

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE  
TREMONTAS PIRAMIDIAIS PARA SILOS  
METÁLICOS ELEVADOS**

**ERNANI CARLOS DE ARAÚJO**

**Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas.**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlito Calil Júnior**

**São Carlos, 1997**

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

A663e      Araújo, Ernani Carlos de  
            Estudo teórico e experimental de tremonhas  
            piramidais para silos metálicos elevados / Ernani  
            Carlos de Araújo. -- São Carlos, 1997.

            Tese (Doutorado). -- Escola de Engenharia  
            de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997.

            Área: Engenharia de Estruturas


            Orientador: Prof. Dr. Carlito Calil Júnior

1. Silos. 2. Aço. 3. Enrijecedores.
4. Tremonhas. I. Título

## FOLHA DE APROVAÇÃO

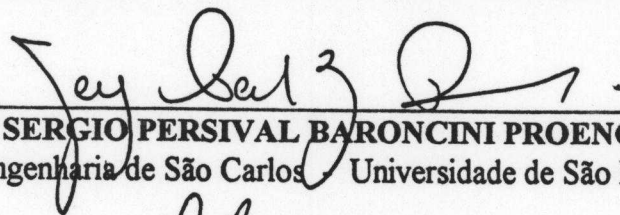
Candidato: Engenheiro **ERNANI CARLOS DE ARAÚJO**

Tese defendida e aprovada em 03-10-1997  
pela Comissão Julgadora:



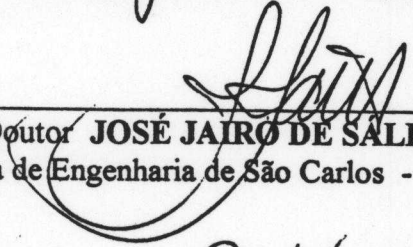
---

Prof. Titular **CARLITO CALIL JUNIOR (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Doutor **SERGIO PERSIVAL BARONCINI PROENÇA**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Doutor **JOSÉ JAIRO DE SALES**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

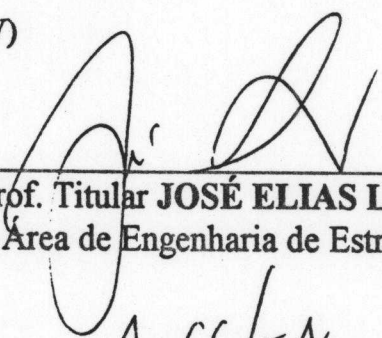


---

Engenheiro **ARI ANTONIO NEGRISONI**  
(ENGESILOS - Consultoria e Projetos de Engenharia S/C Ltda.)

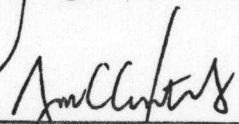
---

Prof. Titular **TETUO HARA**  
(Universidade Federal de Viçosa - UFV)



---

Prof. Titular **JOSÉ ELIAS LAIER**  
Coordenador da Área de Engenharia de Estruturas em exercício



---

**JOSÉ CARLOS A. CINTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

## **DEDICATÓRIA**

***“A sabedoria parte da ignorância...”***

*“O saber se faz através de uma superação constante. O saber superado já é uma ignorância. Todo saber humano tem, em si, o testemunho do novo saber que já anuncia. Todo saber traz consigo sua própria superação. Portanto, não há saber nem ignorância absoluta: há somente uma relativização do saber ou da ignorância.”*

**Paulo Freire**  
**Doutor “honoris causa, por 28 universidades”**  
**Um dos maiores educadores nacionais contemporâneos**  
**1921-1997**  
**Uma lembrança do seu legado**

*A meus pais, Aparecido de Araújo e Zuleide Trindade de Araújo, que, com muito amor e luta, criaram e educaram sete filhos.*

*A meus irmãos, Adorama Trindade de Araújo, Messias Antônio de Araújo, Mara Lúcia de Araújo, Ivan César de Araújo, João Novato de Araújo e Hilton Naves de Araújo que sempre me apoiaram.*

*À minha esposa, Luciana Savoi de Araújo, e a meus filhos, Lucas Savoi de Araújo e Francisco Savoi de Araújo, que souberam suportar a minha ausência em momentos tão importantes para o nosso convívio e que sempre me apoiaram para que eu completasse mais esta etapa. Agradeço por vocês existirem e dedico, especialmente, este trabalho a vocês, com muito amor e carinho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao **Professor Carlito Calil Júnior**, por ser o precursor de pesquisas na área de silos em nosso país, por sua experiência, ensinamentos, dedicação, orientação e, acima de tudo, por sua amizade.

À centenária **Escola de Minas / UFOP** por suas virtudes acadêmicas; à saudosa **República dos Deuses**, pelas amizades e minha juventude; ao **Escritório Piloto dos Estudantes da UFOP**, por ter me proporcionado o senso crítico da vida e ao **povo de Ouro Preto / MG**, a minha eterna gratidão.

À equipe de profissionais do **Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras (LaMEM)** da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC / USP): **Aparecido Galindo, Arnaldo Floro de Souza, Jaime Galindo, José F. do Nascimento Filho, Luis E. Bragatto, Roberto Galindo, Sílvio A. Ferro, Tânia M. Ferreira**, e, em especial, ao **Cláudio Ortiz (Alemão)**, pelo apoio técnico, convívio e amizade.

Aos colegas **Antenor R. Barbosa Jr., Francisco C. Gomes, Gilberto Q. da Silva, Gilberto R. de Queiroz, Hisashi Inoue, José Wallace B. do Nascimento, Luiz Fernando L. Ribeiro, Márcia M. de Souza Rodriguez e Orlando F. Gomes**, pelo apoio técnico, convívio e amizade.

Aos profissionais **Luiz Adalberto Penazzi e José Orlando Lombardi** da Oficina Mecânica da EESC / USP, pelos trabalhos de execução dos protótipos das tremonhas.

Ao profissional **João Jerônimo Bernardi** do Laboratório de Ensaios do Departamento de Materiais da EESC / USP, pelos ensaios de caracterização dos materiais estruturais.

Aos profissionais do **Departamento de Estruturas / EESC / USP** e, em especial, à **Maria Nadir Minatel** pela amizade e apoio bibliográfico.

Aos **companheiros de pós-graduação**, pela troca de conhecimentos e amizade.

E finalmente ao “**povo brasileiro**” por creditar os seus recursos para que este trabalho fosse possível.

# SUMÁRIO

<i>LISTA DE FIGURAS</i> .....	<i>i</i>
<i>LISTA DE TABELAS</i> .....	<i>viii</i>
<i>LISTA DE QUADROS</i> .....	<i>ix</i>
<i>LISTA DE SÍMBOLOS</i> .....	<i>xi</i>
<i>RESUMO</i> .....	<i>xxi</i>
<i>ABSTRACT</i> .....	<i>xxii</i>
<i>CAPÍTULO I : INTRODUÇÃO</i> .....	<i>1</i>
<i>1 - GENERALIDADES</i> .....	<i>1</i>
<i>2 - SILOS DE AÇO</i> .....	<i>4</i>
<i>3 - FLUXOS</i> .....	<i>8</i>
<i>4 - TREMONHA</i> .....	<i>11</i>
<i>CAPÍTULO II : REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</i> .....	<i>14</i>
<i>1 - INTRODUÇÃO</i> .....	<i>14</i>
<i>2 - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PRODUTOS</i> .....	<i>16</i>
<i>3 - GEOMETRIAS</i> .....	<i>17</i>
<i>3.1 - Generalidades</i> .....	<i>17</i>
<i>3.2 - Ângulos das tremonhas em fluxos de massa ou de funil</i> .....	<i>20</i>
<i>3.3 - Boca de descarga para tremonhas em fluxos de massa ou de funil</i> .....	<i>21</i>
<i>4 - AÇÕES</i> .....	<i>28</i>
<i>4.1 - Generalidades</i> .....	<i>28</i>

4.2 - Pressões nas paredes verticais do corpo do silo.....	30
4.3 - Pressões em paredes de tremonhas.....	37
4.3.1 - Método de Baikov.....	37
4.3.2 - Método de Walker.....	38
4.4 - Peso próprio da tremonha.....	44
4.5 - Pressões equivalentes sobre as chapas de paredes.....	45
4.6 - Pressões médias sobre enrijecedores.....	47
5 - ANÁLISE ESTRUTURAL DOS ELEMENTOS DA TREMONHA.....	48
5.1 - Generalidades.....	48
5.2 - Forças de tração horizontais.....	50
5.3 - Forças de tração meridionais.....	52
5.4 - Análise das placas pela Teoria dos Pequenos Deslocamentos (TPD).....	55
5.4.1 - Generalidades.....	55
5.4.2 - Placas Retangulares com relação $\lambda > 3$ .....	55
5.4.3 - Placas Retangulares com relação $\lambda < 3$ .....	57
5.4.4 - Placas Triangulares.....	61
5.4.5 - Placas Trapezoidais.....	68
5.5 - Análise das placas pela Teoria dos Grandes Deslocamentos (TGD).....	71
5.5.1 - Generalidades.....	71
5.5.2 - Placas Retangulares pela TGD e com relação $\lambda < 3$ .....	73
5.5.3 - Placas Retangulares pela TGD e com relação $\lambda > 3$ .....	75
5.6 - Conversões de Placas Triangulares e Trapezoidais em Painéis Retangulares.....	83
5.7 - Enrijecedores.....	85
5.7.1 - Generalidades.....	85
5.7.2 - Largura efetiva.....	86
5.7.3 - Esforços, Deslocamentos e Verificações.....	88
5.7.4 - Soldas.....	92
6 - MATERIAIS ESTRUTURAIIS.....	95
6.1 - Propriedades dos aços.....	95

6.2 - Aços para Silos.....	98
6.3 - Parafusos Estruturais.....	99
6.3.1 - Parafusos comuns.....	99
6.3.2 - Parafusos de alta resistência.....	100
6.3.3 - Nomenclatura internacional.....	101
6.4 - Soldas.....	101
<b>CAPÍTULO III : MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>108</b>
1 - MATERIAIS.....	108
1.1 - Tipos.....	108
1.2 - Produto Granular.....	108
1.3 - Material Estrutural.....	108
2 - MÉTODOS.....	110
2.1 - Métodos teóricos.....	110
2.1.1 - Modelos estruturais adotados.....	110
2.1.2 - Métodos analíticos.....	112
2.1.3 - Métodos numéricos.....	114
2.2 - Métodos experimentais.....	117
2.2.1 - Caracterização do produto granular.....	117
2.2.2 - Caracterização do material estrutural.....	118
2.2.3 - Projeto e fabricação do protótipo.....	120
2.2.4 - Ensaio dos protótipos.....	122
<b>CAPÍTULO IV : RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>140</b>
1 - Escolha das chapas.....	140
2 - Tremonha não-enrijecida.....	145
3 - Tremonha enrijecida.....	148
4 - Enrijecedor.....	151
5 - Deslocamentos globais das tremonhas.....	154



5.1 - Tremonha não-enrijecida.....	154
5.2 - Tremonha enrijecida.....	154
5.3 - Enrijecedores.....	155
<b>CAPÍTULO V : CONCLUSÕES.....</b>	<b>157</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>162</b>
<b>ANEXO A : AÇÕES SOBRE CHAPAS E ENRIJECEDORES.....</b>	<b>171</b>
<b>ANEXO B : PROJETOS.....</b>	<b>179</b>
<b>ANEXO C : FOTOS.....</b>	<b>201</b>
<b>ANEXO D: PROGRAMA (CTP).....</b>	<b>218</b>
<b>ANEXO E : RESULTADOS.....</b>	<b>263</b>

## *LISTA DE FIGURAS*

FIGURA 1.1 -	Sistemas celulares de silos; a) Unicelulares; b) Multicelulares.....	4
FIGURA 1.2 -	Painel modulado.....	5
FIGURA 1.3 -	Tipos de sistemas de silos de seções retangulares.....	6
FIGURA 1.4 -	Silos metálicos.....	8
FIGURA 1.5 -	Tipos básicos de fluxos.....	9
FIGURA 1.6 -	Tremonha tronco-piramidal não-enrijecida.....	11
FIGURA 1.7 -	Tremonha tronco-piramidal enrijecida.....	11
FIGURA 2.1 -	Formas básicas de tremonhas.....	14
FIGURA 2.2 -	Tremonhas simétricas e assimétricas.....	15
FIGURA 2.3 -	Tremonha piramidal não-enrijecida.....	15
FIGURA 2.4 -	Tremonha piramidal enrijecida.....	16
FIGURA 2.5 -	Ângulo de inclinação da parede da tremonha.....	18
FIGURA 2.6 -	Tipos de obstruções de fluxo.....	18
FIGURA 2.7 -	Determinação do tipo de fluxo.....	19
FIGURA 2.8 -	Arco ou cúpula transversalmente a uma tremonha.....	21
FIGURA 2.9 -	Função fluxo e fator fluxo da tremonha.....	24
FIGURA 2.10 -	Lugar geométrico de deslizamento do produto.....	25
FIGURA 2.11 -	Arco transversal a um tubo.....	27
FIGURA 2.12 -	Círculo de Mohr.....	27
FIGURA 2.13 -	Campo de tensões.....	29
FIGURA 2.14 -	Pressões nas paredes para fluxo de funil.....	30
FIGURA 2.15 -	Forças agindo sobre uma camada infinitesimal.....	31
FIGURA 2.16 -	Quadrados imaginários para os cálculos dos raios hidráulicos.....	35
FIGURA 2.17 -	Regiões de distribuição das pressões na seção transversal.....	37
FIGURA 2.18 -	Forças sobre um elemento triangular na parede da tremonha.....	38
FIGURA 2.19 -	Comparações entre as pressões teóricas e as de ensaios.....	39
FIGURA 2.20 -	Pressões sobre a parede e Círculo de Mohr.....	40
FIGURA 2.21 -	Forças atuantes numa faixa elementar da tremonha.....	41

FIGURA 2.22 - Estado de tensões para produto no repouso.....	43
FIGURA 2.23 - Pressões experimentais e teóricas normais às paredes.....	44
FIGURA 2.24 - Componentes do peso próprio da tremonha.....	45
FIGURA 2.25 - Pressões equivalentes para placas retangulares.....	45
FIGURA 2.26 - Pressões equivalentes para placas triangulares.....	46
FIGURA 2.27 - Pressões equivalentes para placas trapezoidais.....	46
FIGURA 2.28 - Pressão média sobre enrijecedor horizontal para tremonha.....	47
FIGURA 2.29 - Forças de tração horizontais e meridionais.....	48
FIGURA 2.30 - Elementos estruturais de um silo prismático.....	49
FIGURA 2.31 - Esforços de tração horizontais e meridionais em uma seção.....	51
FIGURA 2.32 - Esforços de tração horizontais.....	52
FIGURA 2.33 - Forças de tração meridionais.....	52
FIGURA 2.34 - Dimensões de um tronco de pirâmide.....	53
FIGURA 2.35 - Placas com $\lambda > 3$ .....	56
FIGURA 2.36 - Momentos fletores predominantes em placas com $\lambda < 3$ .....	57
FIGURA 2.37 - Tensões e deslocamentos em função das cargas.....	71
FIGURA 2.38 - Placa retangular bi-articulada e com $\lambda > 3$ .....	75
FIGURA 2.39 - Deformações e estado de tensões em um elemento de placa.....	79
FIGURA 2.40 - Conversão de placa triangular em retangular.....	84
FIGURA 2.41 - Conversão de placa trapezoidal em retangular.....	85
FIGURA 2.42 - Tremonha enrijecida.....	86
FIGURA 2.43 - Largura efetiva.....	86
FIGURA 2.44 - Quadro hiperestático.....	88
FIGURA 2.45 - Rotações em “B” pelo Teorema Área-Momento.....	89
FIGURA 2.46 - Soldas contínuas e intermitentes.....	92
FIGURA 2.47 - Solda de filete.....	93
FIGURA 2.48 - Diagramas típicos tensão-deformação para aços estruturais.....	96
FIGURA 2.49 - Limite de escoamento para aço sem patamar de escoamento.....	97
FIGURA 2.50 - Parafuso comum.....	99

FIGURA 2.51 - Parafuso de alta resistência.....	100
FIGURA 2.52 - Soldagem com eletrodo revestido.....	102
FIGURA 2.53 - Processo de soldagem MIG/MAG.....	103
FIGURA 2.54 - Soldagem a arco submerso.....	105
FIGURA 2.55 - Soldagem TIG.....	106
FIGURA 3.1 - Modelo de chapa retangular com $\lambda < 3$ .....	110
FIGURA 3.2 - Modelo de chapa retangular com $\lambda < 3$ .....	110
FIGURA 3.3 - Modelo de chapa retangular com $\lambda > 3$ .....	111
FIGURA 3.4 - Modelo tri-dimensional de tremonha não-enrijecida.....	111
FIGURA 3.5 - Modelo tri-dimensional de tremonha enrijecida.....	112
FIGURA 3.6 - Modelo estrutural para enrijecedores.....	112
FIGURA 3.7 - Chapa 1 da tremonha não-enrijecida: malha de E. F.....	115
FIGURA 3.8 - Chapa 2 da tremonha não-enrijecida: malha de E. Finitos.....	115
FIGURA 3.9 - Chapa 1 da tremonha enrijecida: malha de E. Finitos.....	116
FIGURA 3.10 - Chapa 2 da tremonha enrijecida: malha de E. Finitos.....	116
FIGURA 3.11 - Aparelho de Jenike - TSG 70-140.....	117
FIGURA 3.12 - Dimensões normalizadas dos corpos de prova.....	118
FIGURA 3.13 - Dimensões da tremonha não-enrijecida.....	120
FIGURA 3.14 - Dimensões da tremonha enrijecida.....	120
FIGURA 3.15 - Extensômetro elétrico.....	123
FIGURA 3.16 - Extensômetros na face ext. 1 da tremonha não-enrijecida.....	123
FIGURA 3.17 - Extensômetros na face ext. 2 da tremonha não-enrijecida.....	124
FIGURA 3.18 - Extensômetros na face int. 1 da tremonha não-enrijecida.....	124
FIGURA 3.19 - Extensômetros na face int. 2 da tremonha não-enrijecida.....	125
FIGURA 3.20 - Extensômetros na face ext. 1 da tremonha enrijecida.....	125
FIGURA 3.21 - Extensômetros na face ext. 2 da tremonha enrijecida.....	126
FIGURA 3.22 - Extensômetros na face int. 1 da tremonha enrijecida.....	126
FIGURA 3.23 - Extensômetros na face int. 2 da tremonha enrijecida.....	127
FIGURA 3.24 - Extensômetros nos engastes do enrijecedor "E4".....	127
FIGURA 3.25 - Extensômetros nos engastes do enrijecedor "E3".....	128

FIGURA 3.26 -	Extensômetros nos engastes do enrijecedor “E2”.....	128
FIGURA 3.27 -	Diagramas de deformações quando $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ .....	130
FIGURA 3.28 -	Diagramas de deformações quando $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ .....	130
FIGURA 3.29 -	Transformador diferencial (LVDT).....	131
FIGURA 3.30 -	LVDTs na face ext. 1 da tremonha não-enrijecida.....	132
FIGURA 3.31 -	LVDTs na face ext. 2 da tremonha não-enrijecida.....	132
FIGURA 3.32 -	LVDTs na face ext. 3 da tremonha não-enrijecida.....	133
FIGURA 3.33 -	LVDTs na face ext. 4 da tremonha não-enrijecida.....	133
FIGURA 3.34 -	LVDTs na boca de descarga da tremonha não-enrijecida.....	133
FIGURA 3.35 -	LVDTs nas chapas e enrijecedores da face ext. 1.....	134
FIGURA 3.36 -	LVDTs nas chapas e enrijecedores da face ext. 2.....	134
FIGURA 3.37 -	LVDTs nas chapas e enrijecedores da face ext. 3.....	134
FIGURA 3.38 -	LVDTs nas chapas e enrijecedores da face ext. 4.....	135
FIGURA 3.39 -	LVDTs na boca de descarga e em enrijecedor.....	135
FIGURA 3.40 -	Circuito com um extensômetro ativo e um compensador.....	136
FIGURA 3.41 -	Célula de carga.....	137
FIGURA 4.1 -	Ações trapezoidais nas chapas das tremonhas.....	140
FIGURA 4.2 -	Deslocamentos nas faces 1 e 2 da tremonha não-enrijecida.....	141
FIGURA 4.3 -	Tensões equivalentes nas faces 1 e 2 da tremonha não-enrij.....	141
FIGURA 4.4 -	Deslocamentos nas faces 1 e 2 da tremonha enrijecida.....	142
FIGURA 4.5 -	Tensões equivalentes nas faces 1 e 2 da tremonha enrijecida.....	142
FIGURA 4.6 -	Posições dos elementos finitos para determinações das tensões...	143
FIGURA 4.7 -	Posições dos nós para determinações dos deslocamentos.....	143
FIGURA 4.8 -	Posições dos elementos finitos para determinações das tensões...	144
FIGURA 4.9 -	Posições dos nós para determinações dos deslocamentos.....	144
FIGURA 4.10 -	Tensões em função das pressões (Face-1).....	146
FIGURA 4.11 -	Tensões em função das pressões (Face-1).....	146
FIGURA 4.12 -	Deslocamentos em função das pressões (Face-1).....	147
FIGURA 4.13 -	Tensões no engastamento em função das pressões (Face-1).....	147
FIGURA 4.14 -	Tensões em função das pressões (Face-2).....	148

FIGURA 4.15 -	Deslocamentos em função das pressões (Face-2).....	148
FIGURA 4.16 -	Tensões em função das pressões para chapa 1 da face 1.....	149
FIGURA 4.17 -	Tensões em função das pressões para chapa 1 da face 1.....	150
FIGURA 4.18 -	Deslocamentos em função das pressões para chapa 1 da face 1...	150
FIGURA 4.19 -	Tensões em função das pressões para chapa 1 da face 2.....	151
FIGURA 4.20 -	Deslocamentos em função das pressões para chapa 1 da face 2...	151
FIGURA 4.21 -	Tensões em função das pressões para o enrijecedor "E3".....	152
FIGURA 4.22 -	Deslocamentos em função das pressões para o enrijecedor "E3".	153
FIGURA 4.23 -	Deslocamentos em função das pressões para o enrijecedor "E3".	153
FIGURA 4.24 -	Deslocamentos globais.....	154
FIGURA 4.25 -	Deslocamentos globais.....	155
FIGURA 4.26 -	Deslocamentos relativos.....	156
FIGURA 4.27 -	Deslocamentos relativos.....	156
FIGURA A.1 -	Ações. Pressão na transição = 0 kN/m <sup>2</sup> .....	171
FIGURA A.2 -	Ações. Pressão de transição = 5 kN/m <sup>2</sup> .....	172
FIGURA A.3 -	Ações. Pressão na transição = 10 kN/m <sup>2</sup> .....	172
FIGURA A.4 -	Ações. Pressão na transição = 15 kN/m <sup>2</sup> .....	172
FIGURA A.5 -	Ações. Pressão na transição = 20 kN/m <sup>2</sup> .....	173
FIGURA A.6 -	Ações. Pressão na transição = 25 kN/m <sup>2</sup> .....	173
FIGURA A.7 -	Ações. Pressão na transição = 30 kN/m <sup>2</sup> .....	173
FIGURA A.8 -	Ações. Pressão na transição = 35 kN/m <sup>2</sup> .....	174
FIGURA A.9 -	Ações. Pressão na transição = 40 kN/m <sup>2</sup> .....	174
FIGURA A.10 -	Ações. Pressão na transição = 45 kN/m <sup>2</sup> .....	174
FIGURA A.11 -	Ações. Pressão na transição = 50 kN/m <sup>2</sup> .....	175
FIGURA A.12 -	Ações. Pressão na transição = 55 kN/m <sup>2</sup> .....	175
FIGURA A.13 -	Ações. Pressão na transição = 60 kN/m <sup>2</sup> .....	175
FIGURA A.14 -	Ações. Pressão na transição = 65 kN/m <sup>2</sup> .....	176
FIGURA A.15 -	Ações. Pressão na transição = 70 kN/m <sup>2</sup> .....	176
FIGURA A.16 -	Ações. Pressão na transição = 75 kN/m <sup>2</sup> .....	176
FIGURA A.17 -	Ações. Pressão na transição = 80 kN/m <sup>2</sup> .....	177
FIGURA A.18 -	Ações. Pressão na transição = 85 kN/m <sup>2</sup> .....	177

FIGURA A.19 -	Ações. Pressão na transição = 90 kN/m <sup>2</sup> .....	177
FIGURA A.20 -	Ações. Pressão na transição = 95 kN/m <sup>2</sup> .....	178
FIGURA A.21 -	Ações. Pressão na transição = 100 kN/m <sup>2</sup> .....	178
FIGURA B.1 -	Estrutura de sustentação.....	180
FIGURA B.2 -	Vigas V1.....	181
FIGURA B.3 -	Vigas V2.....	182
FIGURA B.4 -	Colunas P1.....	183
FIGURA B.5 -	Colunas P2.....	184
FIGURA B.6 -	Tremonha tipo 1.....	185
FIGURA B.7 -	Boca de descarga.....	186
FIGURA B.8 -	Tremonha tipo 2.....	187
FIGURA B.9 -	Posicionamento dos enrijecedores nas faces 2 e 4.....	188
FIGURA B.10 -	Posicionamento dos enrijecedores nas faces 1 e 3.....	189
FIGURA B.11 -	Enrijecedores “E1” e “E2”.....	190
FIGURA B.12 -	Enrijecedor “E3”.....	191
FIGURA B.13 -	Enrijecedor “E4”.....	192
FIGURA B.14 -	Enrijecedor “E5”.....	193
FIGURA B.15 -	Soldas em enrijecedores nas faces 2 e 4.....	194
FIGURA B.16 -	Soldas em enrijecedores nas faces 1 e 3.....	195
FIGURA B.17 -	Montagem para ensaios.....	196
FIGURA B.18 -	LVDTs nas faces 1 e 3 da tremonha não-enrijecida.....	197
FIGURA B.19 -	LVDTs nas faces 2 e 4 da tremonha não-enrijecida.....	198
FIGURA B.20 -	LVDTs nas faces 1 e 3 da tremonha enrijecida.....	199
FIGURA B.21 -	LVDTs nas faces 2 e 4 da tremonha enrijecida.....	200
FIGURA C.1 -	Aparelho de Jenike TSG 70-140.....	201
FIGURA C.2 -	Máquina de ensaio à tração INSTRON.....	202
FIGURA C.3 -	Conjunto de corpos de prova.....	203
FIGURA C.4 -	Corpos de prova com extensômetros eletrônicos.....	203
FIGURA C.5 -	Ensaio.....	204

FIGURA C.6 -	Corpos de prova ensaiados.....	204
FIGURA C.7 -	Posições de ruptura do material dentro da medida padrão.....	205
FIGURA C.8 -	Fabricação de enrijecedores.....	206
FIGURA C.9 -	Pré-montagem de chapas.....	206
FIGURA C.10 -	Pré-montagem de enrijecedores.....	207
FIGURA C.11 -	Soldagem de enrijecedores.....	207
FIGURA C.12 -	Soldagem de enrijecedor de transição.....	208
FIGURA C.13 -	Tremonhas prontas e equipamento de soldagem MIG.....	208
FIGURA C.14 -	Definição física das malhas de elementos finitos.....	209
FIGURA C.15 -	Definição física das malhas de elementos finitos internamente..	209
FIGURA C.16 -	Definição física das malhas de elementos finitos.....	210
FIGURA C.17 -	Montagem das estruturas de sustentação e de reação.....	210
FIGURA C.18 -	Instalações de Sistema de Aquisição de Dados (SAD).....	211
FIGURA C.19 -	Posicionamentos e quantidades de LVDTs .....	211
FIGURA C.20 -	Posicionamentos de LVDTs nas extremidades da boca.....	212
FIGURA C.21 -	Extensômetro compensador de temperatura.....	212
FIGURA C.22 -	Célula de carga para 20 toneladas-força (200 kN).....	213
FIGURA C.23 -	Início de aplicações das cargas de transição.....	213
FIGURA C.24 -	Disposições de LVDTs na face externa 4.....	214
FIGURA C.25 -	Disposições de LVDTs nas chapas e enrijecedores da face 1.....	214
FIGURA C.26 -	Disposições de LVDTs nos enrijecedores da face 2.....	215
FIGURA C.27 -	LVDTs posicionados no enrijecedor E4 para medir rotações.....	215
FIGURA C.28 -	Início de aplicação das cargas de transição.....	216
FIGURA C.29 -	Sistema de Aquisição de dados (SAD).....	216
FIGURA C.30 -	Vista geral dos ensaios e laboratório (LaMEM/EESC/USP).....	217
FIGURA D.1 -	Tela 1 para CTP.....	219
FIGURA D.2 -	Tela 2 para CTP.....	222
FIGURA D.3 -	Tela 3 para CTP.....	226
FIGURA D.4 -	Tela 4 para CTP.....	233
FIGURA D.5 -	Tela 5 para CTP.....	242
FIGURA D.6 -	Tela 6 para CTP.....	252



## *LISTA DE TABELAS*

TABELA 2.1 -	Tabela para placas com bordas simplesmente apoiadas e $\lambda < 3$ .....	58
TABELA 2.2 -	Tabela para placas com bordas engastadas e $\lambda < 3$ .....	59
TABELA 2.3 -	Tabela para Placas Triangulares.....	64
TABELA 2.4 -	Tabela para Placas Triangulares com Bordas Apoiadas.....	65
TABELA 2.5 -	Tabela para Placas Triangulares com Bordas Engastadas.....	66
TABELA 2.6 -	Tabela para Placas Triangulares com Bordas Engastadas.....	67
TABELA 2.7 -	Tabela para Placas Trapezoidais com Bordas engastadas.....	69
TABELA 2.8 -	Tabela para Placas Trapezoidais com Bordas Engastadas.....	70
TABELA 2.9 -	Deslocamentos e Tensões para Placas Retangulares pela TGD....	74
TABELA 2.10 -	Aços para Silos.....	98
TABELA 2.11 -	Propriedades mecânicas dos parafusos de acordo com a ISO.....	101
TABELA 2.12 -	Arames de Aço para Soldagem TIG / MIG / MAG.....	104
TABELA 2.13 -	Arames de Aço para Arco Submerso.....	106
TABELA 3.1 -	Aços Estruturais.....	109
TABELA 3.2 -	Propriedades da areia.....	118
TABELA 3.3 -	Resultados dos ensaios das chapas de aço.....	119

## ***LISTA DE QUADROS***

QUADRO E.1 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 1E.0 e 1E.1.....	264
QUADRO E.2 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 1E.2 e 1E.3.....	265
QUADRO E.3 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 1E.4 e 1E.5.....	266
QUADRO E.4 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 1E.6 e 1E.7.....	267
QUADRO E.5 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 1E.8 e 1E.9.....	268
QUADRO E.6 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 2E.10 e 2E.11.....	269
QUADRO E.7 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 2E.12 e 2E.13.....	270
QUADRO E.8 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 2E.14 e 2E.15.....	271
QUADRO E.9 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 2E.16 e 2E.17.....	272
QUADRO E.10 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 2E.18 e 2E.19.....	273
QUADRO E.11 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 1I.20 e 1I.21.....	274
QUADRO E.12 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 1I.22 e 1I.23.....	275
QUADRO E.13 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 1I.24 e 1I.25.....	276
QUADRO E.14 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 1I.26 e 1I.27.....	277
QUADRO E.15 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 2I.28 e 2I.29.....	278
QUADRO E.16 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 2I.30 e 2I.31.....	279
QUADRO E.17 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 2I.32 e 2I.33.....	280
QUADRO E.18 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 2I.34 e 2I.35.....	281
QUADRO E.19 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 2I.36 e 2I.37.....	282
QUADRO E.20 -	Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 1D.0 e 1D.1.....	283
QUADRO E.21 -	Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 1D.2 e 1D.3.....	284
QUADRO E.22 -	Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 3D.4 e 3D.5.....	285
QUADRO E.23 -	Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 4D.6 e 4D.7.....	286
QUADRO E.24 -	Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 5D.8 e 5D.9.....	287
QUADRO E.25 -	Deformações = f(cargas) para extensômetros 1E.0 e 1E.1.....	288

QUADRO E.26 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 1E.2 e 1E.3.....	289
QUADRO E.27 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 1E.4 e 1E.5.....	290
QUADRO E.28 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 1SE.6 e 1SI.7.....	291
QUADRO E.29 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 1SE.8 e 1SI.9.....	292
QUADRO E.30 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 1SE.10 e 1SI.11.	293
QUADRO E.31 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 2E.12 e 2E.13.....	294
QUADRO E.32 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 2E.14 e 2E.15.....	295
QUADRO E.33 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 2E.16 e 2E.17....	296
QUADRO E.34 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 1SE.18 e 1SI.19.	297
QUADRO E.35 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 1SE.20 e 1SI.21.	298
QUADRO E.36 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 1SE.22 e 1SI.23.	299
QUADRO E.37 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 1I.24 e 1I.25.....	300
QUADRO E.38 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 1I.26 e 1I.27.....	301
QUADRO E.39 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 1I.28 e 1I.29.....	302
QUADRO E.40 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 1I.30 e 1I.31.....	303
QUADRO E.41 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 2I.32 e 2I.33.....	304
QUADRO E.42 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 2I.34 e 2I.35.....	305
QUADRO E.43 -	Deformações = $f(\text{cargas})$ para extensômetros 2I.36 e 2I.37.....	306
QUADRO E.44 -	Deslocamentos = $f(\text{cargas})$ para LVDTs 1D.0 e 1D.1.....	307
QUADRO E.45 -	Deslocamentos = $f(\text{cargas})$ para LVDTs 1D.2 e 1D.3.....	308
QUADRO E.46 -	Deslocamentos = $f(\text{cargas})$ para LVDTs 1D.4 e 1D.5.....	309
QUADRO E.47 -	Deslocamentos = $f(\text{cargas})$ para LVDTs 1D.6 e 1D.7.....	310
QUADRO E.48 -	Deslocamentos = $f(\text{cargas})$ para LVDTs 2D.8 e 2D.9.....	311
QUADRO E.49 -	Deslocamentos = $f(\text{cargas})$ para LVDTs 3D.10 e 3D.11.....	312
QUADRO E.50 -	Deslocamentos = $f(\text{cargas})$ para LVDTs 3D.12 e 3D.13.....	313
QUADRO E.51 -	Deslocamentos = $f(\text{cargas})$ para LVDTs 4D.14 e 4D.15.....	314
QUADRO E.52 -	Deslocamentos = $f(\text{cargas})$ para LVDTs 4D.16 e 4D.17.....	315
QUADRO E.53 -	Deslocamentos = $f(\text{cargas})$ para LVDTs 5D.18 e 5D.19.....	316
QUADRO E.54 -	Deslocamentos = $f(\text{cargas})$ para LVDTs 5D.20 e 5D.21.....	317
QUADRO E.55 -	Deslocamentos = $f(\text{cargas})$ para LVDTs 5D.22 e 5D.23.....	318

# LISTA DE SÍMBOLOS

## LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

$a =$	área da mesa ligada ao enrijecedor.....	$[L^2]$
$a =$	lado de um retângulo ( $axb$ ).....	$[L]$
$a' =$	lado de um quadrado imaginário para o cálculo da pressão no lado “b” de um retângulo ( $axb$ ).....	$[L]$
$a_g =$	lado de um retângulo genérico transversalmente à tremonha.....	$[L]$
$a_1 =$	lado do menor retângulo de um tronco de pirâmide.....	$[L]$
$a_2 =$	lado do maior retângulo de um tronco de pirâmide.....	$[L]$
$b =$	lado de um retângulo ( $axb$ ).....	$[L]$
$b_e =$	largura equivalente.....	$[L]$
$b_g =$	lado de um retângulo genérico transversalmente à tremonha.....	$[L]$
$b_1 =$	lado do menor retângulo de um tronco de pirâmide.....	$[L]$
$b_2 =$	lado do maior retângulo de um tronco de pirâmide.....	$[L]$
$c =$	passo longitudinal de centro a centro entre filetes de soldas intermitentes.	$[L]$
$d =$	diâmetro.....	$[L]$
$dp_v =$	incremento infinitesimal da pressão vertical “ $p_v$ ”.....	$[FL^{-2}]$
$d\bar{p}_{VT} =$	incremento infinitesimal da pressão $\bar{p}_{VT}$ .....	$[FL^{-2}]$
$dy =$	incremento infinitesimal da ordenada “y”.....	$[L]$
$dz =$	incremento infinitesimal da ordenada “z”.....	$[L]$
$f =$	força atuante sobre a solda.....	$[FL^{-1}]$
$f =$	função de tensão de Airy.....	
$f_{eq} =$	tensão equivalente.....	$[FL^{-2}]$
$f_{pr} =$	limite de proporcionalidade.....	$[FL^{-2}]$

$f_v =$	resistência da solda ao cisalhamento.....	$[FL^{-2}]$
$ff =$	fator fluxo. Relação entre a tensão de consolidação ( $\sigma_1$ ) e a tensão atuante nos apoios de um arco ( $\bar{\sigma}_1$ ).....	[1]
$h_e =$	altura equivalente.....	[L]
$k =$	relação entre as pressões normal ( $p_n$ ) e a vertical ( $p_v$ ) no corpo do silo..	[1]
$k_2 =$	relação entre a pressão normal ( $p_{NT}$ ) e a pressão vertical ( $\bar{p}_{VT}$ ) na tremonha.....	[1]
$k_l =$	coeficiente linear aplicado à teoria dos pequenos deslocamentos.....	[1]
$k_r =$	coeficiente de redução aplicado à teoria dos grandes deslocamentos.....	[1]
$l =$	comprimento.....	[L]
$l =$	perímetro da seção transversal horizontal.....	[L]
$n =$	número de filetes de soldas entre a mesa e o enrijecedor.....	[1]
$n =$	valor calculado pela expressão (44).....	[1]
$m =$	fator numérico que possibilita a generalização da expressão (44).....	[1]
$p_n =$	pressão normal à parede do corpo do silo.....	$[FL^{-2}]$
$p_v =$	pressão vertical no corpo do silo.....	$[FL^{-2}]$
$p_{NT} =$	pressão normal às paredes da tremonha.....	$[FL^{-2}]$
$p_{TT} =$	pressão tangencial às paredes da tremonha.....	$[FL^{-2}]$
$p_{HT} =$	pressão horizontal na tremonha.....	$[FL^{-2}]$
$p_{vt} =$	pressão vertical na transição entre o corpo e a tremonha do silo.....	$[FL^{-2}]$
$p_{N1} =$	menor pressão de uma função de carga trapezoidal.....	$[FL^{-2}]$
$p_{N2} =$	maior pressão de uma função de carga trapezoidal.....	$[FL^{-2}]$

$p_{NE}$	=	pressão normal equivalente em uma chapa de tremonha.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$p_{NM}$	=	pressão normal média por unidade de comprimento de enrijecedor.....	[FL <sup>-1</sup> ]
$p_{NTa}$	=	pressão normal às paredes da tremonha na face que tem lado "a".....	[FL <sup>-2</sup> ]
$p_{NTb}$	=	pressão normal às paredes da tremonha na face que tem lado "b".....	[FL <sup>-2</sup> ]
$\bar{p}_{VT}$	=	pressão vertical média na tremonha.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$q$	=	pressão de atrito sobre a parede do corpo do silo.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$q$	=	pressão normal a uma placa.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$r_x$	=	raio de curvatura em relação ao eixo "x".....	[L]
$r_y$	=	raio de curvatura em relação ao eixo "y".....	[L]
$\frac{1}{r_x} = \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}$	=	curvatura da curva plana definida pela interseção da superfície "ω" com um plano vertical paralelo ao eixo "x".....	[L <sup>-1</sup> ]
$\frac{1}{r_y} = \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}$	=	curvatura da curva plana definida pela interseção da superfície "ω" com um plano vertical paralelo ao eixo "y".....	[L <sup>-1</sup> ]
$t$	=	espessura de uma placa.....	[L]
$t$	=	dimensão nominal da perna da solda ao longo de cada lado da alma de um enrijecedor.....	[L]
$w_0$	=	deslocamento no meio do vão de uma viga, provocado exclusivamente por cargas transversais.....	[L]
$w_1$	=	deslocamento tabelado para o coeficiente de Poisson igual a "ν <sub>1</sub> ".....	[L]
$w_2$	=	deslocamento para o coeficiente de Poisson igual a "ν <sub>2</sub> ".....	[L]
$w_\alpha$	=	relação entre a força axial "F" e a carga crítica "F <sub>CR</sub> ".....	[1]
$w_m$	=	deslocamento no meio do vão de uma viga bi-articulada sujeita à flexo-tração.....	[L]
$y$	=	altura do produto acima da seção transversal considerada no corpo do silo.....	[L]

$y =$	altura abaixo da transição entre o corpo do silo e a tremonha.....	[L]
$\bar{y} =$	distância entre o centro de gravidade da área da mesa e o eixo neutro da seção total do conjunto chapa da tremonha e enrijecedor.....	[L]
$z =$	ordenada genérica com origem no vértice da tremonha.....	[L]

### LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

$A =$	área da seção transversal de um elemento estrutural.....	[L <sup>2</sup> ]
$A =$	área da seção transversal horizontal de um silo.....	[L <sup>2</sup> ]
$A_a =$	área de influência para o lado “a” de um retângulo (axb).....	[L <sup>2</sup> ]
$A_b =$	área de influência para o lado “b” de um retângulo (axb).....	[L <sup>2</sup> ]
$A_1 =$	área do diagrama de momentos fletores do vão “1”.....	[FL <sup>2</sup> ]
$A_2 =$	área do diagrama de momentos fletores do vão “2”.....	[FL <sup>2</sup> ]
$A_{ag} =$	área de influência para o lado “a <sub>g</sub> ” de um retângulo (a <sub>g</sub> x b <sub>g</sub> ).....	[L <sup>2</sup> ]
$A_{bg} =$	área de influência para o lado “b <sub>g</sub> ” de um retângulo (a <sub>g</sub> x b <sub>g</sub> ).....	[L <sup>2</sup> ]
$B =$	grandeza definida pela expressão (41).....	[1]
$C =$	coesão aparente.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$C_{ag} =$	coeficiente de distribuição para um lado genérico “a <sub>g</sub> ”.....	[1]
$C_{bg} =$	coeficiente de distribuição para um lado genérico “b <sub>g</sub> ”.....	[1]
$D =$	diâmetro.....	[L]
$D =$	fator de distribuição representado pela relação entre a pressão vertical próxima à parede e a pressão vertical média numa seção transversal. Este fator para efeitos práticos é tomado igual à unidade.....	[1]
$D =$	rigidez à flexão de uma placa.....	[FL <sup>2</sup> ]
$E =$	módulo de elasticidade longitudinal do material.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$F =$	força axial desenvolvida pelo efeito membrana.....	[F]

$F$	força de atrito por unidade de comprimento.....	$[FL^{-1}]$
$F_a$	força de atrito.....	$[F]$
$F_{at}$	pressão de atrito.....	$[FL^{-2}]$
$F_u$	limite de resistência.....	$[FL^{-2}]$
$F_y$	limite de escoamento.....	$[FL^{-2}]$
FF	função fluxo. Curva da tensão ao deslizamento inconfiada ( $\sigma_c$ ) em função da maior tensão principal de consolidação ( $\sigma_1$ ).....	$[1]$
$G$	fator Piping.....	$[1]$
$G$	peso próprio da tremonha.....	$[F]$
$H$	altura total do corpo do silo.....	$[L]$
$H$	altura total da tremonha.....	$[L]$
$I$	momento de inércia da seção transversal formada pelo enrijecedor e a largura efetiva da chapa.....	$[L^4]$
$I_a$	momento de inércia para a seção transversal de um enrijecedor do vão “a”.....	$[L^4]$
$I_b$	momento de inércia para a seção transversal de um enrijecedor do vão “b”.....	$[L^4]$
$I_1$	momento de inércia de um elemento estrutural do vão “1”.....	$[L^4]$
$I_2$	momento de inércia de um elemento estrutural do vão “2”.....	$[L^4]$
$L$	comprimento do filete de solda intermitente.....	$[L]$
$L$	comprimento de um elemento estrutural.....	$[L]$
$L$	distância média entre enrijecedores.....	$[L]$
$L_a$	distância entre um enrijecedor e outro adjacente.....	$[L]$
$L_b$	distância entre um enrijecedor e outro adjacente.....	$[L]$
$L_e$	largura efetiva.....	$[L]$
$L_1$	comprimento do vão “1”.....	$[L]$



$L_2 =$	comprimento do vão "2".....	[L]
$M =$	momento de flexão qualquer.....	[FL]
$M =$	momento de flexão em engastamentos de um quadro fechado retangular.....	[FL]
$M_A =$	momento de flexão na extremidade "A" de um elemento estrutural.....	[FL]
$M_B =$	momento de flexão na extremidade "B" de um elemento estrutural.....	[FL]
$M_C =$	momento de flexão na extremidade "C" de um elemento estrutural.....	[FL]
$M_{ma} =$	momento de flexão no meio do vão "a".....	[FL]
$M_{mb} =$	momento de flexão no meio do vão "b".....	[FL]
$M_S =$	momento de flexão em relação a uma seção genérica "S".....	[FL]
$M_{Sa} =$	momento de flexão numa seção "S" do vão "a".....	[FL]
$M_{Sb} =$	momento de flexão numa seção "S" do vão "b".....	[FL]
$M_x =$	momento de flexão em torno do eixo "x".....	[FL]
$M_y =$	momento de flexão em torno do eixo "y".....	[FL]
$M_{xmáx} =$	momento de flexão máximo em torno do eixo "x".....	[FL]
$M_{ymáx} =$	momento de flexão máximo em torno do eixo "y".....	[FL]
$M_{1x} =$	momento de flexão em torno do eixo "x" para uma placa com coeficiente de Poisson " $\nu_1$ ".....	[FL]
$M_{1y} =$	momento de flexão em torno do eixo "y" para uma placa com coeficiente de Poisson " $\nu_1$ ".....	[FL]
$M_{2x} =$	momento de flexão em torno do eixo "x" para uma placa com coeficiente de Poisson " $\nu_2$ ".....	[FL]
$M_{2y} =$	momento de flexão em torno do eixo "y" para uma placa com coeficiente de Poisson " $\nu_2$ ".....	[FL]
$M_{z,eng} =$	momento de flexão de engastamento.....	[FL]
$M_{máx} =$	momento de flexão máximo.....	[FL]

Q =	parâmetro adimensional que reflete o efeito da carga transversal "P <sub>NT</sub> ".....	[1]
R =	raio.....	[L]
R =	raio hidráulico. Relação entre a área da seção (A) transversal do silo e o perímetro (l) da mesma.....	[L]
S <sub>1</sub> =	tensão na base do arco formado pelo produto no interior do silo.....	[FL <sup>-2</sup> ]
T <sub>h</sub> =	tração horizontal na face da tremonha.....	[FL <sup>-1</sup> ]
T <sub>m</sub> =	tração meridional na face da tremonha .....	[FL <sup>-1</sup> ]
T <sub>ha</sub> =	tração horizontal na face da tremonha de lado "a".....	[FL <sup>-1</sup> ]
T <sub>hb</sub> =	tração horizontal na face da tremonha de lado "b".....	[FL <sup>-1</sup> ]
T <sub>ma</sub> =	tração meridional na face da tremonha de lado "a".....	[FL <sup>-1</sup> ]
T <sub>mb</sub> =	tração meridional na face da tremonha de lado "b".....	[FL <sup>-1</sup> ]
T <sub>m(ag)</sub> =	tração meridional na face da tremonha de lado "a" em uma posição genérica.....	[FL <sup>-1</sup> ]
T <sub>m(bg)</sub> =	tração meridional na face da tremonha de lado "b" em uma posição genérica.....	[FL <sup>-1</sup> ]
T <sub>h(ag)</sub> =	tração horizontal na face da tremonha de lado "a" em uma posição genérica.....	[FL <sup>-1</sup> ]
T <sub>h(bg)</sub> =	tração horizontal na face da tremonha de lado "b" em uma posição genérica.....	[FL <sup>-1</sup> ]
V =	volume de um tronco de pirâmide.....	[L <sup>3</sup> ]
V =	esforço de cisalhamento total na seção, em uma dada posição ao longo	

	do enrijecedor .....	[F]
$W =$	módulo de resistência.....	[L <sup>3</sup> ]
$W =$	peso total do produto contido na tremonha.....	[F]
$W =$	coeficiente para o cálculo dos deslocamentos.....	[1]

### LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

$\alpha =$	ângulo de inclinação da parede da tremonha.....	[1]
$\alpha_a =$	ângulo entre a linha de máximo declive da face de lado “a” da tremonha e uma linha horizontal.....	[1]
$\alpha_b =$	ângulo entre a linha de máximo declive da face de lado “b” da tremonha e uma linha horizontal.....	[1]
$\alpha_1 =$	ângulo definido pela linha de máximo declive das paredes com a horizontal.....	[1]
$\alpha_2 =$	ângulo definido pela linha de máximo declive das paredes com a horizontal.....	[1]
$\alpha_m =$	ângulo interno do trapézio diagonal da tremonha.....	[1]
$\beta =$	ângulo entre a maior tensão principal e a normal à parede da tremonha	[1]
$\beta_1, \dots, \beta_5 =$	coeficientes de tabelas.....	[1]
$\gamma =$	peso específico.....	[L <sup>3</sup> ]
$\varepsilon =$	deformação específica ou unitária.....	[1]
$\varepsilon_x =$	deformação específica ou unitária na direção “x”.....	[1]
$\varepsilon_y =$	deformação específica ou unitária na direção “y”.....	[1]
$\theta_1 =$	metade do ângulo do vértice da tremonha.....	[1]
$\theta_{Ba} =$	rotação no apoio “B” do lado do vão “a”.....	[1]
$\theta_{Bb} =$	rotação no apoio “B” do lado do vão “b”.....	[1]
$\lambda =$	relação de aspecto. Relação entre os vãos maior e menor de uma placa	[1]
$\mu =$	coeficiente de atrito do produto granular contra a parede.....	[1]
$\nu =$	coeficiente de Poisson.....	[1]

$\nu_1 =$	coeficiente de Poisson para uma placa 1.....	[1]
$\nu_2 =$	coeficiente de Poisson para uma placa 2.....	[1]
$\sigma =$	tensão.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$\sigma_c =$	tensão de compressão (tensão de deslizamento inconfinaada).....	[FL <sup>-2</sup> ]
$\sigma_1 =$	maior tensão principal de consolidação.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$\sigma_2 =$	menor tensão principal de consolidação.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$\sigma_{fx} =$	tensão devido à flexão na direção “x”.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$\sigma_{fy} =$	tensão devido à flexão na direção “y”.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$\sigma_{mx} =$	tensão devido ao efeito membrana na direção “x”.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$\sigma_{my} =$	tensão devido ao efeito membrana na direção “y”.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$\sigma_x =$	tensão na direção “x”.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$\sigma_y =$	tensão na direção “y”.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$\sigma_w =$	pressão na parede.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$\bar{\sigma} =$	coeficiente para as tensões.....	[1]
$\bar{\sigma}_{bx1} =$	coeficiente para as tensões de flexão na direção “x” e atuantes no ponto 1.....	[1]
$\bar{\sigma}_{by1} =$	coeficiente para as tensões de flexão na direção “y” e atuantes no ponto 1.....	[1]
$\bar{\sigma}_{mx1} =$	coeficiente para as tensões de membrana na direção “x” e atuantes no ponto 1.....	[1]
$\bar{\sigma}_{my1} =$	coeficiente para as tensões de membrana na direção “y” e atuantes no ponto 1.....	[1]
$\bar{\sigma}_{mx2} =$	coeficiente para as tensões de membrana na direção “x” e atuantes no ponto 2.....	[1]
$\bar{\sigma}_{my2} =$	coeficiente para as tensões de membrana na direção “y” e atuantes no ponto 2.....	[1]
$\bar{\sigma}_1 =$	tensão atuante nos apoios de um arco formado pelo produto.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$\tau =$	tensão de cisalhamento.....	[FL <sup>-2</sup> ]

$\tau_{VT}$ =	tensão de cisalhamento do produto contra a parede da tremonha.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$\phi_e$ =	efetivo ângulo de atrito interno.....	[FL <sup>-2</sup> ]
$\phi_{iu}$ =	valor superior do efetivo ângulo de atrito interno do produto, em graus.....	[1]
$\phi_w$ =	ângulo de atrito do produto com a parede.....	[1]
$\phi_{wu}$ =	valor superior do ângulo de atrito com a parede, em graus.....	[1]
$\phi_o$ =	coeficiente em função de “u” que minora o momento de flexão $M_{máx}$ .....	[1]
$\phi_1$ =	coeficiente em função de “u” que minora o deslocamento “ $\omega_{máx}$ ”.....	[1]
$\omega$ =	deslocamento.....	[L]

### LETRAS GREGAS MAIÚSCULAS

$\Delta_{máx}$ =	deslocamento máximo.....	[L]
$\Delta_a$ =	deslocamento no meio do vão “a”.....	[L]
$\Delta_b$ =	deslocamento no meio do vão “b”.....	[L]

## RESUMO

A tremonha é a principal responsável pelo êxito de funcionamento dos silos. Ela desempenha importantes funções nas descargas e nos controles de fluxos dos produtos armazenados. Neste trabalho, estuda-se o comportamento estrutural de tremonhas piramidais de aço através de procedimentos analíticos, numéricos e experimentais. Os ensaios foram realizados em laboratório utilizando-se modelos em escala real para tremonhas não-enrijecidas e enrijecidas. Estes sistemas estruturais estão sujeitos a estados combinados de tensões bi-axiais para as chapas e uni-axiais para os enrijecedores. Os resultados demonstraram que as tremonhas não-enrijecidas são viáveis apenas para silos baixos com pequenas relações altura/lado (cargas não muito elevadas). Os métodos analíticos utilizados na prática para o dimensionamento das mesmas são muito conservadores e recomenda-se a utilização de métodos numéricos. Verificou-se que as tremonhas enrijecidas podem proporcionar relativa economia em peso de chapas. Métodos analíticos ou numéricos pela “teoria dos pequenos deslocamentos” demonstraram ser muito conservadores nos dimensionamentos das chapas. Para este tipo de tremonha, devido à baixa rigidez à flexão das chapas finas, deve-se supor que estas trabalhem, primordialmente, pelo efeito-membrana. Assim, para dimensionamentos mais racionais, propõe-se a utilização do “método dos grandes deslocamentos” aplicado às placas. A teoria analítica para o dimensionamento dos enrijecedores proporcionou valores satisfatórios para as seções transversais. De acordo com os ensaios, a princípio, os enrijecedores prescindem de maior rigidez à torção.

## *ABSTRACT*

The hopper is considered like the main responsible element by the operation of the silos. It fulfills important functions on the discharge and on the flows control of stored products. In this work, the structural behaviour of steel pyramidal hoppers has been studied through of analytical, numerical, and experimental procedures. The essays were realized in laboratory and they had used full-scale models to stiffened and nonstiffened hoppers. These structural systems are subjected to combined states of biaxial stresses to the plates and uniaxial ones to the stiffeners. The results has showed that the nonstiffened hoppers are viable only to lower silos that present the small relationships height / side (loads aren't very higher). The analytical methods that had been used commonly to the design of the both hoppers are considered like very conservative and it has been recommended the use of numerical methods. It has been showed that the stiffened hoppers can provoke relative economy when the subject is the weight of the plates. Analytical or numerical methods by "small-deflection theory" had showed to be very conservative in the design of the plates. For this kind of hopper, it's suggested that the work be made, at first, by membrane-effect, because of lower stiffness to the thinner plates flexion. So, to the more rational design, it's suggested the use of the "large-deflection theory" applied to the plates. The analytical theory to design of the stiffeners brought satisfactory values to the issues, at first, the stiffeners prescind from greater stiffness to the torsion.

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1 - GENERALIDADES

Etimologicamente, a palavra SILO originou-se da palavra SIRUS (do latim) que, por sua vez provém da palavra grega SIROS, que significa lugar profundo, cavernoso e escuro (CALIL, 1984).

“Os povos das mais remotas civilizações, no Egito, na China e na Índia, já se preocupavam com a construção de silos para a guarda de grãos alimentícios. Nas ruínas do Egito foram encontrados silos construídos com paredes de granito. Na China, eram construídos nas rochas. Na Índia, ainda encontraram silos construídos há mais de 4000 anos, possuindo rampas de acesso aos compartimentos superiores, plataformas para descarga e sistema de tubulações de barro para o arejamento dos produtos armazenados. Na Espanha, existem silos construídos em rochas pelos mouros e com capacidade de aproximadamente 23000 toneladas. Os silos construídos pelos romanos, há 1700 anos, são dignos de admiração pela técnica já então usada. A impermeabilização, a dureza e o polimento das paredes internas daqueles depósitos revelam a capacidade daquela civilização para a construção desse tipo de instalação” (SOARES, 1964).

Antes da descoberta do Brasil, como é sabido, nossos habitantes eram indígenas. Estes, em sua maioria, eram nômades, com pouco aprimoramento da técnica agrícola e



sem nenhuma necessidade e nem possibilidade de armazenamento rudimentar pelas condições climáticas oferecidas.

Os índios, em vez de armazenarem, quando o alimento se tornava escasso, simplesmente abandonava e prosseguiam a sua marcha para onde tivessem alimentos. Este fato foi agravado com a descoberta do Brasil cujas expedições eram militares, com finalidades predatórias, sem o objetivo de colonização em termos de fixação das correntes imigratórias. A própria divisão política do Brasil foi determinada por uma distribuição arbitrária de terras, ligadas ao poder central, cujos interesses não tinham qualquer ligação com os problemas da evolução da terra conquistada.

Os fatores climáticos favoreciam por demais a sobrevivência dos núcleos populacionais que, de uma forma lenta e ocasional, iam-se fixando ao solo brasileiro. As facilidades de alimentação e as dificuldades de conservação desencorajavam, na maioria dos casos, qualquer forma, mesmo que primária, de armazenamento de produtos agrícolas. O clima quente, que dificultava a conservação de alimentos, facilitava, durante todo o ano, a rotação de culturas para a alimentação de pequenos grupos populacionais. Assim, o problema da conservação e guarda de grãos alimentícios em nosso país somente começou a ser cogitado pela área governamental a partir de 1943, face aos problemas de abastecimento provocados durante a segunda Grande Guerra Mundial (SOARES, 1964), (ISHKAWA, 1976).

Os primeiros grandes silos foram construídos em madeira, a partir do século XIX ,chegando a alturas de até 20 metros. Inicialmente, os cálculos eram feitos considerando que o produto armazenado provocava pressão horizontal como os líquidos. No entanto, posteriormente, verificou-se que estas pressões eram excessivamente grandes, devido ao atrito do produto contra a parede. Este comportamento, verificado por Janssen em 1895, em poucos anos mudou o conceito de cálculos de silos. Junto a este fato, houve uma evolução na utilização de materiais de construção que também proporcionou o aumento da capacidade de armazenamento dos silos. Assim, começou um interesse internacional por este tipo de estrutura baseado, principalmente, nas seguintes razões:

- **Interesse econômico.** Nos processos industriais, principalmente nas áreas de mineração e agro-indústria, os silos têm um papel de fundamental importância, na armazenagem e manipulação dos produtos do processo de produção. Os silos possibilitam a utilização da

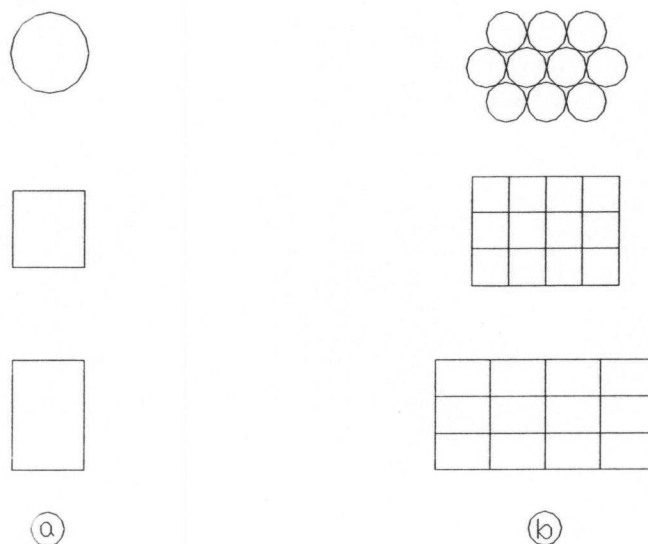
matéria prima a granel, economizando sacaria e mão-de-obra, favorecendo a automação do processo de carga e descarga, contribuindo para a obtenção de ganhos na produtividade, qualidade e custo. O armazenamento de produtos a granel é fundamental no mundo industrial e realizam-se grandes inversões públicas e privadas em estruturas de armazenamento em todos os países do mundo.

- **Interesse social.** O armazenamento de produtos a granel em silos contribui, eficazmente, para o abastecimento de um povo. As qualidades alimentícias são preservadas e permite distribuições controladas dos produtos.

- **Interesse científico.** Os silos são estruturas complexas onde podem ocorrer comportamentos estruturais de diferentes materiais em situações diversas. Há muito tempo os silos têm sido protagonistas de prejuízos materiais e de um grande número de vítimas humanas devido a falhas estruturais, explosões e por asfixia. Apesar de já ter passado um século de investigação, ainda existem grandes lacunas de conhecimento que animam numerosos pesquisadores de todo o mundo (AYUGA, 1995), (ISHIKAWA, 1976).

## 2 - SILOS DE AÇO

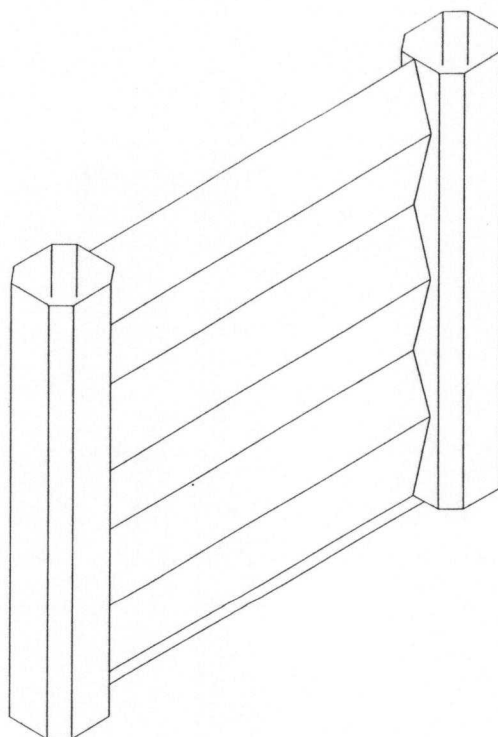
Os primeiros silos construídos em aço foram executados em células de seções circulares isoladas (FIG.1.1-a). No entanto, esta forma apresenta um inconveniente: a área do terreno não é totalmente aproveitada, principalmente em indústrias onde se deseja que as células fiquem justapostas e independentes.



**FIGURA 1.1 - Sistemas celulares de silos; a) Unicelulares; b) Multicelulares**

Outra desvantagem dos silos circulares está relacionado com os métodos de fabricação, manutenção e condições de transporte dos elementos estruturais. Células de pequenas dimensões podem ser transportadas, já montadas, a partir das fábricas, embora a relação peso/volume seja desfavorável. Por outro lado, células de grandes dimensões podem ser fabricadas em elementos isolados, para posteriores transporte e montagem no canteiro de obras. Se o objetivo for obter células de diâmetros diferentes, não se conseguem padronizações dos painéis nos processos de fabricação, pois é necessário adotar raios de curvaturas diferentes (IMMENGA, 1973).

Os inconvenientes decorrentes da utilização de células de seções circulares podem ser amenizados aproveitando-se as vantagens do sistema de painéis modulados (FIG.1.2) para células de seções quadradas ou retangulares (FIG.1.1-b).

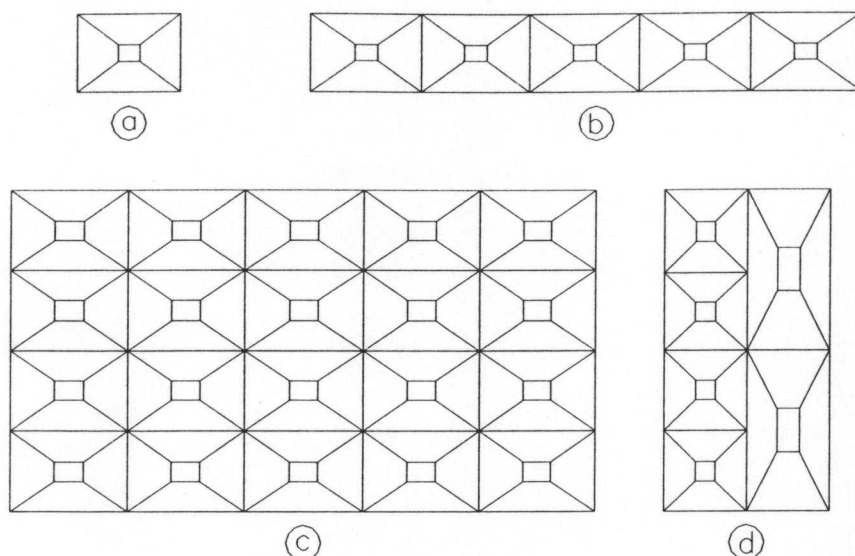


**FIGURA 1.2 - Painel modular**

Na Europa e nos Estados Unidos, esta nova concepção (FIG.1.3) de projetar silos tem aumentado, nas últimas décadas, de forma decisiva, nos diversos campos da indústria.

Atualmente, este tipo de silo tem-se tornado imprescindível nos modernos processos industriais de armazenamento, fabricação, ensacamento e expedição a granel. Os painéis destes tipos de silos são pré-fabricados em fábricas de estruturas metálicas para, depois, serem transportados e montados no local da obra. Com as novas e modernas técnicas de ligações por parafusos, facilita-se a mão de obra e diminui-se o tempo de montagem em até 100% quando comparados com a solda elétrica.

Do ponto de vista estático, os silos de células circulares são mais favoráveis à resistência, pois absorvem os esforços de tração pelo efeito de membrana enquanto que os painéis planos de silos de células retangulares ficam solicitados pelo efeito combinado da tração com a flexão. No entanto, para este último caso a resistência do painel pode ser compensada usando-se placas corrugadas ou com enrijecedores.



**FIGURA 1.3 - Tipos de sistemas de silos de seções retangulares. a) Célula única; b) Fila única de células; c) Células múltiplas; d) Células quadradas e retangulares**

Os silos metálicos apresentam, entre outras, as seguintes vantagens:

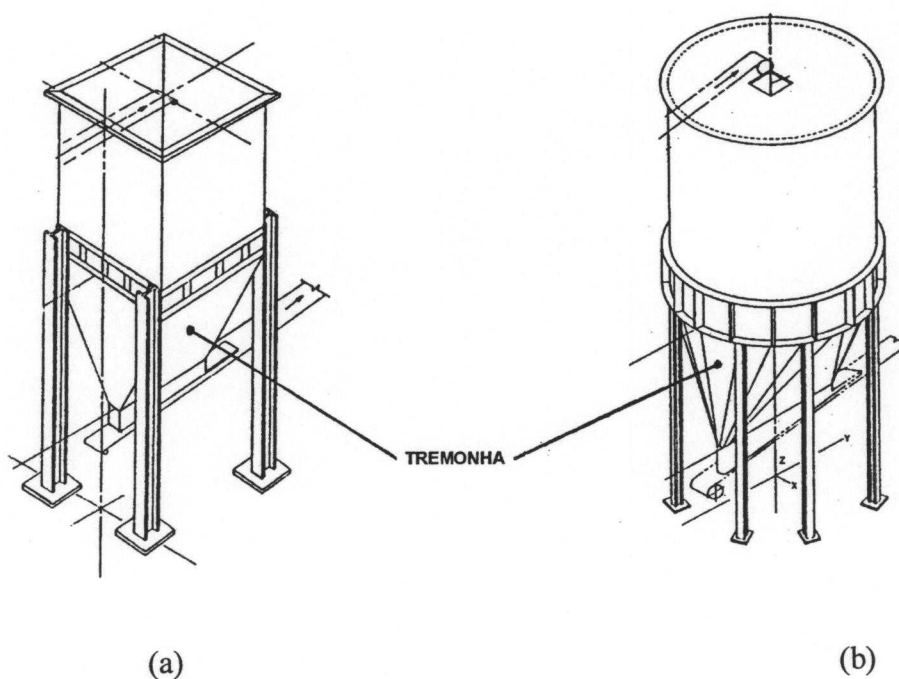
- o peso próprio da superestrutura é menor quando comparado com os de outros materiais, possibilitando fundações menos onerosas;
- a montagem é relativamente rápida;
- quando se utilizam aços resistentes à corrosão devido a fatores atmosféricos, a vida útil destes silos é maior do que para outros tipos de materiais;
- podem ser fabricados em série influenciando, favoravelmente, no custo final;
- podem ser desmontáveis quando for de interesse o armazenamento temporário;
- podem ser aumentados ou diminuídos sem interferir nos processos de fabricação;

- a capacidade de armazenamento é maior para estes tipos de silos do que para os de qualquer outro material, pois as espessuras das placas de aço são notavelmente menores;

- permitem, sobretudo, as conservações dos produtos mantendo-os em atmosfera neutra, seguros e suficientemente protegidos da umidade do meio ambiente (LAFITE, 1973).

### 3 - FLUXOS

O primeiro objetivo no projeto de silos é assegurar que o produto armazenado fluirá por gravidade sem a ocorrência de obstruções do fluxo. Neste contexto, o fundo de um silo pode ser plano ou convergente. O fundo convergente recebe a denominação de TREMONHA (Fig.1.4), cujas formas mais comuns são as tronco-cônicas e as tronco-piramidais.

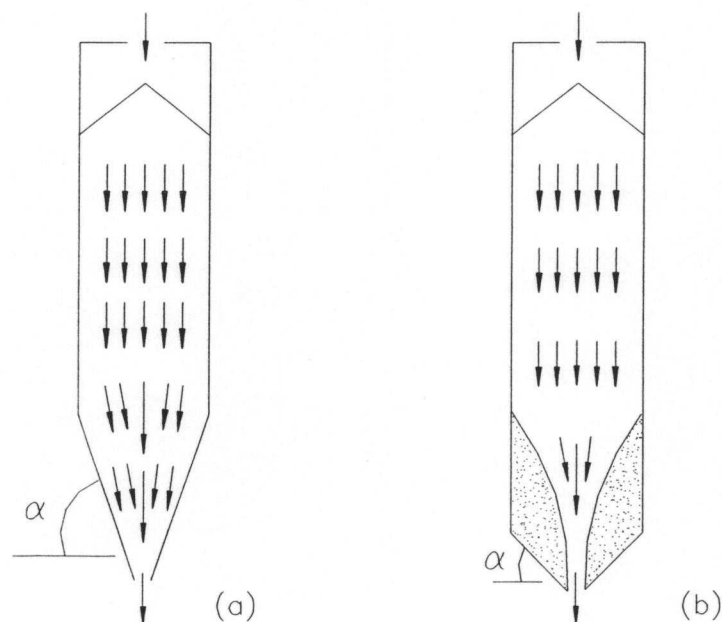


**FIGURA 1.4 - Silos metálicos. a) Retangular com tremonha em cunha com duas paredes verticais, b) Cilíndrico com tremonha do tipo cinzel (Fonte: NEFF & HUSS, 1983.a, 1983b).**

O tipo de fluxo determina as características de descarga do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento (inertes) e se o silo pode ser esvaziado completamente. Também determina a distribuição de pressões nas paredes do silo e fundação e a integridade e custo da construção.

A determinação do tipo de fluxo deve ser feita enquanto o silo está sendo projetado ou selecionado, ou quando são previstas mudanças em sua estrutura ou na manipulação dos produtos a serem armazenados (CALIL, 1990).

Existem basicamente, dois tipos básicos de fluxos: o fluxo de massa e o fluxo de funil. Estes são ilustrados na Figura 1.5.



**FIGURA 1.5 - Tipos básicos de fluxos. a) Fluxo de massa, b) Fluxo de funil.**

No Fluxo de Massa (FIG.1.5-a), praticamente, todo o produto ficará em movimento durante a descarga. Este tipo de fluxo é o ideal por possuir as seguintes características:

- o fluxo é uniforme e bem controlado;
- é um tipo de fluxo onde a primeira porção de produto a entrar será a primeira a sair e pode ser utilizado com vantagens no armazenamento de produtos granulares que se deterioram com o tempo e/ou que se segregam durante o carregamento e/ou descarregamento;



- não existem regiões de sobrecargas no interior do silo; conseqüentemente, haverá consolidação mínima no repouso;

- as pressões, em qualquer seção transversal horizontal das tremonhas, são relativamente uniformes, causando consolidação e permeabilidades também uniformes;

Por outro lado, o Fluxo de Funil (FIG.1.5-b) ocorre quando o produto flui da superfície para um canal vertical central que se forma no interior do silo durante a descarga. Este tipo de fluxo possui as seguintes características:

- a seqüência do fluxo é entendido como sendo a primeira porção de produto granular a entrar sendo a última a sair;

- existirão regiões inertes onde, dependendo das características do produto, poderão ocorrer degradações com o tempo;

- para produtos que se segregam durante o carregamento, não ocorrerá nova mistura na tremonha;

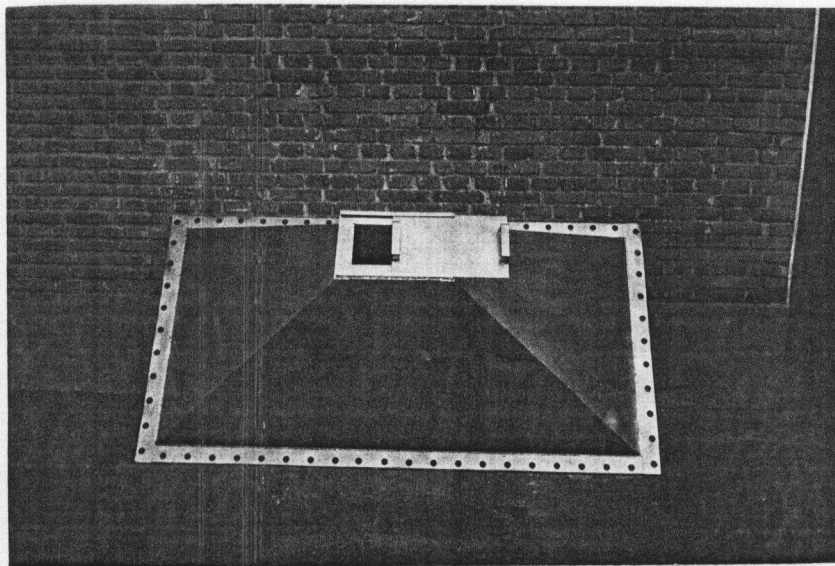
- o fluxo médio tende a ser irregular;

- o fluxo médio irregular provoca diminuição da aeração do produto;

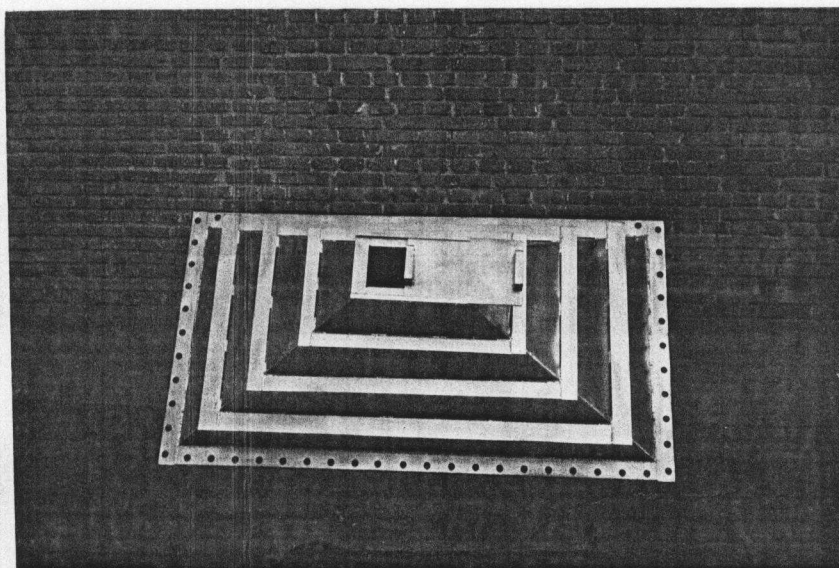
- o fluxo será dificultado devido às regiões de produtos inertes. Conseqüentemente, haverá tendência ao aparecimento de tubos estáveis com suficiente consolidação (PIPING).

#### 4 - TREMONHA

Neste trabalho, estuda-se o comportamento estrutural das TREMONHAS tronco-piramidais não-enrijecidas (FIG.1.6) e enrijecidas (FIG.1.7).



**FIGURA 1.6 - Tremonha tronco-piramidal não-enrijecida**



**FIGURA 1.7 - Tremonha tronco-piramidal enrijecida**

Pela bibliografia disponível, nota-se que muitos casos de ruínas em silos metálicos se devem a descuidos relativos às considerações de projetos ou às ineficiências dos critérios e formulações existentes para o dimensionamento dos elementos estruturais. Assim, pesquisas relativas às tremonhas justificam-se por possibilitarem:

- definição do tipo de fluxo durante as descargas;
- geometrias mais adequadas e seções transversais mais racionais para os elementos estruturais;
- cálculos mais seguros e com modelagem mais adaptada à realidade prática;
- economia de material (chapas, soldas, parafusos, enrijecedores);
- acompanhamentos das evoluções das pesquisas internacionais;
- diretrizes para novas pesquisas na área de silos com os propósitos de implementação da futura norma brasileira;
- avanços científicos que permitam colocar nosso país entre aqueles que, atualmente, detêm as tecnologias sobre os silos.

Este trabalho tem os seguintes objetivos:

- estudar o comportamento estrutural de tremonhas piramidais através de métodos analíticos, numéricos e experimentais;
- estudar os tipos de seções transversais e espaçamentos mais adequados para os enrijecedores das tremonhas;
- fazer a análise técnica e econômica da interação entre a espessura das placas e os espaçamentos e dimensões de enrijecedores;

- desenvolver modelos analíticos e experimentais para a elaboração de formulações para projetos;
  
- comparar os resultados teóricos e experimentais para analisar a validade dos modelos e métodos de cálculos adotados;
  
- propor o método de cálculo mais adequado baseado no estudo realizado.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 1 - INTRODUÇÃO

A TREMONHA é a principal responsável pelo êxito de funcionamento dos silos. É ela que provoca a mudança de direção do fluxo do produto armazenado para a boca de saída. As formas e rugosidades de suas paredes basicamente definem a facilidade de ocorrência do fluxo.

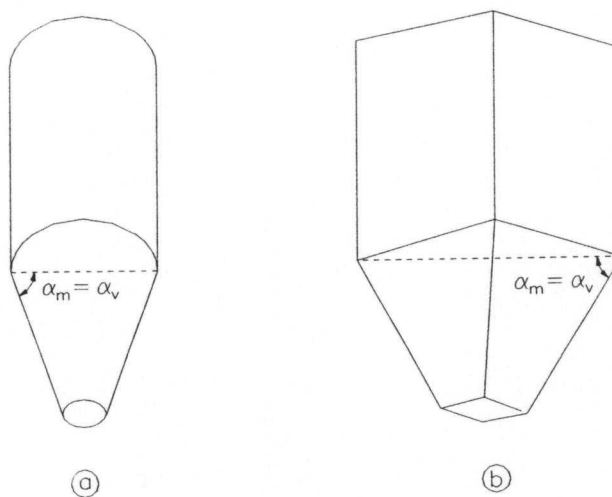
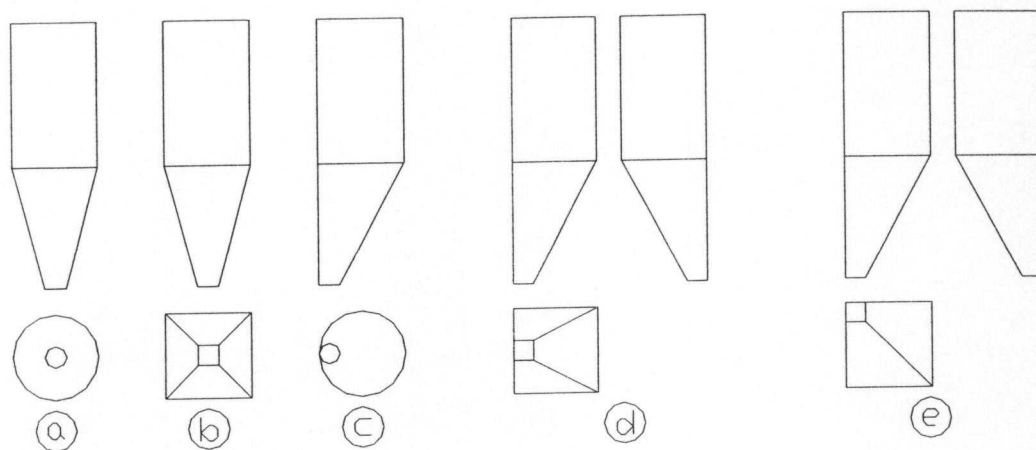


FIGURA 2.1 - Formas básicas de tremonhas: a) Cônica; b) Piramidal

As formas básicas mais usuais para tremonhas são a tronco-cônica e a tronco-piramidal (FIG.2.1), cada qual com suas peculiaridades funcionais e com variações

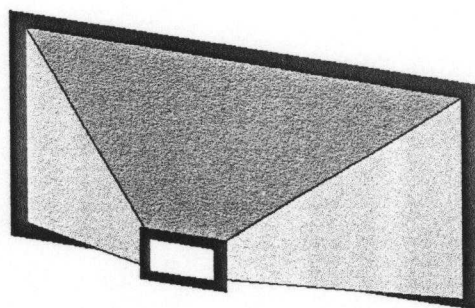
geométricas de simetria e assimetria da abertura de descarga, permitindo o melhor desempenho do fluxo pretendido (FIG.2.2).

Estruturalmente, as tremonhas podem ter distintos comportamentos. As tremonhas cônicas ficam solicitadas à tração axial e a duas tensões principais (circunferencial e meridional). Normalmente, elas não são enrijecidas, exceto nas aberturas de descargas.

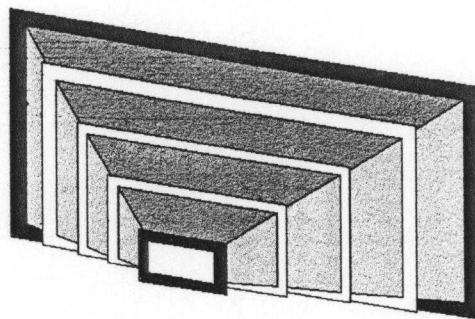


**FIGURA 2.2 - Tremonhas simétricas (a, b); Tremonhas assimétricas (c, d, e)**

Nas tremonhas piramidais não-enrijecidas (FIG.2.3) e nas enrijecidas (FIG.2.4) a flexão estará sempre combinada com a tração.



**FIGURA 2.3 - Tremonha piramidal não-enrijecida**



**FIGURA 2.4 - Tremonha piramidal enrijecida**

Para o caso de tremonhas enrijecidas de silos metálicos, normalmente, assume-se que as chapas estarão solicitadas por flexo-tração, predominantemente na direção meridional e flexo-tração nos enrijecedores. As paredes finas permitem grandes deslocamentos antes de trabalharem pelo efeito membrana. No entanto, os grandes deslocamentos podem ser evitados projetando-se, adequadamente, os enrijecedores e adotando-se espessuras de chapas mais racionais (CARSON, 1993).

Outra característica estrutural importante são as solicitações de flexo-compressão nas vigas de transição provocadas pelas ações atuantes nas paredes das tremonhas.

## 2 - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PRODUTOS SÓLIDOS

As propriedades físicas dos produtos sólidos influenciam a fluabilidade do produto e as forças que o mesmo aplica nas paredes do corpo e da tremonha do silo. Obviamente, estas propriedades variarão de um produto para outro mas podem variar, também, dentro de um mesmo produto supostamente uniforme. As propriedades físicas podem variar com o tempo, grau de compactação e variações climáticas (GAYLORD & GAYLORD, 1984).

O campo da mecânica dos solos teve uma influência significativa no desenvolvimento de pesquisas na área dos produtos sólidos (bulk solids). Porém, enquanto a mecânica dos solos preocupa-se com a condição do solo antes da ruptura, os produtos

sólidos preocupam-se com a condição em que podem ocorrer a ruptura e o fluxo (ROBERTS, 1995).

Foi Jenike que, a partir de 1952, investigou a possibilidade de usar os equipamentos da mecânica dos solos para determinar as propriedades de fluxo. No entanto, os níveis de tensões nos produtos armazenados em silos são menores do que em solos. Estes equipamentos, em suas versões originais, provaram ser insatisfatórios para produtos sólidos (BENINK, 1989).

As propriedades físicas mais importantes são: o peso específico ( $\gamma$ ), o ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ), o efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ), o ângulo de atrito do produto com a parede ( $\phi_w$ ) e o coeficiente de atrito entre o produto estocado e a parede do silo ( $\mu$ ). Os procedimentos para a determinação destas e de outras propriedades físicas dos produtos sólidos podem ser encontrados em MILANI (1993).

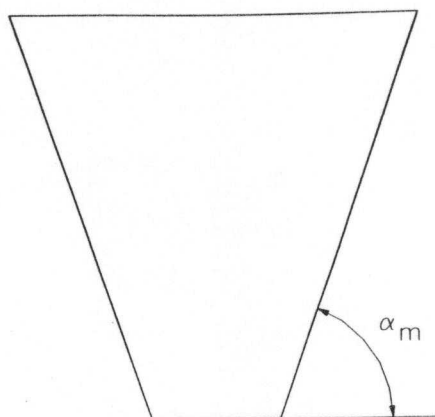
Algumas referências bibliográficas (SAFARIAN & HARRIS, 1985; MILANI, 1993) fornecem tabelas com valores típicos das propriedades físicas para vários tipos de produtos; no entanto estas tabelas devem ser usadas com prudência e, sempre que possível, deve-se recorrer aos ensaios.

### **3 - GEOMETRIAS**

#### **3.1 - Generalidades**

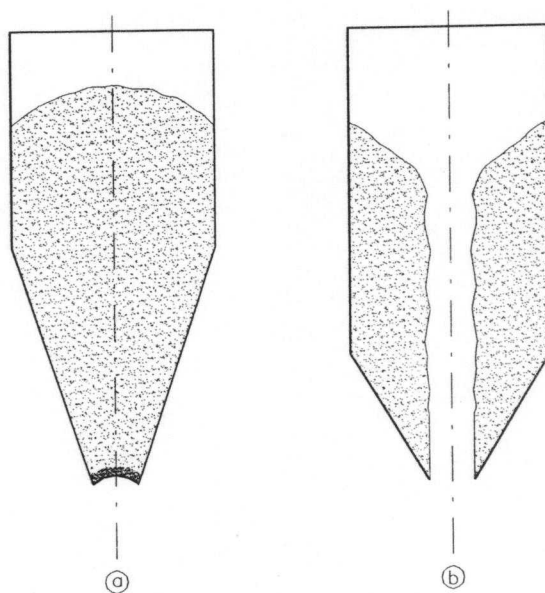
A seção transversal adotada para o corpo do silo é a primeira referência para a escolha da seção transversal da tremonha. Outras variações de seções são definidas em projetos. Posteriormente, definem-se o ângulo de inclinação da parede da tremonha com a horizontal e as dimensões da boca de saída (FIG.2.5).





**FIGURA 2.5 - Ângulo de inclinação da parede da tremonha**

A boca de saída da tremonha deve ter dimensões suficientes para evitar a obstrução do fluxo devido a formações de arcos ou abóbadas (ARCHING) (FIG.2.6-a), cúpulas (DOMING) e tubos estáveis (PIPING) (FIG.2.6-b).

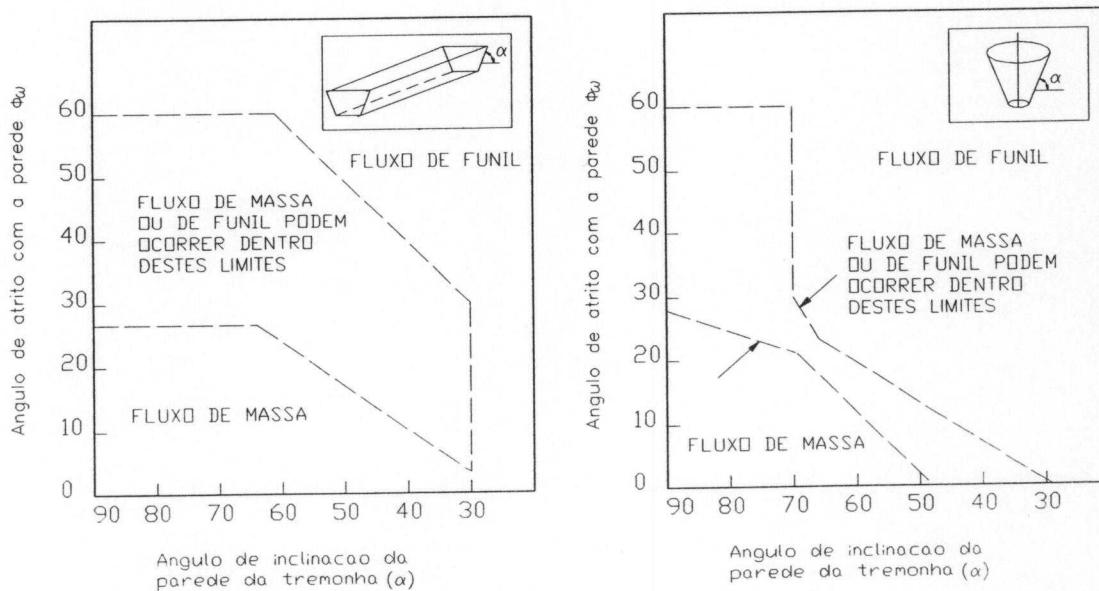


**FIGURA 2.6 - Tipos de obstruções de fluxo: a) Arco coesivo; b) Tubo**

A escolha da geometria da tremonha depende do tipo de fluxo definido por critérios técnicos. Em geral, o fluxo de massa é usado para produtos que requerem

controles de vazão, segregação de partículas e pouco tempo de armazenamento enquanto que, para o fluxo de funil, os produtos não exigem aqueles controles e podem ter um fluxo livre menor (ROBERTS, 1987), (GAYLORD, 1984).

“As normas internacionais, de uma maneira geral, apresentam, basicamente, dois gráficos para a determinação do tipo de fluxo que irá ocorrer no silo. Estes gráficos fornecem o tipo de fluxo em função do ângulo de atrito com a parede, o ângulo de inclinação das paredes da tremonha e o tipo de tremonha (cônicas ou retangulares)” (CALIL, 1990). A Figura 2.7 mostra dois destes gráficos extraídos do EUROCODE 1 / N108/1993.



**FIGURA 2.7 - Determinação do tipo de fluxo**

Uma teoria bastante reconhecida nesta área é a de WALKER (1966). Suas formulações não fornecem diretamente os valores-limites para os ângulos de inclinações das paredes de tremonhas mas, através de ábacos, fixam-se limites práticos para os mesmos.

### 3.2 - Ângulos das tremonhas em fluxos de massa ou de funil

#### a) Ângulos das tremonhas em fluxo de massa

Para tremonhas piramidais, o ângulo interno  $\alpha_m = \alpha_v$  (FIG.2.1 e 2.5) do trapézio diagonal das mesmas, deve ser determinado como para tremonhas cônicas. Ou seja:

$$\alpha_m = 0.5 \cos^{-1} \left( \frac{1 - \text{sen } \phi_{iu}}{2 \text{sen } \phi_{iu}} \right) + \beta, (\text{graus}) \quad (01)$$

onde:

$$2\beta = \phi_{wu} + \text{sen}^{-1} \left( \frac{\text{sen } \phi_{wu}}{\text{sen } \phi_{wu}} \right), (\text{graus}) \quad (02)$$

$\alpha_m$  = menor ângulo da tremonha com a horizontal para fluxo de massa, em graus;

$\phi_{iu}$  = valor superior do efetivo ângulo de atrito interno do produto, em graus.

Se  $\phi_{iu} < 25^\circ$ , então considera-se  $\phi_{iu} = 25^\circ$  na equação 02;

$\phi_{wu}$  = valor superior do ângulo de atrito com a parede, em graus.

Os ângulos  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são aqueles definidos pelas linhas de máximo declive das paredes com as horizontais que passam pelo centro de gravidade da maior seção transversal da tremonha. Para duas paredes adjacentes, estes ângulos estão relacionados com  $\alpha_v$  por:

$$\cot^2 \alpha_v = \cot^2 \alpha_1 + \cot^2 \alpha_2 \quad (03)$$

O ângulo de inclinação  $\alpha_m$  deve ser escolhido pelo menos com  $3^\circ$  a mais do que o dado pela equação 01, para evitar instabilidades no fluxo. A margem de segurança deve

ser aumentada para  $5^\circ$  ou mais, para materiais com características variáveis (CALIL, 1990).

### b) Ângulos das tremonhas em fluxos de funil

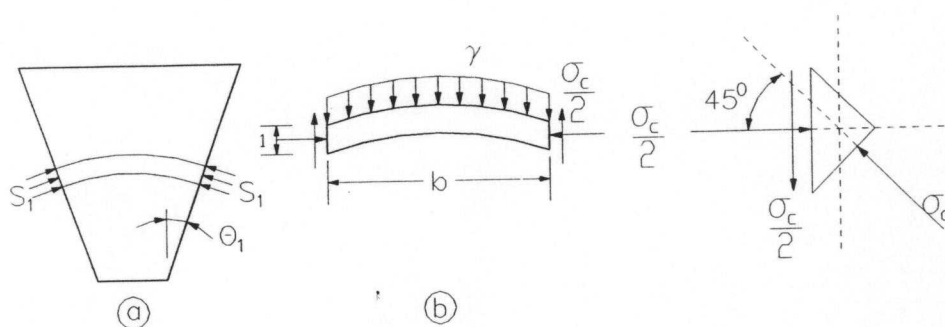
O fluxo de funil não se desenvolve ao longo das paredes da tremonha, então ele não fica diretamente influenciado pelo ângulo da mesma. No entanto, se for requerida a descarga completa do silo, sem equipamentos adicionais, deve ser usado um ângulo de (CALIL, 1990):

$$\alpha_m = 25^\circ + \phi_{wu} \quad (04)$$

### 3.3 - Boca de descarga para tremonhas em fluxos de massa ou de funil

#### a) Boca de descarga para tremonhas em fluxo de massa

A Figura 2.8-a mostra um arco ou cúpula transversalmente à uma tremonha. O produto armazenado tenderá a formar um arco se a tremonha tiver duas paredes planas inclinadas e duas verticais. Se a tremonha for cônica o produto consolidado tenderá a formar uma cúpula.



**FIGURA 2.8 - Arco ou Cúpula transversalmente a uma tremonha**

A verificação dos efeitos citados é necessária para o projeto de silos trabalhando em fluxo de massa ou de funil.

Se a obstrução provocada pelo produto consistir de um arco ou cúpula auto-sustentável, então, nos limites superiores e inferiores das superfícies livres, a menor tensão principal é zero em qualquer seção e a maior tensão principal é tangente ao arco. O cisalhamento máximo para este sistema de tensões está sobre um plano a 45° em relação à direção principal e é igual à metade da maior tensão principal. O vão máximo do arco, que pode ser auto-sustentável sob este sistema de tensões, é atingido quando os cisalhamentos nas seções verticais dos apoios atingem seus valores máximos. Esta condição ocorre quando a maior tensão principal nos apoios iguala à tensão de deslizamento inconfina (resistência ao deslizamento) ( $\sigma_c$ ) do produto armazenado e atua a 45° em relação à horizontal (FIG.2.8-b). A tensão de cisalhamento correspondente na seção vertical é  $\sigma_c/2$ . O equilíbrio das forças verticais de um produto com peso específico " $\gamma$ ", formando um arco de espessura vertical unitária sobre uma abertura retangular de largura " $b$ " e comprimento " $l$ ", fornece (GAYLORD & GAYLORD, 1984; TROITSKY, 1982):

$$2 \cdot \frac{\sigma_c}{2} \cdot l \cdot 1,0 = \gamma \cdot b \cdot l \cdot 1,0$$

portanto, tem-se

$$b = \frac{\sigma_c}{\gamma} \tag{05}$$

Analogamente, para uma cúpula formada sobre uma abertura circular de diâmetro " $d$ ", tem-se:

$$1,0 \cdot 2 \pi \cdot r \cdot \frac{\sigma_c}{2} = \gamma \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot 1,0$$

o que fornece

$$d = \frac{2\sigma_c}{\gamma} \quad (06)$$

De acordo com Jenike, o diâmetro de saída necessário também é função do ângulo  $\alpha$  (FIG.2.8-a) e as equações (05) e (06) são corretas somente para  $\alpha = 0$ . Sua solução fornece valores de "b" para tremonhas em cunha variando linearmente de  $\sigma_c / \gamma$  em  $\alpha = 0$  até  $1.3\sigma_c / \gamma$  em  $\alpha = 60^\circ$ . Valores de "d" para tremonhas cônicas variam de  $2\sigma_c / \gamma$  em  $\alpha = 0$  até  $2.6\sigma_c / \gamma$  em  $\alpha = 40^\circ$ .

Em trabalhos mais recentes publicados por Jenike e Johanson (GAYLORD & GAYLORD, 1984) são sugeridas as seguintes dimensões, respectivamente, para aberturas retangulares e circulares:

$$b \geq \frac{1.3\sigma_c}{\gamma} \quad (07)$$

$$d \geq \frac{2.2\sigma_c}{\gamma} \quad (08)$$

O valor de  $\sigma_c$ , usado nas equações (05), (06), (07) e (08), é determinado através dos conceitos de "fator fluxo" (ff) e "Função Fluxo" (FF).

O "fator fluxo" é definido como sendo a relação entre a tensão de consolidação, que pode ser desenvolvida em um arco ( $\sigma_1$ ), e a tensão atuante nos apoios do arco ( $\bar{\sigma}_1$ ) (FIG.2.9). Ou seja,

$$ff = \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}_1} \quad (09)$$

A teoria de Walker (1966) fornece as seguintes expressões para o "fator fluxo":

$$ff = \frac{1 + \operatorname{sen} \phi_e}{\Delta} \quad \alpha + \phi_w \geq 45^\circ \quad (10)$$

$$ff = \frac{1 + \operatorname{sen} \phi_e}{\Delta} \operatorname{sen} 2(\alpha + \phi_w) \quad \alpha + \phi_w < 45^\circ \quad (11)$$

onde,

$$\Delta = 2 \operatorname{sen} \phi_e \cdot \operatorname{sen} 2(\alpha + \varepsilon) - \tan \alpha [1 - \operatorname{sen} \phi_e \cdot \cos 2(\alpha + \varepsilon)]$$

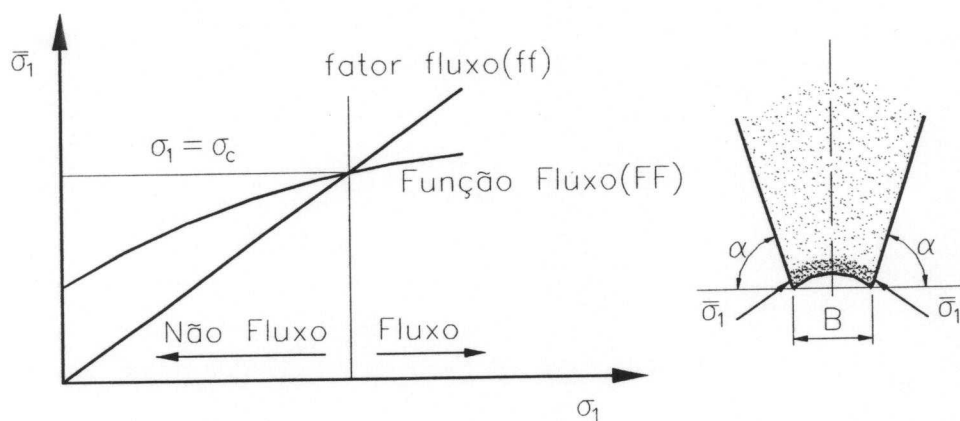
$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left[ \phi_w + \operatorname{arcsen} \left( \frac{\operatorname{sen} \phi_w}{\operatorname{sen} \phi_e} \right) \right]$$

sendo,

$\phi_e$  = efetivo ângulo de atrito interno

$\phi_w$  = ângulo de atrito do produto com a parede do silo.

O fator fluxo é constante para uma dada tremonha e, para efeitos de projeto, pode ser representado graficamente como mostrado na Figura 2.9.

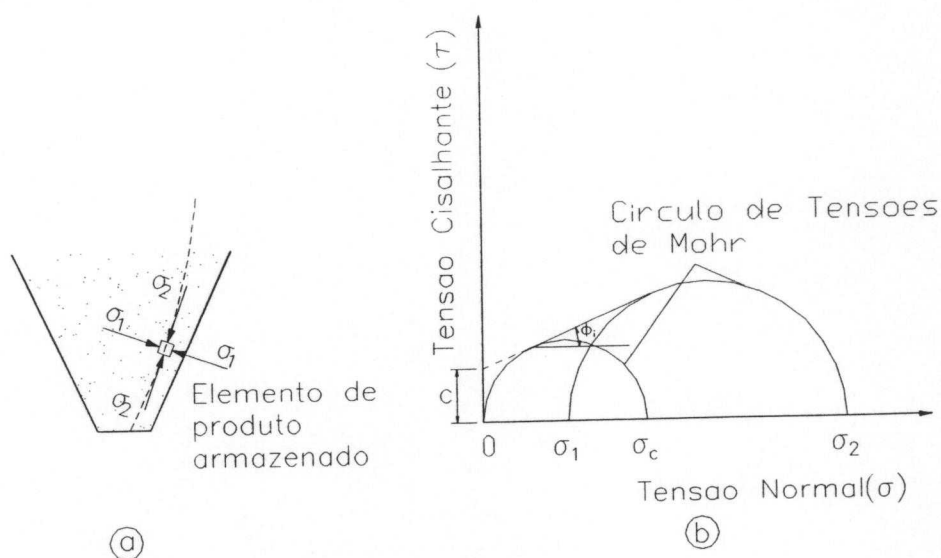


**FIGURA 2.9 - Função Fluxo (FF) e fator fluxo (ff) da tremonha (Condição para fluxo de massa)**

Quando a tensão adquirida em um arco estável " $\bar{\sigma}_1$ " for igual à tensão ao deslizamento inconfina da " $\sigma_c$ ", tem-se a condição crítica para que ocorra o fluxo de um produto.

A "Função Fluxo" (FF) é uma curva (FIG.2.9) da tensão ao deslizamento inconfina da ( $\sigma_c$ ) em função da maior tensão principal de consolidação ( $\sigma_1$ ). A resistência e propriedades de fluxo de um produto são definidos por sua Função Fluxo, que, normalmente, é obtida, através de ensaios, usando equipamentos de cisalhamentos diretos como o de Jenike ou o de Casagrande. A curva da Função Fluxo é determinada a partir do lugar geométrico de deslizamento (Yield Locus -YL).

Um elemento de produto armazenado em um silo está solicitado pelas tensões principais maior e menor (FIG.2.10-a) e são indicadas pelo semi-círculo de Mohr (FIG.2.10-b). Se o elemento, para esta condição de consolidação, é cisalhado sob várias cargas normais, então é obtido o lugar geométrico de deslizamento (FIG.2.10-b). O semi-círculo de Mohr, através da origem, define a tensão de deslizamento inconfina da " $\sigma_c$ ", que representa a resistência do produto em uma superfície livre. Estendendo o lugar geométrico para interceptar o eixo " $\tau$ ", é definida a coesão aparente  $C$ . O ângulo " $\phi_i$ " é o ângulo de atrito interno (FIG.2.10-b) (CALIL, 1990).



**FIGURA 2.10 - Lugar geométrico de deslizamento do produto (Fonte: CALIL, 1990)**



Conhecidas as curvas da função fluxo e do Fator Fluxo, o valor crítico de “ $\sigma_c$ ” é determinado pela interseção das mesmas (FIG.2.9). Esta figura caracteriza, também, a situação de fluxo e não-fluxo do produto armazenado. Onde a linha de ff varia abaixo da curva de FF, as tensões no arco são insuficientes para causar deslizamento e fluxo. Por outro lado, onde a linha de ff varia acima da curva de FF, as tensões no arco excedem a resistência do material e o fluxo ocorrerá (CALIL, 1990)(GAYLORD, 1984)(ROBERTS, 1987) (MILANI, 1993).

### b) Boca de descarga para tremonhas em fluxo de funil

A dimensão mínima da boca de descarga para tremonhas em fluxo de funil deve ser calculada, principalmente, para evitar a formação do efeito tubo (PIPING). Este efeito consiste na formação de um tubo estável acima da abertura da boca de descarga (FIG.2.6-b) impedindo o fluxo normal do produto.

O equilíbrio de um arco transversal a um tubo de diâmetro “D” é mostrado na Figura 2.11. O equilíbrio das forças relativas ao peso do arco de espessura unitária e as forças de cisalhamentos nas paredes, fornecem (JENIKE, 1980):

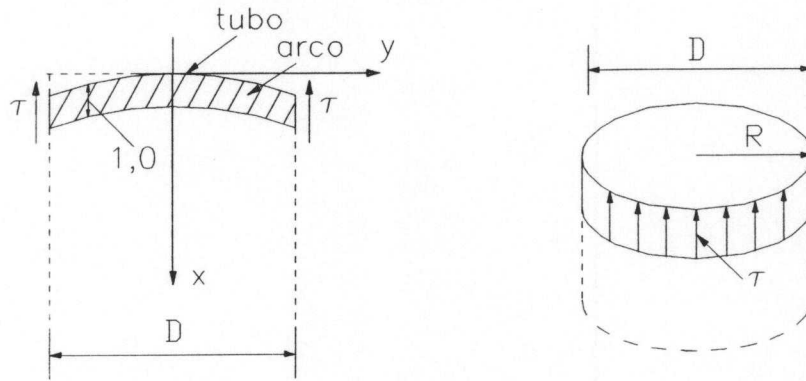
$$2 \cdot \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot 1,0 \cdot \tau = \gamma \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot 1,0;$$

portanto, tem-se:

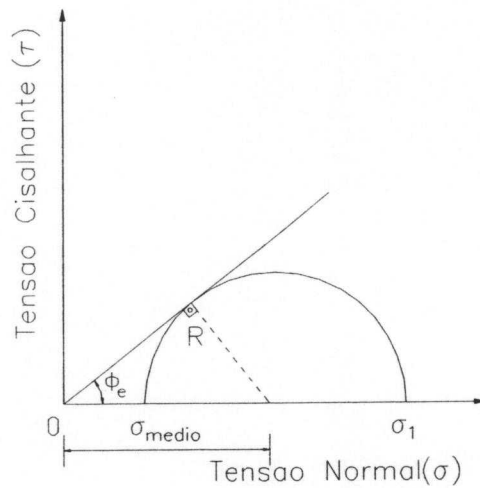
$$\tau = \frac{\gamma \cdot D}{4} \tag{12}$$

Esta tensão é igual ao raio do semi-círculo de Mohr (FIG.2.12) que, por geometria, possibilita determinar a maior tensão principal de consolidação nas paredes do tubo. Isto é:

$$\sigma_1 = \frac{\gamma \cdot D}{4} \left( \frac{1 + \sin \phi_e}{\sin \phi_e} \right) \quad (13)$$



**FIGURA 2.11 - Arco transversal a um tubo**



**FIGURA 2.12 - Círculo de Mohr**

As condições que levam à falha de um tubo circular vertical em um solo foram analisadas por JENIKE & YEN (1963). A maior tensão crítica na superfície interna do tubo pode ser determinada por:

$$\bar{\sigma}_1 = \frac{\gamma \cdot D}{G(\phi_i)} \quad (14)$$

onde  $\phi_i$  é ângulo de atrito interno do produto armazenado.

Quando  $\bar{\sigma}_1 = \sigma_c$ , tem-se:

$$D = \frac{\sigma_c}{\gamma} G(\phi_i) \quad (15)$$

onde  $G(\phi_i)$  é denominado de Fator Piping e não é conhecido explicitamente. Este fator pode ser determinado através de ábacos fornecidos por diversos autores (JENIKE, 1964; TROITSKY, 1982; GAYLORD & GAYLORD, 1984; ROBERTS, 1987). Através de uma expressão empírica,  $G(\phi_i)$  pode ser adequadamente descrito por (McLEAN, 1985):

$$G(\phi_i) = 0.7502e^{0.0387\phi_i} \quad (16)$$

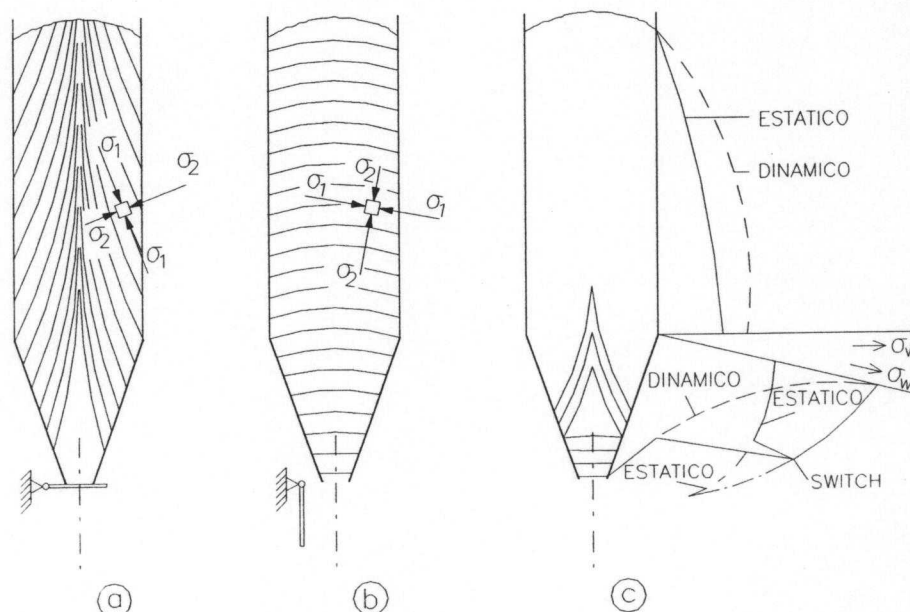
## 4 - AÇÕES

### 4.1 - Generalidades

Até pouco tempo, os calculistas assumiam que os produtos armazenados em silos comportavam-se como líquidos. Ensaio desenvolvidos por Roberts, em 1882, mostraram que esta hipótese era incorreta, pois, parte do peso do produto armazenado é transferida por atrito para as paredes do silo.

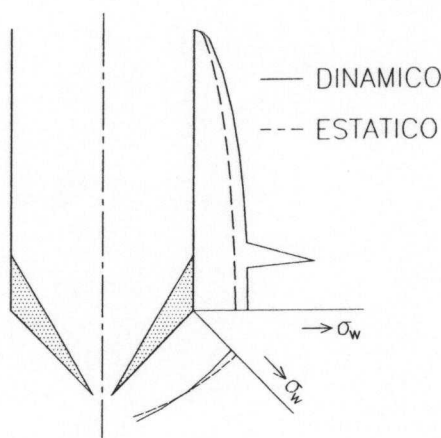
Janssen confirmou, teoricamente, em 1895 as hipóteses de Roberts. Já em 1896 houve comprovações de que as pressões durante a descarga ultrapassavam em muito as pressões em situações de cargas estáticas. Posteriormente, ensaios mostraram que as pressões, durante o descarregamento, poderiam ser de duas a quatro vezes maiores do que as pressões em estado estático (GAYLORD & GAYLORD, 1984).

Normalmente, durante o carregamento de um silo, aparece um estado de tensões ativo (ou estático) (FIG.2.13-a), enquanto que um estado de tensões passivo (ou dinâmico) (FIG.2.13-b) se desenvolve durante a descarga. Uma mudança de estado ativo para o passivo ocorrerá quando o silo for descarregado. Esta mudança do estado de tensões, normalmente, inicia-se na boca de saída e continua através da tremonha. Este comportamento das tensões é conhecido como “switch” e provoca autos picos de pressões (FIG.2.13-c). No entanto, a influência deste efeito sobre a estrutura da tremonha não é grande, pois a mudança do estado de tensões acontece rapidamente. No corpo do silo, a influência deste efeito sobre a estrutura é questionável. No caso do “efeito switch” parar na transição, o estado de tensões no corpo do silo permanece ativo, enquanto que o estado de tensões na tremonha permanece passivo durante a descarga.



**FIGURA 2.13 - Campo de tensões; a) Ativo; b) Passivo; c) Picos de pressões**

No caso de silos sujeitos a fluxos de funil, ocorrem altas pressões nas paredes, onde as zonas estagnadas atingem as paredes do corpo do silo (FIG.2.14). As pressões nas paredes da tremonha são amortecidas devido às zonas de estagnação e, conseqüentemente, não são tão altas como aquelas que ocorrem em silos com fluxo de massa (BENINK, 1989).



**FIGURA 2.14 - Pressões nas paredes para fluxo de funil**

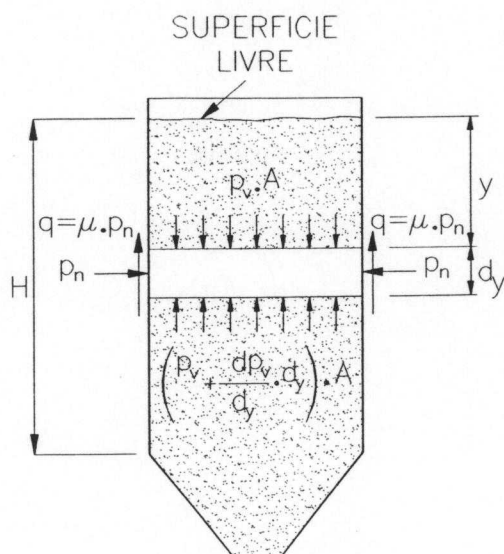
#### 4.2 - Pressões nas paredes verticais do corpo do silo

A teoria mais aceita para o cálculo das pressões em paredes verticais de silos foi proposta por Janssen em 1895.

Janssen determinou as pressões horizontal e vertical através do equilíbrio de forças verticais que atuam em uma camada horizontal de espessura infinitesimal do produto armazenado. Para demonstrar a sua teoria, Janssen considerou as seguintes hipóteses (TROITSKY, 1982; FORTES FILHO, 1985):

- a pressão vertical, em uma seção transversal horizontal do produto armazenado, é constante na seção;
- denominado de “k” a razão entre as pressões normal ( $p_n$ ) e vertical ( $p_v$ ), “k” terá valor constante para qualquer profundidade ( $k = p_n / p_v$ ).

Sobre a camada infinitesimal (FIG.2.15) atuam o peso próprio da mesma, as forças nas faces superior e inferior devidas ao produto e a força devida ao atrito entre o produto e a parede.



**FIGURA 2.15 - Forças agindo sobre uma camada infinitesimal**

Da Figura 2.15, tem-se:

$$q = \text{pressão de atrito sobre a parede} = \text{tg}\phi_w \cdot p_n = \mu \cdot p_n ;$$

$\gamma$  = peso específico do produto;

$A$  = área da seção transversal horizontal do silo;

$l$  = perímetro da seção transversal horizontal;

$y$  = altura do produto acima da seção transversal considerada.

Definindo “raio hidráulico” como sendo a relação entre a área da seção transversal e o perímetro da mesma ( $R = A / l$ ) e, sendo a força de atrito total dada por “ $q \cdot l \cdot dy$ ”, através do equilíbrio das forças na direção vertical chega-se à seguinte equação diferencial:

$$\frac{dp_v}{\left(\gamma - \frac{\mu \cdot k \cdot p_v}{R}\right)} = dy \quad (17)$$

Integrando-se a equação (17), tem-se:

$$\ln\left(\gamma - \frac{\mu \cdot k \cdot p_v}{R}\right) = -\frac{\mu \cdot k}{R} y + c \quad (18)$$

Quando  $y = 0$  tem-se  $p_v = 0$ , então  $c = \ln \gamma$  e, finalmente, chega-se à equação de Janssen:

$$p_v = \frac{\gamma \cdot R}{\mu \cdot k} \left(1 - e^{-\frac{\mu \cdot k}{R} y}\right) \quad (19)$$

Como  $k = p_n / p_v$ , tem-se:

$$p_n = \frac{\gamma \cdot R}{\mu} \left(1 - e^{-\frac{\mu \cdot k}{R} y}\right) \quad (20)$$

Percebe-se pelas expressões (19) e (20) que as pressões sofrem acréscimos que tornam-se cada vez menores com o aumento de “y”. Desprezando-se o termo exponencial para valores altos de “y” obtém-se:

$$p_{vmáx} = \frac{\gamma \cdot R}{\mu \cdot k} \quad (21)$$

$$p_{nmáx} = \frac{\gamma \cdot R}{\mu} \quad (22)$$

“O valor de “k” não foi especificado por Janssen, na sua teoria, estabelecendo que este valor deveria ser determinado, experimentalmente, para cada silo e produto a serem armazenados. De modo geral, escolhendo-se um valor conveniente para o “k”, pode-se obter uma razoável aproximação entre as pressões dadas pela teoria de Janssen e aquelas obtidas experimentalmente. Existem divergências entre pesquisadores para a obtenção da fórmula de “k”. A expressão mais utilizada é aquela proposta por KOENEN (1896), ou seja, o valor de “k” deve ser determinado de modo idêntico ao coeficiente de empuxo ativo da teoria de Rankine sobre empuxos de terra” (FORTES FILHO, 1985). Isto é, para o caso de paredes absolutamente lisas para as quais  $\phi_w = 0$ , tem-se (AYUGA, 1995):

$$k = \frac{1 - \operatorname{sen} \phi_i}{1 + \operatorname{sen} \phi_i} = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi_i}{2} \right) \quad (23)$$

Para o caso de paredes muito rugosas em que  $\phi_i = \phi_w$ , tem-se (AYUGA, 1995):

$$k = \frac{1 - \operatorname{sen}^2 \phi_i}{1 + \operatorname{sen}^2 \phi_i} \quad (24)$$

e para os casos intermediários, tem-se (AYUGA, 1995):

$$k = \frac{1 - m \cdot \operatorname{sen} \phi_i}{1 + m \cdot \operatorname{sen} \phi_i} \cos^2 \phi_w \quad (25)$$

onde,

$$m = \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \phi_w}{\tan^2 \phi_i}} \quad (26)$$

“Verifica-se, pelas expressões (19) e (20), que as pressões dependem do “raio hidráulico”. Sabendo-se que o “raio hidráulico” de uma célula quadrada é igual a “a/4”



(onde “a” é o lado do quadrado) e que o de uma célula circular é igual a “D/4” (onde “D” é o diâmetro do círculo), para células armazenando um mesmo produto, as pressões laterais serão iguais tanto para a célula quadrada como para a célula cilíndrica, quando “a” for igual a “D”, fato que não está de acordo com os resultados experimentais” (FORTES FILHO, 1985).

Os ensaios demonstram que em um silo retangular de largura “a” e comprimento “b”, para uma dada altura de produto armazenado, o empuxo em um dado ponto da parede menor mantém-se constante e igual ao que exerceria no mesmo ponto se o silo fosse quadrado de lado “a”, qualquer que seja a dimensão das paredes maiores (REIMBERT & REIMBERT, 1979).

Assim posto, determina-se a expressão do empuxo médio sobre as paredes maiores escrevendo que os empuxos sobre as paredes menores ( $p_{n_{máx,a}}$ ) e sobre as maiores ( $p_{n_{máx,b}}$ ), que atuam sobre uma fatia de mesma seção transversal da célula e de espessura infinitesimal igual a “dy”, são máximos quando o atrito correspondente a estes empuxos equilibra o peso da fatia considerada. Então, tem-se:

$$a \cdot b \cdot dy \cdot \gamma = p_{n_{máx,a}} \cdot 2a \cdot dy \cdot \mu + p_{n_{máx,b}} \cdot 2b \cdot dy \cdot \mu \quad (27)$$

Para um quadrado de lado “a” a expressão (22) fornece:

$$p_{n_{máx,a}} = \frac{\gamma \cdot R}{\mu} = \frac{\gamma \cdot a}{4\mu} \quad (28)$$

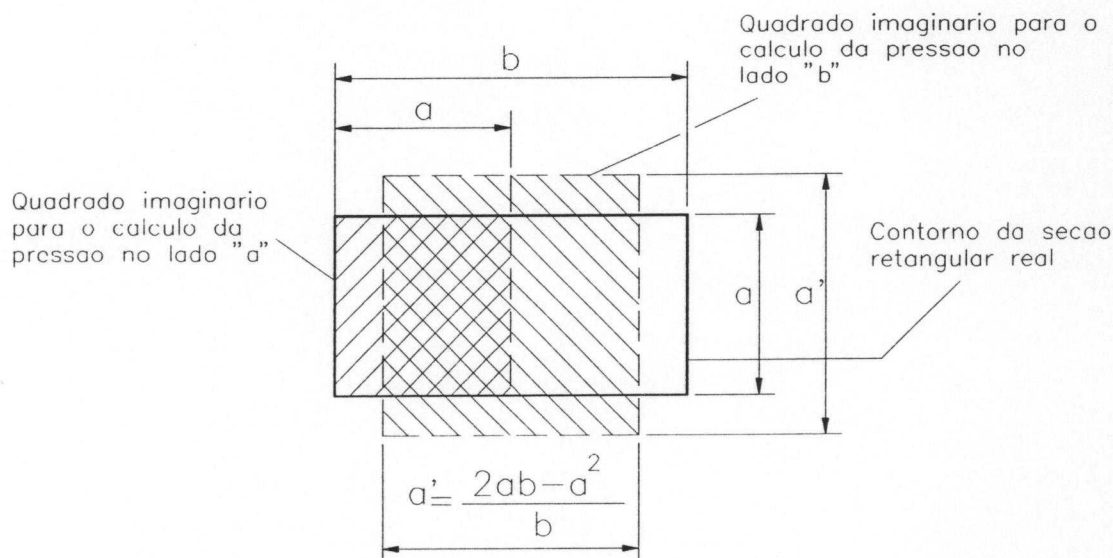
Levando-se (28) em (27) e isolando-se  $p_{n_{máx,b}}$  tem-se:

$$p_{n_{máx,b}} = \frac{\gamma}{4\mu} \cdot \frac{(2a \cdot b - a^2)}{b} \quad (29)$$

Se compararmos o valor de (29) com a expressão geral do empuxo máximo sobre os lados de um silo quadrado de lado "a" (EQ. 28), tem-se a expressão de a', adotada pela norma ACI 317-77:

$$a' = \frac{2a \cdot b - a^2}{b} \quad (30)$$

Desta forma, conclui-se que, para um silo de seção retangular, o empuxo sobre as paredes menores é igual àquele que exerceria em um silo de seção quadrada de lado "a", e, o empuxo médio sobre as paredes maiores é igual àquele que exerceria em um silo de quadrado imaginário, cujo lado é dado pela expressão (30) (FIG.2.16) (REIMBERT & REIMBERT, 1979).



**FIGURA 2.16 - Quadrados imaginários para os cálculos dos raios hidráulicos**

Nos silos, aparecem forças de compressão, por unidade de comprimento atuante, nas paredes verticais. Estas forças são provocadas pelo atrito entre o produto armazenado e as paredes do silo.

Em qualquer seção horizontal do silo a força de atrito é igual ao peso do produto acima da seção, cuja ordenada é "y" a partir da superfície, menos a pressão vertical resultante naquela seção (FORTES FILHO, 1985). Assim, tem-se:

$$F_a + p_v \cdot A = R_{\text{reação}} \quad (31)$$

Sabendo-se que  $R_{\text{reação}} = \gamma \cdot A \cdot y$ ,  $R = A/l$  e dividindo-se toda a expressão (31) pelo perímetro "l", a força de atrito " $F_a$ " será:

$$F = R(\gamma \cdot y - p_v) \quad (32)$$

Esta força pode ser também determinada através do conceito de força de atrito, ou seja (GAYLORD, 1984):

$$F_{\text{at}} = \mu \cdot p_n \quad (33)$$

Sendo "dy" uma faixa vertical infinitesimal, tem-se:

$$F = \int_0^y \mu \cdot k \cdot p_v \cdot dy \quad (34)$$

Levando-se a equação (19) em (34) e integrando-as, chega-se a:

$$F = R(\gamma \cdot y - p_v) \quad (35)$$

A pressão estática sobre o fundo plano é dada pela equação (19). No entanto, para silos retangulares, esta equação fornece pressões diferentes no fundo para regiões próximas dos lados menores e dos lados maiores. Frequentemente, assume-se que as pressões " $p_{va}$ " e de " $p_{vb}$ " atuam nas áreas " $A_a$ " e " $A_b$ ", respectivamente (FIG.2.17).

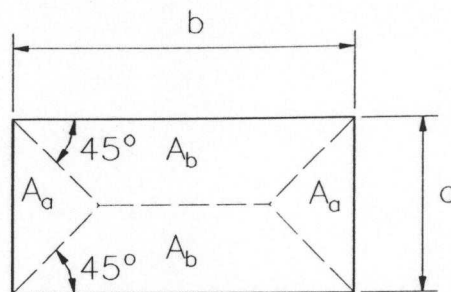


FIGURA 2.17 - Regiões de distribuição das pressões na seção transversal

### 4.3 - Pressões em paredes de tremonhas

#### 4.3.1 - Método de Baikov

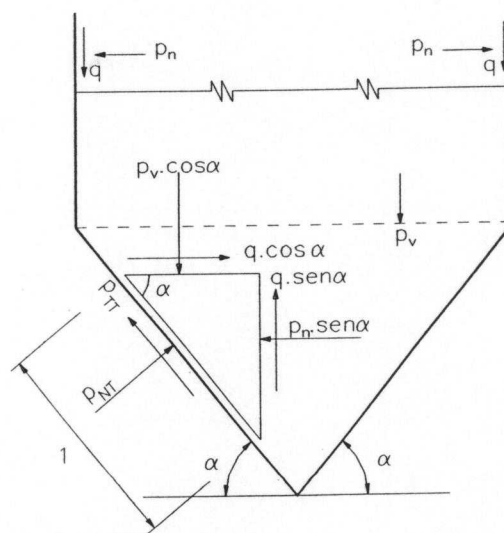
Neste método, também denominado de Método das Projeções, as pressões estáticas normal (horizontal) “ $p_n$ ” e verticais “ $p_v$ ”, sobre as paredes inclinadas da tremonha, podem ser calculadas pelas fórmulas de Janssen ou através de formulações desenvolvidas por outros pesquisadores. O “raio hidráulico” (R) pode variar ao longo da altura da tremonha, mas ele é usualmente considerado constante e igual ao da seção transversal do corpo do silo.

Baikov determinou as pressões normal “ $p_{NT}$ ” e tangencial “ $p_{TT}$ ” na superfície média das paredes de uma tremonha, fazendo-se a decomposição, nestas direções, das pressões “ $p_n$ ”, “ $p_v$ ” e “ $q$ ”. Ele não considerou a redução da seção transversal do corpo do silo, ou seja, é como se as paredes verticais da tremonha se prolongassem até o nível da abertura de saída (FORTES FILHO, 1985).

Considere as forças sobre um elemento triangular junto à parede de uma tremonha. Sendo unitária a área inclinada do elemento (FIG.2.18) e fazendo-se o somatório das forças que agem nesta área, nas direções normal e paralela à parede, têm-se:

$$p_{NT} = p_n \cdot \text{sen}^2 \alpha + p_v \cdot \text{cos}^2 \alpha - q \cdot \text{sen} 2\alpha \quad (36)$$

$$p_{TT} = q \cdot \text{cos} 2\alpha + \frac{1}{2} (p_v - p_n) \cdot \text{sen} 2\alpha \quad (37)$$



**FIGURA 2.18 - Forças sobre um elemento triangular na parede da tremonha  
(Fonte: GAYLORD & GAYLORD, 1984)**

Se o campo de pressão assumido for um campo de Rankine, ou  $q = 0$ , as equações deduzidas anteriormente reduzir-se-ão para:

$$p_{NT} = p_n \cdot \text{sen}^2 \alpha + p_v \cdot \text{cos}^2 \alpha \quad (38)$$

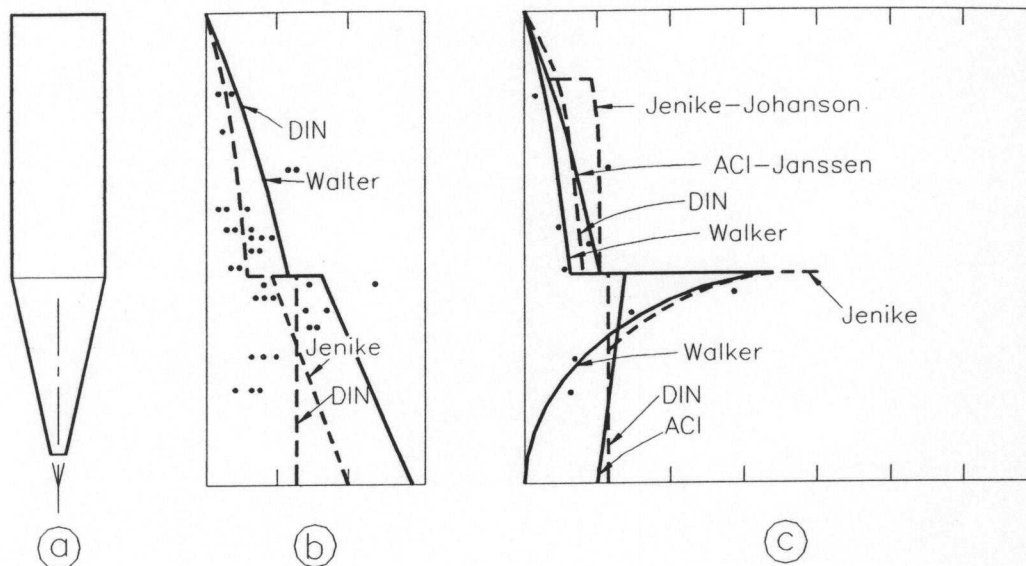
$$p_{TT} = \frac{1}{2} (p_v - p_n) \cdot \text{sen} 2\alpha \quad (39)$$

Com algumas modificações, estas expressões serviram de base para as formulações das normas DIN 1055-77 e ACI 313-77. No entanto, resultados experimentais mostram que as pressões nas paredes das tremonhas podem ser consideravelmente maiores.

#### 4.3.2 - Método de Walker

A teoria de WALKER (1966) é a mais simples e suficientemente precisa tanto para a condição de produto no estado estático como no dinâmico, de acordo com verificações

experimentais (FIG.2.19). Entre outras normas que utilizam esta teoria, pode-se citar a atual Norma Australiana AS 3774-1990.



**FIGURA 2.19 - Comparações entre as pressões teóricas e as de ensaios: b) No repouso; c) Na descarga (Fonte: GAYLORD & GAYLORD, 1984)**

Para o estado dinâmico (descarregamento) a teoria de Walker baseia-se nas seguintes hipóteses:

- as direções das tensões principais maior e menor estão no plano vertical próximo à seção da parede e estas definem o escorregamento do produto, independente da terceira tensão principal, perpendicular a este plano;

- o produto deve escorregar e ser capaz de deslocar independentemente das variações de seções transversais da tremonha;

- o produto terá características de fluxo de massa;

- supõe-se que as pressões verticais sobre um mesmo plano horizontal são constantes.

Das duas primeiras hipóteses, as tensões no produto “adjacente” à parede da tremonha podem ser representadas pelo Círculo de Mohr que tangencia o lugar geométrico de escorregamento do produto representado pela reta “OP” (FIG.2.20-b). A partir da terceira hipótese, as tensões “juntas” à parede devem ser representadas por um ponto do lugar geométrico de escorregamento da parede “OW”.

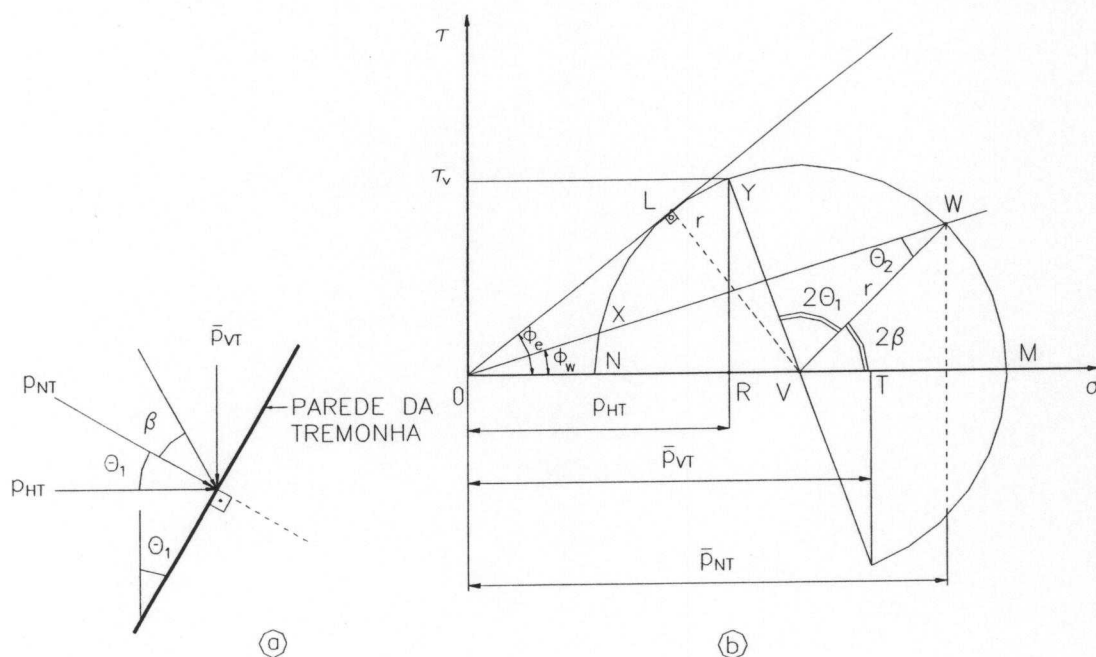


FIGURA 2.20 - a) Pressões sobre a parede; b) Círculo de Mohr (Fonte: WALKER, 1966)

A Figura 2.20-a ilustra a parede de uma tremonha fazendo um ângulo “ $\theta_1$ ” com a vertical e a maior tensão principal formando um ângulo “ $\beta$ ” com a normal à parede. As tensões sobre os vários planos são mostradas no Círculo de Mohr (FIG.2.20-b), onde “M” representa o plano da maior tensão principal, “W” o plano da parede e “Y” o plano vertical.

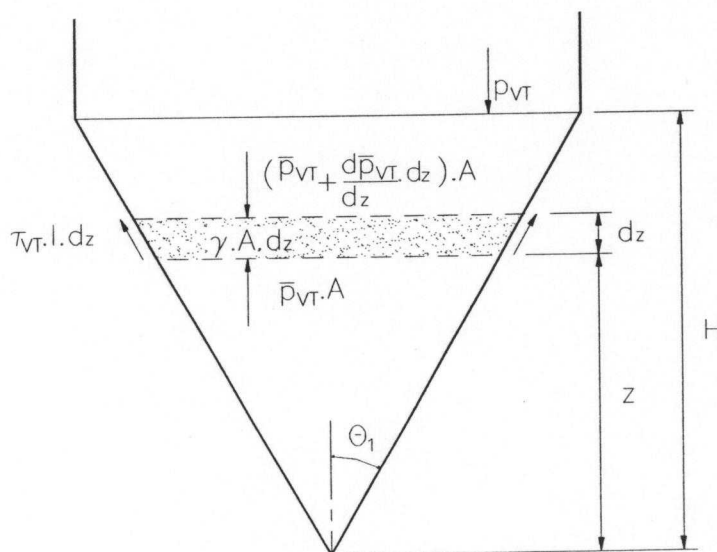
Por geometria, pode-se chegar às seguintes relações:

$$\beta = \frac{1}{2} \left[ \phi_w + \arcsen \left( \frac{\text{sen } \phi_w}{\text{sen } \phi_e} \right) \right] \quad (40)$$

$$B = \frac{\sin(2\theta_1 + 2\beta) \cdot \sin \phi_e}{[1 - \cos(2\theta_1 + 2\beta) \cdot \sin \phi_e]} \quad (41)$$

Sendo “ $p_{NT}$ ” a pressão normal à parede da tremonha e “ $\bar{p}_{VT}$ ” a pressão vertical média na tremonha, tem-se a seguinte relação:

$$k_2 = \frac{p_{NT}}{\bar{p}_{VT}} = \frac{1 + \cos 2\beta \cdot \sin \phi_e}{1 - \sin \phi_e \cos(2\theta_1 + 2\beta)} \quad (42)$$



**FIGURA 2.21 - Forças atuantes numa faixa elementar da tremonha (Fonte: WALKER, 1966)**

Seja “ $\gamma$ ” o peso específico do produto, “ $l$ ” o perímetro e “ $A$ ” a área transversal de uma faixa horizontal de espessura elementar no interior de uma tremonha. Considerando-se, agora, o equilíbrio das forças atuantes sobre aquela faixa (FIG.2.21) e, tomando-se como origem do sistema de eixos coordenados o vértice da tremonha, chega-se à seguinte equação:



$$\frac{d\bar{p}_{VT}}{dz} = \frac{l}{A} B \cdot \bar{p}_{VT} - \gamma = \frac{2 \cdot B \cdot \bar{p}_{VT}}{z \cdot \tan \theta_1} - \gamma \quad (43)$$

Fazendo-se:

$$n = \frac{(1+m)}{\tan \theta_1} B \cdot D \quad (44)$$

Esta generalização possibilita concluir que, se “m” for igual a zero, o “n” será usado para tremonhas em cunha, e, se “m” for igual a “1”, o “n” será usado para tremonhas cônicas ou piramidais.

Feitas estas considerações, a partir da equação (43) tem-se:

$$\frac{d\bar{p}_{VT}}{dz} = n \frac{\bar{p}_{VT}}{z} - \gamma \quad (45)$$

Esta equação é uma equação diferencial linear de primeira ordem, cuja solução é da forma de um produto de duas funções em “z” (PISKUNOV, 1973). Para  $z = H$  tem-se  $\bar{p}_{VT} = p_{vt}$ , então a solução de (45) será:

$$\bar{p}_{VT} = \frac{\gamma \cdot H}{(n-1)} \left[ \left( \frac{z}{H} \right) - \left( \frac{z}{H} \right)^{(n-1)} \right] + p_{vt} \cdot \left( \frac{z}{H} \right)^n \quad (46)$$

Esta é a equação de Walker para o cálculo das pressões verticais nas paredes de tremonhas no estado dinâmico (descarregamento).

Na expressão original do autor (WALKER, 1966), assim como em outras publicações, encontrou-se um descuido na transcrição da expressão (46). O número desta equação naquele artigo é (21), e, usando-se a mesma nomenclatura, o termo  $(h_0/h)^{c-1}$  deve ser alterado para  $(h/h_0)^{c-1}$ .

Fazendo-se  $n = 0$  na equação (46), obtém-se a equação particular denominada de equação de WALKER, para o caso das pressões verticais nas paredes de tremonhas com produtos no estado estático. Portanto, tem-se:

$$\bar{p}_{VT} = \gamma \cdot y + p_{vt} \quad (47)$$

onde “ $y$ ” é a altura abaixo da transição entre o corpo do silo e a tremonha.

O cálculo da pressão normal, quando o produto está no estado estático, não poderá mais ser feito utilizando-se a relação (42). Para determinarmos uma nova relação “ $k_3$ ” entre as pressões normal e vertical, considere a Figura (2.22).

O estado de tensões no produto é aquele onde a maior pressão principal é vertical. Por geometria, a partir do Círculo de Mohr, chega-se a:

$$k_3 = \frac{p_{NT}}{\bar{p}_{VT}} = \frac{\text{sen } 2\theta_1 \cdot \text{cos } \phi_w}{\text{sen}(2\theta_1 + \phi_w) + \text{sen } \phi_w} = \frac{\tan \theta_1}{\tan \phi_w + \tan \theta_1} \quad (48)$$

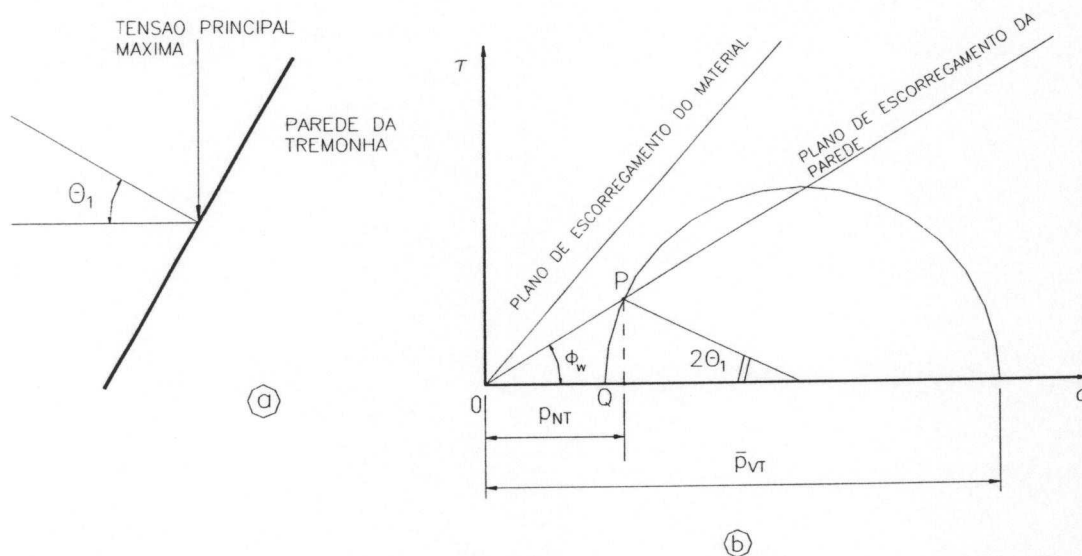
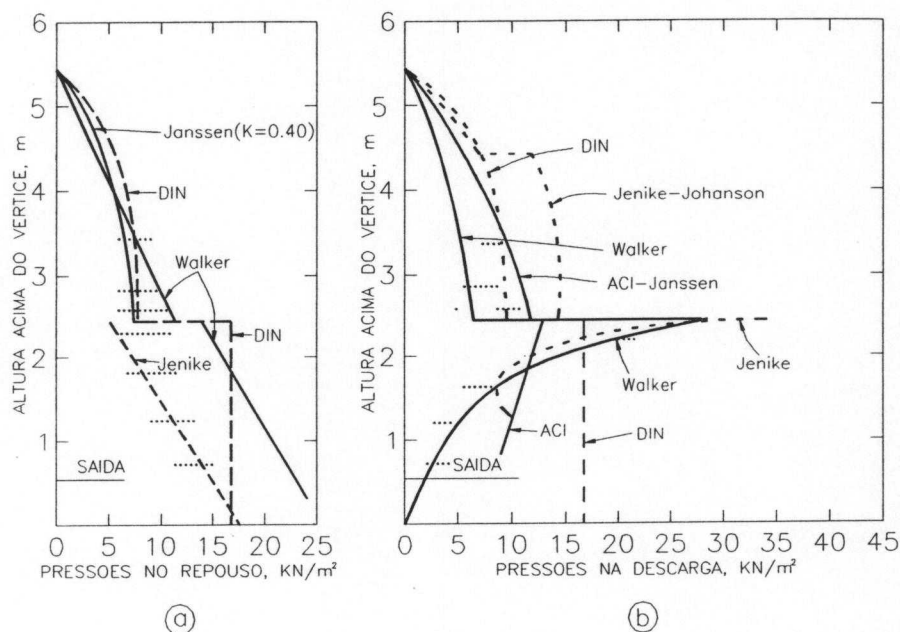


FIGURA 2.22 - Estado de tensões para produto no repouso (Fonte: WALKER, 1966)

Considerando-se a relação dada por (42), as equações de Walker para pressões normais à parede no estado estático (eq.47) e dinâmico (eq.46) são comparadas com outras normas e pesquisadores na Figura (2.23) (GAYLORD & GAYLORD, 1984), (WALKER, 1966).

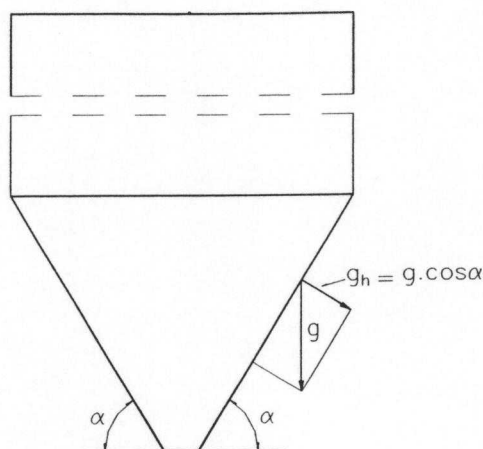


**FIGURA 2.23 - Pressões experimentais e teóricas normais às paredes do corpo e da tremonha (Fonte: GAYLORD & GAYLORD, 1984)**

#### 4.4 - Peso próprio da tremonha

As componentes do peso próprio normais às paredes da tremonha (FIG.2.24) também provocam esforços e estas podem ser avaliadas como (TROITSKY, 1982):

$$g_n = g \cdot \cos \alpha \quad (49)$$



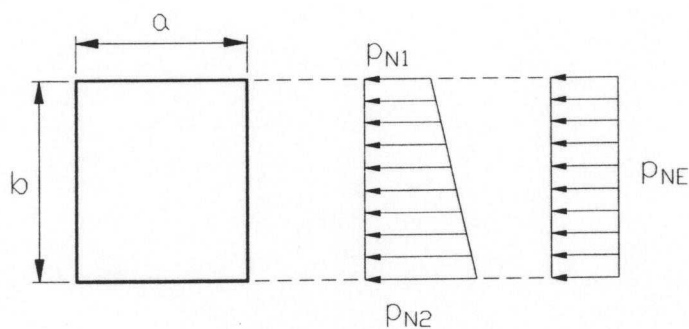
**FIGURA 2.24 - Componentes do peso próprio da tremonha**

onde:

$g_n$  = deve ser calculado em força por unidade de área.

#### 4.5 - Pressões equivalentes sobre as chapas de paredes

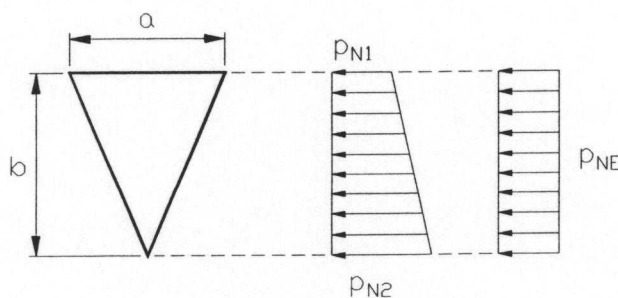
A pressão normal " $p_{NT}$ ", sobre qualquer parede de tremonha piramidal, varia ao longo da altura de acordo com WALKER (1966). No entanto, para a análise simplificada, assume-se que a pressão normal à parede ao longo da altura pode ser equivalente a uma pressão uniformemente distribuída.



**FIGURA 2.25 - Pressões equivalentes para placas retangulares**

Para uma placa retangular (FIG.2.25) com pressões trapezoidais, em que a base menor é igual a " $p_{N1}$ " e a base maior " $p_{N2}$ ", tem-se a seguinte pressão uniforme equivalente (TROITSKY, 1982):

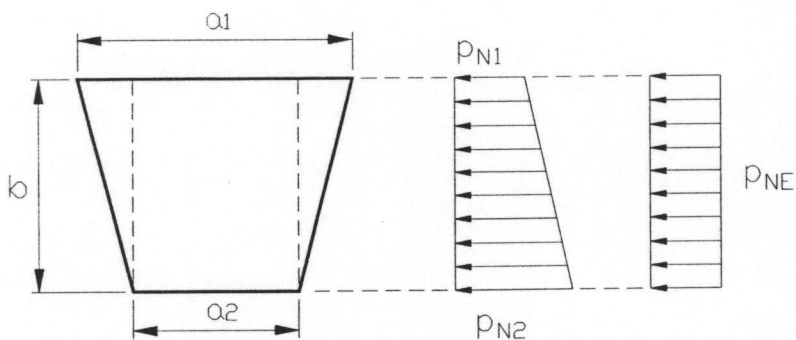
$$p_{NE} = \frac{p_{N1} + p_{N2}}{2} \quad (50)$$



**FIGURA 2.26 - Pressões equivalentes para placas triangulares**

Para uma placa triangular (FIG.2.26) com pressões trapezoidais, em que a base menor é igual a " $p_{N1}$ " e a base maior " $p_{N2}$ ", tem-se a seguinte pressão uniforme equivalente:

$$p_{NE} = \frac{p_{N1} + 2 \cdot p_{N2}}{3} \quad (51)$$



**FIGURA 2.27 - Pressões equivalentes para placas trapezoidais**

Para uma placa trapezoidal (FIG.2.27) com pressões trapezoidais, em que a base menor é igual a " $p_{N1}$ " e a base maior " $p_{N2}$ ", tem-se a seguinte pressão uniforme equivalente:

$$p_{NE} = \frac{a_1(p_{N1} + 2p_{N2}) + a_2(2p_{N1} + p_{N2})}{3(a_1 + a_2)} \quad (52)$$

Sendo "a<sub>1</sub>" e "a<sub>2</sub>" paralelos, "a<sub>1</sub>" é o lado maior e "a<sub>2</sub>" é o lado menor de um trapézio regular.

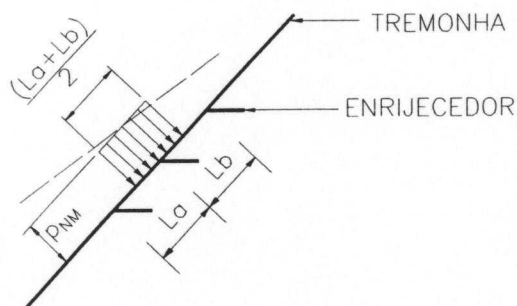
#### 4.6 - Pressões médias sobre enrijecedores

A pressão nas paredes da tremonha, como já mencionado, segue a teoria de WALKER (1966). Portanto, os enrijecedores horizontais estarão sujeitos a pressões de diagramas trapezoidais. Para efeito de cálculos, considera-se uma faixa de influência igual ao espaçamento médio entre enrijecedores adjacentes. Sendo "L<sub>a</sub>" e "L<sub>b</sub>" a distância entre um enrijecedor intermediário e dois outros adjacentes (SAFARIAN, 1985), tem-se:

$$L = \frac{L_a + L_b}{2} \quad (53)$$

A partir de (53), tem-se a seguinte pressão média, por unidade de comprimento, de enrijecedor (FIG.2.28):

$$p_{NM} = p_{NT} \cdot L \quad (54)$$



**FIGURA 2.28 - Pressão média sobre enrijecedor horizontal para tremonha (Fonte: SAFARIAN, 1985)**

## 5 - ANÁLISE ESTRUTURAL DOS ELEMENTOS DA TREMONHA

### 5.1 - Generalidades

As paredes de tremonhas piramidais, normalmente, ficam solicitadas por esforços combinados de flexo-tração. As forças de tração ocorrem devido ao efeito membrana. Estas serão bi-axiais, sendo uma horizontal e a outra meridional (FIG.2.29).

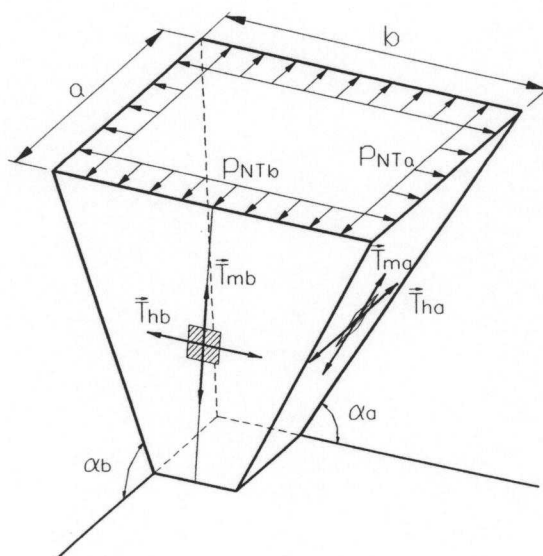
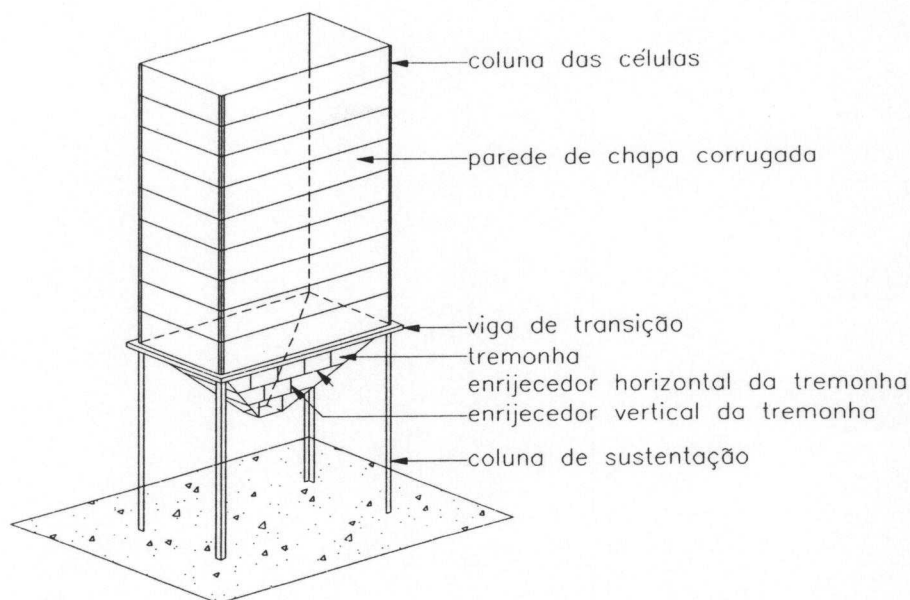


FIGURA 2.29 - Forças de tração horizontais e meridionais

Para diminuir os efeitos da flexão, utilizam-se enrijecedores. Assim, as placas podem ser projetadas para flexões predominantes (o cisalhamento é desprezado) em uma ou em duas direções, dependendo do arranjo e dos espaçamentos dos enrijecedores (FIG.2.30). Os enrijecedores, por sua vez, também ficam solicitados por esforços de flexo-tração. Assim, se os enrijecedores forem meridionais, as forças de tração serão absorvidas pelos mesmos. Se os enrijecedores forem horizontais, as forças meridionais serão absorvidas pelas placas da tremonha e as forças horizontais serão absorvidas pelos enrijecedores.

As teorias dos pequenos deslocamentos (TPD) e a dos grandes deslocamentos (TGD) podem ser usadas para o dimensionamento das placas de paredes das tremonhas. A diferença entre os cálculos não é muito grande para placas relativamente espessas mas pode ser considerável para placas relativamente finas (GAYLORD & GAYLORD, 1984).



**FIGURA 2.30 - Elementos estruturais de um silo prismático**

Verificou-se, pela revisão bibliográfica, que existe carência de pesquisas teóricas ou experimentais, relacionadas ao desenvolvimento da análise estrutural e ao dimensionamento de tremonhas piramidais para silos metálicos elevados. Dos poucos trabalhos publicados, citam-se o de TROITSKY (1980) e o de NEFF & HUSS (1983, 1984).

TROITSKY (1980) tratou, teoricamente, da análise estrutural e requisitos para o cálculo de silos de aço de seções retangulares ou quadradas. São desenvolvidos alguns métodos de cálculos de placas e de enrijecedores de paredes verticais e inclinadas.

NEFF & HUSS (1983, 1984) analisaram, teoricamente, os enrijecedores horizontais de tremonhas piramidais comparando os resultados obtidos pelo princípio dos trabalhos virtuais com aqueles obtidos através do método dos elementos finitos. Neste contexto, as atuais bases para projetos de tremonhas de silos metálicos elevados têm origens em considerações de ordem prática, adotadas por engenheiros calculistas, que muitas vezes tratam o assunto de forma simplista e isolada. Assim, o super dimensionamento ou o sub-dimensionamento pode levar a estruturas anti-econômicas e/ou inseguras. Nesta área, destacam-se RAVENET (1977), TROITSKY (1982), REIMBERT (1983), GAYLORD (1984), SAFARIAM (1985) e WESTBROOK (1988), embora alguns



destes engenheiros tenham também se dedicado ao campo da pesquisa. Por outro lado, pode-se citar algumas publicações relativas a elementos estruturais que serão utilizadas para fornecer informações básicas do trabalho em questão. Por exemplo, TIMOSHENKO (1940), BORN (1962), AALAMI & WILLIANS (1975), TROITSKY (1976), CHIA (1980), YANG (1984), HARARI (1985), HOULSTON (1989) e DUKE (1989).

TIMOSHENKO (1940) tratou das teorias clássicas de placas e cascas. BORN (1962) forneceu as teorias para a análise de estruturas prismáticas e piramidais de placas dobradas interligadas.

AALAMI & WILLIANS (1975) estudaram a teoria dos grandes deslocamentos (TGD) aplicada às placas finas.

TROITSKY (1976) discutiu a teoria das placas enrijecidas, tomando por base a equação diferencial das placas ortotrópicas, conhecida na literatura técnica como equação de HUBER.

CHIA (1984) fez a análise não-linear das placas elásticas anisotrópicas.

YANG (1984) analisou o método das faixas finitas com funções alternativas, que substituem as séries trigonométricas para resolver os problemas de placas irregulares. Desta forma, mostrou que o tempo de processamento computacional é menor do que no método dos elementos finitos.

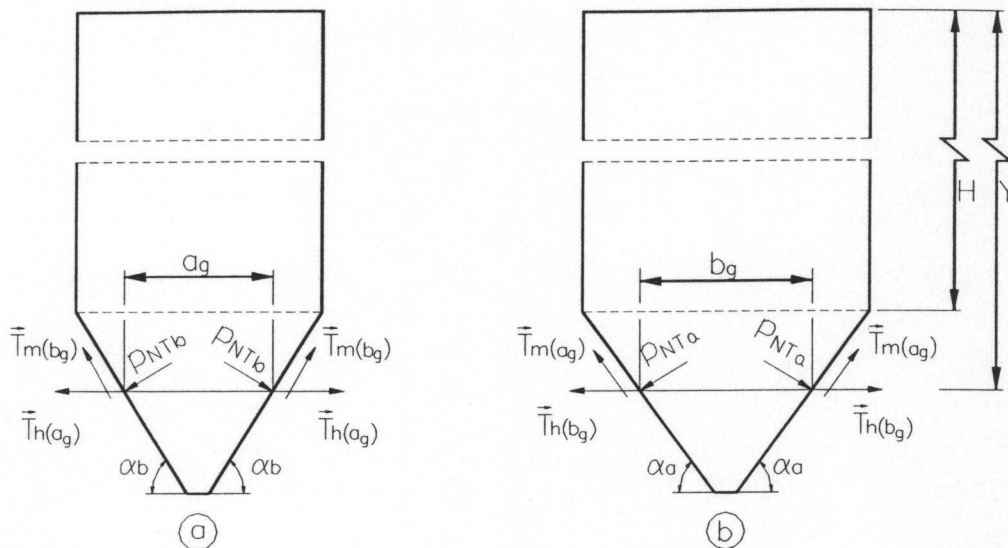
HARARI (1985) estudou o método dos elementos finitos aplicado a placas finas enrijecidas.

HOULSTON (1989) mostrou uma análise do método das faixas finitas aplicado a painéis enrijecidos para problemas não-lineares.

DUKE (1989) apresentou um procedimento para a análise de painéis enrijecidos com soldas intermitentes, submetidos a várias condições de cargas e de contorno.

## 5.2 - Forças de tração horizontais

Para tremonhas simétricas, os ângulos de declividades das paredes com a horizontal serão designados por " $\alpha_a$ " e " $\alpha_b$ ", respectivamente, em relação a uma seção transversal de dimensões "a" e "b" (FIG.2.31).



**FIGURA 2.31 - Esforços de tração horizontais e meridianais em uma seção transversal genérica**

As forças de tração horizontais são calculadas por unidade de largura de parede (TROITSKY, 1980), (TROITSKY, 1982), (GAYLORD, 1984). Por equilíbrio, estas forças são determinadas (FIG.2.32) como sendo iguais a:

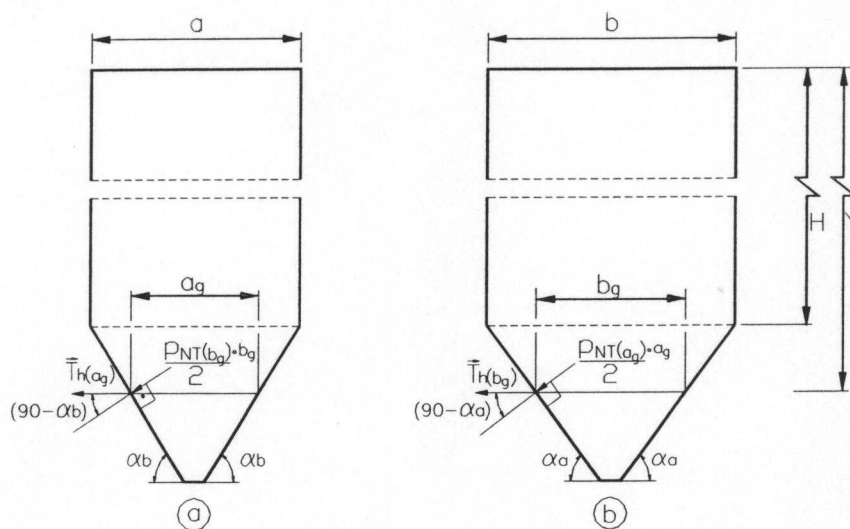
$$T_{h(ag)} = P_{NT(bg)} \cdot \text{sen } \alpha_b \cdot \frac{b_g}{2} \quad (55)$$

$$T_{h(bg)} = P_{NT(ag)} \cdot \text{sen } \alpha_a \cdot \frac{a_g}{2} \quad (56)$$

onde:

$P_{NT(ag)}$  e  $P_{NT(bg)}$  = pressões normais médias sobre as paredes nas posições genéricas "a<sub>g</sub>" e "b<sub>g</sub>", respectivamente. Estas pressões são calculadas através das expressões (19), (20) e (38);

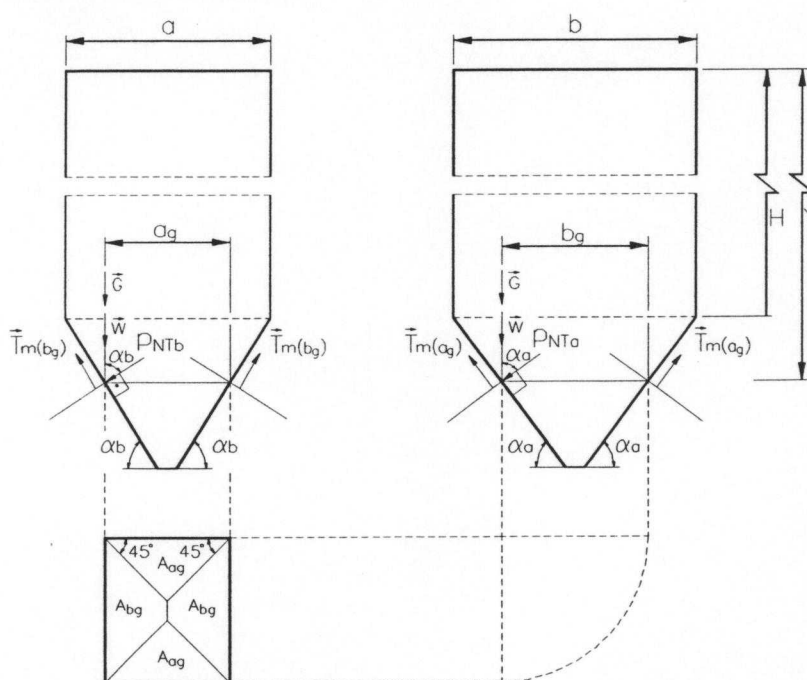
$\alpha_a$  e  $\alpha_b$  = ângulos de inclinações das paredes "a" e "b" relativos à horizontal.



**FIGURA 2.32 - Esforços de tração horizontais**

### 5.3 - Forças de tração meridionais

As paredes inclinadas das tremonhas também estarão sujeitas a forças de tração ao longo de seus meridianos (FIG.2.33).



**FIGURA 2.33 - Forças de tração meridionais**

As forças que atuam em uma seção transversal qualquer da tremonha são afetadas pelas áreas de influências. Estas são definidas pelas bissetrizes dos ângulos de cantos e pela linha média longitudinal da seção (FIG.2.33).

Considera-se que as pressões devidas ao produto armazenado, aplicadas na área " $A_{ag}$ ", afetam o valor da tração meridional " $T_{m(ag)}$ " na linha horizontal " $a_g$ " e aquelas aplicadas na área " $A_{bg}$ " afetam o valor da tração meridional " $T_{m(bg)}$ " na linha horizontal " $b_g$ ".

Para as distribuições das pressões nas áreas " $A_{ag}$ " e " $A_{bg}$ ", podem ser definidos coeficientes de distribuições, dados por:

$$C_{ag} = \frac{A_{ag}}{A_g} \quad (57)$$

$$C_{bg} = \frac{A_{bg}}{A_g} \quad (58)$$

que podem ser relacionados pela seguinte expressão:

$$2C_{ag} + 2C_{bg} = 1.0 \quad (59)$$

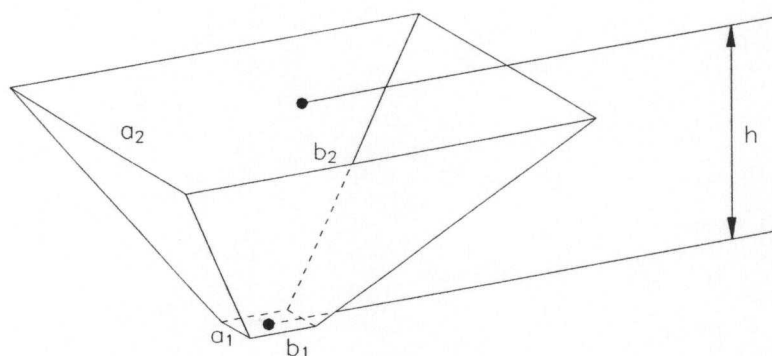


FIGURA 2.34 - Dimensões de um tronco de pirâmide

Para efeito de cálculo do peso do produto contido na tremonha, a expressão para a determinação do volume de um tronco de pirâmide (tremonha) (FIG.2.34), é dada por:

$$V = \frac{h}{6} [b_2(2a_2 + a_1) + a_1(2b_1 + b_2)] \quad (60)$$

Sendo “W” o peso total do produto contido na tremonha e “G” o peso próprio da tremonha, por considerações de equilíbrio em relação ao lado “ $a_g$ ” e ao lado “ $b_g$ ”, respectivamente, chegam-se às seguintes expressões, para o cálculo das trações de membrana meridionais:

$$T_{m(ag)} = \frac{W.C_{ag} + p_{va} \cdot A_{ag} + G.C_{ag}}{a_g \cdot \text{sen } \alpha_a} \quad (61)$$

$$T_{m(bg)} = \frac{W.C_{bg} + p_{vb} \cdot A_{bg} + G.C_{bg}}{b_g \cdot \text{sen } \alpha_b} \quad (62)$$

Nas equações (61) e (62) os valores de “ $p_{va}$ ” e “ $p_{vb}$ ” são calculados para a transição. Então, a pressão “ $p_{va}$ ” é calculada usando-se o “raio hidráulico” do quadrado correspondente ao lado menor e “ $p_{vb}$ ” usando-se o raio hidráulico de um quadrado de lado imaginário.

Observa-se que, para cada nível considerado da tremonha, ter-se-ão diferentes trações meridionais. E ainda, as forças meridionais variarão em intensidade ao longo do comprimento horizontal da parede. No entanto, por simplicidade, estas forças serão consideradas uniformes (TROITSKY, 1982), (SAFARIAN, 1985).

As hipóteses que culminaram nas expressões (61) e (62) são conservadoras e serviram de base para a norma ACI 313/77. Nestas expressões, são desprezados os efeitos do atrito nas paredes da tremonha e os cálculos das pressões são feitos por área de influência.

## 5.4 - Análise das placas pela Teoria dos Pequenos Deslocamentos (TPD)

### 5.4.1 - Generalidades

Na Teoria dos Pequenos Deslocamentos (TPD), para a flexão de placas retangulares elásticas, a deformação do seu plano médio pode ser desprezada nos casos em que os deslocamentos são pequenos, quando comparados com a espessura da placa.

Partindo-se deste princípio, a equação diferencial de equilíbrio para uma placa fina e plana foi primeiramente obtida por Lagrange, em 1811. Esta equação tem a seguinte forma:

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{q}{D} \quad (63)$$

cuja solução, de forma rigorosa, foi dada por Navier, em 1820, através de séries trigonométricas duplas (TIMOSHENKO, 1940).

### 5.4.2 - Placas Retangulares com relação $\lambda > 3$

TIMOSHENKO (1940), mostrou que quando a relação  $\lambda = b/a$ , entre os vãos maior e o menor da placa, é maior do que 3, os esforços na direção do maior vão "diminuem muito" enquanto que eles "aumentam muito" na direção do menor vão. Desta maneira, estes tipos de placas podem ser tratadas como vigas, com esforços predominantes em apenas uma direção.

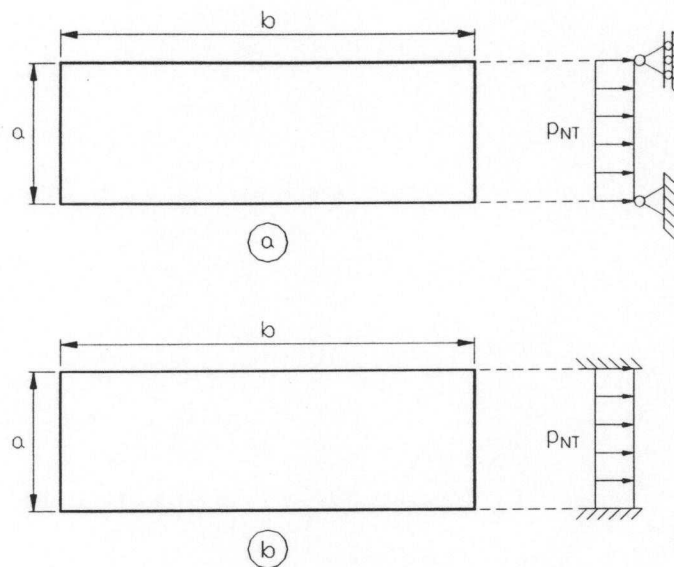


FIGURA 2.35 - Placas com  $\lambda > 3$ : a) Apoiada; b) Engastada

As expressões triviais para os cálculos dos deslocamentos e momentos máximos, para os casos de placas com bordas simplesmente apoiadas e para bordas engastadas (FIG.2.35), sujeitas a cargas uniformemente distribuídas, respectivamente aos pares, são dadas por:

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{5p_{NT} \cdot a^4}{384EI} \quad (64)$$

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{p_{NT} \cdot a^2}{8} \quad (65)$$

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{p_{NT} \cdot a^4}{384EI} \quad (66)$$

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{p_{NT} \cdot a^2}{12} \quad (67)$$

### 5.4.3 - Placas Retangulares com relação $\lambda < 3$

Quando  $\lambda < 3$ , existirão predominâncias de momentos fletores nas duas direções perpendiculares da placa (FIG.2.36). TIMOSHENKO (1940) fornece tabelas para os casos que possuem condições de contorno mais usuais e que podem ser utilizadas diretamente, pois ele adota o coeficiente de Poisson do aço ( $\nu = 0.3$ ) (TAB.2.1) e (TAB.2.2).

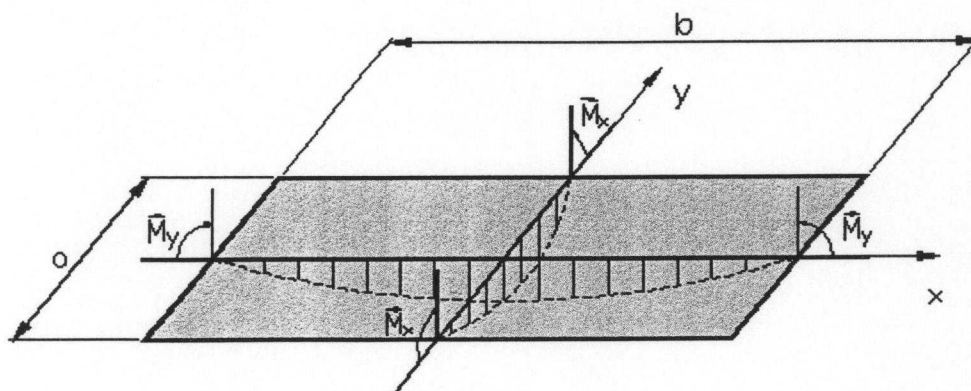
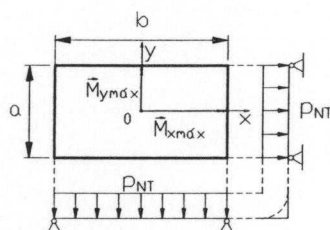


FIGURA 2.36 - Momentos fletores predominantes em placas retangulares com  $\lambda < 3$



**TABELA 2.1 - Tabela para placas com bordas simplesmente apoiadas e  $\lambda < 3$  (Fonte: TIMOSHENKO, 1940)**

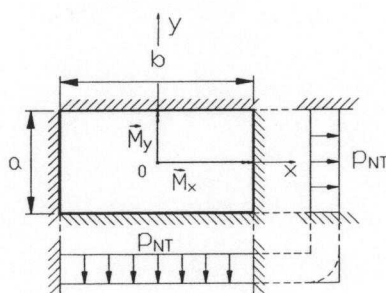
**Deslocamentos e Momentos de Flexão para Placas Retangulares Simplesmente Apoiadas e Carga Uniformemente Distribuída ( $\nu = 0.3$ )**



$b/a$	$w_{máx} = \beta_1 \cdot \frac{p_{NT} \cdot a^4}{E \cdot t^3}$	$(M_x)_{máx} = \beta_2 \cdot p_{NT} \cdot a^2$	$(M_y)_{máx} = \beta_3 \cdot p_{NT} \cdot a^2$
$b > a$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
1.0	0.0443	0.0479	0.0479
1.1	0.0530	0.0553	0.0494
1.2	0.0616	0.0626	0.0501
1.3	0.0697	0.0693	0.0504
1.4	0.0770	0.0753	0.0506
1.5	0.0843	0.0812	0.0499
1.6	0.0906	0.0862	0.0493
1.7	0.0964	0.0908	0.0486
1.8	0.1017	0.0948	0.0479
1.9	0.1064	0.0985	0.0471
2.0	0.1106	0.1017	0.0464
3.0	0.1336	0.1189	0.0404

**TABELA 2.2 - Tabela para placas com bordas engastadas e  $\lambda < 3$ , (Fonte: TIMOSHENKO, 1940)**

**Deslocamentos e Momentos de Flexão em Placas Retangulares com Bordas Engastadas e com Cargas Uniformemente Distribuídas ( $\nu = 0.3$ )**



$b/a$ $b > a$	$(w)_{x=0,y=0}$	$(M_x)_{x=a/2,y=0}$	$(M_y)_{x=0,y=b/2}$	$(M_x)_{x=0,y=0}$	$(M_y)_{x=0,y=0}$
	$\beta_1 \frac{p_{NT} \cdot a^4}{E \cdot t^3}$	$-\beta_2 \cdot p_{NT} \cdot a^2$	$-\beta_3 \cdot p_{NT} \cdot a^2$	$\beta_4 \cdot p_{NT} \cdot a^2$	$\beta_5 \cdot p_{NT} \cdot a^2$
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$
1.0	0.0138	0.0513	0.0513		
1.1	0.0164	0.0581	0.0538	0.0264	0.0231
1.2	0.0188	0.0639	0.0554	0.0299	0.0228
1.3	0.0209	0.0687	0.0563	0.0327	0.0222
1.4	0.0226	0.0726	0.0568	0.0349	0.0212
1.5	0.0240	0.0757			
1.6	0.0251	0.0780	0.0571	0.0381	0.0193
1.7	0.0260	0.0799	0.0571	0.0392	0.0182
1.8	0.0267	0.0812	0.0571	0.0401	0.0174
1.9	0.0272	0.0822	0.0571	0.0407	0.0165
2.0	0.0277	0.0829	0.0571		

Para placas de tremonhas piramidais em que  $\lambda < 3$ , o estado de tensões será bi-axial.

As experiências relacionadas à ruína por escoamento de materiais dúcteis demonstram boa compatibilidade com o critério da máxima energia de distorção ou também conhecido como critério de von Mises (1913). Segundo este critério, a tensão equivalente para o estado bi-axial de tensões será calculado por:

$$f_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (68)$$

onde, para " $\sigma_x$ ", considera-se o efeito combinado entre a tração de membrana horizontal e o momento fletor " $M_x$ " e, analogamente, para " $\sigma_y$ ", considera-se a tensão combinada devido à tração meridional e devido ao momento fletor " $M_y$ ". Para ambos os casos, considera-se que os enrijecedores não estão contribuindo com a absorção das trações de membrana.

As tensões para o cálculo da tensão equivalente de acordo com von Mises, serão:

$$\sigma_x = \frac{T_h}{t} + \frac{6M_x}{t^2} \quad (69)$$

$$\sigma_y = \frac{T_m}{t} + \frac{6M_y}{t^2} \quad (70)$$

Nas expressões (69) e (70) as trações de membrana são dadas em "força por unidade de comprimento" e os momentos em "momento por unidade de comprimento".

Para casos de tremonhas enrijecidas horizontalmente, deve-se considerar que os enrijecedores absorvam as trações " $T_h$ ".

#### 5.4.4 - Placas Triangulares

TIMOSHENKO (1940), KALMANOK (1961), REKACH (1978), JAEGER (1964), VOLTERRA (1971) e BARES (1972) possuem soluções analíticas e/ou tabelas referentes aos esforços e deslocamentos de placas triangulares e trapezoidais.

O problema da flexão das placas triangulares no regime elástico não pode ser resolvido, com algumas exceções por meio dos métodos analíticos, conforme utilizados para resolver os problemas de placas retangulares.

O cálculo da maioria dos problemas de placas triangulares podem ser resolvidos através de métodos de integração numérica como o método das diferenças finitas. Desta maneira, foram confeccionadas tabelas para triângulos isósceles com várias condições de contorno e tipos de carregamentos. As tabelas fornecidas pelas citadas referências (TAB. 2.3) podem também ser utilizadas para o cálculo de placas trapezoidais isósceles. Para isto, a relação entre a altura do triângulo suplementar e a altura do triângulo total, formado pelo prolongamento dos lados não paralelos não deve ser maior do que 1/4. Por este procedimento têm-se resultados relativamente precisos.

Na utilização de tabelas para placas, é importante estabelecer, inicialmente, o valor do coeficiente de Poisson, pois em muitos casos os resultados dependem deste valor. A maioria das tabelas disponíveis fornecem valores para os esforços e deslocamentos utilizando-se coeficientes de Poisson igual a zero ou 1/6. Para utilizá-las com o coeficiente de Poisson do aço, é necessário fazer algumas adaptações, conforme sugerido por BARES (1972) e KALMANOK (1961).

Partindo-se das seguintes expressões (TIMOSHENKO, 1940):

$$M_{1x} = D \left( \frac{1}{r_x} + \nu_1 \frac{1}{r_y} \right) = -D \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \nu_1 \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad (71)$$

$$M_{1y} = D \left( \frac{1}{r_y} + \nu_1 \frac{1}{r_x} \right) = -D \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \nu_1 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) \quad (72)$$

onde:

$$D = \frac{E.t^3}{12(1-\nu^2)} \quad (73)$$

podem-se determinar as curvaturas que possibilitarão obter as seguintes relações:

$$M_{2x} = \frac{1}{(1-\nu_1^2)} [M_{1x}(1-\nu_1\nu_2) + M_{1y}(\nu_2-\nu_1)] \quad (74)$$

$$M_{2y} = \frac{1}{(1-\nu_1^2)} [M_{1y}(1-\nu_1\nu_2) + M_{1x}(\nu_2-\nu_1)] \quad (75)$$

sendo:

$M_{2x}$  = novo momento de flexão em relação ao eixo "x" para o coeficiente de Poisson igual a " $\nu_2$ ";

$M_{2y}$  = novo momento de flexão em relação ao eixo "y" para o coeficiente de Poisson igual a " $\nu_2$ ".

Para os deslocamentos pode-se determinar a seguinte expressão:

$$w_2 = \frac{(1-\nu_2^2)}{(1-\nu_1^2)} w_1 \quad (76)$$

onde:

$w_1$  = deslocamento tabelado para o coeficiente de Poisson igual a " $\nu_1$ ";

$w_2$  = novo deslocamento para o coeficiente de Poisson igual a " $\nu_2$ ".

Com as expressões (74) e (75) determinam-se novos momentos para um valor do coeficiente de Poisson, desde que os momentos para um dado coeficiente de Poisson sejam conhecidos através de tabelas.

Supondo-se que os valores tabelados dos deslocamentos e momentos sejam fornecidos com  $v_1 = 0$ , as expressões (75) e (76) ficarão reduzidas a:

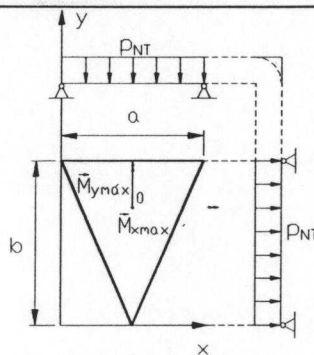
$$M_{2x} = M_{1x} + M_{1y} \cdot v_2 \quad (77)$$

$$M_{2y} = M_{1y} + M_{1x} \cdot v_2 \quad (78)$$

As tabelas para placas triangulares isósceles mais comumente utilizadas na prática são ilustradas nas Tabelas 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6 (BARES, 1972).

TABELA 2.3 - Tabela para Placas Triangulares (Fonte: BARES, 1972)

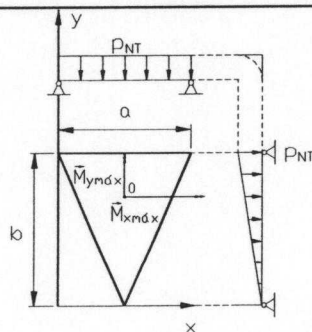
Deslocamentos e Momentos de Flexão para Placas Triangulares Isósceles Simplesmente Apoiadas e com Carga Uniformemente Distribuída ( $\nu = 0$ )



$a/b$	$w_{máx} = \beta_1 \frac{p_{NT} \cdot a^4}{E \cdot t^3}$	$M_{xmáx} = \beta_2 \cdot p_{NT} \cdot a^2$	$M_{ymáx} = \beta_3 \cdot p_{NT} \cdot a^2$
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
0.50	0.02592	0.0396	0.0209
0.55	0.02352	0.0367	0.0203
0.60	0.02124	0.0343	0.0197
0.65	0.01920	0.0322	0.0191
0.70	0.01728	0.0303	0.0186
0.75	0.01548	0.0286	0.0181
0.80	0.01392	0.0270	0.0178
0.85	0.01248	0.0255	0.0175
0.90	0.01118	0.0241	0.0172
0.95	0.01008	0.0227	0.0169
1.00	0.00914	0.0214	0.0166
1.10	0.00782	0.0192	0.0161
1.20	0.00666	0.0172	0.0154
1.30	0.00563	0.0155	0.0145
1.40	0.00472	0.0141	0.0135
1.50	0.00391	0.0128	0.0126
1.60	0.00324	0.0118	0.0118
1.70	0.00270	0.0108	0.0111
1.80	0.00230	0.0099	0.0105
1.90	0.00204	0.0090	0.0099
2.00	0.00191	0.0081	0.0094

**TABELA 2.4 - Tabela para Placas Triangulares com Bordas Simplesmente Apoiadas e com Carga Linear (Fonte: BARES, 1972)**

**Deslocamentos e Momentos de Flexão para Placas Triangulares Isósceles Simplesmente Apoiadas e com Carga Linear ( $v = 0$ )**

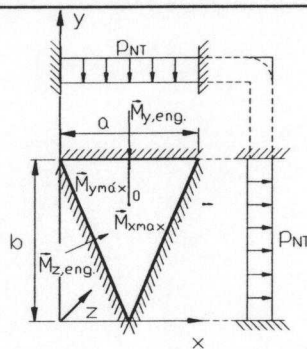


a/b	$w_{máx} = \beta_1 \frac{P_{NT} \cdot a^4}{E \cdot t^3}$ $M_{xmáx} = \beta_2 \cdot P_{NT} \cdot a^2$ $M_{ymáx} = \beta_3 \cdot P_{NT} \cdot a^2$		
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
0.50	0.02028	0.0271	0.0182
0.55	0.01776	0.0247	0.0175
0.60	0.01560	0.0226	0.0167
0.65	0.01380	0.0209	0.0160
0.70	0.01224	0.0195	0.0154
0.75	0.01110	0.0182	0.0148
0.80	0.00996	0.0170	0.0143
0.85	0.00890	0.0161	0.0138
0.90	0.00796	0.0150	0.0133
0.95	0.00712	0.0140	0.0129
1.00	0.00638	0.0130	0.0125
1.10	0.00528	0.0114	0.0117
1.20	0.00433	0.0100	0.0110
1.30	0.00355	0.0088	0.0104
1.40	0.00293	0.0078	0.0097
1.50	0.00247	0.0070	0.0091
1.60	0.00210	0.0063	0.0085
1.70	0.00179	0.0057	0.0080
1.80	0.00154	0.0052	0.0075
1.90	0.00134	0.0048	0.0070
2.00	0.00120	0.0045	0.0066



**TABELA 2.5 - Tabela para Placas Triangulares com Bordas Engastadas e com Carga Uniformemente Distribuída (Fonte: BARES, 1972)**

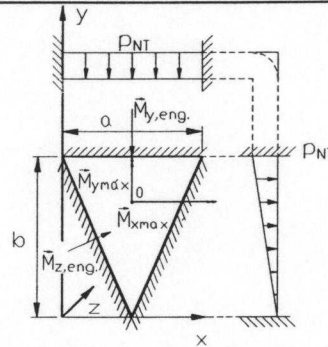
**Deslocamentos e Momentos de Flexão para Placas Triangulares Isósceles com Bordas Engastadas e com Carga Uniformemente Distribuída ( $\nu = 0$ )**



a/b	$w_{m\acute{a}x}$	$M_{xm\acute{a}x}$	$M_{ym\acute{a}x}$	$M_{y,eng.}$	$M_{z,eng.}$
	$\beta_1 \frac{P_{NT} \cdot a^4}{E \cdot I^3}$	$\beta_2 \cdot P_{NT} \cdot a^2$	$\beta_3 \cdot P_{NT} \cdot a^2$	$-\beta_4 \cdot P_{NT} \cdot a^2$	$-\beta_5 \cdot P_{NT} \cdot a^2$
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$
0.50	0.00948	0.0187	0.0089	0.0210	0.0378
0.55	0.00863	0.0178	0.0094	0.0215	0.0356
0.60	0.00785	0.0169	0.0098	0.0219	0.0335
0.65	0.00714	0.0160	0.0100	0.0221	0.0315
0.70	0.00646	0.0150	0.0100	0.0220	0.0297
0.75	0.00583	0.0140	0.0099	0.0218	0.0280
0.80	0.00526	0.0131	0.0096	0.0215	0.0264
0.85	0.00473	0.0122	0.0093	0.0211	0.0249
0.90	0.00425	0.0114	0.0089	0.0206	0.0234
0.95	0.00382	0.0106	0.0085	0.0201	0.0220
1.00	0.00345	0.0098	0.0082	0.0196	0.0207
1.10	0.00294	0.0087	0.0076	0.0184	0.0183
1.20	0.00250	0.0077	0.0071	0.0173	0.0162
1.30	0.00210	0.0069	0.0067	0.0163	0.0145
1.40	0.00175	0.0061	0.0063	0.0153	0.0131
1.50	0.00145	0.0055	0.0059	0.0144	0.0120
1.60	0.00120	0.0049	0.0056	0.0136	0.0111
1.70	0.00101	0.0044	0.0053	0.0128	0.0103
1.80	0.00086	0.0039	0.0050	0.0120	0.0096
1.90	0.00076	0.0034	0.0048	0.0112	0.0091
2.00	0.00068	0.0029	0.0045	0.0103	0.0087

**TABELA 2.6 - Tabela para Placas Triangulares com Bordas Engastadas e com Carga Linear (Fonte: BARES, 1972)**

**Deslocamentos e Momentos de Flexão para Placas Triangulares Isósceles com Bordas Engastadas e com Carga Linear ( $\nu = 0$ )**



$a/b$	$w_{m\acute{a}x}$ $\beta_1 \frac{P_{NT} \cdot a^4}{E \cdot I^3}$	$M_{xm\acute{a}x}$ $\beta_2 \cdot P_{NT} \cdot a^2$	$M_{ym\acute{a}x}$ $\beta_3 \cdot P_{NT} \cdot a^2$	$M_{y,eng.}$ $-\beta_4 \cdot P_{NT} \cdot a^2$	$M_{z,eng.}$ $-\beta_5 \cdot P_{NT} \cdot a^2$
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$
0.50	0.00718	0.0141	0.0082	0.0174	0.0293
0.55	0.00650	0.0128	0.0079	0.0176	0.0270
0.60	0.00588	0.0116	0.0076	0.0177	0.0248
0.65	0.00530	0.0106	0.0074	0.0177	0.0228
0.70	0.00478	0.0097	0.0072	0.0176	0.0210
0.75	0.00430	0.0089	0.0070	0.0173	0.0193
0.80	0.00385	0.0083	0.0068	0.0169	0.0178
0.85	0.00346	0.0077	0.0066	0.0165	0.0164
0.90	0.00310	0.0071	0.0065	0.0160	0.0153
0.95	0.00276	0.0066	0.0063	0.0155	0.0144
1.00	0.00243	0.0061	0.0062	0.0150	0.0136
1.10	0.00193	0.0053	0.0058	0.0140	0.0120
1.20	0.00156	0.0046	0.0054	0.0130	0.0106
1.30	0.00128	0.0040	0.0050	0.0121	0.0094
1.40	0.00108	0.0035	0.0046	0.0112	0.0083
1.50	0.00092	0.0031	0.0042	0.0103	0.0074
1.60	0.00079	0.0028	0.0038	0.0095	0.0067
1.70	0.00068	0.0025	0.0035	0.0088	0.0061
1.80	0.00059	0.0022	0.0033	0.0082	0.0056
1.90	0.00050	0.0019	0.0031	0.0077	0.0052
2.00	0.00043	0.0016	0.0029	0.0072	0.0049

Finalmente, pode-se observar que as Tabelas com cargas uniformemente distribuídas podem ser conjugadas com as tabelas com cargas lineares, para resolverem problemas de placas com carregamentos trapezoidais. E ainda, as tabelas fornecidas podem também ser utilizadas para o cálculo de placas trapezoidais isósceles, desde que a altura do seu triângulo suplementar não seja maior do que  $\frac{1}{4}$  da altura total do triângulo, formado pela placa trapezoidal (KALMANOK, 1961).

#### 5.4.5 - Placas Trapezoidais

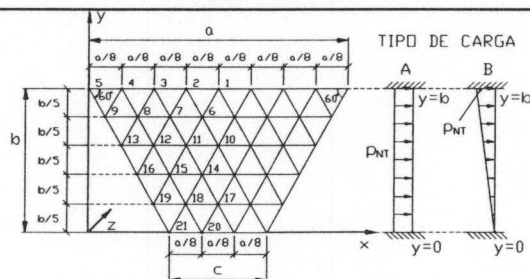
REKACH (1978) possui uma solução analítica para o problema da placa trapezoidal simétrica e engastada nas bordas não paralelas e com condições de contorno arbitrária para as bordas paralelas. No entanto, as soluções normalmente encontradas são feitas por via numérica.

Tabelas para placas trapezoidais podem ser encontradas em ISNARD et al (1971), BARES (1972) e SAFARIAM (1985). Porém, as tabelas fornecidas pelas citadas referências, foram elaboradas considerando-se o coeficiente de Poisson igual a  $\frac{1}{6}$ . Estas tabelas podem ser utilizadas para outros valores do coeficiente de Poisson se forem feitas as modificações nos momentos dados pelas expressões (74) e (75).

Nas tabelas 2.7 e 2.8 são fornecidos coeficientes para cálculos de momentos fletores em pontos definidos de placas trapezoidais de bordas engastadas. As cargas utilizadas nestas tabelas podem ser uniformemente distribuídas ou lineares. Estas cargas, conjugadas adequadamente, fornecem os esforços devidos a cargas trapezoidais.

**TABELA 2.7 - Tabela para Placas Trapezoidais com Bordas engastadas e  $\varphi = 3/8$ ,  
(Fonte: BARES, 1972)**

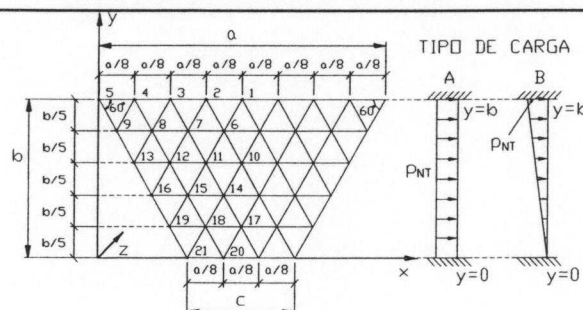
**Momentos de Flexão para Placas Trapezoidais engastadas nas bordas e com cargas Uniformemente Distribuídas ou Lineares ( $v = 0.16$ ) ( $\varphi = c/a = 3/8$ )**



	Tipo de Carga			Tipo de Carga	
	A	B		A	B
$M_{x6}$	0.1318	0.0830	$M_{yvb1}$	-1.0698	-0.6588
$M_{x7}$	0.0791	0.0630	$M_{yvb2}$	-0.9184	-0.5767
$M_{x8}$	-0.0303	0.0015	$M_{yvb3}$	-0.5397	-0.3591
$M_{x10}$	0.3567	0.1888	$M_{yvb4}$	-0.1561	-0.1118
$M_{x11}$	0.2738	0.1537	$M_{yvb5}$	0	0
$M_{x12}$	-0.0469	0.0135	$M_{yvc20}$	-0.8347	-0.3354
$M_{x14}$	0.3777	0.1736	$M_{yvc21}$	-0.2989	-0.1184
$M_{x15}$	0.0921	0.0510	$M_{zv5}$	0	0
$M_{x17}$	0.2272	0.0854	$M_{zv9}$	-0.1561	-0.1118
$M_{x18}$	$\frac{P_{NT} \cdot a^2}{64}$	0.1321	$M_{zv13}$	$\frac{P_{NT} \cdot a^2}{64}$	-0.5359
$M_{y6}$	0.1285	0.1390	$M_{zv16}$	-0.8687	-0.4638
$M_{y7}$	0.1466	0.1444	$M_{zv19}$	-0.7973	-0.3754
$M_{y8}$	0.1313	0.1146	$M_{zv21}$	-0.2989	-0.1184
$M_{y10}$	0.5381	0.3210	$M_{xv9}$	-0.1236	-0.0885
$M_{y11}$	0.4697	0.2805	$M_{xv13}$	-0.4240	-0.2656
$M_{y12}$	0.2679	0.1499	$M_{xv16}$	-0.6876	-0.3671
$M_{y14}$	0.4266	0.1745	$M_{xv19}$	-0.6575	-0.2971
$M_{y15}$	0.2533	0.1237	$M_{xv21}$	-0.2989	-0.1184
$M_{y17}$	0.0388	-0.0543	$M_{yv9}$	-0.0585	-0.0419
$M_{y18}$	-0.0397	-0.0773	$M_{yv13}$	-0.2009	-0.1258
			$M_{yv16}$	-0.3257	-0.1739
			$M_{yv19}$	-0.3115	-0.1408

**TABELA 2.8 - Tabela para Placas Trapezoidais com Bordas Engastadas e  $\varphi = \frac{1}{2}$ ,  
(Fonte: BARES, 1972)**

**Momentos de Flexão para Placas Trapezoidais engastadas nas bordas e com cargas Uniformemente Distribuídas ou Lineares ( $\nu = 0.16$ ) ( $\varphi = c/a = \frac{1}{2}$ )**



	Tipo de Carga			Tipo de Carga			
	A	B		A	B		
$M_{x6}$	0.1038	0.0623	$M_{yvc17}$	-0.8198	-0.3528		
$M_{x7}$	0.0915	0.0614	$M_{yvc18}$	-0.6774	-0.2889		
$M_{x8}$	0.0039	0.0201	$M_{yvc19}$	-0.2712	-0.1356		
$M_{x10}$	0.2145	0.1045	$M_{zv5}$	0	0		
$M_{x11}$	0.2077	0.1030	$M_{zv9}$	-0.1486	-0.0982		
$M_{x12}$	0.0617	0.0398	$M_{zv13}$	-0.4553	-0.2604		
$M_{x14}$	0.1325	0.0510	$M_{zv16}$	-0.5744	-0.2748		
$M_{x15}$	0.1040	0.0341	$M_{zv19}$	-0.2712	-0.1356		
$M_{y6}$	0.2022	0.1625	$M_{xv9}$	-0.1176	-0.0777		
$M_{y7}$	$\frac{p_{NT} \cdot a^2}{64}$	0.1957	0.1549	$M_{xv13}$	$\frac{p_{NT} \cdot a^2}{64}$	-0.3605	-0.2062
$M_{y8}$		0.1472	0.1151	$M_{xv16}$		-0.4546	-0.2175
$M_{y10}$		0.4942	0.2492	$M_{xv19}$		-0.2712	-0.1356
$M_{y11}$		0.4316	0.2183	$M_{yv9}$		-0.0557	-0.0368
$M_{y12}$		0.2390	0.1179	$M_{yv13}$		-0.1708	-0.0977
$M_{y14}$		0.1730	0.0265	$M_{yv16}$		-0.2153	-0.1030
$M_{y15}$		0.0743	-0.0105				
$M_{yvb1}$		-0.8431	-0.4869				
$M_{yvb2}$		-0.7470	-0.4387				
$M_{yvb3}$		-0.4740	-0.2934				
$M_{yvb4}$		-0.1486	-0.0982				
$M_{yvb5}$		0	0				

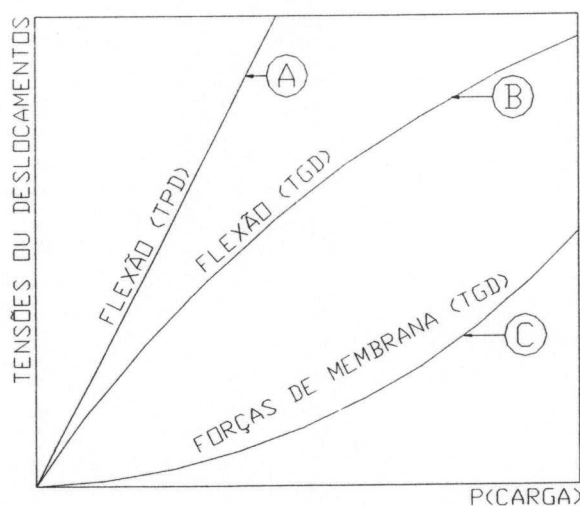
## 5.5 - Análise das Placas pela Teoria dos Grandes Deslocamentos (TGD)

### 5.5.1 - Generalidades

Nas teorias normais sobre flexão de placas elásticas, mostra-se que a deformação do seu plano médio pode ser desprezada nos casos em que os deslocamentos são pequenos, quando comparados com a espessura da placa.

Nos casos em que os deslocamentos não são tão grandes comparados com a espessura da placa mas são ainda pequenos comparados com as outras dimensões, as análises do problema devem ser ampliadas para incluir as deformações no plano médio da placa. Desta forma, as placas podem ser analisadas pela TPD ou pela TGD.

Para a TPD, as tensões de membrana são desprezadas frente às tensões de flexão enquanto que para a TGD as tensões de flexão são praticamente desprezadas em relação às tensões de membrana. De acordo com TROITSKY (1976), quando o deslocamento máximo aproxima-se da espessura da placa, o efeito membrana será aproximadamente igual ao da flexão. No entanto, quando os deslocamentos ultrapassam a ordem de grandeza da espessura da placa, haverá predominância do efeito membrana.



**FIGURA 2.37 - Tensões e Deslocamentos em função das cargas para TPD e TGD**

A Figura 2.37 mostra as variações das tensões e deslocamentos devidos a uma carga concentrada, perpendicular e no centro de uma placa retangular. O comportamento

da placa pela TPD é representado pela curva "A". Esta curva mostra que as tensões e deslocamentos são devidos aos esforços predominantes de flexão. Por outro lado, o comportamento da placa pela TGD é representado pelas curvas "B" e "C". Por esta teoria, atuam, simultaneamente, os esforços de flexão e de membrana. Estes esforços são os responsáveis pelos deslocamentos e tensões. A TPD é linear enquanto que a TGD é não-linear (HARTOG, 1952). Os cálculos, baseados na teoria clássica de placas (TPD), superestimam os deslocamentos e as tensões de placas finas acima de 100% para um grande número de casos práticos.

Embora as equações diferenciais para a análise das placas pela TGD tenham sido deduzidas em 1910 por von Karman, somente através dos recentes avanços dos métodos numéricos é que os problemas das placas têm alcançado resultados satisfatórios.

Como já observado, no comportamento das placas pela TGD, a interação entre os efeitos de flexão e de membrana são levados em consideração. Com a carga transversal atuante, os deslocamentos e as tensões variam de forma não-linear (AALAMI & WILLIAMS, 1975).

Para a TGD, o comportamento das placas é expresso pelas seguintes equações diferenciais de quarta ordem, em termos de deslocamentos do plano médio e função de tensão  $[f(x,y)]$  de Airy, (TIMOSHENKO, 1940), (AALAMI & WILLIAMS, 1975), (CHIA, 1980):

$$\frac{\partial^4 \omega}{\alpha^4} + 2 \frac{\partial^2 \omega}{\alpha^2 \partial^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} - \frac{t}{D} \left( \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \omega}{\alpha^2} - 2 \frac{\partial^2 f}{\alpha \partial y} \frac{\partial^2 \omega}{\alpha \partial y} + \frac{\partial^2 f}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) = \frac{q}{D} \quad (79)$$

$$\frac{\partial^4 f}{\alpha^4} + 2 \frac{\partial^2 f}{\alpha^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 f}{\partial y^4} = E \left[ \left( \frac{\partial^2 \omega}{\alpha \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 \omega}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right] \quad (80)$$

### 5.5.2 - Placas Retangulares pela TGD e com relação $\lambda < 3$

As equações diferenciais (79) e (80) e as equações provenientes das condições de contorno são expressas pelo método das diferenças finitas. A série de equações algébricas não-lineares são resolvidas por um método iterativo via recursos computacionais (AALAMI & WILLIAMS, 1975), (CHIA, 1980).

AALAMI & WILLIAMS (1975) fornecem tabelas para o cálculo de tensões e deslocamentos das placas pela TGD. Estas tabelas foram elaboradas considerando-se o coeficiente de Poisson igual a 0.3. Para a utilização das tabelas, inicialmente, determinam-se a relação  $\lambda = b/a$ , o parâmetro adimensional "Q" (que reflete o efeito da carga transversal " $p_{NT}$ "), o coeficiente linear " $k_L$ " (para os pequenos deslocamentos) e o coeficiente de redução " $k_r$ " (para os grandes deslocamentos). Estes coeficientes são, então, utilizados para o cálculo das tensões e dos deslocamentos. Valores intermediários para " $\lambda$ " devem ser interpolados para a determinação mais precisa daqueles parâmetros. A tabela 2.9 é útil para os casos mais freqüentes na área de silos. O primeiro retângulo (Condições de Contorno para Flexão - C. C. Flexão) da tabela representa simbolicamente as condições de contorno em que a placa é rigidamente apoiada e rotacionalmente livre quando solicitada pela flexão. No segundo retângulo, (Condições de Contorno para Membrana - C. C. Membrana) a simbologia representa as condições de contorno em que os deslocamentos no plano são impedidos e as tensões de cisalhamentos são iguais a zero quando a placa trabalha pelo efeito membrana.

As tensões para o cálculo da tensão equivalente de acordo com von Mises (ver item 5.4.3), serão:

$$\sigma_x = \frac{T_h}{t} + \sigma_{fx} + \sigma_{mx} \quad (81)$$

$$\sigma_y = \frac{T_m}{t} + \sigma_{fy} + \sigma_{my} \quad (82)$$



Nas expressões (81) e (82) as trações de membrana são dadas em “força por unidade de comprimento”.

Para casos de tremonhas enrijecidas horizontalmente, deve-se considerar que os enrijecedores absorvam as trações “ $T_h$ ”.

**TABELA 2.9 - Deslocamentos e Tensões para Placas Retangulares pela TGD**

**( $\lambda < 3$ ) ( $\nu = 0.3$ ) (Fonte: AALAMI & WILLIAMS, 1975)**

Deslocamentos e Tensões para Placas Retangulares pela TGD ( $\lambda < 3$ ) ( $\nu = 0.3$ )								
Carga Uniformemente Distribuída								
			$w = \bar{W} \cdot t$ $\sigma = \bar{\sigma} \cdot E \cdot (t/a)^2$					
			$Q = \frac{a^4 \cdot P_{NT}}{t^4 \cdot E}$					
		(C. C. FLEXÃO)			(C. C. MEMBRANA)			
b/a	Q	$\bar{W}$	$\bar{\sigma}_{bx1}$	$\bar{\sigma}_{by1}$	$\bar{\sigma}_{mx1}$	$\bar{\sigma}_{my1}$	$\bar{\sigma}_{mx2}$	$\bar{\sigma}_{my2}$
1	Linear $k_l \Rightarrow$	$4.434 \times 10^{-2}$	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286
	20	0.666	0.635	0.635	0.184	0.184	0.193	0.038
	40	0.481	0.440	0.440	0.193	0.193	0.207	0.043
	120	0.255	0.215	0.215	0.166	0.166	0.183	0.043
	200	0.185	0.150	0.150	0.147	0.147	0.165	0.041
	300	0.143	0.112	0.112	0.132	0.132	0.149	0.039
	400	0.118	0.091	0.091	0.122	0.122	0.138	0.037
1.5	Linear $k_l \Rightarrow$	$8.438 \times 10^{-2}$	0.486	0.299	0.486	0.299	0.486	0.299
	20	0.476	0.449	0.404	0.185	0.176	0.194	0.073
	40	0.322	0.293	0.249	0.171	0.165	0.181	0.075
	120	0.162	0.140	0.108	0.131	0.131	0.141	0.067
	200	0.116	0.098	0.074	0.114	0.114	0.122	0.062
	300	0.089	0.074	0.055	0.100	0.102	0.108	0.057
	400	0.073	0.061	0.044	0.092	0.094	0.099	0.053
2	Linear $k_l \Rightarrow$	$11.07 \times 10^{-2}$	0.609	0.278	0.609	0.278	0.609	0.278
	20	0.388	0.364	0.298	0.166	0.156	0.172	0.104
	40	0.258	0.235	0.179	0.148	0.144	0.154	0.103
	120	0.127	0.110	0.079	0.110	0.112	0.115	0.087
	200	0.091	0.078	0.055	0.095	0.098	0.099	0.078
	300	0.069	0.059	0.041	0.084	0.088	0.088	0.071
	400	0.057	0.048	0.034	0.076	0.081	0.080	0.065
3	Linear $k_l \Rightarrow$	$13.42 \times 10^{-2}$	0.712	0.244	0.712	0.244	0.712	0.244
	20	0.323	0.306	0.267	0.144	0.145	0.146	0.138
	40	0.212	0.196	0.170	0.126	0.132	0.127	0.128
	120	0.105	0.093	0.081	0.095	0.105	0.095	0.103
	200	0.075	0.066	0.057	0.082	0.093	0.082	0.091
	300	0.057	0.050	0.043	0.072	0.083	0.073	0.081
	400	0.047	0.041	0.036	0.066	0.076	0.066	0.075

### 5.5.3 - Placas Retangulares pela TGD e com relação $\lambda > 3$

Uma placa fina retangular, longa e estreita, com bordas bi-articuladas ou bi-engastadas pode resistir às pressões externas, parte devido à sua rigidez e parte devido à vinculação do seu plano médio ou efeito membrana. Este efeito tem início tão logo se inicia o deslocamento. Desta maneira, a capacidade de carga da placa tende a aumentar na fase elástica (TROITSKY, 1968). A teoria dos grandes deslocamentos (TGD), aplicada a estes tipos de placas, mostra que as placas com bordas bi-articuladas apresentam maior eficiência estrutural frente às placas com bordas bi-engastadas. Isto ocorre porque os engastamentos provocam a diminuição da força de membrana e o seu consequente efeito na diminuição dos momentos de flexão (TIMOSHENKO, 1940), (TROITSKY, 1968), (FEODOSIEV, 1988).

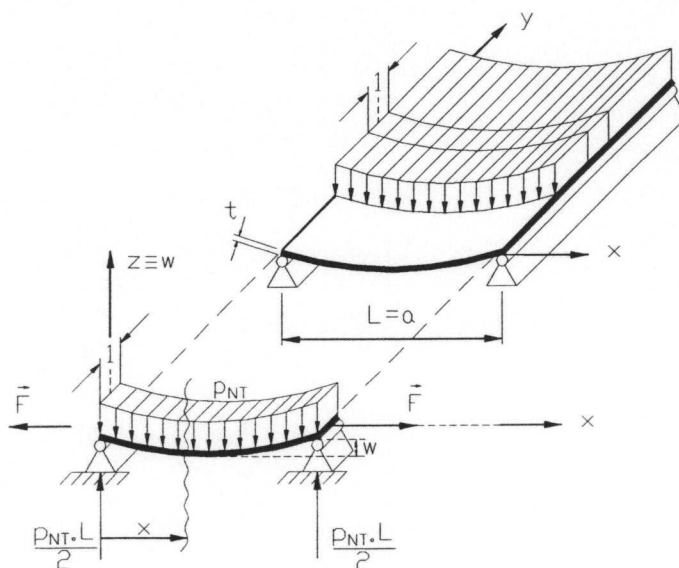


FIGURA 2.38 - Placa retangular bi-articulada e com  $\lambda > 3$

Considere uma placa longa, fina, retangular, e com bordas bi-articuladas, sujeita a uma carga uniformemente distribuída " $p_{NT}$ " sobre uma faixa de largura unitária (FIG. 2.38). Desta forma, a placa pode ser considerada como uma barra de comprimento " $L$ " e seção transversal retangular de altura " $t$ ". Então, a equação diferencial dos deslocamentos de uma faixa elementar terá a seguinte forma (TIMOSHENKO, 1940):

$$D \frac{d^2 w}{dx^2} = -M \quad (83)$$

onde "D" é denominado de "rigidez à flexão da placa", substitui a quantidade "E.I" usada no caso das vigas e é dada por:

$$D = \frac{E.t^3}{12(1-\nu^2)} \quad (84)$$

Quando solicitada pela carga, a barra deslocará e devido às condições de contorno aparecerão forças de tração " $\vec{F}$ " (FIG. 2.38). O momento de flexão em uma seção transversal genérica da barra será:

$$M = \frac{PNT \cdot L}{2} x - \frac{PNT}{2} x^2 - F \cdot w \quad (85)$$

Levando-se (85) em (83) e introduzindo notação:

$$u^2 = \frac{F \cdot L^2}{4D} \quad (86)$$

chega-se a uma equação diferencial linear não homogênea e de segunda ordem (PISKUNOV, 1973) dada por:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} - \frac{4}{L^2} u^2 w = -\frac{PNT \cdot L}{2D} x + \frac{PNT}{2D} x^2 \quad (87)$$

A solução da equação (87), fornece:

$$\omega = \frac{p_{NT} L^4}{16u^4 D} \left[ \frac{\cos\left(u - \frac{2u}{L}x\right)}{\cosh u} - 1 \right] + \frac{p_{NT} \cdot L^2}{8u^2 D} x(L-x) \quad (88)$$

Nesta equação, "u" é função da força axial " $F$ ", a qual permanece sendo uma incógnita. Esta força pode ser determinada lembrando que o aumento linear da barra, devido àquela força, é igual à diferença entre o comprimento do arco ao longo da curva deslocada e o comprimento da corda "L". Esta diferença é, então, dada por:

$$ds - dx = \sqrt{(dx)^2 + (dw)^2} - dx = dx \sqrt{1 + (dw/dx)^2} - dx \quad (89)$$

A função  $\sqrt{1 + (dw/dx)^2}$  pode ser desenvolvida em série de Mac-Laurin e colocada na seguinte forma de polinômio:

$$\sqrt{1 + (dw/dx)^2} = 1 + \frac{w'^2}{2} + \frac{w'^4}{24} + \dots \quad (90)$$

tal que desprezando-se as potências maiores do que 2 das derivadas, tem-se:

$$\sqrt{1 + (dw/dx)^2} = 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{dw}{dx} \right)^2 \quad (91)$$

Levando-se (91) em (89) chega-se a:

$$\Delta L = \int_0^L (ds - dx) = \frac{1}{2} \int_0^L \left( \frac{dw}{dx} \right)^2 dx \quad (92)$$

No caso de bordas bi-articuladas, obtém-se uma boa aproximação para “ $F$ ”, admitindo-se que a curva elástica seja senoidal, ou seja:

$$w = w_m \cdot \text{sen} \frac{\pi x}{L} \quad (93)$$

onde “ $w_m$ ” representa o deslocamento no meio do vão. Levando-se, então, (93) em (92), chega-se a:

$$\Delta L = \frac{1}{4} w_m^2 \frac{\pi^2}{L} \quad (94)$$

De acordo com TIMOSHENKO (1966), os deslocamentos “ $w_m$ ” de uma barra flexotracionada são reduzidos e podem ser aproximados, satisfatoriamente, pela seguinte expressão:

$$w_m = \frac{w_0}{1 + w_\alpha} \quad (95)$$

onde “ $w_0$ ” são os deslocamentos no meio do vão provocados exclusivamente pelas cargas laterais e calculados pelos métodos elementares e desprezando-se o efeito da carga axial “ $F$ ”. Para o caso em estudo tem-se:

$$w_0 = \frac{5qL^4}{384D} \quad (96)$$

E a grandeza adimensional “ $w_\alpha$ ” é dada por:

$$w_\alpha = \frac{F}{F_{cr}} = \frac{F \cdot L^2}{\pi^2 \cdot D} \quad (97)$$

onde para placas a carga crítica é dada por:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^3}{12(1 - \nu^2) \cdot L^2} = \frac{\pi^2 \cdot D}{L^2} \quad (98)$$

Levando-se a expressão (95) em (94), tem-se:

$$\Delta L = \frac{1}{4} \frac{w_0^2}{(1 + w_\alpha)^2} \frac{\pi^2}{L} \quad (99)$$

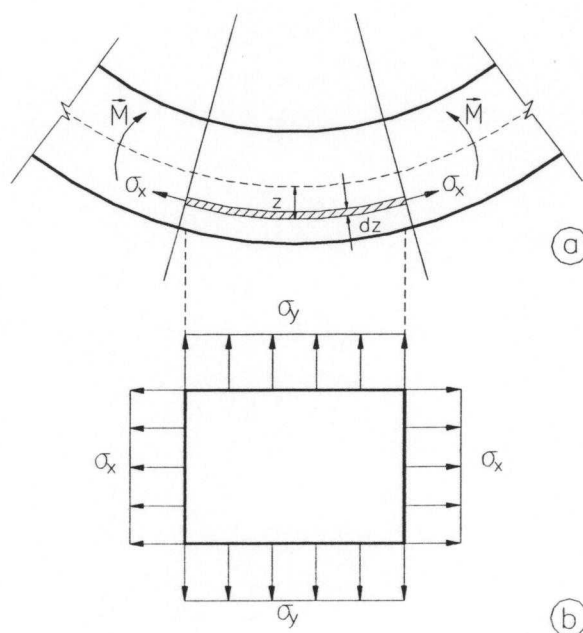


FIGURA 2.39 - Deformações e estado de tensões em um elemento de placa

Pela Resistência dos Materiais Clássica, as deformações unitárias de um elemento de placa (FIG.2.39) em termos de tensões, serão:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \quad (100)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} = 0 \quad (101)$$

Considerando-se que a deformação unitária na direção “y” é nula, das expressões (100) e (101), chega-se a:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L}{L} = \frac{(1 - \nu^2)}{E} \sigma_x \quad (102)$$

Considerando-se (84) e (97) e sabendo-se que  $\sigma_x = F / t$ , a partir de (102) tem-se:

$$\Delta L = \frac{\pi^2 \cdot w_\alpha \cdot t^2}{12 \cdot L} \quad (103)$$

Igualando-se expressão (99) com a expressão (103), chega-se a:

$$w_\alpha (1 + w_\alpha)^2 = \frac{3w_0^2}{t^2} \quad (104)$$

Chamando agora de  $x_1 = 1 + w_\alpha$  em (104), tem-se:

$$x_1^3 - x_1^2 = \frac{3w_0^2}{t^2} \quad (105)$$

A equação (105) é do terceiro grau e possui uma raiz real e duas conjugadas complexas. Ela pode ser resolvida pelo processo de Cardan (KORN & KORN, 1968), colocando-a, inicialmente, na seguinte forma:

$$x^3 + ax^2 + bx + c = 0 \quad (106)$$

Fazendo-se  $x = y - a/3$  na equação (106), esta pode ser transformada na seguinte forma reduzida:

$$y^3 + py + q = 0 \quad (107)$$

onde:

$$p = -\frac{a^2}{3} + b \quad (108)$$

e,

$$q = 2\left(\frac{a}{3}\right)^3 - \frac{a \cdot b}{3} + c \quad (109)$$

As raízes “ $y_1$ ”, “ $y_2$ ” e “ $y_3$ ” da equação cúbica reduzida serão:

$$y_1 = A + B \quad (110)$$

$$y_{2,3} = -\frac{A+B}{2} \pm i\left(\frac{A-B}{2}\right)\sqrt{3} \quad (111)$$

sendo:

$$A = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} \quad (112)$$

$$B = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \quad (113)$$

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2 \quad (114)$$



A equação (107) terá uma raiz real e duas complexas, três raízes reais das quais, no mínimo, duas são iguais, ou três raízes reais diferentes, se "Q" é positivo, zero, ou negativo, respectivamente.

A partir das equações (86) e (97) obtém-se as seguintes relações:

$$u = \frac{\pi}{2} \sqrt{w\alpha} \quad (115)$$

$$F = \frac{\pi^2 \cdot D \cdot w\alpha}{L^2} \quad (116)$$

Finalmente, a partir das equações (83) e (88), e ainda, considerando as soluções das equações (115) e (116) por intermédio de (105), obtém-se:

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{p_{NT} \cdot L^2}{8} \left[ \frac{2(\cosh u - 1)}{u^2 \cosh u} \right] = \frac{p_{NT} \cdot L^2}{8} \varphi_0(u) \quad (117)$$

onde:

$$\varphi_0 = \frac{2(\cosh u - 1)}{u^2 \cosh u} \quad (118)$$

Analisando-se (117) e (118) conclui-se que os valores de " $\varphi_0$ " diminuem rapidamente com o aumento de "u", assim, levando-se também à rápida diminuição do momento  $\frac{p_{NT} \cdot L^2}{8}$

devido à tração do efeito membrana decorrente dos grandes deslocamentos.

Fazendo-se agora  $x = L/2$  em (88), chega-se ao seguinte deslocamento máximo:

$$w_{m\acute{a}x} = \frac{5p_{NT} \cdot L^4}{384D} \left[ \frac{24}{5u^4} \left( \frac{1}{\cosh u} + \frac{u^2}{2} - 1 \right) \right] = \frac{5p_{NT} \cdot L^4}{384D} \varphi_1 \quad (119)$$

onde:

$$\varphi_1 = \frac{24}{5u^4} \left( \frac{1}{\cosh u} + \frac{u^2}{2} - 1 \right) \quad (120)$$

Se as placas em que  $\lambda > 3$  forem utilizadas em tremonhas enrijecidas horizontalmente, que é o caso mais comum, então as tensões horizontais serão absorvidas pelos enrijecedores e as meridionais pelas placas. Assim, o estado de tensão será uni-axial e é dado por:

$$\sigma_y = \frac{T_m}{t} + \frac{F}{t} + \frac{6M_{máx}}{t^2} = \frac{T_m}{t} + \frac{E \cdot u^2}{3(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{L} \right)^2 + \frac{3}{4} P_{NT} \left( \frac{L}{t} \right)^2 \varphi_0 \quad (121)$$

## 5.6 - Conversões de Placas Triangulares e Trapezoidais em Painéis Retangulares

Placas de tremonhas, suportadas por enrijecedores, podem formar painéis com formas triangulares ou trapezoidais. No entanto, a maioria das fórmulas ou tabelas disponíveis são desenvolvidas para placas retangulares, sujeitas a cargas uniformemente distribuídas.

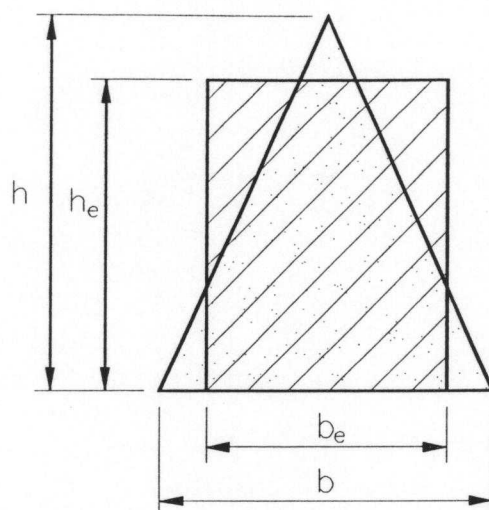
As tabelas desenvolvidas para placas retangulares em TPD ou TGD podem ser utilizadas para resolverem os problemas das placas triangulares ou trapezoidais.

As "placas triangulares" podem ser convertidas em "placas retangulares equivalentes" através das seguintes relações, (TROITSKY, 1982), (GAYLORD, 1984):

$$b_e = b - \frac{b}{3} \quad (122)$$

$$h_e = h - \frac{b}{6} \quad (123)$$

onde "b" e "h" são, respectivamente, as dimensões da base e da altura do triângulo (FIG.2.40).



**FIGURA 2.40 - Conversão de placa triangular em retangular**

As “placas trapezoidais” podem ser convertidas em “placas retangulares equivalentes” (FIG.2.41) através das seguintes relações:

$$b_e = \frac{2b_1 (b_1 + 2b_2)}{3 (b_1 + b_2)} \quad (124)$$

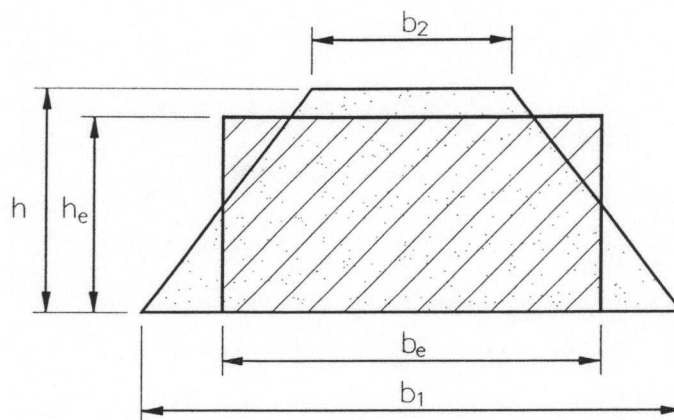
$$h_e = h - \frac{b_1 (b_1 - b_2)}{6 (b_1 + b_2)} \quad (125)$$

onde:

$b_1$  = dimensão do maior lado dos dois lados paralelos;

$b_2$  = dimensão do menor lado dos dois lados paralelos;

$h$  = altura do trapézio.



**FIGURA 2.41 - Conversão de placa trapezoidal em retangular**

Se  $b_1 / b_2 \geq 4$ , o “retângulo equivalente” da “placa trapezoidal” é determinado a partir do “triângulo formado” por esta placa pela extensão dos lados inclinados até as suas interseções.

## 5.7 - Enrijecedores

### 5.7.1 - Generalidades

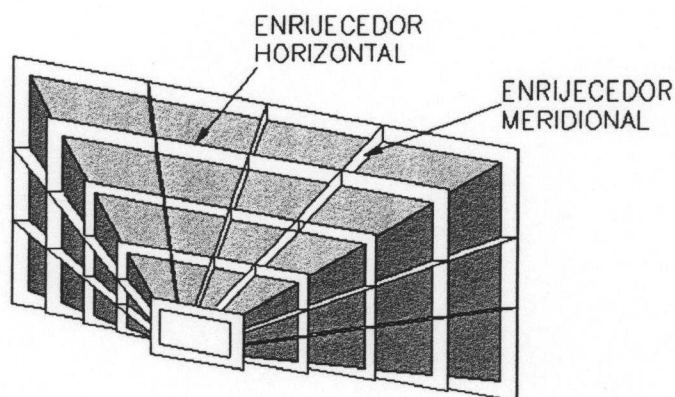
A larga utilização de elementos estruturais enrijecidos em engenharia iniciou-se no século XIX, principalmente com a aplicação de placas de aço em cascos de navios e com o desenvolvimento das pontes e das estruturas de aviação. Na engenharia moderna, as estruturas de placas finas enrijecidas têm encontrado um largo campo de aplicações. Para isto, são fundamentais os estudos da ortotropia estrutural. Esta ortotropia está relacionada com a configuração geométrica dos elementos estruturais (TROITSKY, 1976).

O uso adequado das placas das tremonhas refletirá, fundamentalmente, na segurança e nos custos finais de um projeto. Para diminuir os efeitos da flexão nas placas, eventualmente, torna-se necessário adicionar enrijecedores, aumentando-se, assim, a rigidez do painel.

A escolha do sistema de enrijecimento das placas de uma tremonha depende do tipo de aplicação e de critérios de racionalidades. Estes sistemas podem ser formados por

enrijecedores horizontais, meridionais e, eventualmente, pela conjugação destes dois tipos (FIG. 2.42).

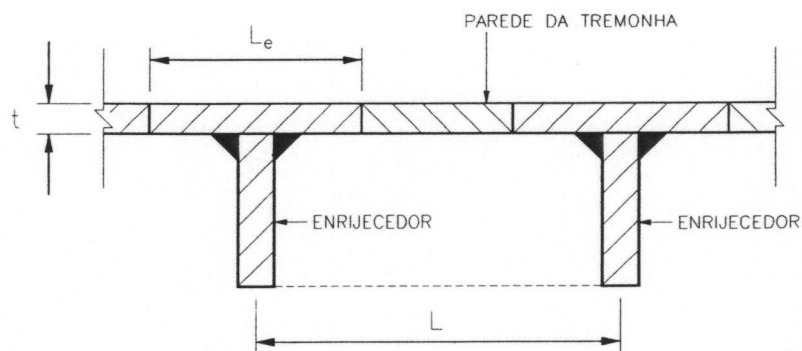
Neste trabalho, serão estudados apenas os enrijecedores horizontais. Isto porque eles têm demonstrado serem mais eficientes estruturalmente e por facilitar as rotinas de fabricação (RAVENET, 1977, 1992).



**FIGURA 2.42 - Tremonha enrijecida**

### 5.7.2 - Largura efetiva

Em qualquer estrutura enrijecida, os elementos nunca trabalham separadamente. Neste contexto, qual será o grau de contribuição que a placa da tremonha proporcionará ao enrijecedor? Esta questão está relacionada com o conceito de "largura efetiva".



**FIGURA 2.43 - Largura efetiva**

Existem várias teorias para a determinação da "largura efetiva" em placas enrijecidas, como a de von KARMAN, METZER, BESCHKINE, FUKUDA, (TROITSKY, 1976), etc. Este conceito provém da teoria de flambagem das placas.

De acordo com TROITSKY (1980), a largura efetiva de um enrijecedor não deve exceder os seguintes valores (FIG. 2.43):

$$\frac{L}{t} \leq 40, L_e = L \quad (126)$$

$$\frac{L}{t} > 40, L_e = 40.t \quad (127)$$

onde:

L = distância entre enrijecedores;

t = espessura da placa;

$L_e$  = largura efetiva.

porém, a largura efetiva não pode ser maior do que 80.t.

Dependendo da espessura de placa a ser usada os critérios anteriores podem mudar e outros mais adequados podem ser utilizados. Assim é que, para espessuras de chapas muito pequenas (da ordem de 1mm), a contribuição da largura efetiva pode ser desprezada (TROITSKY, 1980).

### 5.7.3 - Esforços, Deslocamentos e Verificações

Os enrijecedores horizontais poderão ser analisados como quadros fechados hiperestáticos (FIG. 2.44). Na determinação dos esforços, é mais adequado utilizar a "equação dos três momentos" (HARKER, 1986). Esta clássica equação é dada por:

$$\frac{L_1 M_A}{6EI_1} + \left( \frac{L_1}{3EI_1} + \frac{L_2}{3EI_2} \right) M_B + \frac{L_2 M_C}{6EI_2} = - \left( \frac{A_1 \bar{a}_1}{EI_1 L_1} + \frac{A_2 \bar{b}_2}{EI_2 L_2} \right) \quad (128)$$

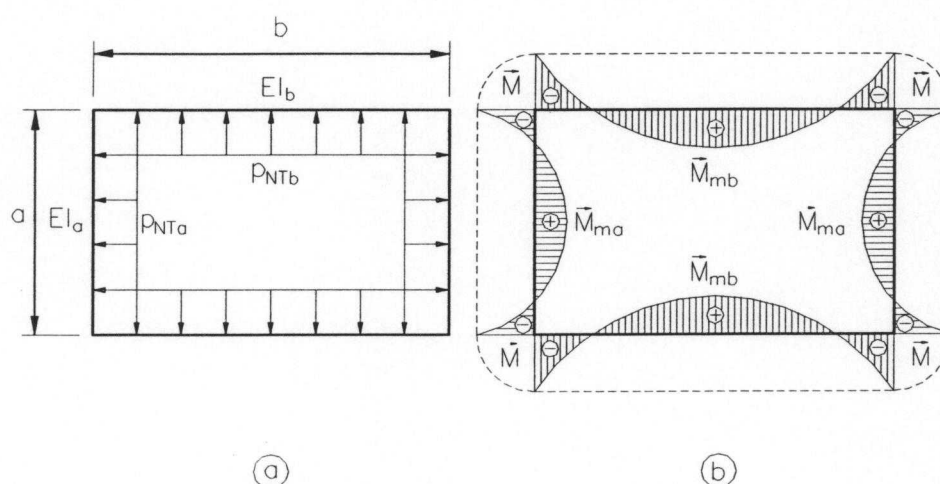


FIGURA 2.44 - Quadro hiperestático (Os diagramas de momentos de flexão estão invertidos na figura para facilidade ilustrativa)

Para os momentos de engastamentos, a equação (128) fornece

$$M = \frac{1}{12} \left( \frac{p_{NTa} \cdot a^3 \cdot I_b + p_{NTb} \cdot b^3 \cdot I_a}{a \cdot I_b + b \cdot I_a} \right) \quad (129)$$

e, para os momentos nos centros dos vãos, têm-se:

$$M_{ma} = -M + \frac{p_{NTa} \cdot a^2}{8} \quad (130)$$

$$M_{mb} = -M + \frac{P_{NTb} \cdot b^2}{8} \quad (131)$$

Aproveitando-se ainda, os princípios que culminaram na equação (128), pode-se determinar a equação que possibilita calcular os deslocamentos nos centros dos vãos dos enrijecedores.

Da Resistência dos Materiais sabe-se que a equação diferencial da linha elástica de uma barra é dada por:

$$E \cdot I \frac{d^2 y}{dx^2} = -M_s \quad (132)$$

Pelo Teorema da Área-Momento determinam-se as rotações no ponto "B" (FIG. 2.45), ou seja:

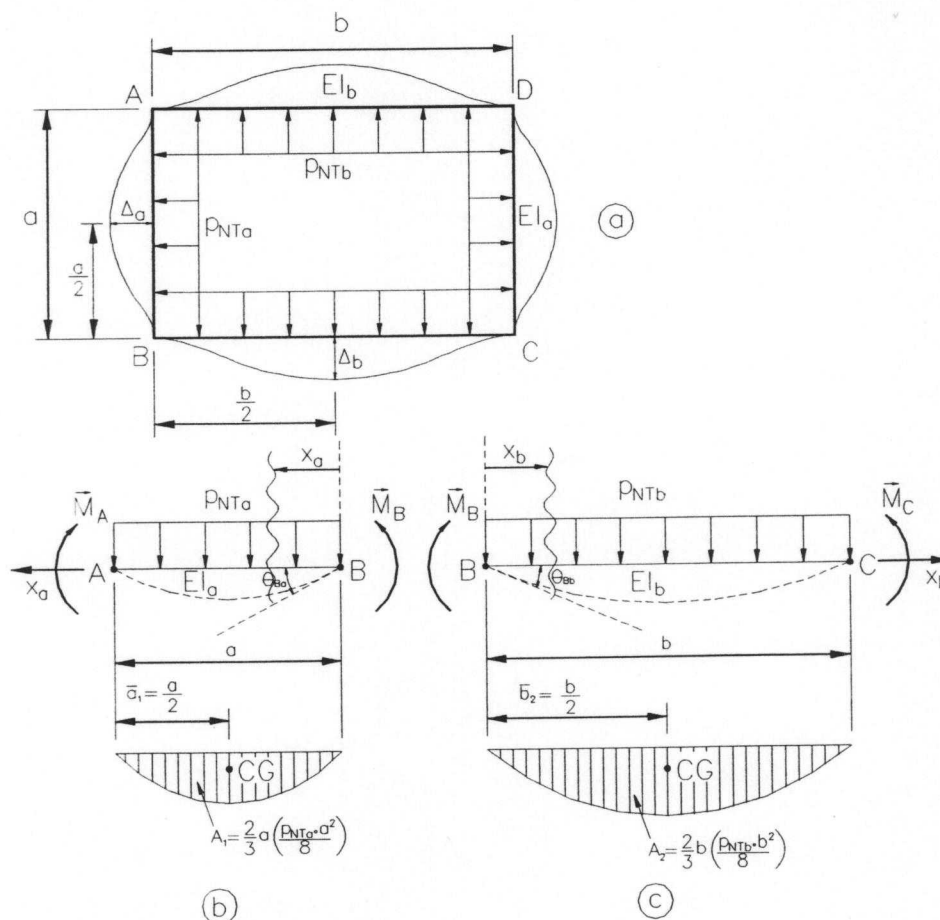


FIGURA 2.45 - Rotações em "B" pelo Teorema Área-Momento



$$\theta_{Ba} = \frac{A_1 \cdot \bar{a}_1}{L_1 \cdot E \cdot I_1} + \frac{M_A \cdot L_1}{6E \cdot I_1} + \frac{M_B \cdot L_1}{3E \cdot I_1} = \frac{pNTa \cdot a^3}{24E \cdot I_a} - \frac{3M \cdot a}{6E \cdot I_a} \quad (133)$$

$$\theta_{Bb} = \frac{A_2 \cdot \bar{b}_2}{L_2 \cdot E \cdot I_2} + \frac{M_B \cdot L_2}{3E \cdot I_2} + \frac{M_C \cdot L_2}{6E \cdot I_2} = \frac{pNTb \cdot b^3}{24E \cdot I_b} - \frac{3M \cdot b}{6E \cdot I_b} \quad (134)$$

Os momentos nas seções “S” dos trechos “AB” e “BC” serão, respectivamente:

$$M_{Sa} = -M + \frac{pNTa \cdot a}{2} x_a - \frac{pNTa}{2} x_a^2 \quad (135)$$

$$M_{sb} = -M + \frac{pNTb \cdot b}{2} x_b - \frac{pNTb}{2} x_b^2 \quad (136)$$

Quando levadas as expressões (135) e (136) em (132) e integrando-as, têm-se respectivamente:

$$E \cdot I_a \cdot y'_a = M \cdot x_a - \frac{pNTa \cdot a}{4} x_a^2 + \frac{pNTa}{6} x_a^3 + C_{a1} \quad (137)$$

$$E \cdot I_b \cdot y'_b = M \cdot x_b - \frac{pNTb \cdot b}{4} x_b^2 + \frac{pNTb}{6} x_b^3 + C_{b1} \quad (138)$$

Para  $x_a = 0$  tem-se a rotação “ $\theta_{Ba}$ ”, fornecida por (133) e para  $x_b = 0$  tem-se a rotação “ $\theta_{Bb}$ ”, fornecida por (134); então, por estas condições de contorno, têm-se:

$$E \cdot I_a \cdot y'_a = M \cdot x_a - \frac{pNTa \cdot a}{4} x_a^2 + \frac{pNTa}{6} x_a^3 + \left( \frac{pNT \cdot a^3}{24} - \frac{3M \cdot a}{6} \right) \quad (139)$$

$$E \cdot I_b \cdot y_b' = M \cdot x_b - \frac{PNTb \cdot b}{4} x_b^2 + \frac{PNTb}{6} x_b^3 + \left( \frac{PNT \cdot b^3}{24} - \frac{3M \cdot b}{6} \right) \quad (140)$$

Integrando-se novamente as expressões (139) e (140), têm-se:

$$E \cdot I_a \cdot y_a = \frac{M \cdot x_a^2}{2} - \frac{PNTa \cdot a}{12} x_a^3 + \frac{PNTa}{24} x_a^4 + \left( \frac{PNT \cdot a^3}{24} - \frac{3M \cdot a}{6} \right) x + C_{a2} \quad (141)$$

$$E \cdot I_b \cdot y_b = \frac{M \cdot x_b^2}{2} - \frac{PNTb \cdot b}{12} x_b^3 + \frac{PNTb}{24} x_b^4 + \left( \frac{PNT \cdot b^3}{24} - \frac{3M \cdot b}{6} \right) x + C_{b2} \quad (142)$$

Para  $x_a = 0$ , tem-se o deslocamento “ $y_a = 0$ ” e para  $x_b = 0$ , tem-se o deslocamento “ $y_b = 0$ ”. Então, por estas condições de contorno, chega-se a:

$$E \cdot I_a \cdot y_a = \frac{M \cdot x_a^2}{2} - \frac{PNTa \cdot a}{12} x_a^3 + \frac{PNTa}{24} x_a^4 + \left( \frac{PNT \cdot a^3}{24} - \frac{3M \cdot a}{6} \right) x \quad (143)$$

$$E \cdot I_b \cdot y_b = \frac{M \cdot x_b^2}{2} - \frac{PNTb \cdot b}{12} x_b^3 + \frac{PNTb}{24} x_b^4 + \left( \frac{PNT \cdot b^3}{24} - \frac{3M \cdot b}{6} \right) x \quad (144)$$

Fazendo-se  $x_a = a/2$  e  $x_b = b/2$ , em (143) e (144), respectivamente, têm-se, finalmente, os deslocamentos no meio dos vãos “AB” e “BC” do enrijecedor:

$$\Delta_a = \frac{1}{E \cdot I_a} \left( -\frac{M \cdot a^2}{8} + \frac{5PNTa \cdot a^4}{384} \right) \quad (145)$$

$$\Delta_b = \frac{1}{E \cdot I_b} \left( -\frac{M \cdot b^2}{8} + \frac{5p_{NTb} \cdot b^4}{384} \right) \quad (146)$$

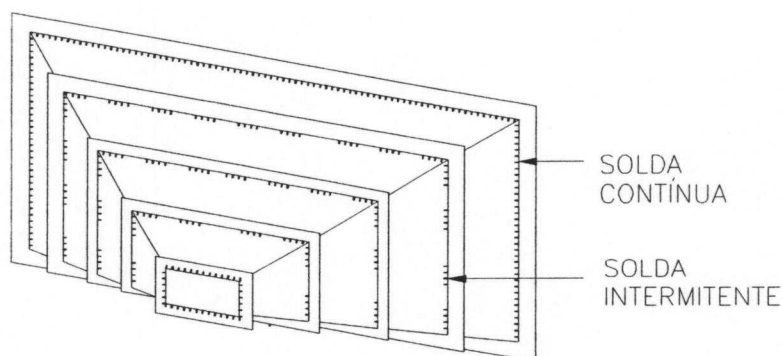
As expressões (145) e (146) possibilitam generalizar os cálculos deste tipo de sistema estrutural, pois as inércias dos enrijecedores podem ser diferentes para os vãos da seção transversal. Um desenvolvimento com os mesmos objetivos foi demonstrado por NEFF & HUSS (1984), utilizando o “Princípio do Trabalho Virtual” e comparando com o “Método dos Elementos Finitos”.

Além dos momentos de flexão, os enrijecedores horizontais também estarão sujeitos à tração devida à pressão sobre as paredes adjacentes. Portanto, a tensão total atuante no enrijecedor poderá ser calculada por:

$$f = \frac{T}{A} + \frac{M}{W} \quad (147)$$

#### 5.7.4 - Soldas

Os enrijecedores são normalmente unidos às placas através de soldas espaçadas, intermitentemente, (SKIP WELDS) (FIG. 2.46) para reduzir as distorções nas placas e os custos de fabricação.



**FIGURA 2.46 - Soldas contínuas e intermitentes**

Dependendo da aplicação e, quando executadas adequadamente, as soldas de penetração total não precisam ser dimensionadas, pois a sua resistência pode ser igual ou melhor do que a do material soldado.

Em soldas de filete as dimensões das pernas e comprimentos das soldas podem variar. Desta maneira, justificam-se os adequados dimensionamentos, (BLODGETT, 1966), (LOTHERS, 1973), (DUKE, 1989).

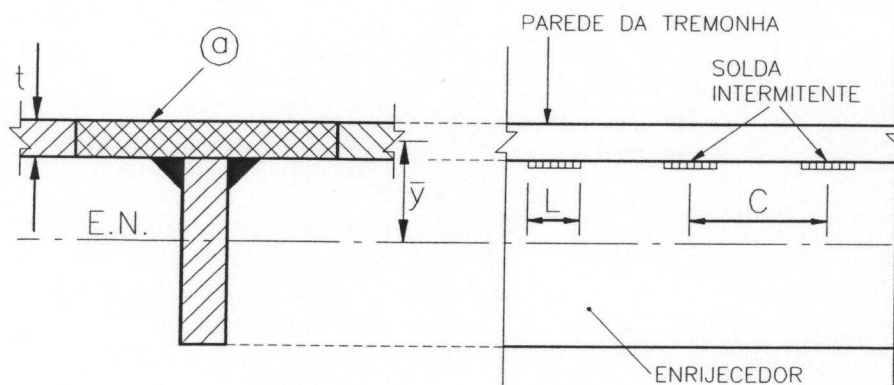


FIGURA 2.47 - Solda de filete

As forças de cisalhamentos horizontais nos filetes são determinados a partir dos conceitos da Resistência dos Materiais (FIG. 2.47), ou seja:

$$f = \frac{V \cdot a \cdot \bar{y}}{I \cdot n} = \tau \cdot t \quad (148)$$

onde:

$f$  = força atuante sobre a solda [ $FL^{-1}$ ];

$V$  = esforço de cisalhamento total na seção, em uma dada posição ao longo do enrijecedor [ $F$ ];

$a$  = área da mesa ligada ao enrijecedor [ $L^2$ ];

$\bar{y}$  = distância entre o centro de gravidade da área da mesa e o eixo neutro da seção total [L];

$I$  = momento de inércia de toda a seção [ $L^4$ ];

$n$  = número de filetes de soldas entre a mesa e o enrijecedor ( $n = 1$  ou  $2$ ) [1].

Para uma solda contínua de dimensão nominal "t" da perna ao longo de cada lado da alma do enrijecedor, a equação (148) fornece:

$$t = \frac{V \cdot a \cdot \bar{y}}{2 f_v I} \quad (149)$$

onde:

$f_v$  = resistência da solda à força cortante [ $F \cdot L^{-2}$ ].

Normalmente, a dimensão mínima de um filete de solda é determinada em função da chapa mais grossa. No entanto, a não ser por necessidade de cálculo, a perna do filete não precisa ser maior do que a espessura da chapa mais fina (LOTHERS, 1973).

Quando a equação (149) fornecer dimensões menores do que a mínima, deve-se adotar solda de filete intermitente. Isto torna-se vantajoso em relação aos custos e reduções dos efeitos de distorções.

A partir da equação (148) pode-se chegar a uma equação que possibilita calcular o espaçamento ou distância de centro a centro das soldas intermitentes (FIG. 2.47). Então, conhecida a dimensão "t" calculada por (149), tem-se:

$$c = \frac{2 \cdot f_v \cdot t \cdot L \cdot I}{V \cdot a \cdot \bar{y}} \quad (150)$$

onde:

$c$  = passo longitudinal de centro a centro entre filetes de soldas intermitentes  $[L]$ ;

$I$  = momento de inércia de toda a seção transversal, considerando-se o enrijecedor e a largura efetiva da placa  $[L^4]$ ;

$t$  = dimensão nominal da perna do filete, calculado por (149)  $[L]$ ;

$V$  = esforço cortante máximo no painel  $[F]$ ;

$a$  = área da placa que corresponde ao produto de uma largura efetiva " $L_e$ " pela espessura da placa da tremonha  $[L^2]$ ;

$\bar{y}$  = distância entre o eixo neutro do conjunto enrijecedor/placa ao C.G. da placa da tremonha  $[L]$ ;

$L$  = comprimento do filete de solda intermitente, devendo ser maior do que  $4.t$   $[L]$ .

## 6 - MATERIAIS ESTRUTURAIS

### 6.1 - Propriedades dos aços

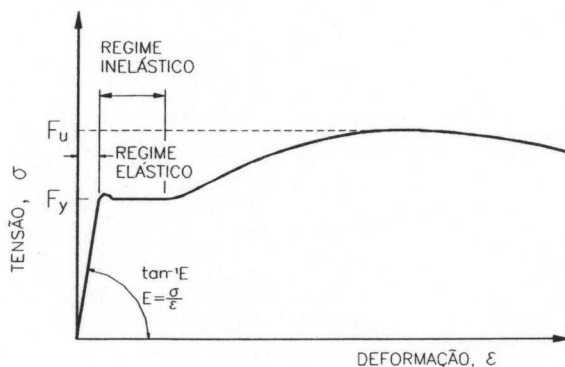
Do ponto de vista estrutural, as propriedades mais importantes dos aços são: a resistência ou limite de escoamento, resistência última ou limite de resistência à tração, módulo de elasticidade e módulo tangente, ductilidade, soldabilidade e resistência à fadiga (YU, 1991).

O termo "aços estruturais" engloba todos os aços que, devido às suas propriedades mecânicas, são adequados para o uso em elementos que suportam cargas.

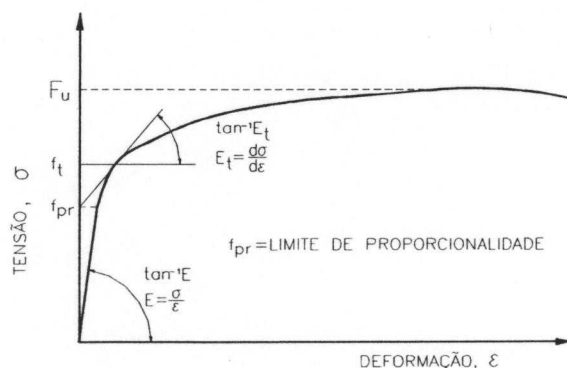
A resistência das peças em "aço estrutural" depende do limite de escoamento. O termo "limite de escoamento" é genérico e indica que o aço tem uma tensão de

escoamento definida por um limite específico ou tem uma tensão de escoamento convencional.

Aços produzidos pela laminação a quente possuem patamar de escoamento (FIG. 2.48-a). Para este tipo de aço, o limite de escoamento é definido pelo nível no qual a curva tensão-deformação torna-se horizontal.



(a)



(b)

**FIGURA 2.48 - Diagramas típicos tensão-deformação para aços estruturais**

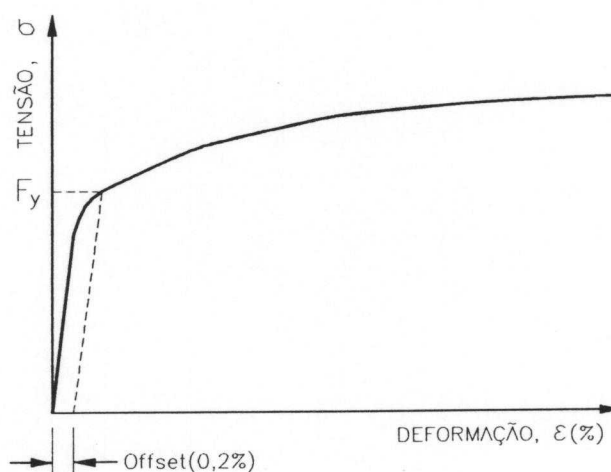
Por outro lado, aços laminados a frio não apresentam patamar de escoamento, ou seja, o escoamento é gradual (FIG. 2.48-b) (YU, 1991).

Para aços sem patamar de escoamento, o limite de escoamento é determinado através de um valor “n”, convencionado internacionalmente. “Quando o desvio da proporcionalidade é expresso em termos de um aumento da deformação, tem-se o chamado “limite de desvio (offset) n”, isto é, o limite “n”, neste caso, é calculado por meio de um aumento de n% na deformação, após a fase elástica. Geralmente, o valor “n” é

especificado para 0.2% (para os metais e ligas metálicas em geral), o que significa uma deformação plástica de 0.002, depois que ultrapassa o limite de proporcionalidade (FIG. 2.49)” (SOUZA, 1982).

Atualmente, encontram-se disponíveis aços que possuem tensões de escoamentos entre 170 e 690 MPa.

O módulo de elasticidade “ $E$ ” é definido pelo ângulo do trecho reto da curva tensão-deformação. Por outro lado, o módulo tangente “ $E_t$ ” é definido pela declividade da tangente à curva tensão-deformação em qualquer ponto da mesma (FIG. 2.48-b).



**FIGURA 2.49 - Limite de escoamento para aço sem patamar de escoamento**

A ductilidade do material é conceituada como sendo a capacidade do mesmo em manter elevada a sua capacidade de deformação plástica antes da ruptura. A ductilidade é importante para os materiais estruturais pois permite uma redistribuição das altas tensões localizadas, frequentemente encontradas nas proximidades de furos ou de outras mudanças abruptas de geometria. Ela, também, é uma condição requerida no processo de dobramento das peças estruturais.

A soldabilidade é a capacidade de um aço ser soldado satisfatoriamente, livre de crateras e permitindo a execução de ligações sem dificuldade na penetração do metal da solda. Estas condições dependem, basicamente, da composição química do aço e do processo de soldagem utilizado.



A fadiga ocorre quando um elemento estrutural está sujeito a tensões repetidas ou cíclicas, podendo vir a romper mesmo nos casos em que a sollicitação máxima aplicada seja inferior à resistência ao escoamento do material (YU, 1991).

## 6.2 - Aços para Silos

A escolha do tipo de aço a ser utilizado dependerá das propriedades mecânicas requeridas, do tipo de aplicação e da norma a ser utilizada. Quanto às espessuras de chapas as normas brasileiras disponíveis são: a “Norma para Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios NBR 8800/86” e a “Norma para Cálculo de Estruturas de Aço constituída por Perfis Leves NB-143/67”. A primeira, limita a espessura mínima das chapas em 3 milímetros e a segunda limita a espessura no intervalo entre 1 a 6 milímetros.

**TABELA 2.10 - Aços para Silos**

Aços para Silos				
Tipos	Propriedades Mecânicas		Aplicações	Produto
	Lim. de Escoamento	Lim. de Resistência		
	(MPa)	(MPa)		
SAE 1008	172	309	colunas, stiffeners	chapas e bobinas a quente ou a frio
SAE 1010	183	330	colunas ou stiffeners	chapas e bobinas a quente ou a frio
ASTM A36	250	400 a 550	construção soldada e aparafusada; propósitos estruturais em geral	chapas, barras e perfis
ASTM A570 Grau C	232	366	perfis formados a frio; construção soldada ou parafusada	chapas ou bobinas a quente
ABNT CF-24	240	370	chapas finas para uso estrutural	bobinas a frio ou a quente
ABNT CF-26	260	420	chapas finas para uso estrutural	bobinas a frio ou a quente
ZAR 345	345	430	corpo e tremonhas	chapas ou bobinas
SAC - 50	≥ 343	≥ 461	corpo de silos e estrutural	chapas ou bobinas a quente
NBR LNE - 38	≥ 375	≥ 440	corpo e tremonhas	chapas e bobinas a quente

Estas normas regulamentam a utilização de aços especificados nacionalmente ou pela norma ASTM ( American Society for Testing and Materials).

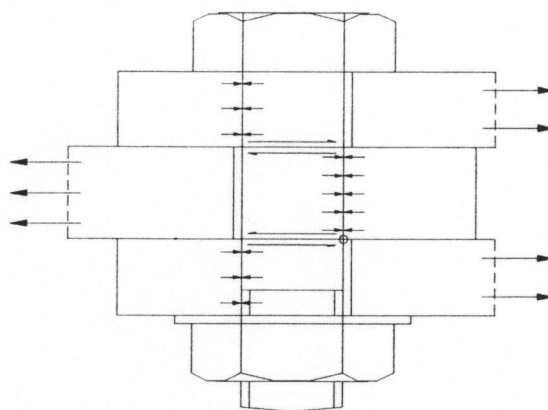
Os aços especificados pela SAE (Society of Automotive Engineers), utilizados na indústria mecânica, não são regulamentados pelas Normas Brasileiras anteriores. No entanto, por vezes, estes aços são utilizados em construções civis.

Na tabela 2.10 são apresentados alguns dos principais tipos de aços utilizados em silos, seja fazendo parte da estrutura do silo propriamente dito ou de sua estrutura de sustentação.

### 6.3 - Parafusos Estruturais

#### 6.3.1 - Parafusos comuns

São parafusos feitos com aço a baixo carbono e, por não possuírem nenhum tratamento especial, são mais econômicos e largamente utilizados em ligações estruturais. Para proteção contra a corrosão, estes parafusos podem ser zincados ou bicromatizados.



**FIGURA 2.50 - Parafuso comum**

Estes parafusos transferem os esforços de cisalhamentos diretamente por contato entre o parafuso e as superfícies internas dos furos das chapas (FIG. 2.50). São

normalmente utilizados em estruturas sujeitas a cargas estáticas. Nesta categoria estão os parafusos ASTM A307 (OWENS & CHEAL, 1989).

### 6.3.2 - Parafusos de alta resistência

São parafusos feitos com aço a médio carbono, com aço liga, ou que passaram por tratamento térmico. Portanto, sua resistência à tração pode ser várias vezes maior do que aquela dos parafusos comuns. Estes parafusos são apertados contra as partes a serem unidas até adquirir uma alta tensão de tração. As partes unidas desta maneira, são impedidas de se deslocarem, quando solicitadas por tração, devido à alta pressão de atrito desenvolvida pelo aperto (FIG. 2.51). Nesta categoria, estão os parafusos ASTM A325 e ASTM A490 (OWENS & CHEAL, 1989).

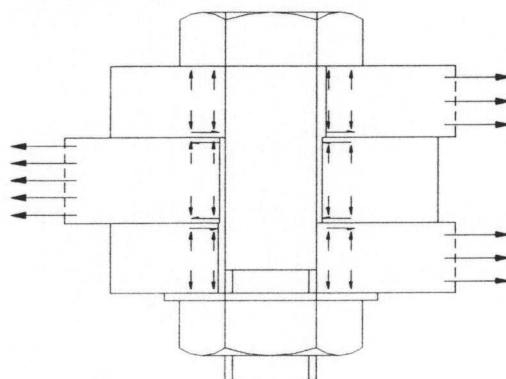


FIGURA 2.51 - Parafusos de alta resistência

Previsões especiais são necessárias para assegurar o aperto adequado dos parafusos. Devido à alta protensão e rigidez sob cargas de cisalhamentos, estes parafusos são adequados para o uso em condições de cargas alternadas ou de fadiga. A galvanização pode ser usada para evitar os problemas de corrosão.

Os parafusos de alta resistência podem, também, serem usados para trabalhar somente devido ao contato. Neste caso, a carga de cisalhamento é absorvida pela haste do parafuso, que se apoia sobre os lados do furo da chapa de união.

### 6.3.3 - Nomenclatura internacional

Atualmente, os parafusos, porcas e arruelas tendem a ser fabricados obedecendo normas internacionais (ISO - International Organization for Standardization) embora as normas nacionais sejam usadas como complementação de documentos. Pela ISO, as propriedades mecânicas dos parafusos são definidas pelo código "X.Y". O "X" equivale a 1/100 da resistência última à tração do parafuso em MPa, e o "Y" equivale a 10 vezes a relação entre a resistência ao escoamento e a resistência última, ou seja,  $10 \cdot (f_y / f_u)$ . Nem todas as designações fornecem valores exatos, mas, em ordem de grandeza, dão razoáveis aproximações. Na tabela a seguir, são fornecidos alguns exemplos desta nomenclatura:

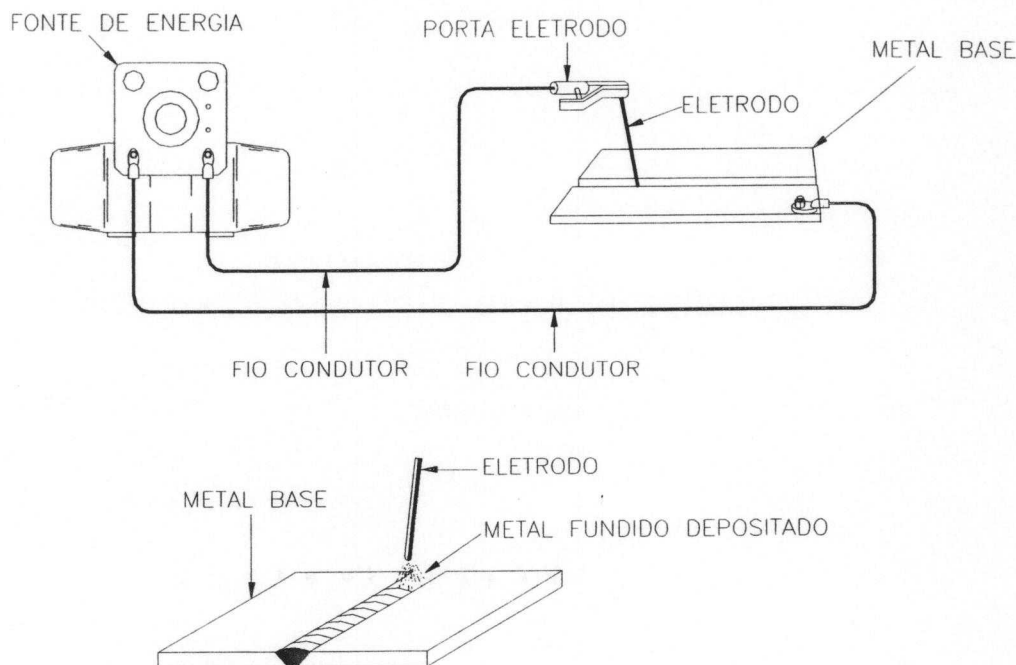
**TABELA 2.11 - Propriedades mecânicas dos parafusos de acordo com a ISO (Fonte: BLAKE, 1986)**

Classe	Dim. Nom. (mm)	Material	Proteção (MPa)(min.)	Escoamento (MPa)(min)	Res. Última (MPa)(min)
4.6	M5 a M100	aço carbono e médio carbono	225	240	400
8.8 (A325, tipo 1)	M16 a M36	aço médio carbono; o produto é temperado	600	660	830
10.9 (A490, tipo 3)	M12 a M36	aço resistente à corrosão atmosférica; o produto é temperado	830	940	1040

### 6.4 - Soldas

Os processos de soldagem mais utilizados em estruturas metálicas são: "Soldagem Manual por Eletrodo Revestido" (SMAW, Shielded Metal Arc Welding); "Soldagem a Arco com Proteção Gasosa" (GMAW, Gas Metal Arc Welding); "Soldagem a Arco Submerso" (SAW, Sumerged Arc Welding); e "Soldagem a Arco com Eletrodo de Tungstênio e Proteção Gasosa" (GTAW, Gás Tungsten Arc Welding) (CARY, 1979).

O mais antigo e difundido processo de soldagem é o manual, por eletrodo revestido (SMAW), também denominado de soldagem a arco elétrico, inventado por Oscar Kjellberg, entre o período de 1907 a 1914.

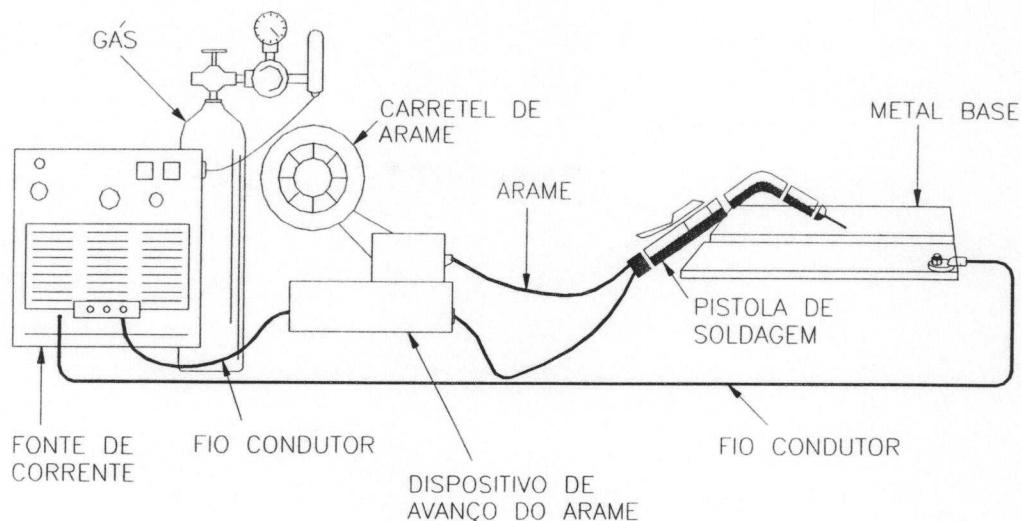


**FIGURA 2.52 - Soldagem com eletrodo revestido**

Este processo consiste de um eletrodo metálico, revestido, que conduz corrente elétrica e fornece o metal de adição para um metal base (FIG. 2.52).

Os eletrodos são classificados de acordo com as propriedades mecânicas do metal base, posição de soldagem, tipo de revestimento e o tipo de corrente elétrica necessária.

A identificação dos eletrodos é feita por códigos. Assim, no código “E $n^o$ XX”, “E” é a inicial da palavra “Electrode”, “ $n^o$ ” é o valor da resistência à tração do eletrodo em  $Kip / in^2 = Ksi$  ( $1Ksi = 482.63 MPa$ ), o primeiro “X” representa um número que designa a posição de soldagem e o segundo “X” indica o número correspondente ao tipo de revestimento do eletrodo e a corrente elétrica a ser usada (alternada ou contínua).



**FIGURA 2.53 - Processo de soldagem MIG/MAG**

O processo de soldagem a Arco com Proteção Gasosa (GMAW) se subdivide nos processos MIG (Metal Inert Gas) e MAG (Metal Active Gas). Estes processos utilizam um eletrodo consumível na forma de arame bobinado, alimentado continuamente para a zona de trabalho (FIG. 2.53). A proteção do eletrodo é obtida através de um tipo de gás inerte (MIG) ou por uma mistura de vários gases ativos (MAG). Dependendo da técnica de soldagem pode-se soldar materiais base com espessuras acima de 0.13 milímetros. A identificação dos arames para o processo MIG/MAG também é feito por códigos. O código utilizado é “ER -  $n^o$  S-X”, onde “ER” indica ser eletrodo em fio ou vareta, “ $n^o$ ” é o valor da resistência mínima à tração do metal depositado (este número é dado em múltiplos de 1000 psi, o qual deve ser multiplicado por 6.9 para obter o valor em MPa), “S” indica eletrodo sólido e “X” relaciona o tipo de composição química. A Tabela 2.12 fornece alguns tipos de arames de aço, utilizando-se este código.

As vantagens do processo de soldagem MIG/MAG podem ser relacionados em seguida:

- a soldagem pode ser feita em todas as posições (comparada com o do arco submerso);
- é o único processo com eletrodo consumível que pode ser utilizado em todos os metais e ligas;

TABELA 2.12 - Arames de Aço para Soldagem TIG / MIG / MAG

Arames de Aço para Soldagem TIG / MIG / MAG						
Especificação	Composição	TIG	MIG / MAG			Observações
		Argônio	Ar - O <sub>2</sub>	Ar - CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	
ER - 70S-2	C 0.050					Utilizados para soldagem de aços com superfície enferrujada ou suja. Usado para solda fora de posição, com transferência por curto-circuito devido a facilidade de operação.
	Mn 1.00	⊗	⊗	⊗	⊗	
	Si 0.500					
	Ti 0.100					
	Zr 0.070					
	Al 0.100					
ER - 70S-6	C 0.100					Para solda de aços ao Carbono comuns, vasos de pressão com resistência a tração máxima de 620 N/mm <sup>2</sup> e chapas navais. Estruturas em geral com aços ao Carbono.
	Si 0.900					
	Mn 1.00	⊗		⊗	⊗	

- possui eletrodo com alimentação contínua, o que elimina as paradas para a troca de eletrodo (comparado com o eletrodo revestido);
- as taxas de deposição são bastantes elevadas (comparadas com o eletrodo revestido);
- as velocidades de soldagem são mais elevadas (comparadas com as do eletrodo revestido e TIG);
- as soldas de grande extensão podem ser feitas, pois o eletrodo é contínuo;
- a limpeza após a solda é mínima;
- o custo total da soldagem é muito inferior ao do eletrodo revestido;
- é de fácil aprendizado o processo.

Por outro lado, como desvantagens pode-se citar:

- o equipamento é mais complexo, mais caro e menos portátil (comparado com o eletrodo revestido);

- o acesso é difícil em locais restritos devido ao bocal da tocha;

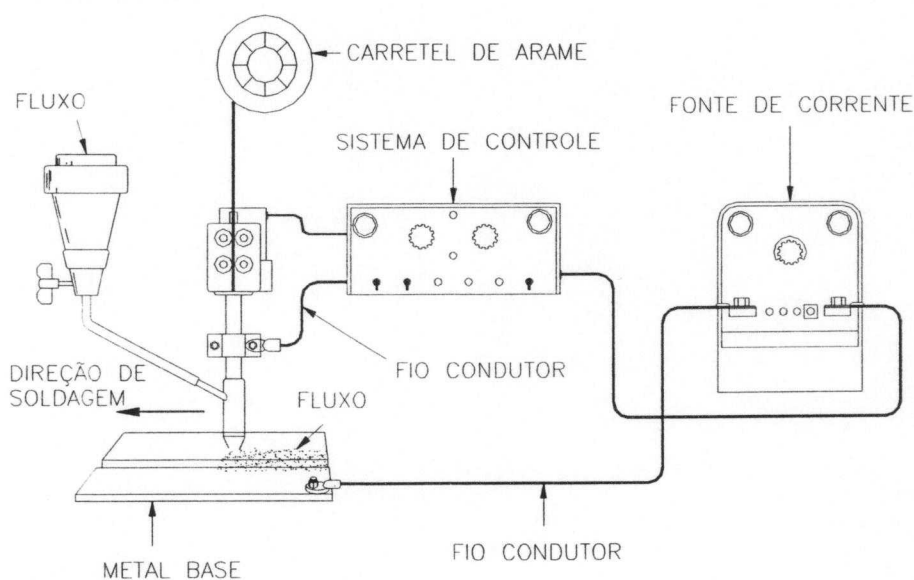
- não pode ser usado onde existam correntes de ar;

- os níveis de radiação e calor são maiores do que em outros processos.

A Soldagem a Arco Submerso (SAW) constitui uma evolução automatizada do processo de soldagem a eletrodo revestido (FIG. 2.54). Neste processo, um arco elétrico é estabelecido entre o arame eletrodo e o material a ser soldado, ficando o arco elétrico submerso em uma camada de fluxo.

O fluxo age como fundente, protegendo o metal de solda das contaminações e como isolante térmico, concentrando o calor na parte sólida.

Como o arco elétrico fica totalmente coberto pelo fluxo, ele não é visível e a solda se desenvolve sem faísca, luminosidade e respingos, que caracterizam os processos de soldagem a arco aberto.



**FIGURA 2.54 - Soldagem a arco submerso**

Como vantagens deste processo, podem-se citar:

- pode ser um processo semi ou automático;

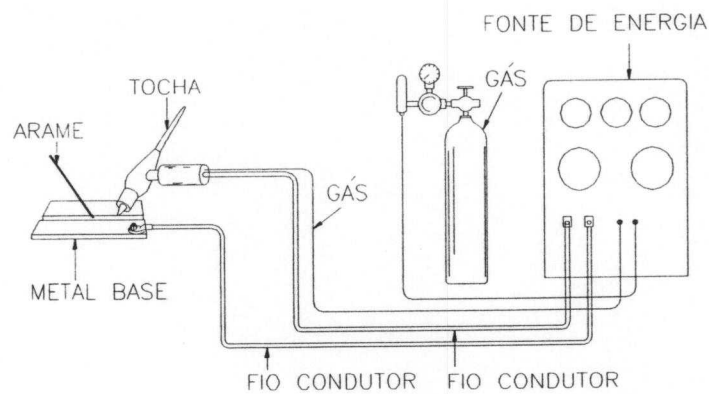


- é um processo rápido e com grande rendimento;
- proporciona soldas com excelentes propriedades mecânicas;
- possui uma elevada taxa de deposição em relação aos processos manuais.

A Tabela 2.13 fornece alguns tipos de arames de aço utilizados em Soldagem a Arco Submerso.

**TABELA 2.13 - Arames de Aço para Arco Submerso**

Arames de Aço para Arco Submerso		
Especificação	Composição	Observações
E A2	C 0.10	Para solda de aços de baixa liga de alta resistência até 550 N/mm <sup>2</sup> de resistência a tração, aços para caldeiras e vasos de pressão, adequado para temperaturas de serviço até 500 °C. Usar fluxos básicos.
	Si 0.10	
	Mn 1.10	
	Mo 0.50	
E A3	C 0.11	Arame de aço Mn-Mo para solda de aços de alta resistência (até 620 N/mm <sup>2</sup> ), bem como aços para vasos de pressão, caldeiras e tubulações. Temperatura de serviço até 500 °C. Combinação com fluxos básicos.
	Si 0.10	
	Mn 1.90	
	Mo 0.50	



**FIGURA 2.55 - Soldagem TIG**

No processo de Soldagem a Arco com Eletrodo de Tungstênio e Proteção Gasosa (GTAW) ou também denominado de TIG (Tungsten inert-gas), o calor é fornecido pelo arco protegido por um gás inerte, formado entre a peça e um eletrodo não consumível de tungstênio (FIG.2.55). Os gases de proteção mais usuais são: argônio, hélio ou mistura

desses gases. A proteção gasosa evita a oxidação atmosférica do eletrodo de tungstênio e resfria o mesmo, promovendo um arco estável, além de proteger o arame e o banho fundido de solda.

No processo TIG, o arame é alimentado manual ou automaticamente. O procedimento para aços em geral é sempre com corrente contínua e eletrodo no polo negativo.

O processo TIG é indicado para soldagem de chapas finas, utilizando vários tipos de arames consumíveis. As vantagens desse processo podem ser:

- alto calor concentrado introduzido na peça, diminuindo a zona termicamente afetada;
- excelente acabamento dos cordões;
- permite solda de alta qualidade;
- possibilita soldar chapas de pequenas espessuras;

A Tabela 2.12 fornece alguns tipos de arames de aços utilizados neste tipo de soldagem.

# CAPÍTULO III

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 1 - MATERIAIS

#### 1.1 - Tipos

Nos ensaios, utilizaram-se dois tipos de materiais: a areia, como “produto granular” de carga, e o aço, como “material estrutural”, utilizado na estrutura de sustentação e nas chapas e enrijecedores do corpo da tremonha.

#### 1.2 - Produto Granular

A areia foi o material genérico escolhido para atuar como ação sobre as paredes da tremonha. Este material se caracteriza por possuir alto peso específico, por ser de fácil obtenção, por distribuir melhor as pressões e por apresentar características de “produto granular”.

#### 1.3 - Material Estrutural

Na tabela a seguir são fornecidos os tipos de materiais estruturais utilizados na estrutura de sustentação e no corpo da tremonha. São especificados os nomes, os tipos de aços, as dimensões principais e o local de utilização.

TABELA 3.1 - Aços Estruturais

Nomes Usuais	Tipos	Dimensões Comerciais	Utilização
Perfil U Laminado	ASTM A36	203.2x57.15x7.7 (mm)	Colunas e vigas
Ferro Chato	SAE 1010	7.94x76.2 (mm)	Enrijecedores
Ferro Chato	SAE 1010	6.35x63.5 (mm)	Enrijecedores
Ferro Chato	SAE 1010	4.76x50.8 (mm)	Enrijecedores
Chapa Fina	SAE 1008	0.91 (mm)	Paredes da Tremonha
Chapa Fina	SAE 1012	3.04 (mm)	Paredes da Tremonha
Chapa Fina	SAE 1012	4.76 (mm)	Porta da boca
Chapa Preta	SAE 1010	12.7 (mm)	Base das colunas
Cantoneira	SAE 1010	3.18x12.7 (mm)	Guia da boca
Parafuso	ASTM A307	22.22x50.8 (mm)	Viga/Colu../Tremonha

Os perfis das seções transversais da estrutura de sustentação da tremonha foram escolhidos baseados em dimensionamentos que fornecessem uma estrutura tão rígida quanto possível. Isto foi necessário para que os deslocamentos deste sistema estrutural não comprometessem os resultados lidos na estrutura principal de ensaio.

Os tipos de aços utilizados nas paredes e enrijecedores da tremonha foram definidos em função da oferta do mercado local. No entanto, esta opção não compromete os resultados a serem obtidos em termos experimentais, pois o módulo de elasticidade dos aços é uma propriedade mecânica, que se mantém praticamente constante para os diversos tipos de aços.

As espessuras das chapas das paredes da tremonha foram definidas em projeto, de tal maneira a se terem estruturas não-enrijecidas e enrijecidas tão flexíveis quanto possível e com iguais capacidades de suportar cargas.

As seções retangulares adotadas para os enrijecedores foram definidas nos dimensionamentos por apresentarem menor rigidez à torção. Esta baixa rigidez facilita a leitura dos deslocamentos pelos dispositivos de laboratório e, conseqüentemente, a determinação da rotação dos enrijecedores.

Os parafusos foram definidos em função dos critérios de resistência e rigidez da estrutura de sustentação da tremonha. Para facilitar a montagem e para uniformizar as dimensões, utilizaram-se os mesmos tipos de parafusos para a conexão da tremonha à viga de transição.

## 2 - MÉTODOS

### 2.1 - Métodos teóricos

#### 2.1.1 - Modelos estruturais adotados

As chapas das tremonhas foram analisadas, basicamente, segundo três modelos estruturais. Os dois primeiros modelos tratam-se de chapas isoladas e o terceiro modelo trata-se de um sistema em casca trabalhando em conjunto. O primeiro modelo consiste de chapas retangulares com  $\lambda < 3$  (ver item 5.4.3, Cap. II). Estes tipos de chapas são aplicadas às tremonhas não enrijecidas e, eventualmente, às tremonhas enrijecidas (Figura 3.1).

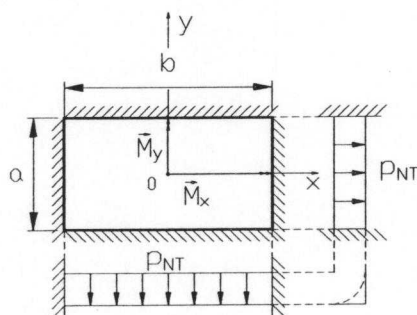


FIGURA 3.1 - Modelo de chapa retangular com  $\lambda < 3$

Em geral nas tremonhas não enrijecidas, normalmente, as chapas são mais espessas. Então, por apresentarem uma rigidez à flexão relativamente maior do que as chapas finas, adotam-se bordas engastadas como condições de contorno. Por outro lado, devido à menor rigidez à flexão das chapas finas, quando as chapas retangulares com  $\lambda < 3$  fizerem parte de tremonhas enrijecidas, adotam-se bordas articuladas como condições de contorno (Figura 3.2).

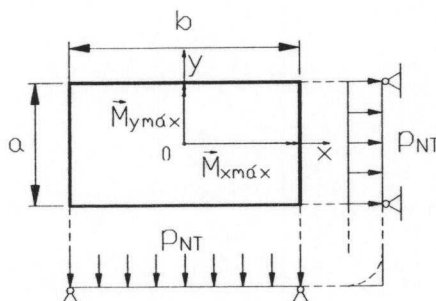
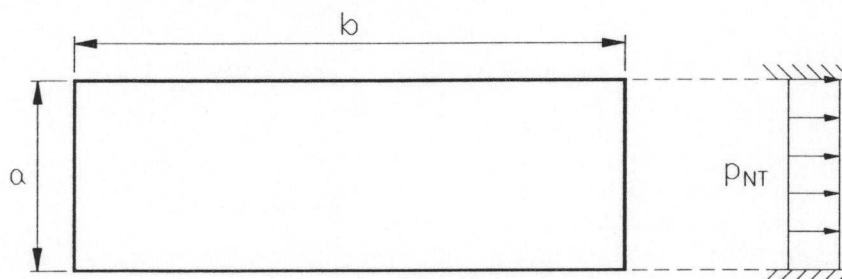


FIGURA 3.2 - Modelo de chapa retangular com  $\lambda < 3$

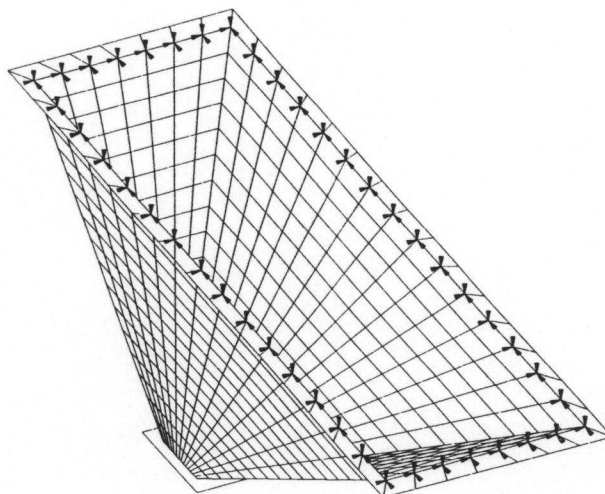
O segundo modelo consiste de chapas retangulares com  $\lambda > 3$  (ver item 5.4.2, Cap. II). Este tipo de chapa é aplicado às tremonhas enrijecidas, onde se pode definir, previamente, o espaçamento entre os enrijecedores. Adotaram-se as condições de contorno das chapas como sendo bi-engastadas (Figura 3.3). Esta escolha se deve à continuidade sobre os apoios proporcionada pelos enrijecedores.



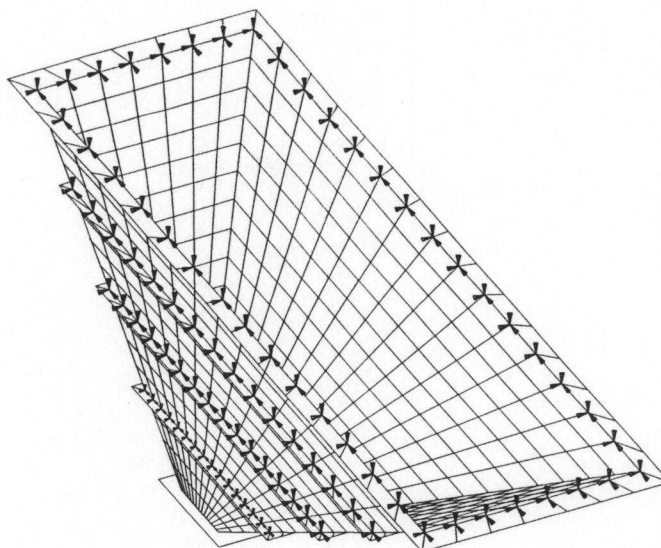
**FIGURA 3.3 - Modelo de chapa retangular com  $\lambda > 3$**

Para os dois primeiros modelos mencionados, as ações são simplificadas, transformando-se a carga trapezoidal real atuante em carga uniforme equivalente (ver item 4.5, Cap. II). E ainda, as chapas reais de formatos triangulares ou trapezoidais são convertidas em chapas retangulares (ver item 5.6, Cap. II).

O terceiro modelo é o que mais se aproxima da situação real. Os sistemas de chapas e enrijecedores são interconectados de tal maneira a trabalharem simultaneamente com as cargas trapezoidais. As condições de contorno são definidas pelos sistemas estruturais, que constituem a tremonha, e pelos vínculos, que impedem as translações em três direções, enquanto que as rotações são liberadas (Figuras 3.4 e 3.5).

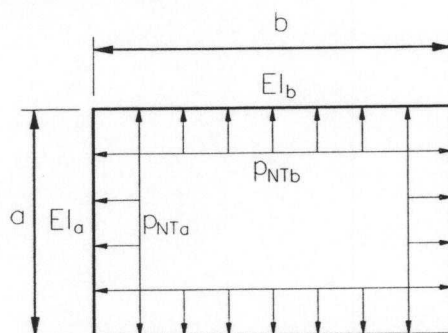


**FIGURA 3.4 - Modelo tri-dimensional de tremonha não enrijecida**



**FIGURA 3.5 - Modelo tri-dimensional de tremonha enrijecida**

O modelo estrutural adotado para os enrijecedores é assimilado a um quadro fechado hiperestático, conforme a Figura 3.6.



**FIGURA 3.6 - Modelo estrutural para enrijecedores**

### 2.1.2 - Métodos Analíticos

#### a - Ações sobre chapas e enrijecedores

Para o cálculo das ações, utilizou-se o “Método de Walker”, conforme as expressões fornecidas no item 4.3.2 do Capítulo II.

A expressão básica de referência é a (47). Esta expressão, juntamente com a expressão (48), permite calcular as pressões normais às chapas variando trapezoidalmente e as consequentes pressões de atrito.

Os cálculos das ações foram feitos com o auxílio de um software desenvolvido durante este trabalho utilizando-se dos recursos de programação do VISUAL BASIC 3 para WINDOWS.

O VISUAL BASIC é uma das primeiras linguagens de computação a possibilitar uma programação orientada a eventos. Ela tem um estilo especialmente recomendado para o tratamento de interação gráfica com os usuários. O software foi denominado de Cálculo de Tremonhas Piramidais (CTP) e sua programação se encontra no Anexo D. Os resultados dos cálculos das ações são fornecidos no Anexo A.

As cargas sobre enrijecedores foram avaliadas de acordo com o item 4.6 do Capítulo II.

#### **b - Forças de tração horizontais**

As forças de tração horizontais são calculadas conforme as equações (55) e (56) do item 5.2 do Capítulo II. Estas forças serão determinadas para a análise da tremonha não enrijecida. Na tremonha enrijecida supõe-se que os esforços de trações horizontais sejam absorvidos pelos enrijecedores.

#### **c - Forças de tração meridionais**

Para os casos de tremonhas analisadas neste trabalho, supõe-se que as forças de trações meridionais serão absorvidas pelas chapas das tremonhas não enrijecida e enrijecida. As expressões (61) e (62) do Capítulo II serão utilizadas para as determinações destas forças.

#### **d - Esforços de flexão e deslocamentos de placas**

Utilizou-se a teoria dos pequenos deslocamentos aplicada a placas com  $\lambda > 3$  e com  $\lambda < 3$ . As formulações e tabelas são encontradas nos itens 5.4.2 e 5.4.3 do Capítulo II.



### **e - Verificações dos efeitos combinados em chapas**

Se a análise for feita para chapas com  $\lambda > 3$ , os esforços combinados predominantes provocarão um estado de tensões uni-axial. Para este caso utiliza-se a expressão (70) do Capítulo II. Nos casos em que as chapas utilizadas possuem  $\lambda < 3$ , os esforços combinados provocarão um estado de tensões bi-axial. Desta maneira, as expressões (69) e (70) do Capítulo II devem ser utilizadas, juntamente com a expressão (68), para que se tenha a tensão equivalente, de acordo com o critério de von Mises.

### **f - Esforços de Flexão, Deslocamentos e Verificações em Enrijecedores**

Os esforços de flexão, os deslocamentos e as verificações das tensões em enrijecedores horizontais são determinados conforme as formulações definidas no item 5.7.3 do Capítulo II.

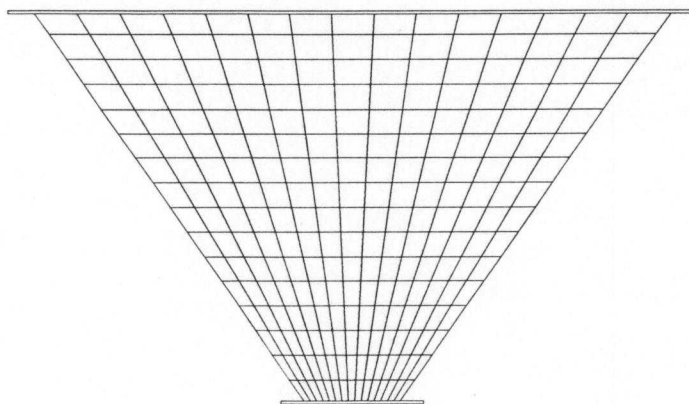
#### **2.1.3 - Métodos Numéricos**

Baseado nos modelos estruturais definidos para as tremonhas, as análises numéricas foram feitas, preliminarmente, pelo Software SAP90. Posteriormente, as análises passaram a ser feitas através do Programa ANSYS.

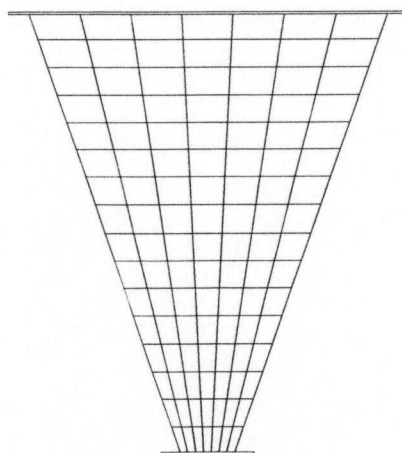
O ANSYS é um programa de origem americana que surgiu há 26 anos passados. Ele é um programa de elementos finitos que atende aos objetivos de pesquisas e projetos. Utiliza os mais modernos recursos interativos com total compatibilidade com o Windows 95. É um poderoso programa com múltiplos propósitos. Pode ser usado em uma grande variedade de disciplinas da engenharia, tais como: estrutural, mecânica, metalúrgica, mineralógica, elétrica, eletromagnética, eletrônica, térmica, fluida, e biomédica. Atualmente é um dos programas mais utilizados pelas mais renomadas instituições de ensino e pesquisa do mundo. Mais especificamente na área da engenharia das estruturas, sua capacidade de análise inclui; estática, dinâmica, fadiga, fratura, análise plástica, não-linearidades físicas e geométricas, sistemas de pórticos, grelhas, treliças, cascas, placas, tubos e cabos. Todas as análises podem ser feitas no plano e no espaço.

Adotaram-se malhas de elementos finitos iguais (Figuras 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10) para as tremonhas não enrijecida e enrijecida, pois as geometrias das mesmas em nada se diferem, a não ser nos enrijecedores. Para a tremonha não enrijecida, a malha formada ficou constituída por 898 nós, e, para a tremonha enrijecida, por 1178 nós. De acordo com os manuais do ANSYS, optou-se pela utilização do elemento finito SHELL63 nas definições das malhas. Este é um elemento finito de casca que admite esforços de flexão e de membrana.

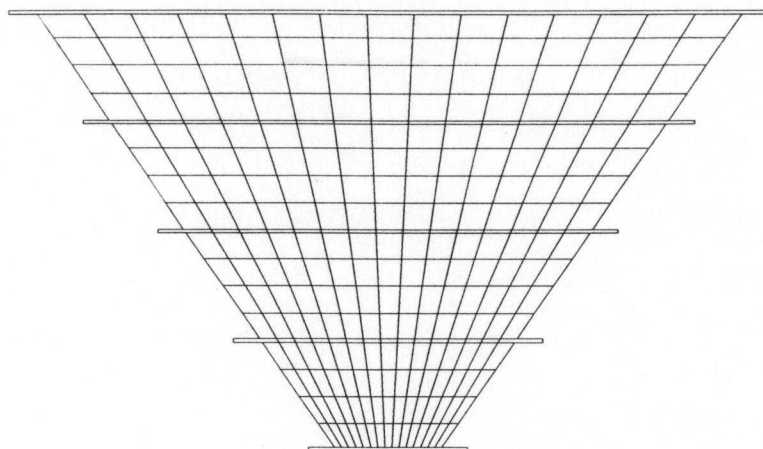
As malhas são muito importantes nas análises numéricas mas foram, também, de fundamental importância na análise experimental. Isto porque permitiram avaliar, quantitativa e qualitativamente, as deformações e deslocamentos dos sistemas estruturais..



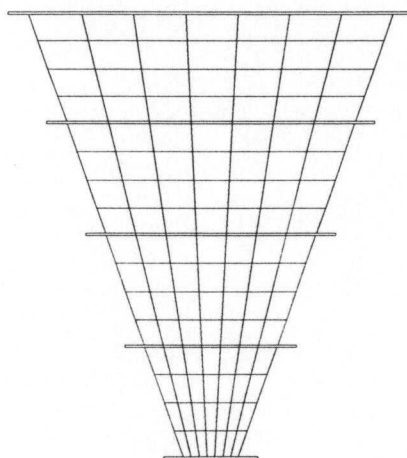
**FIGURA 3.7 - Definição da malha de elementos finitos para a chapa de maior área da tremonha não enrijecida.**



**FIGURA 3.8 - Definição da malha de elementos finitos para a chapa de menor área da tremonha não enrijecida.**



**FIGURA 3.9 - Definição da malha de elementos finitos para a chapa de maior área da tremonha enrijecida.**



**FIGURA 3.10 - Definição da malha de elementos finitos para a chapa de menor área da tremonha enrijecida.**

A malha foi definida baseada nos refinamentos dos resultados que se objetivava obter e, também, pela facilidade de colocação dos extensômetros em função de suas dimensões. Além disso, procuraram-se definir as dimensões e formas dos elementos finitos de tal maneira que houvesse coincidências entre as linhas horizontais limites destes elementos com as linhas de colocações dos enrijecedores (Figuras 3.9 e 3.10).

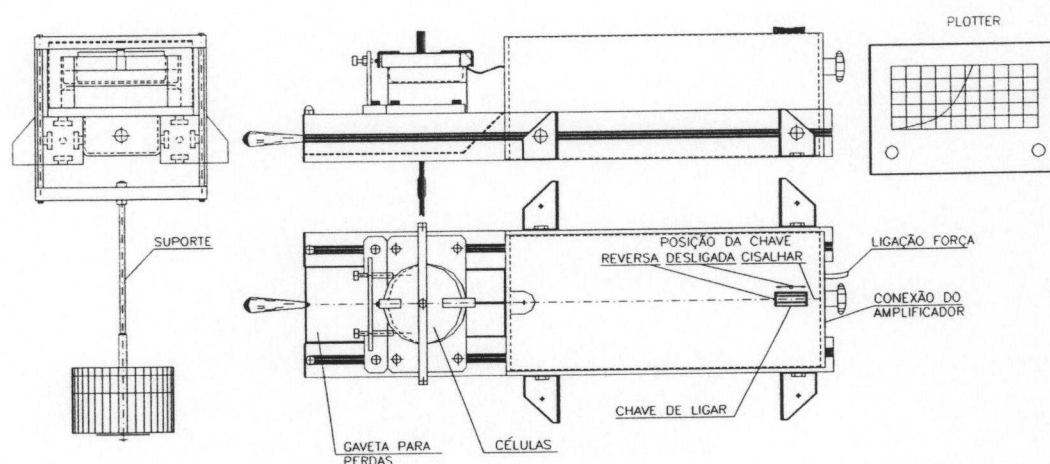
## 2.2 - Métodos experimentais

### 2.2.1 - Caracterização do produto granular

A determinação das propriedades do produto granular foi realizada através do Aparelho de Cisalhamento Direto, de Movimento de Translação, conhecido por "JENIKE SHEAR CELL" (Máquina de Ensaio TSG 70-140) (Figura 3.11) (Ver também Figuras C.1-a e C.1-b). Este aparelho está disponível no LaMEM da EESC/USP. Ele é usado para a determinação do peso específico, função fluxo, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e do ângulo de atrito do produto contra a parede.

A metodologia de ensaio para a determinação das propriedades de produtos granulares pode ser encontrada no trabalho de MILANI (1993).

De posse dos resultados dos ensaios com a areia, utilizou-se também do software YLOCUS, desenvolvido pelo professor CALIL (1989), do LaMEM da EESC/USP. Desta maneira, foram possíveis as determinações das propriedades da areia listadas na Tabela 3.2.



**FIGURA 3.11 - Aparelho de Jenike - TSG 70-140**

TABELA 3.2 - Propriedades da Areia

Peso específico ( $\gamma$ )	15.58 kN / m <sup>3</sup>
Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	36°
Efetivo ângulo de atrito ( $\phi_e$ )	39°
Ângulo de atrito do produto com a parede ( $\phi_w$ )	20°
Coefficiente de atrito do produto com a parede ( $\mu = tg\phi_w$ )	0.36

### 2.2.2 - Caracterização do material estrutural

Amostras de chapas foram submetidas ao ensaio de tração uni-axial em Máquina Universal de Tração. Esta máquina, pertencente, ao laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais da EESC/USP, é da marca INSTRON e tem capacidade máxima de ensaio para 10 toneladas-força (Figuras C.2-a e C.2-b). O objetivo dos ensaios é determinar o "módulo de elasticidade", os limites de "escoamentos" e os de "ruptura" das chapas, utilizadas nas confecções dos modelos das tremonhas. Os ensaios seguiram as prescrições da NB 6152 / 80, que trata da determinação das propriedades mecânicas à tração de materiais metálicos (SILVA et al, 1980) (SOUZA, 1982) e para se obterem informações adicionais recorreu-se à norma ASTM E8M (1980).

As dimensões normalizadas, adotadas para os corpos de prova, são fornecidas na Figura 3.12.

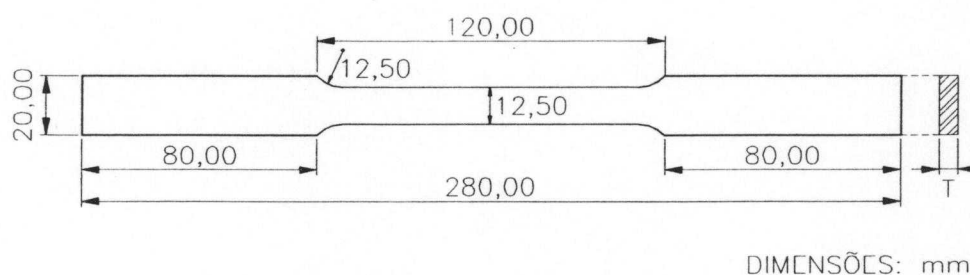


FIGURA 3.12 - Dimensões normalizadas dos corpos de prova

Prepararam-se corpos de provas para as cinco espessuras de chapas existentes nas tremonhas (Figuras C.3, C.4, C.5, C.6 e C.7). As espessuras comerciais de chapas utilizadas foram; 0.91, 3.04, 4.76, 6.35 e 7.94 milímetros. Em cada espessura utilizou-se um dos corpos de prova para a determinação do módulo de elasticidade via extensômetros eletrônicos (Figura C.4). Para os corpos de prova restantes o acompanhamento das propriedades mecânicas se fez através do plotter da própria máquina de ensaio.

Todos os trabalhos devem ser bastante meticolosos, desde as preparações das amostras até o final dos ensaios. As dimensões correspondentes às espessuras e larguras das partes úteis dos corpos de prova devem ser determinadas antes e após os ensaios. Medidas-padrão longitudinais, nas partes úteis, devem ser marcadas a partir de linhas de referências transversais para cada face e não situadas nos mesmos alinhamentos. Este cuidado evita que uma determinada amostra venha a se romper fora da medida padrão (ver Figuras C.6 e C.7) e que o ensaio, conseqüentemente se perca.

Os resultados numéricos das propriedades mecânicas dos corpos de prova, dependem da velocidade de ensaio. Esta velocidade foi definida em 0.5 mm/min. Na Tabela 3.3 são apresentados os resultados dos ensaios para as cinco espessuras de chapas utilizadas.

Notou-se que os valores dos limites de escoamento e de ruptura são relativamente diferentes daqueles fornecidos por alguns fabricantes de aço. Isto pode ser explicado, entre outros motivos, pelo fato de que, para estes tipos de aços, os fabricantes garantem apenas a composição química.

**TABELA 3.3 - Resultados dos ensaios das chapas de aço**

Série de C. de Prova	Espessuras Reais (mm)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	Estricção E (%)	Alongamento A (%)
I	7.90	314.3	462.8	66.7	38.1
II	6.40	221.8	367.8	73.3	38.0
III	5.00	324.5	456.7	59.1	36.6
IV	3.04	298.9	399.8	60.0	38.2
V	0.84	354.9	430.6	45.1	19.2

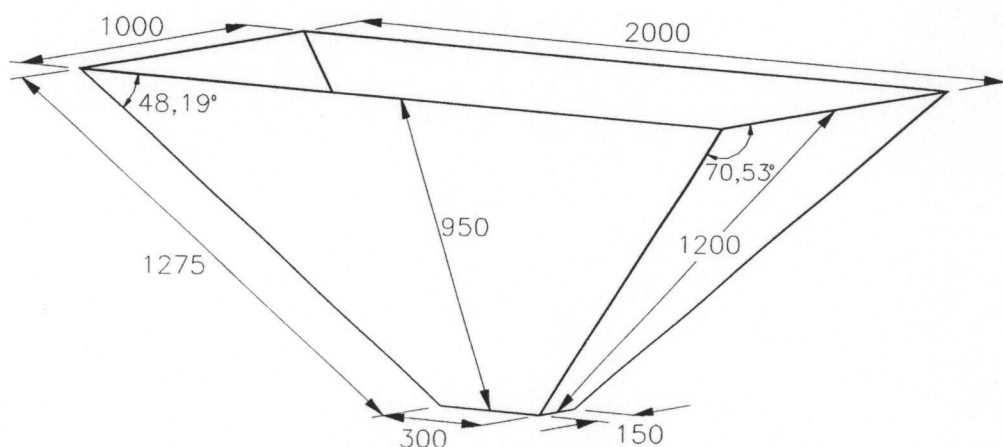
### 2.2.3 - Projeto e Fabricação do protótipo

Definiu-se, inicialmente, a forma tronco-piramidal para a pesquisa de protótipos em escalas reais de tremonhas não-enrijecida e enrijecida. As dimensões geométricas destes sistemas estruturais foram adotadas, baseando-se nas especificações de materiais comerciais encontrados no espaço disponível do laboratório, e atribuindo-se inclinações de chapas, que fornecessem deformações e deslocamentos máximos durante os ensaios.

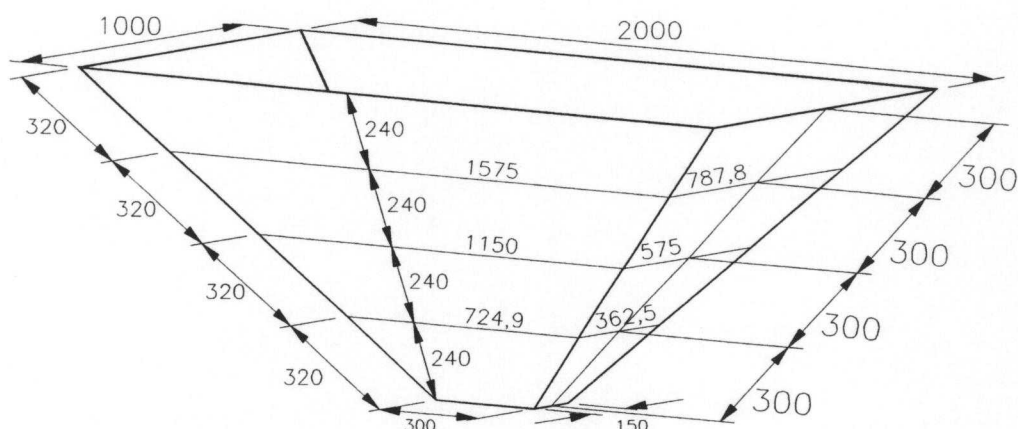
O detalhamento do projeto é uma etapa importante onde cada parte dos sistemas estruturais das tremonhas foi desenhado separadamente.

Os cálculos das grandezas geométricas foram feitos com o auxílio do Software CTP.

Nas Figuras 3.13 e 3.14, respectivamente, são fornecidas as dimensões de projeto das tremonhas não-enrijecida (Tipo 1) e enrijecida (Tipo 2). O projeto completo da estrutura de sustentação e tremonhas encontra-se no Anexo B.



**FIGURA 3.13 - Dimensões da tremonha não-enrijecida**



**FIGURA 3.14 - Dimensões da tremonha enrijecida**

Após o projeto definido iniciaram-se os trabalhos de fabricação. Estes trabalhos seguiram as etapas de traçagem, corte, furação, pré-montagem e soldagem, desenvolvidos por profissionais da Oficina Mecânica da EESC/USP.

A traçagem corresponde às marcações de dimensões lineares, ângulos e pontos de furações em perfis, barras e chapas.

Os perfis U foram cortados com serras de translação e as barras retangulares através de serras circulares. As chapas foram cortadas através de guilhotina.

Por apresentarem melhor acabamento dos furos, as furações foram feitas por broqueamento, através de furadeira elétrica.

A pré-montagem consistiu no posicionamento e nos pontamentos com soldas nos vários elementos estruturais. Estas etapas podem ser vistas nas Figuras C.8, C.9 e C.10).

A etapa mais importante e que exigiu maiores cuidados foi a soldagem. O processo de soldagem utilizado foi MIG, tanto para a estrutura de sustentação como para as tremonhas. As vantagens deste processo, frente aos outros tipos de soldagem, são comentadas no item 6.4 do Capítulo II.

Nos enrijecedores de transições e boca de descarga usou-se soldagem de filetes contínuos e, para os enrijecedores intermediários, previram-se apenas filetes intermitentes, conforme pode ser visto nos detalhes de projeto no Anexo B.

Para evitar maiores distorções nas chapas finas, devido às grandes variações de temperaturas em soldas contínuas, as soldas foram executadas em trechos alternados, com filetes de aproximadamente 150 milímetros. Após resfriamento das soldas executadas, completavam-se os trechos ainda não soldados. Algumas etapas de soldagem podem ser vistas nas Figuras C.11, C.12 e C.13.

Após a fabricação dos sistemas estruturais, estes passaram por etapas de limpeza, para eliminação de películas de corrosão e oleosidade. Posteriormente, fez-se a pintura com cores definidas em amarelo e alumínio. Estas cores foram escolhidas em função das condições de visibilidade.



## 2.2.4 - Ensaio dos protótipos

### a - Definição física das malhas de elementos finitos

As malhas de elementos finitos foram fisicamente desenhadas nas tremonhas, conforme formas e dimensões definidas no item 2.1.3. Estas malhas foram desenhadas, externa e internamente às tremonhas. Desta maneira, foi possível ajustar, adequadamente, os dispositivos de medidas de deformações e deslocamentos.

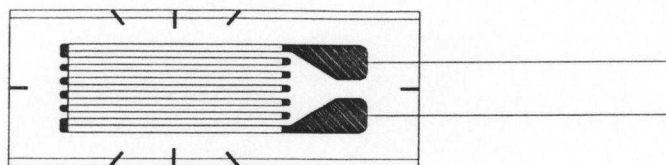
A definição interna das malhas nas chapas é outro detalhe importante, pois permite posicionar, adequadamente, os extensômetros internos, que deverão estar posicionados nas mesmas regiões e direções dos extensômetros externos, porém em superfícies opostas das chapas.

As figuras C.14, C.15 e C.16 ilustram os traçados externos e internos das malhas nas tremonhas.

### b - Medidores de deformações

Como é sabido, conhecendo-se as deformações atuantes e o módulo de elasticidade do material, podem-se determinar as tensões aplicadas em uma determinada amostra ou modelo de ensaio. Ou seja, podendo-se medir a deformação podem-se determinar as tensões limites máximas, de tal forma que o material tenha comportamento elástico.

Com o objetivo de medir as deformações utilizaram-se extensômetros elétricos (Figura 3.15). Os extensômetros elétricos ou STRAIN GAGES, utilizados neste trabalho, foram do tipo KYOWA KFC-5-C1-11. O comprimento, a resistência elétrica e o Fator Gage especificados são: 5 mm, 120  $\Omega$  e 2.1, respectivamente.



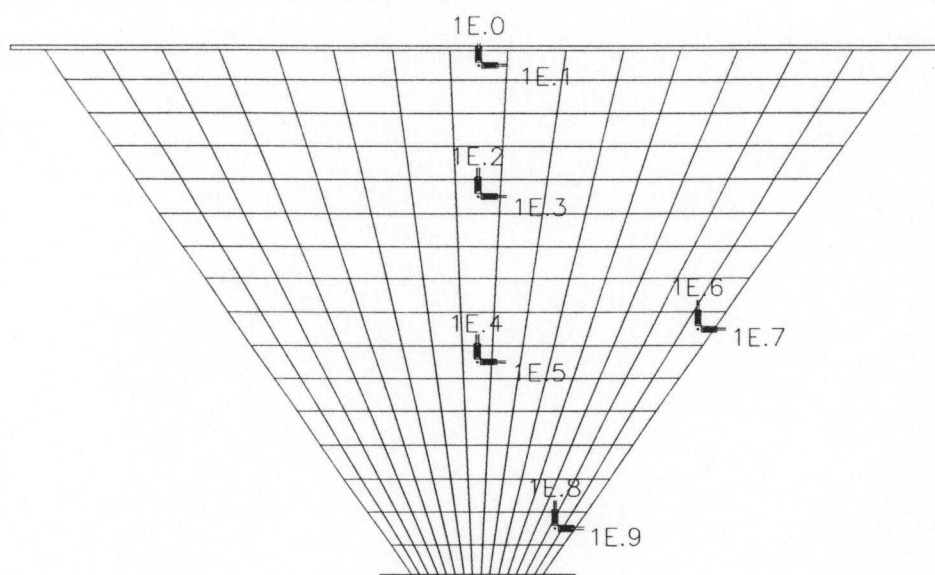
**FIGURA 3.15 - Extensômetro elétrico**

A qualidade da fixação e, conseqüentemente, a confiança das medidas dependem tanto do extensômetro quanto do adesivo e preparação das superfícies de colagem. Além disso, deve-se ter o cuidado de verificar as resistências elétricas dos extensômetros através de multímetros, antes e após as fixações, para observar eventuais danos de fabricação ou utilização.

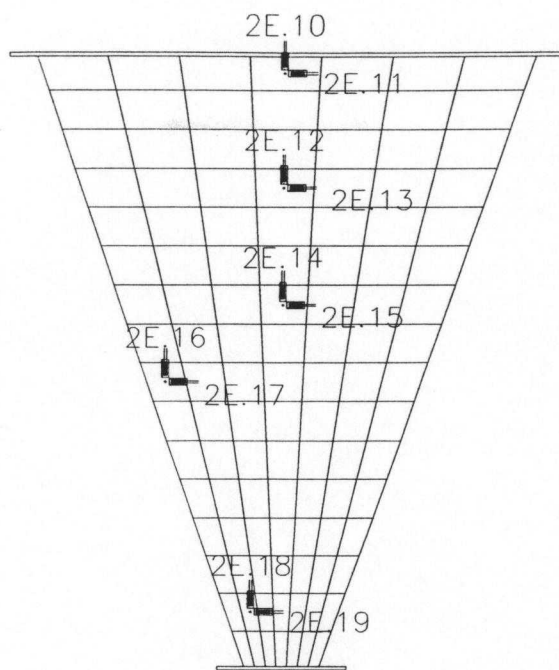
Na colagem dos extensômetros utilizou-se adesivo adequado e as superfícies de aplicações foram lixadas e limpadas de tal forma a ficarem com rugosidades e alcalinidades requeridas para as corretas aplicações.

Cada extensômetro foi cuidadosamente protegido para evitar eventuais danos durante a utilização ou condições ambientais. Para a fixação dos fios condutores utilizaram-se adesivos a base de resina epoxy. Nos extensômetros internos às tremonhas utilizaram-se silicone para a proteção contra a umidade e atrito da areia.

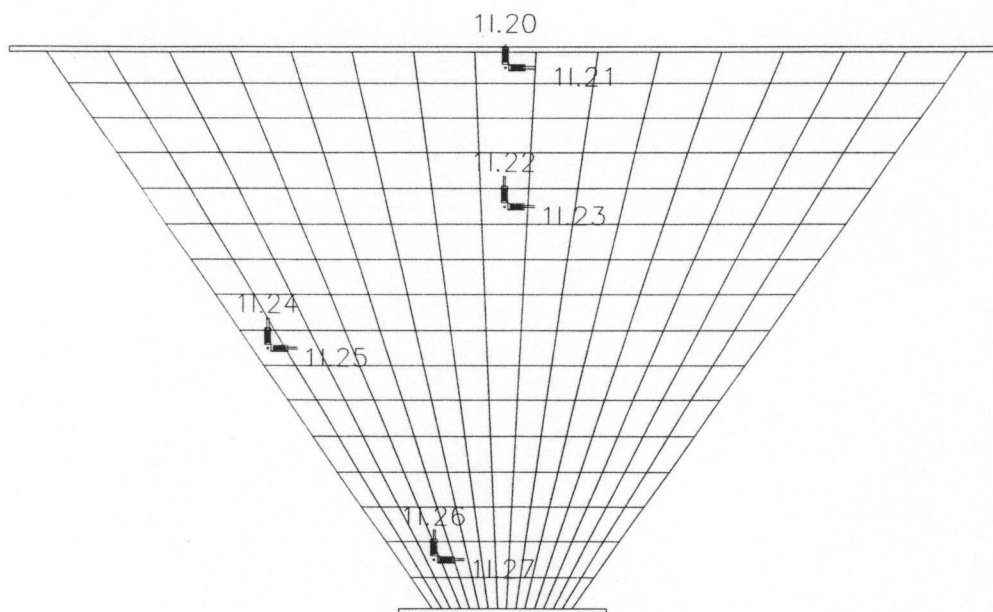
As posições de colagem dos extensômetros foram definidas em função das análises numéricas obtidas via computador. Nas figuras que vão de 3.16 a 3.23 são mostradas as posições de colagens dos extensômetros para os dois tipos de modelos de tremonhas e seus respectivos enrijecedores.



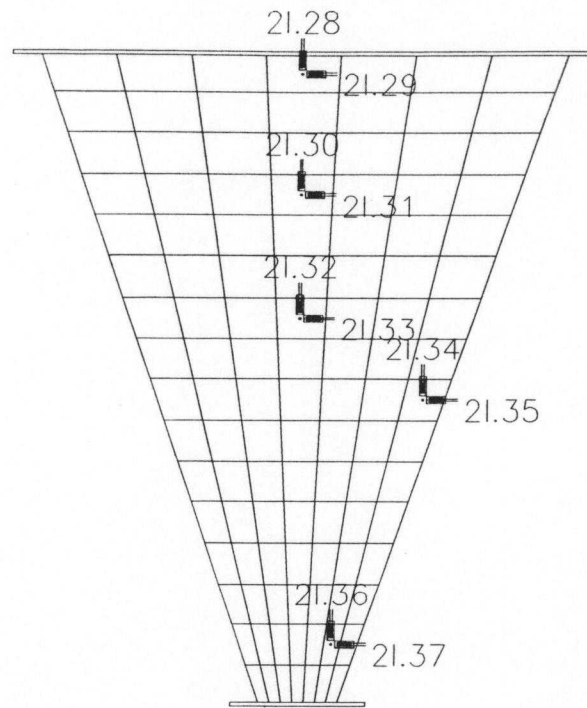
**FIGURA 3.16 - Posicionamentos dos extensômetros na face externa 1 da tremonha não-enrijecida.**



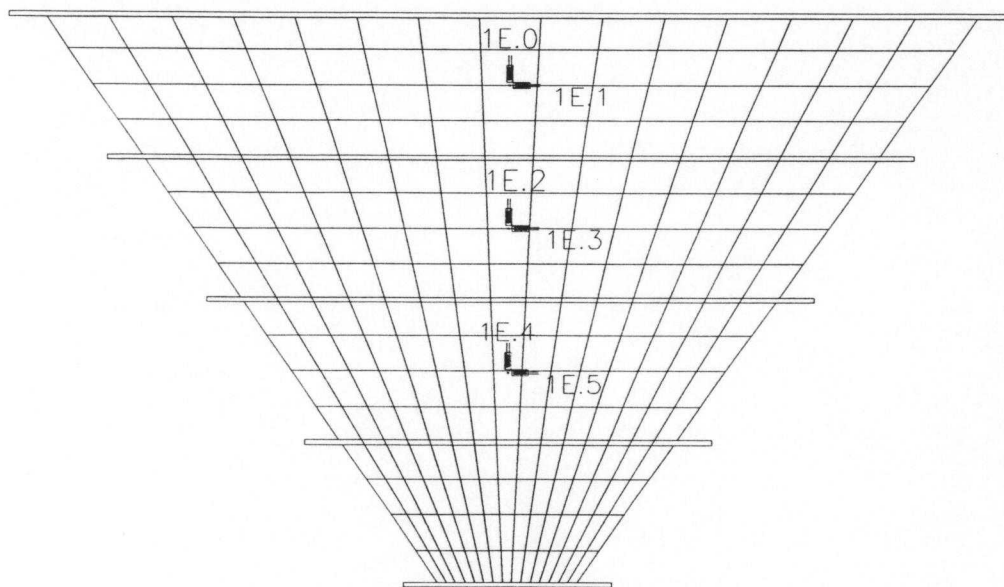
**FIGURA 3.17 - Posicionamentos dos extensômetros na face externa 2 da tremonha não-enrijecida.**



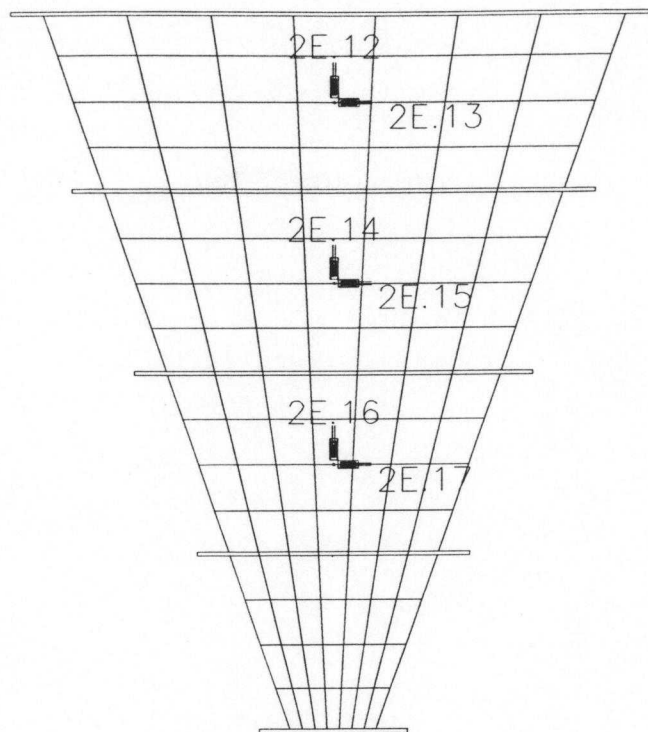
**FIGURA 3.18 - Posicionamentos dos extensômetros na face interna 1 da tremonha não-enrijecida.**



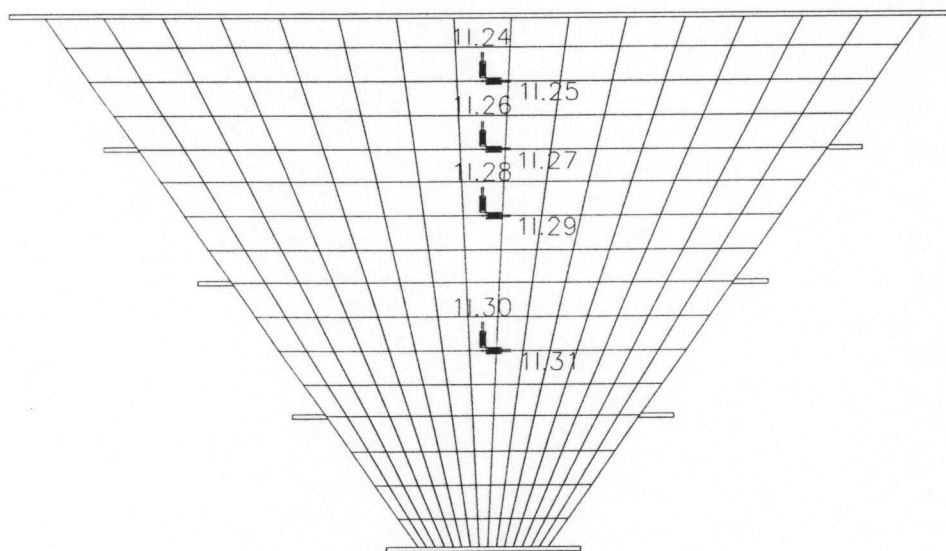
**FIGURA 3.19 - - Posicionamentos dos extensômetros na face interna 2 da tremonha não-enrijecida.**



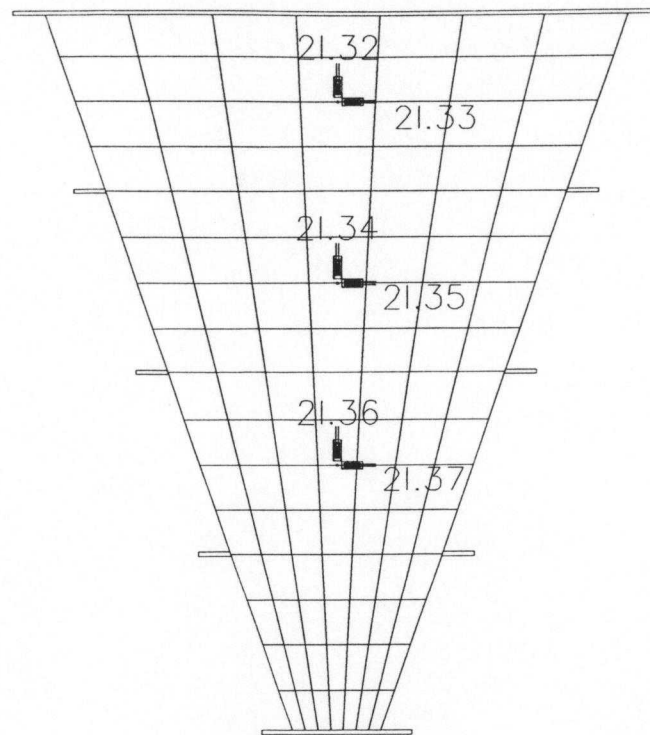
**FIGURA 3.20 - Posicionamentos dos extensômetros na face externa 1 da tremonha enrijecida.**



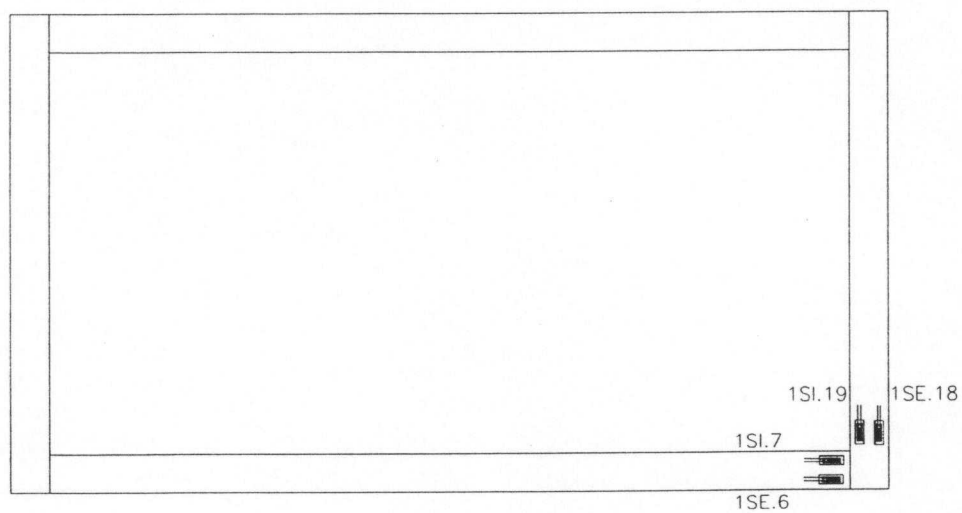
**FIGURA 3.21 - Posicionamentos dos extensômetros na face externa 2da tremonha enrijecida.**



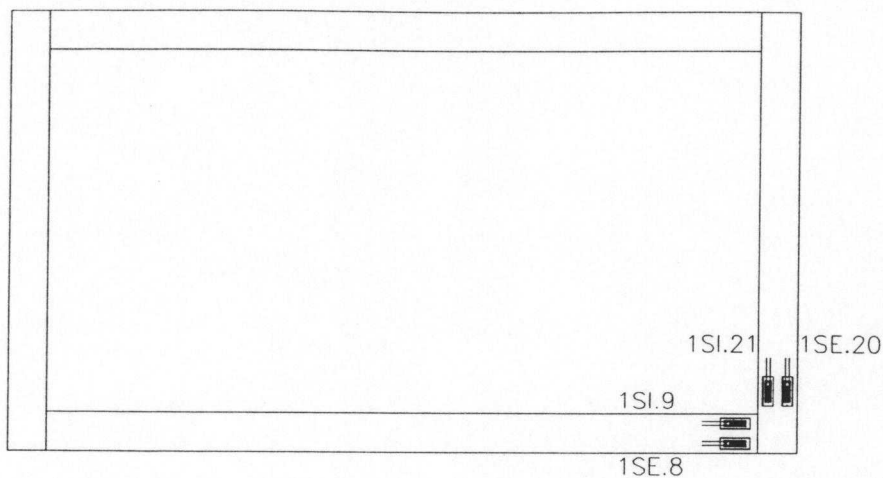
**FIGURA 3.22 - Posicionamentos dos extensômetros na face interna 1 da tremonha enrijecida.**



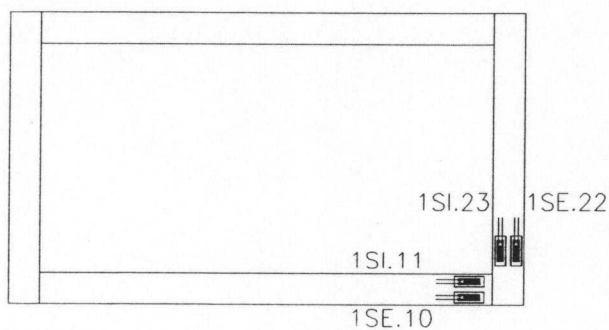
**FIGURA 3.23 - Posicionamentos dos extensômetros na face interna 2 da tremonha enrijecida.**



**FIGURA 3.24 - Posicionamentos dos extensômetros nos engastes do enrijecedor E4.**



**FIGURA 3.25 - Posicionamentos dos extensômetros nos engastes do enrijecedor E3.**



**FIGURA 3.26 - Posicionamentos dos extensômetros nos engastes do enrijecedor E2.**

Para o cálculo dos momentos fletores e tensões nas chapas em que  $\lambda < 3$  usaram-se as seguintes expressões:

$$M_x = \pm D \frac{2}{t} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) \quad (01)$$

$$M_y = \pm D \frac{2}{t} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) \quad (02)$$

sendo:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (03)$$

E, para as tensões, têm-se:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad (04)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad (05)$$

Para chapas com  $\lambda > 3$  têm-se deformações predominantes em apenas uma direção e as expressões utilizadas para os cálculos do momento fletor e tensões foram:

$$M = \frac{t^3 \cdot E \cdot \varepsilon}{12} \quad (06)$$

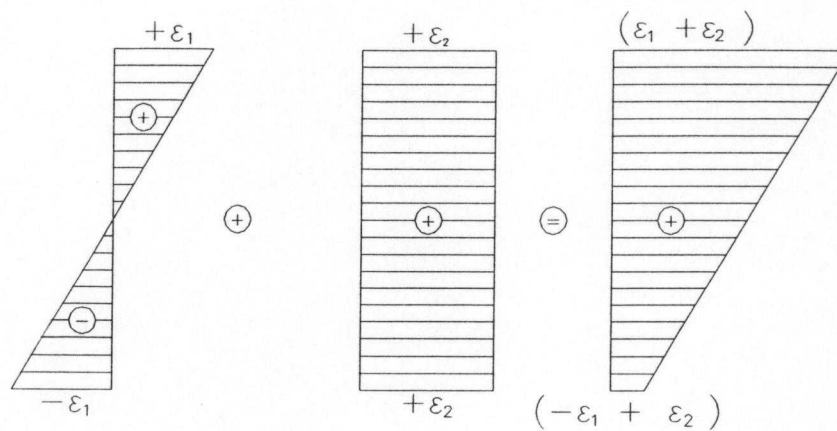
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (07)$$

Para os enrijecedores utilizou-se também a expressão (07). No entanto, a expressão (06), adaptada para este caso, será:

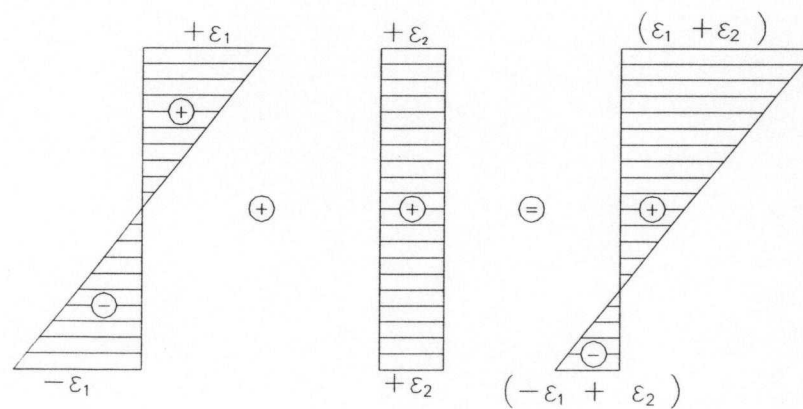
$$M = \frac{t \cdot h^3 \cdot E \cdot \varepsilon}{12} \quad (08)$$

As parcelas correspondentes às deformações devidas à flexão ( $\varepsilon_1$ ) e aquelas devidas ao efeito membrana ( $\varepsilon_2$ ) foram determinadas baseando-se em diagramas de deformações (Figuras 3.27 e 3.28).





**FIGURA 3.27 - Diagramas de deformações quando  $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$**



**FIGURA 3.28 - Diagramas de deformações quando  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$**

Determinando-se as deformações interna ( $\varepsilon_i$ ) e externa ( $\varepsilon_e$ ) em um mesmo ponto de uma chapa, formam-se duas equações com duas incógnitas. Estas equações são:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (09)$$

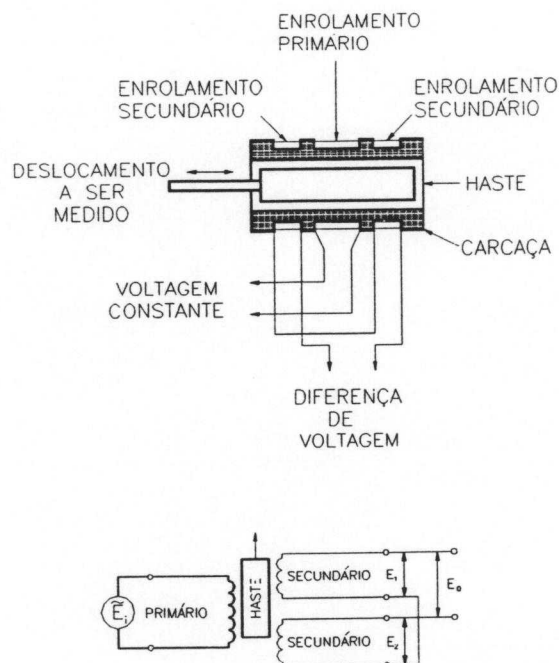
$$\varepsilon_e = -\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (10)$$

### c - Medidores de deslocamentos

Nas análises dos sistemas estruturais, as determinações de deslocamentos são importantes devido às limitações que devem ser impostas para os mesmos, tal como ocorre com as tensões. Além disso, os cálculos de reações e outras incógnitas dos sistemas estruturais implicam no emprego de várias relações entre deslocamentos lineares ou angulares.

Neste trabalho, usaram-se medidores de deslocamentos lineares do tipo 24 DCDT 500, fabricados pela Hewlett Packard (HP). Estes medidores funcionam com uma voltagem de excitação de 24 volts e medem deslocamentos de até 12.7 milímetros. O nome mais popular para estes transformadores diferenciais é LVDT (Linear Variable Differential Transformer).

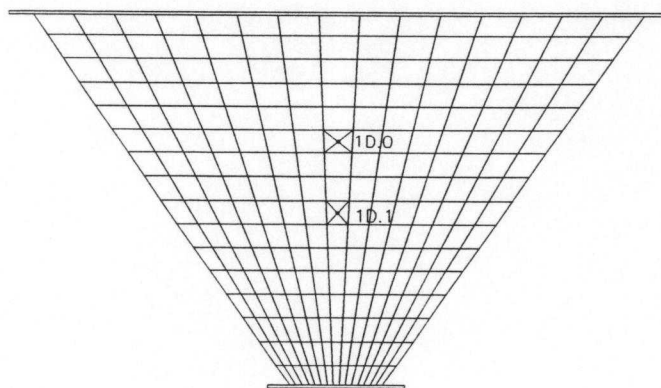
O LVDT possui um enrolamento primário, dois secundários em série, uma carcaça e uma haste móvel (Figura 3.29). Com a excitação do enrolamento primário e com o movimento da haste a partir de sua posição central, desenvolve-se uma voltagem de saída nos enrolamentos secundários. Esta voltagem de saída é uma função linear da posição da haste durante o deslocamento.



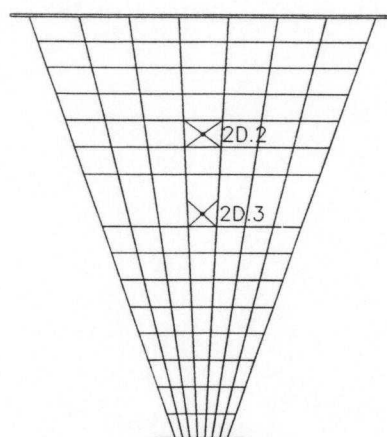
**FIGURA 3.29 - Transformador diferencial (LVDT)**

Nos ensaios, os LVDTs foram adaptados em suportes de madeira. Estes suportes foram contraventados formando-se sistemas treliçados de tal maneira a ficarem rígidos o suficiente para evitar deslocamentos relativos. As Figuras B.18, B.19, B.20 e B.21 mostram as disposições dos LVDTs nas paredes das tremonhas enrijecidas e não-enrijecidas. Nas Figuras C.20 e C.27 observam-se os LVDTs apoiados sobre a laje de reação. Estes LVDTs foram utilizados para medir deslocamentos das tremonhas como um todo e rotações de enrijecedores, respectivamente.

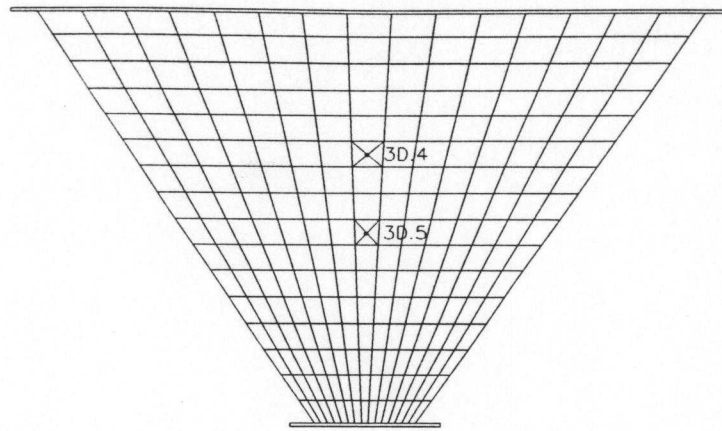
As posições de adaptações dos LVDTs foram definidas em função das análises numéricas obtidas via computador. Nas figuras que vão de 3.30 a 3.37 são mostradas as posições dos LVDTs para os dois tipos de modelos de tremonhas e seus respectivos enrijecedores.



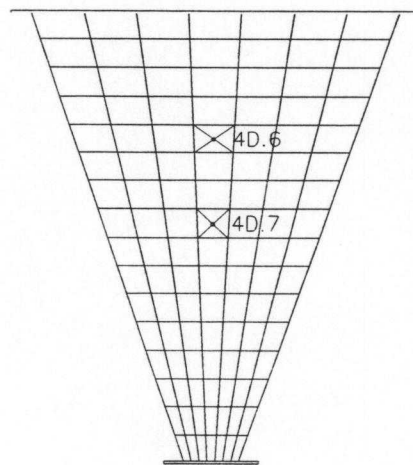
**FIGURA 3.30 - Posicionamentos de LVDTs na face externa 1 da tremonha não-enrijecida.**



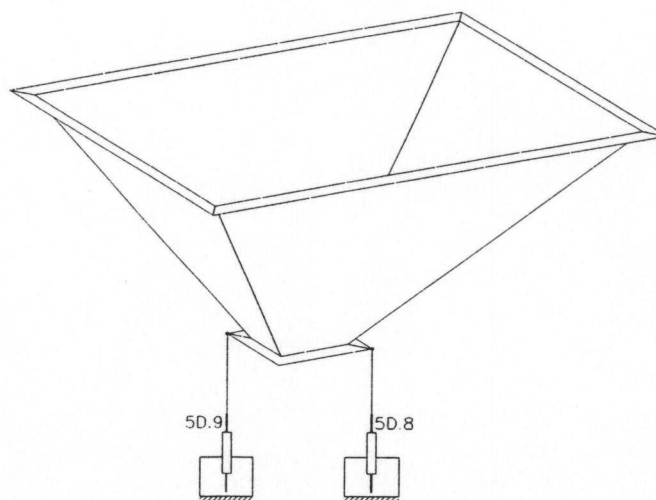
**FIGURA 3.31 - Posicionamentos de LVDTs na face externa 2 da tremonha não-enrijecida.**



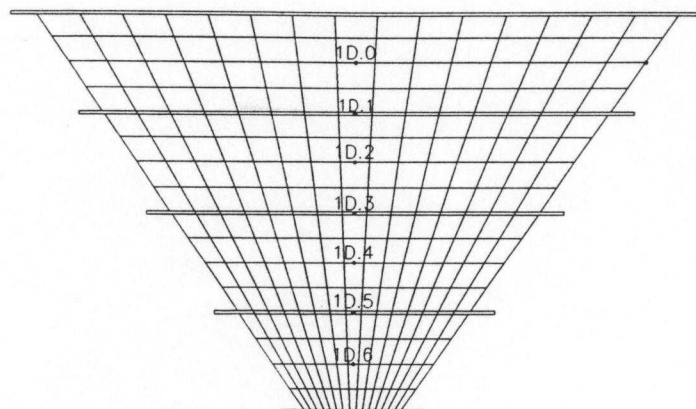
**FIGURA 3.32 - Posicionamentos de LVDTs na face externa 3 da tremonha não-enrijecida.**



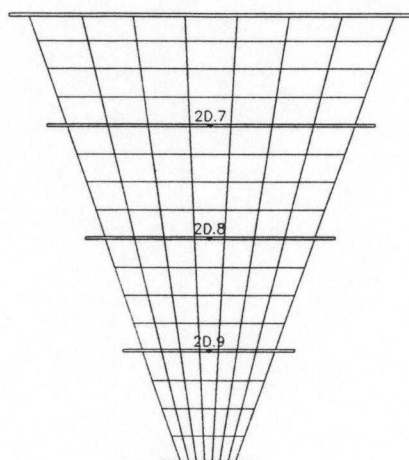
**FIGURA 3.33 - Posicionamentos de LVDTs na face externa 4 da tremonha-enrijecida.**



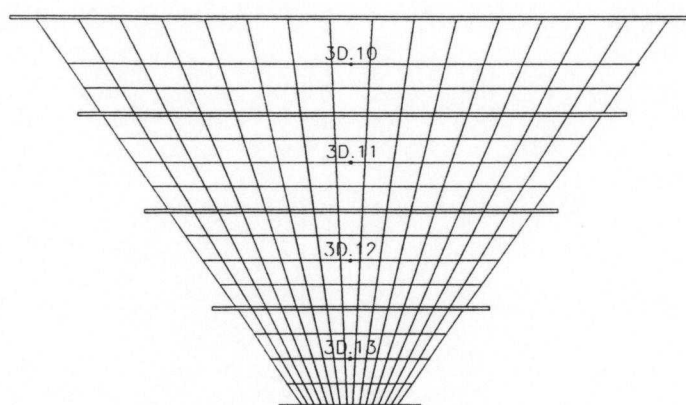
**FIGURA 3.34 - Posicionamentos de LVDTs na boca de descarga da tremonha não-enrijecida.**



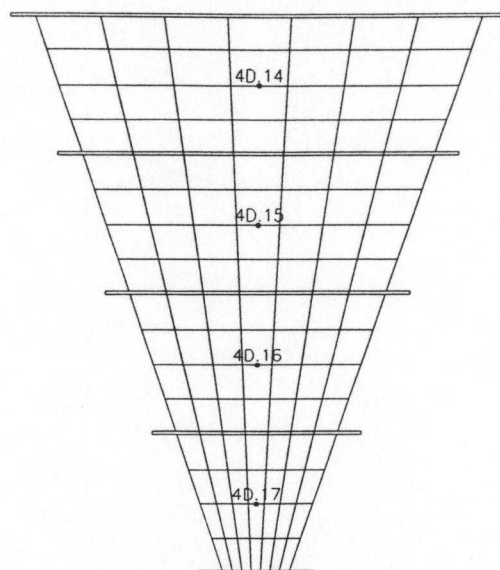
**FIGURA 3.35 - Posicionamentos de LVDTs nas chapas e enrijecedores da face externa 1 da tremonha enrijecida.**



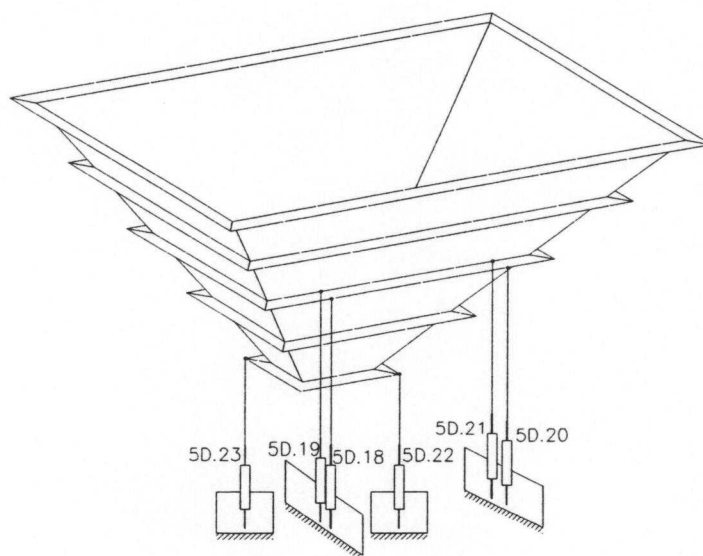
**FIGURA 3.36 - Posicionamentos de LVDTs nos enrijecedores da face externa 2 da tremonha enrijecida.**



**FIGURA 3.37 - Posicionamentos de LVDTs nas chapas da face externa 3 da tremonha enrijecida.**



**FIGURA 3.38 - Posicionamentos de LVDTs nas chapas da face externa 4 da tremonha enrijecida.**



**FIGURA 3.39 - Posicionamentos de LVDTs na boca de descarga e em enrijecedor.**

#### **d - Compensador de temperatura**

Um circuito de  $\frac{1}{4}$  de ponte é o tipo mais simples de montagem onde apenas um extensômetro é ativo. Este tipo de montagem atende aos objetivos de muitos

problemas experimentais. No entanto, ele apresenta um inconveniente de que as variações de temperatura do extensômetro provocam variações em sua resistência, que são registradas como deformações. Para eliminar este problema, usou-se um segundo extensômetro, colado a um material igual ao das chapas a serem deformadas (aço) e colocado nas proximidades das mesmas. Assim, este segundo extensômetro sofrerá as mesmas mudanças de deformações devido à temperatura que o extensômetro ativo.

A montagem básica com compensador de temperatura é mostrado na Figura 3.40. Para o conjunto de extensômetros utilizados nos ensaios o princípio foi o mesmo.

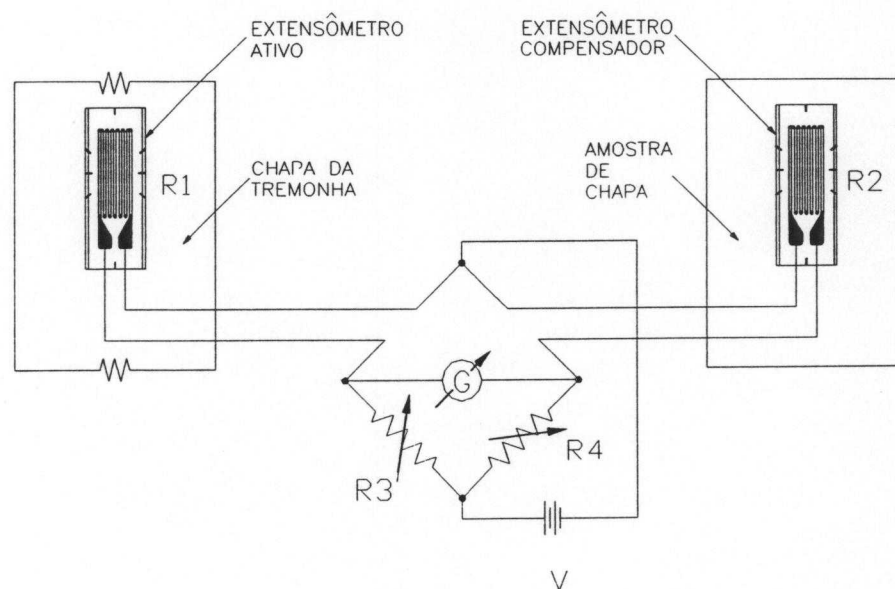
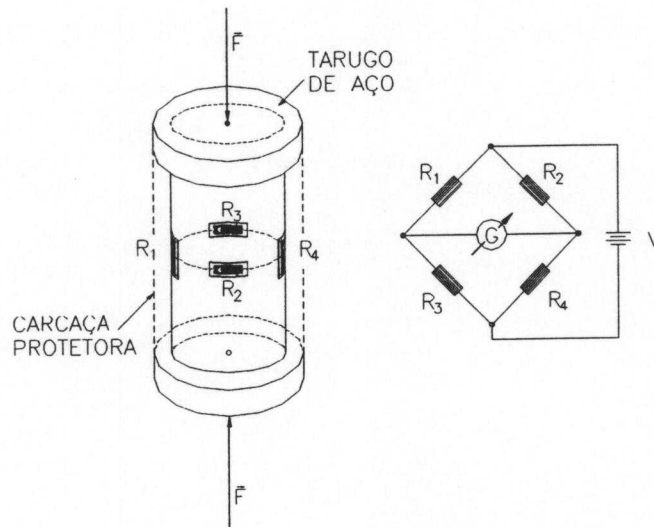


FIGURA 3.40 - Circuito com um extensômetro ativo e um compensador.

#### e - Célula de carga

Uma “célula de carga” simples é um tipo de transdutor utilizado para a determinação indireta de forças uni-axiais de tração ou compressão. Quatro extensômetros elétricos são colados em um tarugo de aço de tal modo que dois deles estejam na direção axial e dois na direção transversal. Os extensômetros são, então, instalados em um circuito de ponte de Wheatstone (Figura 3.41). Assim, a carga aplicada pôde ser determinada, sabendo-se que a mesma é linearmente proporcional à voltagem de saída.



**FIGURA 3.41 - Célula de Carga**

A capacidade da “célula de carga” utilizada nos ensaios foi de 200 kN (Figura C.22). Este valor foi adotado baseado nos dados do projeto original.

A célula de carga utilizada neste trabalho foi projetada pelo LaMEN da EESC / USP. Esta célula foi inicialmente calibrada através de um anel dinamométrico e verificou-se que sua “constante de célula” era de 0.1 kN / divisão.

Os controles das intensidades das cargas aplicadas foram feitos através das leituras, a cada 100 divisões, em um indicador de deformações KYOWA, SM-60B, acoplado a uma caixa comutadora balanceável para 24 canais, também KIOWA, modelo SS-24R.

#### **f - Cilindro hidráulico**

Para a aplicação das cargas sobre os modelos utilizou-se um cilindro hidráulico (ou atuador hidráulico) com capacidade máxima de 200 kN (Figuras C.17 e C.30). Este cilindro foi alimentado por óleo através de uma bomba e acionado manualmente através de válvulas de controles de fluxo.

O operador do sistema hidráulico controlou os níveis de cargas aplicadas através de uma célula de carga conforme descrito no item anterior.



### **g - Leituras de dados**

As leituras de dados de deformações e deslocamentos foram feitas, automaticamente, por um conjunto de equipamentos constituído por um Sistema de Aquisição de Dados (SAD), do tipo 3497-A e um Micro Computador do tipo HP 9825-T, fabricados pela Hewlett Packard e pertencente ao LaMEN da EESC / USP (Figuras C.29 e C.30). O SAD possui um voltímetro digital, uma fonte de energia e slots para placas de relês. Estas placas são utilizadas para interligarem-se com os extensômetros e LVDTs.

Para a tremonha não-enrijecida ocuparam-se do SAD 37 canais para extensômetros e 9 canais para LVDTs. Por outro lado, a tremonha enrijecida ocupou-se do SAD, 37 canais para extensômetros e 23 canais para LVDTs.

### **h - Ensaaios das tremonhas**

Os ensaios das tremonhas foram desenvolvidos sobre a laje de reação do LaMEN da EESC / USP.

A etapa preliminar consistiu da colagem e instalações dos fios dos extensômetros. Paralelamente, foram confeccionados os suportes para LVDTs. Posteriormente, providenciou-se a montagem do pórtico de reação para a montagem do cilindro hidráulico (Figura C.17 e C.30) e montaram-se também a estrutura de sustentação e a tremonha, conforme o tipo a ser ensaiado.

Verificou-se o funcionamento de cada extensômetro e LVDT e materializaram-se as ligações com os Sistemas de Leituras de Dados.

A carga a ser confinada na tremonha foi pesada a cada lata, antes do lançamento para o seu interior.

Utilizaram-se de um sistema estrutural na transição das tremonhas, para simulação das cargas de pressão, correspondentes ao produto contido no corpo do silo. Este sistema ficou constituído por um pranchão de madeira compensada, transversinas, longarinas e uma viga transversal, conforme Figuras C.28 e C.30. Cada elemento deste sistema também foi cuidadosamente pesado.

O monitoramento dos ensaios foi feito por duas pessoas. Uma destas ficou responsável pelas aplicações das cargas através de um sistema hidráulico e leituras das deformações na “célula de carga” pelo indicador de deformações. A outra pessoa ficou responsável pelo controle do Sistema de Leitura de Dados e pelas observações estruturais, a cada intervalo de 10kN de carga aplicada.

Foram feitos três ensaios para a tremonha enrijecida e um ensaio para a tremonha não-enrijecida. A maior quantidade de ensaios para a tremonha enrijecida foi uma opção para garantir melhores resultados, pois, devido à pequena espessura das chapas, as mesmas apresentaram maiores irregularidades de fabricação.

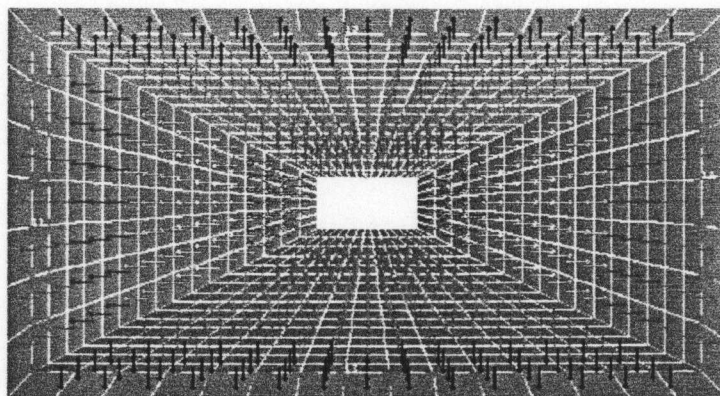
# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 1 - Escolha das chapas

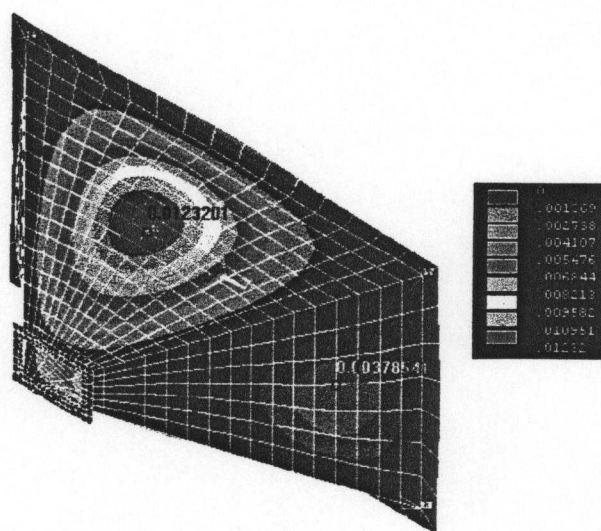
Os pontos de instrumentações dos protótipos de tremonhas foram definidos baseados nos resultados numéricos. Desta forma, foi possível fazer a escolha “preliminar” das chapas e enrijecedores mais solicitados para as análises experimentais.

Conforme definido no Capítulo III, as ações atuantes nas tremonhas foram do tipo trapezoidal como mostra a figura 4.1.

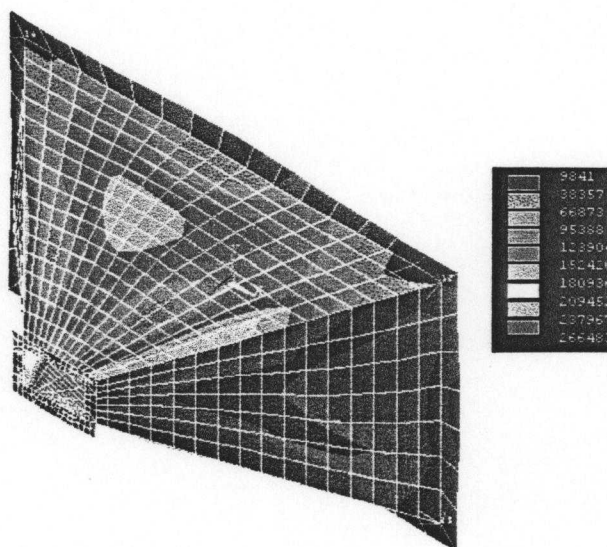


**FIGURA 4.1 - Ações trapezoidais nas chapas das tremonhas**

Os deslocamentos e tensões equivalentes, para a tremonha não-enrijecida sujeita a uma pressão de transição máxima igual a 100 kPa, são apresentados, respectivamente, nas figuras 4.2 e 4.3.

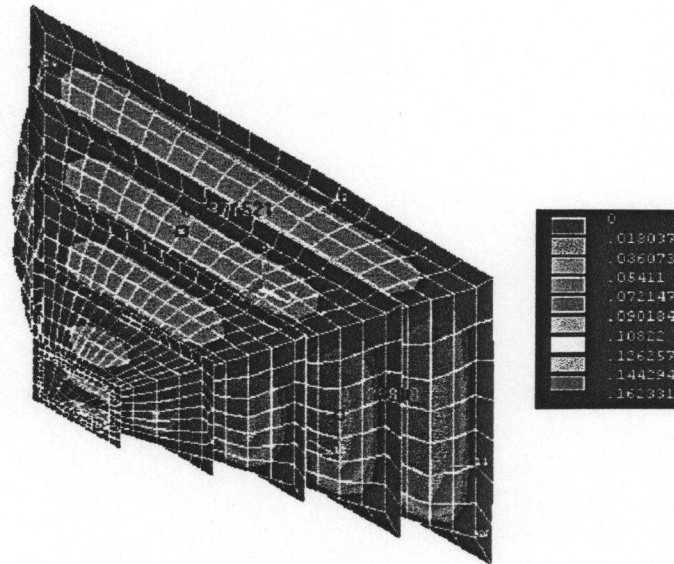


**FIGURA 4.2 - Deslocamentos nas faces de maior e menor área da tremonha (Faces 1 e 2) em metros para uma pressão de transição igual a 100 kPa.**

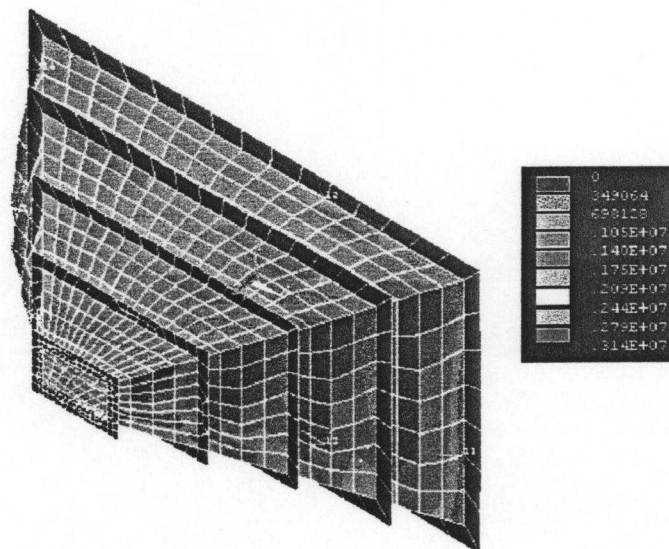


**FIGURA 4.3 - Tensões equivalentes nas faces 1 e 2 em kPa para uma pressão de transição igual a 100 kPa.**

Para a tremonha enrijecida, os deslocamentos e as tensões equivalentes obtidas para uma pressão de transição máxima igual a 100 kPa, são apresentados, respectivamente nas figuras 4.4 e 4.5.



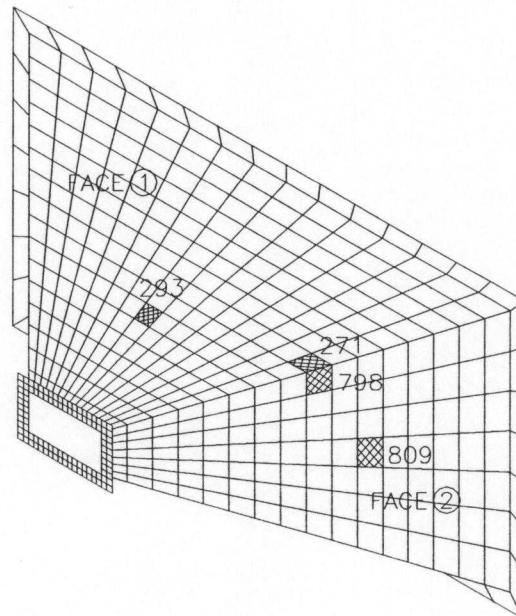
**FIGURA 4.4 - Deslocamento em metros nas faces 1 e 2 da tremonha enrijecida em metros para uma pressão de transição igual a 100 kPa.**



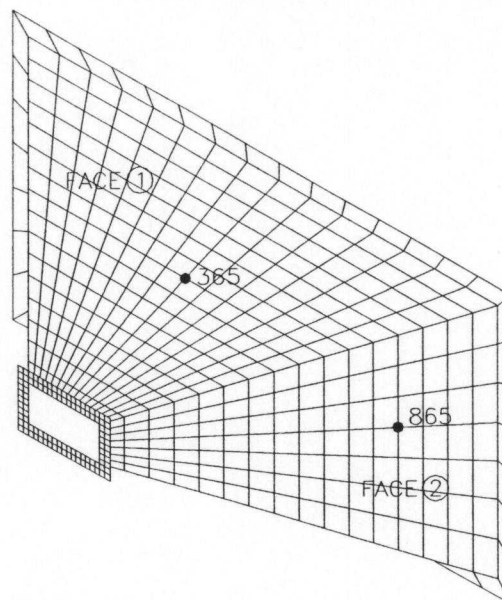
**FIGURA 4.5 - Tensões equivalentes nas faces 1 e 2 em kPa para uma pressão de transição igual a 100 kPa.**

Na tremonha não-enrijecida (Tipo 1) definiu-se analisar os dois tipos de chapas (Chapas das faces 1 e 2). Para a tremonha enrijecida (Tipo 2), as chapas a serem analisadas serão aquelas delimitadas pelos enrijecedores E4 e E5 e posicionadas nas faces 1 e 2.

As tensões equivalentes nas faces 1 e 2 da tremonha não-enrijecida foram obtidas através dos elementos finitos de números 271, 293, 798 e 809 (Figura 4.6). Os deslocamentos foram obtidos através dos nós de números 365 e 865 (Figura 4.7).

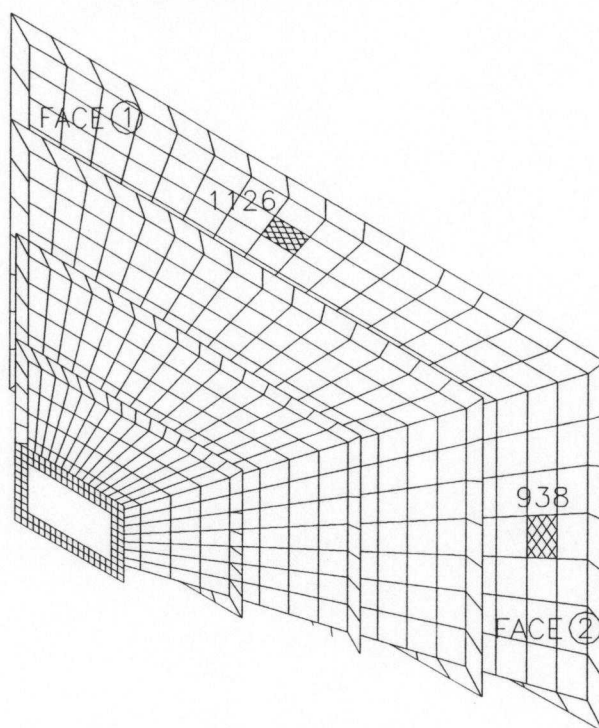


**FIGURA 4.6 - Posições dos elementos finitos para determinações das tensões.**

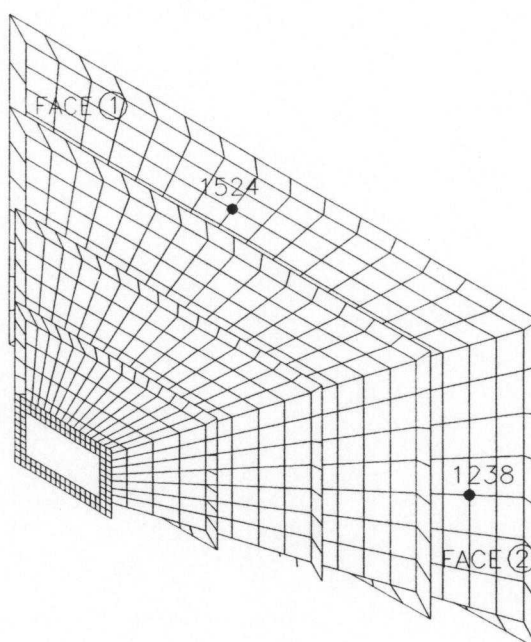


**FIGURA 4.7 - Posições dos nós para determinações dos deslocamentos.**

Para a tremonha enrijecida, as tensões equivalentes nas faces 1 e 2 foram obtidas através dos elementos finitos de números 938 e 1126 (Figura 4.8). Os deslocamentos foram obtidos através dos nós de números 1238 e 1524 (Figura 4.9).



**FIGURA 4.8 - Posições dos elementos finitos para determinações das tensões.**



**FIGURA 4.9 - Posições dos nós para determinações dos deslocamentos.**

Dentre os enrijecedores, o enrijecedor E3 foi o escolhido para as análises, por apresentar melhores condições de observações dos estados de deformações e de deslocamentos.

Os resultados analíticos, numéricos e experimentais serão apresentados na forma de gráficos. Estes gráficos serão do tipo deslocamentos e tensões em função das pressões de transição aplicadas nos ensaios.

## **2 - Tremonha não-enrijecida**

Para a tremonha não-enrijecida, verificou-se boa compatibilidade entre os resultados numéricos e experimentais, tanto para a chapa da face 1 como para a chapa da face 2 (Figuras 4.10 a 4.15). O modelo numérico desenvolvido, adotando-se o elemento finito SHELL63 (do ANSYS), proporcionou valores para as tensões e deslocamentos próximos daqueles obtidos através dos ensaios do protótipo. Na realidade, para este tipo de tremonha, o estado de tensões formado é bi-axial e uma das componentes de tensão de tração na direção meridional é devido às pressões de atrito. Na análise numérica considerou-se inicialmente que estas pressões são desprezíveis. Desta forma, para se obterem melhores resultados para o modelo numérico, estas ações deveriam ser consideradas. Além disso, uma malha de elementos finitos mais refinada se faz necessária.

Das Figuras que vão de 4.10 a 4.15 observou-se que existem diferenças acentuadas entre os resultados analíticos e experimentais e/ou numéricos. Estas diferenças ocorreram, primordialmente, devido aos procedimentos simplificadores que comumente são adotados pelos calculistas. As hipóteses de equivalências de placas e ações e a forma primitiva de calcular as trações devidas ao efeito membrana levam a dimensionamentos relativamente exagerados para as espessuras das chapas e, evidentemente, que ficam a favor da segurança.



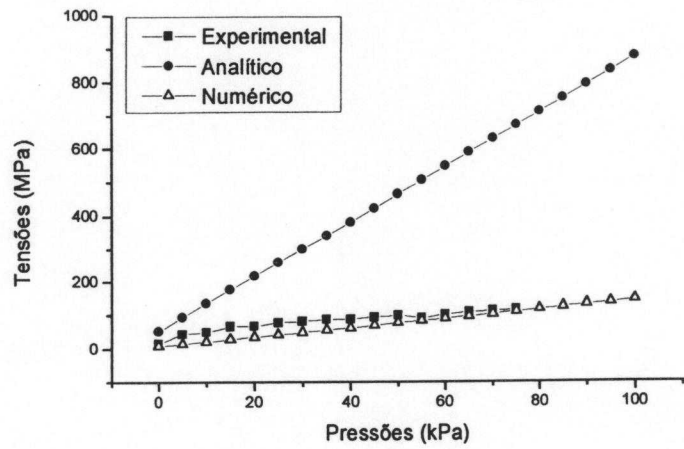


FIGURA 4.10 - Tensões em função das pressões (Face-1)

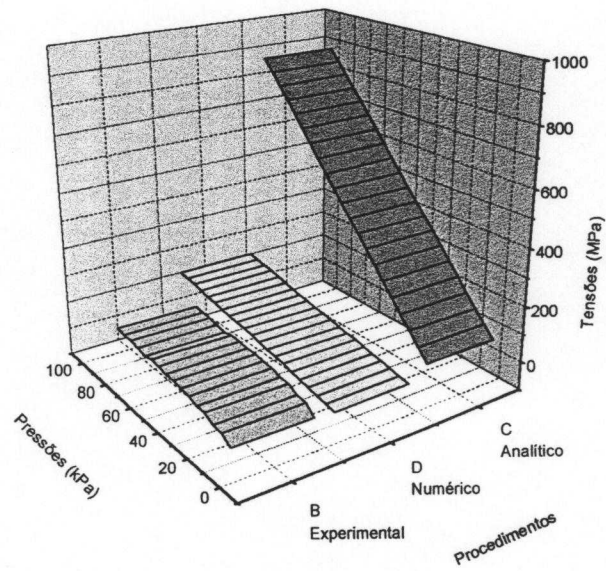


FIGURA 4.11 - Tensões em função das pressões (Face-1)

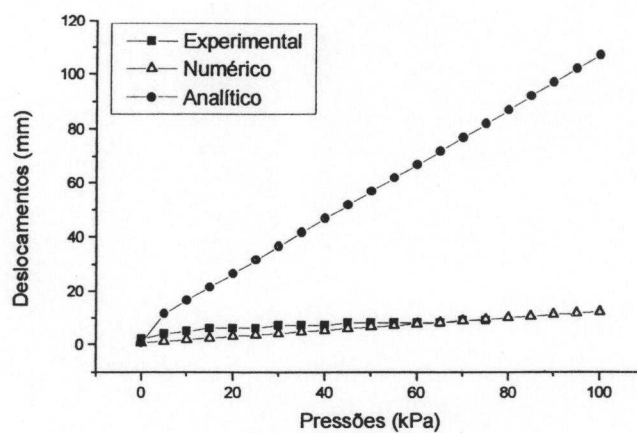


FIGURA 4.12 - Deslocamentos em função das pressões (Face-1)

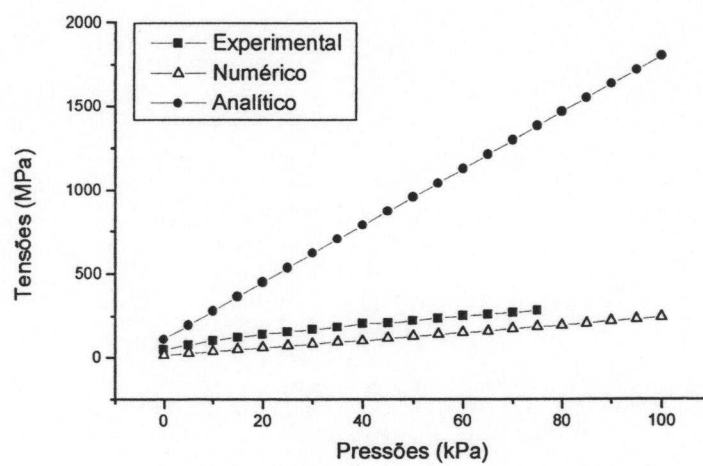


FIGURA 4.13 - Tensões no engastamento em função das pressões (Face-1).

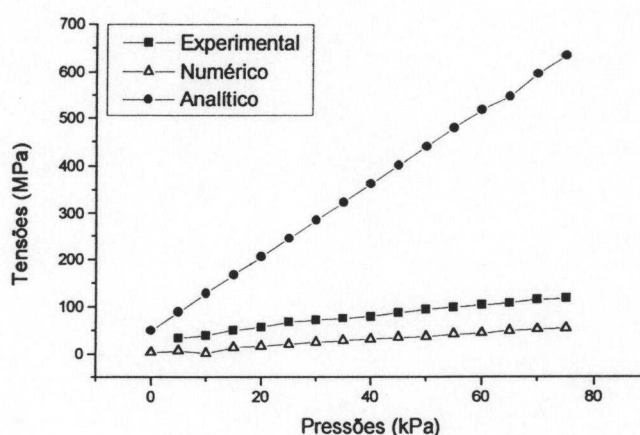


FIGURA 4.14 - Tensões em função das pressões (Face-2).

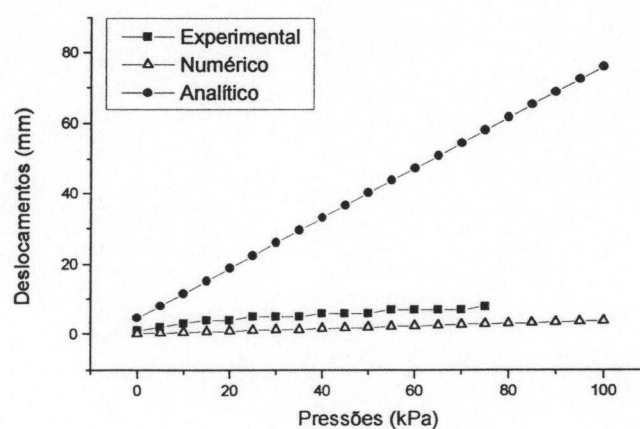


FIGURA 4.15 - Deslocamentos em função das pressões (Face-2).

### 3 - Tremonha enrijecida

O comportamento da tremonha ficou afetado, substancialmente, devido à introdução de enrijecedores e conseqüente diminuição da espessura das chapas das paredes. Observando-se as Figuras que vão de 4.16 a 4.20 notam-se as aproximações existentes entre os resultados numéricos e analíticos. Por outro lado, os resultados experimentais se mantêm com valores relativamente pequenos e abaixo dos resultados numéricos e analíticos.

Nas fases de definições dos protótipos, projetaram-se os enrijecedores de tal forma que, pelo menos as maiores chapas da tremonha, trabalhassem como chapas em que  $\lambda > 3$ . Assim procedendo, por simplicidade, os cálculos poderiam ser feitos considerando-se a teoria de vigas bi-apoiadas ou bi-engastadas. Neste trabalho, para a análise analítica das tensões e deslocamentos considerou-se a teoria de viga bi-engastada.

Na análise numérica considerou-se o elemento de casca SHELL63 (do ANSYS) que admite significantes efeitos de flexão e de membrana. No entanto, os resultados experimentais demonstraram que, em chapas finas enrijecidas com  $\lambda > 3$ , os efeitos da flexão são desprezíveis frente aos efeitos de membrana. Portanto, as hipóteses admitidas pela teoria de viga bi-engastada e elementos finitos com as características do elemento SHELL63 são conservadoras e levam ao super dimensionamento das chapas.

Pelas análises das tensões solicitantes nas chapas das faces 1 e 2 (Figuras 4.16 e 4.19), nota-se que os resultados numéricos foram melhores do que os analíticos, embora apresentem, ainda, um certo distanciamento da realidade dos resultados experimentais.

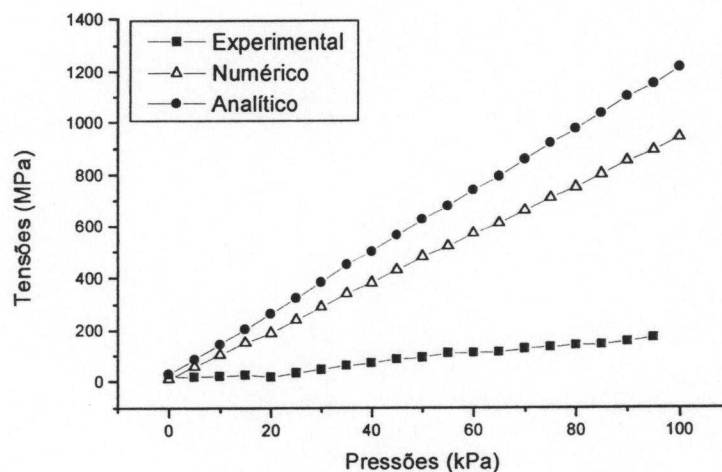


FIGURA 4.16 - Tensões em função das pressões para chapa 1 da face 1.

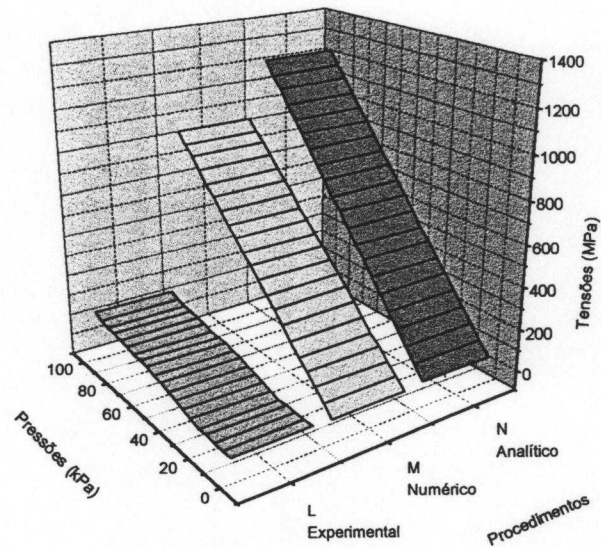


FIGURA 4.17 - Tensões em função das pressões para chapa 1 da face 1.

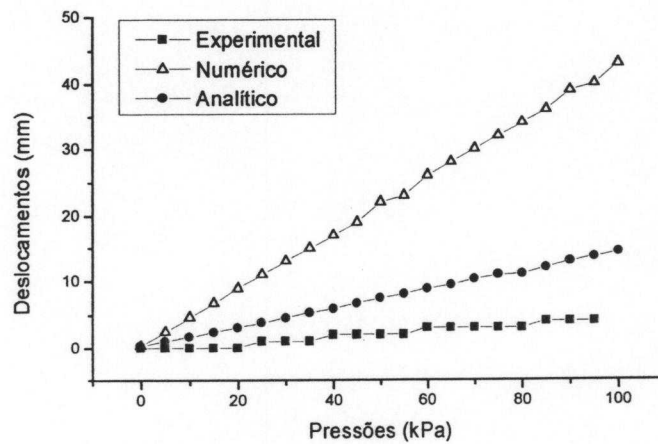


FIGURA 4.18 - Deslocamentos em função das pressões para chapa 1 da face 1.

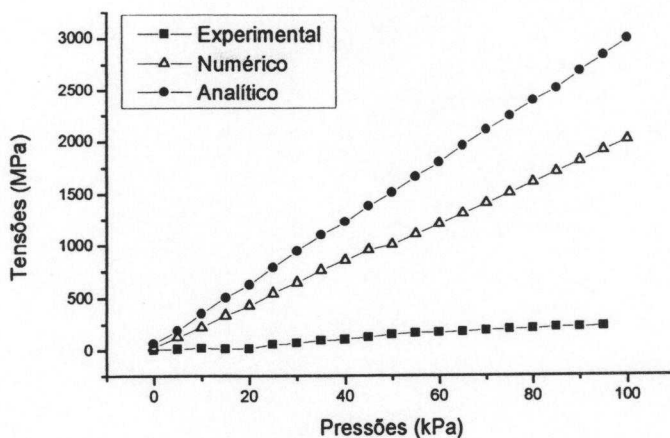


FIGURA 4.19 - Tensões em função das pressões para chapa 1 da face 2.

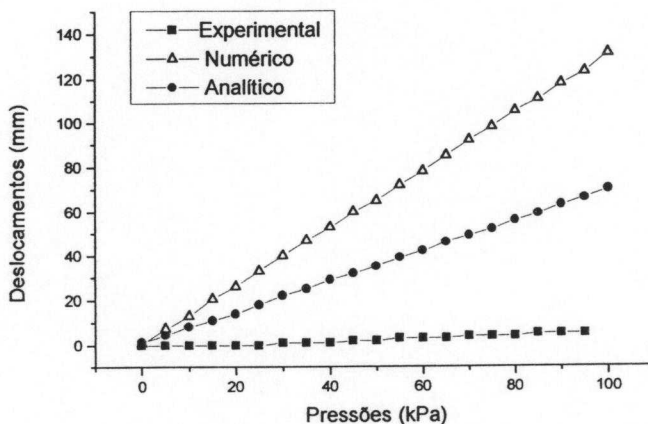


FIGURA 4.20 - Deslocamentos em função das pressões para chapa 1 da face 2.

#### 4 - Enrijecedor

A Figura 4.21 mostra os resultados das tensões máximas nos engastamentos do quadro hiperestático formado pelo enrijecedor “E3”. Os valores das tensões de flexo-tração obtidas para este enrijecedor demonstraram que, por “via analítica”, pode-se chegar a dimensionamentos satisfatórios para a seção transversal. Por outro lado, numericamente,

verificou-se que os valores das tensões são mais conservadoras. No entanto, a diferença existente entre os valores numéricos e aqueles obtidos analítica ou experimentalmente pode ser explicada pela malha de elementos finitos adotada. Esta malha foi definida baseando-se na continuidade da malha das chapas. Desta forma, a malha formada para os enrijecedores ficou pouco representativa para as tensões requeridas. Através do ANSYS foi possível demonstrar que, com o refinamento da malha pode-se chegar a tensões e deslocamentos menores e compatíveis com os procedimentos analíticos.

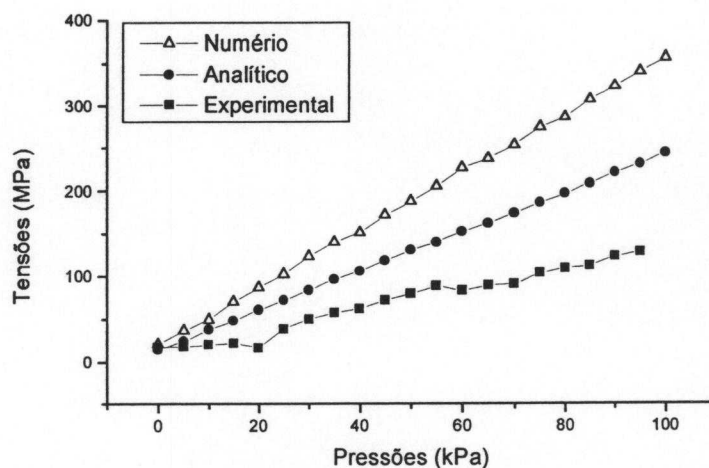
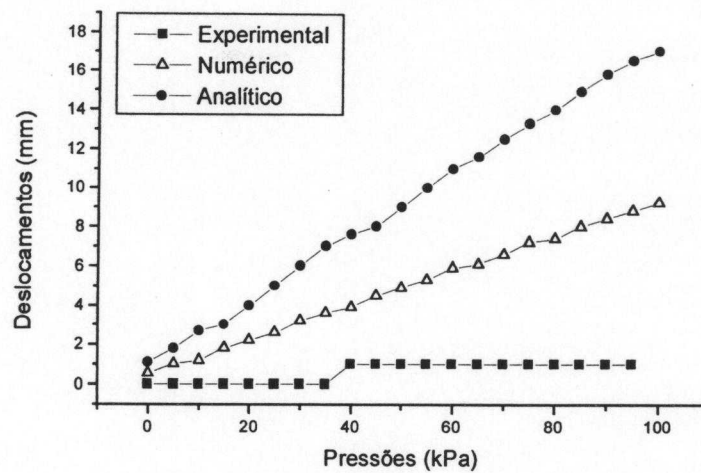
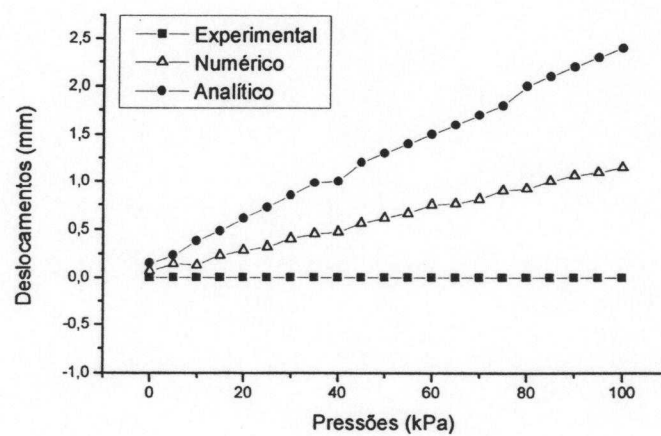


FIGURA 4.21 - Tensões em função das pressões para o enrijecedor "E3".



**FIGURA 4.22 - Deslocamentos no vão da face 1 em função das pressões para o enrijecedor "E3".**



**FIGURA 4.23 - Deslocamentos no vão da face 2 em função das pressões para o enrijecedor "E3".**



## 5 - Deslocamentos globais das tremonhas

### 5.1 - Tremonha não-enrijecida

No protótipo desta tremonha foram adaptados os LVDTs 5D.8 e 5D.9, diametralmente opostos, na boca de descarga, com o objetivo de verificar os deslocamentos relativos globais durante os ensaios. Os deslocamentos apresentados mostraram uma certa tendência à rotação da tremonha. No entanto, os deslocamentos apresentados são considerados muito pequenos quando comparados com o nível de carga máxima aplicada (160 kN) durante os ensaios e não comprometem os resultados principais.

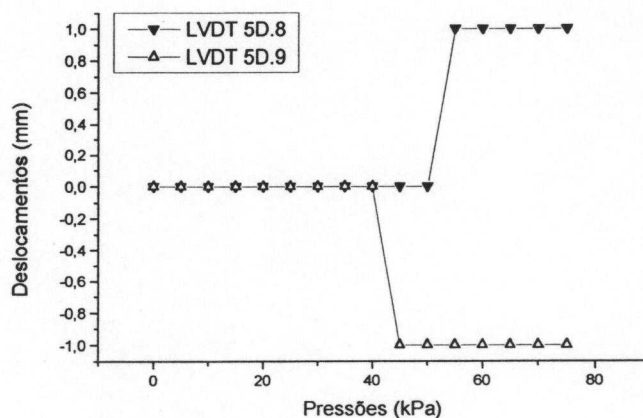
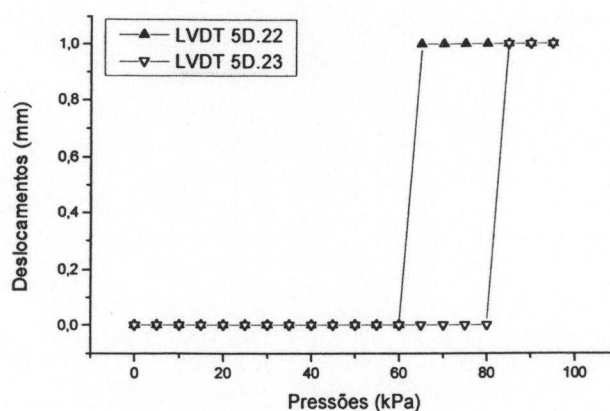


FIGURA 4.24 - Deslocamentos globais.

### 5.2 - Tremonha enrijecida

Para a verificação dos deslocamentos relativos globais desta tremonha utilizaram-se os LVDTs 5D.22 e 5D.23, também diametralmente opostos na boca de descarga, como no caso da tremonha não-enrijecida. Pela Figura 4.25 nota-se que os deslocamentos foram mínimos e que houve uma certa uniformização nos deslocamentos, isto é, a tremonha se deslocou por igual. Além disso, os deslocamentos somente apareceram para altos níveis de cargas (160 kN).



**FIGURA 4.25 - Deslocamentos globais.**

### 5.3 - Enrijecedores

Os LVDTs 5D.18, 5D.19, 5D.20 e 5D.21 foram posicionados nas extremidades do enrijecedor “E3” de tal forma a possibilitar medidas de rotações. Estas rotações eram teoricamente esperadas, porém, ainda não confirmadas experimentalmente. O desconhecimento da real direção das cargas e a efetiva continuidade das chapas sobre os enrijecedores poderiam ou não levar os enrijecedores a girar em torno do seu centro de cisalhamento. Pelo valor máximo de carga aplicada durante os ensaios (180 kN), esperava-se que as rotações do enrijecedor instrumentado fossem maiores, face à sua baixa rigidez à torção. No entanto, isto não se confirmou, como pode ser observado pelas Figuras 4.26 e 4.27 (Para a largura do enrijecedor E3 igual a 50,8 mm tem-se  $\theta = 2,25^\circ$ ). Se fosse levado em consideração que a tremonha teve um deslocamento relativo global igual a 1 milímetro, chegaria-se à conclusão de que praticamente não houve rotações no enrijecedor.

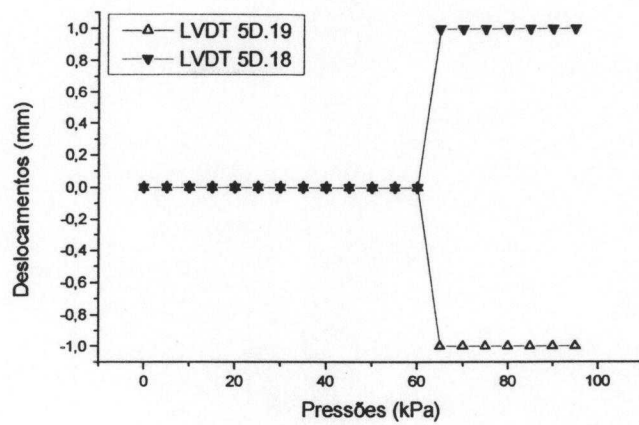


FIGURA 4.26 - Deslocamentos relativos.

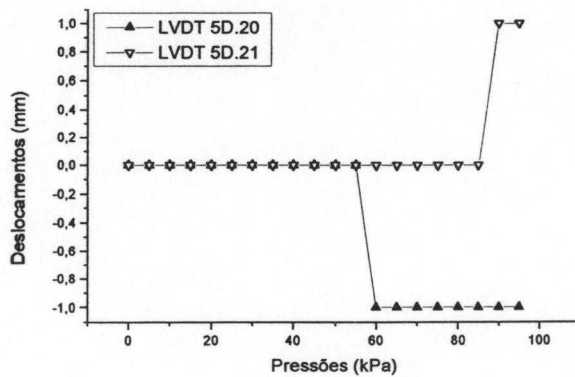


FIGURA 4.27 - Deslocamentos relativos.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

Desde as mais remotas civilizações, os silos têm desempenhado importantes funções nos processos industriais ou de armazenamentos de produtos alimentícios.

A demanda de produtos a granel e a conseqüente necessidade de armazenamentos são fundamentais no mundo industrial e nas várias atividades sociais. Segundo artigo do Jornal Folha de São Paulo (16/10/96), em cinco anos, quase todos os alimentos, bebidas e produtos industrializados terão seu processo de fabricação controlados por automatizações. Essa previsão foi feita durante a International and Measurement Control - ISA Show'96, uma das maiores feiras do setor de instrumentação industrial (Chicago - EUA). Este fato mostra o importante papel que os silos representarão nos modernos processos de automações industriais. Pela bibliografia consultada, verificou-se que existe um interesse internacional por este tipo de estrutura por razões econômicas, sociais e científicas.

A tremonha é a principal responsável pelo êxito de funcionamento dos silos. Ela desempenha importantes funções nas descargas e controles de fluxos dos produtos armazenados.

Este trabalho limitou-se ao estudo do comportamento estrutural de tremonhas tronco-piramidais “não-enrijecidas” e “enrijecidas” de aço, através de procedimentos analíticos, numéricos e experimentais.

Para as tremonhas piramidais, constituídas por sistemas estruturais de chapas não-enrijecidas e enrijecidas, as solicitações formam “estados combinados de tensões bi-axiais” para as chapas e “estados combinados de tensões uni-axiais” para os enrijecedores.

A seguir, serão relatados alguns aspectos conclusivos, considerados de relevância quando analisadas as “ações”, as tremonhas “não-enrijecidas” e “enrijecidas” e os “enrijecedores”.

**Com relação às “ações” sobre as paredes das tremonhas concluiu-se que:**

- (1) para ações estáticas, o Método de Walker mostrou-se de boa compatibilidade para com os consequentes resultados dos estados de tensões e de deformações, determinados através das teorias adotadas para o cálculo estrutural e os valores obtidos nos ensaios;
- (2) propõe-se a utilização deste método para o cálculo das ações. Este método apresenta a grande vantagem frente a outras teorias e critérios de normas, por apresentar funções de cargas perfeitamente definidas e de fácil geração pelos softwares modernos;
- (3) este método foi incorporado ao software desenvolvido durante este trabalho para o Cálculo de Tremonhas Piramidais (CTP).

**Com relação às “tremonhas não-enrijecidas” concluiu-se que:**

- (1) as chapas das paredes normalmente recaem na análise dos casos de placas com  $\lambda < 3$ ;
- (2) as tremonhas não-enrijecidas são viáveis apenas para silos baixos em que a relação altura lado é pequena (cargas não muito elevadas), pois os efeitos da flexão em chapas de aço podem levar a espessuras anti-econômicas;
- (3) os métodos analíticos, utilizados na prática para o dimensionamento de chapas de aço, são muito conservadores, levando-se a espessuras de chapas exageradas;

- (4) para dimensionamentos rápidos das chapas deste tipo de tremonha propõe-se a utilização de tabelas elaboradas pela Teoria dos Grandes Deslocamentos (TGD), como as propostas por AALAMI & WILLIAMS (1975);
- (5) utilizando-se recursos computacionais para a análise estrutural linear, recomenda-se a escolha de elementos finitos de casca que admitam esforços de flexão e por efeito membrana.

**Com relação às “tremonhas enrijecidas” concluiu-se que:**

- (1) os espaçamentos entre enrijecedores podem ser escolhidos de tal forma a se obter chapas mais finas e com relação  $\lambda > 3$ ;
- (2) tremonhas enrijecidas, a princípio, podem possuir capacidade ilimitada de suportar cargas, desde que o conjunto chapa/enrijecedor seja adequadamente dimensionado;
- (3) pode-se chegar a uma economia de 30% em peso usando-se enrijecedores nas chapas de paredes das tremonhas;
- (4) as Teorias dos Pequenos Deslocamentos (TPD) para vigas e para elementos finitos levam ao super-dimensionamento das chapas. Este fato é atribuído à baixa rigidez à flexão das placas finas. Os resultados experimentais mostraram que os deslocamentos e as tensões para as chapas em questão são pequenos quando comparados com aquelas teorias. Portanto, a princípio, supõe-se que as chapas trabalhem, primordialmente pelo efeito membrana;
- (5) para dimensionamentos mais racionais das espessuras das chapas em que  $\lambda > 3$ , propõe-se a utilização da Teoria dos Grandes Deslocamentos (TGD), desenvolvida analiticamente por TIMOSHENKO (1940).

**Com relação aos “enrijecedores” concluiu-se que:**

- (1) os enrijecedores proporcionam a utilização de chapas mais finas nas paredes das tremonhas e aumentam a suas capacidades de suportar cargas;
- (2) neste trabalho, analisaram-se apenas os enrijecedores horizontais, por ter já sido comprovada a sua eficiência na prática por renomados engenheiros e/ou pesquisadores. No entanto, é importante que os mesmos sejam projetados para

serem posicionados em nível e não perpendicularmente às chapas, pois podem-se ter problemas nas ligações;

- (3) a teoria analítica para o dimensionamento dos enrijecedores demonstrou ser simples e proporcionou valores satisfatórios para a seção transversal;
- (4) durante este trabalho, desenvolveu-se uma expressão analítica para o cálculo dos deslocamento nos vãos de quadros hiperestáticos fechados. Os enrijecedores dos vãos considerados podem possuir inércias iguais ou diferentes. Os deslocamentos calculados demonstraram ser satisfatórios;
- (5) por via numérica, para se obterem bons resultados nos dimensionamentos, torna-se necessário refinar melhor a malha de elementos finitos;
- (6) o conceito de largura efetiva para chapas relativamente finas contribui muito pouco para a resistência do enrijecedor e para estes casos pode ser desprezada;
- (7) para os níveis de cargas aplicadas durante os ensaios, as ações sobre os enrijecedores demonstraram atuar segundo componentes horizontais que passam pelo centro de cisalhamento das seções transversais. Isto leva a concluir, a princípio, que enrijecedores com maior rigidez à torção tornam-se desnecessários.

**Como sugestões gerais para futuros trabalhos pode-se citar:**

- (1) estudo teórico e experimental das ações em tremonhas usando-se células de pressões e produtos granulares de variedades diferentes;
- (2) estudo teórico e experimental de enrijecedores de tremonhas para altas cargas;
- (3) conclusão do software CTP em VISUAL BASIC, incluindo as rotinas para determinações dos esforços e dimensionamento de tremonhas piramidais;
- (4) análise numérica pela Teoria dos Grandes Deslocamentos (TGD) aplicada às chapas das paredes de tremonhas piramidais. Para este caso, se for utilizado o Software ANSYS, sugerem-se os elementos finitos formadores das malhas dos tipos: SHELL63 (tem rigidez de membrana e à flexão), SHELL41 (tem rigidez de membrana, porém rigidez à flexão desprezível) e SURF22 ( admite ações tangenciais e pode-se sobrepor a outros tipos de elementos finitos); todos estes elementos admitem grandes deslocamentos conforme citado pelos manuais.

- (5) estudo teórico e experimental das vigas de transição utilizadas em silos prismáticos;
- (6) estudo dos efeitos durante o carregamento e descarregamento (efeitos dinâmicos) dos produtos nos sistemas de soldas e/ou enrijecedores utilizados na união das tremonhas piramidais com as vigas de transição (propõe-se a utilização da Teoria de Walker);
- (7) estudo teórico e experimental dos efeitos das distorções provocadas pelas soldas em chapas finas.



## BIBLIOGRAFIA

AALAMI, B.; WILLIAMS, D.G. (1975). *Thin plate design for transverse loading*. London, Beccles and Colchester. 194p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1977). *ACI 313-77 - Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos, and bunkers for storing granular materials*. Detroit, ACI..

AMERICAN WELDING SOCIETY (1986). *Structural welding code: steel*. Miami, AWS. (ANSI / AWS D1.1-86).

AMON, R. et al. (1982). *Steel design for engineers and architects*. New York, Van Nostrand Reinhold. 412p.

ARAUJO, E.C.; CALIL JR., C. (1995). *Silos metálicos cilíndricos: recomendações mínimas de projetos*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24. Viçosa, MG.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980). *NBR 6152 - Determinação das propriedades mecânicas a tração de materiais metálicos*. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS(1986). *NBR 8800 - Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (método dos estados limites)*. Rio de Janeiro, ABNT.

AUSTRALIAN STANDARD (1990). *AS 3775 - Loads on bulk solids containers*. Sydney.

- AYALA, A.J. (1975). *Trazado y calculo de caldeira*. Bilbao, Urno Ediciones. 379p.
- AYUGA, F. (1995). Los empujes del material almacenado en silos. *Informes de la Construcción*, v.46, n.436, p.27-34.
- BARATA, F.E. (1984). *Propriedades da mecânica dos solos*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora. 152p.
- BARES, R. (1972). *Tablas para el calculo de placas e vigas pared*. Barcelona, Gustavo Gili.
- BENINK, E.J. (1989). *Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes*. 162p. Tese (Doutorado) - Universiteit Twent, The Netherlands.
- BLAKE, A. (1986). *Threaded fasteners*. New York, Marcel Dekker. 202p.
- BLODGETT, O.W. (1966). *Design of welded structures*. Ohio, The James F. Lincoln Arc Welding Foundation. 874p.
- BORN, J. (1962). *Hipped-plated structures*. London, Crosby Lockwood & Son. 250p.
- BRESLER, B. et al. (1988). *Diseno de estructuras de acero*. México, Editorial Limusa. 926p.
- BRITISH MATERIALS HANDLING BOARD (1985). *Draft code of pratice for the design of silos, bins, bunkes and hoppers*. England, BMHB. 101p.
- CALIL JR, C. (1984). *Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos*. Barcelona. 184p. Tese (Doutorado) - Escola Técnica Superior de Engenheiros Industriais, Universidade Politécnica de Barcelona.
- CALIL JR., C. (1990). *Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais*. São Carlos, EESC-USP. 198p.

- CAPUTO, H.P. (1978). *Mecânica dos solos*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. v.2, 456p.
- CAPUTO, H.P. (1978). *Mecânica dos solos*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. v.1, 241p.
- CARSON, J.W.; JENKYN, R.T. (1993). Load development and structural considerations in silo design. *Proceedings, Powder Science and Technology Research A/S, Oslo, Norway, n.96, p.237-254, August.*
- CARY, H.B. (1979). *Modern welding technology*. New Jersey, Prentice-Hall. 736p.
- CHIA, C. (1980). *Nonlinear analysis plates*. New York, McGraw-Hill. 422p.
- CLINCH, J.A. (1985). *Minimum considerations in design of bins for bulk solid*. Coletânea de artigos publicados pela Universidade de Sydney, Austrália. p.198-204.
- DARKOV, A.; KOZNETSOV, V. (1982). *Curso de mecânica das estruturas*. Porto, Livraria. Lopes da Silva Editora. 680p.
- DEUTSCHE NORM (1987). *DIN 1055-87 - Lastannahinen für Bauten, blatt 6, Lasten in Silozellen*. 12p.
- DIAS, A.T. (1962). *Curso de cálculo infinitesimal*. Ouro Preto, Fundação Gorceix. tomo 2, 841p.
- DRAPINSKI, J. (1979). *Elementos de soldagem*. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil. 280p.
- DRESCHER, A. (1991). *Analytical methods in bin-load analysis*. Amsterdam, Elsevier Science. 255p.
- DUKE, D.; HILL, J.L. (1989). Load transfer in skip welded stiffened panels. *Computers & Structures*, v.21, n.5, p.973-985.

- EUROCODE 1 (1993). *Basis of design and actions on structures - Part 4: Action on silos and tanks*. Brussels.
- EUROCODE 1 (1992). *Basis of design and actions on structures*. Brussels.
- FEODOSIEV, V.I. . (1988). *Resistencia de materiales*. Moscu, Editorial Mir. 583p.
- FORTES FILHO, J. (1985). *Uma introdução ao estudo dos silos*. São Carlos. 427p.  
Dissertação(Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- GAYLORD,E.H.; GAYLORD, C.N. (1984). *Design of steel bins for storage of bulk solids*. New Jersey, Pretince-Hall. 359p.
- GORENC, B.E. (1985). *Design of supports for steel bins*. Coletânea de artigos publicados pela Universidade de Sydney, Austrália. p.184-188.
- HARARI, I. (1985). Finite element analysis of stiffened plates. *Computers & Structures*, v.21, n.5 p.973-985.
- HARKER, R.J. (1986). *Elastic methods of design analysis*. New York, Elsevier Science. 441p.
- HARTOG, J.P.D. (1952). *Advanced strength of materials*. New York, McGraw-Hill Book. 379p.
- HIBBELER, R.C. (1986). *Estática*. Rio de Janeiro, Editora Campus. v.1, 475p.
- HOULSTON, R. (1989). Finite strip analysis of plates and stiffened panels subjected to air-blast loads. *Computers & Structures*, v.32, n.3/4, p.647-659.
- IMMENGA, R. (1973). Silos in acier. *Acier-Stahl-Steel*, n.4, p.156-161.

- ISHIKAWA, R.K. (1976). *Silos pré-fabricados*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- ISNARD, V. et al. (1971). *Formulario del ingeniero*. Bilbao, Artes Gráficas Grijelmo. 708p.
- JAEGER, L.G. (1964). *Elementary theory of elastic plates*. London, Pergamon Press. 108p.
- JENIKE, A.W. (1980). *Storage and flow of solid*. Utah, University of Utah. 197p. (Bulletin, n.123)
- KALMANOK, A.S. (1961). *Manual para cálculo de placas*. Montevideo, Editora Inter Ciencia. 285p.
- KAREEM, A. (1985). *Wind tunnel modeling*. Coletânea de artigos publicados pela Universidade de Sydney, Austrália. p.40-48.
- KAUPS, T.; LIEB, J.M. (1985). *A practical guide for the design of quality bulk storage bins and silos*. Coletânea de artigos publicados pela Universidade de Sydney, Austrália. p.205-220.
- KOKAL, V.E.; GORDON, I. (1995). Effective width for stiffener. *Modern Steel Construction*, p.10, October.
- KORN, G.A.; KORN, T.M. (1968). *Mathematical handbook for scientists and engineers*. New York, McGraw-Hill Book. 1130p.
- LAERMANN, K. (1972). *Experimentelle Plattenuntersuchungen*. Dusseldorf, Wern-Verlag. 223p.
- LAFITE, J. (1979). Hermetic silos of welded steel. *Acier-Stahl-Steel*, v.3, p.99-102.

- LOTHERS, J.E. (1973). *Diseno de estructuras metalicas*. Madrid, Prentice-Hall International. 560p.
- MEHTA, K.C. (1985). *Wind loads*. Coletânea de artigos publicados pela Universidade de Sydney, Austrália. p.34-39.
- MERIAN, J.L. (1985). *Estática*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora. 326p.
- MILANI, A. P. (1993). *Determinação das propriedades de produtos armazenados para projeto de pressões e fluxo em silos*. São Carlos. 272p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MOLITERNO, A. (1989). *Elementos para projeto em perfis leves de aço*. São Paulo, Edgard Blücher. 209p.
- MURRAY, N.W. (1985). *Design aspects of thin-walled steel silos*. Coletânea de artigos publicados pela Universidade de Sydney, Austrália. p.158-163.
- NEFF, D., HUSS, C. (1984). Horizontally stiffened angular hopper analyzed by beam action versus finite element. *Bulk Solids Handling*, v.4, n.2, June.
- NEFF, D.; HUSS, C. (1983). Horizontally stiffened membrane hoppers analyzed by vertical work versus finite element - Part 1. *Bulk Solids Handling*, v.3, n.4, November.
- OWENS, G.W.; CHEAL, B.D. (1989). *Structural steelwork connections*. London. 330p.
- PISKUNOV, N. (1973). *Cálculo diferencial e integral*. Moscou, Mir. v.2, 517p.
- RAVENET, J. (1977). *Silos*. Barcelona, Editores Técnicos Associados. 381p.
- RAVENET, J. (1992). *Silos*. Barcelona, IMGESA. 508p.

- REIMBERT, A.; REIMBERT, M. (1979). *Silos: teoria y practica*. Tucumán: Editorial Américalee. 463p.
- REKACH, V.G. (1978). *Problemas de la teoria de la elasticidad*. Moscu, Mir. 388p.
- ROBERTS, A.W. (1995). 100 Years of Janssen. *Bulk Solids Handling*, v.15, n.3, p.369-383, July/September.
- ROBERTS, A.W. (1987). *Storage, flow and handling of bulk solids*. The University of Newcastle.
- ROTTER, J.M. (1988). *The structural desing of light gauge silo hoppers*. Sydney, Austrália, University of Sydney. 45p. (Research Report n.R571)
- SAFARIAN, S.S. (1985). *Design and construction of silos and bunkers*. New York, Van Nostrand Reinhold. 468p.
- SHAMES, I.H. (1983). *Introdução à mecânica dos sólidos*. Rio de Janeiro, Prentice-Hall. 556p.
- SILVA, E. M. et al. (1980). *Fundamentos de ensaios mecânicos de metais*. Belo Horizonte, UFMG. 443p.
- SOARES, E.V. (1964). *Armazéns e silos: preservação de grãos alimentícios*. Rio de Janeiro. 194p.
- SOUZA, S.A. (1982). *Ensaos mecânicos de materiais metálicos*. São Paulo, Edgard Blücher. 286p.
- TIMOSHENKO, S.P. (1966). *Resistência dos materiais*. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico. 518p.

- TIMOSHENKO, S.P. (1940). *Theory of plates and shells*. New York, McGraw-Hill. 492p.
- TRAHAIR, N.S. (1977). *The behavior and design of steel structures*. London, Chapman and Hall. 320p.
- TRAHAIR, N.S. (1985). *Characteristics of structural form*. Coletânea de artigos publicados pela Universidade Sydney., Austrália. p.55-57.
- TRAHAIR, N.S. (1985). *Criteria of failure*. Coletânea de artigos publicados pela Universidade de Sydney, Austrália. p.113-121.
- TRAHAIR, N.S. et al (1983). *Structural design steel bins for bulk solids*. Sydney, Australian Institute of Steel Construction.
- TROITSKY, M.S. (1968). *Orthotropic bridges theory and design*. Ohio, The James F. Lincoln Arc Welding Foundation. 256p.
- TROITSKY, M.S. (1976). *Stiffened plates: bending, stability and vibrations*. Amsterdam, Elsevier. Scientific. 410p.
- TROITSKY, M.S. (1982). *Tubular steel structures: theory and design*. Montreal. 369p.
- TROYTSKY, M.S. (1980). Design considerations for rectangular steel bins. In: CANADIAN STRUCTURAL ENGINEERING CONFERENCE. 43p.
- VAZ, J. (1987). *Silos verticais de madeira compensada*. São Carlos. 346p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- VOLTERRA, E.; GAINES, J.H. (1971). *Advanced strength of materials*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall. 522p.



- WALKER, D.M. (1966). An approximate theory for pressures and arching in hoppers. *Chemical Engineering Science*, v.21, p.975-996.
- WALKER, D.M.; BLANCHARD, M.H. (1967). Pressures in experimental coal hoppers. *Chemical Engineering Science*, v.22, p.1713-1745.
- WESTBROOK, R. (1988). *Structural engineering design in practice*. New York, John Wiley & Sons. 262p.
- WOHLBIER, R.H. (1986). *Silos, hoppers bins & for storing bulk materials: the best of bulk solids handling 1981-1985*. v.A/86. Calusthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications. 470p.
- YANG, H.Y. (1984). Finite strip method with x-spline functions. *Computers & Structures*, v.18, n.1, p.127-132.
- YU, W.W. (1991). *Cold-formed steel design*. New York, John Wiley & Sons. 631p.

## ANEXO A

### AÇÕES SOBRE CHAPAS E ENRIJECEDORES

Nas figuras a seguir são fornecidas as ações utilizadas para as determinações de esforços e deslocamentos nas tremonhas não-enrijecida e enrijecida. Os cálculos foram feitos para carregamentos que correspondem às etapas de aplicações de cargas na seção de transição da tremonha pelo macaco hidráulico.

As cargas na transição listadas a seguir, foram determinadas para valores variando entre 0 (zero)  $\text{kN/m}^2$  e  $100 \text{ kN/m}^2$ . Nas figuras, as unidades de dimensões lineares estão em metro e para dimensões de pressões estão em  $\text{kN/m}^2$ .

A ordenada “y” que aparece nas figuras corresponde ao ponto em que as pressões gradientes se anulam sobre um sistema de eixos local de acordo com o Software ANSYS. Para todas as figuras, estas ordenadas devem ser multiplicadas por (-1) pois a origem do sistema de eixos local foi tomado a partir da transição.

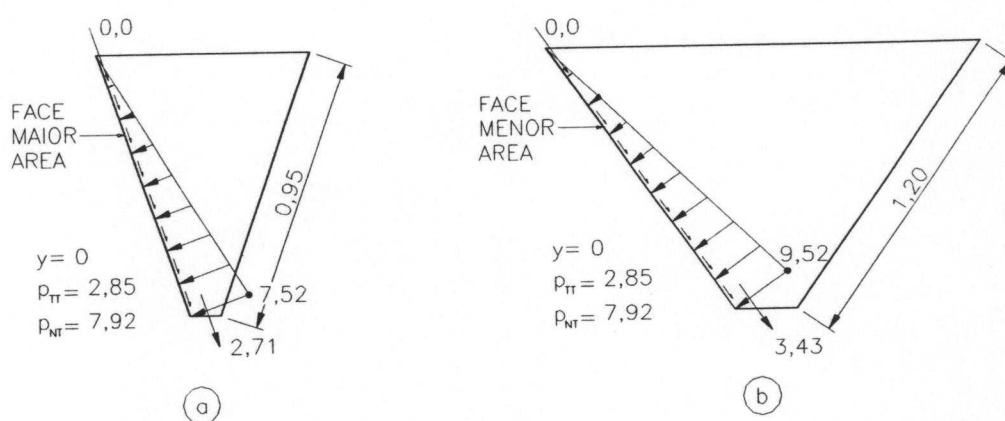
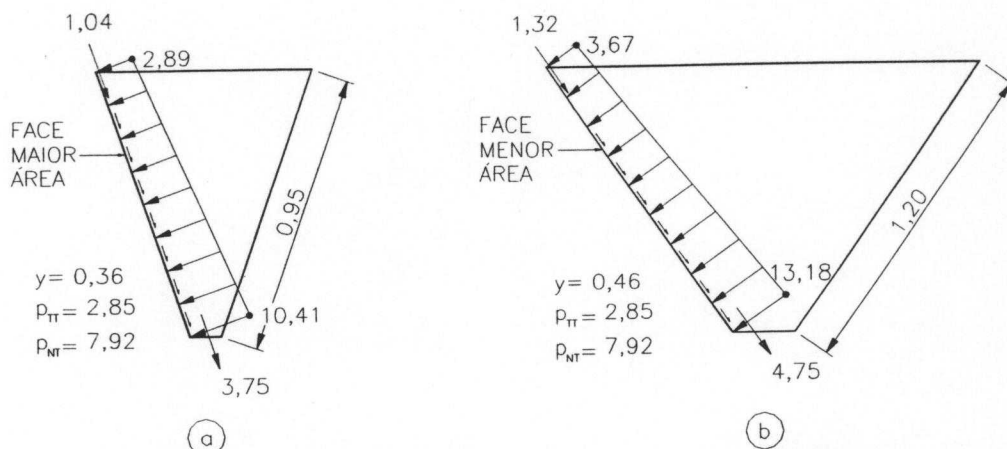
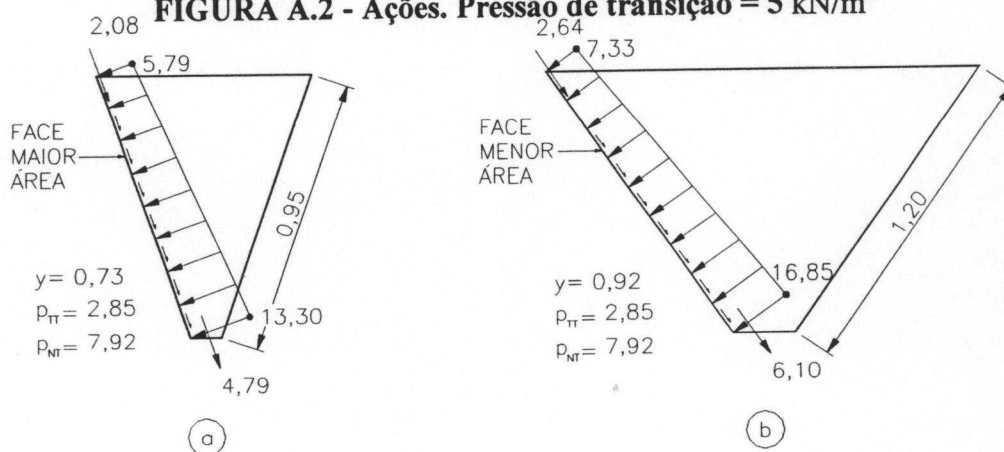


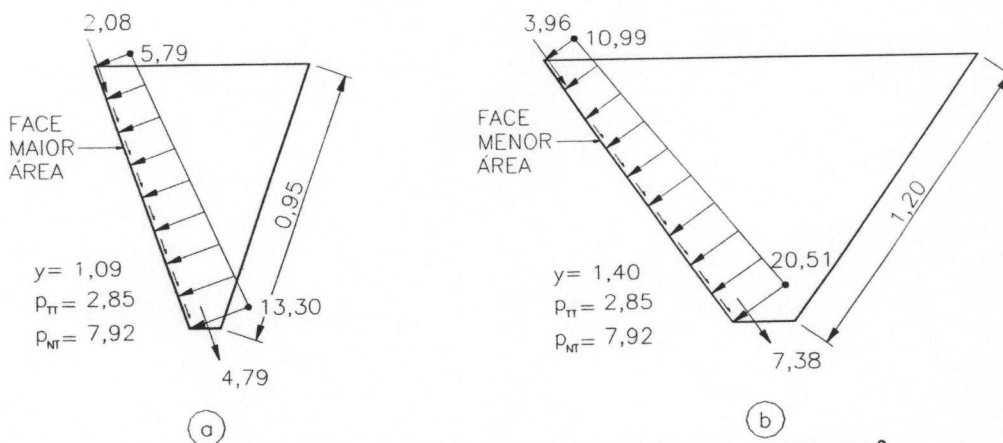
FIGURA A.1 - Ações. Pressão na transição =  $0 \text{ kN/m}^2$



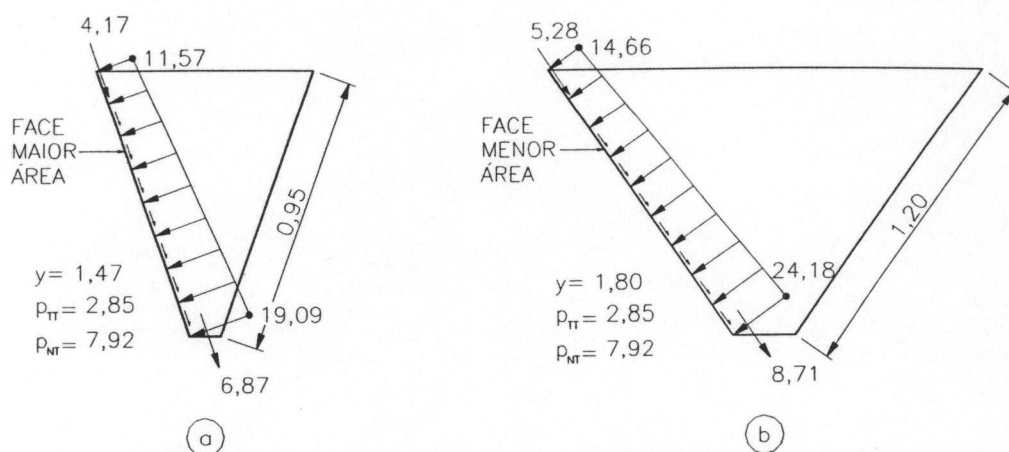
**FIGURA A.2 - Ações. Pressão de transição = 5 kN/m<sup>2</sup>**



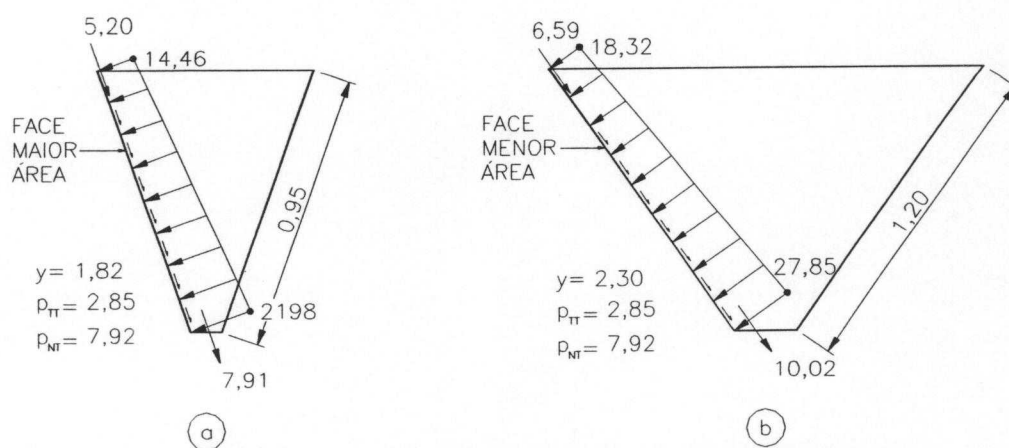
**FIGURA A.3 - Ações. Pressão na transição = 10 kN/m<sup>2</sup>**



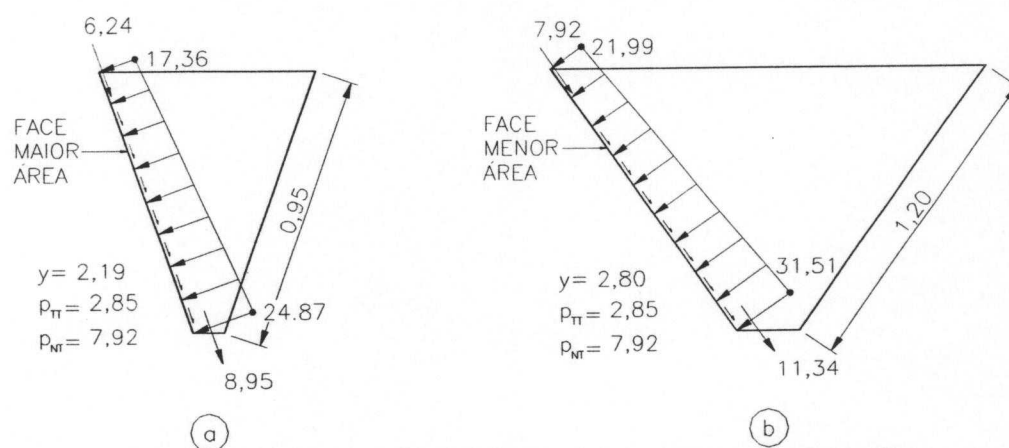
**FIGURA A.4 - Ações. Pressão na transição = 15 kN/m<sup>2</sup>**



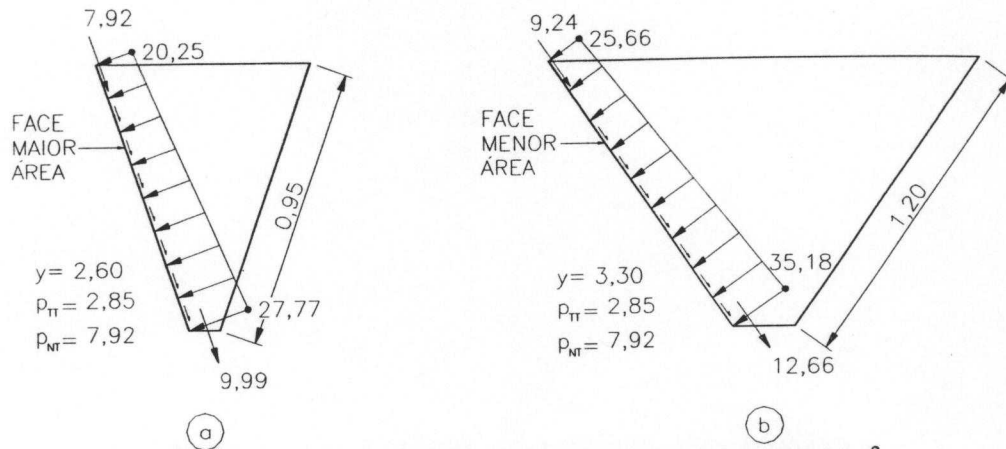
**FIGURA A.5 - Ações. Pressão na transição =  $20 \text{ kN/m}^2$**



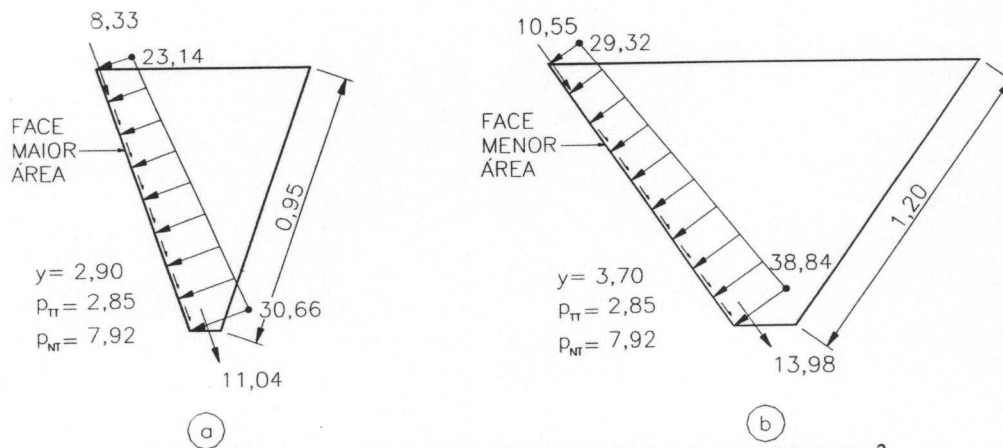
**FIGURA A.6 - Ações. Pressão na transição =  $25 \text{ kN/m}^2$**



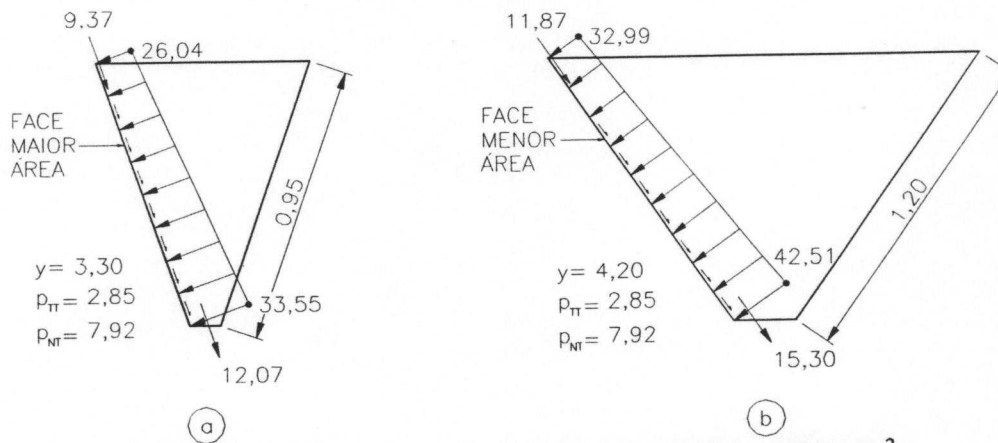
**FIGURA A.7 - Ações. Pressão na transição =  $30 \text{ kN/m}^2$**



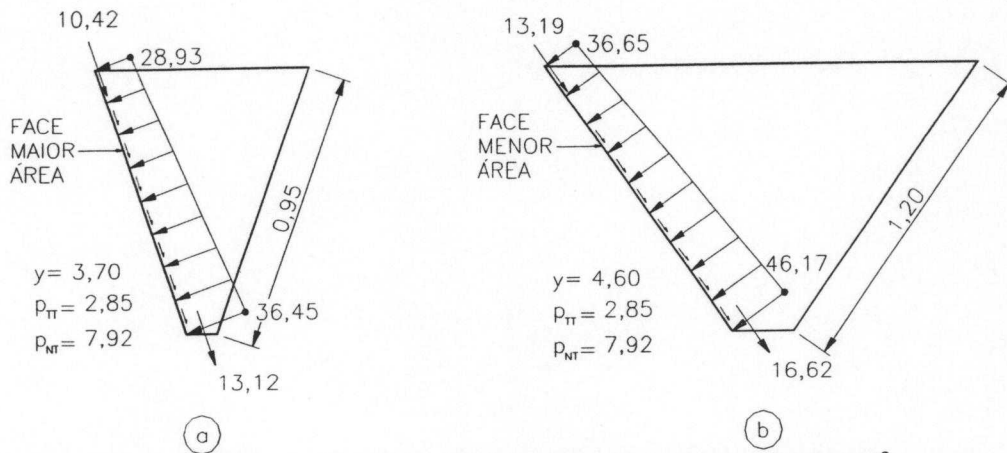
**FIGURA A.8 - Ações. Pressão na transição = 35 kN/m<sup>2</sup>**



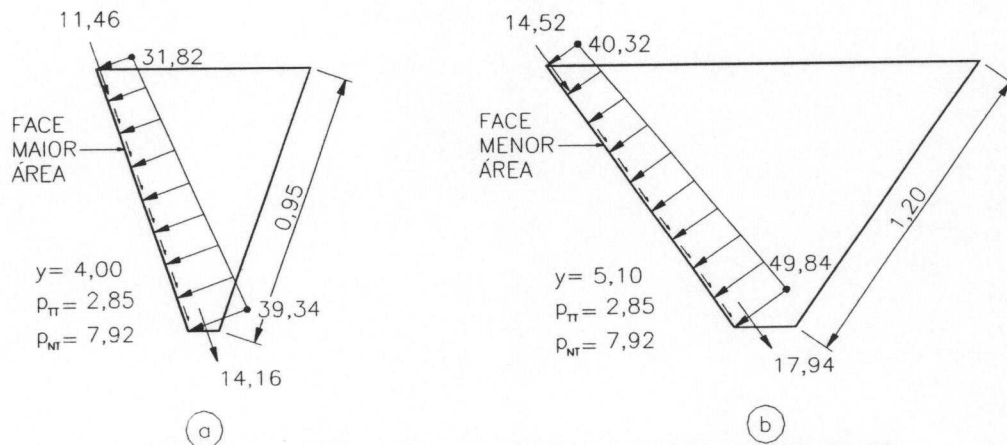
**FIGURA A.9 - Ações. Pressão na transição = 40 kN/m<sup>2</sup>**



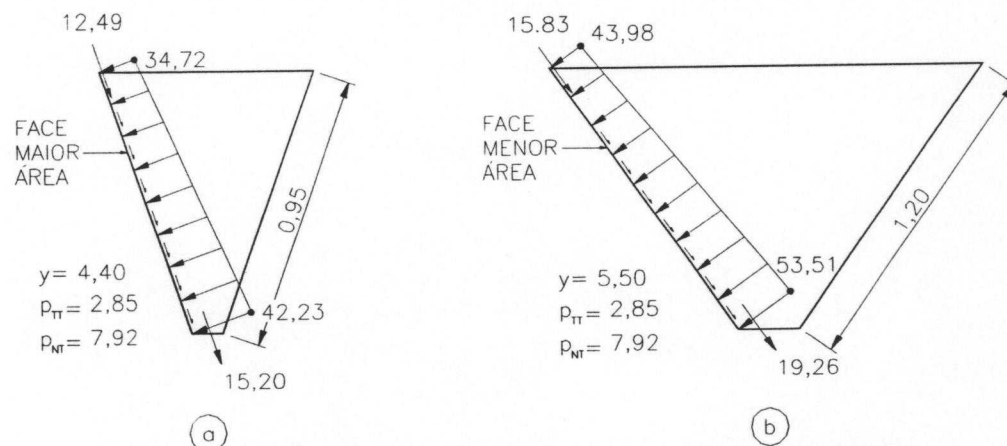
**FIGURA A.10 - Ações. Pressão na transição = 45 kN/m<sup>2</sup>**



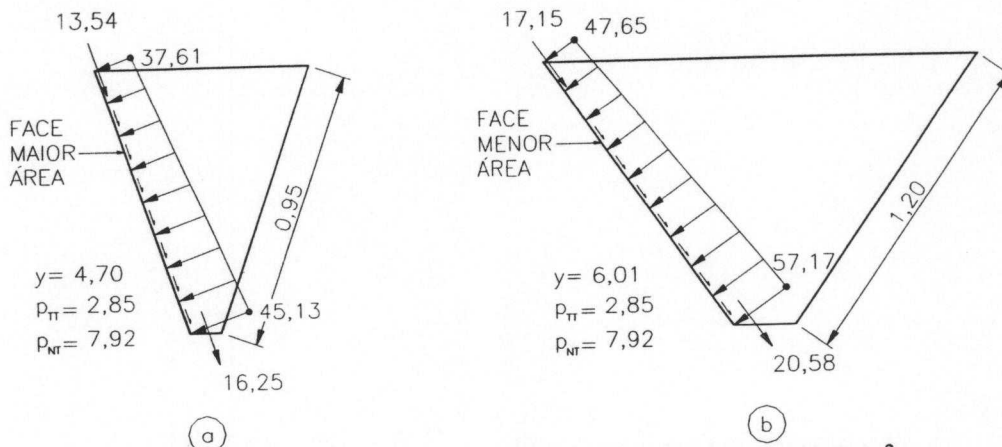
**FIGURA A.11 - Ações. Pressão na transição = 50 kN/m<sup>2</sup>**



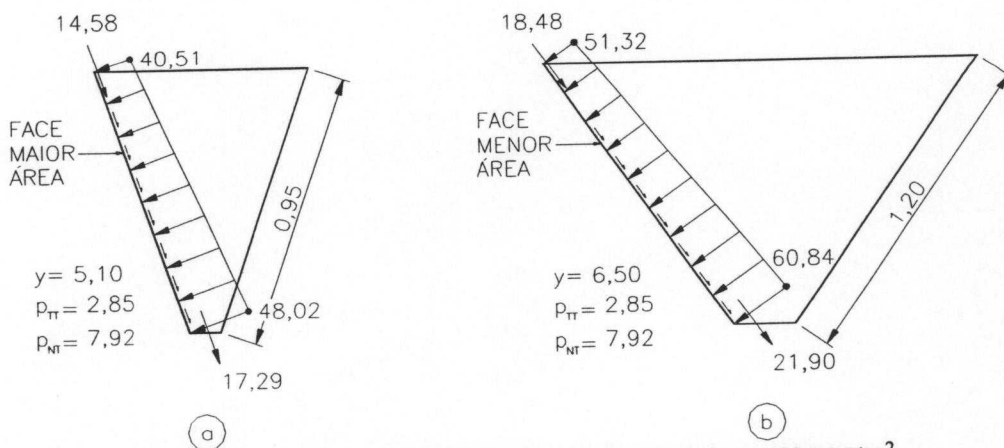
**FIGURA A.12 - Ações. Pressão na transição = 55 kN/m<sup>2</sup>**



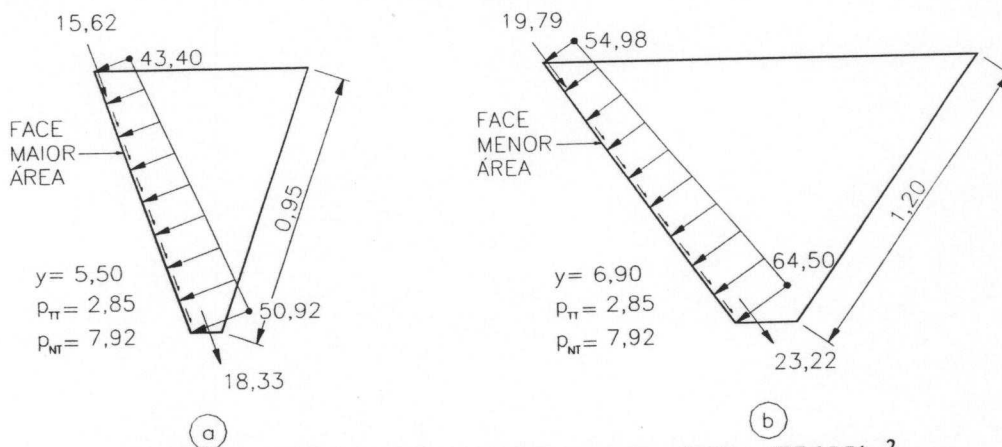
**FIGURA A.13 - Ações. Pressão na transição = 60 kN/m<sup>2</sup>**



**FIGURA A.14 - Ações. Pressão na transição = 65 kN/m<sup>2</sup>**



**FIGURA A.15 - Ações. Pressão na transição = 70 kN/m<sup>2</sup>**



**FIGURA A.16 - Ações. Pressão na transição = 75 kN/m<sup>2</sup>**

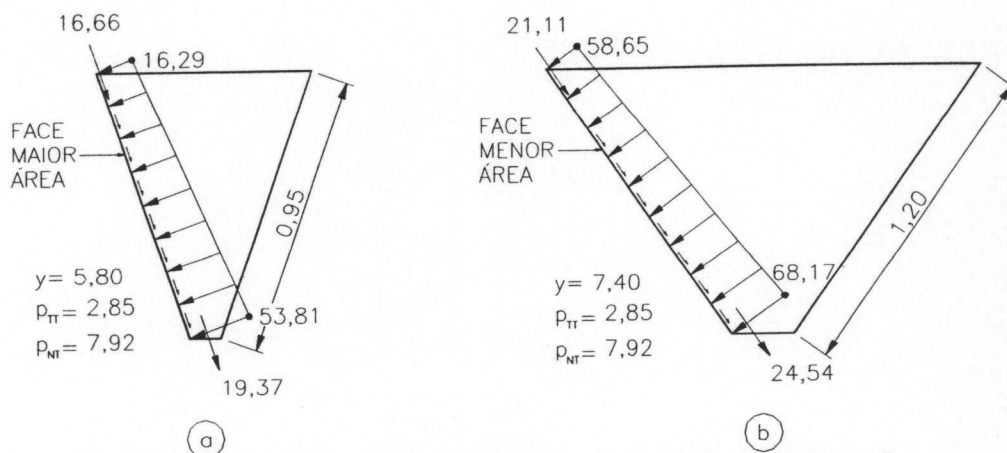


FIGURA A.17 - Ações. Pressão na transição =  $80 \text{ kN/m}^2$

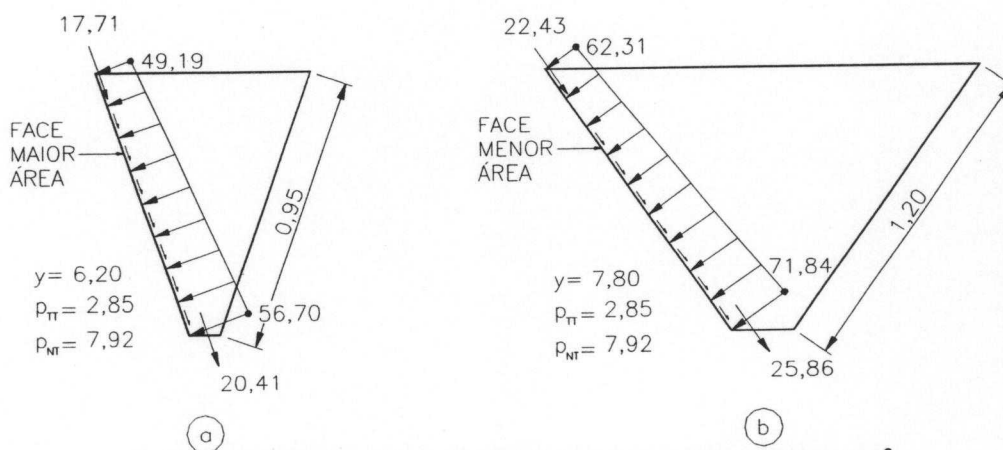


FIGURA A.18 - Ações. Pressão na transição =  $85 \text{ kN/m}^2$

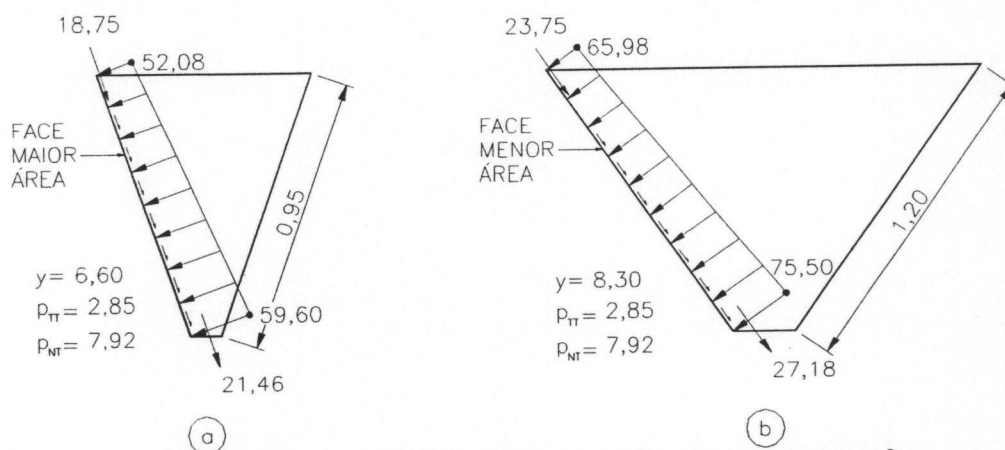
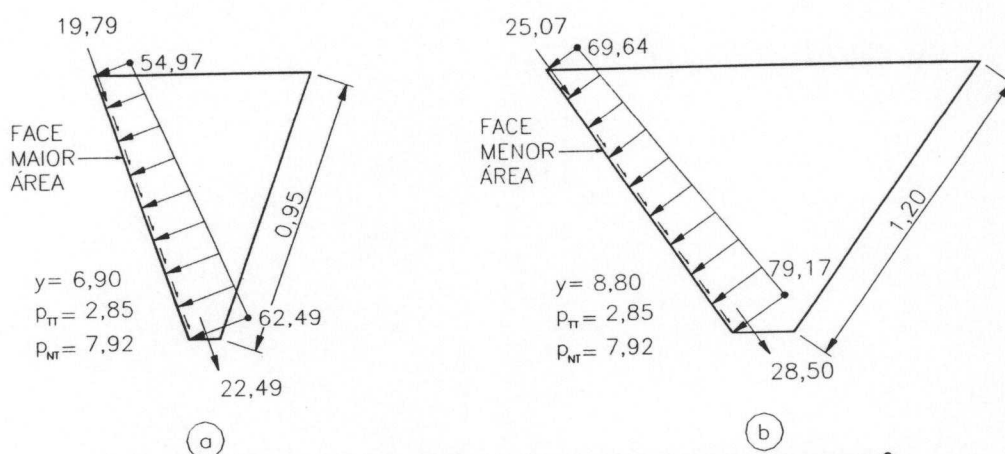
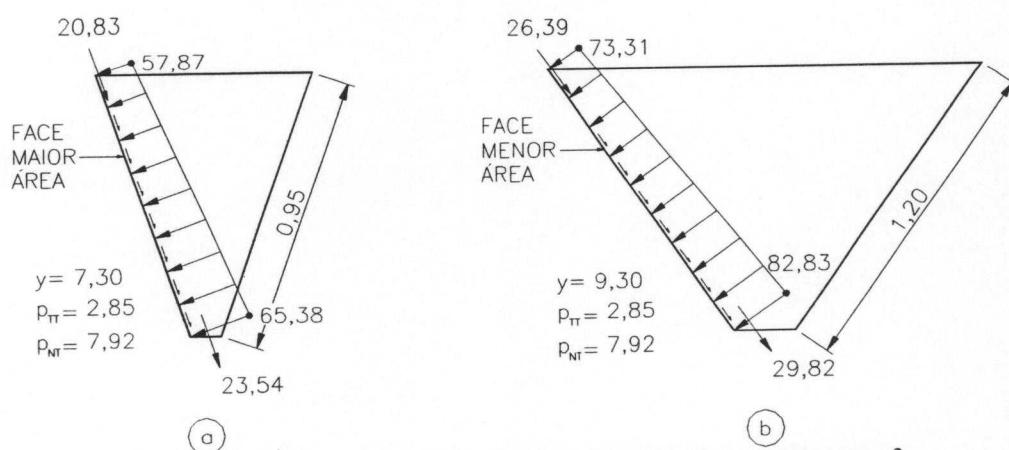


FIGURA A.19 - Ações. Pressão na transição =  $90 \text{ kN/m}^2$





**FIGURA A.20 - Ações. Pressão na transição =  $95 \text{ kN/m}^2$**



**FIGURA A.21 - Ações. Pressão na transição =  $100 \text{ kN/m}^2$**

## **ANEXO B**

### **PROJETOS**

# 1 - ESTRUTURA DE SUSTENTAÇÃO

SILO DE ACO: TREMONHA PIRAMIDAL  
ESTRUTURA DE SUSTENTACAO DA TREMONHA

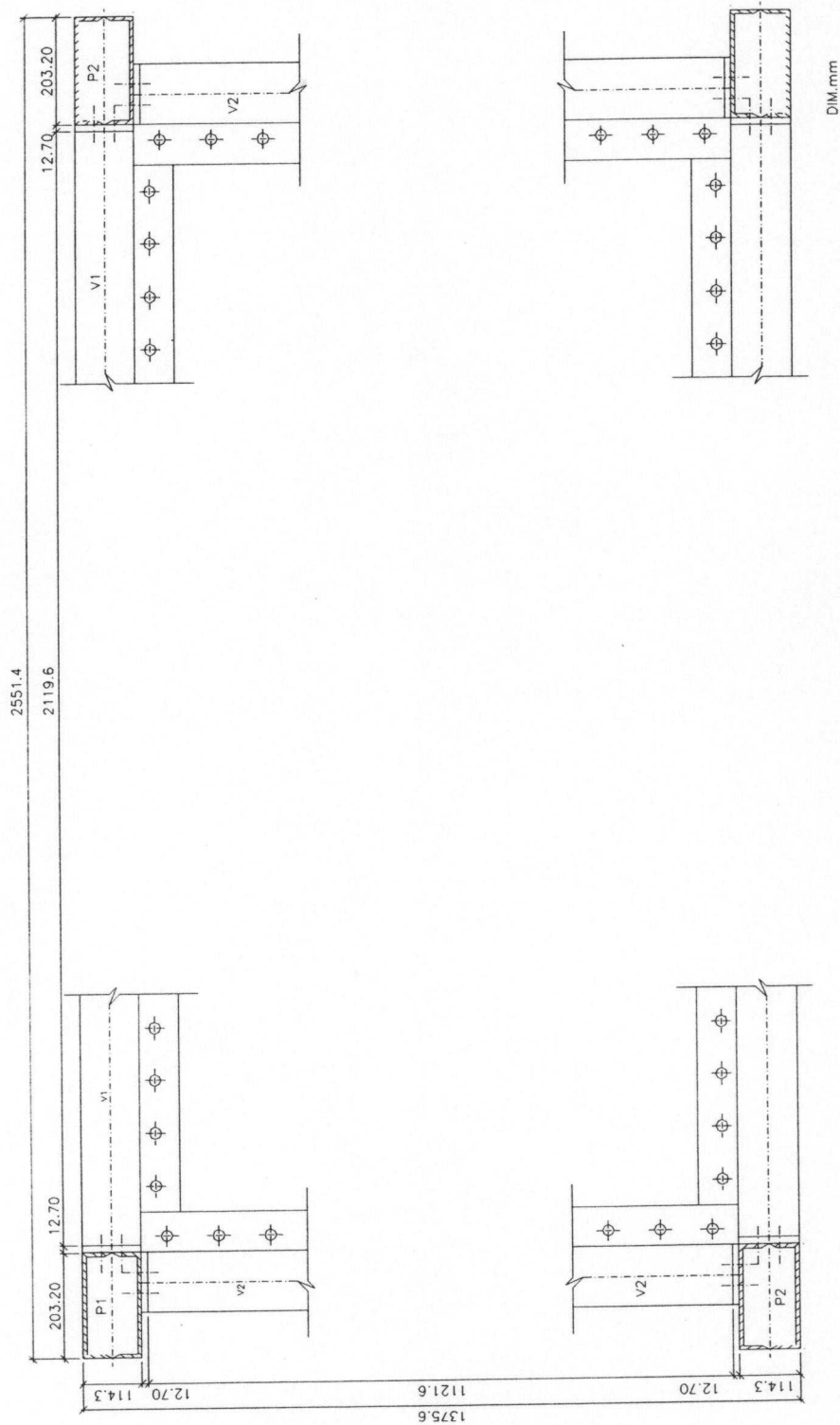


FIGURA B.1

VIGAS V1: (QUANTIDADE=2)

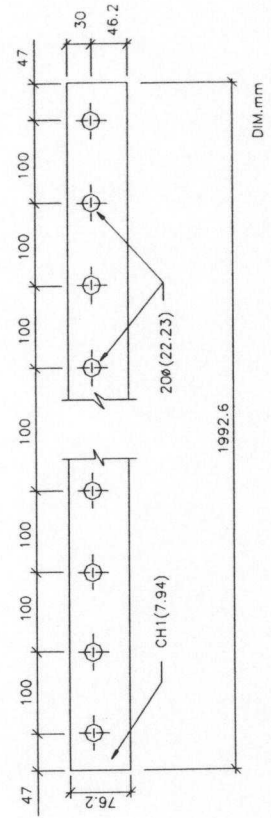
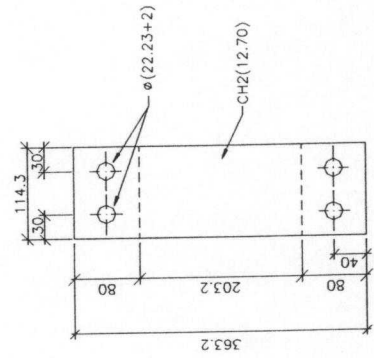
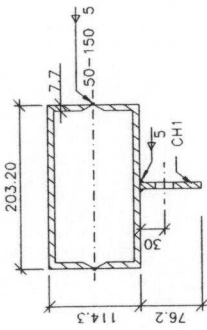
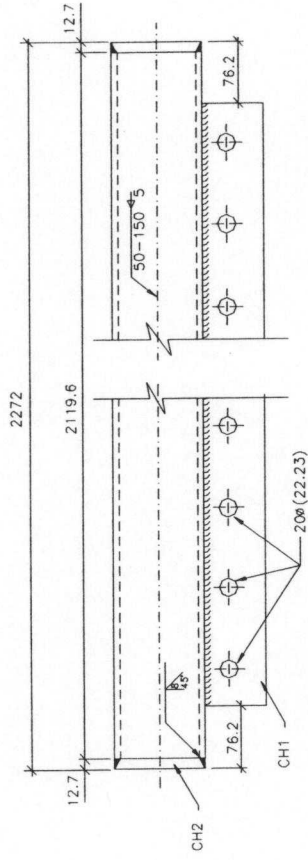


FIGURA B.2

VIGAS V2: (QUANTIDADE=2)

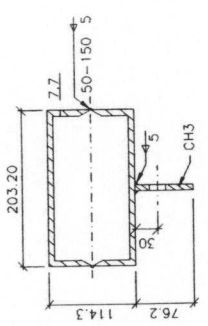
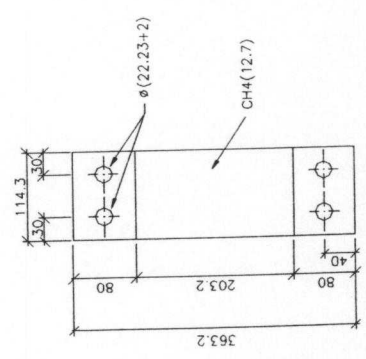
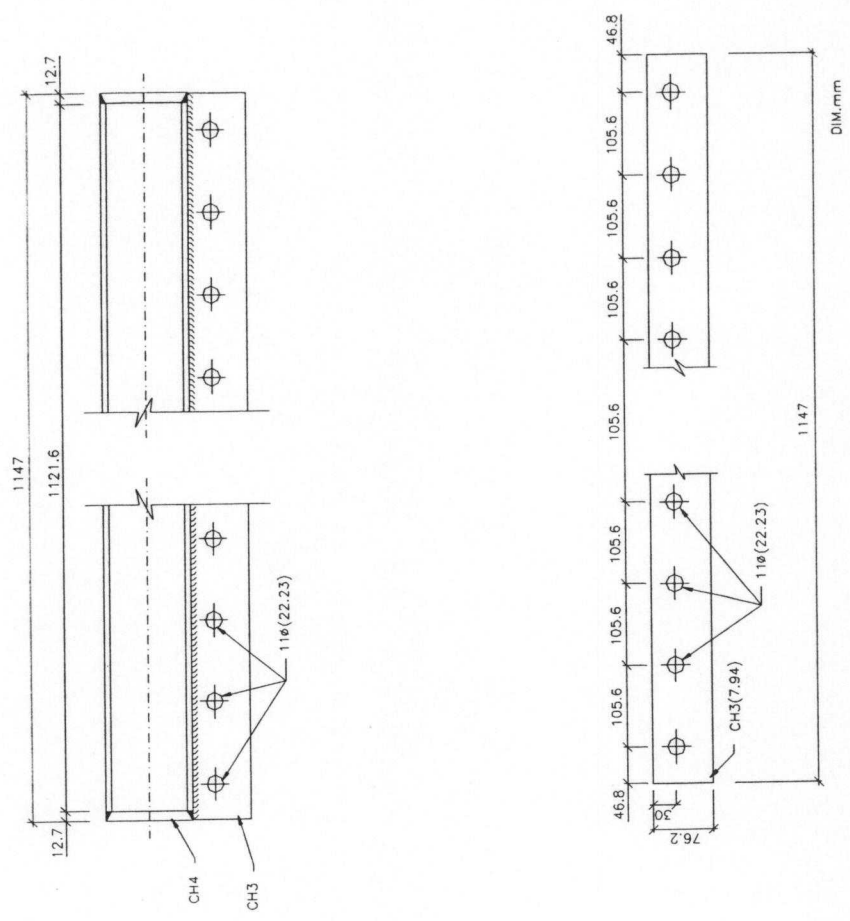


FIGURA B.3

COLUNAS P1: (QUANTIDADE=2)

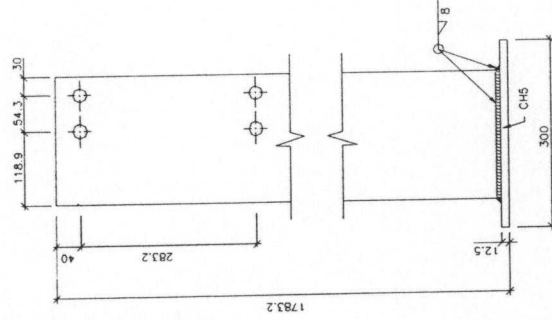
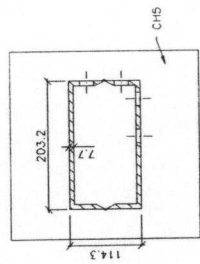
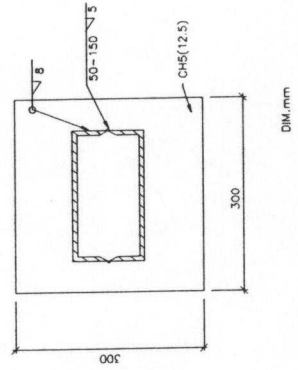
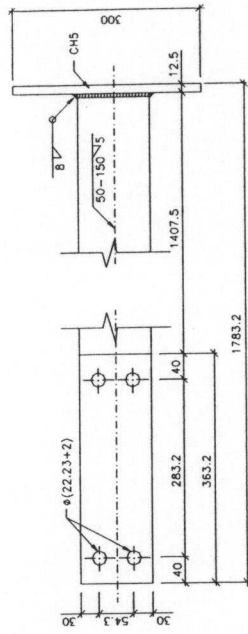


FIGURA B.4

COLUNAS P2: (QUANTIDADE=2)

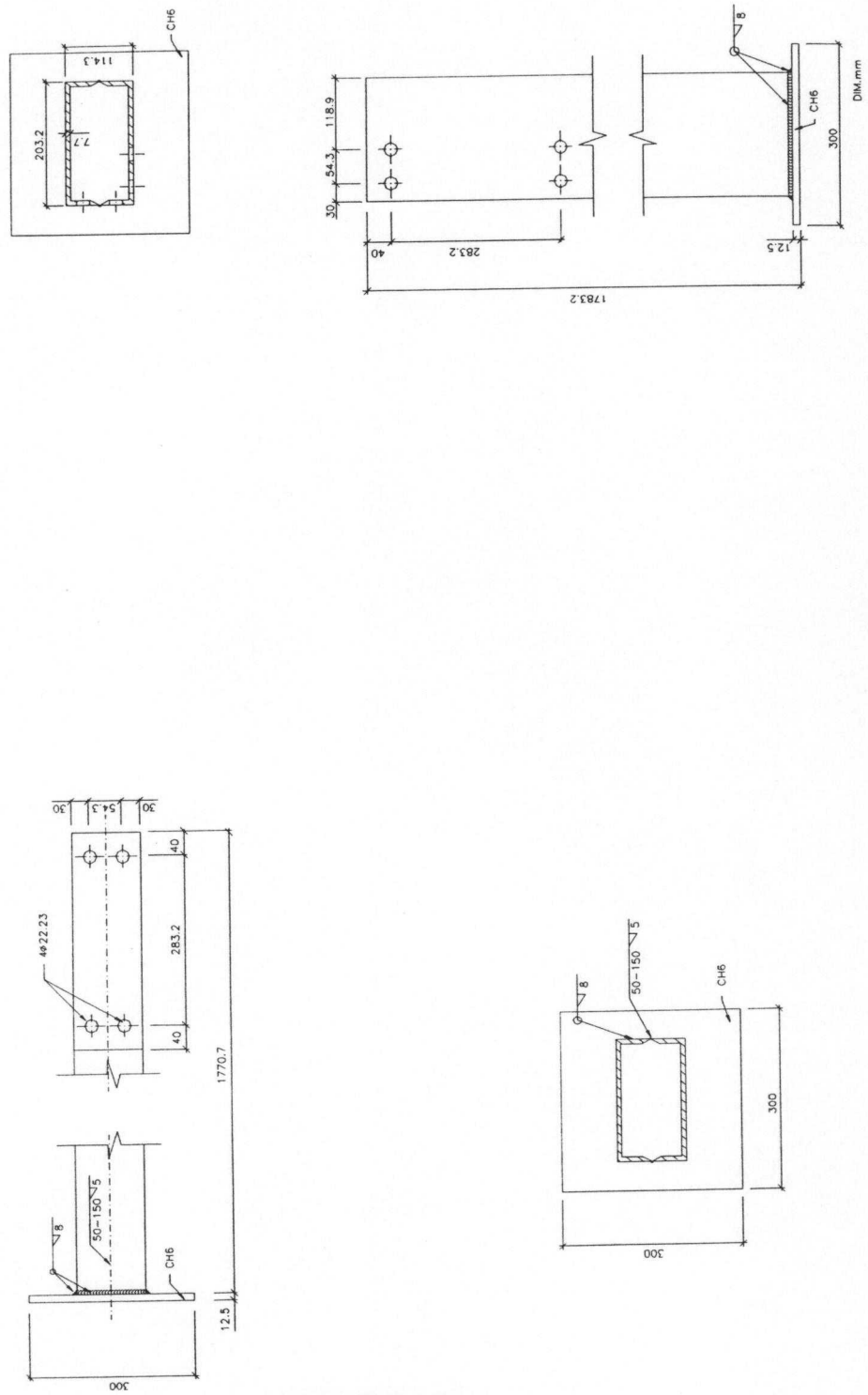


FIGURA B.5

## 2 - TREMONHAS

TREMONHA: TIPO 1 (T1)

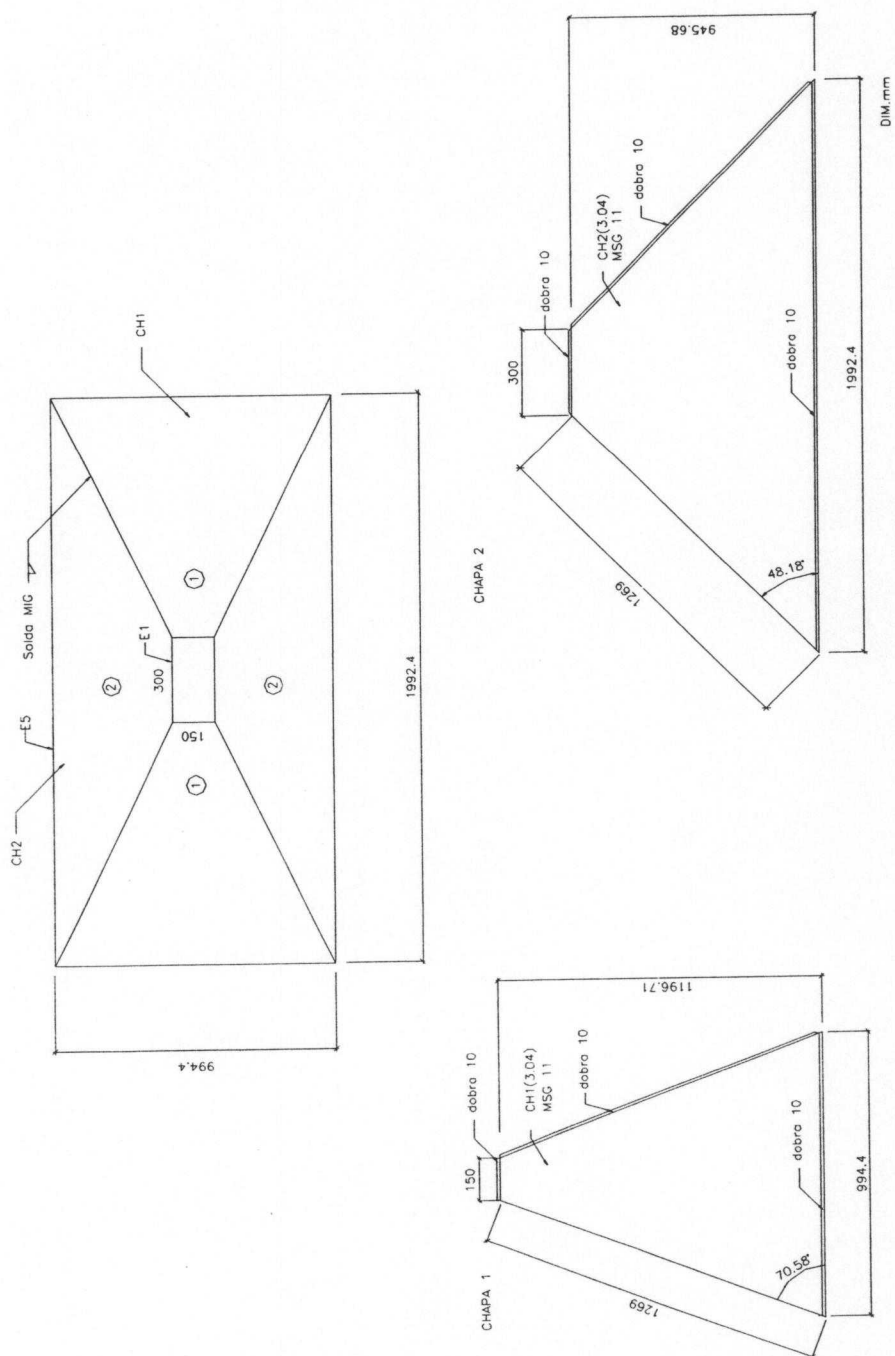


FIGURA B.6



BOCA DE DESCARGA

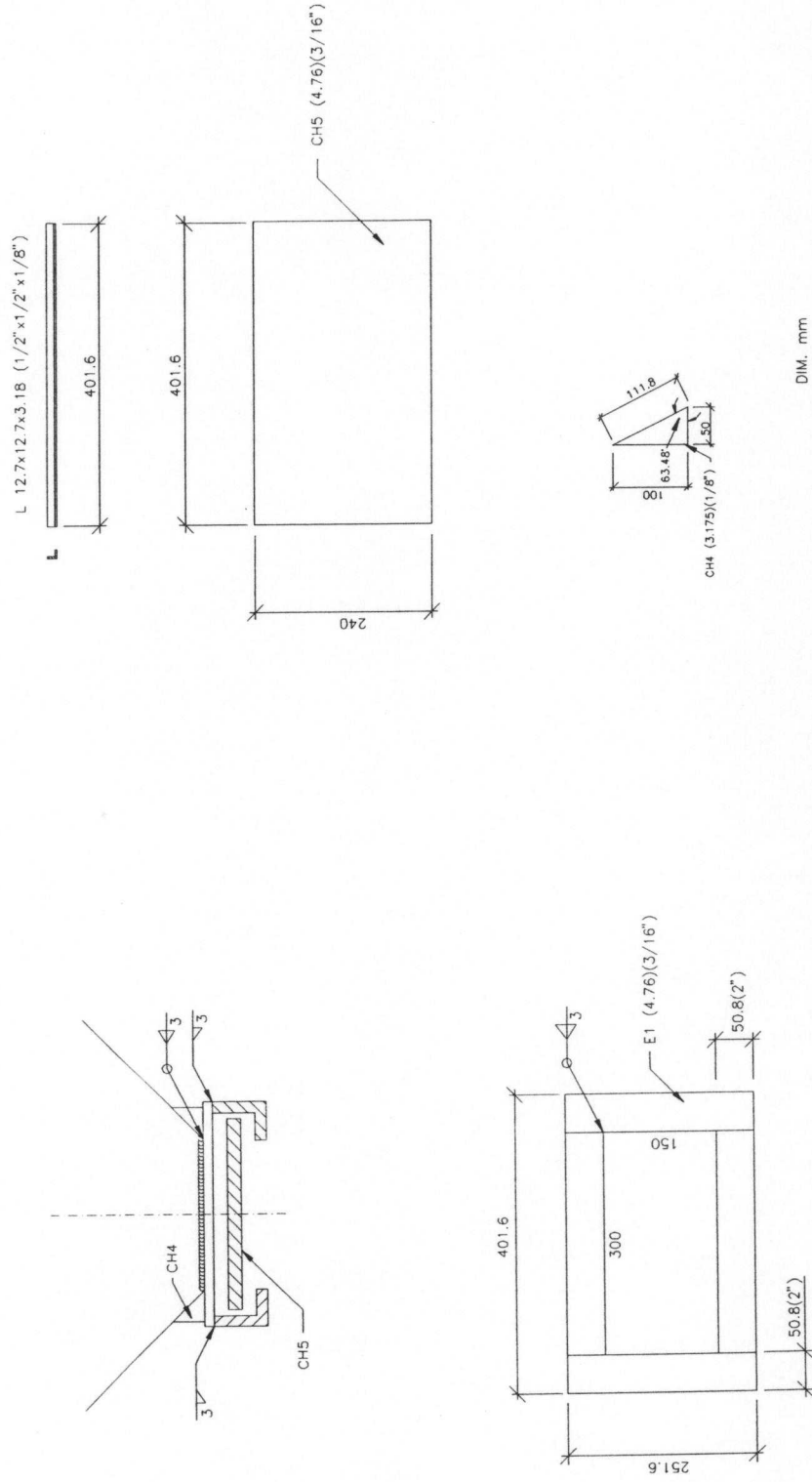
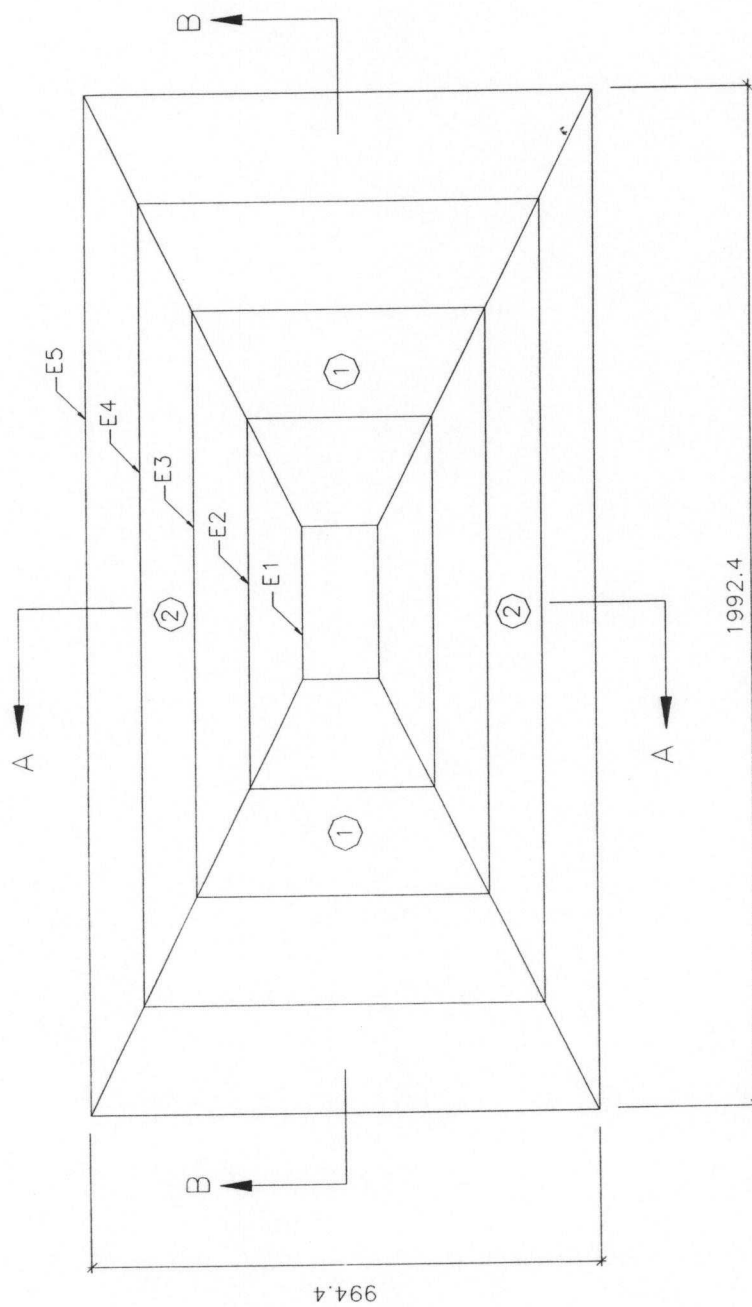


FIGURA B.7

TREMONHA: TIPO 2 (T2)



DIM. mm

OBS.: As chapas 1 e 2, gabarito e boca de descarga são semelhantes a tremonha do tipo 1

FIGURA B.8

POSICIONAMENTO DOS ENRIJECEDORES: (FACE DE MENOR AREA)

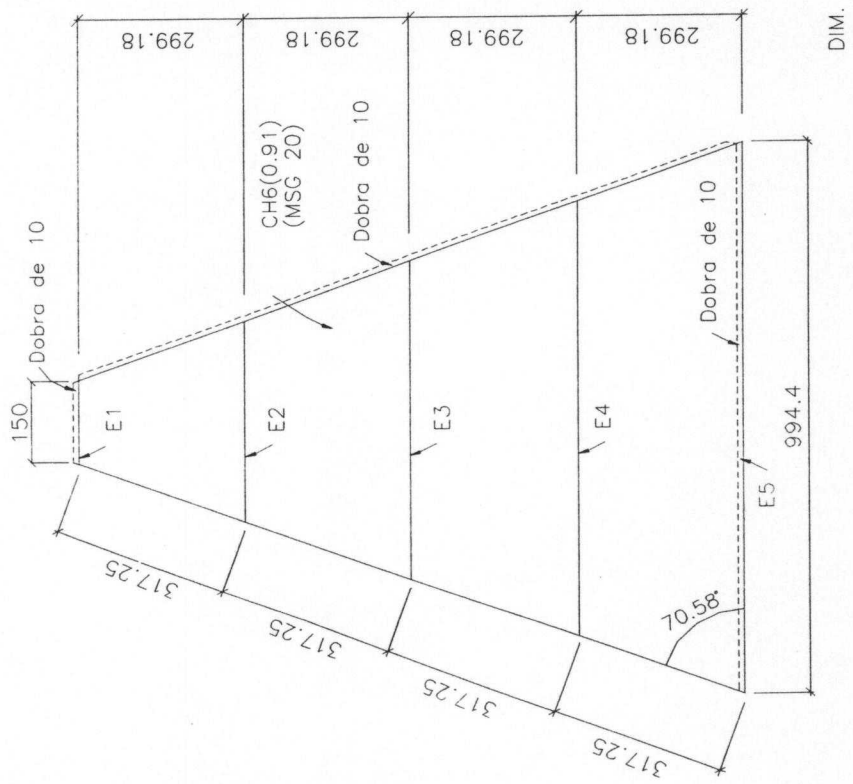


FIGURA B.9

POSICIONAMENTO DOS ENRIJECEDORES: (FACE DE MAIOR AREA)

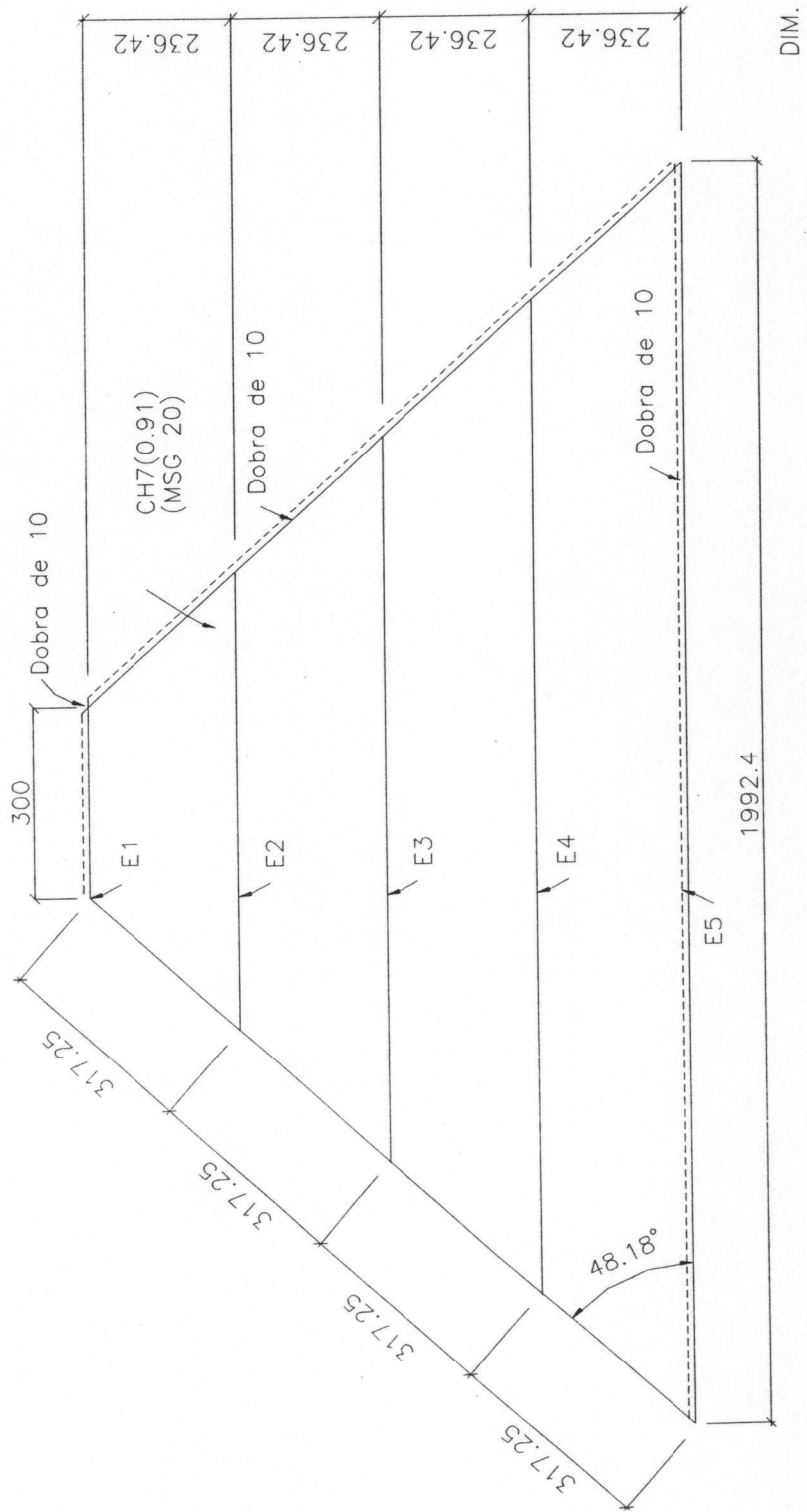
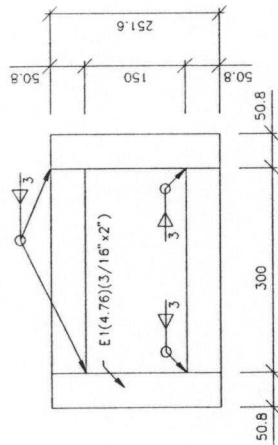


FIGURA B.10

ENRIJECEDOR E1



ENRIJECEDOR E2

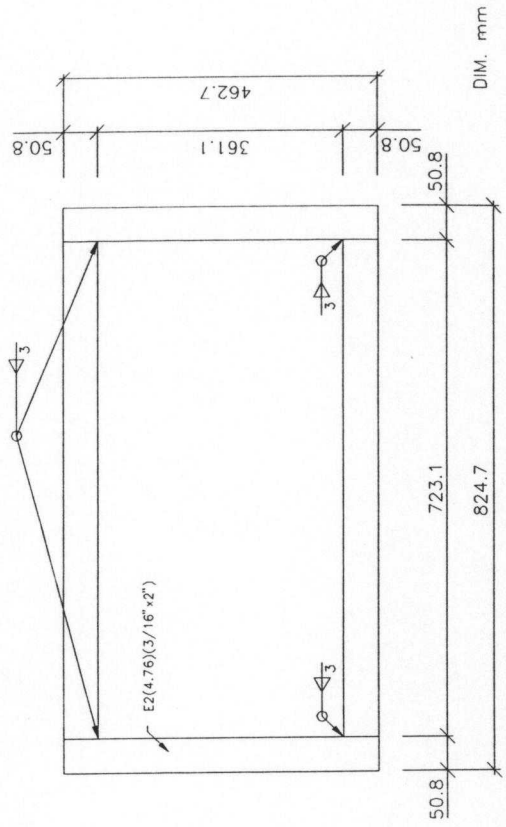


FIGURA B.11

ENRIJECEDOR E3

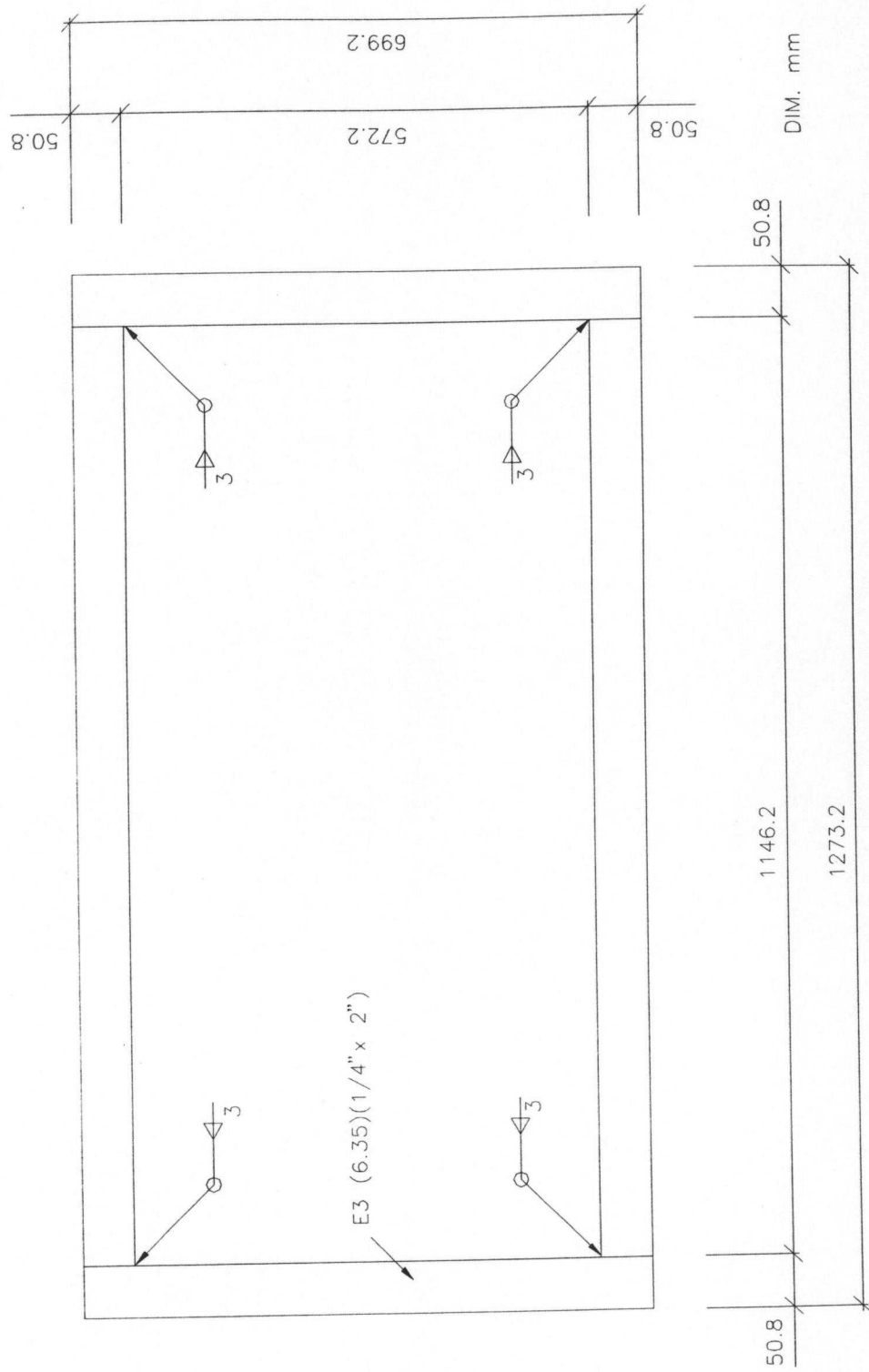


FIGURA B.12

ENRIJECEDOR E4

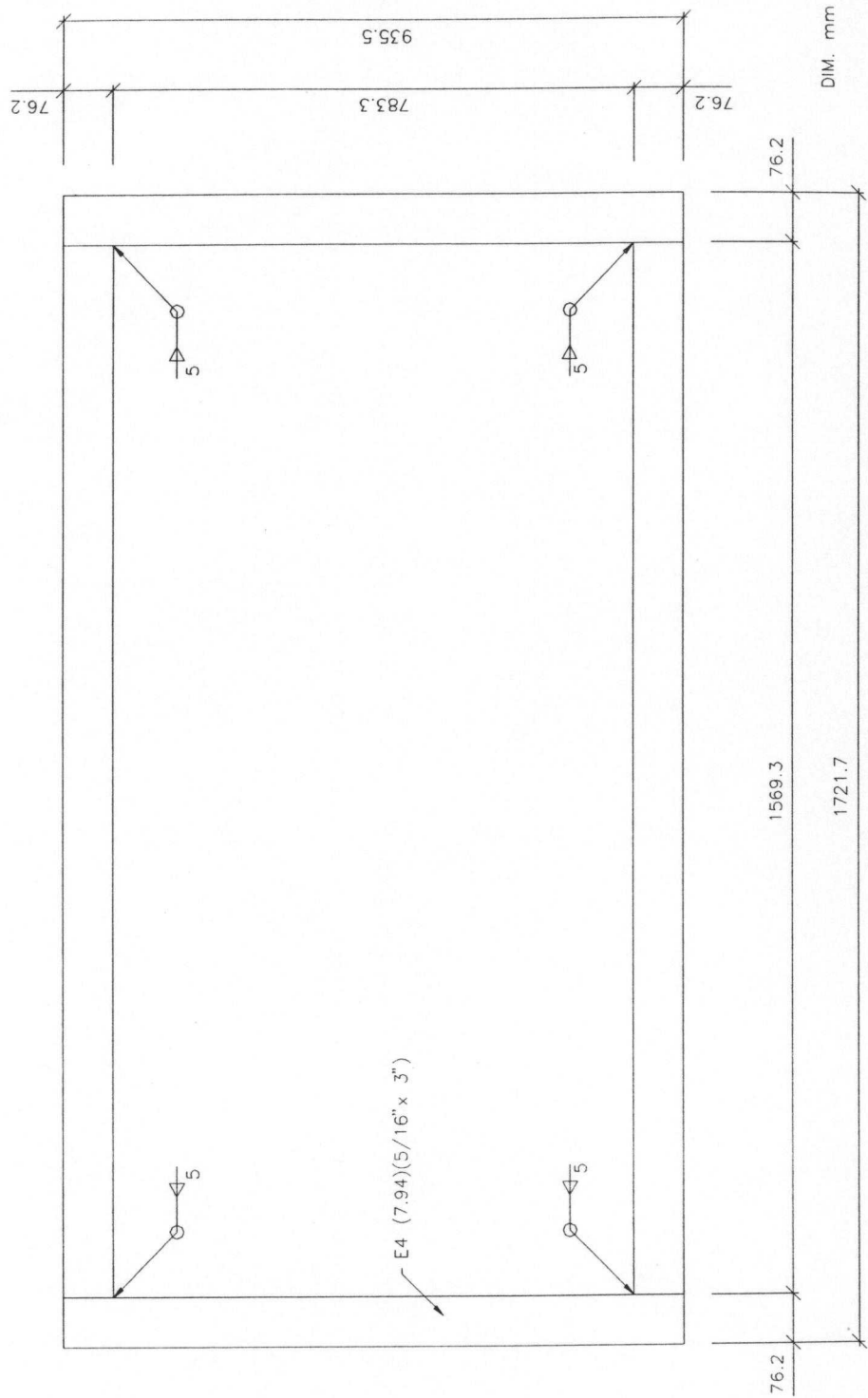


FIGURA B.13

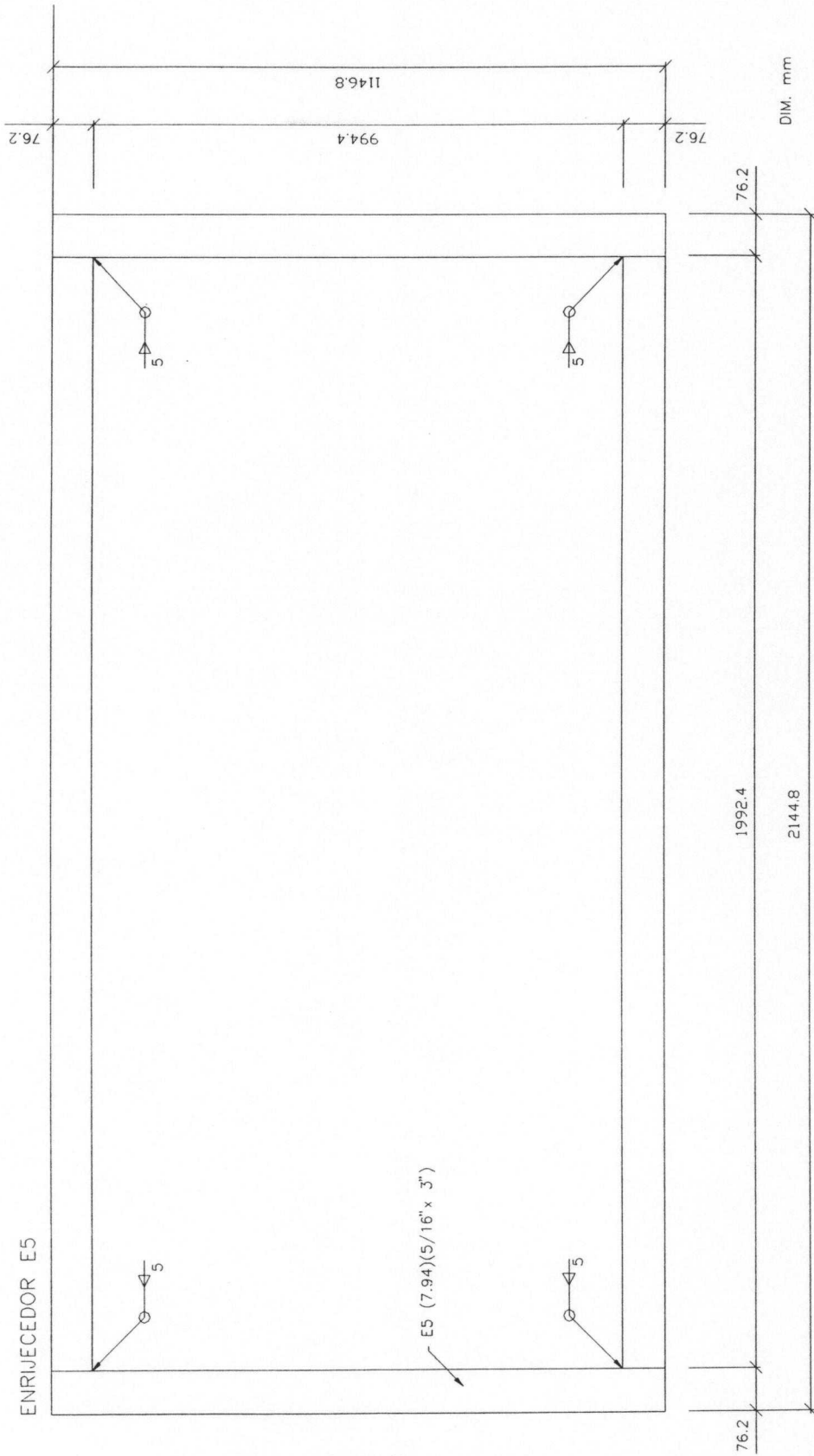


FIGURA B.14



SOLDAS DOS ENRIJECEDORES: (FACE DE MENOR AREA)

Corte AA

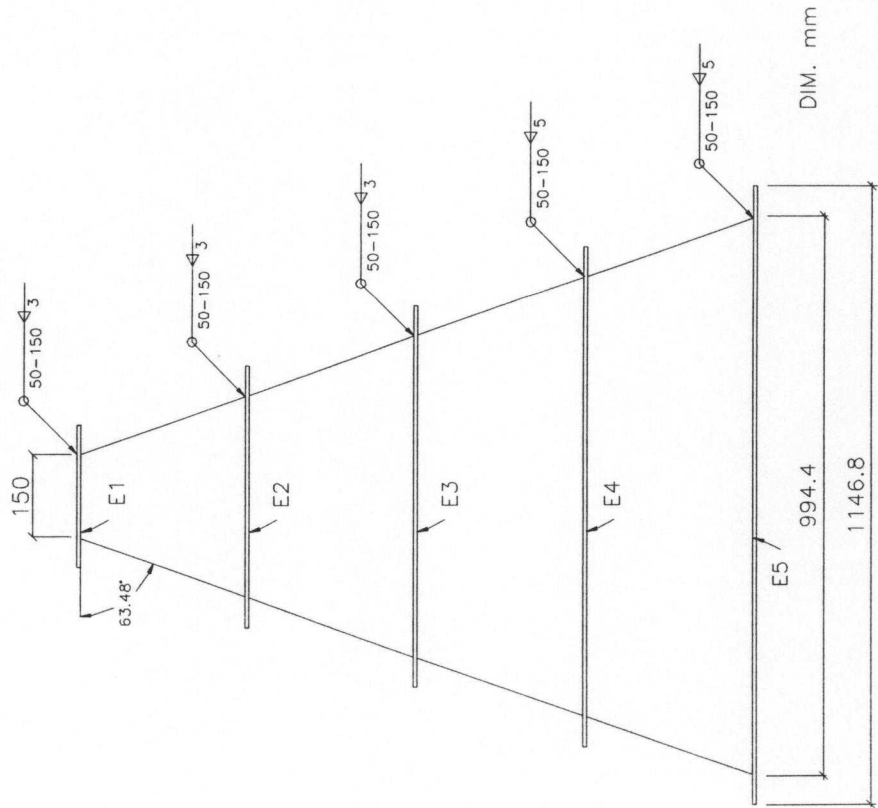


FIGURA B.15

SOLDAS DOS ENRIJECEDORES: (FACE DE MAIOR AREA)

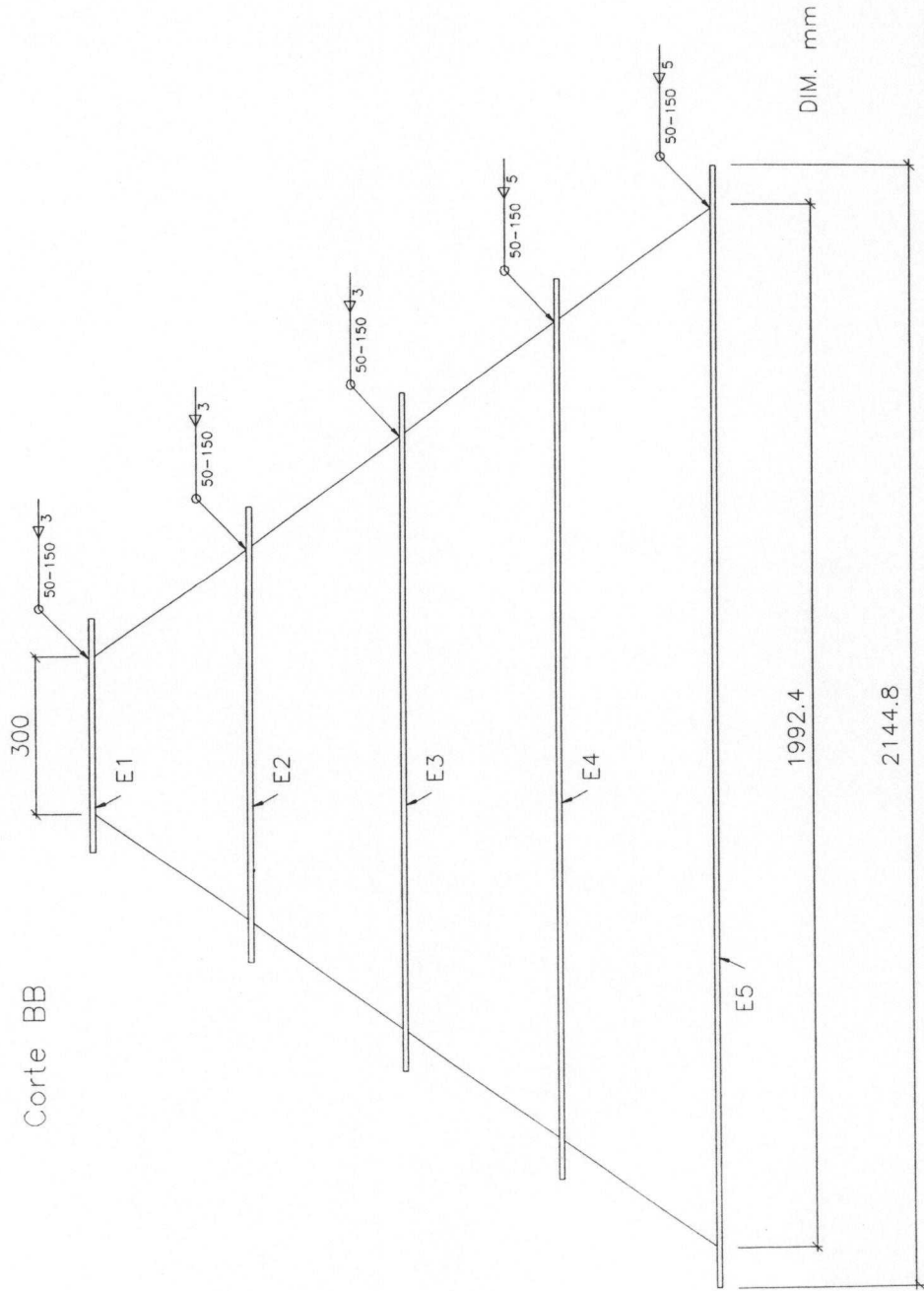


FIGURA B.16

### 3 - ENSAIOS DOS PROTÓTIPOS EM LABORATÓRIO

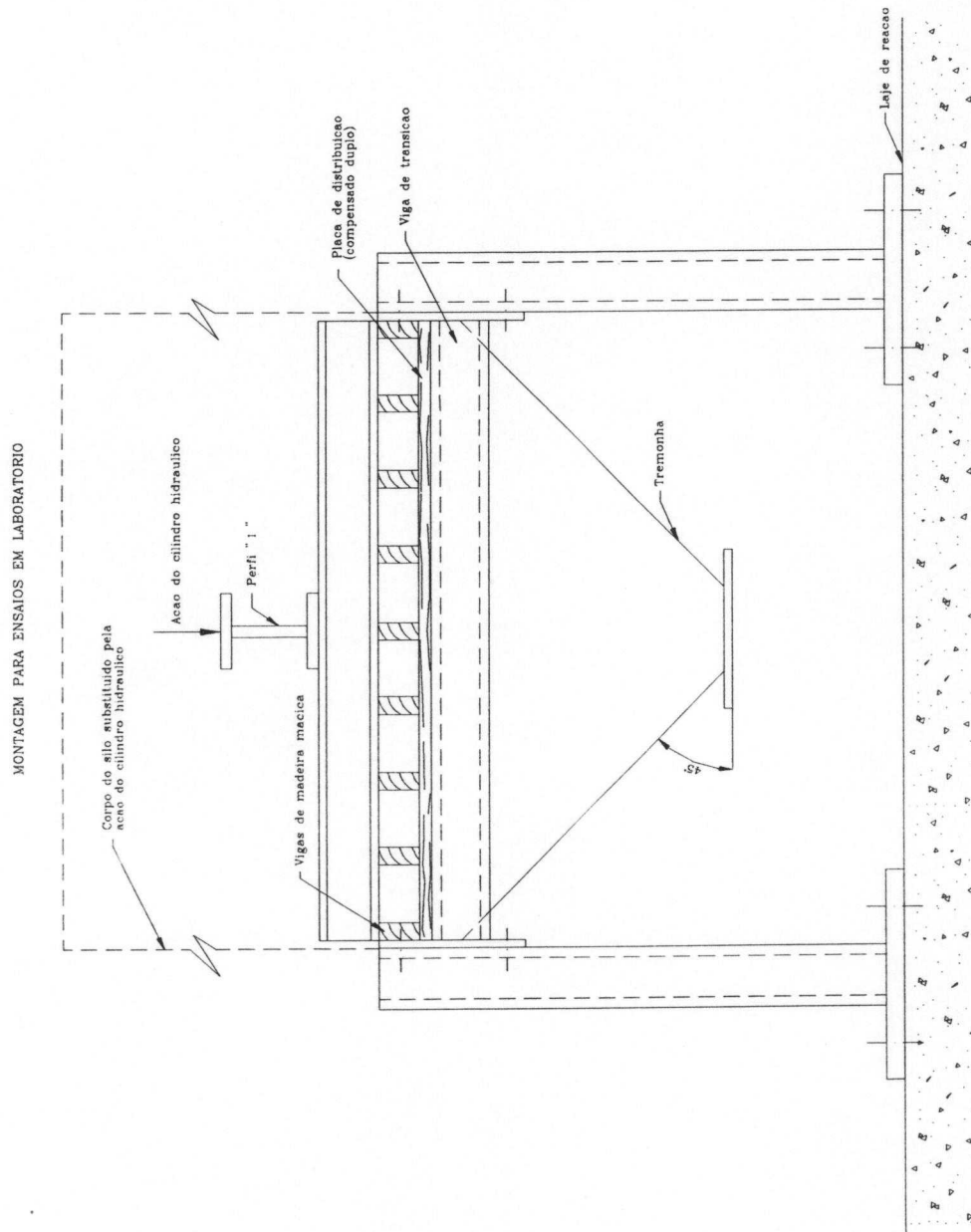


FIGURA B.17

## TREMONHA NAO ENRIJECIDA

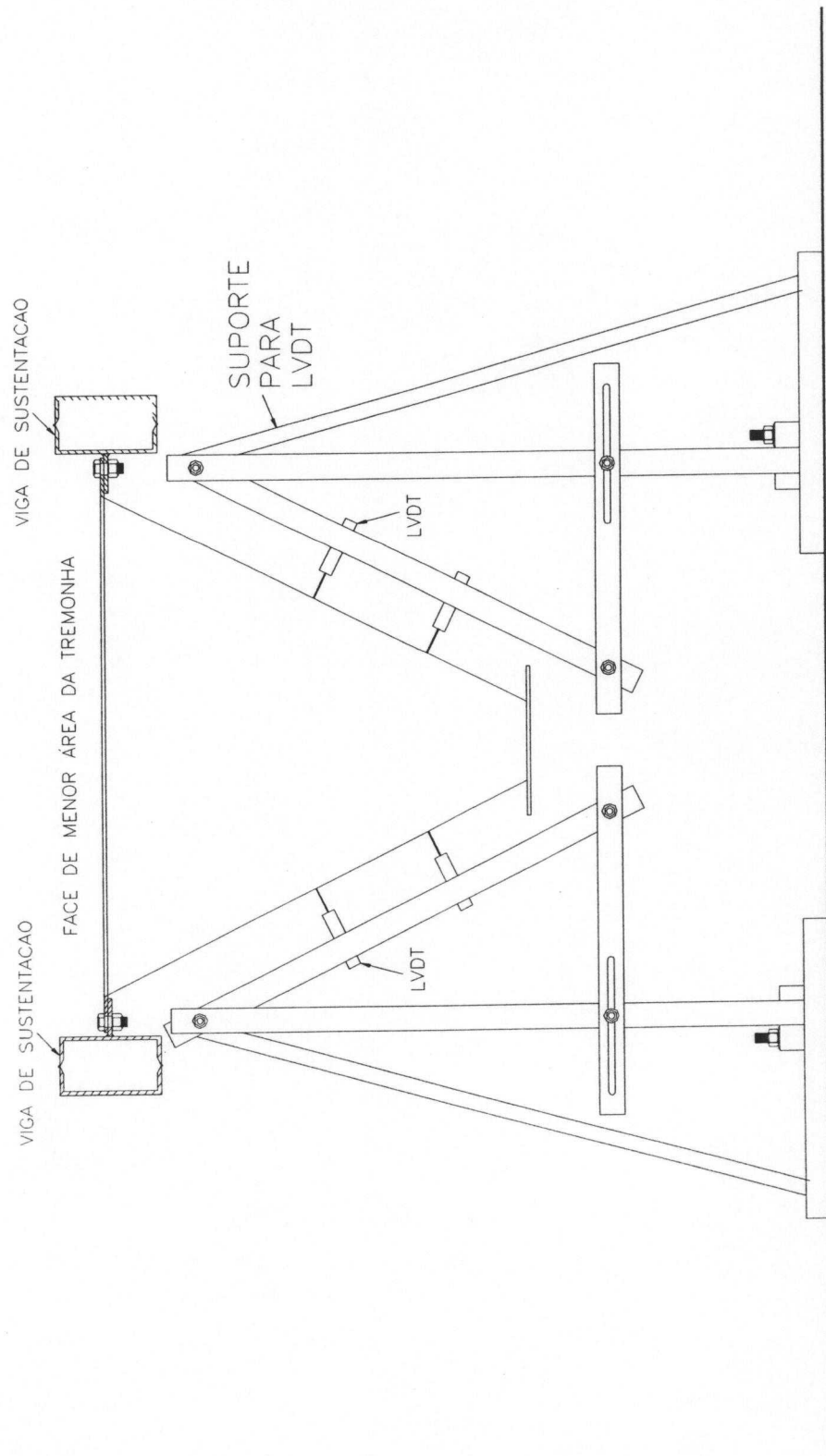


FIGURA B.18

TREMONHA NÃO ENRIJECIDA

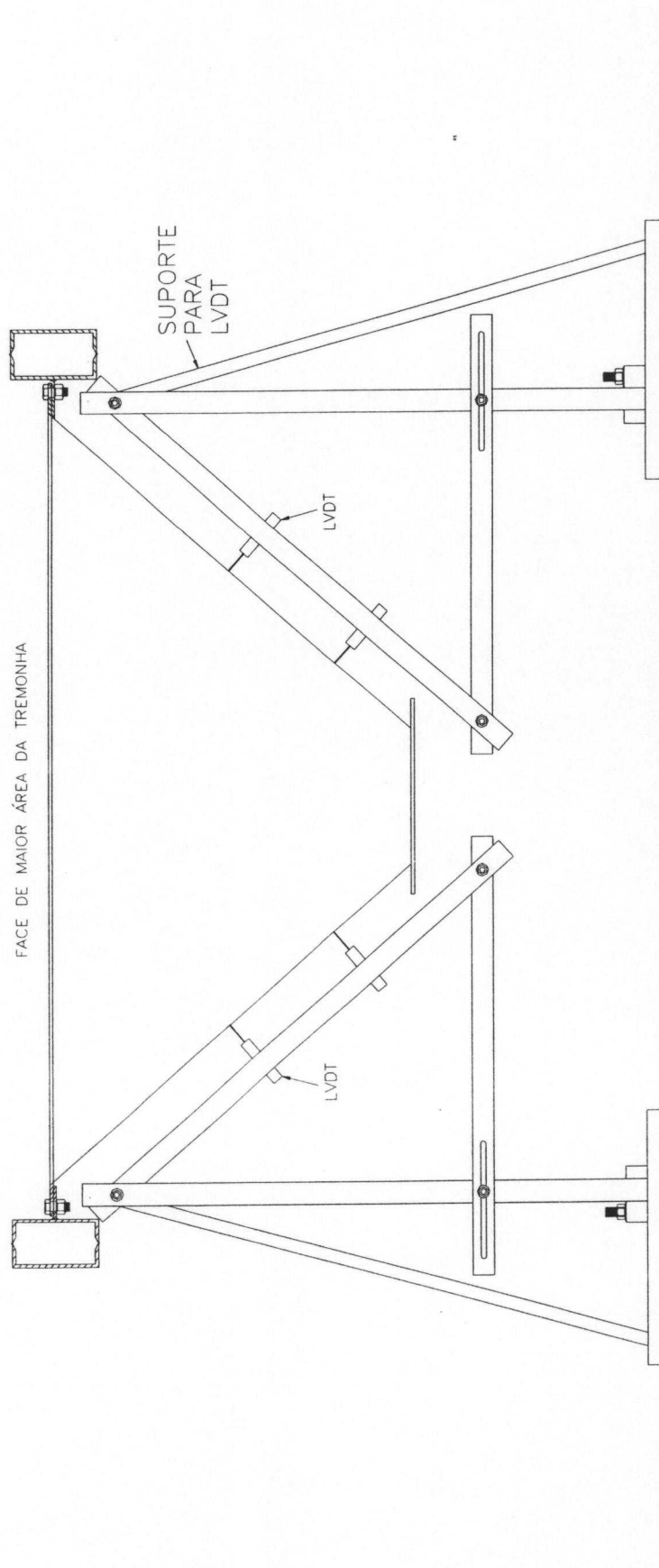


FIGURA B.19

TREMONHA ENRIJECIDA

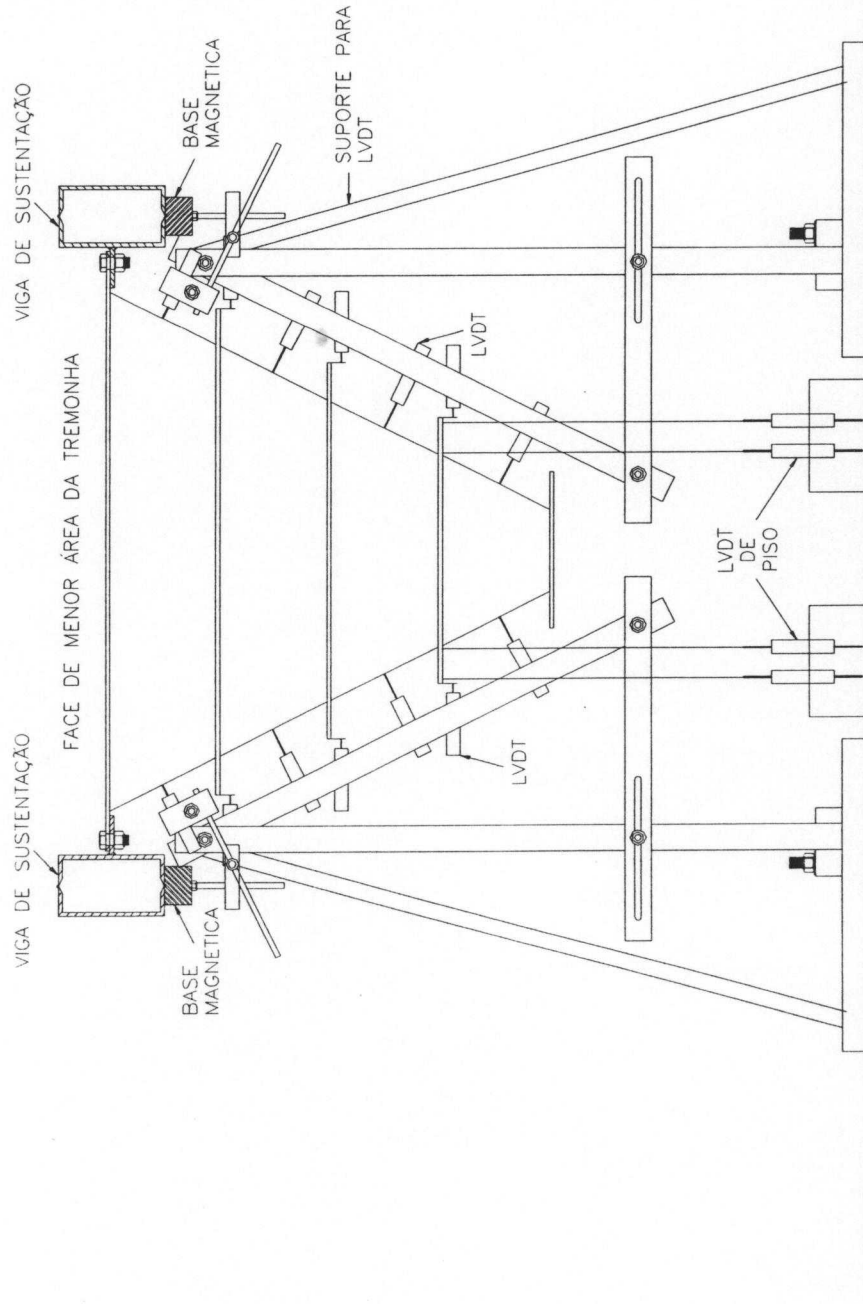


FIGURA B.20

TREMONHA ENRIJECIDA

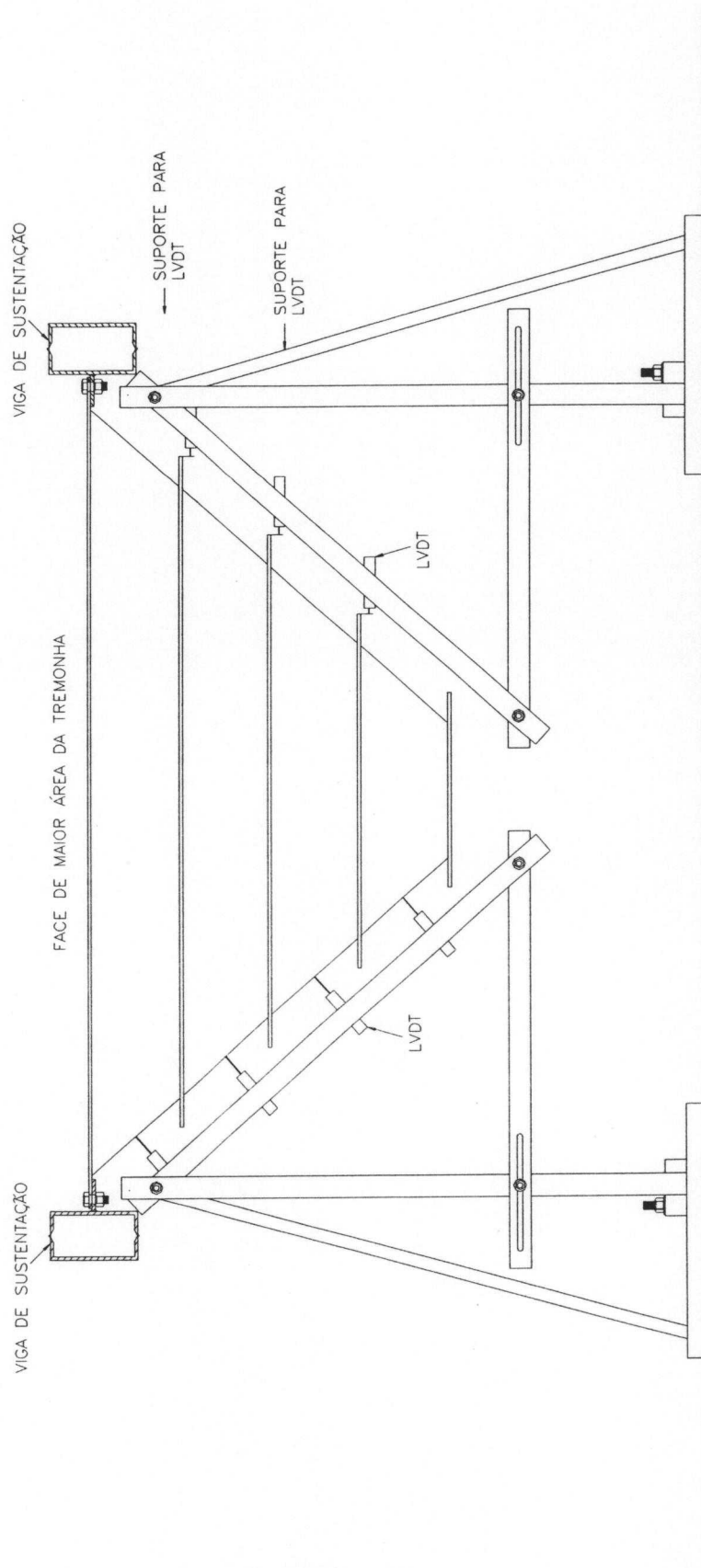
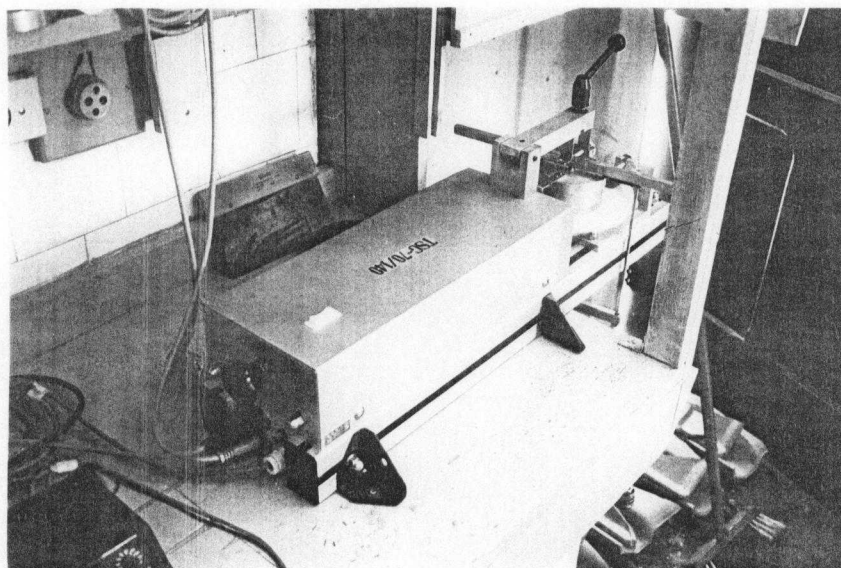


FIGURA B.21

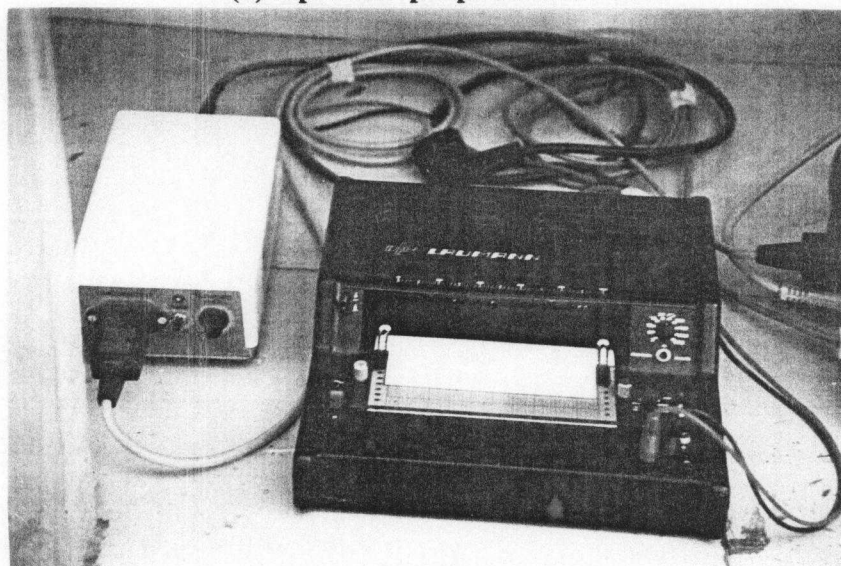
# ANEXO C

## FOTOS

### 1 - EQUIPAMENTOS DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO.



(a) Aparelho propriamente dito .

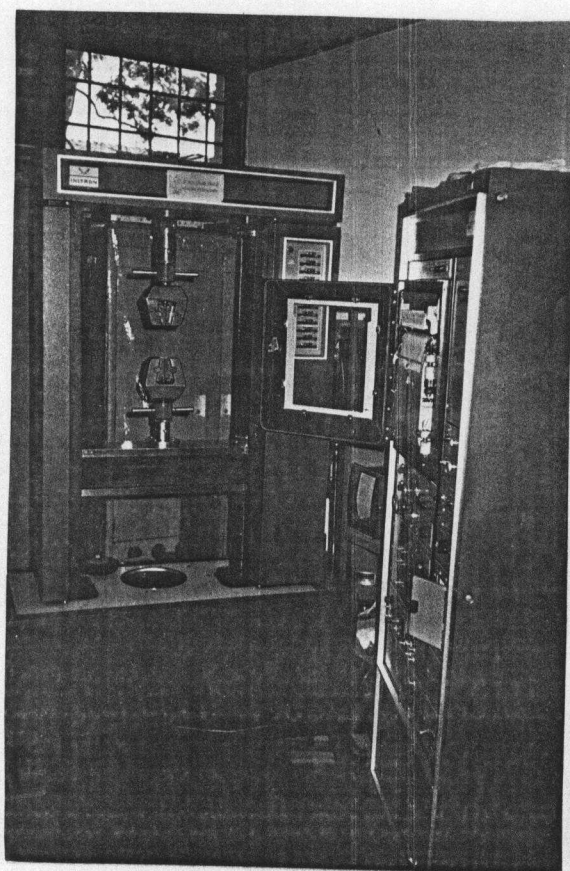


(b) Plotter

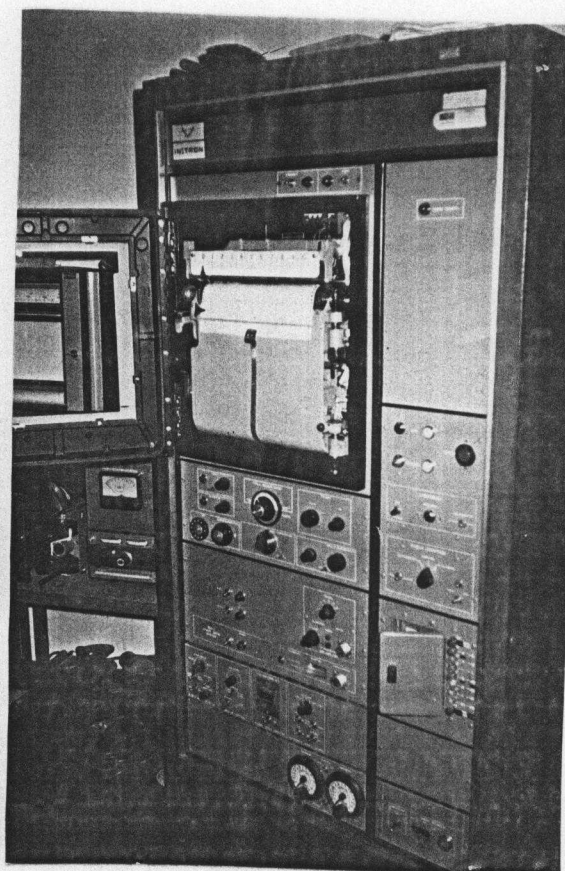
FIGURA C.1 - Aparelho de Jenike TSG 70-140.



## 2 - EQUIPAMENTOS PARA CARACTERIZAÇÃO E CORPOS DE PROVA DO MATERIAL ESTRUTURAL.

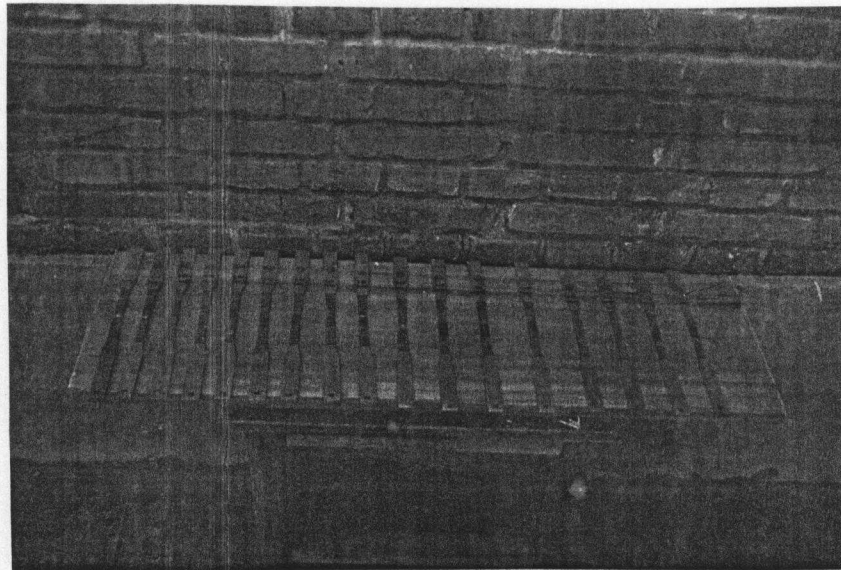


(a)

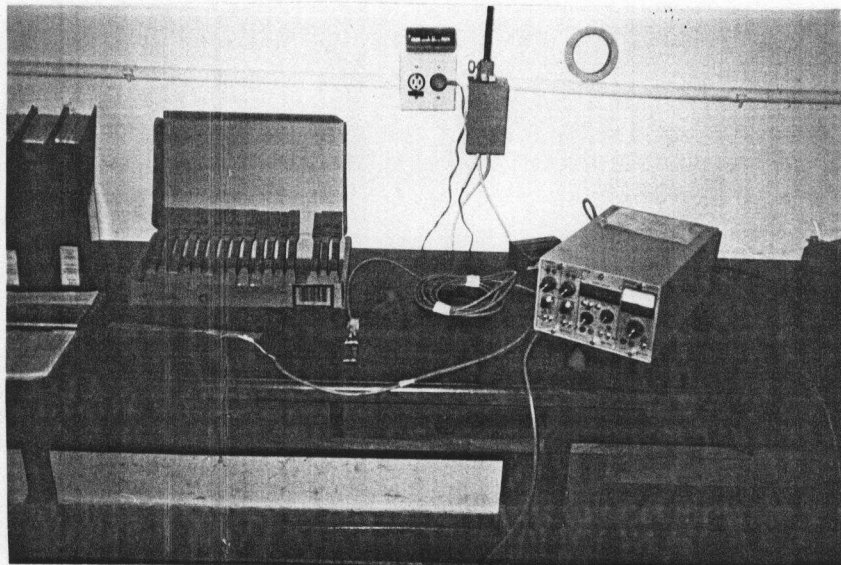


(b)

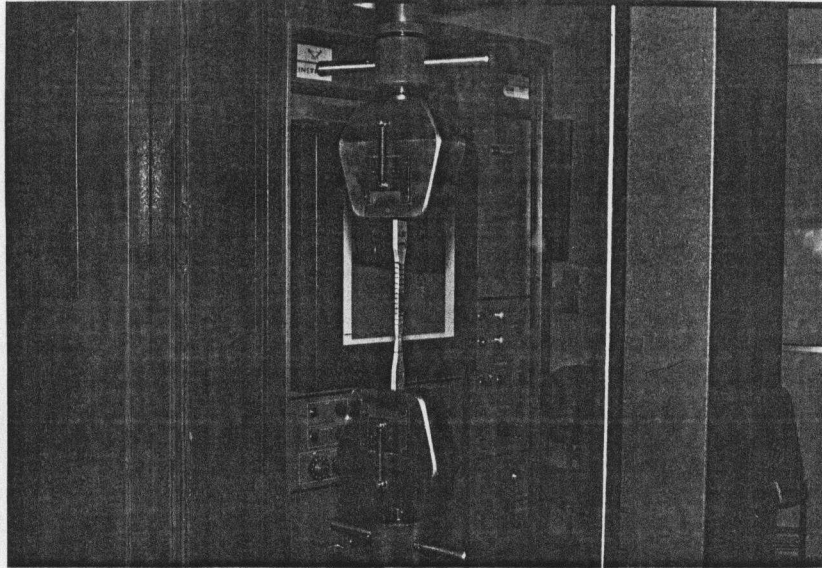
**FIGURA C.2 - Máquina de ensaio à tração INSTRON; a) Cabeçotes com garras, b) Painel de controle e Plotter.**



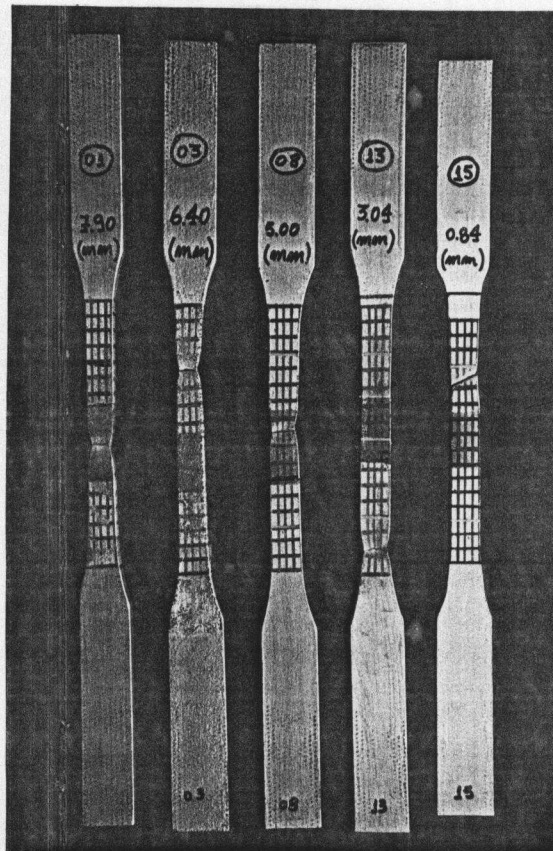
**FIGURA C.3 - Conjunto de corpos de prova**



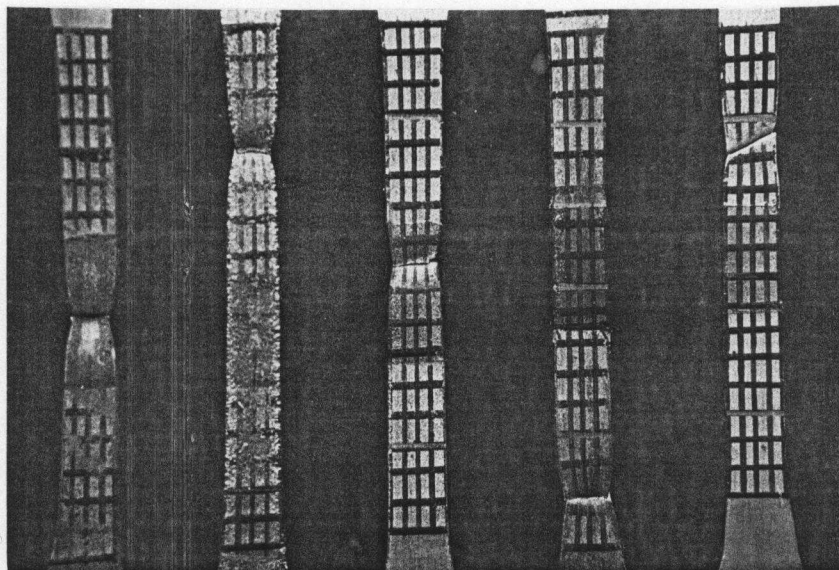
**FIGURA C.4 - Corpos de prova com extensômetros eletrônicos (Ativo e Compensador de temperatura)**



**FIGURA C.5 - Ensaio**

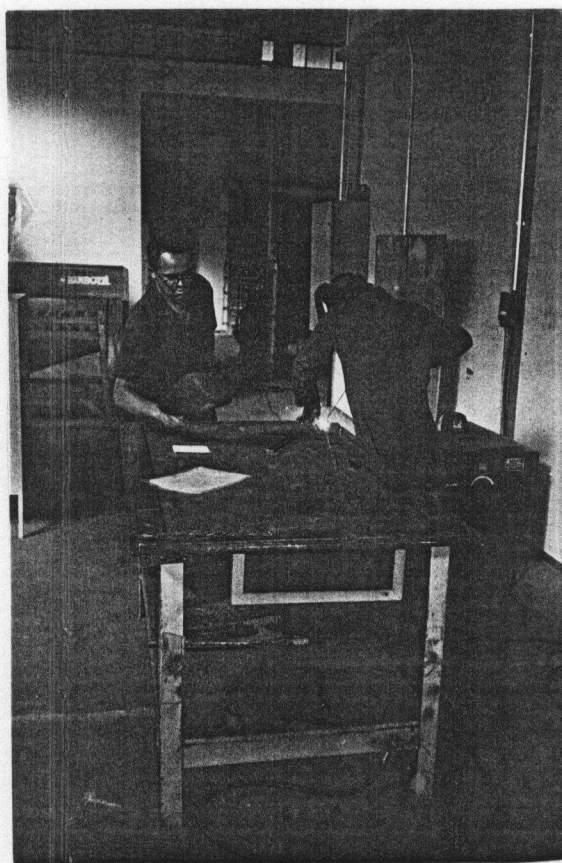


**FIGURA C.6 - Corpos de prova ensaiados mostrando-se as linhas pretas da medida tomada como padrão para a determinação dos alongamentos.**

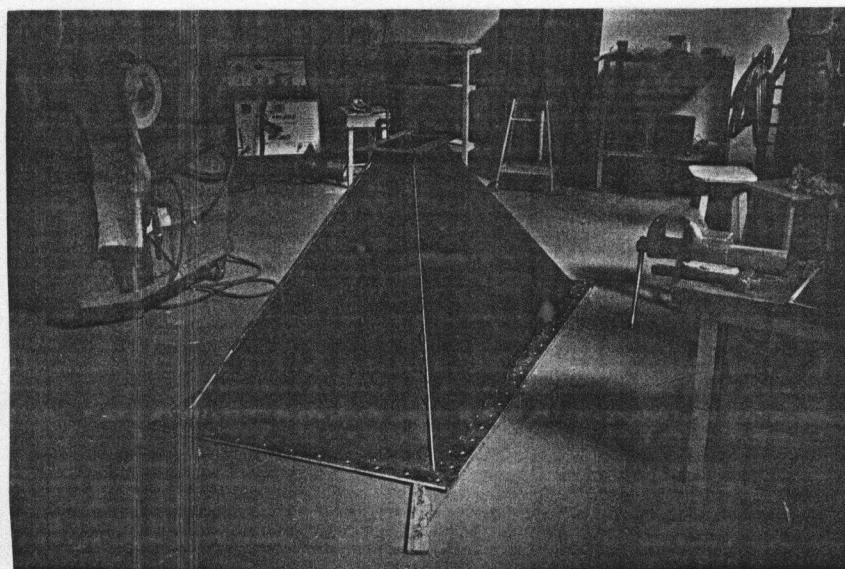


**FIGURA C.7 - Posições de ruptura do material dentro da medida padrão e Estricção.**

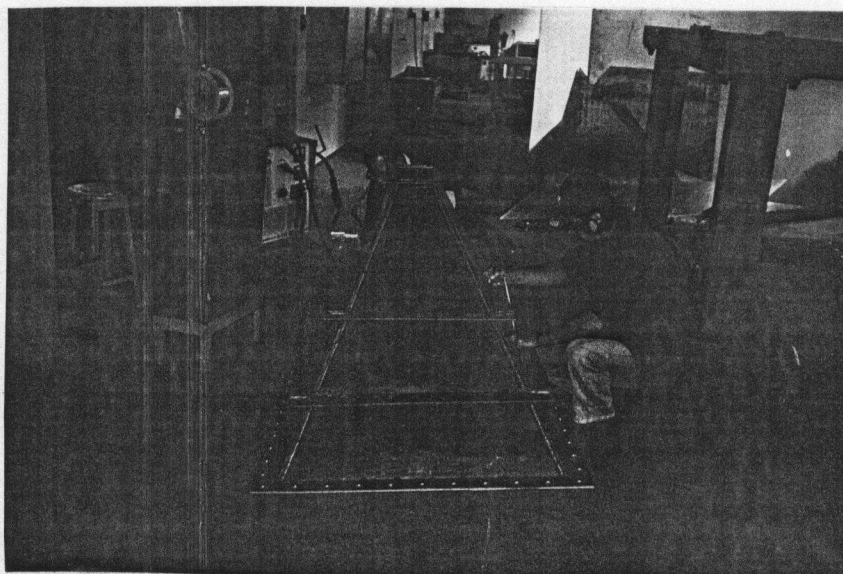
### 3 - FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO



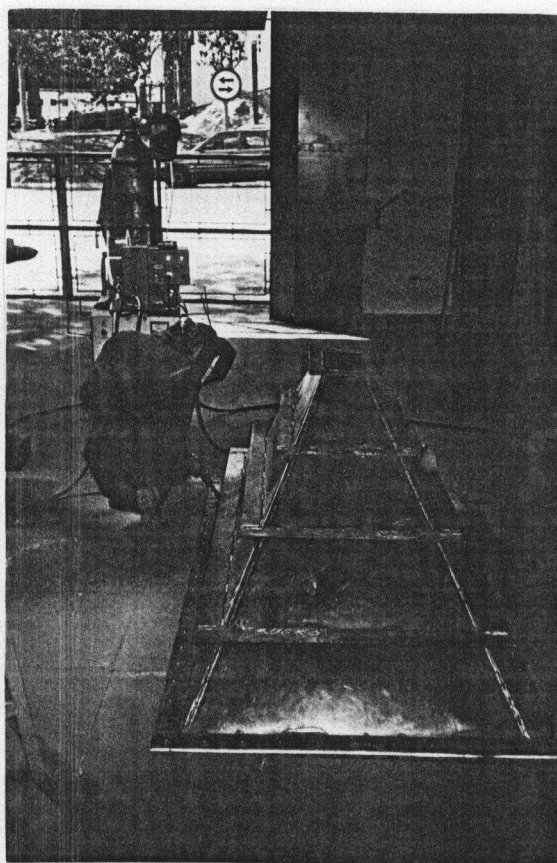
**FIGURA C.8 - Fabricação de enrijecedores**



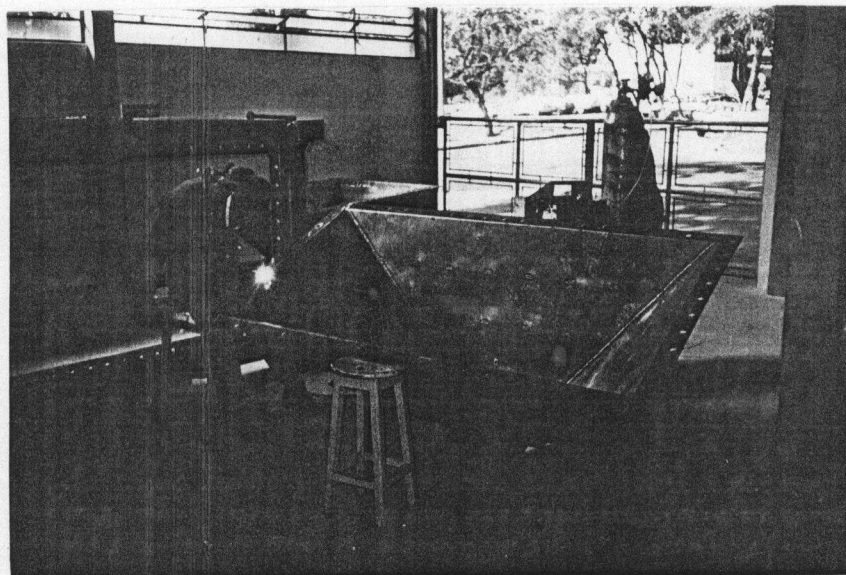
**FIGURA C.9 - Pré-montagem de chapas**



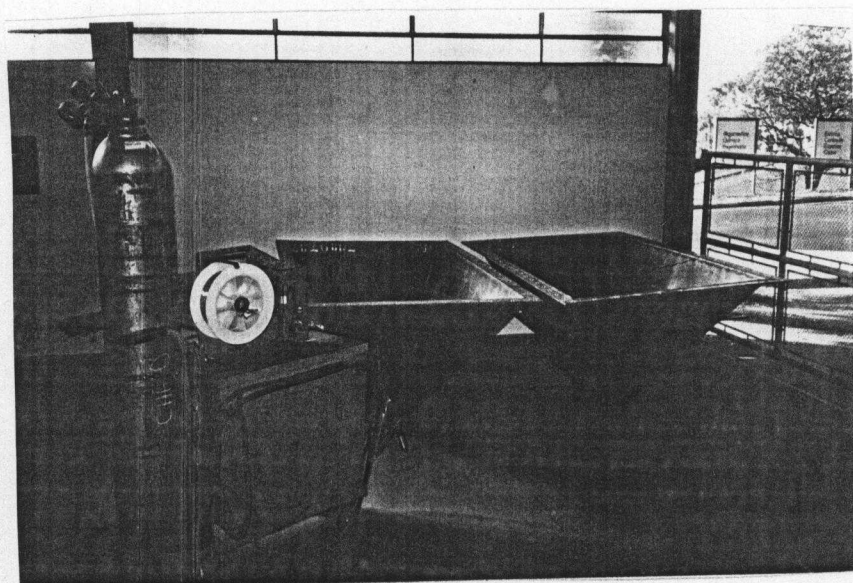
**FIGURA C.10 - Pré-montagem de enrijecedores**



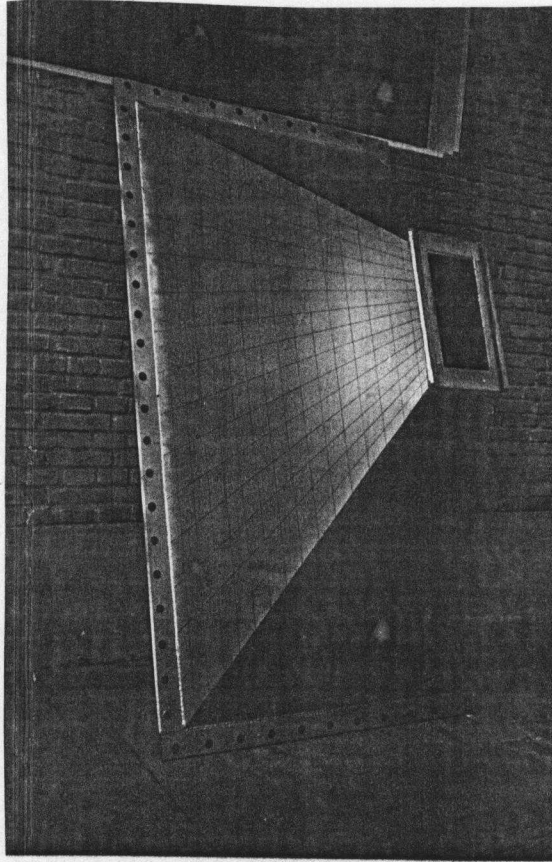
**FIGURA C.11 - Soldagem de enrijecedores**



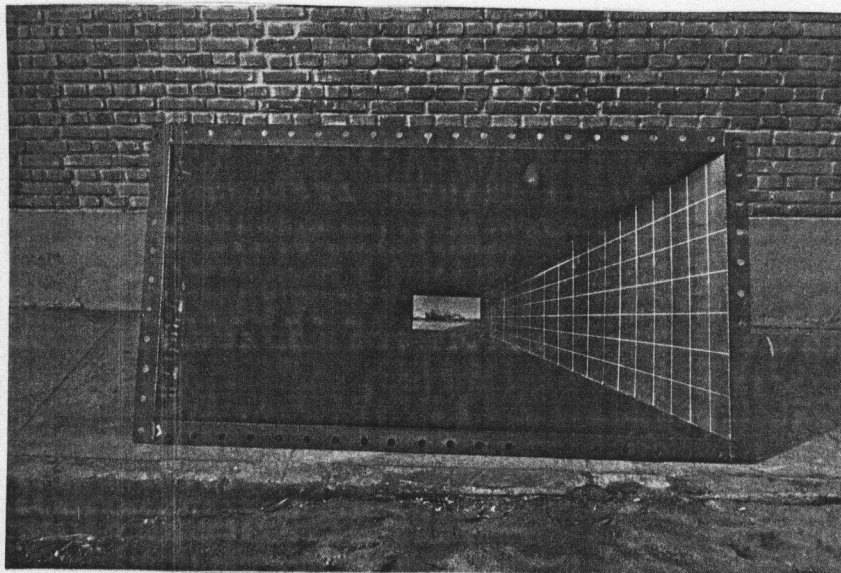
**FIGURA C.12 - Soldagem de enrijecedor de transição.**



**FIGURA C.13 - Tremonhas prontas e equipamento de soldagem MIG.**

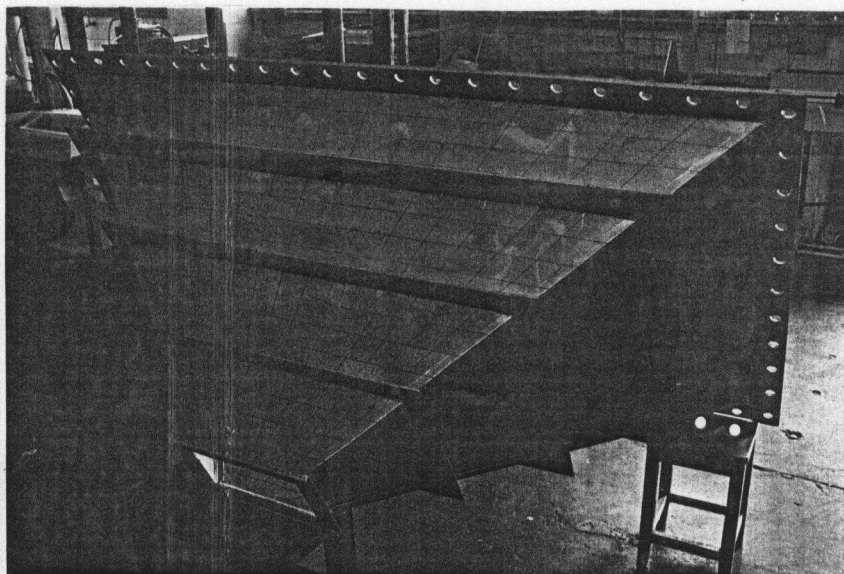
**4 - ENSAIOS DOS PROTÓTIPOS**

**FIGURA C.14 - Definição física das malhas de elementos finitos na tremonha não enrijecida.**

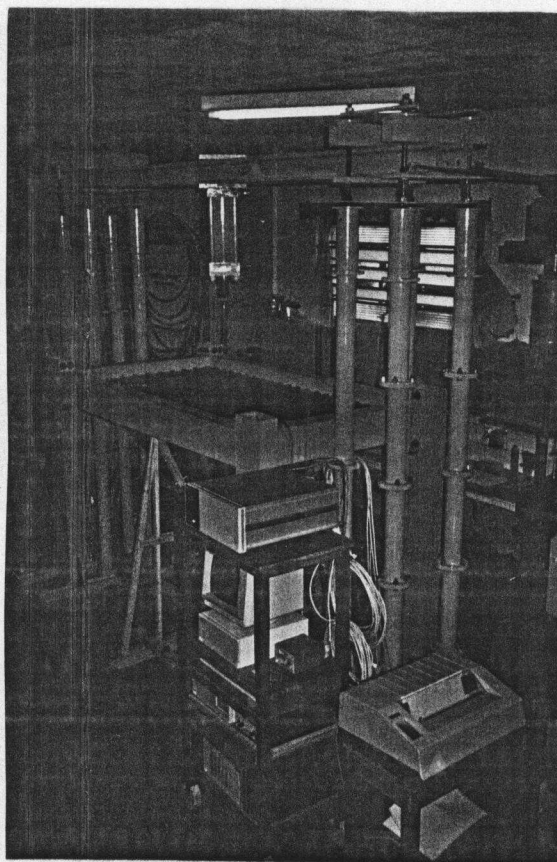


**FIGURA C.15 - Definição física das malhas de elementos finitos internamente à tremonha não enrijecida.**

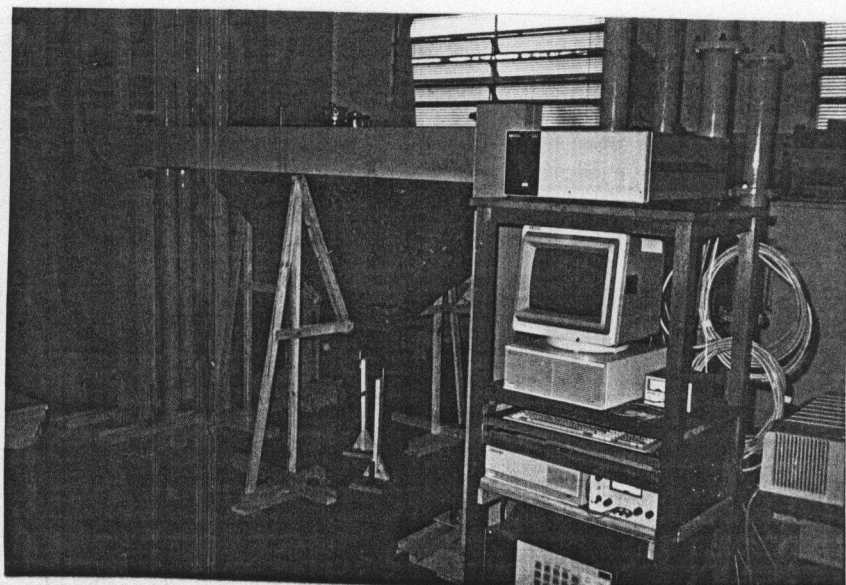




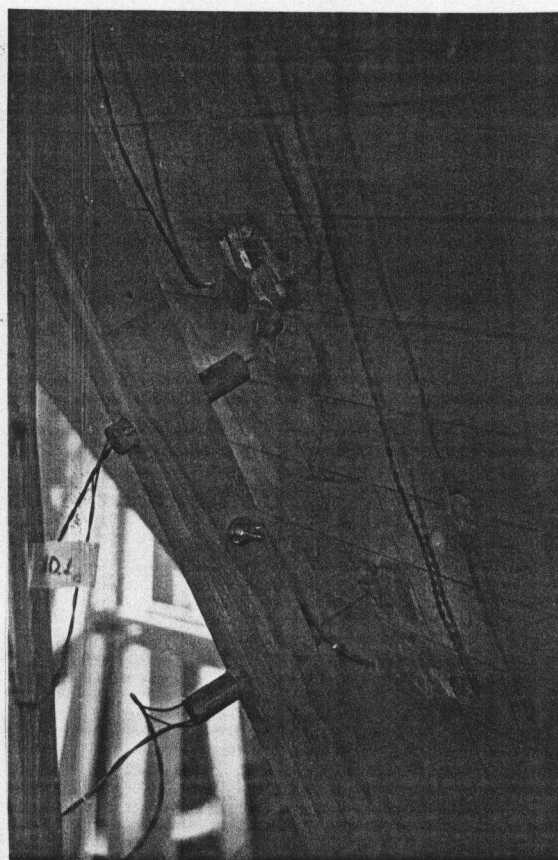
**FIGURA C.16 - Definição física das malhas de elementos finitos na tremonha enrijecida.**



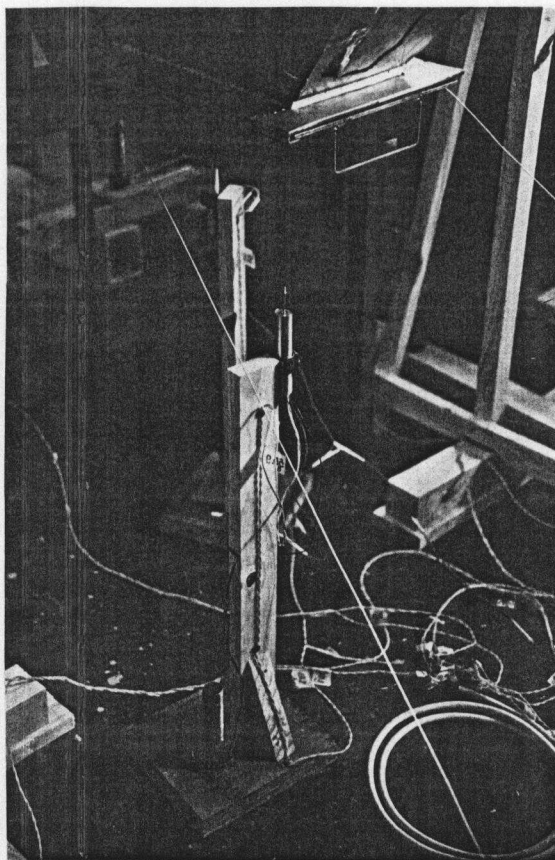
**FIGURA C.17 - Montagem das estruturas de sustentação e de reação.**



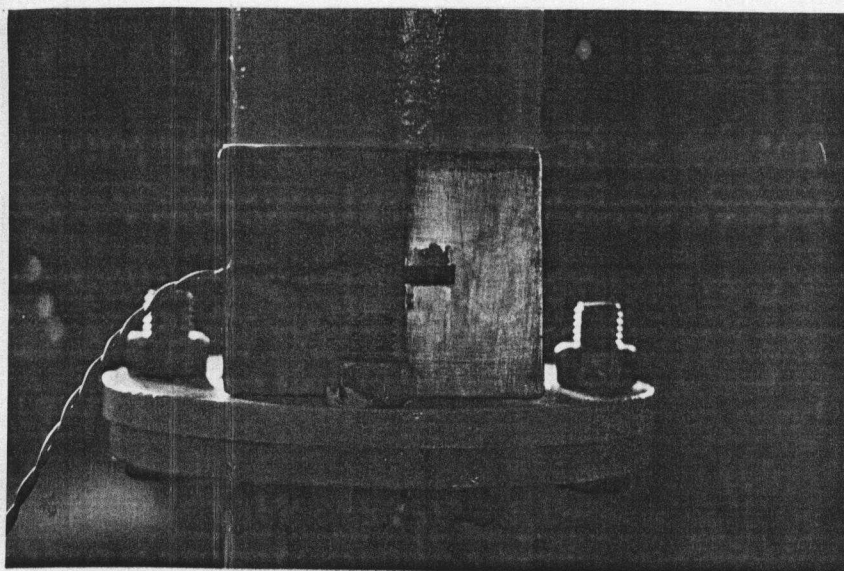
**FIGURA C.18 - Instalações de Sistema de Aquisição de Dados (SAD) e dispositivos de medidas de deformações e deslocamentos.**



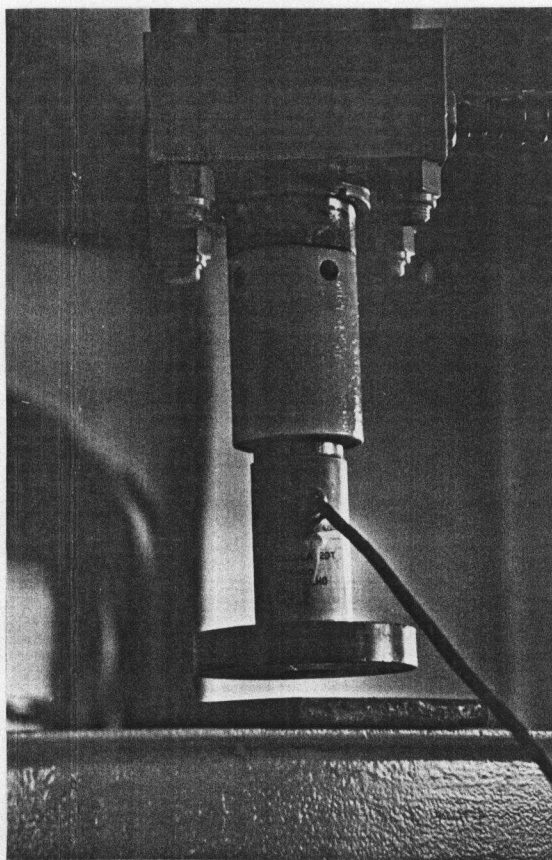
**FIGURA C.19 - Posicionamentos e quantidades de LVDTs utilizados nas chapas da tremonha não enrijecida.**



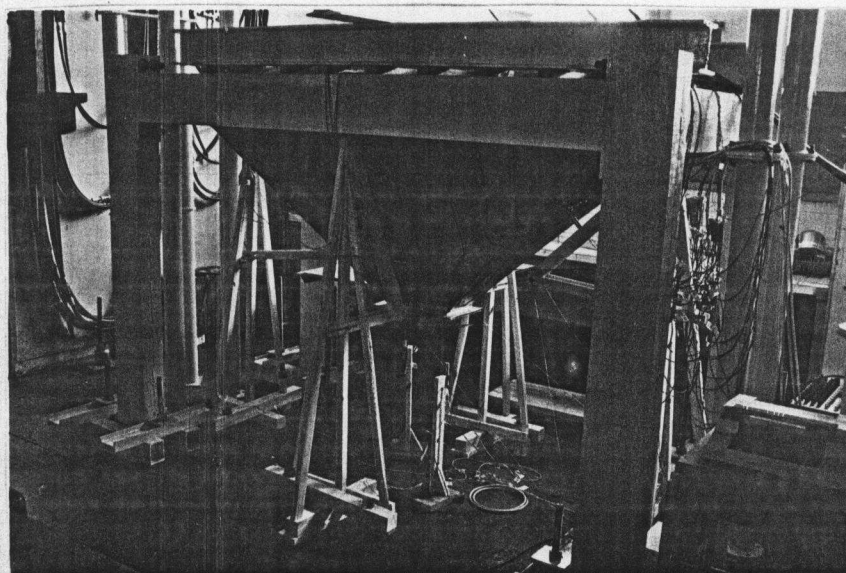
**FIGURA C.20 - Posicionamentos de LVDTs nas extremidades da boca de descarga.**



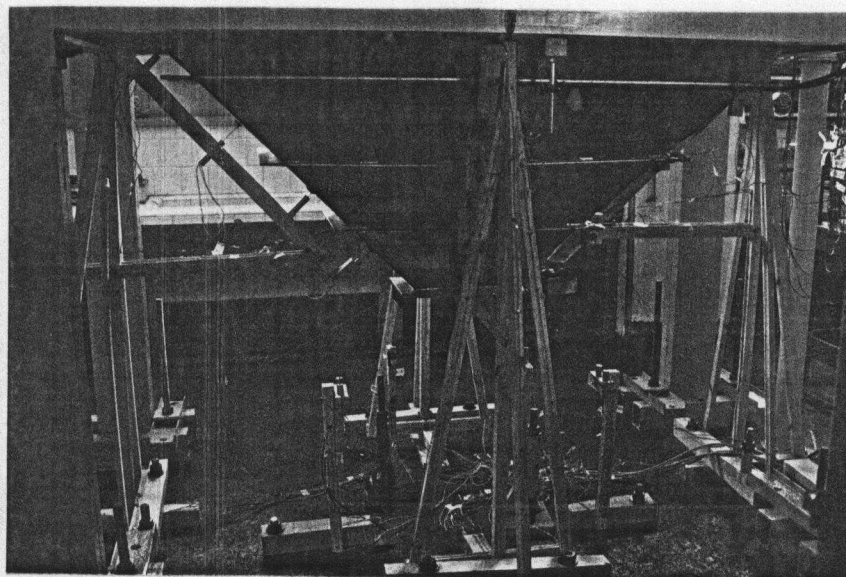
**FIGURA C.21 - Extensômetro compensador de temperatura.**



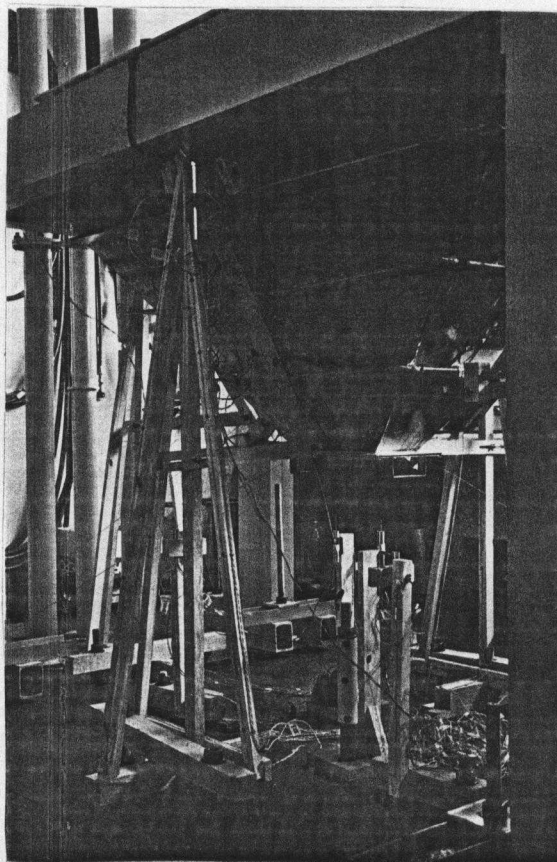
**FIGURA C.22 - Célula de carga para 20 toneladas-força (200 kN).**



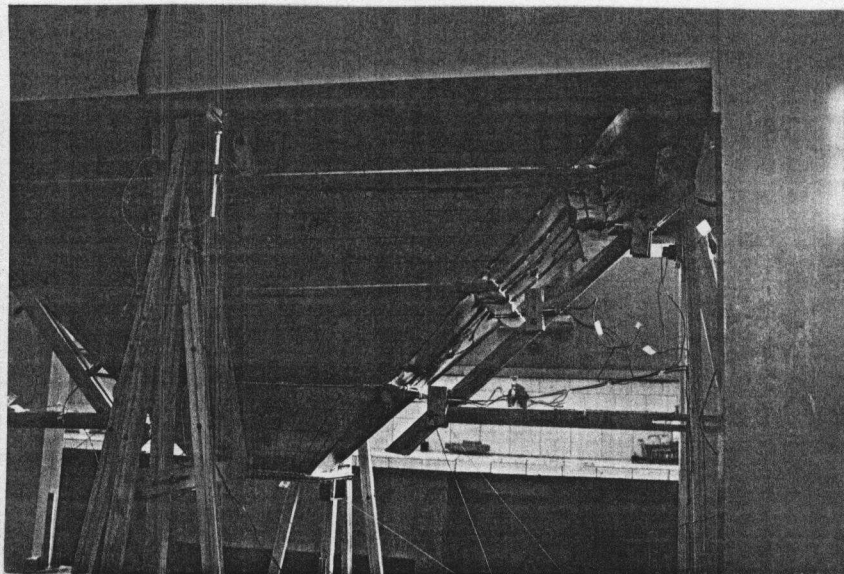
**FIGURA C.23 - Início de aplicações das cargas de transição para a tremonha não enrijecida.**



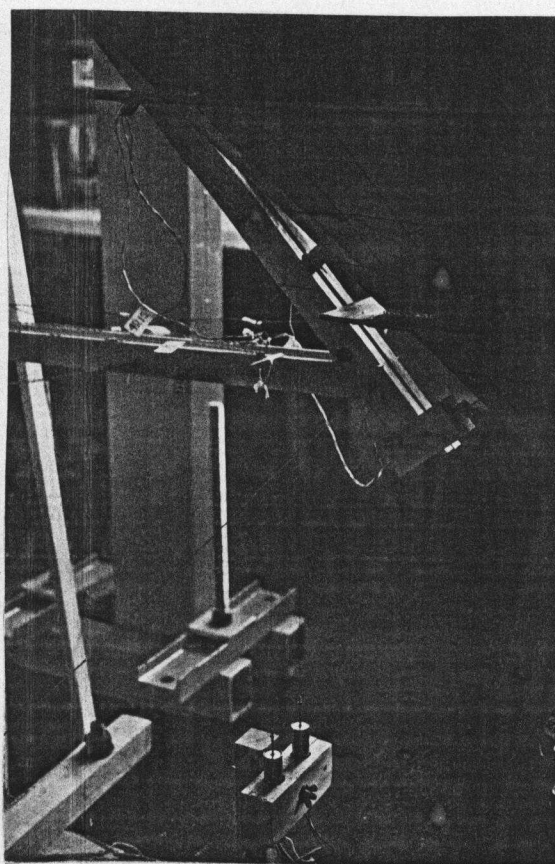
**FIGURA C.24 - Disposições de LVDTs na face externa 4 esquerda.**



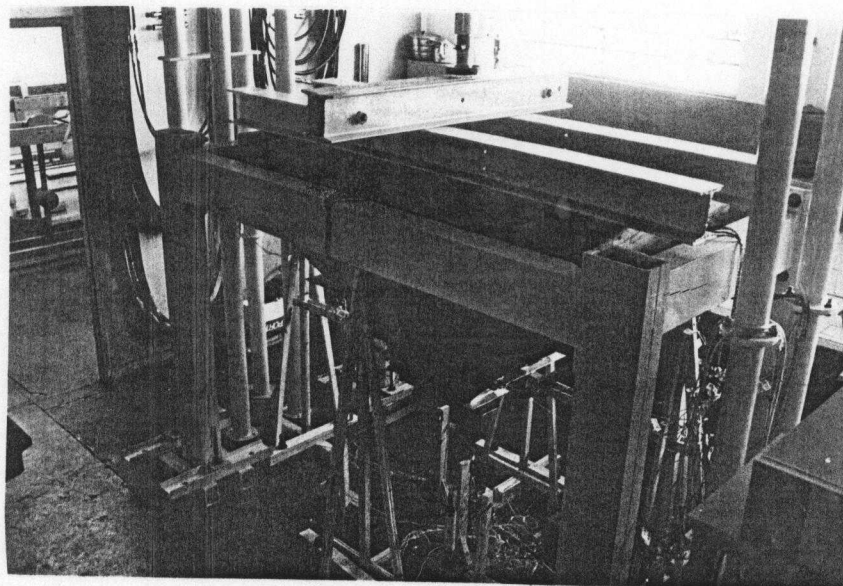
**FIGURA C.25 - Disposições de LVDTs nas chapas e enrijecedores da face 1.**



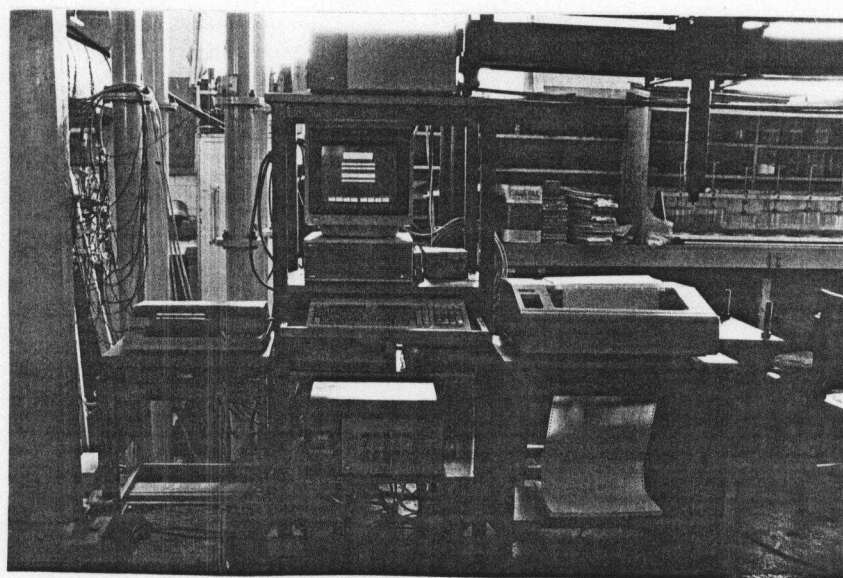
**FIGURA C.26 - Disposições de LVDTs nos enrijecedores da face 2.**



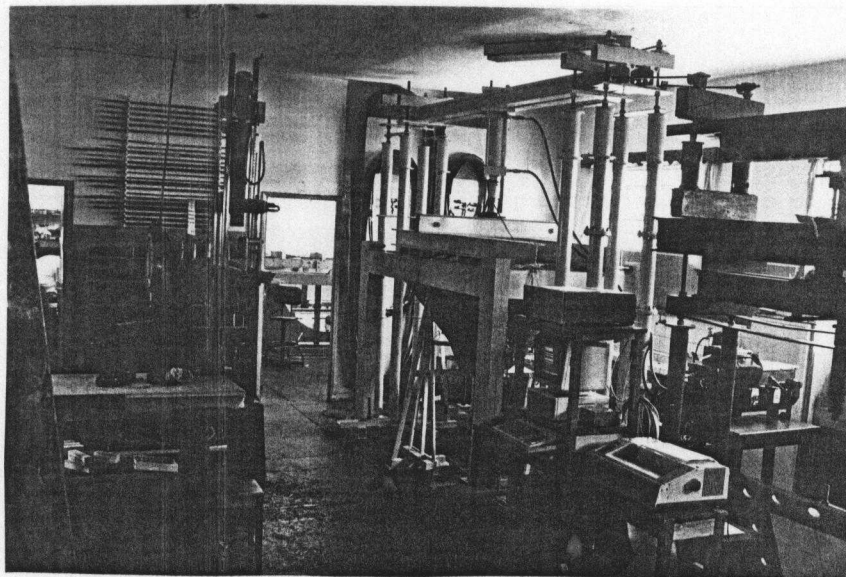
**FIGURA C.27 - LVDTs posicionados no enrijecedor E4 para medir rotações.**



**FIGURA C.28 - Início de aplicação das cargas de transição na tremonha enrijecida.**



**FIGURA C.29 - Sistema de Aquisição de dados (SAD).**



**FIGURA C.30 - Vista geral dos ensaios e laboratório (LaMEM/EESC/USP).**



## **ANEXO D**

### **PROGRAMA**

#### **“CÁLCULO DE TREMONHAS PIRAMIDAIS” (CTP)**

#### **VISUAL BASIC 3 PARA WINDOWS**

O arquivo executável do programa CTP poderá ser processado mesmo que o VISUAL BASIC não esteja instalado no computador. No entanto, é necessário de um arquivo adicional chamado VBRUN300.DLL. Para possibilitar o processamento do programa compilado pelo VISUAL BASIC é preciso fazer uma cópia deste arquivo.

SILO DE AÇO: TREMONHA PIRAMIDAL (1)

**GEOMETRIA: primeira etapa**

<p><b>SEÇÃO NA TRANSIÇÃO</b></p> <p>LARGURA = <input type="text"/></p> <p>COMPRIMENTO = <input type="text"/></p>	<p><b>SEÇÃO NA SAÍDA</b></p> <p>LARGURA = <input type="text"/></p> <p>COMPRIMENTO = <input type="text"/></p>	<p><b>METADE DO ÂNGULO DO VÉRTICE PARA UM CORTE LONGITUDINAL</b></p> <p>GRAUS = <input type="text"/></p>
--	--	--

ALTURA DA TREMONHA

METADE DO ÂNGULO DO VÉRTICE PARA UM CORTE TRANSVERSAL  GRAUS

**CALCULAR**

**IMPRIMIR**      **GEOMETRIA: segunda etapa**      **SAIR**

FIGURA D.1 - Tela 1 para CTP

### CALCULAR

Sub Command3D1\_Click ()

Dim A1 As Single

Dim A2 As Single

Dim B1 As Single

Dim B2 As Single

Dim MAV As Single

Dim PI As Single

Dim H As Single

Dim MAVT As Single

Dim MAVTG As Single

A1 = Val(TEXT1.Text)

B1 = Val(TEXT2.Text)

A2 = Val(TEXT3.Text)

B2 = Val(TEXT4.Text)

```
MAV = Val(TEXT5.Text)
PI = 4 * Atn(1)
H = (Tan(MAV * PI / 180)) * (B1 - B2) / 2
TEXT6.Text = Str$(H)
MAVT = Atn((A1 - A2) / 2 / H)
MAVTG = MAVT * 180 / PI
TEXT7.Text = Str$(MAVTG)
End Sub
```

### **IMPRIMIR**

```
Sub Command3D2_Click ()
Dim A1 As Single
Dim A2 As Single
Dim B1 As Single
Dim B2 As Single
Dim MAV As Single
Dim H As Single
Dim MAVTG As Single
A1 = Val(TEXT1.Text)
B1 = Val(TEXT2.Text)
A2 = Val(TEXT3.Text)
B2 = Val(TEXT4.Text)
MAV = Val(TEXT5.Text)
H = Val(TEXT6.Text)
MAVTG = Val(TEXT7.Text)
printer.Print Tab(15); "SILO DE AÇO: TREMONHA PIRAMIDAL (1)"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(18); "GEOMETRIA: primeira etapa"
printer.Print ""
printer.Print ""
```

```

printer.Print Tab(5); "SEÇÃO NA TRANSIÇÃO"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Largura [L] = "; A1
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Comprimento [L] = "; B1
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "SEÇÃO NA SAÍDA"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Largura [L] = "; A2
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Comprimento [L] = "; B2
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Metade do ângulo do vértice para um corte longitudinal em graus [1] =
"; MAV
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Altura da Tremonha [L] = "; H
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Metade Do Ângulo do Vértice para um corte transversal em graus [1] =
"; MAVTG
printer.Print ""
printer.EndDoc
End Sub

```

### **GEOMETRIA: segunda etapa**

```

Sub Command3D3_Click ()
FORM2.Show
End Sub

```

**SAIR**

Sub Command3D4\_Click ()

FI = MsgBox("PARA SAIR CLIQUE 'OK'", 33, "ATENÇÃO")

If FI = 1 Then

End

End If

End Sub

SILO DE AÇO: TREMONHA PIRAMIDAL (2)

GEOMETRIA: segunda etapa

DIMENSÃO DAS ARESTAS INCLINADAS DA TREMONHA = BORDAS DAS CHAPAS

ALTURA DA CHAPA

FACE DE ÁREA MENOR

FACE DE ÁREA MAIOR

CALCULAR

ÂNGULO AGUDO DO TRAPÉZIO DE MENOR ÁREA (GRAUS)

ÂNGULO AGUDO DO TRAPÉZIO DE MAIOR ÁREA (GRAUS)

CALCULAR

IMPRIMIR

GEOMETRIA: terceira etapa

RETORNAR

FIGURA D.2 - Tela 2 para CTP

**CALCULAR**

Sub Command3D1\_Click ()

Dim A1 As Single

Dim A2 As Single

Dim B1 As Single

Dim B2 As Single

Dim MAV As Single

```

Dim PI As Single
Dim H As Single
Dim MAVT As Single
Dim MAVTG As Single
Dim AI As Single
Dim N1 As Single
Dim N2 As Single
A1 = Val(form1.Text1)
B1 = Val(form1.Text2)
A2 = Val(form1.Text3)
B2 = Val(form1.Text4)
MAV = Val(form1.Text5)
PI = 4 * Atn(1)
H = (Tan(MAV * PI / 180)) * (B1 - B2) / 2
AI = Sqr((B1 / 2 - B2 / 2) ^ 2 + (A1 / 2 - A2 / 2) ^ 2 + H ^ 2)
Text1.Text = Str$(AI)
N1 = Sqr(AI ^ 2 - (A1 / 2 - A2 / 2) ^ 2)
N2 = Sqr(AI ^ 2 - (B1 / 2 - B2 / 2) ^ 2)
Text2.Text = Str$(N1)
Text3.Text = Str$(N2)
End Sub

```

### **CALCULAR**

```

Sub Command3D2_Click ()
Dim AN1G As Single
Dim AN2G As Single
Dim A1 As Single
Dim A2 As Single
Dim B1 As Single
Dim B2 As Single
Dim PI As Single

```

```

Dim N1 As Single
Dim N2 As Single
A1 = Val(form1.Text1)
B1 = Val(form1.Text2)
A2 = Val(form1.Text3)
B2 = Val(form1.Text4)
N1 = Val(Text2.Text)
N2 = Val(Text3.Text)
PI = 4 * Atn(1)
AN1G = (180 / PI) * Atn(2 * N1 / (A1 - A2))
AN2G = (180 / PI) * Atn(2 * N2 / (B1 - B2))
Text4.Text = Str$(AN1G)
Text5.Text = Str$(AN2G)
End Sub

```

### **IMPRIMIR**

```

Sub Command3D3_Click ()
Dim AN1G As Single
Dim AN2G As Single
Dim AI As Single
Dim N1 As Single
Dim N2 As Single
AI = Val(Text1.Text)
N1 = Val(Text2.Text)
N2 = Val(Text3.Text)
AN1G = Val(Text4.Text)
AN2G = Val(Text5.Text)
printer.Print Tab(15); "SILO DE AÇO: TREMONHA PIRAMIDAL (2)"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(18); "GEOMETRIA: Segunda etapa"

```

```
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Dimensão das arestas inclinadas da tremonha = Bordas das chapas [L] =
"; AI
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Altura da chapa trapezoidal para a face de menor área [L] = "; N1
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Altura da chapa trapezoidal para a face de maior área [L] = "; N2
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ângulo agudo do trapézio de menor área em graus [1] = "; AN1G
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ângulo agudo do trapézio de maior área em graus [1] = "; AN2G
printer.Print ""
printer.EndDoc
End Sub
```

#### **GEOMETRIA: terceira etapa**

```
Sub Command3D4_Click ()
FORM3.Show
End Sub
```

#### **RETORNAR**

```
Sub Command3D5_Click ()
form1.Show
End Sub
```



SILO METÁLICO: TREMONHA PIRAMIDAL (3)

GEOMETRIA: terceira etapa

<b>NÚMERO ESTIMADO DE ENRIJECEDORES</b>	<b>COMPRIMENTO DE CONTORNO DOS ENRIJECEDORES</b>		
<input type="text"/>	FACE DE MENOR ÁREA enr. >	<input type="text"/>	iniciar
<b>NÚMERO DE ESPAÇAMENTOS</b>	enr. <	<input type="text"/>	continuar
<input type="text"/>	FACE DE MAIOR ÁREA enr. >	<input type="text"/>	iniciar
<b>ESPAÇAMENTO NAS ARESTAS</b>	enr. <	<input type="text"/>	continuar
<input type="text"/>	<b>PESO</b>		<b>PRESSÕES EQUIVALENTES</b>
<b>ESPAÇAMENTO NA FACE MENOR</b>	<input type="text"/>		<input type="text"/>
<input type="text"/>	<b>TRAÇÃO / ENRIJ.</b>		<b>CONVERSÃO/PAINEL</b>
<b>ESPAÇAMENTO NA FACE MAIOR</b>	<input type="text"/>		<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>		<input type="text"/>
<b>CALCULAR</b>	<b>IMPRIMIR</b>		<b>RETORNAR</b>
		<b>GEOMETRIA: quarta etapa</b>	

FIGURA D.3 - Tela 3 para CTP

**CALCULAR**

```
Sub Command3D1_Click ()
```

```
Dim NE As Single
```

```
Dim ES As Single
```

```
Dim EA As Single
```

```
Dim PI As Single
```

```
AI = Val(FORM2.Text1)
```

```
PI = 4 * Atn(1)
```

```
NE = Val(Text1.Text)
```

```
ES = NE - 1
```

```
Text2.Text = Str$(ES)
```

```
EA = AI / ES
```

```
Text3.Text = Str$(EA)
```

```

AN1G = Val(FORM2.Text4)
AN2G = Val(FORM2.Text5)
EM1 = EA * Sin(AN1G * PI / 180)
Text4.Text = Str$(EM1)
EM2 = EA * Sin(AN2G * PI / 180)
Text5.Text = Str$(EM2)
End Sub

```

## INICIAR

```

Sub Command3D2_Click ()
Dim CO1 As Single
Dim PI As Single
Dim NE As Integer
AN1G = Val(FORM2.Text4)
EA = Val(FORM3.Text3)
A1 = Val(FORM1.Text1)
NE = Val(FORM3.Text1)
PI = 4 * Atn(1)
Text6.Text = Str$(A1)
text10.Text = 1
text11.Text = 2
CO1 = A1 - 2 * EA * Cos(PI * AN1G / 180)
Text7.Text = Str$(CO1)
MsgBox "OS PRÓXIMOS INCREMENTOS SE DARÃO APENAS COM O BOTÃO
'CONTINUAR'. ESCOLHER OS BOTÕES 'PESO' OU 'PRESSÕES EQUIVALENTES'
PARA CADA INCREMENTO. USAR O BOTÃO 'PRESSÕES EQUIVALENTES'
SOMENTE APÓS FORNECER OS DADOS DA TELA 6 (AÇÕES: primeira etapa).", 64,
"ATENÇÃO"
End Sub

```

**CONTINUAR**

```
Sub Command3D3_Click ()
Dim A2 As Single
Dim LA1 As Single
Dim EA As Single
Dim AN1G As Single
Dim CO1F As Single
If text11.Text < Text1.Text Then
text10.Text = Val(text11.Text)
text11.Text = 1 + text10.Text
End If
A2 = Val(FORM1.Text3)
PI = 4 * Atn(1)
AN1G = Val(FORM2.Text4)
EA = Val(Text3.Text)
LA1 = Val(Text7.Text)
Text6.Text = Str$(LA1)
CO1F = LA1 - 2 * EA * Cos(PI * AN1G / 180)
If CO1F > A2 Then
Text7.Text = Str$(CO1F)
End If
If CO1F <= A2 Then
MsgBox "FIM DOS INCREMENTOS", 64, "ATENÇÃO"
End If
End Sub
```

**INICIAR**

```
Sub Command3D7_Click ()
Dim CO2 As Single
Dim PI As Single
AN2G = Val(FORM2.Text5)
```

EA = Val(FORM3.Text3)

B1 = Val(FORM1.Text2)

PI = 4 \* Atn(1)

text12.Text = 1

text13.Text = 2

Text8.Text = Str\$(B1)

CO2 = B1 - 2 \* EA \* Cos(PI \* AN2G / 180)

Text9.Text = Str\$(CO2)

MsgBox "OS PRÓXIMOS INCREMENTOS SE DARÃO APENAS COM O BOTÃO 'CONTINUAR'. ESCOLHER OS BOTÕES 'PESO' OU 'PRESSÕES EQUIVALENTES' PARA CADA INCREMENTO. USAR O BOTÃO 'PRESSÕES EQUIVALENTES' SOMENTE APÓS FORNECER OS DADOS DA TELA 6 (AÇÕES: primeira etapa).", 64, "ATENÇÃO"

End Sub

## **CONTINUAR**

Sub Command3D8\_Click ()

Dim B2 As Single

Dim LA2 As Single

Dim EA As Single

Dim AN2G As Single

Dim CO2F As Single

B2 = Val(FORM1.Text4)

PI = 4 \* Atn(1)

If text13.Text < Text1.Text Then

text12.Text = Val(text13.Text)

text13.Text = 1 + text12.Text

End If

AN2G = Val(FORM2.Text5)

```

EA = Val(Text3.Text)
LA2 = Val(Text9.Text)
Text8.Text = Str$(LA2)
If LA2 > B2 Then
CO2F = LA2 - 2 * EA * Cos(PI * AN2G / 180)
Text9.Text = Str$(CO2F)
End If
If CO2F < B2 Then
MsgBox "FIM DOS INCREMENTOS", 64, "ATENÇÃO"
End If
End Sub

```

## **IMPRIMIR**

```

Sub Command3D4_Click ()
PRINTER.Print Tab(15); "SILO DE AÇO: TREMONHA PIRAMIDAL (3)"
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print Tab(18); "GEOMETRIA: terceira etapa"
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print ""
If Val(text10.Text) = 1 Then
PRINTER.Print Tab(5); "Número estimado de enrijecedores [1] = "; Text1.Text
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print Tab(5); "Número de espaçamentos [1] = "; Text2.Text
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print Tab(5); "Espaçamento nas arestas [L] = "; Text3.Text
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print Tab(5); "Espaçamento na face de menor área [L] = "; Text4.Text
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print Tab(5); "Espaçamento na face de maior área [L] = "; Text5.Text
PRINTER.Print ""

```

```
PRINTER.Print ""
End If
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print Tab(5); "COMPRIMENTOS DE CONTORNOS DOS ENRIJECEDORES"
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print Tab(5); "FACE DE MENOR ÁREA"
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print Tab(5); "Ordem numérica do enrijecedor anterior [1] = "; text10.Text
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print Tab(5); "Valor do comprimento de contorno do enrijecedor anterior [L] = ";
Text6.Text
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print Tab(5); "Ordem numérica do enrijecedor posterior [1] = "; text11.Text
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print Tab(5); "Valor do comprimento de contorno do enrijecedor posterior [L] = ";
Text7.Text
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print Tab(5); "FACE DE MAIOR ÁREA"
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print Tab(5); "Ordem numérica do enrijecedor anterior [1] = "; text12.Text
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print Tab(5); "Valor do comprimento de contorno do enrijecedor anterior [L] = ";
Text8.Text
PRINTER.Print ""
PRINTER.Print Tab(5); "Ordem numérica do enrijecedor posterior [1] = "; text13.Text
PRINTER.Print ""
```

```
PRINTER.Print Tab(5); "Valor do comprimento de contorno do enrijecedor posterior [L] = ";  
Text9.Text  
PRINTER.Print ""  
PRINTER.Print ""  
PRINTER.EndDoc  
MsgBox "INCREMENTAR QUADROS ANTERIORES E DEPOIS CLICAR O BOTÃO  
'IMPRIMIR'", 64, "ATENÇÃO"  
End Sub
```

### **GEOMETRIA: quarta etapa**

```
Sub Command3D5_Click ()  
FORM4.Show  
End Sub
```

### **RETORNAR**

```
Sub Command3D11_Click ()  
FORM2.Show  
End Sub
```

SILO DE AÇO: TREMOIHA PIRAMIDAL (4)

GEOMETRIA: quarta etapa

**ORDENADAS INTERMEDIÁRIAS E LOCAIS AOS ENRIJECEDORES**

QUANTIDADE DE ORDENADAS

Ord. anterior		iniciar
Ord. posterior		continuar

**ORDENADAS LOCAIS DOS ENRIJECEDORES**

QUANTIDADE DE ORDENADAS

Ord. anterior		iniciar
Ord. posterior		continuar

PRESSÕES/CHAPAS  PRESSÕES/ENRIJ.

**ORDENADAS INTERMEDIÁRIAS DAS CHAPAS**

QUANTIDADE DE ORDENADAS

Ord. anterior		iniciar
Ord. posterior		continuar

TRAÇÃO HORIZ.  TRAÇÃO MERID.

INPRIMIR

GEOMETRIA: quinta etapa

RETORNAR

FIGURA D.4 - Tela 4 para CTP

## INICIAR

Sub Command3D1\_Click ()

Dim NO As Single

Dim Y As Single

Dim Y1 As Single

Dim X As Single

Dim FI As Single

EA = Val(FORM3.Text3)

AI = Val(FORM2.Text1)

H = Val(FORM1.Text6)

NO = Val(FORM3.Text1) + Val(FORM3.Text2)

Text1.Text = Str\$(NO)

text7.Text = 1

TEXT8.Text = 2



```

X = Sqr(AI ^ 2 - H ^ 2)
FI = Atn(H / X)
Y1 = 0
Text2.Text = Str$(Y1)
Y = Y1 + (EA / 2) * Sin(FI)
Text3.Text = Str$(Y)
MsgBox "OS PRÓXIMOS INCREMENTOS SE DARÃO APENAS COM O BOTÃO
'CONTINUAR'.", 64, "ATENÇÃO"
End Sub

```

### **CONTINUAR**

```

Sub Command3D2_Click ()
Dim NO As Single
Dim X As Single
Dim FI As Single
Dim Y1 As Single
EA = Val(FORM3.Text3)
H = Val(FORM1.Text6)
AI = Val(FORM2.Text1)
NO = Val(Text1.Text)
If TEXT8.Text < NO Then
text7.Text = Val(TEXT8.Text)
TEXT8.Text = 1 + text7.Text
End If
X = Sqr(AI ^ 2 - H ^ 2)
FI = Atn(H / X)
Y1 = Val(Text3.Text)
Text2.Text = Str$(Y1)
Y = Y1 + (EA / 2) * Sin(FI)
If Y1 < H Then
Text3.Text = Str$(Y)

```

```
End If
If Y1 = H Then
MsgBox "LIMITE DA ORDENADA MÁXIMA", 64, "ATENÇÃO"
End If
If Val(TEXT8.Text) = Val(Text1.Text) Then
MsgBox "ORDENADA MÁXIMA", 64, "ATENÇÃO"
End If
End Sub
```

## INICIAR

```
Sub Command3D4_Click ()
Dim NO As Single
Dim Y As Single
Dim Y1 As Single
Dim X As Single
Dim FI As Single
EA = Val(FORM3.Text3)
AI = Val(FORM2.Text1)
H = Val(FORM1.Text6)
NO = Val(FORM3.Text2)
Text11.Text = Str$(NO)
If Val(Text11.Text) = 1 Then
Text12.Text = 1
X = Sqr(AI ^ 2 - H ^ 2)
FI = Atn(H / X)
Y = (EA / 2) * Sin(FI)
Text13.Text = Str$(Y)
MsgBox "PARA DOIS ENRIJECEDORES EXISTE APENAS UMA ORDENADA
INTERMEDIÁRIA.", 64, "ATENÇÃO"
End If
If Val(Text11.Text) > 1 Then
```

```

Text12.Text = 1
Text14.Text = 2
X = Sqr(AI ^ 2 - H ^ 2)
FI = Atn(H / X)
Y = (EA / 2) * Sin(FI)
Text13.Text = Str$(Y)
Y1 = Y + EA * Sin(FI)
Text15.Text = Str$(Y1)
MsgBox "OS PRÓXIMOS INCREMENTOS SE DARÃO APENAS COM O BOTÃO
'CONTINUAR'.", 64, "ATENÇÃO"
End If
End Sub

```

## **CONTINUAR**

```

Sub Command3D11_Click ()
Dim NO As Single
Dim X As Single
Dim FI As Single
Dim Y1 As Single
EA = Val(FORM3.Text3)
H = Val(FORM1.Text6)
AI = Val(FORM2.Text1)
If Val(Text11.Text) > 1 Then
NO = Val(FORM4.Text11)
If Val(Text14.Text) < NO Then
Text12.Text = Val(Text14.Text)
Text14.Text = 1 + Text12.Text
End If
X = Sqr(AI ^ 2 - H ^ 2)
FI = Atn(H / X)
Y1 = Val(Text15.Text)

```

```
Text13.Text = Str$(Y1)
Z = H - (EA / 2) * Sin(FI)
Y = Y1 + EA * Sin(FI)
If Y1 < Z Then
Text15.Text = Str$(Y)
End If
If Y1 >= Z Then
MsgBox "MÁXIMA ORDENADA PARA CHAPAS", 64, "ATENÇÃO"
End If
End If
If Val(Text11.Text) = Val(Text14.Text) Then
MsgBox "MÁXIMA ORDENADA PARA CHAPAS", 64, "ATENÇÃO"
End If
End Sub
```

## **TRAÇÃO HORIZ.**

Não implementado

## **TRAÇÃO MERID.**

Não implementado

## **INICIAR**

```
Sub Command3D7_Click ()
Dim NO As Single
Dim Y As Single
Dim Y1 As Single
Dim X As Single
Dim FI As Single
EA = Val(FORM3.Text3)
```

```

AI = Val(FORM2.Text1)
H = Val(FORM1.Text6)
NO = Val(FORM3.Text1)
TEXT4.Text = Str$(NO)
X = Sqr(AI ^ 2 - H ^ 2)
FI = Atn(H / X)
Y1 = 0
TEXT5.Text = Str$(Y1)
Y = Y1 + (EA) * Sin(FI)
Text6.Text = Str$(Y)
text9.Text = 1
TEXT10.Text = 2
MsgBox "OS PRÓXIMOS INCREMENTOS SE DARÃO APENAS COM O BOTÃO
'CONTINUAR'. ESCOLHER O BOTÃO 'PRESSÕES' PARA CADA INCREMENTO.", 64,
"ATENÇÃO"
End Sub

```

## CONTINUAR

```

Sub Command3D8_Click ()
Dim X As Single
Dim FI As Single
Dim Y1 As Single
EA = Val(FORM3.Text3)
H = Val(FORM1.Text6)
AI = Val(FORM2.Text1)
X = Sqr(AI ^ 2 - H ^ 2)
FI = Atn(H / X)
Y1 = Val(Text6.Text)
TEXT5.Text = Str$(Y1)
Y = Y1 + (EA) * Sin(FI)

```

```

If Y1 < H Then
Text6.Text = Str$(Y)
End If
If Y1 = H Then
MsgBox "LIMITE DA ORDENADA MÁXIMA", 64, "ATENÇÃO"
End If
If Val(TEXT4.Text) = Val(TEXT10.Text) Then
MsgBox "ORDENADA MÁXIMA", 64, "ATENÇÃO"
End If
NO = Val(TEXT4.Text)
If TEXT10.Text < Val(TEXT4.Text) Then
text9.Text = Val(TEXT10.Text)
TEXT10.Text = 1 + text9.Text
End If
End Sub

```

### **PRESSÕES / CHAPAS**

```

Sub Command3D9_Click ()
FORM6.Show
End Sub

```

### **PRESSÕES / ENRIJ.**

Não implementado

### **IMPRIMIR**

```

Sub Command3D3_Click ()
printer.Print Tab(15); "SILO DE AÇO: TREMONHA PIRAMIDAL (4)"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(18); "GEOMETRIA: quarta etapa"

```

```
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "ORDENADAS INTERMEDIÁRIAS E LOCAIS AOS
ENRIJECEDORES"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Quantidade de ordenadas [1] = "; Text1.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ordem numérica da ordenada anterior [1] = "; text7.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Valor da ordenada anterior [L] = "; Text2.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ordem numérica da ordenada posterior [1] = "; TEXT8.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Valor da ordenada posterior [L] = "; Text3.Text
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print ""
If Val(TEXT8.Text) <= Val(TEXT4.Text) Then
printer.Print Tab(5); "ORDENADAS LOCAIS DOS ENRIJECEDORES"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Quantidade de ordenadas [1] = "; TEXT4.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ordem numérica da ordenada anterior [1] = "; text9.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Valor da ordenada anterior [L] = "; TEXT5.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ordem numérica da ordenada posterior [1] = "; TEXT10.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Valor da ordenada posterior [L] = "; Text6.Text
```

```
printer.Print ""
printer.Print ""
End If
If Val(text7.Text) <= Val(Text11.Text) Then
printer.Print Tab(5); "ORDENADAS INTERMEDIÁRIAS DAS CHAPAS"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Quantidade de ordenadas [1] = "; Text11.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ordem numérica da ordenada anterior [1] = "; Text12.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Valor da ordenada anterior [L] = "; Text13.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ordem numérica da ordenada posterior [1] = "; Text14.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Valor da ordenada posterior [L] = "; Text15.Text
printer.Print ""
printer.Print ""
End If
printer.EndDoc
MsgBox "INCREMENTAR QUADROS ANTERIORES E DEPOIS ACIONAR O BOTÃO
'IMPRIMIR.'", 64, "ATENÇÃO"
End Sub
```

### **GEOMETRIA: quinta etapa**

```
Sub Command3D5_Click ()
FORM5.Show
End Sub
```

### **RETORNAR**

```
Sub Command3D6_Click ()
```



FORM3.Show

End Sub

SILO DE AÇO: TREMONHA PIRAMIDAL (5)

GEOMETRIA: quinta etapa

**COMPRIMENTOS DE CONTORNOS INTERMEDIÁRIOS E LOCAIS ADS ENRUJECEDORES (complementação da terceira etapa)**

FACE DE MENOR ÁREA	co. ant.			iniciar	FACE DE MAIOR ÁREA	co. ant.			iniciar
	co. pos.			continuar		co. pos.			continuar

**COMPRIMENTOS DE CONTORNOS INTERMEDIÁRIOS DAS CHAPAS**

FACE DE MENOR ÁREA	co. ant.			iniciar	FACE DE MAIOR ÁREA	co. ant.			iniciar
	co. pos.			continuar		co. pos.			continuar

IMPRIMIR      AÇÕES: primeira etapa      RETORNAR

FIGURA D.5 - Tela 5 para CTP

**INICIAR**

Sub Command3D1\_Click ()

Dim CO1 As Single

Dim PI As Single

Dim NE As Integer

AN1G = Val(form2.Text4)

EA = Val(FORM3.Text3)

A1 = Val(FORM1.Text1)

NE = Val(FORM3.Text1)

Text5.Text = 1

TEXT6.Text = 2

PI = 4 \* Atn(1)

```
Text1.Text = Str$(A1)
CO1 = A1 - 2 * (EA / 2) * Cos(PI * AN1G / 180)
Text2.Text = Str$(CO1)
MsgBox "OS PRÓXIMOS INCREMENTOS SE DARÃO APENAS COM O BOTÃO
'CONTINUAR'.", 64, "ATENÇÃO"
End Sub
```

## **CONTINUAR**

```
Sub Command3D2_Click ()
Dim A2 As Single
Dim LA1 As Single
Dim EA As Single
Dim AN1G As Single
Dim CO1F As Single
If TEXT6.Text < Val(FORM4.Text1) Then
Text5.Text = Val(TEXT6.Text)
TEXT6.Text = 1 + Text5.Text
End If
A2 = Val(FORM1.Text3)
PI = 4 * Atn(1)
AN1G = Val(form2.Text4)
EA = Val(FORM3.Text3)
LA1 = Val(Text2.Text)
Text1.Text = Str$(LA1)
CO1F = LA1 - 2 * (EA / 2) * Cos(PI * AN1G / 180)
If CO1F > A2 Then
Text2.Text = Str$(CO1F)
End If
If CO1F <= A2 Then
MsgBox "FIM DOS INCREMENTOS", 64, "ATENÇÃO"
End If
```

End Sub

## **INICIAR**

Sub Command3D3\_Click ()

Dim CO2 As Single

Dim PI As Single

AN2G = Val(form2.Text5)

EA = Val(FORM3.Text3)

B1 = Val(FORM1.Text2)

text7.Text = 1

text8.Text = 2

PI = 4 \* Atn(1)

Text3.Text = Str\$(B1)

CO2 = B1 - 2 \* (EA / 2) \* Cos(PI \* AN2G / 180)

Text4.Text = Str\$(CO2)

MsgBox "OS PRÓXIMOS INCREMENTOS SE DARÃO APENAS COM O BOTÃO  
'CONTINUAR'.", 64, "ATENÇÃO"

End Sub

## **CONTINUAR**

Sub Command3D4\_Click ()

Dim LA2 As Single

Dim EA As Single

Dim AN2G As Single

Dim CO2F As Single

If text8.Text < Val(FORM4.Text1) Then

text7.Text = Val(text8.Text)

text8.Text = 1 + text7.Text

End If

B2 = Val(FORM1.Text4)

```

PI = 4 * Atn(1)
AN2G = Val(form2.Text5)
EA = Val(FORM3.Text3)
LA2 = Val(Text4.Text)
Text3.Text = Str$(LA2)
If LA2 > B2 Then
CO2F = LA2 - 2 * (EA / 2) * Cos(PI * AN2G / 180)
Text4.Text = Str$(CO2F)
End If
If CO2F <= B2 Then
MsgBox "FIM DOS INCREMENTOS", 64, "ATENÇÃO"
End If
End Sub

```

## INICIAR

```

Sub Command3D6_Click ()
Dim CO1 As Single
Dim PI As Single
Dim NE As Integer
AN1G = Val(form2.Text4)
EA = Val(FORM3.Text3)
A1 = Val(FORM1.Text1)
NE = Val(FORM3.Text1)
If Val(FORM4.Text11) >= 1 Then
text9.Text = 1
TEXT10.Text = 2
End If
PI = 4 * Atn(1)
CO1 = A1 - 2 * (EA / 2) * Cos(PI * AN1G / 180)
Text11.Text = Str$(CO1)
CO2 = CO1 - 2 * EA * Cos(PI * AN1G / 180)

```

```

text12.Text = Str$(CO2)
MsgBox "OS PRÓXIMOS INCREMENTOS SE DARÃO APENAS COM O BOTÃO
'CONTINUAR'.", 64, "ATENÇÃO"
If Val(FORM4.Text11) = 1 Then
text9.Text = 1
TEXT10.Text = 0
text12.Text = 0
MsgBox "NÃO CLICAR 'CONTINUAR'. EXISTE APENAS 'UM' COMPRIMENTO", 64,
"ATENÇÃO"
End If
End Sub

```

## **CONTINUAR**

```

Sub Command3D9_Click ()
Dim A2 As Single
Dim LA1 As Single
Dim EA As Single
Dim AN1G As Single
Dim CO1F As Single

If TEXT10.Text < Val(FORM4.Text11) Then
text9.Text = Val(TEXT10.Text)
TEXT10.Text = 1 + text9.Text
End If
A2 = Val(FORM1.Text3)
PI = 4 * Atn(1)
AN1G = Val(form2.Text4)
EA = Val(FORM3.Text3)
LA1 = Val(text12.Text)
Text11.Text = Str$(LA1)
A2F = A2 - 2 * (EA / 2) * Cos(PI * AN1G / 180)

```

```

CO1F = LA1 - 2 * (EA) * Cos(PI * AN1G / 180)
If CO1F > A2F Then
text12.Text = Str$(CO1F)
End If
If TEXT10.Text = Val(FORM4.Text11) Then
MsgBox "FIM DOS INCREMENTOS", 64, "ATENÇÃO"
End If
If text12.Text = 0 Then
MsgBox "INCREMENTO INVÁLIDO", 64, "ATENÇÃO"
End If
If CO1F <= A2F Then
MsgBox "FIM DOS INCREMENTOS", 64, "ATENÇÃO"
End If
End Sub

```

## INICIAR

```

Sub Command3D10_Click ()
Dim CO1 As Single
Dim PI As Single
Dim NE As Integer
AN2G = Val(form2.Text5)
EA = Val(FORM3.Text3)
B1 = Val(FORM1.Text2)
NE = Val(FORM3.Text1)
text13.Text = 1
text14.Text = 2
PI = 4 * Atn(1)
CO1 = B1 - 2 * (EA / 2) * Cos(PI * AN2G / 180)
Text15.Text = Str$(CO1)
CO2 = CO1 - 2 * EA * Cos(PI * AN2G / 180)
text16.Text = Str$(CO2)

```

```

MsgBox "OS PRÓXIMOS INCREMENTOS SE DARÃO APENAS COM O BOTÃO
'CONTINUAR'.", 64, "ATENÇÃO"
If Val(FORM4.Text11) = 1 Then
text13.Text = 1
text14.Text = 0
text16.Text = 0
MsgBox "NÃO CLICAR 'CONTINUAR'. EXISTE APENAS 'UM' COMPRIMENTO", 64,
"ATENÇÃO"
End If
End Sub

```

## CONTINUAR

```

Sub Command3D11_Click ()
Dim B2 As Single
Dim LA1 As Single
Dim EA As Single
Dim AN2G As Single
Dim CO1F As Single

If text14.Text < Val(FORM4.Text11) Then
text13.Text = Val(text14.Text)
text14.Text = 1 + text13.Text
End If

B2 = Val(FORM1.Text4)
PI = 4 * Atn(1)
AN2G = Val(form2.Text5)
EA = Val(FORM3.Text3)
LA1 = Val(text16.Text)
Text15.Text = Str$(LA1)
B2F = B2 - 2 * (EA / 2) * Cos(PI * AN2G / 180)
CO1F = LA1 - 2 * (EA) * Cos(PI * AN2G / 180)

```

```
If CO1F > B2F Then
text16.Text = Str$(CO1F)
End If
If text14.Text = Val(FORM4.Text11) Then
MsgBox "FIM DOS INCREMENTOS", 64, "ATENÇÃO"
End If
If CO1F <= B2F Then
MsgBox "FIM DOS INCREMENTOS", 64, "ATENÇÃO"
End If
If text16.Text = 0 Then
MsgBox "INCREMENTO INVÁLIDO", 64, "ATENÇÃO"
End If
End Sub
```

## **IMPRIMIR**

```
Sub Command3D5_Click ()
printer.Print Tab(15); "SILO DE AÇO: TREMONHA PIRAMIDAL (5)"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(18); "GEOMETRIA: quinta etapa"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "COMPRIMENTOS DE CONTORNOS INTERMEDIÁRIOS E
LOCAIS AOS ENRIJECEDORES"
printer.Print Tab(10); "(Complementação da terceira etapa)"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "FACE DE MENOR ÁREA"
printer.Print ""
printer.Print ""
```



```
printer.Print Tab(5); "Ordem numérica do comprimento de contorno anterior [1] = ";
Text5.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Valor do comprimento de contorno anterior [L] = "; Text1.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ordem numérica do comprimento de contorno posterior [1] = ";
TEXT6.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Valor do comprimento de contorno posterior [L] = "; Text2.Text
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "FACE DE MAIOR ÁREA"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ordem numérica do comprimento de contorno anterior [1] = ";
text7.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Valor do comprimento de contorno anterior [L] = "; Text3.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ordem numérica do comprimento de contorno posterior [1] = ";
text8.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Valor do comprimento de contorno posterior [L] = "; Text4.Text
printer.Print ""
If Val(TEXT6.Text) <= Val(TEXT10.Text) Then
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "COMPRIMENTOS DE CONTORNOS INTERMEDIÁRIOS DAS
CHAPAS"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "FACE DE MENOR ÁREA"
```

```
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ordem numérica do comprimento de contorno anterior [1] = ";
text9.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Valor do comprimento de contorno anterior [L] = "; Text11.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ordem numérica do comprimento de contorno posterior [1] = ";
TEXT10.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Valor do comprimento de contorno posterior [L] = "; text12.Text
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "FACE DE MAIOR ÁREA"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ordem numérica do comprimento de contorno anterior [1] = ";
text13.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Valor do comprimento de contorno anterior [L] = "; Text15.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ordem numérica do comprimento de contorno posterior [1] = ";
text14.Text
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Valor do comprimento de contorno posterior [L] = "; text16.Text
printer.Print ""
End If
printer.EndDoc
MsgBox "INCREMENTAR QUADROS ANTERIORES E DEPOIS CLICAR O BOTÃO
'IMPRIMIR'", 64, "ATENÇÃO"
End Sub
```

**AÇÕES: primeira etapa**

Sub Command3D7\_Click ()

FORM6.Show

End Sub

**RETORNAR**

Sub Command3D8\_Click ()

FORM4.Show

End Sub

SILO DE AÇO: TREMONHA PIRAMIDAL (6)

**AÇÕES: primeira etapa**

**PRESSÕES NORMAIS ÀS CHAPAS LABORATÓRIO**

FACE DE MENOR ÁREA CH= Qa= Qp= CALCULAR

FACE DE MAIOR ÁREA CH= Qa= Qp= CALCULAR

ORDENADAS DAS CHAPAS

**JANSSEN**

FACE DE MENOR ÁREA CH= Qa= Qp= CALCULAR

FACE DE MAIOR ÁREA CH= Qa= Qp= CALCULAR

LABORATÓRIO JANSSEN

imprimir imprimir AÇÕES: segunda parte RETORNAR

FIGURA D.6- Tela 6 para CTP

**CALCULAR**

Sub Command3D1\_Click ()

Dim Y1 As Single

Dim ANP As Single

Dim ANE As Single

Dim MAVL As Single

Dim MAVT As Single

Dim PE As Single

Dim PT As Single

Dim Q1 As Single

Dim QN As Single

Dim P1 As Single

Dim PN As Single

Dim PI As Single

Dim YN As Single

Dim CA As Single

Y1 = Val(FORM4.Text5)

YN = Val(FORM4.Text6)

MAVL = Val(FORM1.Text5)

MAVT = Val(FORM1.Text7)

ANP = Val(TEXT3.Text)

PE = Val(Text1.Text)

PT = Val(TEXT4.Text)

ANE = Val(Text2.Text)

H = Val(FORM1.Text6)

MsgBox "POSTERIORMENTE INCREMENTAR 'ORDENADAS DAS CHAPAS'", 64,  
"ATENÇÃO"

PI = 4 \* Atn(1)

CA = Tan(MAVL \* PI / 180) / (Tan(ANP \* PI / 180) + Tan(MAVL \* PI / 180))

P1 = PE \* Y1 + PT

PN = PE \* YN + PT

Q1 = P1 \* CA

QN = PN \* CA

Text6.Text = Str\$(Q1)

```
Text7.Text = Str$(QN)
If YN >= H Then
MsgBox "FIM DOS INCREMENTOS", 64, "ATENÇÃO"
End If
TEXT14.Text = Val(FORM4.Text9)
End Sub
```

## **CALCULAR**

```
Sub Command3D2_Click ()
Dim Y1 As Single
Dim ANP As Single
Dim ANE As Single
Dim MAVL As Single
Dim MAVT As Single
Dim PE As Single
Dim PT As Single
Dim Q1 As Single
Dim QN As Single
Dim P1 As Single
Dim PN As Single
Dim PI As Single
Dim YN As Single
Dim CA As Single
Y1 = Val(FORM4.Text5)
YN = Val(FORM4.Text6)
MAVL = Val(FORM1.Text5)
MAVT = Val(FORM1.Text7)
ANP = Val(TEXT3.Text)
PE = Val(Text1.Text)
PT = Val(TEXT4.Text)
ANE = Val(Text2.Text)
```

```

H = Val(FORM1.Text6)
MsgBox "POSTERIORMENTE INCREMENTAR 'ORDENADAS DAS CHAPAS'", 64,
"ATENÇÃO"
PI = 4 * Atn(1)
CA = Tan(MAVT * PI / 180) / (Tan(ANP * PI / 180) + Tan(MAVT * PI / 180))
P1 = PE * Y1 + PT
PN = PE * YN + PT
Q1 = P1 * CA
QN = PN * CA
TEXT8.Text = Str$(Q1)
Text9.Text = Str$(QN)
If YN >= H Then
MsgBox "FIM DOS INCREMENTOS", 64, "ATENÇÃO"
End If
TEXT15.Text = Val(FORM4.Text9)
End Sub

```

### **ORDENADAS DAS CHAPAS**

```

Sub Command3D5_Click ()
YN = Val(FORM4.Text6)
H = Val(FORM1.Text6)
FORM4.Show
If YN >= H Then
MsgBox "LIMITE DA ORDENADA MÁXIMA", 64, "ATENÇÃO"
End If
End Sub

```

### **CALCULAR**

```

Sub Command3D3_Click ()
Dim RA As Single
Dim RB As Single

```

Dim Y1 As Single

Dim YJ As Single

Dim ANP As Single

Dim ANE As Single

Dim MAVL As Single

Dim MAVT As Single

Dim PE As Single

Dim PT As Single

Dim Q1 As Single

Dim QN As Single

Dim P1 As Single

Dim PN As Single

Dim PI As Single

Dim YN As Single

Dim CA As Single

Y1 = Val(FORM4.Text5)

YN = Val(FORM4.Text6)

YJ = Val(Text5.Text)

MAVL = Val(FORM1.Text5)

MAVT = Val(FORM1.Text7)

ANP = Val(TEXT3.Text)

PE = Val(Text1.Text)

PT = Val(TEXT4.Text)

ANE = Val(Text2.Text)

A1 = Val(FORM1.Text1)

B1 = Val(FORM1.Text2)

PI = 4 \* Atn(1)

MI = Tan(ANP \* PI / 180)

ANE = Val(Text2.Text)

CA2 = Tan(MAVL \* PI / 180) / (Tan(ANP \* PI / 180) + Tan(MAVL \* PI / 180))

CA1 = (1 - Sin(ANE \* PI / 180)) / (1 + Sin(ANE \* PI / 180))

```

RA = A1 / 4 * Raio hidráulico p/ lado menor
RB = (2 * A1 * B1 - A1 ^ 2) / (4 * B1) * Raio hidráulico p/ lado maior
PTJA = ((PE * RA) / (MI * CA1)) * (1 - Exp((-MI * CA1 * YJ) / RA))
PTJB = ((PE * RB) / (MI * CA1)) * (1 - Exp((-MI * CA1 * YJ) / RB))
P1 = PE * Y1 + PTJA
PN = PE * YN + PTJA
Q1 = P1 * CA2
QN = PN * CA2
Text10.Text = Str$(Q1)
Text11.Text = Str$(QN)
TEXT16.Text = Val(FORM4.Text9)
End Sub

```

## CALCULAR

```

Sub Command3D4_Click ()
Dim RA As Single
Dim RB As Single
Dim Y1 As Single
Dim YJ As Single
Dim ANP As Single
Dim ANE As Single
Dim MAVL As Single
Dim MAVT As Single
Dim PE As Single
Dim PT As Single
Dim Q1 As Single
Dim QN As Single
Dim P1 As Single
Dim PN As Single

```



```

Dim PI As Single
Dim YN As Single
Dim CA1 As Single
Dim CA2 As Single
Y1 = Val(FORM4.Text5)
YN = Val(FORM4.Text6)
YJ = Val(Text5.Text)
MAVL = Val(FORM1.Text5)
MAVT = Val(FORM1.Text7)
ANP = Val(TEXT3.Text)
PE = Val(Text1.Text)
PT = Val(TEXT4.Text)
ANE = Val(Text2.Text)
A1 = Val(FORM1.Text1)
B1 = Val(FORM1.Text2)
PI = 4 * Atn(1)
MI = Tan(ANP * PI / 180)
ANE = Val(Text2.Text)
CA2 = Tan(MAVT * PI / 180) / (Tan(ANP * PI / 180) + Tan(MAVT * PI / 180))
CA1 = (1 - Sin(ANE * PI / 180)) / (1 + Sin(ANE * PI / 180))
RA = A1 / 4 * Raio hidráulico p/ lado menor
RB = (2 * A1 * B1 - A1 ^ 2) / (4 * B1) * Raio hidráulico p/ lado maior
PTJA = ((PE * RA) / (MI * CA1)) * (1 - Exp((-MI * CA1 * YJ) / RA))
PTJB = ((PE * RB) / (MI * CA1)) * (1 - Exp((-MI * CA1 * YJ) / RB))
P1 = PE * Y1 + PTJB
PN = PE * YN + PTJB
Q1 = P1 * CA2
QN = PN * CA2
TEXT12.Text = Str$(Q1)
TEXT13.Text = Str$(QN)
TEXT17.Text = Val(FORM4.Text9)

```

End Sub

### **IMPRIMIR (Laboratório)**

Sub Command3D9\_Click ()

YN = Val(FORM4.Text6)

Y1 = Val(FORM4.Text5)

PE = Val(Text1.Text)

MAVT = Val(FORM1.Text7)

MAVL = Val(FORM1.Text5)

ANP = Val(TEXT3.Text)

PT = Val(TEXT4.Text)

ANE = Val(Text2.Text)

Q1 = Val(Text6.Text)

Q2 = Val(Text7.Text)

Q3 = Val(TEXT8.Text)

Q4 = Val(Text9.Text)

printer.Print Tab(18); "SILO DE AÇO: TREMONHA PIRAMIDAL (6)"

printer.Print ""

printer.Print ""

printer.Print Tab(15); "AÇÕES: primeira etapa"

printer.Print ""

printer.Print ""

printer.Print Tab(5); "Cálculos para laboratório considerando cilindro hidráulico na transição"

printer.Print ""

printer.Print ""

printer.Print Tab(5); "Ordenada anterior [L] = "; Y1

printer.Print ""

printer.Print Tab(5); "Ordenada posterior [L] = "; YN

printer.Print ""

printer.Print Tab(5); "Peso específico do produto  $[F.L^{-3}] =$ "; PE

printer.Print ""

```

printer.Print Tab(5); "Efetivo ângulo de atrito interno [1] = "; ANE
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ângulo de atrito com a parede [1] = "; ANP
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Pressão na transição [F.L^-2] = "; PT
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Metade do ângulo do vértice transversal [1] = "; MAVT
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Metade do ângulo do vértice longitudinal [1] = "; MAVL
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "PRESSÕES NORMAIS NA FACE DE MENOR ÁREA"
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Pressão anterior [F.L^-2] = "; Q1
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Pressão posterior [F.L^-2] = "; Q2
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "PRESSÕES NORMAIS NA FACE DE MAIOR ÁREA"
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Pressão anterior [F.L^-2] = "; Q3
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Pressão posterior [F.L^-2] = "; Q4
printer.EndDoc
End Sub

```

### **IMPRIMIR (Janssen)**

```

Sub Command3D10_Click ()
YN = Val(FORM4.Text6)
Y1 = Val(FORM4.Text5)
PE = Val(Text1.Text)

```

```
MAVT = Val(FORM1.Text7)
MAVL = Val(FORM1.Text5)
ANP = Val(TEXT3.Text)
PT = Val(TEXT4.Text)
ANE = Val(Text2.Text)
Q1 = Val(Text10.Text)
Q2 = Val(Text11.Text)
Q3 = Val(TEXT12.Text)
Q4 = Val(TEXT13.Text)
printer.Print Tab(18); "SILO DE AÇO: TREMONHA PIRAMIDAL"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(15); "AÇÕES: primeira etapa"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Cálculos de acordo com Janssen"
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ordenada anterior = "; Y1
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ordenada posterior = "; YN
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Peso específico = "; PE
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Efetivo ângulo de atrito interno = "; ANE
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Ângulo de atrito com a parede = "; ANP
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Metade do ângulo do vértice transversal = "; MAVT
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Metade do ângulo do vértice longitudinal = "; MAVL
```

```
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "PRESSÕES NORMAIS NA FACE DE MENOR ÁREA"
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Pressão anterior = "; Q1
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Pressão posterior = "; Q2
printer.Print ""
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "PRESSÕES NORMAIS NA FACE DE MAIOR ÁREA"
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Pressão anterior = "; Q3
printer.Print ""
printer.Print Tab(5); "Pressão posterior = "; Q4
printer.EndDoc
End Sub
```

### **AÇÕES: segunda parte**

Não implementado

### **RETORNAR**

```
Sub Command3D12_Click ()
FORM5.Show
End Sub
```

## **ANEXO E**

### **RESULTADOS**

**QUADRO E.1 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1E.0 e 1E.1**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.0		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-31
2	1,28	-20
3	2,55	-31
4	3,81	-25
5	5,10	-21
6	6,39	-53
7	7,66	-52
8	8,96	-42
9	10,22	-56
10	11,11	-53
11	13,94	-90
12	24,49	-144
13	35,04	-224
14	45,59	-265
15	56,14	-326
16	66,69	-357
17	77,24	-403
18	87,79	-436
19	98,34	-473
20	108,89	-483
21	119,44	-497
22	129,99	-522
23	140,54	-539
24	151,09	-547
25	161,64	-571
26	172,19	-582
27	13,94	-185

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.1		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-25
2	1,28	-17
3	2,55	-33
4	3,81	-37
5	5,10	-30
6	6,39	-34
7	7,66	-29
8	8,96	-38
9	10,22	-37
10	11,11	-19
11	13,94	-26
12	24,49	5
13	35,04	-17
14	45,59	-26
15	56,14	-34
16	66,69	-41
17	77,24	-54
18	87,79	-70
19	98,34	-81
20	108,89	-70
21	119,44	-72
22	129,99	-91
23	140,54	-98
24	151,09	-96
25	161,64	-89
26	172,19	-88
27	13,94	0

**QUADRO E.2 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1E.2 e 1E.3**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.2		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-14
2	1,28	-6
3	2,55	-29
4	3,81	8
5	5,10	3
6	6,39	1
7	7,66	9
8	8,96	8
9	10,22	4
10	11,11	53
11	13,94	92
12	24,49	226
13	35,04	254
14	45,59	343
15	56,14	341
16	66,69	396
17	77,24	424
18	87,79	446
19	98,34	446
20	108,89	484
21	119,44	507
22	129,99	512
23	140,54	519
24	151,09	556
25	161,64	569
26	172,19	603
27	13,94	274

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.3		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-7
2	1,28	-28
3	2,55	-23
4	3,81	-27
5	5,10	-27
6	6,39	-23
7	7,66	-42
8	8,96	-23
9	10,22	-47
10	11,11	-13
11	13,94	6
12	24,49	103
13	35,04	93
14	45,59	141
15	56,14	151
16	66,69	177
17	77,24	163
18	87,79	179
19	98,34	181
20	108,89	191
21	119,44	216
22	129,99	207
23	140,54	209
24	151,09	239
25	161,64	251
26	172,19	252
27	13,94	89



**QUADRO E.3 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1E.4 e 1E.5**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.4		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-41
2	1,28	-17
3	2,55	-16
4	3,81	-15
5	5,10	11
6	6,39	-14
7	7,66	1
8	8,96	-4
9	10,22	3
10	11,11	29
11	13,94	36
12	24,49	100
13	35,04	117
14	45,59	157
15	56,14	154
17	77,24	180
18	87,79	189
19	98,34	196
20	108,89	215
21	119,44	228
22	129,99	222
23	140,54	235
24	151,09	247
25	161,64	255
26	172,19	273
27	13,94	138

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.5		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-37
2	1,28	-10
3	2,55	-1
4	3,81	5
5	5,10	18
6	6,39	19
7	7,66	16
8	8,96	35
9	10,22	19
10	11,11	41
11	13,94	75
12	24,49	165
13	35,04	188
14	45,59	222
15	56,14	238
17	77,24	260
18	87,79	255
19	98,34	262
20	108,89	303
21	119,44	298
22	129,99	304
23	140,54	303
24	151,09	319
25	161,64	351
26	172,19	352
27	13,94	215

**QUADRO E.4 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1E.6 e 1E.7**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.6		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-16
2	1,28	-14
3	2,55	-36
4	3,81	-42
5	5,10	-74
6	6,39	-99
7	7,66	-119
8	8,96	-161
9	10,22	-186
10	11,11	-172
11	13,94	-238
12	24,49	-347
13	35,04	-488
14	45,59	-575
15	56,14	-667
16	66,69	-722
17	77,24	-789
18	87,79	-855
19	98,34	-945
20	108,89	-969
21	119,44	-1028
22	129,99	-1086
23	140,54	-1144
24	151,09	-1186
25	161,64	-1227
26	172,19	-1291
27	13,94	-499

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.7		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-22
2	1,28	-12
3	2,55	-25
4	3,81	-13
5	5,10	-36
6	6,39	-46
7	7,66	-64
8	8,96	-78
9	10,22	-92
10	11,11	-83
11	13,94	-89
12	24,49	-101
13	35,04	-196
14	45,59	-226
15	56,14	-281
16	66,69	-326
17	77,24	-387
18	87,79	-443
19	98,34	-499
20	108,89	-529
21	119,44	-569
22	129,99	-625
23	140,54	-673
24	151,09	-707
25	161,64	-744
26	172,19	-742
27	13,94	-65

**QUADRO E.5 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1E.8 e 1E.9**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.8		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-38
2	1,28	-38
3	2,55	-41
4	3,81	-42
5	5,10	-41
6	6,39	-40
7	7,66	-58
8	8,96	-53
9	10,22	-62
10	11,11	-32
11	13,94	-42
12	24,49	-3
13	35,04	-26
14	45,59	-14
15	56,14	-36
16	66,69	-13
17	77,24	-16
18	87,79	-42
19	98,34	-51
20	108,89	-13
21	119,44	-26
22	129,99	-23
23	140,54	-33
24	151,09	-22
25	161,64	-13
26	172,19	11
27	13,94	5

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.9		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-18
2	1,28	-41
3	2,55	-43
4	3,81	-56
5	5,10	-51
6	6,39	-39
7	7,66	-63
8	8,96	-60
9	10,22	-71
10	11,11	-58
11	13,94	-64
12	24,49	-48
13	35,04	-104
14	45,59	-96
15	56,14	-119
16	66,69	-110
17	77,24	-131
18	87,79	-147
19	98,34	-178
20	108,89	-163
21	119,44	-196
22	129,99	-181
23	140,54	-212
24	151,09	-208
25	161,64	-218
26	172,19	-225
27	13,94	-67

**QUADRO E.6 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2E.10 e 2E.11**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.10		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-15
2	1,28	-14
3	2,55	-33
4	3,81	-15
5	5,10	-26
6	6,39	-17
7	7,66	-41
8	8,96	-45
9	10,22	-62
10	11,11	-62
11	13,94	-68
12	24,49	-98
13	35,04	-210
14	45,59	-270
15	56,14	-365
16	66,69	-428
17	77,24	-510
18	87,79	-588
19	98,34	-696
20	108,89	-733
21	119,44	-807
22	129,99	-871
23	140,54	-936
24	151,09	-992
25	161,64	-978
26	172,19	-955
27	13,94	-44

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.11		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-35
2	1,28	-25
3	2,55	-26
4	3,81	-25
5	5,10	-24
6	6,39	-22
7	7,66	-36
8	8,96	-41
9	10,22	-15
10	11,11	-19
11	13,94	-1
12	24,49	24
13	35,04	3
14	45,59	22
15	56,14	-31
16	66,69	-27
17	77,24	-41
18	87,79	-62
19	98,34	-74
20	108,89	-64
21	119,44	-82
22	129,99	-90
23	140,54	-103
24	151,09	-100
25	161,64	-91
26	172,19	-122
27	13,94	-21

**QUADRO E.7 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2E.12 e 2E.13**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.12		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-23
2	1,28	-4
3	2,55	-17
4	3,81	-27
5	5,10	-11
6	6,39	-13
7	7,66	-24
8	8,96	0
9	10,22	11
10	11,11	28
11	13,94	51
12	24,49	145
13	35,04	181
14	45,59	227
15	56,14	252
16	66,69	298
17	77,24	321
18	87,79	321
19	98,34	341
20	108,89	356
21	119,44	386
22	129,99	395
23	140,54	399
24	151,09	412
25	161,64	439
26	172,19	449
27	13,94	226

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.13		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-35
2	1,28	-20
3	2,55	-35
4	3,81	-18
5	5,10	-12
6	6,39	-4
7	7,66	-21
8	8,96	-10
9	10,22	0
10	11,11	5
11	13,94	29
12	24,49	126
13	35,04	134
14	45,59	191
15	56,14	230
16	66,69	283
17	77,24	292
18	87,79	319
19	98,34	332
20	108,89	394
21	119,44	421
22	129,99	447
23	140,54	480
24	151,09	504
25	161,64	544
26	172,19	559
27	13,94	194

**QUADRO E.8 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2E.14 e 2E.15**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.14		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-2
2	1,28	-8
3	2,55	-30
4	3,81	-16
5	5,10	2
6	6,39	6
7	7,66	-2
8	8,96	23
9	10,22	8
10	11,11	35
11	13,94	46
12	24,49	118
13	35,04	147
14	45,59	183
15	56,14	225
16	66,69	280
17	77,24	290
18	87,79	316
19	98,34	325
20	108,89	368
21	119,44	385
22	129,99	403
23	140,54	429
24	151,09	455
25	161,64	481
26	172,19	516
27	13,94	154

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.15		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-34
2	1,28	-29
3	2,55	-27
4	3,81	-1
5	5,10	27
6	6,39	20
7	7,66	48
8	8,96	58
9	10,22	52
10	11,11	75
11	13,94	115
12	24,49	227
13	35,04	270
14	45,59	309
15	56,14	346
16	66,69	383
17	77,24	399
18	87,79	414
19	98,34	438
20	108,89	447
21	119,44	472
22	129,99	472
23	140,54	494
24	151,09	490
25	161,64	532
26	172,19	524
27	13,94	341

**QUADRO E.9 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2E.16 e 2E.17**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.16		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-37
2	1,28	-22
3	2,55	-18
4	3,81	-25
5	5,10	-24
6	6,39	-12
7	7,66	-27
8	8,96	-32
9	10,22	-47
10	11,11	-46
11	13,94	-38
12	24,49	-22
13	35,04	-79
14	45,59	-66
15	56,14	-117
16	66,69	-122
17	77,24	-131
18	87,79	-160
19	98,34	-180
20	108,89	-182
21	119,44	-191
22	129,99	-223
23	140,54	-236
24	151,09	-246
25	161,64	-253
26	172,19	-265
27	13,94	-66

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.17		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-18
2	1,28	-23
3	2,55	-49
4	3,81	-69
5	5,10	-98
6	6,39	-121
7	7,66	-149
8	8,96	-160
9	10,22	-162
10	11,11	-171
11	13,94	-210
12	24,49	-299
13	35,04	-407
14	45,59	-484
15	56,14	-551
16	66,69	-595
17	77,24	-673
18	87,79	-721
19	98,34	-760
20	108,89	-804
21	119,44	-843
22	129,99	-890
23	140,54	-934
24	151,09	-959
25	161,64	-992
26	172,19	-989
27	13,94	-381

**QUADRO E.10 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2E.18 e 2E.19**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.18		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-33
2	1,28	-53
3	2,55	-65
4	3,81	-69
5	5,10	-55
6	6,39	-82
7	7,66	-78
8	8,96	-70
9	10,22	-91
10	11,11	-84
11	13,94	-91
12	24,49	-90
13	35,04	-159
14	45,59	-161
15	56,14	-187
16	66,69	-194
17	77,24	-242
18	87,79	-276
19	98,34	-313
20	108,89	-308
21	119,44	-347
22	129,99	-369
23	140,54	-414
24	151,09	-431
25	161,64	-448
26	172,19	-485
27	13,94	-183

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.19		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-16
2	1,28	-17
3	2,55	-21
4	3,81	-41
5	5,10	-30
6	6,39	-38
7	7,66	-56
8	8,96	-58
9	10,22	-66
10	11,11	-43
11	13,94	-61
12	24,49	-33
13	35,04	-77
14	45,59	-99
15	56,14	-114
16	66,69	-109
17	77,24	-106
18	87,79	-113
19	98,34	-135
20	108,89	-109
21	119,44	-106
22	129,99	-118
23	140,54	-128
24	151,09	-127
25	161,64	-132
26	172,19	-114
27	13,94	-109



**QUADRO E.11 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1I.20 e 1I.21**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1I.20		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-34
2	1,28	-34
3	2,55	-20
4	3,81	-20
5	5,10	31
6	6,39	31
7	7,66	32
8	8,96	42
9	10,22	64
10	11,11	80
11	13,94	157
12	24,49	380
13	35,04	519
14	45,59	674
15	56,14	785
16	66,69	896
17	77,24	971
18	87,79	1046
19	98,34	1118
20	108,89	1202
21	119,44	1254
22	129,99	1307
23	140,54	1336
24	151,09	1384
25	161,64	1406
26	172,19	1455
27	13,94	364

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1I.21		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-8
2	1,28	-14
3	2,55	-4
4	3,81	-30
5	5,10	-2
6	6,39	-25
7	7,66	-26
8	8,96	-29
9	10,22	-34
10	11,11	-35
11	13,94	-47
12	24,49	-50
13	35,04	-107
14	45,59	-117
15	56,14	-156
16	66,69	-121
17	77,24	-173
18	87,79	-188
19	98,34	-224
20	108,89	-218
21	119,44	-210
22	129,99	-224
23	140,54	-232
24	151,09	-224
25	161,64	-224
26	172,19	-225
27	13,94	-19

**QUADRO E.12 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 11.22 e 11.23**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 11.22		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-28
2	1,28	-5
3	2,55	-18
4	3,81	-17
5	5,10	-10
6	6,39	-27
7	7,66	-23
8	8,96	-28
9	10,22	-25
10	11,11	-28
11	13,94	-61
12	24,49	-122
13	35,04	-177
14	45,59	-195
15	56,14	-243
16	66,69	-245
17	77,24	-236
18	87,79	-310
19	98,34	-355
20	108,89	-336
21	119,44	-354
22	129,99	371
23	140,54	-392
24	151,09	-409
25	161,64	-420
26	172,19	-427
27	13,94	-176

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 11.23		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-2
2	1,28	-15
3	2,55	-19
4	3,81	-3
5	5,10	2
6	6,39	4
7	7,66	14
8	8,96	12
9	10,22	11
10	11,11	26
11	13,94	32
12	24,49	71
13	35,04	75
14	45,59	136
15	56,14	134
16	66,69	168
17	77,24	162
18	87,79	178
19	98,34	183
20	108,89	216
21	119,44	240
22	129,99	248
23	140,54	260
24	151,09	270
25	161,64	288
26	172,19	316
27	13,94	114

**QUADRO E.13 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 11.24 e 11.25**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 11.24		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-24
2	1,28	-27
3	2,55	-38
4	3,81	-41
5	5,10	-42
6	6,39	-52
7	7,66	-54
8	8,96	-51
9	10,22	-65
10	11,11	-62
11	13,94	-70
12	24,49	-101
13	35,04	-140
14	45,59	-164
15	56,14	-190
16	66,69	-185
17	77,24	-207
18	87,79	-242
19	98,34	-286
20	108,89	-284
21	119,44	-304
22	129,99	-328
23	140,54	-344
24	151,09	-368
25	161,64	-361
26	172,19	-359
27	13,94	-115

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 11.25		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-14
2	1,28	-1
3	2,55	-1
4	3,81	9
5	5,10	30
6	6,39	44
7	7,66	47
8	8,96	59
9	10,22	50
10	11,11	67
11	13,94	85
12	24,49	160
13	35,04	188
14	45,59	232
15	56,14	267
16	66,69	318
17	77,24	329
18	87,79	356
19	98,34	384
20	108,89	428
21	119,44	430
22	129,99	485
23	140,54	494
24	151,09	516
25	161,64	560
26	172,19	568
27	13,94	101

**QUADRO E.14 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 11.26 e 11.27**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 11.26		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-40
2	1,28	-51
3	2,55	-83
4	3,81	-74
5	5,10	-78
6	6,39	-187
7	7,66	-188
8	8,96	-101
9	10,22	-237
10	11,11	-95
11	13,94	-139
12	24,49	-217
13	35,04	-272
14	45,59	-292
15	56,14	-320
16	66,69	-327
17	77,24	-339
18	87,79	-380
19	98,34	-402
20	108,89	-408
21	119,44	-406
22	129,99	-432
23	140,54	-456
24	151,09	-445
25	161,64	-421
26	172,19	-446
27	13,94	-284

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 11.27		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-14
2	1,28	-22
3	2,55	-55
4	3,81	-58
5	5,10	-53
6	6,39	-65
7	7,66	-76
8	8,96	-78
9	10,22	-89
10	11,11	-86
11	13,94	-109
12	24,49	-154
13	35,04	-216
14	45,59	-206
15	56,14	-248
16	66,69	-248
17	77,24	-268
18	87,79	-293
19	98,34	-340
20	108,89	-328
21	119,44	-342
22	129,99	-361
23	140,54	-369
24	151,09	-378
25	161,64	-371
26	172,19	-376
27	13,94	-233

**QUADRO E.15 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2I.28 e 2I.29**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.28		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-14
2	1,28	-28
3	2,55	-7
4	3,81	3
5	5,10	28
6	6,39	35
7	7,66	53
8	8,96	87
9	10,22	87
10	11,11	134
11	13,94	211
12	24,49	513
13	35,04	599
14	45,59	744
15	56,14	836
16	66,69	959
17	77,24	1028
18	87,79	1099
19	98,34	1180
20	108,89	1285
21	119,44	1360
22	129,99	1424
23	140,54	1486
24	151,09	1550
25	161,64	1567
26	172,19	1550
27	13,94	566

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.29		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-27
2	1,28	-14
3	2,55	-14
4	3,81	-17
5	5,10	-12
6	6,39	-25
7	7,66	-23
8	8,96	-25
9	10,22	-46
10	11,11	-34
11	13,94	-28
12	24,49	-15
13	35,04	-53
14	45,59	-44
15	56,14	-74
16	66,69	-71
17	77,24	-81
18	87,79	-93
19	98,34	-124
20	108,89	-117
21	119,44	-115
22	129,99	-127
23	140,54	-132
24	151,09	-133
25	161,64	-144
26	172,19	-136
27	13,94	-75

**QUADRO E.16 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2I.30 e 2I.31**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.30		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-30
2	1,28	-46
3	2,55	-35
4	3,81	-16
5	5,10	-2
6	6,39	-8
7	7,66	-12
8	8,96	-20
9	10,22	-19
10	11,11	-20
11	13,94	-23
12	24,49	-38
13	35,04	-71
14	45,59	-63
15	56,14	-75
16	66,69	-78
17	77,24	-99
18	87,79	-109
19	98,34	-108
20	108,89	-98
21	119,44	-104
22	129,99	-105
23	140,54	-94
24	151,09	-67
25	161,64	-56
26	172,19	-47
27	13,94	-28

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.31		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-26
2	1,28	-25
3	2,55	-22
4	3,81	-33
5	5,10	-29
6	6,39	-22
7	7,66	-29
8	8,96	-22
9	10,22	-30
10	11,11	-18
11	13,94	-15
12	24,49	4
13	35,04	27
14	45,59	61
15	56,14	98
16	66,69	129
17	77,24	144
18	87,79	154
19	98,34	163
20	108,89	217
21	119,44	220
22	129,99	235
23	140,54	238
24	151,09	268
25	161,64	293
26	172,19	314
27	13,94	23

**QUADRO E.17 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2I.32 e 2I.33**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.32		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-21
2	1,28	7
3	2,55	-37
4	3,81	-33
5	5,10	-36
6	6,39	-48
7	7,66	-51
8	8,96	-66
9	10,22	-69
10	11,11	-58
11	13,94	-93
12	24,49	-139
13	35,04	-186
14	45,59	-197
15	56,14	-239
16	66,69	-228
17	77,24	-263
18	87,79	-284
19	98,34	-318
20	108,89	-392
21	119,44	-20000
22	129,99	-3951
23	140,54	-3853
24	151,09	-50000
25	161,64	-20000
26	172,19	-6102
27	13,94	-80000

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.33		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-26
2	1,28	-23
3	2,55	-20
4	3,81	1
5	5,10	-3
6	6,39	-5
7	7,66	-17
8	8,96	4
9	10,22	7
10	11,11	11
11	13,94	27
12	24,49	84
13	35,04	81
14	45,59	139
15	56,14	151
16	66,69	197
17	77,24	202
18	87,79	219
19	98,34	214
20	108,89	264
21	119,44	278
22	129,99	289
23	140,54	319
24	151,09	336
25	161,64	358
26	172,19	385
27	13,94	115

**QUADRO E.18 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2I.34 e 2I.35**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.34		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-18
2	1,28	-13
3	2,55	-35
4	3,81	-12
5	5,10	-30
6	6,39	-37
7	7,66	-46
8	8,96	-40
9	10,22	-58
10	11,11	-48
11	13,94	-78
12	24,49	-104
13	35,04	-159
14	45,59	-188
15	56,14	-212
16	66,69	-214
17	77,24	-245
18	87,79	-258
19	98,34	-300
20	108,89	-303
21	119,44	-321
22	129,99	-331
23	140,54	-343
24	151,09	-357
25	161,64	-364
26	172,19	-362
27	13,94	-147

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.35		
LEITURA	CARGA(kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-29
2	1,28	-12
3	2,55	-3
4	3,81	35
5	5,10	75
6	6,39	91
7	7,66	101
8	8,96	113
9	10,22	116
10	11,11	138
11	13,94	210
12	24,49	349
13	35,04	425
14	45,59	538
15	56,14	587
16	66,69	633
17	77,24	681
18	87,79	731
19	98,34	756
20	108,89	809
21	119,44	838
22	129,99	868
23	140,54	912
24	151,09	943
25	161,64	962
26	172,19	993
27	13,94	431



**QUADRO E.19 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2I.36 e 2I.37**

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.36		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-13
2	1,28	6
3	2,55	-22
4	3,81	-3
5	5,10	-2
6	6,39	-10
7	7,66	2
8	8,96	-1
9	10,22	-3
10	11,11	-3
11	13,94	5
12	24,49	8
13	35,04	7
14	45,59	34
15	56,14	40
16	66,69	83
17	77,24	85
18	87,79	80
19	98,34	85
20	108,89	107
21	119,44	128
22	129,99	131
23	140,54	146
24	151,09	161
25	161,64	192
26	172,19	222
27	13,94	73

CARGA / DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.37		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,00	-15
2	1,28	2
3	2,55	0
4	3,81	21
5	5,10	36
6	6,39	35
7	7,66	25
8	8,96	47
9	10,22	54
10	11,11	58
11	13,94	80
12	24,49	145
13	35,04	163
14	45,59	227
15	56,14	228
16	66,69	263
17	77,24	279
18	87,79	311
19	98,34	299
20	108,89	343
21	119,44	468
22	129,99	368
23	140,54	365
24	151,09	750
25	161,64	420
26	172,19	435
27	13,94	1185

**QUADRO E.20 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 1D.0 e 1D.1**

CARGA / DESLOCAMENTO PARA LVDT 1D.0		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,00	0
2	1,28	0
3	2,55	0
4	3,81	0
5	5,10	1
6	6,39	1
7	7,66	1
8	8,96	1
9	10,22	1
10	11,11	1
11	13,94	2
12	24,49	4
13	35,04	5
14	45,59	6
15	56,14	6
16	66,69	6
17	77,24	7
18	87,79	7
19	98,34	7
20	108,89	8
21	119,44	8
22	129,99	8
23	140,54	8
24	151,09	8
25	161,64	9
26	172,19	9
27	13,94	5

CARGA / DESLOCAMENTO PARA LVDT 1D.1		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,00	0
2	1,28	0
3	2,55	0
4	3,81	-1
5	5,10	-1
6	6,39	-1
7	7,66	-1
8	8,96	-1
9	10,22	-2
10	11,11	-2
11	13,94	-2
12	24,49	-4
13	35,04	-5
14	45,59	-6
15	56,14	-7
16	66,69	-7
17	77,24	-8
18	87,79	-8
19	98,34	-9
20	108,89	-9
21	119,44	-10
22	129,99	-10
23	140,54	-10
24	151,09	-11
25	161,64	-11
26	172,19	-12
27	13,94	-6

**QUADRO E.21 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 1D.2 e 1D.3**

CARGA / DESLOCAMENTO PARA LVDT 2D.2		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,00	0
2	1,28	0
3	2,55	0
4	3,81	0
5	5,10	0
6	6,39	0
7	7,66	0
8	8,96	1
9	10,22	1
10	11,11	1
11	13,94	1
12	24,49	2
13	35,04	3
14	45,59	4
15	56,14	4
16	66,69	5
17	77,24	5
18	87,79	5
19	98,34	6
20	108,89	6
21	119,44	6
22	129,99	7
23	140,54	7
24	151,09	7
25	161,64	7
26	172,19	8
27	13,94	3

CARGA / DESLOCAMENTO PARA LVDT 2D.3		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,00	0
2	1,28	0
3	2,55	0
4	3,81	0
5	5,10	1
6	6,39	1
7	7,66	1
8	8,96	1
9	10,22	1
10	11,11	1
11	13,94	2
12	24,49	3
13	35,04	4
14	45,59	4
15	56,14	5
16	66,69	5
17	77,24	6
18	87,79	6
19	98,34	6
20	108,89	7
21	119,44	7
22	129,99	7
23	140,54	7
24	151,09	8
25	161,64	8
26	172,19	8
27	13,94	4

**QUADRO E.22 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 3D.4 e 3D.5**

CARGA / DESLOCAMENTO PARA LVDT 3D.4		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,00	0
2	1,28	0
3	2,55	0
4	3,81	0
5	5,10	0
6	6,39	1
7	7,66	1
8	8,96	1
9	10,22	2
10	11,11	2
11	13,94	2
12	24,49	4
13	35,04	4
14	45,59	5
15	56,14	6
16	66,69	6
17	77,24	6
18	87,79	6
19	98,34	7
20	108,89	7
21	119,44	7
22	129,99	7
23	140,54	7
24	151,09	8
25	161,64	8
26	172,19	8
27	13,94	5

CARGA / DESLOCAMENTO PARA LVDT 3D.5		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,00	0
2	1,28	0
3	2,55	0
4	3,81	1
5	5,10	1
6	6,39	1
7	7,66	1
8	8,96	2
9	10,22	2
10	11,11	2
11	13,94	3
12	24,49	4
13	35,04	4
14	45,59	5
15	56,14	5
16	66,69	6
17	77,24	6
18	87,79	6
19	98,34	6
20	108,89	6
21	119,44	7
22	129,99	7
23	140,54	7
24	151,09	7
25	161,64	7
26	172,19	7
27	13,94	5

**QUADRO E.23 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 4D.6 e 4D.7**

CARGA / DESLOCAMENTO PARA LVDT 4D.6		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,00	0
2	1,28	0
3	2,55	0
4	3,81	0
5	5,10	0
6	6,39	0
7	7,66	0
8	8,96	1
9	10,22	1
10	11,11	1
11	13,94	1
12	24,49	2
13	35,04	3
14	45,59	4
15	56,14	5
16	66,69	5
17	77,24	6
18	87,79	6
19	98,34	6
20	108,89	6
21	119,44	7
22	129,99	7
23	140,54	7
24	151,09	7
25	161,64	7
26	172,19	8
27	13,94	4

CARGA / DESLOCAMENTO PARA LVDT 4D.7		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,00	0
2	1,28	0
3	2,55	1
4	3,81	1
5	5,10	1
6	6,39	1
7	7,66	1
8	8,96	1
9	10,22	2
10	11,11	2
11	13,94	2
12	24,49	3
13	35,04	4
14	45,59	5
15	56,14	6
16	66,69	6
17	77,24	6
18	87,79	7
19	98,34	7
20	108,89	7
21	119,44	7
22	129,99	7
23	140,54	8
24	151,09	8
25	161,64	8
26	172,19	8
27	13,94	5

**QUADRO E.24 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 5D.8 e 5D.9**

CARGA / DESLOCAMENTO PARA LVDT 5D.8		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,00	0
2	1,28	0
3	2,55	0
4	3,81	0
5	5,10	0
6	6,39	0
7	7,66	0
8	8,96	0
9	10,22	0
10	11,11	0
11	13,94	0
12	24,49	0
13	35,04	0
14	45,59	0
15	56,14	0
16	66,69	0
17	77,24	0
18	87,79	0
19	98,34	0
20	108,89	0
21	119,44	0
22	129,99	1
23	140,54	1
24	151,09	1
25	161,64	1
26	172,19	1
27	13,94	0

CARGA / DESLOCAMENTO PARA LVDT 5D.9		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,00	0
2	1,28	0
3	2,55	0
4	3,81	0
5	5,10	0
6	6,39	0
7	7,66	0
8	8,96	0
9	10,22	0
10	11,11	0
11	13,94	0
12	24,49	0
13	35,04	0
14	45,59	0
15	56,14	0
16	66,69	0
17	77,24	0
18	87,79	0
19	98,34	0
20	108,89	-1
21	119,44	-1
22	129,99	-1
23	140,54	-1
24	151,09	-1
25	161,64	-1
26	172,19	-1
27	13,94	0

## TREMONTA TIPO 2 (ENRIJECIDA)

**QUADRO E.25 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1E.0 e 1E.1**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.0		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	58
2	1,65	84
3	2,50	66
4	3,35	73
5	4,17	48
6	5,02	89
7	5,86	89
8	6,70	87
9	7,53	71
10	8,40	87
11	9,26	86
12	10,11	87
13	10,89	94
14	13,63	120
15	24,18	90
16	34,73	141
17	45,28	187
18	55,83	227
19	66,38	281
20	76,93	283
21	87,48	321
22	98,03	328
23	108,58	359
24	119,13	336
25	129,68	371
26	140,23	406
27	150,78	426
28	161,33	433
29	171,88	470
30	182,43	509
31	13,63	339

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.1		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	50
2	1,65	49
3	2,50	36
4	3,35	65
5	4,17	14
6	5,02	47
7	5,86	53
8	6,70	41
9	7,53	25
10	8,40	61
11	9,26	55
12	10,11	35
13	10,89	62
14	13,63	61
15	24,18	44
16	34,73	93
17	45,28	144
18	55,83	212
19	66,38	247
20	76,93	333
21	87,48	361
22	98,03	459
23	108,58	455
24	119,13	477
25	129,68	549
26	140,23	583
27	150,78	619
28	161,33	638
29	171,88	699
30	182,43	786
31	13,63	360

**QUADRO E.26 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1E.2 e 1E.3**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.2		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	42
2	1,65	58
3	2,50	53
4	3,35	67
5	4,17	28
6	5,02	43
7	5,86	43
8	6,70	28
9	7,53	41
10	8,40	19
11	9,26	48
12	10,11	16
13	10,89	42
14	13,63	28
15	24,18	-9
16	34,73	20
17	45,28	6
18	55,83	26
19	66,38	-6
20	76,93	27
21	87,48	21
22	98,03	2
23	108,58	30
24	119,13	0
25	129,68	-2
26	140,23	19
27	150,78	-16
28	161,33	-27
29	171,88	2
30	182,43	-16
31	13,63	13

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.3		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	44
2	1,65	69
3	2,50	44
4	3,35	46
5	4,17	40
6	5,02	66
7	5,86	82
8	6,70	50
9	7,53	58
10	8,40	66
11	9,26	70
12	10,11	53
13	10,89	67
14	13,63	91
15	24,18	46
16	34,73	179
17	45,28	189
18	55,83	202
19	66,38	192
20	76,93	225
21	87,48	268
22	98,03	282
23	108,58	253
24	119,13	255
25	129,68	278
26	140,23	302
27	150,78	295
28	161,33	305
29	171,88	304
30	182,43	338
31	13,63	206



**QUADRO E.27 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1E.4 e 1E.5**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.4		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	51
2	1,65	60
3	2,50	57
4	3,35	66
5	4,17	54
6	5,02	77
7	5,86	82
8	6,70	52
9	7,53	59
10	8,40	71
11	9,26	74
12	10,11	74
13	10,89	75
14	13,63	88
15	24,18	67
16	34,73	123
17	45,28	145
18	55,83	175
19	66,38	136
20	76,93	210
21	87,48	197
22	98,03	250
23	108,58	259
24	119,13	223
25	129,68	244
26	140,23	249
27	150,78	233
28	161,33	241
29	171,88	231
30	182,43	266
31	13,63	220

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1E.5		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	40
2	1,65	71
3	2,50	80
4	3,35	89
5	4,17	78
6	5,02	82
7	5,86	96
8	6,70	94
9	7,53	48
10	8,40	89
11	9,26	99
12	10,11	100
13	10,89	121
14	13,63	103
15	24,18	120
16	34,73	186
17	45,28	166
18	55,83	212
19	66,38	193
20	76,93	200
21	87,48	238
22	98,03	208
23	108,58	157
24	119,13	180
25	129,68	175
26	140,23	205
27	150,78	191
28	161,33	184
29	171,88	189
30	182,43	213
31	13,63	96

**QUADRO E.28 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1SE.6 e 1SI.7**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1SE.6		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	44
2	1,65	62
3	2,50	69
4	3,35	64
5	4,17	60
6	5,02	66
7	5,86	63
8	6,70	62
9	7,53	44
10	8,40	52
11	9,26	51
12	10,11	34
13	10,89	28
14	13,63	33
15	24,18	19
16	34,73	-41
17	45,28	-58
18	55,83	-94
19	66,38	-174
20	76,93	-248
21	87,48	-257
22	98,03	-331
23	108,58	-366
24	119,13	-434
25	129,68	-495
26	140,23	-502
27	150,78	-565
28	161,33	-587
29	171,88	-622
30	182,43	-618
31	13,63	92

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1SI.7		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	24
2	1,65	59
3	2,50	53
4	3,35	57
5	4,17	50
6	5,02	61
7	5,86	75
8	6,70	45
9	7,53	49
10	8,40	63
11	9,26	78
12	10,11	84
13	10,89	85
14	13,63	68
15	24,18	84
16	34,73	185
17	45,28	250
18	55,83	301
19	66,38	352
20	76,93	398
21	87,48	446
22	98,03	495
23	108,58	518
24	119,13	532
25	129,68	575
26	140,23	648
27	150,78	667
28	161,33	697
29	171,88	710
30	182,43	793
31	13,63	124

QUADRO E.29 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1SE.8 e 1SI.9

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1SE.8		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	25
2	1,65	43
3	2,50	26
4	3,35	35
5	4,17	23
6	5,02	43
7	5,86	27
8	6,70	7
9	7,53	-8
10	8,40	7
11	9,26	3
12	10,11	-13
13	10,89	1
14	13,63	-22
15	24,18	-11
16	34,73	-45
17	45,28	-104
18	55,83	-120
19	66,38	-202
20	76,93	-227
21	87,48	-238
22	98,03	-295
23	108,58	-345
24	119,13	-412
25	129,68	-448
26	140,23	-460
27	150,78	-497
28	161,33	-558
29	171,88	-585
30	182,43	-546
31	13,63	12

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1SI.9		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	13
2	1,65	61
3	2,50	63
4	3,35	74
5	4,17	72
6	5,02	85
7	5,86	95
8	6,70	88
9	7,53	65
10	8,40	93
11	9,26	86
12	10,11	87
13	10,89	99
14	13,63	109
15	24,18	82
16	34,73	188
17	45,28	244
18	55,83	277
19	66,38	303
20	76,93	348
21	87,48	385
22	98,03	430
23	108,58	403
24	119,13	433
25	129,68	441
26	140,23	501
27	150,78	528
28	161,33	542
29	171,88	598
30	182,43	622
31	13,63	113

**QUADRO E.30 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1SE.10 e 1SI.11**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1SE.10		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	10
2	1,65	40
3	2,50	21
4	3,35	10
5	4,17	10
6	5,02	12
7	5,86	23
8	6,70	-5
9	7,53	-14
10	8,40	12
11	9,26	2
12	10,11	-4
13	10,89	-9
14	13,63	-11
15	24,18	-69
16	34,73	-37
17	45,28	-76
18	55,83	-70
19	66,38	-106
20	76,93	-146
21	87,48	-163
22	98,03	-170
23	108,58	-207
24	119,13	-250
25	129,68	-293
26	140,23	-271
27	150,78	-317
28	161,33	-342
29	171,88	-392
30	182,43	-338
31	13,63	-14

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1SI.11		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	51
2	1,65	59
3	2,50	74
4	3,35	106
5	4,17	72
6	5,02	96
7	5,86	118
8	6,70	90
9	7,53	55
10	8,40	10
11	9,26	107
12	10,11	101
13	10,89	116
14	13,63	112
15	24,18	102
16	34,73	178
17	45,28	193
18	55,83	242
19	66,38	231
20	76,93	253
21	87,48	279
22	98,03	287
23	108,58	296
24	119,13	293
25	129,68	342
26	140,23	367
27	150,78	346
28	161,33	395
29	171,88	402
30	182,43	416
31	13,63	189

**QUADRO E.31 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2E.12 e 2E.13**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.12		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	60
2	1,65	81
3	2,50	81
4	3,35	40
5	4,17	41
6	5,02	40
7	5,86	54
8	6,70	19
9	7,53	2
10	8,40	3
11	9,26	18
12	10,11	48
13	10,89	92
14	13,63	55
15	24,18	72
16	34,73	247
17	45,28	255
18	55,83	276
19	66,38	231
20	76,93	215
21	87,48	129
22	98,03	121
23	108,58	63
24	119,13	27
25	129,68	9
26	140,23	-6
27	150,78	-44
28	161,33	-44
29	171,88	-55
30	182,43	-60
31	13,63	84

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.13		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	21
2	1,65	25
3	2,50	62
4	3,35	36
5	4,17	42
6	5,02	29
7	5,86	57
8	6,70	25
9	7,53	13
10	8,40	31
11	9,26	23
12	10,11	46
13	10,89	70
14	13,63	52
15	24,18	54
16	34,73	226
17	45,28	347
18	55,83	495
19	66,38	575
20	76,93	696
21	87,48	797
22	98,03	877
23	108,58	889
24	119,13	918
25	129,68	972
26	140,23	1020
27	150,78	1039
28	161,33	1099
29	171,88	1096
30	182,43	1148
31	13,63	704

**QUADRO E.32 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2E.14 e 2E.15**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.14		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	26
2	1,65	79
3	2,50	70
4	3,35	58
5	4,17	36
6	5,02	74
7	5,86	67
8	6,70	59
9	7,53	40
10	8,40	39
11	9,26	41
12	10,11	44
13	10,89	26
14	13,63	19
15	24,18	12
16	34,73	25
17	45,28	44
18	55,83	66
19	66,38	89
20	76,93	90
21	87,48	153
22	98,03	141
23	108,58	159
24	119,13	151
25	129,68	187
26	140,23	218
27	150,78	224
28	161,33	242
29	171,88	250
30	182,43	303
31	13,63	64

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.15		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	23
2	1,65	67
3	2,50	59
4	3,35	53
5	4,17	68
6	5,02	85
7	5,86	98
8	6,70	103
9	7,53	109
10	8,40	126
11	9,26	140
12	10,11	141
13	10,89	134
14	13,63	134
15	24,18	180
16	34,73	203
17	45,28	235
18	55,83	243
19	66,38	205
20	76,93	192
21	87,48	230
22	98,03	211
23	108,58	196
24	119,13	178
25	129,68	188
26	140,23	213
27	150,78	195
28	161,33	231
29	171,88	215
30	182,43	249
31	13,63	170

**QUADRO E.33 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2E.16 e 2E.17**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.16		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	31
2	1,65	78
3	2,50	83
4	3,35	64
5	4,17	49
6	5,02	84
7	5,86	96
8	6,70	82
9	7,53	58
10	8,40	112
11	9,26	98
12	10,11	94
13	10,89	110
14	13,63	128
15	24,18	91
16	34,73	183
17	45,28	207
18	55,83	274
19	66,38	298
20	76,93	319
21	87,48	373
22	98,03	406
23	108,58	399
24	119,13	415
25	129,68	416
26	140,23	454
27	150,78	445
28	161,33	488
29	171,88	499
30	182,43	490
31	13,63	244

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2E.17		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	58
2	1,65	75
3	2,50	65
4	3,35	81
5	4,17	74
6	5,02	85
7	5,86	85
8	6,70	84
9	7,53	64
10	8,40	73
11	9,26	93
12	10,11	98
13	10,89	95
14	13,63	87
15	24,18	48
16	34,73	114
17	45,28	159
18	55,83	179
19	66,38	122
20	76,93	159
21	87,48	152
22	98,03	146
23	108,58	154
24	119,13	153
25	129,68	168
26	140,23	195
27	150,78	171
28	161,33	196
29	171,88	214
30	182,43	223
31	13,63	188

**QUADRO E.34 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1SE.18 e 1SI.19**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1SE.18		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	15
2	1,65	46
3	2,50	55
4	3,35	55
5	4,17	53
6	5,02	70
7	5,86	68
8	6,70	45
9	7,53	33
10	8,40	43
11	9,26	59
12	10,11	16
13	10,89	29
14	13,63	41
15	24,18	2
16	34,73	-19
17	45,28	-105
18	55,83	-86
19	66,38	-162
20	76,93	-188
21	87,48	-204
22	98,03	-235
23	108,58	-296
24	119,13	-334
25	129,68	-374
26	140,23	-380
27	150,78	-451
28	161,33	-422
29	171,88	-437
30	182,43	-426
31	13,63	67

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1SI.19		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	44
2	1,65	44
3	2,50	68
4	3,35	55
5	4,17	40
6	5,02	64
7	5,86	70
8	6,70	78
9	7,53	68
10	8,40	84
11	9,26	88
12	10,11	72
13	10,89	110
14	13,63	93
15	24,18	82
16	34,73	201
17	45,28	222
18	55,83	287
19	66,38	292
20	76,93	339
21	87,48	368
22	98,03	424
23	108,58	430
24	119,13	457
25	129,68	474
26	140,23	511
27	150,78	503
28	161,33	498
29	171,88	514
30	182,43	593
31	13,63	177



QUADRO E.35 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1SE.20 e 1SI.21

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1SE.20		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	63
2	1,65	52
3	2,50	58
4	3,35	49
5	4,17	38
6	5,02	36
7	5,86	39
8	6,70	45
9	7,53	23
10	8,40	48
11	9,26	26
12	10,11	22
13	10,89	21
14	13,63	33
15	24,18	-8
16	34,73	-46
17	45,28	-88
18	55,83	-75
19	66,38	-144
20	76,93	-199
21	87,48	-200
22	98,03	-244
23	108,58	-281
24	119,13	-316
25	129,68	-344
26	140,23	-353
27	150,78	-399
28	161,33	-421
29	171,88	-437
30	182,43	-396
31	13,63	28

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1SI.21		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	55
2	1,65	38
3	2,50	48
4	3,35	70
5	4,17	46
6	5,02	68
7	5,86	62
8	6,70	63
9	7,53	44
10	8,40	63
11	9,26	71
12	10,11	58
13	10,89	68
14	13,63	38
15	24,18	28
16	34,73	59
17	45,28	71
18	55,83	79
19	66,38	54
20	76,93	54
21	87,48	61
22	98,03	51
23	108,58	40
24	119,13	-8
25	129,68	-1
26	140,23	-9
27	150,78	-34
28	161,33	-23
29	171,88	-75
30	182,43	-106
31	13,63	44

**QUADRO E.36 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1SE.22 e 1SI.23**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1SE.22		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	56
2	1,65	22
3	2,50	58
4	3,35	25
5	4,17	0
6	5,02	8
7	5,86	18
8	6,70	11
9	7,53	1
10	8,40	-3
11	9,26	9
12	10,11	-3
13	10,89	-10
14	13,63	-43
15	24,18	-28
16	34,73	-54
17	45,28	-76
18	55,83	-90
19	66,38	-136
20	76,93	-146
21	87,48	-148
22	98,03	-111
23	108,58	-207
24	119,13	-242
25	129,68	-257
26	140,23	-252
27	150,78	-298
28	161,33	-331
29	171,88	-322
30	182,43	-311
31	13,63	-59

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1SI.23		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	62
2	1,65	82
3	2,50	75
4	3,35	81
5	4,17	81
6	5,02	94
7	5,86	99
8	6,70	114
9	7,53	96
10	8,40	99
11	9,26	129
12	10,11	109
13	10,89	131
14	13,63	107
15	24,18	120
16	34,73	151
17	45,28	151
18	55,83	218
19	66,38	217
20	76,93	214
21	87,48	248
22	98,03	275
23	108,58	276
24	119,13	274
25	129,68	281
26	140,23	291
27	150,78	287
28	161,33	343
29	171,88	361
30	182,43	401
31	13,63	168

**QUADRO E.37 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1I.24 e 1I.25**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1I.24		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	13
2	1,65	8
3	2,50	19
4	3,35	20
5	4,17	16
6	5,02	26
7	5,86	35
8	6,70	17
9	7,53	0
10	8,40	27
11	9,26	13
12	10,11	2
13	10,89	10
14	13,63	-8
15	24,18	-37
16	34,73	-147
17	45,28	-181
18	55,83	-237
19	66,38	-312
20	76,93	-393
21	87,48	-397
22	98,03	-430
23	108,58	-440
24	119,13	-488
25	129,68	-510
26	140,23	-470
27	150,78	-506
28	161,33	-488
29	171,88	-452
30	182,43	-427
31	13,63	-238

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1I.25		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	45
2	1,65	45
3	2,50	42
4	3,35	48
5	4,17	39
6	5,02	41
7	5,86	64
8	6,70	42
9	7,53	30
10	8,40	45
11	9,26	41
12	10,11	33
13	10,89	58
14	13,63	32
15	24,18	38
16	34,73	16
17	45,28	-14
18	55,83	-30
19	66,38	-121
20	76,93	-143
21	87,48	-177
22	98,03	-224
23	108,58	-284
24	119,13	-354
25	129,68	-395
26	140,23	-447
27	150,78	-520
28	161,33	-552
29	171,88	-614
30	182,43	-670
31	13,63	-157

**QUADRO E.38 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 11.26 e 11.27**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 11.26		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	33
2	1,65	34
3	2,50	26
4	3,35	42
5	4,17	21
6	5,02	31
7	5,86	50
8	6,70	48
9	7,53	40
10	8,40	63
11	9,26	74
12	10,11	64
13	10,89	69
14	13,63	53
15	24,18	54
16	34,73	207
17	45,28	279
18	55,83	355
19	66,38	351
20	76,93	411
21	87,48	471
22	98,03	503
23	108,58	509
24	119,13	535
25	129,68	558
26	140,23	603
27	150,78	607
28	161,33	661
29	171,88	677
30	182,43	753
31	13,63	353

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 11.27		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	34
2	1,65	22
3	2,50	36
4	3,35	32
5	4,17	3
6	5,02	27
7	5,86	52
8	6,70	30
9	7,53	19
10	8,40	39
11	9,26	29
12	10,11	18
13	10,89	35
14	13,63	18
15	24,18	6
16	34,73	-27
17	45,28	-33
18	55,83	-30
19	66,38	-48
20	76,93	-29
21	87,48	-44
22	98,03	-24
23	108,58	-58
24	119,13	-58
25	129,68	-83
26	140,23	-72
27	150,78	-69
28	161,33	-52
29	171,88	-61
30	182,43	-66
31	13,63	75

**QUADRO E.39 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1I.28 e 1I.29**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1I.28		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	55
2	1,65	57
3	2,50	47
4	3,35	68
5	4,17	69
6	5,02	97
7	5,86	115
8	6,70	87
9	7,53	71
10	8,40	97
11	9,26	112
12	10,11	102
13	10,89	134
14	13,63	118
15	24,18	138
16	34,73	191
17	45,28	227
18	55,83	256
19	66,38	247
20	76,93	262
21	87,48	288
22	98,03	264
23	108,58	271
24	119,13	275
25	129,68	249
26	140,23	289
27	150,78	287
28	161,33	313
29	171,88	310
30	182,43	339
31	13,63	232

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1I.29		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	20
2	1,65	69
3	2,50	54
4	3,35	64
5	4,17	34
6	5,02	47
7	5,86	56
8	6,70	43
9	7,53	34
10	8,40	42
11	9,26	69
12	10,11	42
13	10,89	71
14	13,63	38
15	24,18	48
16	34,73	104
17	45,28	113
18	55,83	157
19	66,38	114
20	76,93	194
21	87,48	186
22	98,03	214
23	108,58	210
24	119,13	211
25	129,68	200
26	140,23	247
27	150,78	230
28	161,33	253
29	171,88	282
30	182,43	299
31	13,63	178

**QUADRO E.40 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 1I.30 e 1I.31**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1I.30		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	63
2	1,65	62
3	2,50	45
4	3,35	34
5	4,17	22
6	5,02	39
7	5,86	67
8	6,70	55
9	7,53	35
10	8,40	37
11	9,26	51
12	10,11	39
13	10,89	54
14	13,63	37
15	24,18	27
16	34,73	41
17	45,28	64
18	55,83	112
19	66,38	37
20	76,93	51
21	87,48	90
22	98,03	63
23	108,58	39
24	119,13	64
25	129,68	65
26	140,23	111
27	150,78	110
28	161,33	104
29	171,88	120
30	182,43	160
31	13,63	94

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 1I.31		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	31
2	1,65	36
3	2,50	42
4	3,35	64
5	4,17	66
6	5,02	82
7	5,86	90
8	6,70	77
9	7,53	75
10	8,40	97
11	9,26	81
12	10,11	69
13	10,89	104
14	13,63	73
15	24,18	61
16	34,73	101
17	45,28	112
18	55,83	150
19	66,38	150
20	76,93	150
21	87,48	175
22	98,03	167
23	108,58	139
24	119,13	127
25	129,68	160
26	140,23	149
27	150,78	145
28	161,33	136
29	171,88	156
30	182,43	164
31	13,63	18

**QUADRO E.41 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2I.32 e 2I.33**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.32		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	27
2	1,65	30
3	2,50	39
4	3,35	39
5	4,17	42
6	5,02	72
7	5,86	67
8	6,70	97
9	7,53	78
10	8,40	10
11	9,26	101
12	10,11	84
13	10,89	76
14	13,63	39
15	24,18	35
16	34,73	18
17	45,28	34
18	55,83	129
19	66,38	156
20	76,93	215
21	87,48	269
22	98,03	304
23	108,58	322
24	119,13	357
25	129,68	350
26	140,23	412
27	150,78	400
28	161,33	423
29	171,88	443
30	182,43	503
31	13,63	286

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.33		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	53
2	1,65	76
3	2,50	49
4	3,35	76
5	4,17	39
6	5,02	47
7	5,86	60
8	6,70	43
9	7,53	18
10	8,40	36
11	9,26	39
12	10,11	63
13	10,89	68
14	13,63	75
15	24,18	68
16	34,73	180
17	45,28	255
18	55,83	384
19	66,38	412
20	76,93	503
21	87,48	547
22	98,03	618
23	108,58	662
24	119,13	666
25	129,68	707
26	140,23	763
27	150,78	757
28	161,33	810
29	171,88	816
30	182,43	831
31	13,63	440

**QUADRO E.42 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2I.34 e 2I.35**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.34		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	26
2	1,65	53
3	2,50	43
4	3,35	51
5	4,17	26
6	5,02	54
7	5,86	51
8	6,70	51
9	7,53	31
10	8,40	67
11	9,26	81
12	10,11	72
13	10,89	90
14	13,63	78
15	24,18	81
16	34,73	135
17	45,28	181
18	55,83	246
19	66,38	269
20	76,93	276
21	87,48	332
22	98,03	334
23	108,58	352
24	119,13	388
25	129,68	376
26	140,23	427
27	150,78	410
28	161,33	417
29	171,88	432
30	182,43	469
31	13,63	203

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.35		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	68
2	1,65	73
3	2,50	53
4	3,35	48
5	4,17	38
6	5,02	79
7	5,86	74
8	6,70	90
9	7,53	76
10	8,40	107
11	9,26	104
12	10,11	87
13	10,89	127
14	13,63	60
15	24,18	109
16	34,73	109
17	45,28	135
18	55,83	167
19	66,38	118
20	76,93	111
21	87,48	147
22	98,03	119
23	108,58	116
24	119,13	122
25	129,68	133
26	140,23	123
27	150,78	102
28	161,33	148
29	171,88	132
30	182,43	185
31	13,63	41



**QUADRO E.43 - Deformações = f(cargas) para extensômetros 2I.36 e 2I.37**

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.36		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	62
2	1,65	72
3	2,50	57
4	3,35	57
5	4,17	63
6	5,02	58
7	5,86	67
8	6,70	86
9	7,53	49
10	8,40	66
11	9,26	61
12	10,11	51
13	10,89	79
14	13,63	54
15	24,18	39
16	34,73	80
17	45,28	90
18	55,83	127
19	66,38	109
20	76,93	93
21	87,48	116
22	98,03	122
23	108,58	100
24	119,13	106
25	129,68	119
26	140,23	149
27	150,78	128
28	161,33	137
29	171,88	170
30	182,43	175
31	13,63	-8

CARGA/DEFORMAÇÃO PARA EXTENSÔMETRO 2I.37		
LEITURA	CARGA (kN)	Deformação (E-6)
1	0,82	63
2	1,65	57
3	2,50	61
4	3,35	126
5	4,17	122
6	5,02	144
7	5,86	146
8	6,70	160
9	7,53	137
10	8,40	168
11	9,26	144
12	10,11	151
13	10,89	179
14	13,63	160
15	24,18	163
16	34,73	217
17	45,28	256
18	55,83	280
19	66,38	264
20	76,93	255
21	87,48	296
22	98,03	296
23	108,58	291
24	119,13	299
25	129,68	281
26	140,23	329
27	150,78	326
28	161,33	312
29	171,88	355
30	182,43	388
31	13,63	241

QUADRO E.44 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 1D.0 e 1D.1

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 1D.0		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	1
17	45,28	1
18	55,83	1
19	66,38	2
20	76,93	2
21	87,48	2
22	98,03	2
23	108,58	3
24	119,13	3
25	129,68	3
26	140,23	3
27	150,78	3
28	161,33	4
29	171,88	4
30	182,43	4
31	13,63	1

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 1D.1		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	0
17	45,28	-1
18	55,83	-1
19	66,38	-1
20	76,93	-1
21	87,48	-1
22	98,03	-1
23	108,58	-1
24	119,13	-1
25	129,68	-2
26	140,23	-2
27	150,78	-2
28	161,33	-2
29	171,88	-2
30	182,43	-2
31	13,63	0

**QUADRO E.45 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 1D.2 e 1D.3**

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 1D.2		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	1
17	45,28	2
18	55,83	2
19	66,38	3
20	76,93	3
21	87,48	3
22	98,03	3
23	108,58	3
24	119,13	4
25	129,68	4
26	140,23	4
27	150,78	4
28	161,33	4
29	171,88	4
30	182,43	4
31	13,63	2

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 1D.3		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	0
17	45,28	0
18	55,83	0
19	66,38	1
20	76,93	1
21	87,48	1
22	98,03	1
23	108,58	1
24	119,13	1
25	129,68	1
26	140,23	1
27	150,78	1
28	161,33	1
29	171,88	1
30	182,43	1
31	13,63	0

**QUADRO E.46 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 1D.4 e 1D.5**

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 1D.4		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	1
17	45,28	1
18	55,83	1
19	66,38	1
20	76,93	1
21	87,48	1
22	98,03	2
23	108,58	2
24	119,13	2
25	129,68	2
26	140,23	2
27	150,78	2
28	161,33	2
29	171,88	2
30	182,43	3
31	13,63	0

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 1D.5		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	0
17	45,28	0
18	55,83	0
19	66,38	0
20	76,93	0
21	87,48	0
22	98,03	0
23	108,58	0
24	119,13	0
25	129,68	0
26	140,23	0
27	150,78	0
28	161,33	0
29	171,88	0
30	182,43	0
31	13,63	0

**QUADRO E.47 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 1D.6 e 1D.7**

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 1D.6		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	-1
5	4,17	-1
6	5,02	-1
7	5,86	-1
8	6,70	-1
9	7,53	-1
10	8,40	-1
11	9,26	-1
12	10,11	-1
13	10,89	-1
14	13,63	-1
15	24,18	-1
16	34,73	-2
17	45,28	-2
18	55,83	-3
19	66,38	-3
20	76,93	-3
21	87,48	-4
22	98,03	-5
23	108,58	-6
24	119,13	-6
25	129,68	-6
26	140,23	-7
27	150,78	-7
28	161,33	-7
29	171,88	-7
30	182,43	-7
31	13,63	-6

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 2D.7		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	0
17	45,28	0
18	55,83	0
19	66,38	0
20	76,93	0
21	87,48	0
22	98,03	0
23	108,58	0
24	119,13	0
25	129,68	0
26	140,23	0
27	150,78	0
28	161,33	0
29	171,88	0
30	182,43	1
31	13,63	0

**QUADRO E.48 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 2D.8 e 2D.9**

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 2D.8		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	0
17	45,28	0
18	55,83	0
19	66,38	0
20	76,93	0
21	87,48	0
22	98,03	0
23	108,58	0
24	119,13	0
25	129,68	0
26	140,23	0
27	150,78	0
28	161,33	0
29	171,88	0
30	182,43	0
31	13,63	0

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 2D.9		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	0
17	45,28	0
18	55,83	0
19	66,38	0
20	76,93	0
21	87,48	0
22	98,03	0
23	108,58	0
24	119,13	0
25	129,68	0
26	140,23	0
27	150,78	0
28	161,33	0
29	171,88	0
30	182,43	0
31	13,63	0

**QUADRO E.49 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 3D.10 e 3D.11**

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 3D.10		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	0
17	45,28	1
18	55,83	1
19	66,38	1
20	76,93	1
21	87,48	1
22	98,03	2
23	108,58	2
24	119,13	2
25	129,68	2
26	140,23	2
27	150,78	2
28	161,33	2
29	171,88	3
30	182,43	3
31	13,63	1

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 3D.11		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	1
17	45,28	1
18	55,83	2
19	66,38	2
20	76,93	2
21	87,48	2
22	98,03	3
23	108,58	3
24	119,13	3
25	129,68	3
26	140,23	3
27	150,78	4
28	161,33	4
29	171,88	4
30	182,43	4
31	13,63	2

**QUADRO E.50 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 3D.12 e 3D.13**

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 3D.12		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	1
6	5,02	1
7	5,86	1
8	6,70	1
9	7,53	1
10	8,40	1
11	9,26	1
12	10,11	1
13	10,89	1
14	13,63	1
15	24,18	1
16	34,73	1
17	45,28	1
18	55,83	1
19	66,38	1
20	76,93	1
21	87,48	1
22	98,03	2
23	108,58	2
24	119,13	2
25	129,68	2
26	140,23	2
27	150,78	2
28	161,33	2
29	171,88	2
30	182,43	3
31	13,63	1

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 3D.13		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	2
3	2,50	2
4	3,35	2
5	4,17	2
6	5,02	2
7	5,86	3
8	6,70	3
9	7,53	3
10	8,40	3
11	9,26	3
12	10,11	3
13	10,89	3
14	13,63	3
15	24,18	4
16	34,73	5
17	45,28	5
18	55,83	6
19	66,38	6
20	76,93	6
21	87,48	6
22	98,03	6
23	108,58	6
24	119,13	6
25	129,68	6
26	140,23	6
27	150,78	6
28	161,33	6
29	171,88	6
30	182,43	6
31	13,63	6



**QUADRO E.51 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 4D.14 e 4D.15**

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 4D.14		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	0
17	45,28	1
18	55,83	1
19	66,38	1
20	76,93	2
21	87,48	2
22	98,03	3
23	108,58	3
24	119,13	3
25	129,68	4
26	140,23	4
27	150,78	4
28	161,33	5
29	171,88	5
30	182,43	5
31	13,63	2

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 4D.15		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	-1
14	13,63	-1
15	24,18	-1
16	34,73	-1
17	45,28	-2
18	55,83	-2
19	66,38	-2
20	76,93	-3
21	87,48	-3
22	98,03	-3
23	108,58	-3
24	119,13	-4
25	129,68	-4
26	140,23	-4
27	150,78	-4
28	161,33	-5
29	171,88	-5
30	182,43	-5
31	13,63	-2

QUADRO E.52 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 4D.16 e 4D.17

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 4D.16		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	1
6	5,02	1
7	5,86	1
8	6,70	1
9	7,53	1
10	8,40	1
11	9,26	1
12	10,11	1
13	10,89	1
14	13,63	1
15	24,18	3
16	34,73	4
17	45,28	4
18	55,83	4
19	66,38	5
20	76,93	5
21	87,48	5
22	98,03	5
23	108,58	5
24	119,13	5
25	129,68	5
26	140,23	6
27	150,78	6
28	161,33	6
29	171,88	6
30	182,43	6
31	13,63	4

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 4D.17		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	-1
6	5,02	-1
7	5,86	-1
8	6,70	-1
9	7,53	-1
10	8,40	-1
11	9,26	-1
12	10,11	-1
13	10,89	-1
14	13,63	-1
15	24,18	-2
16	34,73	-3
17	45,28	-4
18	55,83	-4
19	66,38	-4
20	76,93	-5
21	87,48	-5
22	98,03	-5
23	108,58	-5
24	119,13	-5
25	129,68	-5
26	140,23	-6
27	150,78	-6
28	161,33	-6
29	171,88	-6
30	182,43	-6
31	13,63	-4

**QUADRO E.53 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 5D.18 e 5D.19**

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 5D.18		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	0
17	45,28	0
18	55,83	0
19	66,38	0
20	76,93	0
21	87,48	0
22	98,03	0
23	108,58	0
24	119,13	1
25	129,68	1
26	140,23	1
27	150,78	1
28	161,33	1
29	171,88	1
30	182,43	1
31	13,63	-1

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 5D.19		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	0
17	45,28	0
18	55,83	0
19	66,38	0
20	76,93	0
21	87,48	0
22	98,03	0
23	108,58	0
24	119,13	-1
25	129,68	-1
26	140,23	-1
27	150,78	-1
28	161,33	-1
29	171,88	-1
30	182,43	-1
31	13,63	1

**QUADRO E.54 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 5D.20 e 5D.21**

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 5D.20		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	0
17	45,28	0
18	55,83	0
19	66,38	0
20	76,93	0
21	87,48	0
22	98,03	0
23	108,58	-1
24	119,13	-1
25	129,68	-1
26	140,23	-1
27	150,78	-1
28	161,33	-1
29	171,88	-1
30	182,43	-1
31	13,63	1

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 5D.21		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	0
17	45,28	0
18	55,83	0
19	66,38	0
20	76,93	0
21	87,48	0
22	98,03	0
23	108,58	0
24	119,13	0
25	129,68	0
26	140,23	0
27	150,78	0
28	161,33	0
29	171,88	1
30	182,43	1
31	13,63	-1

**QUADRO E.55 - Deslocamentos = f(cargas) para LVDTs 5D.22 e 5D.23**

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 5D.22		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	0
17	45,28	0
18	55,83	0
19	66,38	0
20	76,93	0
21	87,48	0
22	98,03	0
23	108,58	0
24	119,13	1
25	129,68	1
26	140,23	1
27	150,78	1
28	161,33	1
29	171,88	1
30	182,43	1
31	13,63	0

CARGA/DESLOCAMENTO PARA LVDT 5D.23		
LEITURA	CARGA (kN)	Deslocam. (mm)
1	0,82	0
2	1,65	0
3	2,50	0
4	3,35	0
5	4,17	0
6	5,02	0
7	5,86	0
8	6,70	0
9	7,53	0
10	8,40	0
11	9,26	0
12	10,11	0
13	10,89	0
14	13,63	0
15	24,18	0
16	34,73	0
17	45,28	0
18	55,83	0
19	66,38	0
20	76,93	0
21	87,48	0
22	98,03	0
23	108,58	0
24	119,13	0
25	129,68	0
26	140,23	0
27	150,78	0
28	161,33	1
29	171,88	1
30	182,43	1
31	13,63	0