

$$\text{lado oposto} \quad S = -S_1 - S_2 + S_3$$

onde o sinal negativo indica tratar-se de compressão.

- Tensão Circunferencial:

$$S = S_4 = p \cdot D / 2$$

I.3.2 Pesos por Secção

Adotando-se $\gamma_{aço} = 0,0078 \text{ Kgf/cm}^3$ temos:

SECÇÃO 2

$$W(\text{peso}) = \text{volume} \times \gamma_{aço}$$

$$W_2 = 0,25 \cdot \gamma \left((78 + 2 \times 3,81)^2 - 78^2 \right) \times 228 \times 0,0078$$

$$W_2 = 1742 \text{ Kgf}$$

SECÇÃO 3

$$W_3 = 0,25 \cdot \gamma \left((78 + 2 \times 3,175)^2 - 78^2 \right) \times 500 \times 0,0078$$

$$W_3 = 3158 \text{ Kgf}$$

SECÇÃO 4

$$W_4 = 0,25 \cdot \gamma \left((78 + 2 \times 3,175)^2 - 78^2 \right) \times 500 \times 0,0078$$

$$W_4 = 3158 \text{ Kgf}$$

SEÇÃO 5

$$W_5 = 0,25 \cdot \gamma \cdot ((78 + 2 \times 2,54)^2 - 78^2) \times 500 \times 0,0078$$

$$W_5 = 2506 \text{ Kgf}$$

SEÇÃO 6

$$W_6 = 0,25 \cdot \gamma \cdot ((78 + 2 \times 1,905)^2 - 78^2) \times 400 \times 0,0078$$

$$W_6 = 1492 \text{ Kgf}$$

SEÇÃO 7

$$W_7 = 0,25 \cdot \gamma \cdot ((78 + 2 \times 1,27)^2 - 78^2) \times 400 \times 0,0078$$

$$W_7 = 987 \text{ Kgf}$$

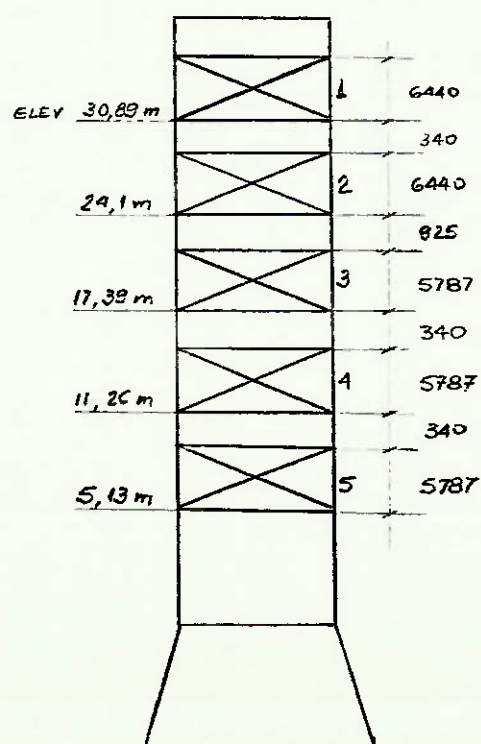
SEÇÃO 8

$$W_8 = 0,25 \cdot \gamma \cdot ((78 + 2 \times 0,794)^2 - 78^2) \times 1007 \times 0,0078$$

$$W_8 = 1543 \text{ Kgf}$$

1.3.3 Cálculo do peso Devido ao Recheio

Recheio IMPT-40

Peso Específico = 228 Kgf/m³

$$W_{R1} = 0,25 \times \gamma \times 0,78^2 \times 6,44 \times 228 = 702 \text{ Kgf}$$

$$W_{R2} = W_{R1}$$

$$W_{R3} = 0,25 \times \gamma \times 0,78^2 \times 5,78 \times 228 = 630 \text{ Kgf}$$

$$W_{R4} = W_{R3} = 630 \text{ Kgf}$$

$$W_{R5} = W_{R3} = 630 \text{ Kgf}$$

I.3.4 Cálculo das Tensões

1- Nível 28,0 m

a) Tensão longitudinal devido ao peso próprio

$$S_1 = W / A$$

$$W = W_a + W_{R1} + \text{Peso do Trocador}$$

$$W = 1543 + 702 + 1500 = 3745 \text{ Kgf}$$

$$A = 0,25 \times \pi \times ((78 + 2 \times 0,794)^2 - 78^2) = 196,5 \text{ cm}^2$$

$$S_1 = 3745 / 196,5 = 19,05 \text{ Kgf/cm}^2$$

b) Tensão Longitudinal Devido ao Momento Fletor

$$S_2 = M.D_e / 2J = 639982 \times (78 + 2 \times 0,794) / 2 \times 152486$$

$$S_2 = 167 \text{ Kgf/cm}^2$$

c) Tensão Longitudinal devido à Pressão Interna

$$S_3 = p.D / 4t = 2,2 \times 78 / 4 \times 0,794 = 54 \text{ Kgf/cm}^2$$

d) Tensão Longitudinal Atuante

$$\text{lado do vento: } -19,05 + 167 + 54 = 202 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$\text{lado oposto : } -19,05 - 167 + 54 = -132 \text{ Kgf/cm}^2$$

e) Tensão Circunferencial

$$S_4 = p.D / 2t = 2,2 \times 78 / 2 \times 0,794 = 108 \text{ Kgf/cm}^2$$

2- Nível 24,0 m

a) Tensão longitudinal devido ao peso próprio

$$S_1 = W / A$$

$$W = 3745 + W_p + W_{R2}$$

$$W = 3745 + 987 + 702 = 5434 \text{ Kgf}$$

$$A = 0,25 \times \pi \times ((78 + 2 \times 1,270)^2 - 78^2) = 316,3 \text{ cm}^2$$

$$S_1 = 5434 / 316,3 = 17,20 \text{ Kgf/cm}^2$$

b) Tensão Longitudinal Devido ao Momento Fletor

$$S_2 = M.D_e / 2J = 1166822 \times (78 + 2 \times 1,270) / 2 \times 248486$$

$$S_2 = 189 \text{ Kgf/cm}^2$$

c) Tensão Longitudinal devido à Pressão Interna

$$S_3 = p.D / 4t = 2,2 \times 78 / 4 \times 1,270 = 33,8 \text{ Kgf/cm}^2$$

d) Tensão Longitudinal Atuante

$$\text{lado do vento: } -17,20 + 189 + 33,8 = 205,6 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$\text{lado oposto : } -17,20 - 189 + 33,8 = -172,4 \text{ Kgf/cm}^2$$

e) Tensão Circunferencial

$$S_4 = p.D / 2t = 2,2 \times 78 / 2 \times 1,270 = 67,6 \text{ Kgf/cm}^2$$

3- Nível 20,0 m

a) Tensão longitudinal devido ao peso próprio

$$S_1 = W / A$$

$$W = 5434 + W_4$$

$$W = 5434 + 1492 = 6926 \text{ Kgf}$$

$$A = 0,25 \times \pi \times ((78 + 2 \times 1,905)^2 - 78^2) = 478,2 \text{ cm}^2$$

$$S_1 = 6926 / 478,2 = 14,50 \text{ Kgf/cm}^2$$

b) Tensão Longitudinal Devido ao Momento Fletor

$$S_2 = M.D_E / 2J = 1850862 \times (78 + 2 \times 1,905) / 2 \times 381877$$

$$S_2 = 198 \text{ Kgf/cm}^2$$

c) Tensão Longitudinal devido à Pressão Interna

$$S_3 = p.D / 4t = 2,2 \times 78 / 4 \times 1,905 = 22,5 \text{ Kgf/cm}^2$$

d) Tensão Longitudinal Atuante

$$\text{lado do vento: } -14,5 + 198 + 22,5 = 206 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$\text{lado oposto : } -14,5 - 198 + 22,5 = -198 \text{ Kgf/cm}^2$$

e) Tensão Circunferencial

$$S_4 = p.D / 2t = 2,2 \times 78 / 2 \times 1,905 = 45 \text{ Kgf/cm}^2$$

4- Nível 15,0 m

a) Tensão longitudinal devido ao peso próprio

$$S_1 = W / A$$

$$W = 6926 + W_{R3} + W_5$$

$$W = 6926 + 2506 + 630 = 10061 \text{ Kgf}$$

$$A = 0,25 \times \pi \times ((78 + 2 \times 2,540)^2 - 78^2) = 642,7 \text{ cm}^2$$

$$S_1 = 10061 / 642,7 = 15,6 \text{ Kgf/cm}^2$$

b) Tensão Longitudinal Devido ao Momento Fletor

$$S_2 = M.D_e / 2J = 2917862 \times (78 + 2 \times 2,540) / 2 \times 521627$$

$$S_2 = 232 \text{ Kgf/cm}^2$$

c) Tensão Longitudinal devido à Pressão Interna

$$S_3 = p.D / 4t = 2,2 \times 78 / 4 \times 2,540 = 16,9 \text{ Kgf/cm}^2$$

d) Tensão Longitudinal Atuante

$$\text{lado do vento: } -15,6 + 232 + 16,9 = 233,3 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$\text{lado oposto : } -15,6 - 232 + 16,9 = -230,7 \text{ Kgf/cm}^2$$

e) Tensão Circunferencial

$$S_4 = p.D / 2t = 2,2 \times 78 / 2 \times 2,540 = 33,8 \text{ Kgf/cm}^2$$

5- Nível 5,00 m

a) Tensão longitudinal devido ao peso próprio

$$S_1 = W / A$$

$$W = 10061 + W_4 + W_3 + W_{R4} + W_{R5}$$

$$W = 10061 + 3054 + 3054 + 2 \times 630 = 17429 \text{ Kgf}$$

$$A = 0,25 \times \pi \times ((78 + 2 \times 3,175)^2 - 78^2) = 809,7 \text{ cm}^2$$

$$S_1 = 17429 / 809,7 = 21,50 \text{ Kgf/cm}^2$$

b) Tensão Longitudinal Devido ao Momento Fletor

$$S_2 = M.D_e / 2J = 5697887 \times (78 + 2 \times 3,175) / 2 \times 667935$$

$$S_2 = 359,8 \text{ Kgf/cm}^2$$

c) Tensão Longitudinal devido à Pressão Interna

$$S_3 = p.D / 4t = 2,2 \times 78 / 4 \times 3,175 = 13,5 \text{ Kgf/cm}^2$$

d) Tensão Longitudinal Atuante

$$\text{lado do vento: } -21,5 + 359,8 + 13,5 = 351,8 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$\text{lado oposto : } -21,5 - 359,8 + 13,5 = -367,8 \text{ Kgf/cm}^2$$

e) Tensão Circunferencial

$$S_4 = p.D / 2t = 2,2 \times 78 / 2 \times 3,175 = 27 \text{ Kgf/cm}^2$$

6- Nível 2,72 m

a) Tensão longitudinal devido ao peso próprio

$$S_1 = W / A$$

$$W = 17429 + W_2$$

$$W = 17429 + 1742 = 19171 \text{ Kgf}$$

$$A = 0,25 \times \pi \times ((78 + 2 \times 3,810)^2 - 78^2) = 979,2 \text{ cm}^2$$

$$S_1 = 19171 / 979,2 = 19,6 \text{ Kgf/cm}^2$$

b) Tensão Longitudinal Devido ao Momento Fletor

$$S_2 = M.D_e / 2J = 6433896 \times (78 + 2 \times 3,810) / 2 \times 821003$$

$$S_2 = 335,6 \text{ Kgf/cm}^2$$

c) Tensão Longitudinal devido à Pressão Interna

$$S_3 = p.D / 4t = 2,2 \times 78 / 4 \times 3,810 = 11,2 \text{ Kgf/cm}^2$$

d) Tensão Longitudinal Atuante

$$\text{lado do vento: } -19,6 + 335,6 + 11,2 = 327,2 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$\text{lado oposto : } -19,6 - 335,6 + 11,2 = -344 \text{ Kgf/cm}^2$$

e) Tensão Circunferencial

$$S_4 = p.D / 2t = 2,2 \times 78 / 2 \times 3,810 = 22,4 \text{ Kgf/cm}^2$$

I.3.5 Análise do Resultados

As tensões máximas atuantes na coluna são:

- À Tração : 351,8 Kgf/cm² (nível 5,00 m)
- À Compressão: 367,8 Kgf/cm² (nível 5,00 m)

Conforme a norma ASME - Secção VIII - divisão 1 a tensão admissível para o aço SA-285C à 210°C é 966 Kgf/cm².

Como em nenhuma secção da coluna as tensões ultrapassam o máximo admissível, as espessuras adotadas são satisfatórias.

OBS.: A fim de se evitar flambagem o seguinte critério é recomendado: (Conforme referência 1)

$$\text{comp. ADM} = 1,5 \times 10^6 (t/r) \leq 1/3 \text{ tensão de escoamento (psi)}$$

Convertendo para Kgf/cm² obtemos:

$$\text{comp. ADM} = 105536 (t/r) \leq 1/3 \text{ tensão de escoamento (Kgf/cm}^2\text{)}$$

A menor espessura na coluna é 0,794 cm.

Assim :

$$105536 (0,794 / 39) = 2148 \text{ Kgf/cm}^2$$

A tensão de escoamento (SA-285-C) = 2235 Kgf/cm² (ASME-seccão VIII)

$$2235 / 3 = 745 \text{ Kgf/cm}^2$$

Assim tomamos o menor dos dois valores

$$\sigma_{\text{comp. ADM}} = 745 \text{ Kgf/cm}^2$$

A máxima tensão de compressão no costado da coluna é igual à 367 Kgf/cm² não ultrapassa portanto a tensão admissível.

II - DIMENSIONAMENTO DA SAIA, CHUMBADORES, ANEL DE APOIO E TAMPOS

II.1 Dimensionamento da Saia

O procedimento para cálculo das tensões na saia é idêntico ao procedimento adotado para o costado da coluna exceto o fato de que a saia não está sujeita à pressão interna. Assim, temos dois fatores:

- 1 - Carga devido ao peso próprio
- 2 - Carga devido aos momentos

a) Tensão longitudinal devido ao peso próprio
(Nível 0,0 m)

$$W = W_{saia} + 19171$$

$$W = 22640 \text{ kgf}$$

$$A = 0,25 \times 3,14 ((174 + 2 \times 3,81)^2 - 174^2) = 2128 \text{ cm}^2$$

$$S_1 = 10,6 \text{ kgf/cm}^2$$

b) Tensão longitudinal devido ao momento

$$S_2 = M/J \cdot d/2 = 7.531.685 / 8.414.973 \times 181,6 / 2 =$$

$$81,27 \text{ kgf/cm}^2$$

c) Tensão longitudinal atuante

lado do vento $-S_1 + S_2 = 70,6 \text{ kgf/cm}^2$

lado oposto $-S_1 - S_2 = 92 \text{ kgf/cm}^2$

As tensões atuantes na saia são baixas portanto a espessura adotada (3,81 cm) é suficiente.

II.2 Dimensionamento dos Chumbadores e Anel de Apoio

A base da saia deve ser apoiada na fundação de concreto através de chumbadores dimensionados para resistir aos momentos induzidos por ventos ou cargas sísmicas.

Para cálculo do anel de apoio e dos chumbadores utilizaremos o modelo a Ref.1.

Sendo : E_c = módulo de elasticidade do concreto

E_s = módulo de elasticidade dos chumbadores

$n = E_s / E_c$

ou $E_s = n \cdot E_c$

mas $E_c = S_c / E_c$ e $E_s = S_s / E_s$

substituindo temos $S_s / E_s = n \cdot S_c / E_c$

Admitindo-se que não haja escorregamento entre os chumbadores e o concreto temos que:

$$E_s = E_c$$

Assim:

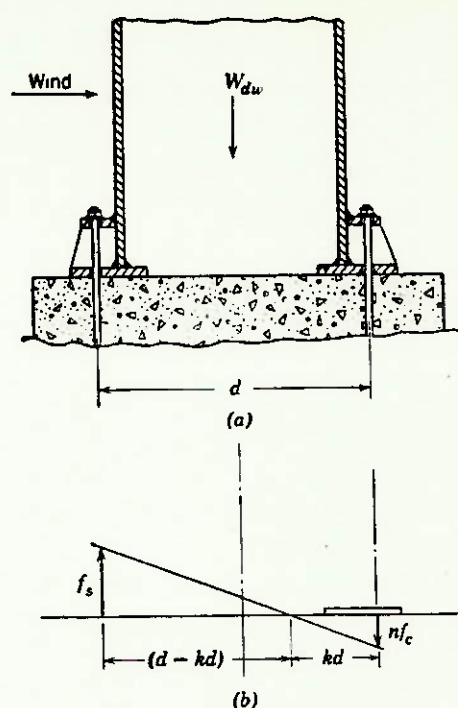
$$S_s \text{ induzida} = n \cdot S_c \text{ induzida}$$

Os esforços devidos ao peso próprio e carga de ventos resultam em tração no lado sob ação do vento e compressão no lado oposto.

Se S_c é a tensão de compressão no concreto podemos deduzir a tensão induzida nos chumbadores através da equação anterior.

Assim, $n \cdot S_c$ é a tensão de compressão induzida dos chumbadores e S_s a tensão no lado tracionado.

A diferença entre a rigidez do concreto e do aço provoca um deslocamento da linha neutra em relação ao eixo de simetria conforme figura abaixo.



Admite-se também que o diâmetro do cálculo de parafusos é igual ao diâmetro médio do anel de apoio.

Por semelhança de triângulos deduz-se que

$$k = 1 / (1 + (S_m / nS_c))$$

onde

S_m = máxima tensão no aço, lado tracionado, no círculo de parafusos.

S_c = máxima compressão no concreto

Taylor, Thompson e Smulsk exprimem a área dos chumbadores em termos de uma casca equivalente de espessura t_1 com a mesma área dos chumbadores conforme esquematizado na figura abaixo:

Da figura anterior tomando-se a somatória dos momentos em relação ao ponto de aplicação de F_c obtemos:

$$M_{vento} - W.z.d - F_t.j.d = 0$$

onde W = peso próprio da coluna

$$z = z(k) \text{ e } j = j(k)$$

$$\text{temos } F_t = (M_{vento} - W.z.d)/j.d$$

$$\text{e ainda } t_1 = (M_{vento} - W.z.d)/S_s.r.C_t.j.d$$

$$\text{Sendo } A_s = 2 \times 3,14 \times r \times t_1 \text{ temos}$$

$$A_s = 2 \times 3,14 ((M_{vento} - W.z.d)/(C_t.S_s.j.d))$$

onde A_s = área total dos chumbadores

Referindo-se ainda à figura anterior, e tomando-se a somatória das forças verticais obtemos:

$$F_t + N - F_c = 0$$

$$t_2 = (W + (C_T.S_s - C_c.S_c.n)r.t_1)/(C_c.S_c.r)$$

A largura do anel de apoio (t_3) será dada por:

$$t_3 = t_1 + t_2$$

II.2.2 Procedimento Prático

A princípio não conhecemos os valores de S_e e S_u .
Admite-se então que S_u é igual à tensão admissível para o
aço e verifica-se a validade da hipótese.

$$E_s = 2,03.10^6 \text{ kgf/cm}^2 \quad (\text{TEMA})$$

$$E_c = 200.000 \text{ kgf/cm}^2 \quad S_c = 150 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{Peso Próprio Coluna Vazia} = 22.640 \text{ kgf}$$

$$\text{Momento devido ao vento} = 7.540.000 \text{ kgf.cm}$$

$$d \text{ (diâmetro do círculo de parafuso)} = 192 \text{ cm}$$

$$n = E_s / E_c = 10$$

$$\begin{aligned} \text{Admitindo : } S_s &= 1000 \text{ Kgf/cm}^2 \\ S_c \text{ (circ. parafusos)} &= 100 \text{ Kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

$$k = 1 / (1 + (1000/10 \times 100)) = 0,5$$

$$C_c = 2,0 \quad C_r = 2,0 \quad z = 0,393 \quad j = 0,786$$

$$A_s = \frac{2 \times 3,14 \times (7540000 - 22640 \times 0,393 \times 192)}{2 \times 1000 \times 0,786 \times 192}$$

$$A_s = 121,4 \text{ cm}^2$$

Adotaremos:

$$16 \text{ parafusos } 1 \frac{1}{2}'' \quad \text{Area de raiz} = 8,348 \text{ cm}^2$$

$$A_{s(\text{NOVA})} = 16 \times 8,343 = 133,57 \text{ cm}^2$$

$$S_{B(NOVO)} = S_{B(ANTIGA)} \cdot A_{B(ANTIGA)} / A_{B(NOVA)} = 910 \text{ Kg/cm}^2$$

$$A_B = 2 \cdot 3,14 \cdot r \cdot t_1$$

$$t_1 = 133,57 \times 2 / 2 \times 3,14 \times 192 = 0,2215 \text{ cm}^2$$

$$t_2 = \frac{22640 + (2 \times 910 - 2 \times 100 \times 10) \times 0,5 \times 192 \times 0,2215}{2 \times 100 \times 0,5 \times 192}$$

$$t_2 = 0,9798 \text{ cm}^2$$

$$t_3 = t_2 + t_1 = 1,2 \text{ cm}$$

O valor obtido para t_3 é menor que o mínimo recomendado.

$$\text{Adotaremos } t_3 = 20 \text{ cm}^2$$

$$F_T = \frac{2540000 - 22640 \times 0,393 \times 192}{0,768 \times 192} = 38600 \text{ Kg}$$

$$S_B = 2 \cdot F_T / t_1 \cdot d \cdot C_T$$

$$S_B = \frac{2 \times 38600}{0,2215 \times 192 \times 2}$$

$$F_C = F_T + W = 38600 + 22640 = 61240 \text{ Kg}$$

$$F_C = (t_2 + nt_1) \cdot r \cdot S_C \cdot C_C$$

$$t_2 = t_3 - t_1 = 20 - 0,2215 = 19,7785 \text{ cm}$$

$$61240 = (19,7785 + 10 \times 0,2215) \times 192 \times S_C$$

$$S_C = 14,5 \text{ Kg/cm}^2$$

Recalculando (2):

$$k = 1 / (1 + 907/145) = 0,14$$

$$C_C = 1,001 \quad C_T = 2,803 \quad z = 0,471 \quad j = 0,770$$

$$F_T = 37150 \text{ Kg}$$

$$S_B = 623 \text{ Kg/cm}^2$$

$$F_C = 22640 + 37150 = 59790 \text{ Kg}$$

$$S_C = 28,3 \text{ Kg/cm}^2$$

Recalculando (3):

$$k = 1 / (1 + 623/28,3) = 0,31$$

$$C_c = 1,536 \quad C_T = 2,420 \quad z = 0,436 \quad j = 0,781$$

$$F_T = 37644 \text{ Kgf}$$

$$S_s = 731 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$F_c = 22640 + 37644 = 60284 \text{ Kgf}$$

$$S_c = 18,6 \text{ Kgf/cm}^2$$

Recalculando (4):

$$k = 1 / (1 + 731/186) = 0,20$$

$$C_c = 1,281 \quad C_T = 2,661 \quad z = 0,459 \quad j = 0,776$$

$$F_T = 37700 \text{ Kgf}$$

$$S_s = 663 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$F_c = 22640 + 37700 = 60340 \text{ Kgf}$$

$$S_c = 23,5 \text{ Kgf/cm}^2$$

Recalculando (5):

$$k = 1 / (1 + 666/235) = 0,26$$

$$C_c = 1,398 \quad C_T = 2,529 \quad z = 0,446 \quad j = 0,779$$

$$F_T = 37450 \text{ Kgf}$$

$$S_s = 696 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$F_c = 22640 + 37450 = 60090 \text{ Kgf}$$

$$S_c = 20,4 \text{ Kgf/cm}^2$$

Recalculando (6):

$$k = 1 / (1 + 696/204) = 0,23$$

$$C_c = 1,309 \quad C_T = 2,595 \quad z = 0,452 \quad j = 0,778$$

$$F_T = 37325 \text{ Kgf}$$

$$S_s = 676 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$F_c = 22640 + 37325 = 59965 \text{ Kgf}$$

$$S_c = 21,7 \text{ Kgf/cm}^2$$

Recalculando (7):

$$k = 1 / (1 + 676/217) = 0,24$$

$$k_2 = k_1 \text{ logo } S_s = 676,4 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$S_c = 21,7 \text{ Kgf/cm}^2$$

A tensão máxima de compressão no concreto ocorre na periferia externa do anel de apoio e é expressa por:

$$S_{c \text{ max}} = S_c \text{ circ paraf } (2.k.d + t_3) / 2.k.d$$

$$S_{c \text{ max}} = 26,4 \text{ Kgf/cm}^2$$

E a máxima tensão de compressão nos parafusos é igual à: $nS_c = 217 \text{ Kgf/cm}^2$

Material dos chumbadores: SA 193 B16

$$S_{adm} = 1250 \text{ Kgf/cm}^2$$

Portanto os resultados obtidos são satisfatórios

Assim, em resumo:

Chumbadores	quantidade	16
	diâmetro	1 1/2"
	diâmetro circ. parafusos =	192 cm
Anel de apoio	largura	20 cm

A espessura do anel de apoio (t_4) é calculada através da expressão:

$$t_4 = l \cdot (3 \cdot S_c / S_{adm})^{1/2}$$

onde l é igual ao raio externo do anel de apoio menos o raio externo da saia.

$$\text{logo: } l = 20 - 1,5 \times 2,54 = 16,2 \text{ cm}$$

$$t_4 = 16,2 \times (3 \times 26,5 / 966)^{1/2}$$

$$\text{adotaremos } t_4 = 2" = 5,08 \text{ cm}$$

II.3 DIMENSIONAMENTO DOS TAMPOS

(Conforme ASME Seção VIII div 1)

Tampo inferior torisférico 10%

Material	SA 285 C
Espessura da chapa	3,81 cm
Eficiência de solda	0,85
Raio interno da coroa	78 cm
Raio interno da parte toroidal	7,8 cm
Tensão admissível	966 Kgf/cm ²

Cálculo do fator M:

$$M = (3 + (78/7,8)^{1/2}) / 4 = 1,54$$

$$P_{ADM} = 2 \times 966 \times 3,81 / (78 \times 1,54 + 0,2 \times 3,81) = 60,9 \text{ Kgf/cm}^2$$

Como a pressão de projeto é de 2,2 Kgf/cm² a espessura adotada é suficiente.

III - CALCULO DAS TENSÕES LOCALIZADAS NA JUNCÃO SAIA-COSTADO

III.1 - Quando a coluna é posta em operação, o costado sofre expansão térmica e se não houver restrições para esta expansão não surgirão tensões térmicas.

Ocorre que a saia não possui temperatura uniforme, o que induz tensões na junção com o costado.

Para o cálculo da tensão induzida na junção saia-costado, utilizaremos o modelo proposto por Harvey, J. F. em Theory and Design of Modern Pressure Vessels.

Para adequarmos o nosso problema ao modelo proposto assumiremos que a saia é cilíndrica.

Outra hipótese é a de que o gradiente de temperatura é linear ao longo do comprimento da saia. A temperatura da saia é igual à do costado na junção, e na base a temperatura da saia é igual à temperatura ambiente.

Para saia e costado de igual espessura o momento fletor por unidade de comprimento de circunferência induzido pelo gradiente térmico é dado por:

$$M_o = k \cdot \beta \cdot r (T_o - T_R) / 4 \cdot b \cdot 3 \quad (\text{na junção saia-costado})$$

onde $k = E \cdot h / r^2$ e $\beta = 1,285 / (r \cdot h)^{1/2}$

r = raio interno do costado/saia

h = espessura do costado/saia

α = coeficiente de expansão térmica

b = comprimento da saia

T_o = temperatura do costado

T_R = temperatura na base da saia

III.2 Resultados:

Adotamos: $E = 1,93 \times 10^6 \text{ Kgf/cm}^2$

$h = 3,81 \text{ cm}$

$r = 39 \text{ cm}$

$\alpha = 12,2 \times 10^{-6} \text{ cm / cm}^\circ\text{C}$

Assim obtemos:

$k = 4834,5 \text{ Kgf/cm}^3$

$\beta = 0,1054 \text{ cm}^{-1/2}$

$M_o = 341 \text{ Kgf.cm/cm}$

A máxima tensão térmica é dada por:

$S_{max} = 6 \cdot M_o / h^2 = 141 \text{ Kgf/cm}^2$

Logo a tensão térmica é baixa e não ocasiona problemas.

IV - FREQUENCIA NATURAL

(Conforme Process Equipment Design - Brownell
and Young)

O cálculo da frequência natural de vibração em colunas tem como objetivo verificar a possível ocorrência de vibrações induzidas por ventos ou por abalos sísmicos.

Neste trabalho não consideraremos o efeito dos abalos sísmicos já que não se verifica sua ocorrência na região onde será instalada a coluna.

O cálculo da frequência natural será feito à partir das teorias de Energia de Deformação e do Movimento Harmônico.

Quando uma coluna vertical vibra, a máxima velocidade e consequentemente a máxima Energia Cinética ocorrem quando o deslocamento em relação à posição de equilíbrio é nulo.

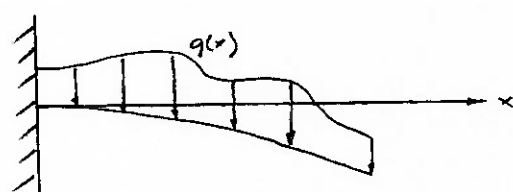
Ao se aproximar do máximo deslocamento, a Energia de Deformação (Potencial) tende ao valor máximo enquanto a Energia Cinética tende a zero.

Admitindo-se que a energia no sistema permaneça constante, concluímos que a máxima Energia Cinética (no deslocamento zero) é igual à máxima Energia de Deformação (no deslocamento máximo).

A solução desta igualdade envolve a avaliação da Energia Cinética conforme a teoria do Movimento Harmônico.

IV.1 - Energia de Deformação

Consideremos o caso geral de uma viga engastada numa das extremidades sujeita à um carregamento distribuído $q=q(x)$ correspondente ao peso por unidade de comprimento da viga.



Da resistência dos Materiais sabemos que a Energia de Deformação para uma viga sujeita à flexão é dada por:

$$U = 1/2 \int_0^l M^2 / E \cdot J \, dx$$

Conhecendo-se a geometria da viga $q=q(x)$ é facilmente determinada e assim obtém-se $M=M(x)$.

IV.2 - Vibração Harmônica

As relações para vibração harmônica simples podem ser deduzidas considerando o movimento de um corpo suspenso por uma mola de constante elástica k .

A força na mola pode ser expressa através da relação

$$F = -k.y \quad (I)$$

onde y corresponde ao deslocamento em relação à posição de equilíbrio.

Pela Lei de Newton:

$$F = m . a = Q/g . d^2y/dt^2 \quad (II)$$

onde Q corresponde ao peso do corpo.

Igualando-se (I) e (II) obtemos:

$$-k.y = Q/g . d^2y/dt^2$$

fazendo $p^2 = k.g/Q$ obtemos

$$d^2y/dt^2 + p^2y = 0 \quad (III)$$

A solução geral para esta equação diferencial é dada por:

$$y = C_1 \cos pt + C_2 \sin pt$$

onde o termo p tem dimensão de velocidade angular.

Considerando-se que para $t = 0$ temos um deslocamento y_0 correspondente ao deslocamento máximo, obtemos então as seguintes condições de contorno:

- 1) $y = y_0$ para $t=0$
- 2) $dy/dt = 0$ para $t=0$

Aplicando-se as condições de contorno, obtemos as equações do movimento:

$$y = y_0 \cos pt$$

$$dy/dt = -py_0 \sin pt$$

IV.3 - Energia Cinética

Para uma coluna de altura h em movimento harmônico, a energia cinética pode ser expressa por:

$$E_c = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i \cdot v_i^2 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} Q_i / g \cdot (dy_i / dt)^2$$

Mas a máxima energia cinética ocorre para $y=0$, ou seja, para $pt = \pi/2$. Logo:

$$dy/dt = -p \cdot y_0 \sin \pi/2 = -p \cdot y_0$$

Assim

$$(dy/dt)^2 = p^2 \cdot y_0^2$$

A velocidade de oscilação varia com a altura, aumentando até um máximo que ocorre no topo.

Fazendo-se o número de incrementos da somatória anterior tender ao infinito obtemos a energia cinética através da integral:

$$E_c = \int_0^h q(x)/2g \cdot (dy/dt)^2 dx$$

ou seja :

$$E_c = p^2/2g \int_0^h q(x) (y_0(x))^2 dx$$

Igualando-se a energia cinética à energia potencial, obtemos p e, através da relação

$$f = p/2.\pi$$

obtemos a frequência do movimento correspondente à 1ª frequência natural da coluna.

IV.4 - Método de Cálculo

A existência de singularidades como massas localizadas e as variações nas dimensões ao longo da coluna tornam os cálculos da Energia Cinética e da Energia de Deformação excessivamente trabalhosos.

Para isso, desenvolvemos um programa em BASIC que efetua os cálculos através de métodos numéricos.

O programa efetua a divisão da coluna em incrementos iguais, num número máximo de 3000. Para cada incremento, é calculado o momento fletor atuante e a deflexão linear através das equações apresentadas no cálculo da deflexão por carga de ventos.

Como dados de entrada no programa temos:

- módulo de elasticidade e densidade do material;
- nº de seções da coluna;
- massas localizadas (posição e peso);
- incremento desejado para o cálculo das integrais.

Calcula-se as integrais pelo método de Simpson, obtendo-se o valor da frequência natural através da relação:

$$p^2 = (2 \cdot \pi \cdot f)^2 = \frac{\frac{1}{2E} \int_0^l (M(x))^2 / J(x) \cdot dx}{\frac{1}{2g} \int_0^l q(x) (y(x))^2 \cdot dx}$$

Em anexo temos uma listagem do programa e o relatório de cálculo para a coluna em projeto.

IV.5 - Resultados Obtidos

Dados de entrada:

nº de seções : 8

Obs.: A saia cônica foi dividida em 2 seções adotando-se o diâmetro médio para cada seção

densidade do material : 7800 kgf/m³

módulo de elasticidade : 1,93 x 10⁶ kgf/cm²

massas localizadas : 7, sendo 5 correspondentes ao recheio da coluna, 1 correspondente ao trocador no topo e 1 correspondente ao tampo torisférico no fundo.

SEÇÕES	diâm. interno	espessura	comprimento(mm)
1	1500 mm	38,1 mm	1360
2	1020 mm	38,1 mm	1360
3	780 mm	38,1 mm	2280
4	780 mm	31,75 mm	10000
5	780 mm	25,40 mm	5000
6	780 mm	19,05 mm	4000
7	780 mm	12,70 mm	4000
8	780 mm	7,94 mm	10070

MASSAS	PESO		POSIÇÃO (em relação a base)	
1	702	kgf	8023,5 mm	(recheio)
2	702	kgf	14153,5 mm	(recheio)
3	630	kgf	20283,5 mm	(recheio)
4	630	kgf	27320,0 mm	(recheio)
5	630	kgf	34110,0 mm	(recheio)
6	15	kgf	38070,0 mm	(trocador)
7	202,4	kgf	2720,0 mm	(tampo inf.)

RESULTADO frequência natural = 0,696 Hz

IV.5 - Avaliação dos Resultados

De posse dos resultados é necessário verificar a possível ocorrência de vibrações induzidas por ventos.

Para esta análise, consideraremos a coluna como sendo um tubo posicionado transversalmente em relação ao escoamento do fluido, o ar, no caso.

No caso de um tubo cilíndrico, liso, estacionário, imerso num fluido em movimento, pode-se dizer que a frequência de formação de vórtices é função do número de Reynolds, para baixos números de Mach.

Segundo Blevins, R. D., em Flow Induced Vibration, para número de Reynolds muito baixos não há deslocamento. A faixa de Re compreendida entre 300 e aproximadamente 3×10^5 é chamada faixa subcrítica, nesta faixa o desprendimento de vórtices é laminar e ocorre com frequências bem definidas.

Na região de transição (de Re 3×10^5 e aproximadamente $3,5 \times 10^6$) os desprendimentos de vórtices são desorganizados e não têm frequência definida (há uma larga faixa de frequências de deslocamento). Para Re acima de $3,5 \times 10^6$ o desprendimento de vórtices é turbulento e volta a ocorrer com frequências bem definidas.

A relação entre a frequência de deslocamento predominante (f_s) e a velocidade de escoamento do fluido é dada pelo nº de Strouhal (S). A relação é a seguinte:

$$f_s = S \cdot V/D$$

onde V é a velocidade de escoamento e D o diâmetro do cilindro.

A relação entre o número de Reynolds e o número de Strouhal é fornecida pelo gráfico da figura IV-a. Na faixa de Reynolds entre 3×10^5 e $3,5 \times 10^6$ o gráfico apresenta linhas pontilhadas, já que se trata da região de transição, onde a frequência de deslocamento não é definida.

É recomendável que a frequência natural da coluna esteja 30% acima ou abaixo da frequência de deslocamento dos vórtices. Ocorre que esta frequência varia com a velocidade de escoamento. Faremos então a verificação das velocidades de vento entre as quais ocorre a transição (ou seja, $3 \times 10^5 < Re < 3,5 \times 10^6$).

Para o ar a 25°C temos:

$$\nu = 1,55 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$D_{\text{coluna}} = 1 \text{ m}$ (incluindo espessura de isolamento)

$$Re = D \cdot V / \nu \quad V = \nu \cdot Re / D$$

$$Re = 3 \times 10^5 \quad \Rightarrow \quad V = 4,65 \text{ m/s} = 16,74 \text{ km/h}$$

$$Re = 3,5 \times 10^6 \quad \Rightarrow \quad V = 54,25 \text{ m/s} = 195,3 \text{ km/h}$$

Temos então que para velocidades de vento entre 16,74 km/h e 195,3 km/h estaremos na faixa de transição não existindo o risco de ressonância.

Velocidades acima de 195,3 km/h não ocorrem na região do projeto, portanto a nossa preocupação se restringe às velocidades abaixo de 16,74 km/h, correspondente a $R_{\bullet} = 10^5$.

Entrando-se com o valor $R_{\bullet} = 3 \times 10^5$ no gráfico, obtemos S aproximadamente 0,2.

$$\text{Como: } f_{\bullet} = S \cdot V/D$$

introduzindo os valores obtemos

$$f_{\bullet} = 0,2 \cdot V/D$$

$$\text{para } v = 4,65 \text{ m/s temos } f_{\bullet} = 0,93 \text{ s}^{-1}.$$

Portanto, na faixa subcrítica teremos frequências de deslocamento de até $0,93 \text{ s}^{-1}$.

Como a frequência natural da coluna é de $0,696 \text{ s}^{-1}$, o risco de ressonância existe tornando-se necessário a adoção de medidas preventivas.

Alterações na espessura do costado não mudam significativamente a frequência natural já que aumentam a rigidez mas aumentam também a inércia da coluna.

A colocação de tirantes ancorados ao solo é inviável por problemas de ordem físicos, já que a coluna se encontra cercada de equipamentos que dificultam a instalação dos tirantes.

A solução mais viável, no caso, é a instalação de helicóides ao longo do costado. A função destes helicóides é impedir a formação dos vórtices eliminando assim o risco de ressonância.

O detalhamento dos helicóides não será feito neste projeto. Um esquema deste helicóides é sugerido por Blevins, R. D. (Figura IV - b).

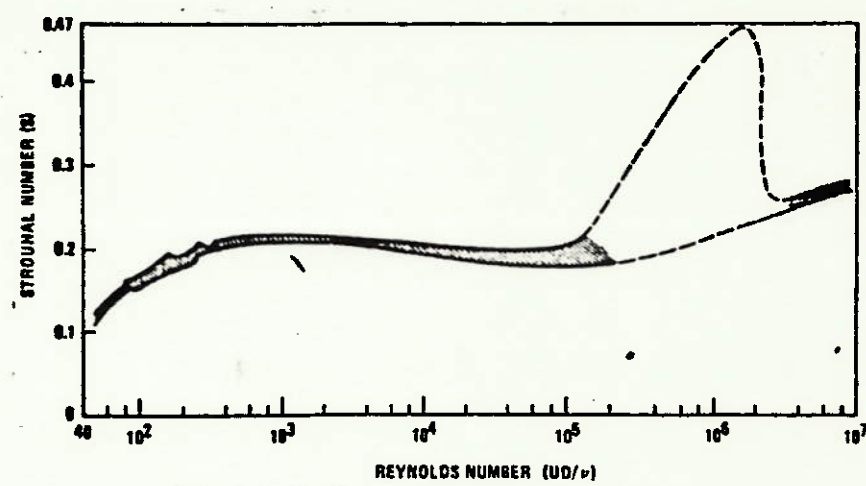


Figura IV-a: Relação entre o nº de Reynolds e o nº de Strouhal (extraído de Flow Induced Vibration - R. D. Blevins)

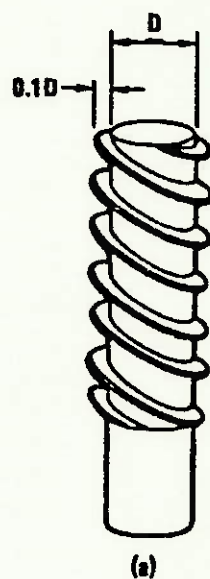


Figura IV - b : Esquema dos helicóides.

V - Bibliografia

1. BROWNELL, L. E . e YOUNG, E. H.
Process Equipment Design - Vessel Design
John Wilwy & Sons, Inc. - 1959
2. HARVEY, J. F.
Theory and Design of Modern Pressure Vessels
Second Edition - Van Nastrand Reinhold Company -
- 1974
3. NBR 6123
Forças Devidas ao Vento em Edificações
ABNT - Nov/1980
4. ANALISE VIBRACIONAL EM PREMUTADORES DE CALOR
Seminário Interno RHODIA S.A.
5. ASME - American Society of Mechanical Engineers
Seção VIII - divisão 1 : Vasos de Pressão
IBP - 1982
6. PADRÃO DE CONSTRUÇÃO RHODIA MO-CO-0-16 (em anexo)
7. BLEVINS, R. D.
Flow Induced Vibration
Van Nostrand Rheinhold Company

		ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA		3310 / 02 / 0074 E		
		DIVISÃO/USINA : DGB/VAP		SÍMBOLO DO PROJETO: ALFAMET		
		LOCAL/UNIDADE: PLA/FENOL		PASE: 0600		
		MEC/11E		DATA 18-03-87 FOLHA 01 DE 06		
DADOS GERAIS						
1 Serviço: RETIFICAÇÃO DO CUMENO				Quantidade: 01		
2 Tipo: RECHEIO						
kg (Cheio d'água:		kg (Cheio de produto:		kg Internos:		
kg (Massas Vazio:						
4 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO:				VASO		
5 Fluido: Líquido CUMENO		56 Aquecim. e/ou Resfriamento				
6 Gds CUMENO		57 Tipo (Ver N) (Inho 53)				
7 Massa específica: 760 (190°C) kg/m³		58 Área		m²		
8 Capacidade de retenção		59 Fluido				
		60 Vazão		kg/h		
10 Temp. de operação 154 190 °C		61 Temp. de operação		°C		
11 Pres. de operação 3,09 1,5 kgf/cm² abs		62 Pressão de operação kgf/cm² abs				
12 Queda de pressão:		63				
13 DADOS DE PROJETO E CONSTRUÇÃO: CÓDIGO: ASME SEC. VIII DIV. 1 OUTRO						
14 Normas aplicáveis: MD-CO-0-01/02/03/07/13/14/15 MD-CO-1-06/07/11/12/14/15/19 MD-CO-0-01 MR-CO-1-07						
15 Instalação. Interna		64 Alimentação localizada:		Esp. vapor Verificador		
16 Auto-portante		65 Nos pratos a:				
17 Ancorado		66				
18 Carga devido o vento: NOTAS		67 Temperatura de projeto		°C 210		
19 Tratamento: Retozimento		68 Pressão de projeto EF		kgf/cm² 2,2		
20 Decap. e Apassiv		69 Pressão de teste EF		kgf/cm² 3,5		
21 Externo Jateam. c/aréo (2)		70 MAWP Limit. por:		kgf/cm²		
22 Revestim.: Interno		71 Eficiência de soldo: Casco/Tampas		0,85		
23 Material:		72 Coefic. de segurança				
24 Isolamento térmico		73 Corrosão admissível		mm		
25 Material: LAMELA NAP		74 NOTA: Pressão de projeto.		Topo Fundo Cheio		
26 Internos: Pratos perfurados		75		Vazio		
27 Calotas		76 Condições de teste:		Vertical Horizontal		
28 Quantidade de pratos:		77 Inspeção:		Radiografia: PARCIAL		
29 Acessórios: Plafat. dim.: FL 05 DE 06		78		Outro: LIB. PENET.		
30 Norma:		79				
31 Escado: Marinheiro		80 Mont. dos pratos/enchimento:		Boca de visita Desmontagem seção		
32 Norma:		81				
33 Suportes de tubos:		82 PROTEÇÃO CONTRA-FOGO		X A		
34 Norma:		83				
35 DESCRIÇÃO		QT.	ESP.	MATERIAL	NORMA	OBS.
36 Seções		1	(G) t	A-285-C		
37 Diâmetro mm 780 780 780 780 780 780						
38 Altura mm 238 5 5 5 4 4 205						
39 Tempo superior						
40 Tempo inferior TORISFÉRICO 10%		1	1/2"	A-285-C		
41 Prato Enchimento X						
42 Sustentação						Detalh. Sold. Purif.
43 Aquecimento, Outro						
44 Demister						
45 Flange todo casco				A-105/A-285-C		
46 Colete						
47 Guarnições conexões						
48 Estajo/Parcas internas				A-193-B7/A-1942H		
49 Estajo/Parcas externas				A-193-B7/A-1942H		
50 Suportes (tipo): SAIA		1	1/2"	A-285-C		
51 Porofuso chumbador				ACO CARB.		Incluído no fornecimento
52 Agitador						
53 OBSERVAÇÕES: (x) Serpentina, Camiso, Treca, etc.						
54 (2) 1/2" x 1/2" x 1/4" x 1/4" x 1" x 3/4" x 1/2" x 5/16"						
(2) ITENS SA 21/2 & 1 DEMONSTRAR CARROLINE 1248 DE 40 M.						
REVISÃO		EXAT. ÁREA		COLUNA		
ITEM		PCD		ITEM: E-E-602A		



ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA

3330 /02/0074 | E

DIVISÃO/UBINA : DOD IURP

LOCAL/UNIDADE : PLA/FANOL

SERIE DO PROJETO : ALFAMET

PAGE : 0600

MEC/11E

DATA : 16-03-87

FOLHA 02 de 06

1 DADOS E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO: Quantidade de pratos:				
		TOPO	FUNDO	
2	Dados para os pratos Nº			
3	Tipo de prato			
4	Tipo de flange			
5	Diâmetro dos pratos mm			
6	Distância entre pratos mm			
7	Diâmetro da coluna mm			
8	Tipo de vertedor			
9	Ponto de carga			
10	Perda de carga admissível (NOTA 1) mm	80	80	m.c.a. / m DE RECHEIO
11	Faixa de operação % máxima			
12	% mínima			
13	Fator do sistema			
14	Área do vertedor m²			
15	Secção ativa m²			
16	Altura estática de líquido mm			
17	CARGA VAPOR			
18	Massa molar g/moles			
19	Temperatura °C	154	190	
20	Pressão kgf/cm²	1,09	1,5	
21	Vazão mássica kg/h	6417	6434	
22	Vazão em volume m³/h	2139	804	
23	Massa específica kg/m³	3	8	
24	Fator de compressibilidade			
25	CARGA LÍQUIDO			
26	Vazão mássica kg/h	4807	6417	
27	Massa molar g/moles			
28	Temperatura °C	154	190	
29	Pressão kgf/cm²	1,09	1,5	
30	Viscosidade cP	0,20	0,17	
31	Fator de compressibilidade			
32	Fator de espuma			
33	Densidade relativa			
34	Massa específica kg/m³			
35	Tensão superficial kgf/cm²			
36	DADOS DE PROJETO E CONSTRUÇÃO:			
37	Pratos: Ø mm	Material:		
38	Tipo: Um posse	☐ Dois posses		
39	Circulação convergente	☐ Circ. em cascata ☐ Internos ☐ Soldados ☐ Desmontáveis		
40	Secção mínima do vertedor:	Superior: m² Inferior: m²		
41	Colatos: Quantidade:	Dimensão: mm x mm		
42	Fendas: Quantidade:	Dimensão: mm x mm		
43	Chamine: Ø mm	Altura: mm		
44	Válvulas: Quantidade:	Tipo: Material:		
45	Furos: Quantidade:	Diâmetro: mm		
46	Recheio: Tipo: IMTP 40	Dimensão: Material: A.C.		
47	Volume: 15,6 m³	Nº telas: 5		
48	Distribuidor: FOLHA 04			
49	Vertedor: Entrada:	Saída: Material:		
50	Tirantes: Quantidade:	Diâmetro: mm		
51	Corrosão admissível: mm			
52	Guarnição: Espessura: mm	Material:		
53	Parafusos:	Material:		
54	Anel de suporte:	Material:		
55				

NOTA (1) VALOR GARANTIDO PELO FORNECEDOR = 47,5 mm c.a. / m DE RECHEIO

A	B	C	D	E	F	G	H	I

INTERNOS DE COLUNAS

ITEM - E-602A



COMPANHIA SANEAMENTO DE SÃO PAULO

ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA

DIVISÃO/UNHA : DQB/UQP FOLHA DO PROJETO: ALFAMEY

LOCAL/UNIDADE: PLA/FEND PARE: 0600

3310/02/0074 E

MEC / 41E

DATA: 24.03.81 FOLHA 03 DE 06

1 REFERVEDOR: B-C-604A	35 Dimensões Ø _{ext} : mm	50 CONDENSADOR: B-C-605A/C-606A	61 Dimensões Ø _{ext} : mm
2 CASCO	36 Suporte:	62 Massa máxima:	63 Isol. térmico esp.:
3 Material	37 Massa máxima:	64	65
4 Temp operação °C	38 Isol. térmico esp.:		
5 Temp projeto °C	39		

NOTAS

3-AÇÃO DE VENTO: NBR-6123/1980
 $V_0 = 45 \text{ m/s}$
 $S_1 = 1.0$; $S_2 = f(2, B)$; $S_3 = 1.0$
COEFICIENTE DE ARRASTO ($C_a = 0,6$)
FATOR DE MAJORAÇÃO DA ÁREA PROJETADA 1,5

4-O FABRICANTE DEVERÁ EXECUTAR A ANÁLISE DE VIBRAÇÕES DA COLUMA

5-O FABRICANTE DEVERÁ CALCULAR A ESPESSURA DOS PESCOÇOS E FLANGES DAS BOCAS DE VISITA

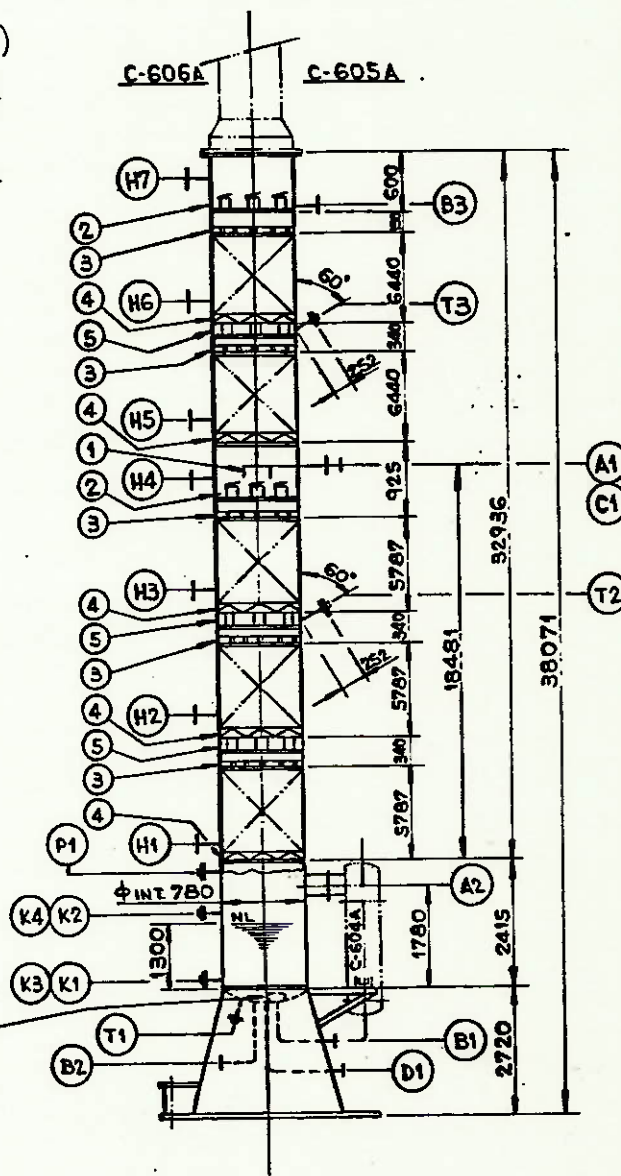
6-O FABRICANTE DEVERÁ EXECUTAR AS SOLDAS CONFORME ASME VIII DIV I UCS-56.

ITEM	DN	SERVIÇO	SECT.	PROJ.	MATERIAL	NORMAS	TIPO	CLASSE	NORMA	MATERIAL	FACE	ACAB.
1	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
2	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
3	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
4	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
5	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
6	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
7	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
8	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
9	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
10	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
11	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
12	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
13	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
14	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
15	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
16	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
17	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
18	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
19	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
20	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
21	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
22	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
23	40	TEMPERAT. 2" FLANGE 1/2" LUNA 1/2" NPT	40		A-106B		50	150#	ANSI B16.5	A-105	RF	
24	40	TEMPERAT.										

INTERNOS: (AÇOPLAST)

- ① ALIMENTADOR MOD. 644
PARA ALIMENTAÇÃO
- ② DISTRIBUIDOR/REDISTRIB.
DE LÍQUIDO MOD. 1007
- ③ LIMITADOR DE LEITO
MOD. 824
- ④ SUORTE MOD. 818
- ⑤ REDISTRIBUIDOR DE
LÍQUIDO MOD. 950

QUEBRA VÓRTICE
MO-CO-0-13
TIPO I



REVISOR	A	10.5.56	G	.	
B	10.01.57	57	H	ENG LORA.	
C	11.12.56	57	I	ENG PCB.	

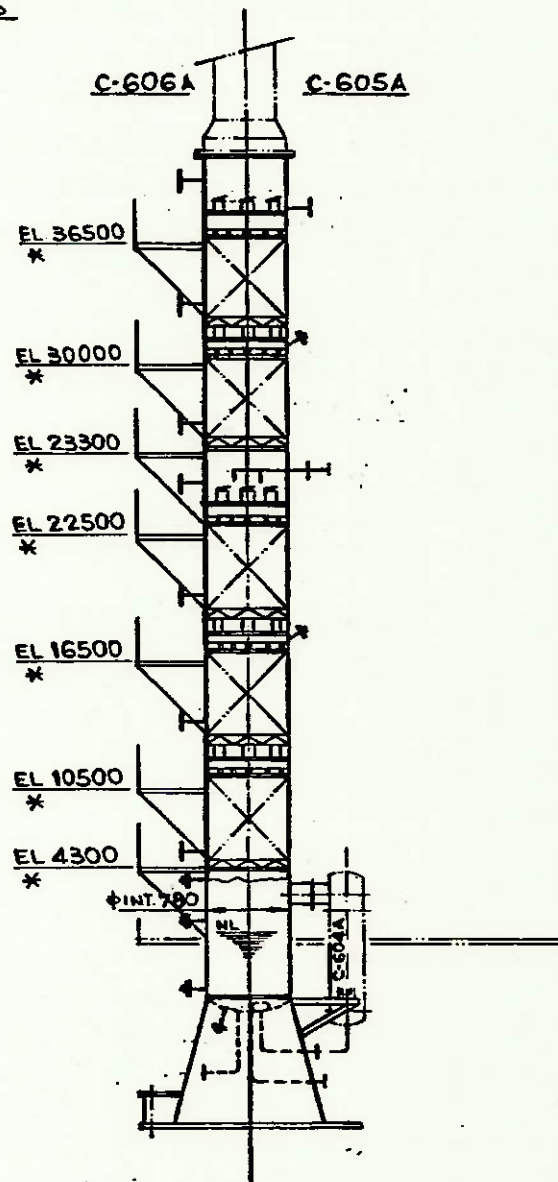
ITEM E-602 A



LOTEAMENTO: DQB/UDP
SOLA DO PROJETO: ALTAMET
LOCAL/UNIDADE: PLA/FENDOL
PARTE: 0600

MLC/11E
DATA: 24-01-81
FOLHA 05 DE 06

* A SEREM CONFIRMADAS



REVISÃO	A	D	10.8.80	E		ITEM E-602 A
	B	F	11.12.80	H		
	C	F		I		

[illegible]

PROGRAMA : CALCULO DE FREQUENCIA NATURAL - (*****.BAS)

DATA: 16/12/88

AS: SIGLA:PMC-581

ITEM: COLUNA DISCRIMINACAO:

USUARIO: CARLOS

***** DADOS FORNECIDOS *****

S (numero de seccoes).....= 8
 C (numero de massas concentradas).....= 7
 GAMA (peso especifico do material).....(Kgf/m3)....= 7800
 INCR (incremento).....= 13

----- SECCOES -----

j	Lj (mm)	DIj (mm)	Tj (mm)	Ej (Kgf/cm2)
1	1360	1500	38.1	1930000
2	1360	1020	38.1	1930000
3	2280	780	38.1	1930000
4	10000	780	31.75	1930000
5	5000	780	25.4	1930000
6	4000	780	19.05	1930000
7	4000	780	12.7	1930000
8	10070	780	7.940001	1930000

----- MASSAS CONCENTRADAS -----

j	PCj (Kgf)	ZMj (mm)
1	702	8023.5
2	702	14153.5
3	630	20285.5
4	630	27320
5	630	34110
6	1560	38070
7	202.4	2720

***** RESULTADOS *****

----- SECCOES -----

j	Jj (cm4)	Pj (Kgf)
1	5447594	1952.956
2	1774712	1343.492
3	821003.6	1741.449
4	667935.2	6315.539
5	521627.3	2506.455
6	381876.7	1492.014
7	248486	986.7732
8	152546.9	1543.786

PT (peso total).....(Kgf)....= 23568.87
 T (primeiro periodo natural).....(s/ciclo)....= 1.435381
 fn (primeira frequencia natural).....(Hz)....= .6966793

```

10 KEY OFF
20 REM -PROGRAMA PARA CALCULO DE FREQUENCIA NATURAL-
30 DIM DI(50),DE(50),L(50),T(50),A(50),J(50),Z(50),P(50),MC(50),E(50),ZM(50),N(5
0),Q(3000),HV(3000),M(3000),JN(3000)
31 BRANCO$=STRING$(75," ")
32 CLS:LOCATE 4,17:PRINT "PROGRAMA PARA CALCULO DE FREQUENCIA NATURAL"
33 LOCATE 9,11:PRINT "DATA: ";:INPUT DT$
34 LOCATE 11,11:PRINT "AUTORIZACAO DE SERVICO: ";:INPUT AS$
35 LOCATE 11,50:PRINT "SIGLA: ";:INPUT SIG$
36 LOCATE 13,11:PRINT "ITEM: ";:INPUT ITEM$
37 LOCATE 13,45:PRINT "DISCRIMINACAO: ";:INPUT DISC$
38 LOCATE 15,11:PRINT "USUARIO: ";:INPUT USUAR$
39 LOCATE 22,2:PRINT "Os dados estao corretos";:INPUT R$
40 IF R$="s" OR R$="S" THEN 320
41 IF R$="n" OR R$="N" THEN 32
42 LOCATE 22,2:PRINT BRANCO$: PRINT CHR$(7):GOTO 39
320 REM ----- ENTRADA DE DADOS -----
325 CLS
326 LOCATE 3,27:PRINT "-----ENTRADA DE DADOS-----"
330 LOCATE 8,10:PRINT "S (NUMERO DE SECCOES).....=";:INPUT S
335 LOCATE 10,10:PRINT "C (NUMERO DE MASSAS CONCENTRADAS).....=";:INPUT C
340 LOCATE 12,10:PRINT "GAMA (DENSIDADE DO MATERIAL).....(Kg/m3)....=";:INPUT GAMA
351 LOCATE 22,2:PRINT "Os dados estao corretos";:INPUT R$
352 IF R$="s" OR R$="S" THEN 360
353 IF R$="n" OR R$="N" THEN 325
354 LOCATE 22,2:PRINT BRANCO$: PRINT CHR$(7):GOTO 351
360 Z(0)=0
370 FOR I=1 TO S
380 CLS:LOCATE 7,1:PRINT:PRINT" DI(";I;") (DIAMETRO INTERNO DA SECCAO";I;").....
.....(mm)....=";:INPUT DI(I):DI(I)=DI(I)/10
390 PRINT:PRINT" L(";I;") (COMPRIMENTO DA SECCAO";I;").....(mm)....="
;:INPUT L(I):L(I)=L(I)/10
395 PRINT:PRINT" T(";I;") (ESPESSURA DA SECCAO";I;").....(mm)....="
;:INPUT T(I):T(I)=T(I)/10
400 PRINT:PRINT" E(";I;") (MODULO DE ELASTICIDADE DA SECCAO";I;").(Kg/cm2)....="
;:INPUT E(I)
401 LOCATE 22,2:PRINT "Os dados estao corretos";:INPUT R$
402 IF R$="s" OR R$="S" THEN 410
403 IF R$="n" OR R$="N" THEN 380
404 LOCATE 22,2:PRINT BRANCO$: PRINT CHR$(7):GOTO 401
410 DE(I)=DI(I)+2*T(I)
420 Z(I)=Z(I-1)+L(I)
430 A(I)=3.141592654*(DE(I)^2-DI(I)^2)/40000
440 J(I)=3.141592654*(DE(I)^4-DI(I)^4)/64
450 P(I)=A(I)*GAMA/100
455 PT=PT+P(I)*L(I)
460 NEXT I
470 L=Z(S)
500 FOR I=1 TO C
505 CLS:LOCATE 1,28:PRINT "---MASSAS CONCENTRADAS---"
510 LOCATE 7,1:PRINT " PC(";I;") (PESO DA MASSA CONCENTRADA";I;").....(Kg
f)....=";:INPUT MC(I)
520 PRINT:PRINT" ZM(";I;") (ELEVACAO DA MASSA";I;"EM RELACAO A BASE)....(mm)....
=";:INPUT ZM(I):ZM(I)=ZM(I)/10
524 PT=PT+MC(I)
525 LOCATE 22,2:PRINT "Os dados estao corretos";:INPUT R$
526 IF R$="s" OR R$="S" THEN 530
527 IF R$="n" OR R$="N" THEN 510
528 LOCATE 22,2:PRINT BRANCO$: PRINT CHR$(7):GOTO 525
530 NEXT I

```

```

535 CLS:LOCATE 7,17:PRINT"INCREMENTO.....(mm)...=";:INPUT INCR:INCR=
INCR/10
536 IF INCR>L/2999 THEN GOTO 548
537 PRINT CHR$(7):LOCATE 10,17:PRINT "O Incremento e menor que o minimo admissiv
e1"
538 LOCATE 11,17:PRINT "INCREMENTO MINIMO.....(mm)...=";:L*10/2999
539 LOCATE 13,17:PRINT "Entre com novo incremento"
540 LOCATE 15,17:PRINT "NOVO INCREMENTO.....(mm)...=";:INPUT INCR:INCR=
INCR/10
541 CLS:GOTO 536
548 CLS:LOCATE 11,30:PRINT "PROCESSANDO AGUARDE..."
549 REM ----- CARGAS DISTRIBUIDAS
550 N=L/INCR: N=INT(N)
560 Q(0)=P(1):JN(0)=J(1)
570 A=1
580 FOR H=1 TO N
590 IF H*INCR<=Z(A) THEN GOTO 610
600 A=A+1:GOTO 590
610 Q(H)=P(A):JN(H)=J(A)
620 NEXT H
630 Q(N+1)=P(S):JN(N+1)=J(S)
640 REM ----- FORCA CORTANTE
650 HV(N+1)=0:HV(N)=(Q(N+1)+Q(N))*(L-N*INCR)/2
660 FOR I=N-1 TO 0 STEP -1
670 HV(I)=(Q(I+1)+Q(I))*INCR/2+HV(I+1)
680 NEXT I
690 FOR X=1 TO C
700 NC=ZM(X)/INCR:NC=INT(NC)
710 FOR I=NC TO 0 STEP -1
720 HV(I)=HV(I)+MC(X)
730 NEXT I
740 NEXT X
750 REM ----- MOMENTOS
760 M(N+1)=0 : M(N)=.5*((Q(N+1)+Q(N))/2)*(L-N*INCR)^2
770 FOR I=N-1 TO 0 STEP -1
780 M(I)=.5*((Q(I+1)+Q(I))/2)*INCR^2+HV(I+1)*INCR+M(I+1)
790 NEXT I
800 REM ----- ENERGIA POTENCIAL
809 A=1
810 FOR I=1 TO N
811 IF I*INCR<=Z(A) THEN 813
812 A=A+1:GOTO 811
813 E=E(A)
820 U=U+((M(I)+M(I-1))/2)^2*INCR/((JN(I)+JN(I-1))*E/2)
830 NEXT I
835 E=E(S)
840 U=U+((M(N)+M(N+1))/2)^2*(L-N*INCR)/((JN(N)+JN(N+1))*E/2)
850 U=U/2
860 REM ----- FLECHA (Q) E ROTACAO (HV)
870 HV(0)=0:Q(0)=0:A=1
880 FOR I=1 TO N
885 IF I*INCR<=Z(A) THEN 887
886 A=A+1:GOTO 885
887 E=E(A)
890 Q(I)=INCR^2*(3*(M(I)+M(I-1))+HV(I)*INCR)/(12*E*JN(I))
900 HV(I)=INCR*(2*M(I)+M(I-1)+HV(I)*INCR/2)/(3*E*JN(I))
910 NEXT I
915 E=E(S)
920 Q(N+1)=(L-N*INCR)^2*(3*(M(I+1)+M(N))+HV(N+1)*(L-N*INCR))/(12*E*JN(I))
930 HV(N+1)=(L-N*INCR)*(2*M(N+1)+M(N)+HV(N+1)*(L-N*INCR)/2)/(3*E*JN(I))
940 FOR I=1 TO N
950 HV(I)=HV(I-1)+HV(I)
960 Q(I)=Q(I-1)+INCR*HV(I-1)+Q(I)
970 NEXT I
980 HV(N+1)=HV(N)+HV(N+1)
990 Q(N+1)=Q(N)+(L-N*INCR)*HV(N)+Q(N+1)

```

```

1020 REM ----- ENERGIA CINETICA
1030 FOR I=0 TO N+1
1040 JN(I)=Q(I)
1050 NEXT I
1060 Q(0)=P(1):Q(N+1)=P(S)
1070 A=1
1080 FOR H=1 TO N
1090 IF H*INCR<=Z(A) THEN GOTO 1110
1100 A=A+1:GOTO 1090
1110 Q(H)=P(A)
1120 NEXT H
1130 FOR I=1 TO N
1140 EC=EC+((Q(I)+Q(I-1))/2)*((JN(I)+JN(I-1))/2)^2*INCR
1150 NEXT I
1160 EC=EC+((Q(N)+Q(N+1))/2)*((JN(N)+JN(N+1))/2)^2*(L-N*INCR)
1170 EC=EC/(2*981)
1180 FOR I=1 TO C
1190 NC=ZM(I)/INCR:NC=INT(NC)
1200 EC=EC+.5*(NC(I)*JN(NC)^2)/981
1210 NEXT I
1220 P=(U/EC)^.5
1230 T=2*3.141592654#P
1240 CLS:LOCATE 4,12:PRINT " ***** RESULTADOS *****"
1250 LOCATE 8,6:PRINT "T (primeiro periodo natural).....(s/ciclo)..
..=";T
1260 LOCATE 10,6:PRINT "fn (primeira frequencia natural).....(Hz).
..=";1/T
1290 LOCATE 21,10:PRINT "DESEJA IMPRIMIR OS RESULTADOS? (TECLE S OU N)";:INPUT
R$
1400 IF R$="S" OR R$="s" THEN 2000
1410 IF R$="N" OR R$="n" THEN 2495
1420 LOCATE 21,2:PRINT BRNCD$:PRINT CHR$(7):GOTO 1390
2000 REM ----- SUBROTINA-IMPRESSAO -----
2010 LPRINT " RHODIA S.A. - GERENCIA GERAL DE ENGENHARIA - G.G.E.G."
2020 LPRINT
2030 LPRINT " PROGRAMA : CALCULO DE FREQUENCIA NATURAL - (*****.BAS)"
2040 LPRINT
2050 LPRINT "DATA: ";DTA$
2060 LPRINT "AS: ";AS$; " SIGLA: ";SIG$
2070 LPRINT "ITEM: ";ITEM$; " DISCRIMINACAO: ";DISC$
2080 LPRINT "USUARIO: ";USUAR$
2090 LPRINT
2105 LPRINT " ***** DADOS FORNECIDOS *****":GOTO 2110
2110 LPRINT
2130 LPRINT "S (numero de seccoes).....=";S
2140 LPRINT "C (numero de massas concentradas).....=";C
2150 LPRINT "GAMA (peso especifico do material).....(Kg/m3)..."GAMA
2155 LPRINT "INCR (incremento).....=";INCR*10
2160 LPRINT
2170 LPRINT " ----- SECCOES ----- "
2180 LPRINT TAB(6) "j" TAB(20) "Lj(mm)" TAB(30) "Dij(mm)" TAB(40) "Tj(mm)" TAB(5
0) "Ej(Kgf/cm2)"
2190 FOR X=1 TO S
2200 LPRINT TAB(5) X TAB(20) L(X)*10 TAB(30) DI(X)*10 TAB(40) T(X)*10 TAB(50) E(
X)
2210 NEXT X
2215 IF C=0 THEN GOTO 2280

```

```

2220 LPRINT:LPRINT
2230 LPRINT " ----- MASSAS CONCENTRADAS ----- "
2240 LPRINT TAB(6) "J" TAB(20) "PCj (Kgf)" TAB(41) "ZMj (mm)"
2250 FOR X=1 TO C
2260 LPRINT TAB(5) X TAB(20) MC(X) TAB(40) ZM(X)*10
2270 NEXT X
2280 LPRINT:LPRINT
2300 LPRINT " ***** RESULTADOS *****" :LPRINT
2310 LPRINT " ----- SECCOES ----- "
2320 LPRINT TAB(6) "J" TAB(21) "Jj (cm4)" TAB(41) "Pj (Kgf)"
2330 FOR X=1 TO S
2340 LPRINT TAB(5) X TAB(20) J(X) TAB(40) P(X)*L(X)
2350 NEXT X
2360 LPRINT
2370 LPRINT "PT (peso total).....(Kgf)....=";PT
2380 LPRINT "T (primeiro periodo natural).....(s/ciclo)....=";T
2390 LPRINT "fn (primeira frequencia natural).....(Hz)....=";1/T

```

	EQUIPAMENTO - PADRÃO DE CONSTRUÇÃO			
	CARREGAMENTOS		MO - CO - 0 - 16	
	PROJETO MECÂNICO		DATA ABO/85	FOLHA 1 DE 5

1. DEFINIÇÃO DOS CARREGAMENTOS

No projeto de equipamentos de processo devem ser consideradas as tensões produzidas pelos carregamentos e/ou combinações dos mesmos quando agem simultaneamente.

1.1 Pressão de projeto interna e/ou externa.

1.2 Cargas de impacto, inclusive provenientes de flutuações rápidas da pressão.

1.3 Peso próprio do vaso, inclusive o conteúdo do mesmo nas condições normais de operação ou teste. Deve ser incluída também, a pressão adicional devido à altura estática da coluna líquida, quando for o caso.

1.4 Cargas adicionais sobrepostas, tais como as provenientes do peso próprio de outros equipamentos, isolamento térmico, revestimento resistentes à corrosão, erosão e fogo, tubulações, escadas, etc.

1.5 Cargas provenientes da ação de ventos (ver parágrafo 2).

1.6 Ações de orelhas de içamento, suporte, sapatas, berços e outros tipos de sustentação do vaso e/ou seus acessórios.

1.7 O efeito dos gradientes de temperatura nas tensões máximas.

1.8 Cargas devido a operações de montagem e manutenção.

2. VENTOS

2.1 Objetivo

As indicações apresentadas neste parágrafo permitem o cálculo das cargas provenientes da pressão de velocidade resultante da ação direta de ventos sobre equipamentos e estruturas.

REVISÃO	A	JAN/80	D		G		AB/ms	PADRÕES DE ENGENHARIA
	B		E		H			
	C		F		I			

	EQUIPAMENTO - PADRÃO DE CONSTRUÇÃO				
	CARREGAMENTOS			MO - CO - O - 16	
	PROJETO MECÂNICO			DATA ABO/85	FOLHA 2 DE 5

2.2 Critérios de Projeto

.1 O equipamento ou estrutura deve ser projetado para resistir à pressão horizontal do vento atuante em qualquer direção.

.2 O máximo deslocamento horizontal de um ponto situado no topo do equipamento, quando este é submetido à ação de vento, deve satisfazer a relação $\delta \leq \frac{L}{200}$.

.3 A altura do equipamento ou estrutura deve ser medida em relação ao nível real do solo adjacente.

.4 Deve ser desconsiderada qualquer redução na pressão de projeto por efeito de anteparo exercido por equipamentos, estruturas, edifícios ou singularidades topográficas do terreno próximas.

.5 Efeitos oriundos de oscilações aerodinâmicas provocadas por ações de ventos, deverão ser analisadas segundo BS-5500 e outras fontes se necessário.

.6 O projeto feito segundo as indicações deste parágrafo não prevê a ocorrência de furacões e turbulência ou canalização exercidas na passagem do ar que venham a resultar em condições mais severas.

2.3 Pressões de Vento

.1 Os valores mínimos das pressões de vento para o cálculo das cargas sobre equipamentos são embasados na norma NBR 6123, e os esforços resultantes devem ser avaliados conforme parágrafo 2.3.2.

.2 Avaliação dos esforços

.1 $V_k = V_0 S_1 S_2 S_3$

REVISÃO	A	D	G	AB/ms	PADRÕES DE ENGENHARIA
	B	E	H		
	C	F	I		

DOCUMENTO ORIGINAL: SENTENÇA: ORIGINAL DE ENGENHARIA

	EQUIPAMENTO - PADRÃO DE CONSTRUÇÃO				
	CARREGAMENTOS PROJETO MECÂNICO			MO - CO - O - 16	
				DATA ABO/85	FOLHA 3 DE 5
.2 $q = \frac{1}{16} \cdot V_k^2$.3 $F_a = C_a \cdot q \cdot A_e$.4 Nomenclatura e Unidades A_e = área da projeção ortogonal do equipamento num plano normal à direção do vento (m²). A_{pi} = projeção do contorno do i-ésimo elemento do equipamento incluindo isolamento térmico, em um plano vertical que contenha o seu eixo longitudinal (m²). C_a = coeficiente de arrasto (NBR 6123, parágrafo 6.3; adimensional) D_e = diâmetro externo incluindo isolamento (m). D_o = diâmetro externo do equipamento (m). F_a = força de arrasto (daN) K_{di} = coeficiente de correção do i-ésimo elemento (adimensional) L = altura do equipamento (m). q = pressão dinâmica do vento (daN/m²) Corresponde à velocidade característica V_k, nas seguintes condições: - pressão : 1 ata - temperatura : 15°C S_1 = fator topográfico (NBR 6123, parágrafo 5.2; adimensional) S_2 = fator localização (NBR 6123, parágrafo 5.3, adimensional) S_3 = fator estatístico (NBR 6123, parágrafo 5.4; adimensional) t = espessura do isolamento (m) V_o = velocidade básica do vento (NBR 6123, parágrafo 5.1; m/s)					
REVISÃO	A	D	G	AB/ms	
	B	E	H		
	C	F	I		
				PADRÕES DE ENGENHARIA	



EQUIPAMENTO - PADRÃO DE CONSTRUÇÃO

CARREGAMENTOS
PROJETO MECÂNICO

MO - CO - O - 86

DATA
AGO/86 FOLHA 4 DE 5 V_k = velocidade característica do vento (m/s) δ = deslocamento (m) ρ = densidade do ar nas condições

. pressão : 1 ata

. temperatura : 15°C

 $\approx 1,22 \text{ kg/m}^3$ Obs.: 1 daN = 10N $\approx$ 1 kgf2.3.3 Avaliação de A_e

Para equipamento provido de acessórios externos tais como tubulações, bocais, escadas, plataformas, isolamento térmico, proteção contra fogo, estruturas especiais, a área projetada é definida pela máxima projeção dos contornos em um plano vertical que contenha o seu eixo longitudinal.

Tendo em vista que na fase de projeto do equipamento muitos parâmetros são desconhecidos, o seguinte critério é recomendado:

$$A_e = \sum A_{pi} K_{di}$$

$$D_e = D_e + 2t$$

D_e	K_d
$< 0,9$	1,50
$0,90 \leq D_e < 1,50$	1,40
$1,50 \leq D_e < 2,15$	1,30
$2,15 \leq D_e < 2,75$	1,20
$2,75 \leq D_e$	1,18

REVISÃO

A
B
CD
E
FG
H
I

AB/ms

PADRÕES DE ENGENHARIA

PADRÕES DE ENGENHARIA