

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

"SILOS DE MADEIRA"

ENGº CARLITO CALIL JUNIOR

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA
A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE "MESTRE EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS"

BANCA EXAMINADORA

PROF. DR. JOÃO CESAR HELLMEISTER - ORIENTADOR (EESC - USP)
PROF. DR. MUNIR RACHID - (EESC - USP)
PROF. DR. JUSTO MORETTI FILHO - (ESALQ - USP)



SETEMBRO DE 1978

A meus pais, Edite e Carlito

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor João Cesar Hellmeister pela orientação constante manifestada durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao colega e amigo, Professor Francisco Antonio Rocco Lahr, pelo estímulo e frequente participação na realização deste trabalho.

Aos técnicos, auxiliares, bolsistas e monitores do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira da Escola de Engenharia de São Carlos, pelo auxílio prestado na realização dos ensaios, essenciais à conclusão deste trabalho.

Ao Sr. José Francisco do Nascimento Filho pelos trabalhos de datilografia e ao Sr. João Paulo Moretti na elaboração dos desenhos.

O Autor

ABSTRACT

This work pertains to the study of circular silos, built-up with plywood plates, with dimensions of 5 m in diameter, 15 m of height and with a bulk volume of 300 m^3 to store up to 250000 kg of cereals. This capacity was defined by storage requirements for farm purposes.

Studies were carried out on the storage materials characteristics and existing wooden silos were analysed along with the available equipment operation and handling of cereals.

Besides the bibliographical investigations carried out on the theoretical studies relating to structural considerations of silos, experimental tests were conducted on miniature models made of semi kraft paper (1:20 gauge) and plywood (1:10 gauge), where the induced strains were measured by strain gages and inductive transducers.

The experimental results were found to show good correlation with theoretically determined values.

Finally, the design considerations of a prototype silo, with all the details to its construction with plywood plates, are detailed out.

RESUMO

A dissertação apresentada consiste no estudo de um silo de forma cilíndrica, projetado com chapas de madeira compensada, de 5 m de diâmetro, 15 m de altura e 300 m³ de volume, para armazenar até 250.000 kg de cereais, capacidade definida através de pesquisa da necessidade de armazenamento a nível de fazenda.

Foram estudadas as características dos materiais a ensilar, mostrados os silos existentes em madeira, bem como os equipamentos para seu funcionamento e manipulação.

Além do estudo teórico e bibliográfico sobre o cálculo estrutural dos silos, foram realizados vários ensaios em modelos reduzidos (escala 1:20) de papel e em modelo pouco reduzido (escala 1:10) de madeira compensada, medindo-se as deformações através de extensômetros elétricos resistivos e indutivos, comparando-os com as obtidas no cálculo teórico.

No final, apresenta-se o projeto do silo protótipo, com todos os detalhes para sua construção em madeira compensada.

INDICE

I - Introdução ao Estudo dos Silos.....	1
II - Armazenagem de Grãos e Cereais em Pequenas Quantidades.	2
III - Fluxograma da Armazenagem a Granel.....	7
IV - Operações Básicas com os Cereais.....	9
V - Manipulação. Equipamentos.....	14
VI - Silos - Definição e Finalidade.....	24
VII - Principais Características dos Materiais Ensilados.....	26
VIII - Silos Convencionais de Madeira.....	38
IX - Revisão Teórica e Bibliográfica do Cálculo dos Silos...	41
X - Cálculo das Tensões pelo Método de Reimbert.....	44
XI - Dimensionamento de um Protótipo de Madeira.....	56
XII - Experimentação em Modelos Reduzidos de Papel e de Corpos de Prova de Papel.....	75
XIII - Experimentação em Modelo pouco Reduzido de Silo de Compen- sado e de Corpos de Prova de Compensado.....	89
XIV - Projeto e Detalhamento Final do Silo - Protótipo.....	114
XV - Conclusões e Previsão de Trabalhos Posteriores.....	125

I - INTRODUÇÃO AO ESTUDO DOS SILOS DE MADEIRA

A necessidade de utilização, no Brasil, de silos para armazenamento de cereais em grande quantidade, tem exigido a interferência do governo federal para o caso dos produtos agrícolas mais relevantes como a soja, o milho, o feijão, o arroz e alguns outros o qual tem promovido, através de instituições adequadas, o projeto e a construção de grandes armazéns.

Infelizmente os fazendeiros pequenos e médios ficam fora dos esquemas que atendem aos grandes produtores. Entretanto, de acordo com Santos (13) são na região norte do Estado do Paraná, para 20 silos de 2.000 t necessários ao armazenamento de cereais de grandes produtores, ainda são necessários 430 silos de 300 t para as propriedades médias e pequenas, representando mais de 3 vezes a quantidade de cereais destinados aos grandes silos da região. Essa situação é facilmente reconhecida em outras regiões produtoras do país, indicando a necessidade da construção de grande quantidade de pequenos silos para as fazendas médias e pequenas.

A orientação para o projeto e para a construção dos pequenos silos não é comum, mesmo na literatura internacional.

Para que se possa vir a construir os silos para 300t, a baixo custo, mas, realmente adequados a sua finalidade, são apresentadas a seguir as idéias básicas relativas aos cereais, tendo em vista conhecer as características indispensáveis ao seu armazenamento. Procurou-se mostrar, através de alguns exemplos de silos de madeira existentes em diversos países, a viabilidade de seu emprego também no Brasil; fez-se o estudo e a explanação das teorias relativas à estrutura necessária, bem como o estudo e a apresentação das propriedades das madeiras e dos materiais feitos de madeira para a construção adequada dos silos; finalmente na parte experimental, utilizando pequenos modelos, fez-se a análise da aplicação das teorias existentes à construção do silo de madeira, evidenciando-se sua viabilidade estrutural, funcional e econômica.

II - ARMAZENAGEM DE GRÃOS E CEREAIS EM PEQUENAS QUANTIDADES:

Estudiosos e conhecedores da agricultura, em todo o mundo, afirmam que há dois grandes problemas que precisam ser resolvidos a curto prazo para o aumento indispensável da produção: o mau uso do solo, devido às práticas culturais inconvenientes e a perda frequente da produção agrícola pela inexistência de silos para a preservação dos alimentos.

O governo brasileiro está enfrentando atualmente esses problemas através do "Programa Nacional de Armazenagem (PRONAZEM)", o qual, sob a responsabilidade direta da Companhia Brasileira de Armazenamento (CIBRAZEM) cuida da construção e modernização dos armazéns, dá assistência técnica e manutenção dos equipamentos adquiridos, etc., para oferecer aos agricultores a possibilidade de armazenamento de seus produtos.

Os dois objetivos básicos do PRONAZEM tem em vista as grandes fazendas, através da armazenagem intermediária e da armazenagem terminal, planejando instalar no país uma rede coletora atingindo todos os locais de grande produção, permitindo redução de perdas ao agricultor e facilitando a comercialização do produto.

O café foi o responsável pela implantação de um sistema especial de armazenagem, pois, circunstâncias econômicas obrigaram a sua estocagem por longos períodos. Nos dias de hoje o consumo ou industrialização de grãos e cereais em geral é contínua ao passo que a produção é sempre sazonal. Daí a necessidade de se criar um sistema capaz de regular o fornecimento dos produtos permanentemente.

II.1 - Condições de Armazenagem em Pequenas Quantidades:

O produtor encontra grandes dificuldades na hora da colheita para estocar seus produtos. Vários fatores concorrem para agravar esta situação: congestionamento em fim de colheita devido ao grande volume a descarregar nos pontos receptores; preferência para armazenamento de soja, trigo e outros. Uma solução comum é amontoar ou ensacar o produto sem as mínimas condições para climatização. Isto provoca perda de até 30% em quantidade sem contar a

redução do valor nutritivo, perda de cor e alteração do sabor do produto final.

Uma solução para essa situação é a instalação de silos em propriedades médias e pequenas para preservar a qualidade da produção, facilitando a policultura e a comercialização do produto. Isto proporcionará a diminuição no "deficit" de armazenagem nacional, a maximização dos lucros do pequeno e médio produtor pela minimização das perdas, e o equilíbrio do fluxo de comercialização com provável redução dos preços para o consumidor.

II.2 - Necessidade da Armazenagem em Pequenas Quantidades:

As exportações são feitas a granel, por isso a armazenagem em sacas, comum no passado, tem sido abandonada. Assim sendo, o método mais eficiente de armazenagem, mesmo ao nível de fazenda, é também a granel, através de silos. Deve-se atentar para outras vantagens: a limpeza e a umidade correta dos grãos são obtidas com extrema facilidade nos silos construídos com técnica adequada. Os silos existentes, sendo frequentemente insuficientes ou inadequados, obrigam o produtor a comercializar o seu produto em condições desfavoráveis com benefícios para os intermediários e provável custo maior para o consumidor. A existência dos silos permite a comercialização do produto de maneira mais eficiente para o produtor sem prejuízo do consumidor.

II.3 - Dimensão Média dos Silos a Serem Instalados nas Fazendas:

Segundo os estudos de mercado realizado por Santos(13) no Norte e Nordeste do Estado do Paraná, existem 558 propriedades nas quais podem ser instalados silos. Essas propriedades podem ser distribuídas em grupos, de acordo com as áreas de cultivo da seguinte forma:

TABELA 1 - ÁREAS DAS FAZENDAS

Classificação por área (ha)	Nº de Propriedades	Áreas c/Culturas temporárias (ha)	Área Média (ha)
100 a 199	428	55076	129
200 a 299	73	17219	236
300 a 499	37	14541	393
> 500	20	17604	880
Total	558	104440	-

O volume médio dos silos em cada caso foi calculado em função da cultura que apresenta maior produtividade, no caso a soja, com 2100 kg/ha. Dada uma margem de segurança de 10% para as safras que superam essa produtividade, seja devido a condições climáticas favoráveis ou ao uso de tecnologia moderna e padronizando-se os volumes calculados, obteve-se a tabela seguinte:

TABELA 2 - VOLUME DOS SILOS

Nº de Propriedades	Necessidade Líquida de armazenagem (ton) por propriedade	Capacidade dos silos sacos 60 kg	toneladas
428	298	5000	300
73	545	10000	600
37	908	15000	900
20	2033	34000	2040

Observa-se que a maior frequência de propriedades encontra-se entre aquelas que plantam em média 130 ha de soja. Sabe-se, entretanto, no tocante a produção, a medida que a área de cultivo aumenta, os custos por unidade de área diminuem. Isto também é verdade para a ensilagem, ou seja, os custos por tonelada decrescem com o aumento do volume a estocar. Assim o custo fixo por tonelada para o silo de 2000 t é cerca de um terço do custo para o silo de 60 t.

Considerando o custo unitário decrescente e a frequência das propriedades que podem instalar silos, foi feita uma análise simplificada para se estudar a viabilidade da instalação de silos para 300t nas propriedades com 130 ha cultivados.

II.4 - Economia de Custos e Obtenção de Renda:

Em geral o produtor que colhe e entrega seu produto ensacado à rede intermediária, utilizando o armazém por um período de 3 meses, paga um preço médio de Cr\$ 348,00 por tonelada comercializada, já incluídas as despesas de sacaria, transporte, limpeza e secagem. Utilizando o sistema de silos na propriedade, este mesmo produtor, gastará em média Cr\$ 131,00 por tonelada vendida, pelo mesmo período de armazenamento.

Na tabela seguinte, foi analisado o aspecto financeiro da propriedade com área total de 200 ha e com uma área cultivada de 130 ha, no sistema soja-trigo em rotação e procurou-se demonstrar que um conjunto de silos, por si só apresenta economia na produção.

A diferença da produção líquida entre as propriedades sem silos e as propriedades com silos, é devida a perdas de 20% (vinte por cento) no período da colheita até a armazenagem na rede do município. Essas perdas para as propriedades sem silos são devidas ao clima, condições das estradas e ao sistema utilizado na propriedade para conservação dos grãos e cereais.

TABELA 3 - RECEITA

Renda	Propriedades sem Silos		Propriedades c/silos	
	soja	trigo	soja	trigo
1. Produção líquida (t).....	213	144	253	165
2. Preço de Venda (1.000 Cr\$).....	302,6	252,0	358,5	299,3
Renda Total (1.000 Cr\$).....		554,6		657,8
Aumento de Receita (1.000 Cr\$).....		---		103,2

TABELA 4 - CUSTOS (1000 Cr\$)

	Propriedades sem Silos		Propriedades com Silos	
	Soja	Trigo	Soja	Trigo
1. Custo da Sacaria Cr\$ 7,80/60 kg.	39,80	27,1	-	23,4
2. Imposto sôbre Sacaria	0,7	0,5	-	0,5
3. Custo de Transporte	8,7	5,9	4,3	3,0
4. Despesas com Carregamento de Sacos (Cr\$ 1,00) 2 carregadores	10,2	6,9	-	6,0
5. Custo de Armazenagem				
a. Recebimento, descarga e Armazenamento no 1.º mês	6,1	-	3,3	2,3
b. Custo de limpeza e sacaria	8,3	5,6	1,8	1,2
c. Expurgo	1,3	-	0,3	0,2
d. Armazenagem por 2 mēses	4,2	-	-	-
Despesas	79,3	46,0	9,7	36,6
Custos totais	125,3		46,3	
Diferença de Custo		79,0		
Diferença de lucro:				
Sem silos - Cr\$ 429.300,00				
Com silos - Cr\$ 611.500,00				
Renda adicional com silos: Cr\$ 182.200,00				

III - FLUXOGRAMA DA ARMAZENAGEM A GRANEL:

Para que se possa projetar um silo é do maior interesse conhecer o material que vai ser armazenado e todas as circunstâncias que possam influir na perfeita adequação do silo as suas finalidades.

O fluxograma das operações da armazenagem a granel (fig. 1) indica uma seqüência lógica de operações com os cereais que interferem com o esquema de utilização dos silos e podem, e às vezes devem, influir na orientação da operação dos silos. O conhecimento das condições de operação dos silos pode ser importante no projeto funcional e até no projeto estrutural do silo.

Imediatamente após a colheita, mas dependendo das condições da fazenda, os cereais são conduzidos a um armazém ou a um terreiro para serem debulhados, seguindo-se limpeza, secagem, carregamento do silo, expurgo, aeração e finalmente a descarga na época oportuna para distribuição ao consumidor.

A determinação da umidade antes, durante e após o armazenamento, pode exigir condições de acesso às sementes.

A secagem, a aeração e os tratamentos para eliminar ou controlar a proliferação de insetos e de roedores, influem na escolha do esquema funcional do silo.

A ação dos ventos, a carga e a descarga são fatores da maior relevância no cálculo estrutural do silo.



FIG. 1 - FLUXOGRAMA DA ARMAZENAGEM A GRANEL

IV - OPERAÇÕES BÁSICAS COM OS CEREAIS:

a) - Determinação do Teor de Umidade:

O armazenamento dos cereais não pode ser feito quando os grãos ainda contêm elevado teor de umidade. A umidade e o calor permitem a proliferação de microorganismos e a fermentação das sementes.

O baixo teor de umidade é condição necessária ao armazenamento do produto.

Para se conhecer o teor de umidade das sementes faz-se a sua determinação antes da limpeza, antes, durante e após a secagem.

A determinação do teor de umidade é feita utilizando amostra tirada de vários pontos do lote. Deve-se evitar o contato das sementes com as mãos. Palhas, raízes, terra e outros materiais estranhos devem ser eliminados da amostra. A determinação do teor de umidade deve ser feito imediatamente após a coleta da amostra. Deve-se seguir método adequado de determinação do conteúdo de umidade.

b) - Limpeza:

A limpeza dos grãos tem em vista:

1 - Retirar cascas, grãos inaproveitáveis, poeira e palha.

2 - Proporcionar uma secagem mais rápida e barata pois as impurezas que contêm a umidade e impedem a ventilação, são removidas antes da secagem.

3 - Possibilitar uma armazenagem mais segura, porque os cereais limpos são mais fáceis de serem ventilados.

4 - Manter os cereais mais saudáveis para alimentação e fornecer sementes melhores, pois a poeira e as impurezas favorecem o aparecimento do mofo.

c) - Secagem:

Secagem é o processo de retirada por meios naturais ou artificiais, até o limite desejado, da umidade contida numa massa de grãos.

A secagem é indispensável para a armazenagem. Os grãos úmidos permitem o ataque por fungos e vem a apodrecer. Os grãos mais secos tem maior durabilidade. O excesso de umidade aumenta o custo do transporte.

TABELA 5 - UMIDADE DOS CEREAIS

Produtos	Colheita Mecânica Umidade Ótima à Mí- nima perda na Co- lheita (%)	Umidade Ideal para Armazenagem	
		p/1 ano (%)	p/5 anos (%)
Milho	24,0 a 22	13	11
Trigo	18,5 a 16	13	11
Sorgo	20,0 a 18	12	10
Cevada	18,0 a 16	13	11
Aveia	18,0 a 16	13	11
Arroz	18,0 a 16	14	13
Soja	18,0 a 16	12	10
Amendoim	-	10	8
Girassol	-	10	8
Cafê	-	13	11
Feijão	-	13	11

A secagem dos cereais pode ser feita natural e artificialmente.

1) - Secagem Natural:

A secagem natural é realizada pela ação do sol e do vento e consiste em expor os grãos ao sol em camadas finas nos terreiros. A secagem natural fica sujeita a variações da temperatura e às chuvas ocasionais. Atualmente, realiza-se a secagem natural, espalhando o produto em camadas finas sobre retalhos de laminados plásticos. Caso haja uma brusca mudança do tempo, estes laminados podem ser dobrados, evitando a chuva e a umidade. O processo é limitado à pequena produção.

2) - Secagem Artificial:

A secagem artificial consiste em submeter o produto à ação de uma corrente de ar quente, que atravessa a massa dos grãos.

Os secadores mecânicos são máquinas contendo dispositivos que fazem passar um ar quente e seco através da massa dos grãos.

A secagem artificial pode ser realizada continuamente, sem interferência das condições atmosféricas, diminui a exposição das sementes ao ataque de fungos e insetos, inibe a ação dos fungos apodrecedores, pode ser totalmente mecanizada facilitando a produção em grande quantidade.

d) - Carga e Descarga do Silo:

A carga e a descarga do silo com o produto a granel podem ser feitos com o auxílio de vários tipos de equipamentos, tais como: os elevadores de canecas, as esteiras transportadoras de borracha lisa ou de correntes com pás, transportadores pneumáticos e por roscas sem fim.

O transporte do produto a granel nas operações de descarga poderá ser feito com auxílio de equipamentos ou por gravidade.

A descarga por gravidade pode ser central ou lateral.

A descarga central geralmente é feita dando-se forma adequada ao fundo do silo, fazendo-se a retirada das sementes através de orifício central.

A descarga lateral pode ser por formato especial do fundo do silo e saída por furo lateral, usa-se às vezes, um ducto com múltiplas aberturas ao longo da altura do silo (fig. 2).

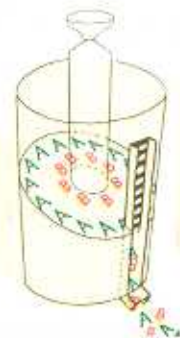
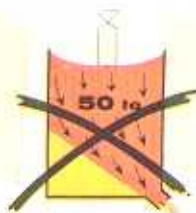
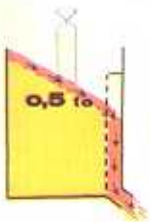
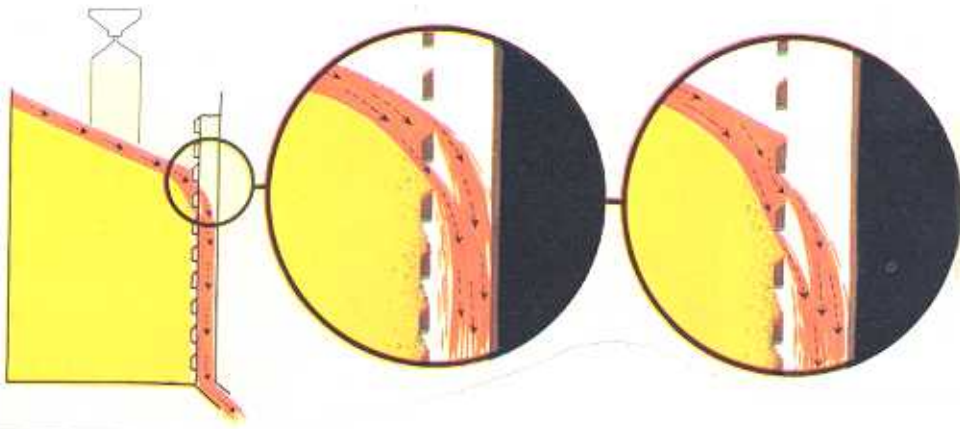


FIG. 2- DESCARGA LATERAL UNIFORME

e) - Expurgo a Granel:

Expurgo é a operação que visa acabar com todos os insetos que se encontram nos grãos armazenados, em todas as suas fases.

O expurgo a granel pode ser feito mediante a aplicação de inseticidas como o brometo de metila e a fosfina.

O expurgo com brometo de metila em silos é realizado com o auxílio de equipamentos especiais. Para pequenos silos, que não apresentam tais equipamentos, o uso deste produto químico não é aconselhável.

A operação com fosfina é mais simples: o inseticida é colocado em pastilhas através de sonda especial em posição adequada, retira-se lentamente a sonda, soltando as pastilhas do inseticida em diversas alturas da massa de grãos.

Após a retirada da sonda, veda-se totalmente as aberturas do silo.

Para fazer o expurgo com fosfina, durante a operação de carregamento do silo, basta colocar as pastilhas de inseticida à medida que se estiver carregando o silo. Nesse caso os grãos já devem estar secos.

f) - Aeração:

Aeração é a passagem de uma corrente de ar do meio ambiente através da massa de grãos.

A aeração é feita utilizando ventiladores especiais, ou através de transilagem, isto é; a passagem do produto de um silo para outro, expondo a massa de grãos ao ar do meio ambiente.

A aeração dificulta o desenvolvimento de fungos (mofo, bolor, etc); evita a condensação e a migração de umidade e mantém a mesma temperatura em toda a massa dos grãos.

A aeração deve ser feita quando a massa dos grãos apresentar diferentes temperaturas em diferentes pontos; quando se notar algum cheiro diferente no produto; nas operações de expurgo com brometo de metila, para fazer circular este inseticida na massa de grãos; para retirar o brometo de metila, depois do expurgo e quando os grãos estiverem apresentando teor de umidade acima do normal e a umidade relativa do ar estiver baixa.

V - MANIPULAÇÃO - EQUIPAMENTOS

A armazenagem a granel exige a utilização de equipamentos especiais para diversas fases de manipulação dos cereais. O conhecimento desses equipamentos é indispensável ao conhecimento das funções do silo e ajuda a estabelecer condições e especificações para o projeto dos silos.

a) - Debulhadeira:

Alguns cereais são encontrados na forma de espigas. Separar as sementes é a operação chamada debulhar, designando-se por debulhadeira a máquina capaz de fazer essa operação. Na figura 3 é apresentada uma debulhadeira comercial.

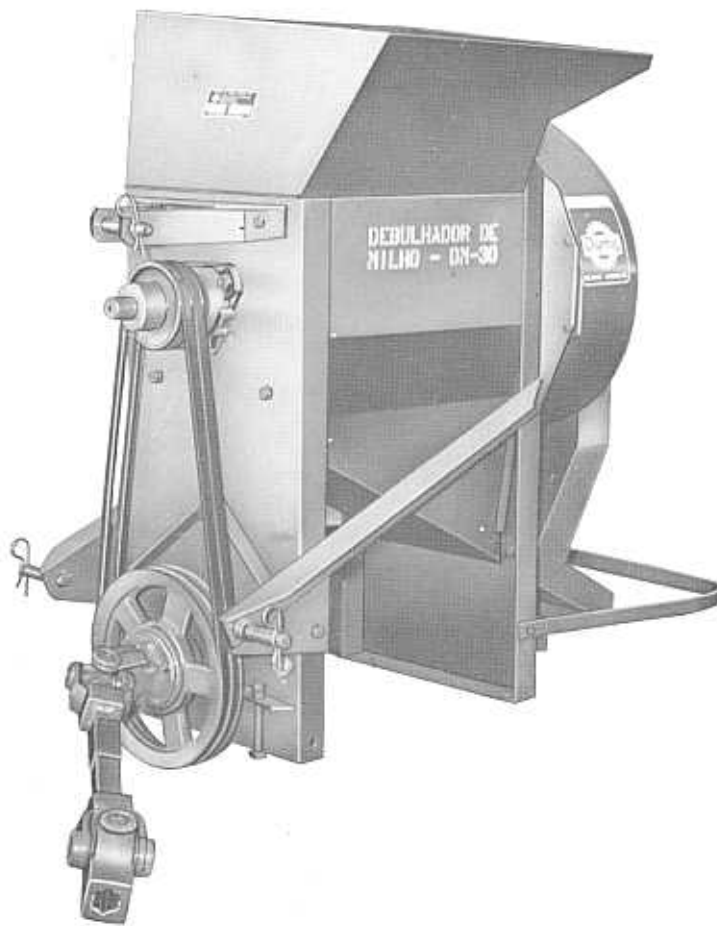


FIG. 3 - DEBULHADEIRA

b) - Medidores de Umidade:

O processo teórico de se medir a umidade de um cereal consiste em retirar uma amostra do cereal e pesá-la. Colocar em seguida a amostra em estufa a 100°C durante o tempo necessário para evaporar toda a sua umidade e pesá-la novamente.

A umidade será:

$$u = \frac{P_u - P_s}{P_s} \cdot 100$$

P_u = peso úmido

P_s = peso seco

Devido à dificuldade prática e a demora para efetuar medições através deste processo, são fabricados diversos tipos de aparelhos medidores de umidade que fornecem uma precisão razoável para uma medição mais rápida.

A seguir, ilustra-se um desses aparelhos, cujo princípio de funcionamento consiste em medir constantes dielétricas: o Twin Tester. O teor de umidade é estabelecido sincronizando - se dois circuitos eletrônicos para a mesma frequência.

Cereais molhados, na câmara dos cereais (interna a esse aparelho), produzem, por exemplo, uma frequência mais baixa, a qual pode ser acelerada girando-se o cilindro de graduação (fig.4). Enquanto os dois circuitos do medidor estiverem em frequências diferentes é gerada uma corrente elétrica, fazendo com que a agulha do aparelho oscile para a direita ou para a esquerda, dependendo da umidade dos cereais. Quando os dois circuitos tiverem sido sincronizados, a agulha ficará no centro do triângulo vermelho e o teor de umidade poderá ser lido no cilindro de graduação.



FIG. 4 - MEDIDOR DE UMIDADE

c) - Máquina de Limpeza:

Quando se utiliza o sistema pneumático para carregar o silo, a operação de limpeza é feita por centrifugação do material. A poeira, palhas e sementes de menor densidade são separadas e eliminadas antes do armazenamento. Alguns equipamentos permitem também peneirar as sementes. Uma peneira fina retira partículas pesadas de terra e areia e, outra grossa, retira as partículas pesadas maiores do que os grãos. A figura 5 apresenta o esboço de um conjunto de equipamentos para a limpeza de cereais.

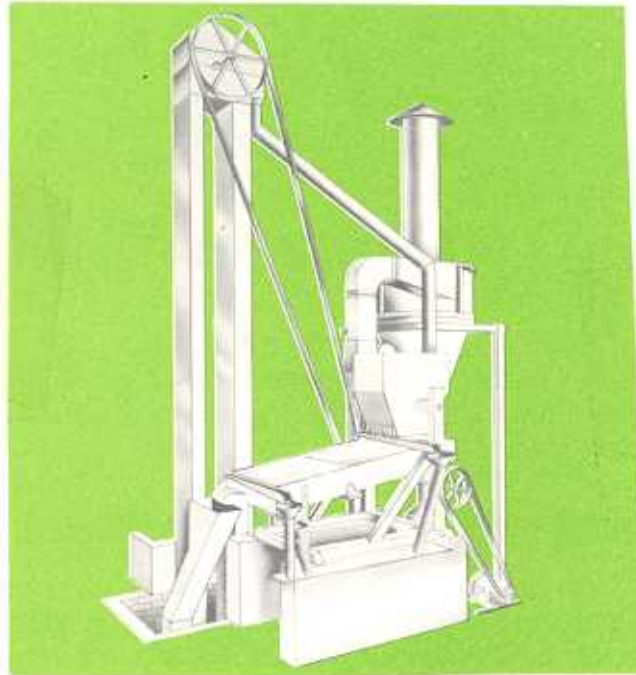


FIG. 5 - MÁQUINA DE LIMPEZA

d) - Secadores:

Usualmente a umidade das sementes deve ser reduzida a um nível de equilíbrio com as condições ambientes. O processo usual no passado consistia na secagem no terreiro utilizando o calor do sol.

A lentidão desse processo e a dificuldade de mão-de-obra tem conduzido à mecanização da secagem. Basicamente a secagem consiste em fazer passar uma corrente de ar quente e seco pelos cereais, durante o tempo necessário para secá-los, ao nível adequado para seu armazenamento e comercialização.

Os equipamentos de secagem podem ser isolados dos silos e nesse caso servem a uma bateria de silos ou podem estar incorporados a um silo.

O secador Minuano é do tipo isolado. As câmaras de secagem e resfriamento do secador Minuano são atravessadas por canais triangulares (telhados) dispostos em filas horizontais para entrada (E) e saída (S) do ar, alternadamente (fig. 6). Os canais E estão abertos somente para a entrada do ar seco e os canais S são abertos somente para a saída do ar úmido.

Dessa maneira, o ar, proveniente da fornalha entra pelos canais E e sai pelos canais S, sendo obrigado a atravessar a massa de grãos que vem descendo por sobre os referidos canais, promovendo a retirada da umidade do cereal.

Na parte inferior do secador, o resfriamento se processa da mesma forma, porém com o ar na temperatura ambiente.

Entre a zona de secagem e a de resfriamento, está a zona neutra, onde não há canais para a passagem de ar. Nesta zona o cereal perde lentamente a temperatura, não havendo contacto repentino com o ar frio (fig. 7).

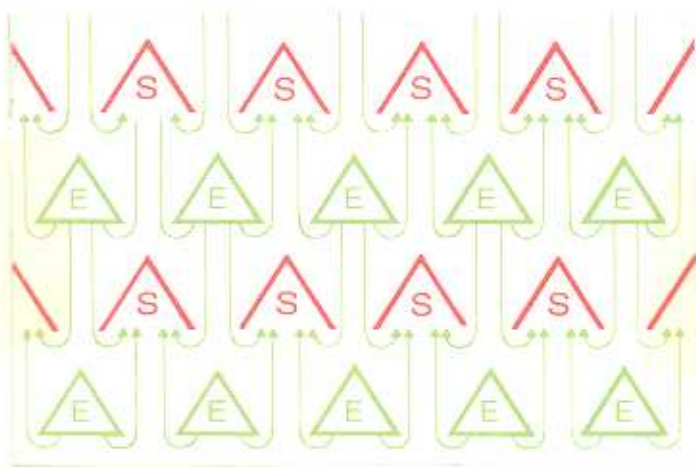


FIG. 6 - CAMARA DE SECAGEM

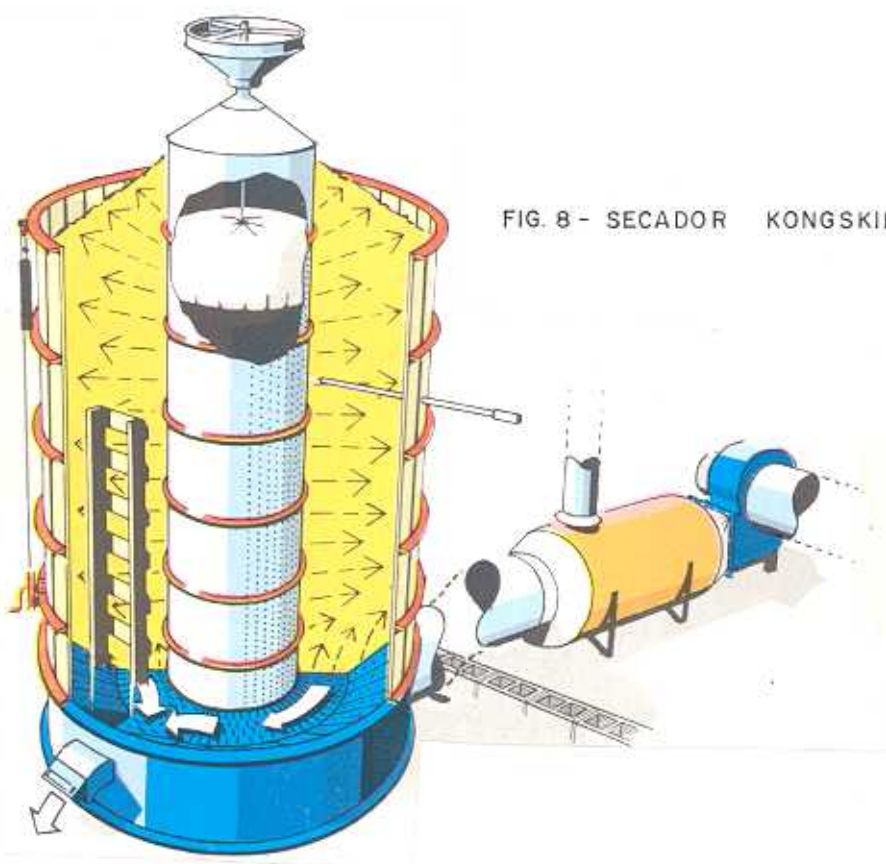


FIG. 7 - SECADOR MINUANO

O secador pode estar incorporado aos silos de pequenas dimensões. Neste caso o ar quente sobe pelo tubo de ventilação perfurado e espalha-se através dos grãos. Uma característica é o efeito do sopro duplo provocado por duas correntes de ar, uma deslocando-se rapidamente, a outra, originada da base em direção às paredes. Representa uma vantagem para cereais com um teor de umidade elevado.

O ar deixa o silo, saturado da umidade dos grãos ,

atê que estes atinjam grau de umidade suficientemente baixa que permita seu armazenamento (fig. 8).



e) - Equipamentos de Elevação e Transporte Interno de Cereais:

Os silos elevados tem necessidade do transporte vertical dos cereais até o topo, por onde é feito o carregamento.

Várias soluções tem sido propostas para a elevação e transporte dos cereais existindo firmas interessadas na sua fabricação.

Um sistema de caçambas fixadas em correia transportadora, protegida do ambiente externo pode produzir o fluxo contínuo da base para o topo do silo como apresentado nas figuras 9 e 10.



FIG. 9 - CAÇAMBAS



FIG. 10 - ELEVADOR DE CAÇAMBAS

Um sistema de rosca sem fim movida por motor elétrico dentro de um tubo, permite transporte eficiente em distâncias pequenas. Na figura 11 vê-se um carregador desse tipo em funcionamento.



FIG. 11 - TRANSPORTADOR HELICOIDAL

O transporte pneumático, isto é, através de corrente de ar é dos mais eficientes. Uma ventoinha promove a corrente de ar sugando as sementes até um ciclone; há uma queda natural dos mesmos até a base do ciclone de onde são soprados para o silo (figuras 12 e 13.)

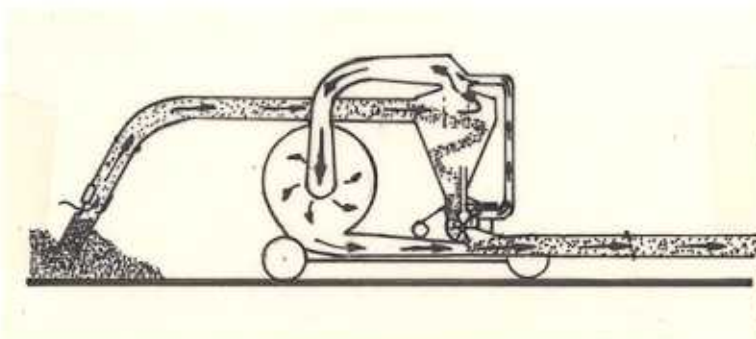


FIG. 12 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO



FIG. 13 - SUGADOR

O sistema pode ser mais simples, dispensando o tubo de aspiração, mas necessita que os cereais sejam colocados num funil acoplado ao tubo de saída de ar da ventoinha (figura 14).



FIG. 14 - INJETOR

f) - Equipamentos para Aeração:

Algumas sementes necessitam aeração durante o período de armazenagem. Essa aeração pode ser promovida por ventoinhas (alta pressão) ou por ventiladores de baixa pressão (figura 15).

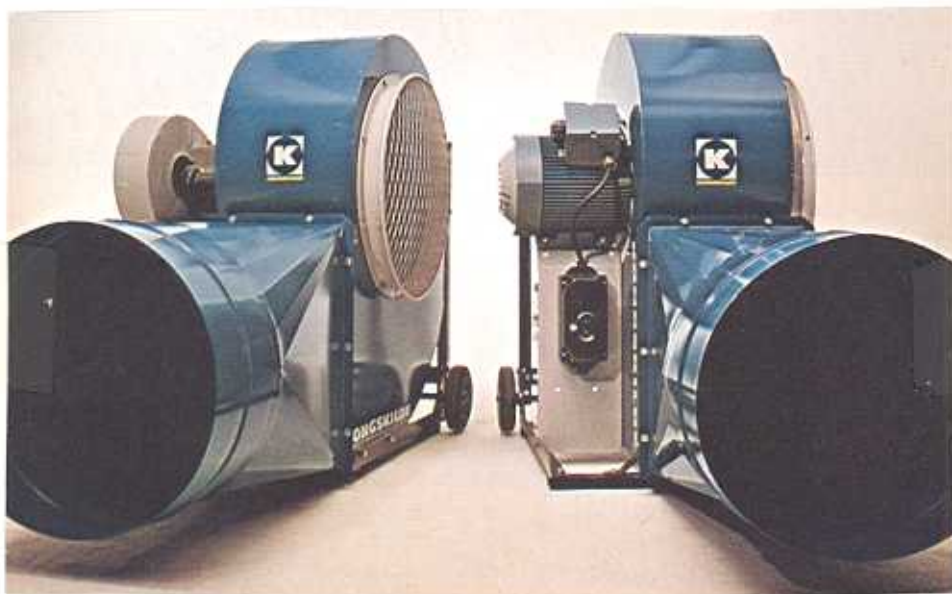


FIG. 15 - VENTILADOR DE BAIXA PRESSÃO

g) - Dispositivos e Equipamentos para Descarga:

A descarga mais simples é feita por gravidade. Para isso o silo deve ser provido de um cone na base, com uma válvula para regular a saída dos cereais. Este cone deverá ficar a uma altura adequada para possibilitar a descarga direta em veículo transportador (figura 16).

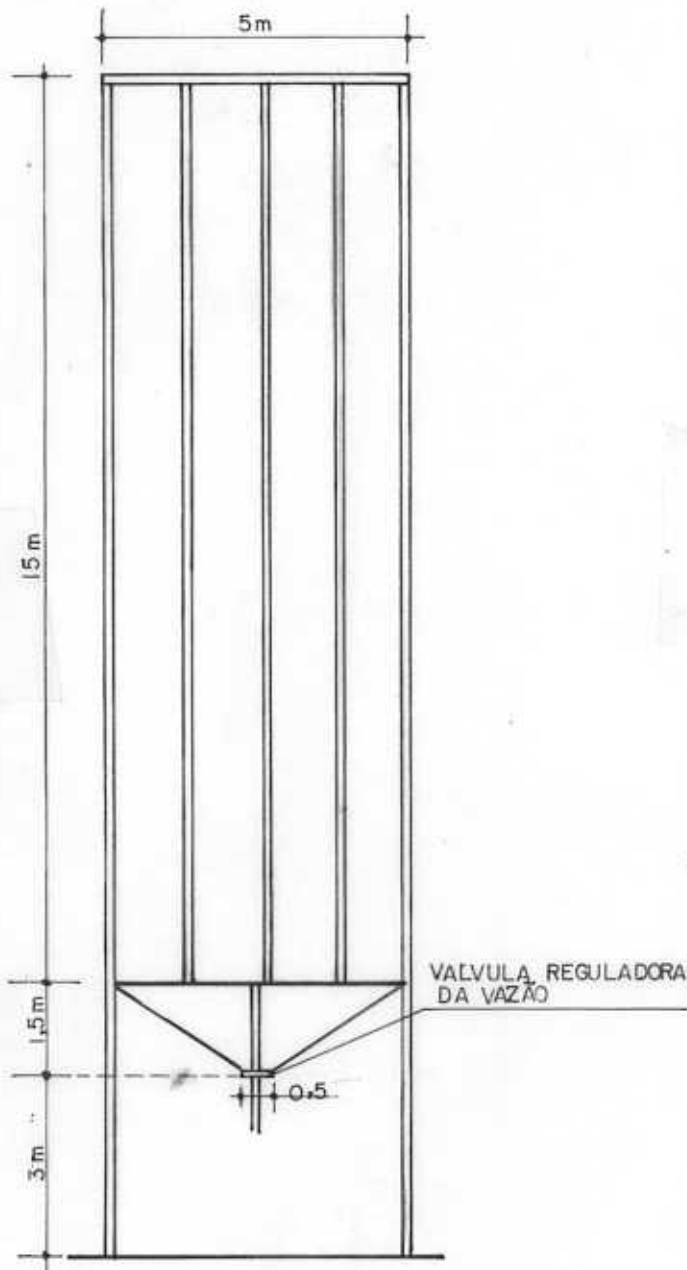


FIG. 16 - DESCARGA CENTRAL

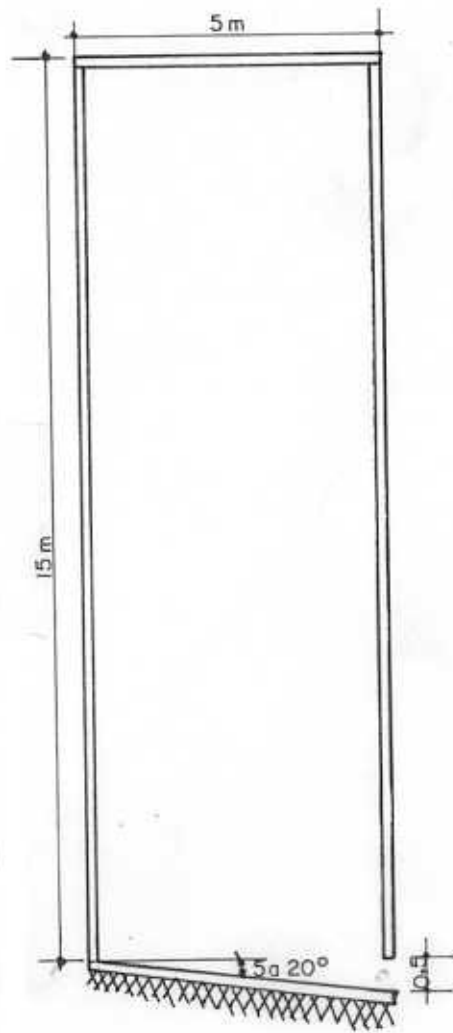


FIG. 17 - DESCARGA LATERAL

A saída lateral, por gravidade é possível com o piso inclinado, que varia de 5 a 20° dependendo do material a ser armazenado. No ponto inferior do piso, na periferia do silo é feita uma abertura na qual os cereais são descarregados (fig. 17). Geralmente nesse caso há necessidade de um transportador helicoidal ou pneumático para o caminhão transportador.

Um sistema de roscas sem fim, instalado no fundo do silo pode ser usado para a descarga (fig. 18).

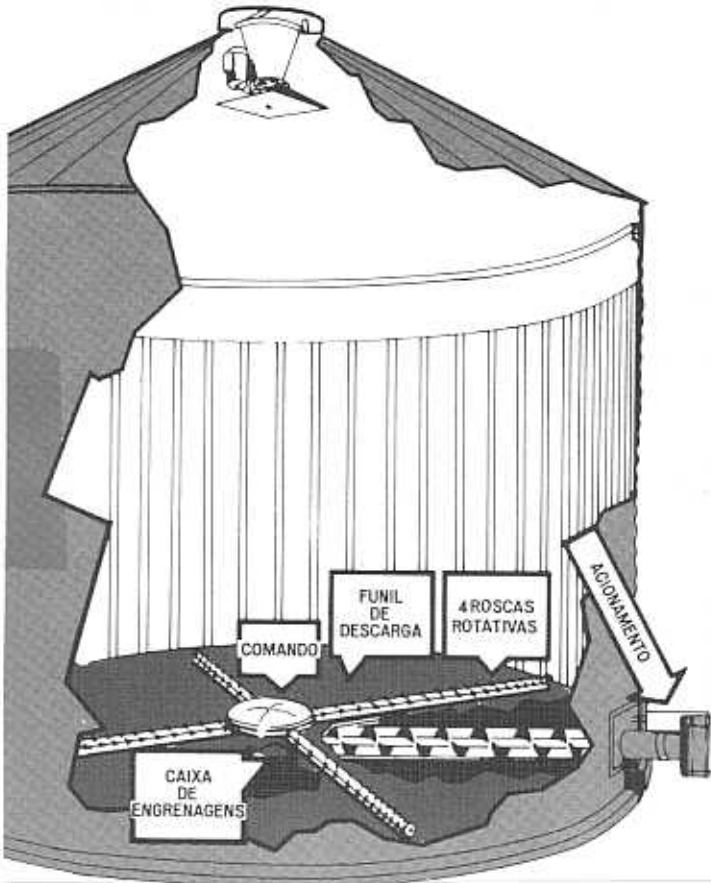


FIG. 18 - DESCARGA HELICOIDAL

Para melhor conhecimento dos equipamentos podem ser procuradas as firmas especializadas:

KONGSKILDE, RICASSILO S/A - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de Silos - BR-369 - Km 166 - Rolândia - Cambê, fone 56-1611 - Teleg. "RICASA" - Cx Postal, 143 - Paranã.

KEPLER, WEBER S/A - Indústria, Comércio, Importação e Exportação - Rua Hermann Meyer, 43 - Cx Postal, 2 - Fones 2 e 32 - Teleg. "KEPLERSA" - Panambi - Rio Grande do Sul.

SILOGRANEL - Sistemas Graneleiros e Agromecânicos - Rua Tavares de Lira, 4444 - Colonia Afonso Pena - São José dos Pinhais - Paranã.

IMACO - Silos e Armazens - Avenida Goioerê, s/n, - Fone: 23-1462 - Campo Mourão - Paranã.

IMAGRO S/A - Indústria de Máquinas e Implementos Agrícolas - Rodovia BR - 101 Km 215 - Fone 42-196 - Teleg. IMAGRO Cx. Postal, 50 - Palhoça - Santa Catarina.

SILOS CASP - Av. Bernardino de Campos, 565 - Amparo - São Paulo.

MEGRAL - Secadores e Equipamentos para Cereais Ltda
Distrito Industrial - Av. A W 2 nº 3 - 120 - Bauru - São Paulo.

ALEM MAR - Comercial e Industrial S/A - Av. Senador
Queiroz, 96 - 29 andar - Conjunto 206 - Cx Postal 9851 - 01026 -
São Paulo - SP.

VI - OS SILOS - DEFINIÇÕES E FINALIDADES

Os silos são unidades armazenadoras de grãos, caracterizadas por células ou compartimentos estanques e herméticos ou semi-herméticos, que possibilitam o mínimo de influências do meio externo com o ambiente de estocagem.

Os silos oferecem condições técnicas de conservação do produto estocado por período de tempo normalmente prolongado.

Mantêm, portanto, controláveis as características físicas, químicas e biológicas da massa de grãos, geralmente perdendo sua identidade de origem, podendo, entretanto, conservar diferenciação classificatória da espécie e padrão agrícola em virtude de compartimento do espaço disponível.

Os silos contam com uma torre central ou lateral para a circulação dos cereais a granel, para as operações básicas de recebimento, limpeza, secagem, expurgo, estocagem e expedição; são dotados de equipamentos automatizados e semi-automatizados que permitem a simultaneidade de operações, inclusive a transilagem com baixa utilização de mão-de-obra. As células ou compartimentos, em geral, variam de tamanho e número, dependendo das necessidades e ou da concepção construtiva. A estocagem desenvolve-se no sentido vertical ou horizontal, donde se origina a denominação: silo vertical e silo horizontal.

a) - Silo Vertical:

Assim denominado por predominar a dimensão da altura em relação ao diâmetro da base da célula. É um tipo de unidade bastante compartimentada, que através de células agrupadas ou justapostas, forma um conjunto com altura variável e normalmente em forma cilíndrica. Os grandes silos elevados são construídos em concreto armado (formas deslizantes), protendido, chapas metálicas com isolantes térmicos.

A base da célula usualmente é em forma de cone, a qual permite o total esvaziamento. Quanto à disposição e sustentação em relação ao solo, são classificados como elevado ou semi-subterrâneo, por estarem acima ou em posição intermediária em relação ao nível do solo. Os silos de madeira normalmente são verticais e elevados.

b) - Silo Horizontal:

Caracteriza-se por prevalecerem as dimensões da base em relação à altura dos compartimentos. Constitui-se em unidade armazenadora composta por compartimentos de estocagem, cuja capacidade individual deverá ser igual a 20% da capacidade estática total. No caso do bloco de armazenagem do silo ser composto por um pavilhão contínuo, no qual a compartimentação é obtida através de septos divisórios, estes terão a mesma área em relação à seção transversal do eixo principal do bloco, de maneira a oferecer plena estanqueidade de ambientes. A galeria de alimentação superior (carregamento dos compartimentos) situa-se sobre a cobertura, conectando os compartimentos por intermédio de aberturas apropriadas. A base ou fundo dos compartimentos apresenta-se em talude para facilitar a descarga.

Quanto à disposição e sustentação em relação ao solo são classificados em elevado, semi-subterrâneo ou subterrâneo por estarem respectivamente acima, em posição intermediária ou abaixo do nível do solo.

VII - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS ENSI - LADOS

Entre as cargas a considerar para o dimensionamento dos silos predominam as pressões exercidas sôbre as paredes laterais e sôbre o fundo do silo pelo material nele contido. Essas pressões recebem o nome genérico de empuxos e assemelham-se ao empuxo da água nas barragens ou do solo nos muros de arrimo.

Os materiais granulosos destinados ao armazenamento nos silos como o café, o trigo, a cevada, a areia e outros tem características importantes para o seu dimensionamento.

a) - Atrito Interno:

Trata-se de considerar no dimensionamento dos silos o efeito do atrito físico, de grão sôbre grão e do atrito fictício que se verifica em materiais desse tipo, formando um emaranhado e por êsse motivo oferece uma resistênciã maior ao livre deslocamento de seus grãos.

Na prática não se mede separadamente o efeito do atrito físico e do atrito fictício; mede-se o efeito conjunto desses dois tipos de atrito e a ele se dá o nome de atrito interno.

Por analogia com o atrito físico, representa-se o atrito interno por μ e denomina-se ângulo de atrito interno do material, o ângulo ϕ tal que:

$$\mu = \text{tg } \phi$$

A medida do atrito interno e de atrito sobre as paredes é realizada com dispositivo de cisalhamento de Hvorslev, com a aplicação de uma carga normal variando de $0,110 \text{ kg/cm}^2$ a $0,861 \text{ kg/cm}^2$ exercida por uma alavanca.

Tem sido constatado que o valor máximo do atrito interno é atingido rapidamente, com deformações de alguns milímetros (4 a 6 mm) sobre o perímetro do modelo. Ao mesmo tempo, o volume do modelo aumenta de 3 a 4%, pois a resistênciã ao cisalhamento decresce com algumas variações resultantes da dificuldade de se estabelecer um regime permanente de cisalhamento.

Obtém-se pois, para uma mesma pressão, dois valores de atrito interno; mínimo e máximo (este último sendo atingido com muito fracas deformações). A tabela seguinte dá uma variação

de valores obtidos para os máximos e mínimos do atrito interno do milho.

TABELA 6 - ATRITO INTERNO DO MILHO

Forças Normais	tg ϕ máx	tg ϕ min	Ângulo de Atrito	
			Máximo	Mínimo
0,1105	0,524 a	0,467 a	27° 30' a	25° 00' a
	0,477	0,370	25° 30'	20° 10'
0,2330	0,617 a	0,493 a	31° 40' a	26° 15' a
	0,530	0,400	27° 55'	21° 50'
0,6480	0,645 a	0,528 a	32° 50' a	27° 50' a
	0,608	0,475	31° 20'	25° 25'
0,8610	0,651 a	0,528 a	33° 05' a	27° 50' a
	0,608	0,487	31° 20'	26° 00'

Para os outros grãos estudados, os valores extremos dos ângulos de atrito são representados nos gráficos seguintes, obtidos pondo-se a pressão em abcissas e em ordenadas, o valor correspondente ao ângulo de atrito.

Os resultados obtidos não são parecidos:

Para o milho, o atrito interno aumenta rapidamente e regularmente com a carga tendendo a um valor constante.

Para os grãos oleaginosos os fenômenos são diferentes e obtém-se uma diminuição do atrito interno atingindo o mínimo seguido de um aumento.

Essas variações do atrito interno seguindo natureza dos grãos exigem alguns comentários.

Quando considera-se meios pulverulentos cujas partículas são pouco compressíveis, constata-se que os parâmetros que intervêm são o atrito da matéria construtiva dos grãos sobre eles mesmos e o emaranhado dos grãos que cresce com a capacidade do meio. Na prática, esse emaranhado é pouco modificado por pressões estáticas; por outro lado ele é muito sensível às vibrações.

No caso dos grãos de baixo peso específico a vibração é pouco prática mas a compressibilidade dos grãos intervém enormemente.

Para o milho, por exemplo, é necessário considerar não apenas a compressibilidade do caroço do grão mas, também, a

flexibilidade da película que o envolve sem aderir inteiramente a ele. Conclui-se então que quando a pressão aumenta os impactos entre os grãos aumentam, inicialmente bem depressa em consequência da flexibilidade da película externa.

Para os grãos oleaginosos, um parâmetro suplementar intervém modificando o atrito recíproco da superfície em contato.

Com efeito, mesmo para baixas pressões, há a emissão de um líquido oleoso que modifica o atrito nos ensaios de cisalhamento, constituindo, pois, uma dependência entre as diminuições do atrito entre os contatos mais ou menos lubrificados e o aumento de atrito devido aos impactos em consequência da compressibilidade global dos grãos (fig. 19 a 24).

COEFICIENTES DE ATRITO INTERNO

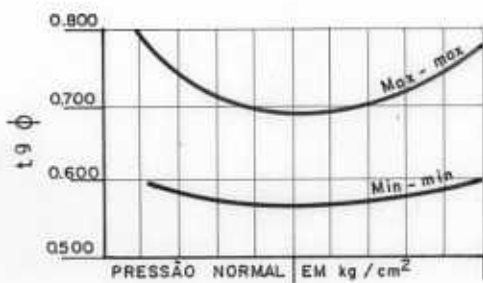


Fig.19- NABO

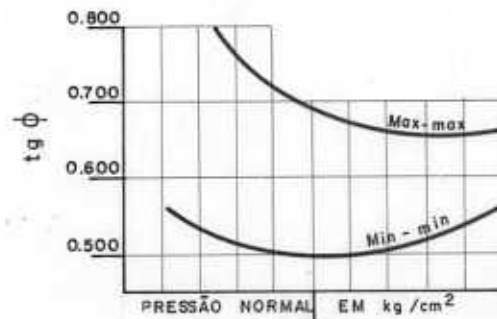


Fig.20 - COLZA



FIG.21 - CAMELINA

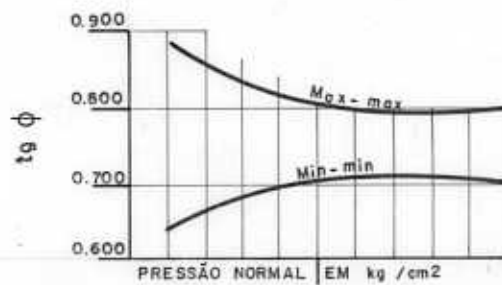


FIG 22 - PAPOULA

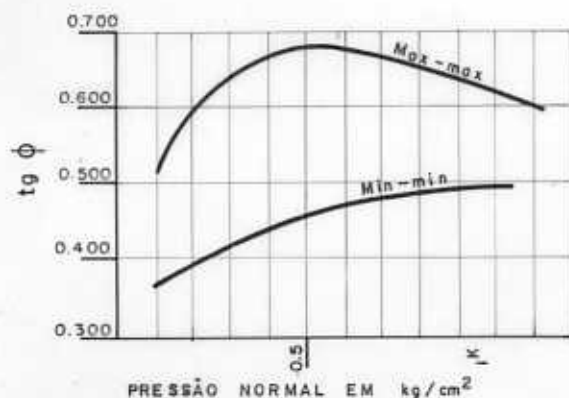


FIG.23 - MILHO

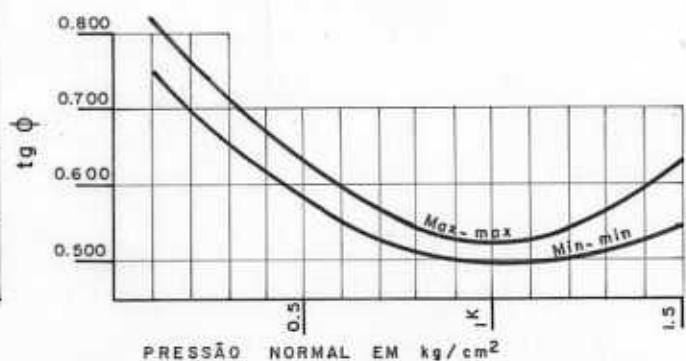


FIG.24 - TRIGO

b) - Coesão:

Quanto à coesão, distinguem-se, também, dois tipos: uma, a coesão propriamente dita e outra devido à tensão capilar da água envolvendo os grãos e que recebe o nome de coesão aparente.

Na prática não se mede separadamente o efeito desses dois tipos de coesão.

Nem todos os materiais granulosos apresentam a coesão aparente; tal é o caso dos materiais em que os vazios do emaranhado de seus grãos sejam muito grandes. Quando isto acontece o material recebe o nome de não coesivo, e se o material apresentar a coesão propriamente dita e a aparente, recebe o nome de material coesivo.

Os cereais, a areia, a argila reduzida a pó e os cimentos são materiais não coesivos.

c) - Talude Natural:

Chama-se ângulo de talude natural o aquele que a geratriz do cone, formado por uma porção de material granuloso disposto livremente sobre um plano horizontal e submetido só à ação da gravidade, faz com o plano horizontal.

No caso de materiais "não coesivos" o ângulo de talude natural coincide, praticamente, com o ângulo de atrito ϕ .

Os ângulos de talude são medidos utilizando-se uma caixa em forma de paralelepípedo com faces de vidro que permitem a observação direta do fenômeno e a medida direta dos ângulos.

Os ângulos médios usuais são apresentados na tabela 7.

d) - Cisalhamento:

Quando se exerce um esforço crescente T tendendo a cisalhar uma determinada porção de material granuloso (fig.25) há verã ruptura quando T atingir um valor igual à soma das resistências devidas ao atrito e à coesão, isto é, quando:

$$T = C + \mu N$$

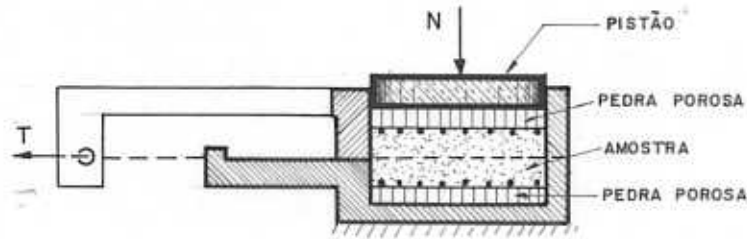


FIG. 25 - DISPOSITIVO DE CISALHAMENTO DE HVORSLEV

Sendo C a força de coesão, μ o coeficiente de atrito interno, N a força normal aplicada ao material e T a força cortante.

Pode-se estabelecer a relação:

$$T = \tau S$$

sendo S a área da seção cisalhada. Fazendo-se:

$$C = k S \quad \text{e} \quad N = \sigma S$$

resulta:

$$\tau = k + \mu \sigma$$

ou

$$\tau = k + \sigma \operatorname{tg} \phi$$

sendo:

τ e σ as tensões de cisalhamento e de compressão e k o coeficiente de coesão.

Para os cereais, para a areia, para o cimento e outros materiais não coesivos tem-se, praticamente $k = 0$ e τ é representável, em função de σ , por uma reta que passa pela origem das coordenadas e faz com o eixo dos σ um ângulo igual ao de atrito interno (fig. 26).

Para se obter o diagrama da figura 26, correspondente a diversos materiais não coesivos pode-se adotar o dispositivo de ensaio representado esquematicamente na figura 25. Ensaando-se o material para diferentes valores de N , aos quais corresponde, na ruptura, determinados valores de T , pode-se determinar vários pontos σ e τ .

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \phi$$

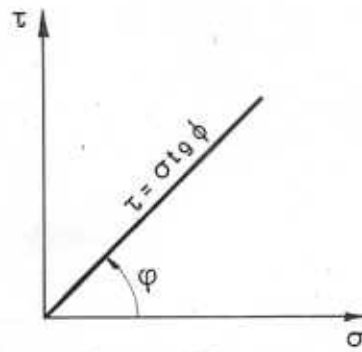


FIG. 26 - DIAGRAMA DE $\tau = f(\sigma)$

O gráfico assim traçado permite determinar, diretamente, o valor do ângulo de atrito interno ϕ e o coeficiente de atrito interno μ .

e) - Empuxo Ativo e Empuxo Passivo:

Considera-se um prisma A B C D de dimensões muito pequenas, de material granuloso (fig. 27).

Admitamos que para conservar o material sob a forma de prisma A B C D, de dimensões pequenas para se poder desprezar o efeito do peso próprio, sejam aplicadas nas faces AB e CD as pressões p e nas faces AD e BC as pressões q , de tal forma que não se verifique a ruptura por cisalhamento.

Haverá, então, aplicado p , um valor mínimo de q , que designaremos por q_a , a ser introduzido nas faces AD e BC, a fim de que o material não rompa por cisalhamento, como se indica na figura 28.a.

A relação:

$$\epsilon_a = \frac{q_a}{p}$$

é uma constante para cada material granuloso e recebe o nome de coeficiente de empuxo ativo.

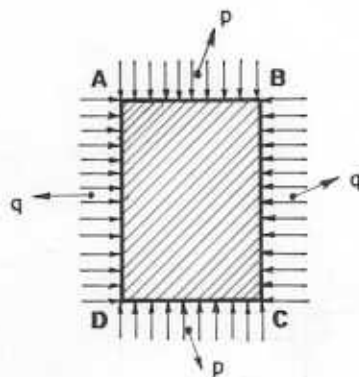


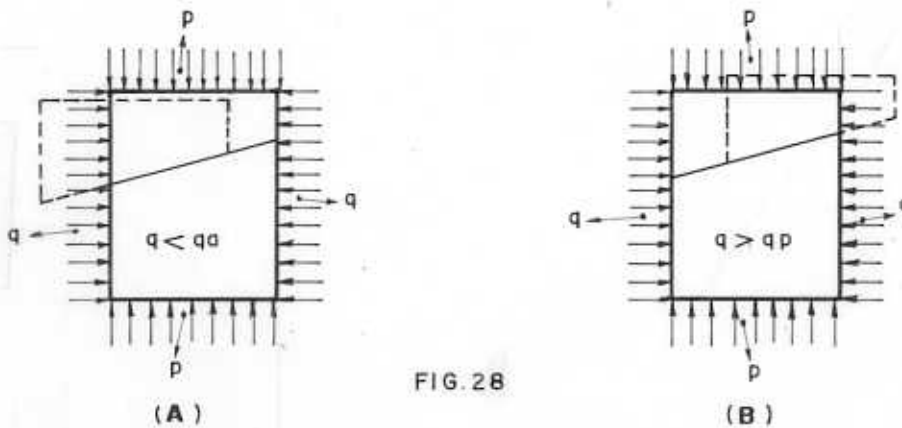
FIG. 27

Se aumentarmos o valor de q , além de q_a , atingiremos um valor q_p para o qual a ruptura se dá por efeito da pressão lateral (fig. 28).

A relação:

$$\epsilon_p = \frac{q_p}{p}$$

é também, uma constante para cada material granuloso e recebe o nome de coeficiente de empuxo passivo.



A razão dessas denominações está em que, para valores de q menores que q_a o material rompe por efeito da força ativa, representada pela pressão p e para valores de q maiores que q_p o material rompe por efeito da força reativa representada pela pressão q_p .

Fixado o valor de p , pode-se, atribuir a q um valor intermediário entre q_a e q_p para o qual o material não rompa por cisalhamento. Diminuindo q , quando se atinge o valor:

$$q \leq q_a$$

o material rompe por empuxo ativo (fig. 28.a); daí o dizer-se que esse tipo de ruptura corresponde ao limite de mínimo q . Aumentando q , o material rompe por empuxo passivo (fig. 28.b), quando se atinge o valor:

$$q \geq q_b$$

ruptura corresponde a um limite de máximo q .

De maneira geral denominar-se-á a relação:

$$\epsilon = \frac{q}{p}$$

de coeficiente de empuxo, e os casos limites de mínimo e de máximo, respectivamente, serão os que correspondem a $\epsilon = \epsilon_a$ ou $\epsilon = \epsilon_p$

f) - Coeficiente de Empuxo:

Para determinar as relações existentes entre o ângulo de atrito interno e os coeficientes de empuxo ativo e passivo de determinado material granuloso, não coesivo, considere-se um prisma desse material em equilíbrio sob a ação das pressões p e q (figura 29).

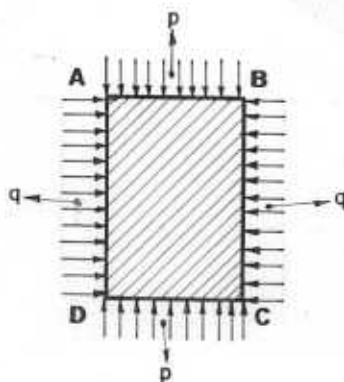


FIG. 29

Considere-se uma seção qualquer (MN) desse prisma, definida pelo ângulo α que MN faz com BC (figura 30); a porção considerada nessa figura estará em equilíbrio, por hipótese, sob a ação dos esforços que aí se indicam. Supondo unitária a espessura do elemento, seja S a área da superfície MN então $S \text{ sen } \alpha$ é a área da superfície MP e $S \text{ cos } \alpha$ a área da superfície NP. Nessas condições as equações que exprimem o equilíbrio do elemento MNP se escrevem:

$$p S \text{ sen } \alpha = R \text{ sen } (\alpha + \theta)$$

$$q S \text{ cos } \alpha = R \text{ cos } (\alpha + \theta)$$

donde:

$$\text{tg}(\alpha + \theta) = \frac{p}{q} \text{tg } \alpha = \frac{\text{tg } \alpha + \text{tg } \theta}{1 - \text{tg } \alpha \text{tg } \theta} = \frac{1}{\epsilon} \text{tg } \alpha$$

isto é:

$$\varepsilon \operatorname{tg} \alpha + \varepsilon \operatorname{tg} \theta = \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg}^2 \alpha \operatorname{tg} \theta$$

$$\operatorname{tg} \theta (\varepsilon + \operatorname{tg}^2 \alpha) = \operatorname{tg} \alpha (1 - \varepsilon)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon \operatorname{cotg} \alpha + \operatorname{tg} \alpha}$$

ou

$$\operatorname{cotg} \theta = \frac{\varepsilon \operatorname{cotg} \alpha + \operatorname{tg} \alpha}{1 - \varepsilon}$$

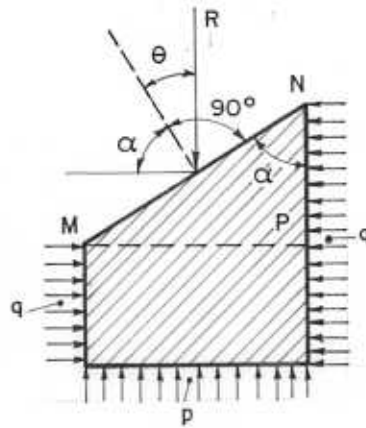


FIG. 30

Para determinar o ângulo α que define a seção MN para a qual θ é máximo ou é mínimo, derivamos essa expressão em relação a α , e igualamo-la a zero (observe-se que no intervalo de 0 a $\frac{\pi}{2}$ a cotangente é função monotônica decrescente). Portanto:

$$(1 - \varepsilon) \frac{d}{d\alpha} (\operatorname{cotg} \theta) = - \frac{\varepsilon}{\operatorname{sen}^2 \alpha} + \frac{1}{\operatorname{cos}^2 \alpha} = 0$$

donde:

$$\varepsilon = \operatorname{tg}^2 \alpha$$

e:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\varepsilon}$$

O máximo ou o mínimo valor de θ é obtido substituindo-se, na expressão de $\operatorname{tg} \theta$, o valor $\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\varepsilon}$, isto é:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{1 - \varepsilon}{\frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon}} + \sqrt{\varepsilon}} = \frac{1 - \varepsilon}{2\sqrt{\varepsilon}}$$

Em função de $\text{tg } \alpha$ obtem-se:

$$\text{tg } \theta = \frac{1 - \text{tg}^2 \alpha}{2 \text{tg } \alpha}$$

Essa expressão se escreve:

$$\text{tg } \theta = \frac{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha}{2 \sin \alpha \cos \alpha} = \frac{\cos 2 \alpha}{\sin 2 \alpha} = \text{cotg } 2 \alpha$$

Visto que a ruptura se dá para uma das duas condições seguintes:

$$1) - \theta = + \phi$$

$$2) - \theta = - \phi$$

ter-se-á, na ruptura:

$$\text{tg } (\pm \phi) = \text{cotg } 2 \alpha$$

isto é:

$$2 \alpha = \frac{\pi}{2} - \phi$$

$$\alpha = 45^\circ - \frac{\phi}{2}$$

ou:

$$2 \alpha = \frac{\pi}{2} + \phi$$

atingidos os valores de:

$$\alpha = 45^\circ \pm \frac{\phi}{2}$$

teremos um dos casos de ruptura (por empuxo ativo ou por empuxo passivo), aos quais correspondem $q = q_a$ ou $q = q_p$.

Como, por definição, $\epsilon_a < \epsilon_p$ resulta que:

$$\epsilon_a = \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)$$

$$\epsilon_p = \text{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

mas:

$$\epsilon_a = \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) = \text{cotg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1}{\epsilon_p}$$

donde:

$$\epsilon_a \cdot \epsilon_p = 1$$

Resumindo pode-se dizer que a ruptura de um material granuloso não coesivo, submetido à pressão p não se verificará quando o valor de q for:

$$\epsilon_a \cdot p < q < \epsilon_p \cdot p = \frac{1}{\epsilon_a} p$$

onde:

$$\epsilon_a = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)$$

g) - Densidade Aparente:

O método utilizado é aquele usado para os materiais pulverulentos (cimento) com um funil assegurando uma altura de queda constante. Os resultados são apresentados na tabela 7.

h) - Variação do Fluxo de escoamento em Função da Área de Abertura:

Estudos feitos pela Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola da UNICAMP, com respeito à influência da área da abertura e do tamanho dos grãos no fluxo de escoamento, permitem tirar as seguintes conclusões:

h.1) - O fluxo de escoamento independe da altura de matéria prima existente no silo.

h.2) - Quanto maior for o tamanho dos grãos, menor é o fluxo de escoamento para uma determinada abertura, ou seja, o fluxo de escoamento é inversamente proporcional ao tamanho dos grãos.

h.3) - A variação do fluxo de escoamento, em função da abertura, independentemente do tamanho é aproximadamente linear.

h.4) - A variação do fluxo de escoamento, em função do tamanho dos grãos, independentemente da área de abertura é aproximadamente descrita por uma função do segundo grau.

TABELA 7 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS ENSILADOS

Materiais Ensilados	δ (kg/m ³)	ϕ (°)	ϕ' (°)	ϵ_a
Acúcar.....	750	30	----	0,33
Antracite.....	800 a 850	26 a 28	25	0,39 a 0,36
Areias.....	1500 a 1800	30 a 35	27	0,33 a 0,27
Argilas.....	1800 a 2000	15 a 28	----	0,59 a 0,36
Arroz.....	580 a 620	24 a 26	22	0,42 a 0,41
Aveia.....	490 a 550	28	20	---- 0,36
Blenda.....	1700 a 2400	25 a 27	----	0,41 a 0,38
Cafê.....	700	25 a 28	----	0,41 a 0,36
Camelina.....	620 a 700	29	----	---- 0,35
Carvão Gordo.....	800 a 880	38 a 45	22	0,24 a 0,17
Carvão Magro.....	820 a 880	27 a 32	19	0,38 a 0,31
Centeio.....	700	37	44	---- 0,25
Cevada.....	520 a 700	25 a 28	18	0,41 a 0,36
Cimento.....	1400 a 1500	30 a 40	20	0,33 a 0,22
Cinza.....	600 a 750	25 a 40	25	0,41 a 0,22
Coque.....	400 a 450	35 a 40	35	0,27 a 0,22
Ervilha.....	800 a 880	24 a 26	15	0,42 a 0,41
Escoria de Ferro.....	900 a 1100	25 a 45	----	0,41 a 0,17
Farinha.....	600 a 1100	25 a 40	30	0,41 a 0,22
Fava.....	750	30	----	---- 0,33
Feijão.....	750	32	44	---- 0,31
Fosfatos.....	800 a 1400	35 a 45	----	0,27 a 0,17
Hulha.....	900	45	30	---- 0,17
Lignito.....	1000	35	30	---- 0,27
Linhaça.....	600 a 680	23 a 26	17	0,44 a 0,41
Malte.....	530 a 600	21 a 23	18	0,47 a 0,44
Milho.....	780 a 820	26 a 29	17	0,41 a 0,35
Minerais.....	1900 a 2000	40 a 45	30	0,22 a 0,17
Nabo.....	600 a 700	29	----	---- 0,35
Noz.....	800 a 900	35	----	---- 0,27
Pedra Britada.....	1700	45	30	---- 0,17
Saibro.....	1700 a 1900	30 a 40	----	0,33 a 0,22
Soja.....	750	30	----	---- 0,33
Sal.....	1250	40	30	---- 0,22
Trigo.....	740 a 850	24 a 26	20	0,42 a 0,41

VIII - SILOS CONVENCIONAIS DE MADEIRA

O estudo de soluções novas para a construção dos silos de madeira pode ser beneficiado pelo exame de silos convencionais de madeira.

Carneiro (6) descreve, com detalhes, o projeto do silo de madeira tipo "Wisconsin". O detalhe principal desse silo é a parede dupla formada por tábuas horizontais, com juntas deslocadas de meia largura, isto é, as internas funcionam como se fossem cobrejuntas.

Essas tábuas são pregadas umas sobre as outras em montantes verticais. Entre as duas tábuas é colocado material impermeável, como papel parafinado ou alcatroado (figura 31).

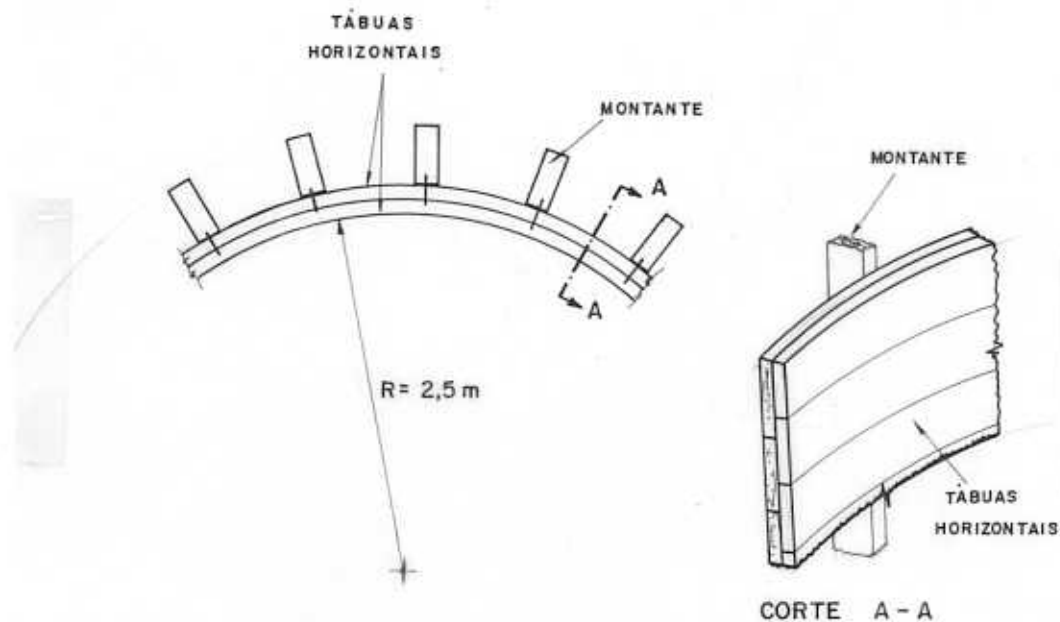


FIG. 31 - SILO DE MADEIRA TIPO WISCONSIN

O silo tipo Wisconsin apresenta aberturas na parede (janela de descarga) por onde se faz a sua descarga.

Em frente às janelas de descarga, é montado um tubo de seção quadrada ao longo de toda a altura do silo cuja finalidade é impedir que o material se espalhe quando se descarrega o silo.

Não é feita a menção a contraventamentos e não há necessidade do uso de cintas de reforço.

O piso é de concreto com um ralo central, os alicerces são de alvenaria e a cobertura é feita em forma de telhado convencional.

É construído nas medidas de 5 m de diâmetro por 12 m de altura e destina-se normalmente à forragem. O carregamento deste tipo de silo é feito através das janelas de descarga.

Outro tipo é o silo de vigotas verticais com juntas macho e fêmea, por meio de pregos compridos (figura 32).

No sentido vertical as vigotas são emendadas topo a topo, intercalando-se uma lâmina metálica embutida em cada topo à meia madeira, para dar resistência à junta e evitar a entrada de ar por esse ponto.

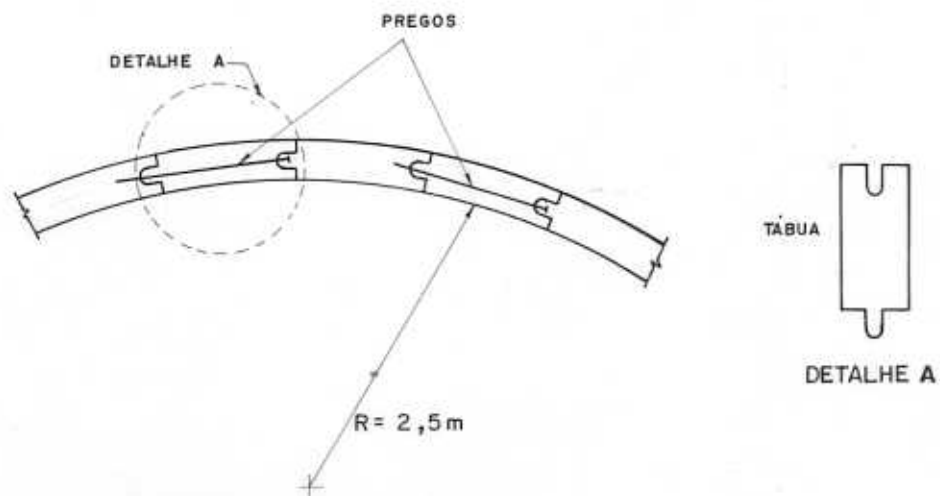


FIG. 32.- SILO DE VIGOTAS VERTICAIS

As janelas de descarga são abertas a bisel e suas folhas são constituídas por segmentos verticais de vigotas da mesma bitola das paredes, reunidas por meio de duas travessas horizontais.

Devido à posição vertical das tábuas, neste silo são usadas cintas de reforço ao longo da altura, presas através de esticadores.

A cobertura, o piso, os alicerces e o tubo de descarga são do mesmo tipo do silo Wisconsin, descrito anteriormente.

Um outro tipo descrito é o silo destinado principalmente ao armazenamento de sementes oleoginosas, como caroço de algodão, girassol, etc...

A sua construção, porém, é muito dispendiosa, pelo volume de madeira utilizado.

Sua estrutura consiste de montantes verticais, vigas e cambotas horizontais formando uma espécie de grelha (figura 33).

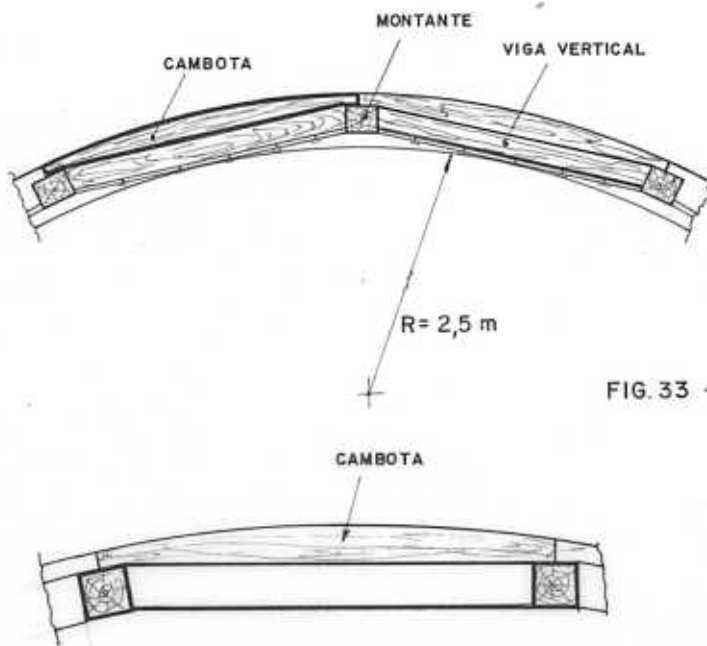


FIG. 33 - SILO-CELEIRO DE MADEIRA

Para o fechamento do silo, são utilizadas tábua aplicadas verticalmente sobre a estrutura de montantes e vigas.

A cobertura, o piso, os alicerces e o tubo de descarga são do mesmo tipo do silo Wisconsin.

DOS SILOS
IX - REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA DO CÁLCULO

a) - Silos Cilíndricos:

O cálculo das paredes verticais dos silos cilíndricos não apresenta passagens de dificuldades particulares.

Além da ação do peso próprio das paredes e das sobrecargas que podem ocorrer durante a construção dos silos, as paredes são solicitadas por dois esforços principais: a pressão horizontal devida ao material ensilado, que tende a se projetar na direção radial; e a força de atrito vertical do material sobre as paredes, responsável pelos esforços de compressão.

Sendo q_z a pressão horizontal e R o raio interno do silo, a parede deve ser calculada para resistir a um esforço de tração (T), por unidade de altura, igual a:

$$T = R \cdot q_z$$

Na direção vertical, a espessura da parede é determinada em função da força de atrito do material ensilado por metro linear periférico, à profundidade z , dada por:

$$F_z = \delta \cdot r \cdot \frac{z^2}{z + A}$$

onde:

δ = peso específico do material ensilado (vide tabela 7).

r = raio médio da seção.

z = cota vertical do silo, contada de cima para baixo a partir do cimo (cume).

A = abcissa característica (vide teoria, capítulo seguinte).

OBS: Embora exista um estado duplo de tensões, o elemento é dimensionado para cada um dos esforços em separado, de acordo com a teoria de A. Reimbert e dada a omissão da NB-11 a respeito do problema.

b) - Silos de Base Poligonal Regular:

As paredes dos silos de base poligonal regular são solicitadas no plano horizontal pelos momentos de flexão devidos à pressão direta dos grãos e pelos esforços de tração devidos às reações de apoio das paredes adjacentes; e no plano vertical, pelos mesmos esforços definidos para os silos cilíndricos.

A espessura das paredes é constante num mesmo plano horizontal, b é o lado do polígono regular e q_z a pressão horizontal.

Momentos de Flexão:

Os momentos fletores valem:

$$M' = \frac{q_z b^2}{12} \quad \text{nos encontros entre duas arestas}$$

$$M = \frac{q_z b}{24} \quad \text{nos pontos médios de cada aresta}$$

Esforços de Tração:

No caso de um polígono regular de n lados, o valor de um ângulo externo é:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{n}$$

A reação de apoio de uma aresta sobre a outra é:

$$t = \frac{q_z b}{2}$$

Esta reação de apoio se decompõe segundo a direção da parede considerada e segundo a direção da parede adjacente.

Sejam T_1 e T_2 as componentes respectivas de t segundo estas duas direções (figura 34) tem-se:

$$T_1 = \frac{t}{\operatorname{tg} \alpha} \quad \text{e} \quad T_2 = \frac{t}{\operatorname{sen} \alpha}$$

O esforço de tração solicitando cada parede \bar{e} :

$$T = T_1 + T_2 = t \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{1}{\operatorname{sen} \alpha} \right)$$

$$T = \frac{q_z b}{2} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{\operatorname{sen} \alpha} \right)$$

No caso dos polígonos regulares seguintes; tem-se:

triângulo $T = \frac{q_z b}{2} \cdot \frac{1 - 0,5}{0,866} = 0,288 q_z b$

quadrado $T = 0,5 q_z b$

pentágono $T = \frac{q_z b}{2} \cdot \frac{1 + 0,309}{0,951} = 0,688 q_z b$

hexágono $T = \frac{q_z b}{2} \cdot \frac{1 + 0,5}{0,866} = 0,865 q_z b$

Octógono $T = \frac{q_z b}{2} \cdot \frac{1 + 0,707}{0,707} = 1,205 q_z b$

decágono $T = \frac{q_z b}{2} \cdot \frac{1 + 0,809}{0,5878} = 1,53 q_z b$

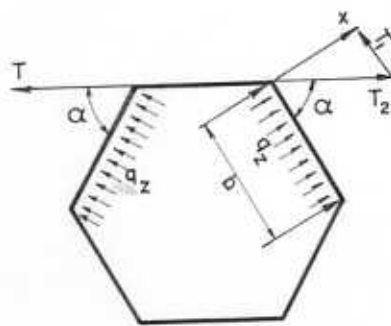


FIG. 34 - ESFORÇOS DE TRAÇÃO

X - CÁLCULO DAS TENSÕES PELO MÉTODO DE A. REIMBERT

Notações:

- δ = peso de um metro cúbico de material ensilado.
- ϕ = ângulo de atrito interno do material.
- ϕ' = ângulo de atrito do material com as paredes do silo.
- S = área do silo
- L = perímetro de uma seção transversal do silo.
- D = diâmetro do silo.
- r = raio médio da seção: $r = \frac{S}{L}$
- z = cota vertical do silo, contada de cima para baixo a partir do cimo (cume).
- q = pressão horizontal exercida sobre as paredes pelo material ensilado.
- p = pressão vertical exercida pelo material ensilado.
- q_z = pressão horizontal à profundidade z .
- p_z = pressão vertical média à profundidade z .
- q_{max} = pressão horizontal máxima.
- p_{max} = pressão vertical máxima.
- P_{max} = força vertical total máxima.
- $P_{max} = S \cdot p_{max}$

O valor da pressão horizontal máxima é calculado considerando-se uma fatia horizontal de espessura $d z$ de um silo carregado. Seu peso é igual a: $S d z \delta$, exercendo sobre as paredes do silo um esforço horizontal igual a $q_z \cdot L \cdot d z$ por todo o perímetro da célula de diâmetro D .

Esse esforço é crescente com a profundidade até que alcance q_{max} , tal que o atrito equilibre o peso próprio da seção considerada. Tem-se portanto:

$$q_{m\bar{x}} \cdot L \cdot dz \cdot \text{tg } \phi' = S \cdot dz \cdot \delta$$

obtendo-se o valor da pressão horizontal máxima.

$$q_{m\bar{x}} = \frac{\delta \cdot S}{L \cdot \text{tg } \phi'} = \frac{\delta \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot \pi \cdot D \cdot \text{tg } \phi'}$$

$$q_{m\bar{x}} = \frac{\delta \cdot D}{4 \cdot \text{tg } \phi'} \dots\dots\dots (1)$$

Como visto no capítulo VII, em um maciço pulverulento em equilíbrio-limite, a relação dos esforços extremos $\bar{\epsilon}$:

$$\epsilon_a = \frac{q}{p} = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)$$

de onde tira-se o valor da pressão vertical máxima.

$$p_{m\bar{x}} = \frac{q_{m\bar{x}}}{\text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)} \dots\dots\dots (2)$$

ou:

$$p_{m\bar{x}} = \frac{\delta \cdot D}{4 \cdot \text{tg } \phi' \cdot \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)} \dots\dots\dots (3)$$

Conhecendo a pressão horizontal máxima agindo sobre as paredes de um silo infinito e a pressão vertical máxima correspondente, hã condições de se encontrarem os seus valores a uma profundidade determinada no interior de um silo.

Tais valores serão conseguidos logo que se conheça a função da curva representativa das cargas equilibradas pelo atrito sobre as paredes.

Determinação da Função da Curva Representativa das Cargas Equilibradas pelo Atrito sobre as Paredes dos Silos:

Obtém-se a curva representativa das cargas equilibradas pelo atrito da seguinte maneira:

Se o material está ensilado sem atrito sobre as paredes, a carga sobre o fundo, à profundidade z será:

$$P_z = \delta \cdot S \cdot z + \delta \cdot S \frac{h}{3}$$

sendo h a altura do cone do material ensilado acima do plano horizontal que passa pela origem ($z = 0$), valendo:

$$h = \frac{D}{2} \cdot \operatorname{tg} \phi \dots\dots\dots (4)$$

sendo D o diâmetro do silo.

A curva representativa da carga P será a reta I, de coeficiente angular $\delta \cdot S$, com ordenada na origem (figura 35):

$$P_0 = \delta \cdot S \frac{h}{3} \dots\dots\dots (5)$$

Traça-se a curva II (obtida experimentalmente) representando a carga sobre o fundo e transporta-se em ordenadas, para os diversos valores de z , a diferença das ordenadas da curva I (carga sobre o fundo do silo no caso de atrito nulo) e das ordenadas da curva II (cargas reais sobre o fundo). Assim, fica determinada a curva III, das cargas equilibradas pelo atrito. A curva II é tangente à reta I para $z = 0$ e é assintota a uma paralela distante $P_{m\bar{a}x}$ do eixo z .

$$P_{m\bar{a}x} = S \cdot P_{m\bar{a}x}$$

$$P_{m\bar{a}x} = \frac{\delta \cdot S \cdot D}{4 \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)} \dots\dots\dots (6)$$

A curva III é portanto, tangente ao eixo Z para $Z = 0$, e suas ordenadas são inferiores, às da curva I, do valor $P_{m\bar{a}x}$. A assintota à curva III tem coeficiente angular $\delta \cdot S$ e ordenada na origem - $(P_{m\bar{a}x} - P_0)$.

Estes são os parâmetros que orientarão a pesquisa da equação da curva III representativa das cargas equilibradas pelo atrito do material ensilado sobre as paredes dos silos.

Estudos anteriores mostram que esta curva pode ser representada com uma boa precisão, para um ramo da hipérbole da forma:

$$y = \frac{a z^2 + b z + c}{d z + e}$$

A equação da assíntota a esse ramo da hipérbole é:

$$y = \delta \cdot S \cdot z - (P_{\text{máx}} - P_0)$$

e o coeficiente angular $\delta \cdot S$ da assíntota corresponde ao limite de $\frac{y}{z}$ quando $z \rightarrow \infty$

$$\frac{y}{z} = \frac{a \cdot z^2 + b \cdot z + c}{z(d \cdot z + e)}$$

quando $z \rightarrow \infty$, a relação $\frac{y}{z}$ tende para a relação $\frac{a}{d}$ dos coeficientes dos termos de maior grau.

logo: $\lim_{z \rightarrow \infty} \frac{y}{z} = \frac{a}{d} = \delta \cdot S$ ou $a = d \cdot \delta \cdot S$

quando $z \rightarrow \infty$

Então, para $z = 0$, a pressão vertical é nula, pois a carga equilibrada pelo atrito é nula, e o numerador da função deve ser nulo, de onde:

$$c = 0$$

e a função torna-se:

$$y = \frac{d \cdot \delta \cdot S \cdot z^2 + b \cdot z}{d \cdot z + e}$$

A curva, sendo tangente ao eixo z por $z = 0$, tem derivada nula nesse ponto, de onde:

$$y' = \frac{(d \cdot z + e) (2d \cdot \delta \cdot S \cdot z + b) - (d \cdot \delta \cdot S \cdot z^2 + b \cdot z) d}{(d \cdot z + e)^2}$$

para $z = 0$ o numerador deve ser nulo, ou seja:

$$y' = b e = 0$$

ora e não pode ser nulo porque a função se tornaria linear, portanto é necessário que $b = 0$ e a função geral torna-se:

$$y = \frac{d \cdot \delta \cdot S \cdot z^2}{d \cdot z + e}$$

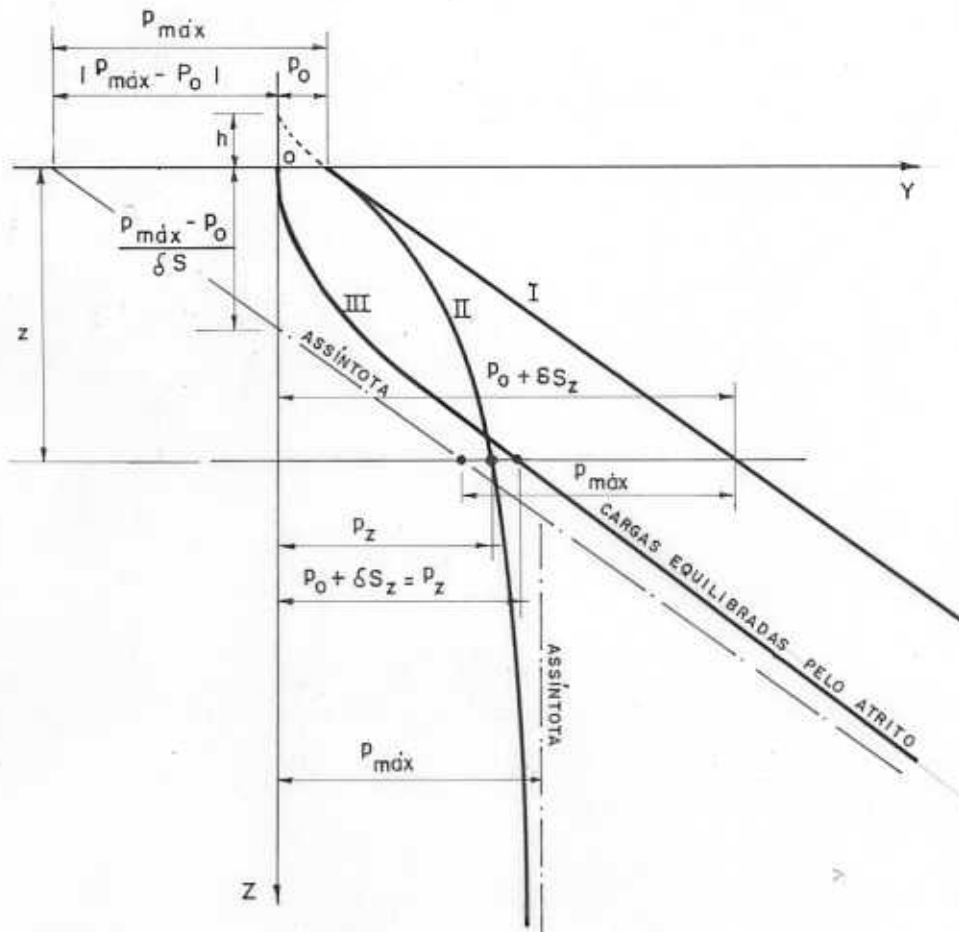


FIG.35- CURVA DAS CARGAS EQUILIBRADAS PELO ATRITO

A ordenada na origem da assíntota: $-(P_{máx} - P_0)$ corresponde a: $\lim_{z \rightarrow \infty} y - \delta \cdot S \cdot z$

$$z \rightarrow \infty$$

portanto:

$$y - \delta \cdot S \cdot z = \frac{d \cdot \delta \cdot S \cdot z^2}{d \cdot z + e} - \delta \cdot S \cdot z = - \frac{e \cdot \delta \cdot S \cdot z}{d \cdot z + e}$$

quando $z \rightarrow \infty$, $y - \delta \cdot S \cdot z \rightarrow \frac{\infty}{\infty}$ cujo limite é o mesmo que o da relação das derivadas onde:

quando $z \rightarrow \infty$

$$y - \delta \cdot S \cdot z = - \frac{e \cdot \delta \cdot S}{d} = - (P_{m\bar{a}x} - P_0)$$

ou

$$e = \frac{d (P_{m\bar{a}x} - P_0)}{\delta \cdot S}$$

e a função procurada é:

$$y = \frac{d \cdot \delta \cdot S \cdot z^2}{d z + d \frac{(P_{m\bar{a}x} - P_0)}{\delta \cdot S}}$$

$$y = \frac{\delta \cdot S \cdot z^2}{z + \frac{P_{m\bar{a}x} - P_0}{\delta \cdot S}} \dots \dots \dots (7)$$

É a fórmula fundamental do cálculo dos silos resumida por:

$$y = \frac{\delta \cdot S \cdot z^2}{z + A} \dots \dots \dots (8)$$

com

$$A = \frac{P_{m\bar{a}x} - P_0}{\delta \cdot S} \dots \dots \dots (9)$$

Esta grandeza A tem as dimensões de comprimento e define a abscissa na origem da assíntota à curva das cargas equilibradas pelo atrito; também é chamada de: abscissa característica, para fixar a importância do papel que ela desempenha no cálculo dos silos.

Por outro lado nota-se que:

$$P_0 = S \cdot \delta \frac{h}{3}$$

e

$$P_{m\bar{a}x} = \frac{\delta \cdot S \cdot r}{\text{tg } \phi' \text{ tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)}$$

a fórmula (9) da abscissa característica torna-se pois:

$$A = \frac{D}{4 \text{ tg } \phi' \text{ tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)} - \frac{h}{3} \dots \dots \dots (10)$$

que será conservada finalmente para a apresentação dos cálculos.

É agora possível determinar a função da curva da pressão horizontal sobre as paredes e a função da curva da pressão vertical sobre o fundo de um silo.

Pressão Horizontal sobre as Paredes:

O conhecimento da carga equilibrada pelo atrito sobre as paredes, a um nível dado, para aplicação da fórmula fundamental (8), permite determinar, neste mesmo nível, a pressão horizontal do material ensilado sobre as paredes.

A função da curva da carga total equilibrada pelo atrito sobre as paredes ao nível z , é:

$$y = \frac{\delta \cdot S \cdot z^2}{z + A}$$

Se q_z é a pressão horizontal no nível z e a tangente ϕ' o coeficiente de atrito do material sobre as paredes, a carga equilibrada pelo atrito sobre as paredes, para uma fatia de espessura dz é:

$$q_z \cdot L \cdot dz \cdot \operatorname{tg} \phi'$$

$$q_z \cdot L \cdot dz \cdot \operatorname{tg} \phi' = \delta \cdot S \frac{z^2 + 2 A z}{(z + A)^2} dz$$

$$q_z = \frac{\delta \cdot S}{L \cdot \operatorname{tg} \phi'} \cdot \frac{z^2 + 2 A z}{(z + A)^2} = \frac{\delta \cdot S}{L \operatorname{tg} \phi'} \left[1 - \frac{A^2}{(z + A)^2} \right]$$

$$q_z = \frac{\delta \cdot S}{L \cdot \operatorname{tg} \phi'} \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{z}{A} + 1\right)^2} \right]$$

ora:

$\frac{\delta \cdot S}{L \cdot \operatorname{tg} \phi'}$, é a pressão horizontal máxima sobre as paredes; finalmente a pressão horizontal sobre as paredes é:

$$q_z = q_{\max} \left[1 - \left(\frac{z}{A} + 1\right)^{-2} \right] \dots\dots\dots (11)$$

Pressão Total sobre as Paredes:

A pressão total por unidade de comprimento periférico de parede à profundidade z , é:

$$Q_z = \frac{\delta \cdot r}{\rho g \cdot \phi^r} \int_0^z \left[1 - \left(\frac{z}{A} + 1\right)^{-2} \right] dz$$

Fazendo:

$$I_1 = \int dz ; \quad I_2 = \int \left(\frac{z}{A} + 1\right)^{-2} dz ; \quad u = \frac{z}{A} + 1$$

tem-se:

$$I = \int \left[1 - \left(\frac{z}{A} + 1\right)^{-2} \right] dz = \int dz - \int \left(\frac{z}{A} + 1\right)^{-2} dz$$

$$I = I_1 - I_2$$

ora:

$$I_1 = z + Cte \quad e \quad I_2 = \int \left(\frac{z}{A} + 1\right)^{-2} dz = \int \frac{dz}{\left(\frac{z}{A} + 1\right)^2}$$

Fazendo:

$$u = \frac{z}{A} + 1 \rightarrow du = \frac{1}{A} dz \rightarrow dz = A \cdot du$$

$$I_2 = \int \frac{A \cdot du}{u^2} = -\frac{A}{u} + Cte = -\frac{A}{\frac{z}{A} + 1} + Cte \rightarrow$$

$$\rightarrow I = I_1 - I_2 = z + \frac{A}{\frac{z}{A} + 1} + Cte$$

Ora, para $z = 0$ a pressão é nula, então o valor da constante Cte = $-A$, de onde:

$$I = \int_0^z \left[1 - \left(\frac{z}{A} + 1\right)^{-2} \right] dz = z + \frac{A^2}{z + A} - A$$

Finalmente a pressão total por unidade de comprimento periférico de parede e sobre a altura z é:

$$Q_z = \frac{\delta r}{\rho g \cdot \phi^r} \left[z + \frac{A^2}{z + A} - A \right] \dots \dots \dots (12)$$

(kg/metro periférico)

Ponto de Aplicação da Resultante da Pressão Horizontal na Parede:

Em certos procedimentos de construção de silos, é necessário conhecer a posição do ponto de aplicação da resultante da pressão horizontal dos grãos sobre a parede de um silo, para se determinar as reações de apoio no topo e na base dessa parede.

A distância z_g do ponto de aplicação da resultante da pressão horizontal, a partir do topo da parede é dado por:

$$z_g = \frac{\int_0^z z \cdot q_z \cdot dz}{\int_0^z q_z \cdot dz} = \frac{\frac{\delta \cdot h}{\lambda g \cdot \phi'} \int_0^z z \left[1 - \left(\frac{z}{A} + 1 \right)^{-2} \right] dz}{\frac{\delta \cdot h}{\lambda g \cdot \phi'} \int_0^z \left[1 - \left(\frac{z}{A} + 1 \right)^{-2} \right] dz}$$

ou:

$$z_g = \frac{\int_0^z z \left[1 - \left(\frac{z}{A} + 1 \right)^{-2} \right] dz}{z + \frac{A^2}{z + A} - A}$$

fazendo:

$$\int z \cdot dz = I_1 \quad \text{e} \quad \int \frac{z}{\left(\frac{z}{A} + 1 \right)^2} dz = I_2$$

O numerador torna-se: $I = I_1 - I_2$

ora: $I_1 = \frac{1}{2} z^2 + Cte$

Fazendo:

$$\frac{z}{A} + 1 = u$$

donde: $z = A(u - 1)$

$$\frac{dz}{A} = du$$

donde:

$$dz = A \cdot du$$

$$I_2 = \int \frac{A(u-1)}{u^2} A du = A^2 \int \frac{du}{u} - A^2 \int \frac{du}{u^2}$$

$$A^2 \int \frac{du}{u} = A^2 \cdot \ln u + Cte = A^2 \ln\left(\frac{z}{A} + 1\right) + Cte$$

$$A^2 \int \frac{du}{u^2} = -\frac{A^2}{u} + Cte = -\frac{A^2}{\frac{z}{A} + 1} + Cte$$

donde:

$$I_2 = A^2 \ln\left(\frac{z}{A} + 1\right) + \frac{A^2}{\frac{z}{A} + 1} + Cte$$

e finalmente:

$$I = I_1 - I_2 = \frac{1}{2} z^2 - A^2 \ln\left(\frac{z}{A} + 1\right) - \frac{A^2}{\frac{z}{A} + 1} + Cte$$

para $z = 0$ a distância z_g é nula, então: $Cte = 0$

tem-se pois, entre os limites 0 e z :

$$\int_0^z z \left[1 - \left(\frac{z}{A} + 1\right)^{-2} \right] dz = \frac{1}{2} z^2 - A^2 \ln\left(\frac{z}{A} + 1\right) - \frac{A^2}{\frac{z}{A} + 1}$$

e a distância z_g procurada é:

$$z_g = \frac{\frac{z^2}{2} - A^2 \ln\left(\frac{z}{A} + 1\right) - \frac{A^2}{\frac{z}{A} + 1} + A^2}{z + \frac{A^2}{z + A} - A}$$

Para facilitar os cálculos, a tabela 8 dá os valores dos logarítimos neperianos: $\ln\left(\frac{z}{A} + 1\right)$ na segunda coluna em função do valor de $\frac{z}{A}$ na primeira coluna.

Pressão Vertical sobre o Fundo:

O peso total do material ensilado a um nível z determinado \bar{e} :

$$P_z = \delta \cdot S \cdot z + \delta \cdot S \frac{h}{3} = S \cdot \delta \left(z + \frac{h}{3} \right)$$

A carga equilibrada neste mesmo nível pelo atrito do material ensilado \bar{e} :

$$P'_z = \frac{\delta \cdot S \cdot z^2}{z + A}$$

A pressão vertical total ou carga sobre o plano horizontal ao nível $z \bar{e}$, pois:

$$P_z^* = P_z - P'_z = \delta \cdot S \left(z + \frac{h}{3} \right) - \frac{\delta \cdot S \cdot z^2}{z + A}$$

ou:

$$P_z^* = \delta \cdot S \left(z + \frac{h}{3} - \frac{z^2}{z + A} \right)$$

finalmente:

$$P_z^* = \delta \cdot S \left[z \left(\frac{z}{A} + 1 \right)^{-1} + \frac{h}{3} \right]$$

R E S U M O

Silos Cilíndricos:

Pressão horizontal máxima: $q_{m\bar{a}x} = \frac{\delta D}{4 \operatorname{tg} \phi'}$,

Abscissa característica: $A = \frac{D}{4 \operatorname{tg} \phi' \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2} \right)} - \frac{h}{3}$

Pressão horizontal sobre as paredes \bar{a} profundidade z :

$$q_z = q_{m\bar{a}x} \left[1 - \left(\frac{z}{A} + 1 \right)^{-2} \right]$$

Pressão vertical média \bar{a} profundidade z :

$$P_z = \delta \left[z \left(\frac{z}{A} + 1 \right)^{-1} + \frac{h}{3} \right]$$

TABELA 8 - VALORES DO $\ln(\frac{z}{\lambda} + 1)$ EM FUNÇÃO DE $\frac{z}{\lambda}$

$\frac{z}{\lambda}$	$\ln(\frac{z}{\lambda} + 1)$	$\frac{z}{\lambda}$	$\ln(\frac{z}{\lambda} + 1)$	$\frac{z}{\lambda}$	$\ln(\frac{z}{\lambda} + 1)$	$\frac{z}{\lambda}$	$\ln(\frac{z}{\lambda} + 1)$	$\frac{z}{\lambda}$	$\ln(\frac{z}{\lambda} + 1)$	$\frac{z}{\lambda}$	$\ln(\frac{z}{\lambda} + 1)$	$\frac{z}{\lambda}$	$\ln(\frac{z}{\lambda} + 1)$
1,0	0,693	2,0	1,099	3,0	1,386	4,0	1,609	5,0	1,792	6,0	1,946	7,0	2,079
1,1	0,742	2,1	1,131	3,1	1,411	4,1	1,629	5,1	1,808	6,1	1,970	7,1	2,092
1,2	0,788	2,2	1,163	3,2	1,435	4,2	1,649	5,2	1,825	6,2	1,974	7,2	2,104
1,3	0,833	2,3	1,194	3,3	1,459	4,3	1,668	5,3	1,840	6,3	1,988	7,3	2,116
1,4	0,865	2,4	1,224	3,4	1,482	4,4	1,686	5,4	1,856	6,4	2,001	7,4	2,128
1,5	0,916	2,5	1,253	3,5	1,504	4,5	1,705	5,8	1,862	6,5	2,015	7,5	2,140
1,6	0,956	2,6	1,281	3,6	1,526	4,6	1,723	5,6	1,887	6,6	2,028	7,6	2,152
1,7	0,993	2,7	1,308	3,7	1,548	4,7	1,740	5,7	1,902	6,7	2,041	7,7	2,163
1,8	1,030	2,8	1,335	3,8	1,569	4,8	1,758	5,8	1,917	6,8	2,054	7,8	2,175
1,9	1,065	2,9	1,361	3,9	1,589	4,9	1,775	5,9	1,932	6,9	2,067	7,9	2,186

XI - DIMENSIONAMENTO DE UM PROTÓTIPO DE MADEIRA

a) - Cálculo Teórico do Silo pelo Método de Reimbert:

Silo Base: $D = 5 \text{ m}$

$H = 15 \text{ m}$

material de ensilagem: milho.

$q_{m\bar{a}x}$ = pressão horizontal máxima

$$q_{m\bar{a}x} = \frac{\delta D}{4 \operatorname{tg} \phi'}$$

δ = peso de um metro cúbico de material ensilado.

ϕ' = ângulo de atrito do material com as paredes do silo.

para o milho

$$\delta = 720 \text{ kg/m}^3 = 0,00072 \text{ kg/cm}^3$$
$$\phi' = 18^\circ$$

$$q_{m\bar{a}x} = \frac{720 \cdot 5}{4 \cdot \operatorname{tg} 18^\circ} = 2.770 \text{ kg/m}^2 = 0,28 \text{ kg/cm}^2$$

$p_{m\bar{a}x}$ = pressão vertical máxima

$$p_{m\bar{a}x} = \frac{q_{m\bar{a}x}}{\operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)}$$

ϕ = ângulo de atrito interno do material.

para o milho $\phi = 28^\circ$

$$p_{m\bar{a}x} = 0,78 \text{ kg/cm}^2$$

Altura do cone superior do material ensilado:

$$h = \frac{D}{2} \cdot \operatorname{tg} \phi = \frac{5}{2} \cdot 0,53 = 1,33 \text{ m}$$

Raio médio da seção:

$$r = \frac{S}{L} = \frac{\frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = \frac{D}{4} = \frac{5}{4} = 1,25 \text{ m}$$

Abscissa Característica:

$$A = \frac{D}{4 \operatorname{tg} \phi' \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2} \right)} - \frac{h}{3} = \frac{5}{4 \cdot 0,325 \cdot 0,361} - \frac{1,33}{3}$$

$$A = 10,21 \text{ m}$$

Pressão horizontal sobre as paredes à profundidade z

$$q_z = q_{\max} \left[1 - \left(\frac{z}{A} + 1 \right)^{-2} \right]$$

Pressão vertical média à profundidade z :

$$p_z = \delta \left[z \left(\frac{z}{A} + 1 \right)^{-1} + \frac{h}{3} \right]$$

z contando de cima para baixo

z (m)	$\frac{z}{A} + 1$	q_z (kg/cm ²)	p_z (kg/cm ²)
1	1,098	0,047	0,097
2	1,196	0,084	0,152
3	1,294	0,113	0,199
4	1,392	0,135	0,239
5	1,489	0,154	0,274
6	1,588	0,169	0,304
7	1,686	0,181	0,331
8	1,784	0,192	0,355
9	1,881	0,201	0,376
10	1,979	0,209	0,396
11	2,077	0,215	0,413
12	2,175	0,221	0,429
13	2,273	0,226	0,444
14	2,371	0,230	0,457
15	2,469	0,234	0,469

Q_z = pressão total sobre as paredes

$$Q_z = \frac{\delta \kappa}{\operatorname{tg} \phi'} \left[z + \frac{A^2}{z + A} - A \right]$$

Ponto de aplicação da resultante da pressão horizontal na parede:

$$z_g = \frac{\frac{z^2}{2} - A^2 \ln\left(\frac{z}{A} + 1\right) - \frac{A^2}{\frac{z}{A} + 1} + A^2}{z + \frac{A^2}{z + A} - A}$$

para $z = 15$ m:

$$z_g = \frac{\frac{15^2}{2} - 10,21^2 \ln\left(\frac{15}{10,21} + 1\right) - \frac{10,21^2}{\frac{15}{10,21} + 1} + 10,21^2}{15 + \frac{10,21^2}{15 + 10,21} - 10,21} = \frac{112,5 - 94,22}{8,925}$$

$$z_g = 8,997 \text{ m}$$

Pressão vertical sobre o fundo:

$$P_z = \delta \cdot S \left[z \left(\frac{z}{A} + 1 \right)^{-1} + \frac{h}{3} \right]$$

para o fundo:

$$z = 15 \text{ m} \quad + \quad h = 15 - 1,33 = 13,67 \text{ m}$$

$$P_{13,67} = 720 \cdot \frac{\pi \cdot 5^2}{4} \left[13,67 \left(\frac{13,67}{10,21} + 1 \right)^{-1} + \frac{1,33}{3} \right]$$

$$P_{13,67} = 88894,54 \approx 89000 \text{ kg}$$

Esforços de tração nas paredes do silo:

$$T = R \cdot q_z$$

$$R = 250 \text{ cm}$$

z (m)	q_z (kg/cm ²)	T (kg/cm)
1	0,047	11,75
2	0,084	21,00
3	0,113	28,25
4	0,135	33,75
5	0,154	38,50
6	0,169	42,25
7	0,181	45,25
8	0,192	48,00
9	0,201	50,25
10	0,209	52,25
11	0,215	53,75
12	0,221	55,25
13	0,226	56,50
14	0,230	57,50
15	0,234	58,50

Esforços de compressão nas paredes do silo:

$$F_z = \delta \cdot \kappa \frac{z^2}{z + A}$$

Tabela da força de atrito ao longo do comprimento:

z (m)	$\frac{z^2}{z + A}$	F_z (kg/cm)
1	0,089	0,80
2	0,328	2,95
3	0,681	6,13
4	1,126	10,13
5	1,644	14,80
6	2,221	19,99
7	2,847	25,62
8	3,515	31,64
9	4,217	37,95
10	4,948	44,53
11	5,705	51,35
12	6,484	58,36
13	7,281	65,53
14	8,096	72,86
15	8,925	80,33

b - Aproximações de Cálculo Devidas ao Método Construtivo do PROTÓTIPO:

Os esforços calculados no item anterior são válidos para um silo cilíndrico com paredes de espessura constante.

Nesse caso, para ligações, tanto horizontal como vertical das chapas de compensado, foram usados montantes de peroba rosa de dimensões (6×12) cm² de seção por 5 m de comprimento.

Esses montantes foram chanfrados no ângulo determinado pela geometria do silo e colados às chapas de compensado de 55 em 55 cm (o que corresponde à dimensão de meia chapa) por 2,20 m de comprimento.

Com isso houve um enrijecimento na estrutura que necessita ser adaptada para as novas condições do rearranjo tensional.

Portanto, com a colocação dos montantes, haverá uma parcela de carga absorvida pelos mesmos e, outra absorvida, pelas chapas. Tais parcelas necessitam ser determinadas teoricamente e depois comprovadas com os ensaios.

c - Ensaio de tração e compressão em corpos de prova de madeira compensada:

Ensaio de tração:

Os ensaios de tração em corpos de prova de madeira compensada feitos no LaMEM foram padronizados da seguinte maneira:

Os corpos de prova tinham as seguintes dimensões:

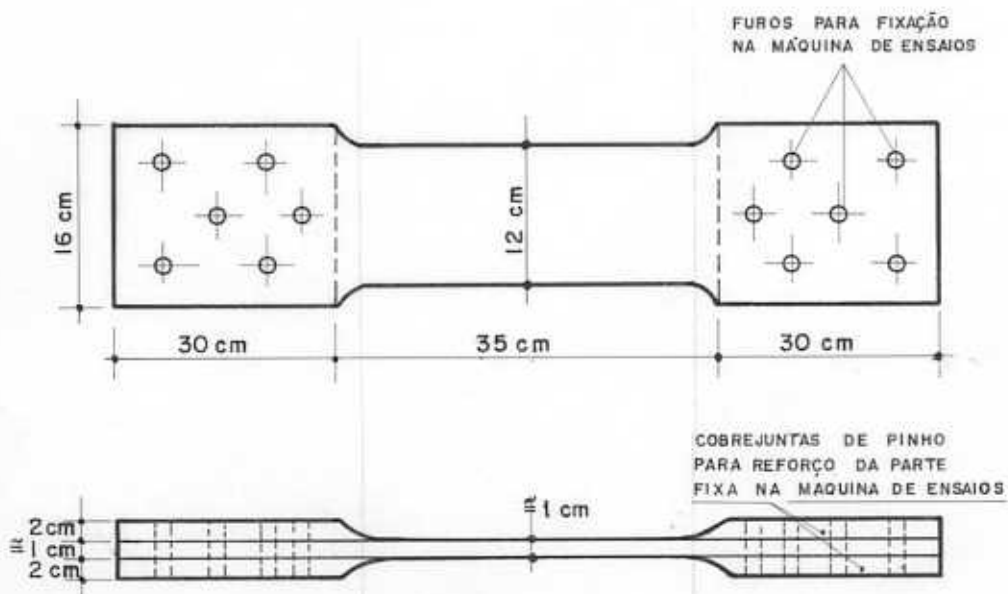


FIG.36 - CORPO DE PROVA DE TRAÇÃO

A máquina de ensaio dos corpos de prova, segue o seguinte esquema (figura 37).

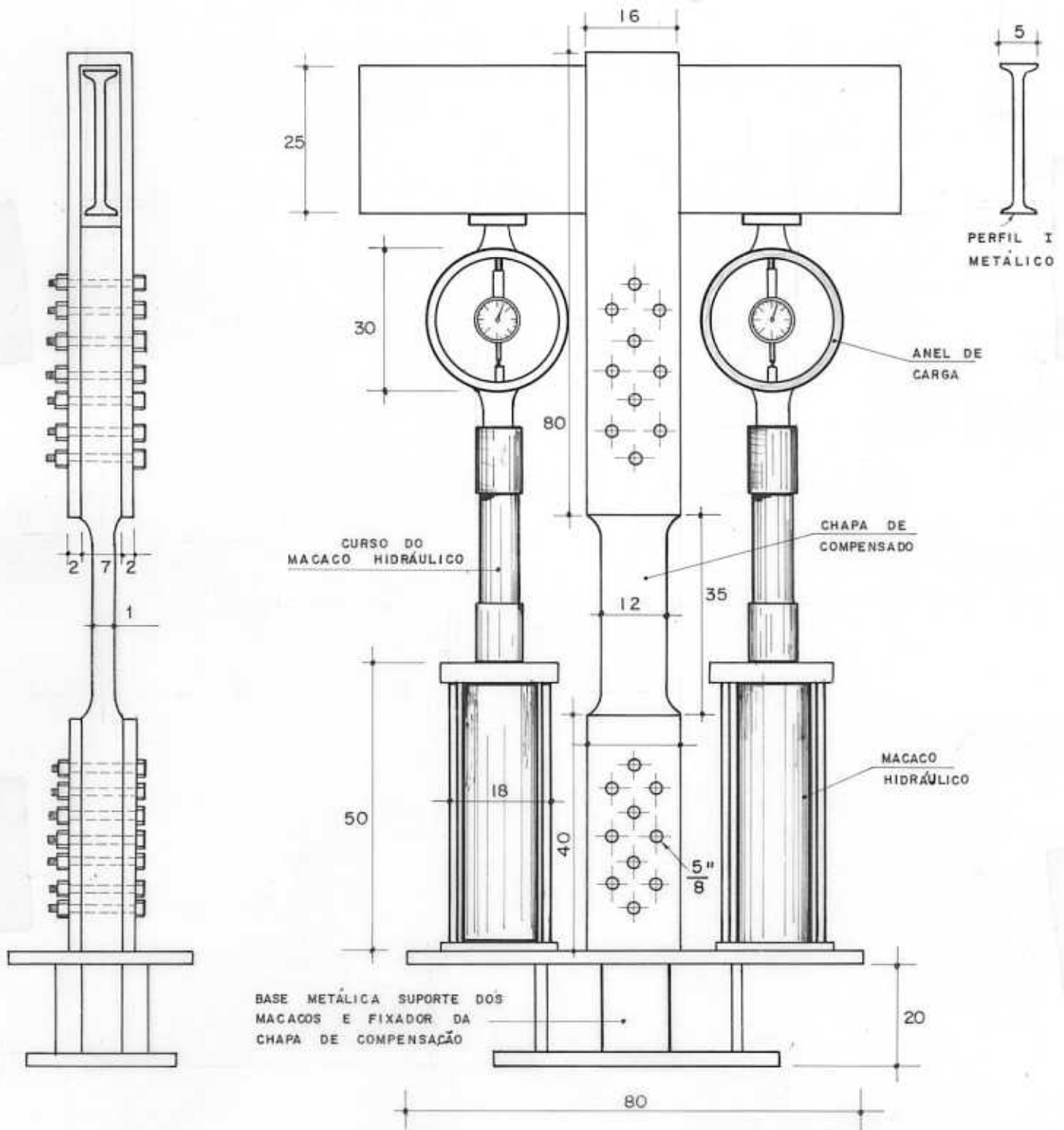


FIG. 37 - MÁQUINA DE ENSAIO DOS CORPOS DE PROVA DE MADEIRA COMPENSADA.

Os corpos de prova eram instalados na máquina de ensaio e a cada parcela de carga, aplicada através dos macacos hidráulicos, eram medidas as deformações, com extensômetros elétricos, para a determinação do módulo de elasticidade, de carregamento em carregamento, até o limite de proporcionalidade, embora o ensaio prosseguisse até a ruptura.

Construía-se, com estes dados, uma curva da tensão em função da deformação, determinando o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura.

Os resultados obtidos foram os seguintes (tabela)

TABELA - Resultados dos Ensaio de Tração:

CP Nº	σ_R (Kg/cm ²)	E (Kg/cm ²)	CP Nº	σ_R (Kg/cm ²)	E (Kg/cm ²)
1	359,00	100551	5	288,30	78322
2	300,00	115454	6	275,25	71495
3	270,00	110525	7	287,42	80244
4	294,00	98726	8	299,36	76123
Média.....				296,70	91430

Ensaio de Compressão:

Os ensaios de compressão em corpos de prova de madeira compensada foram feitos no LaMEM segundo o M B 26 da seguinte maneira: foram coladas 4 chapas de compensado de espessura 1,25cm para dar a largura aproximadamente igual a 5 cm. As dimensões do corpo de prova eram (5 X 5 X 16 cm) (figura 38).

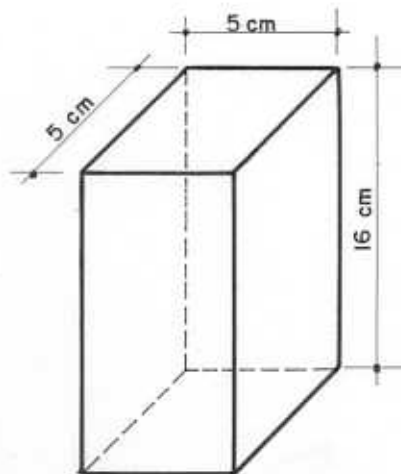


FIG. 38 - CORPO DE PROVA DE COMPRESSÃO

A máquina de ensaios dos corpos de prova, segue o seguinte esquema (figura 39).

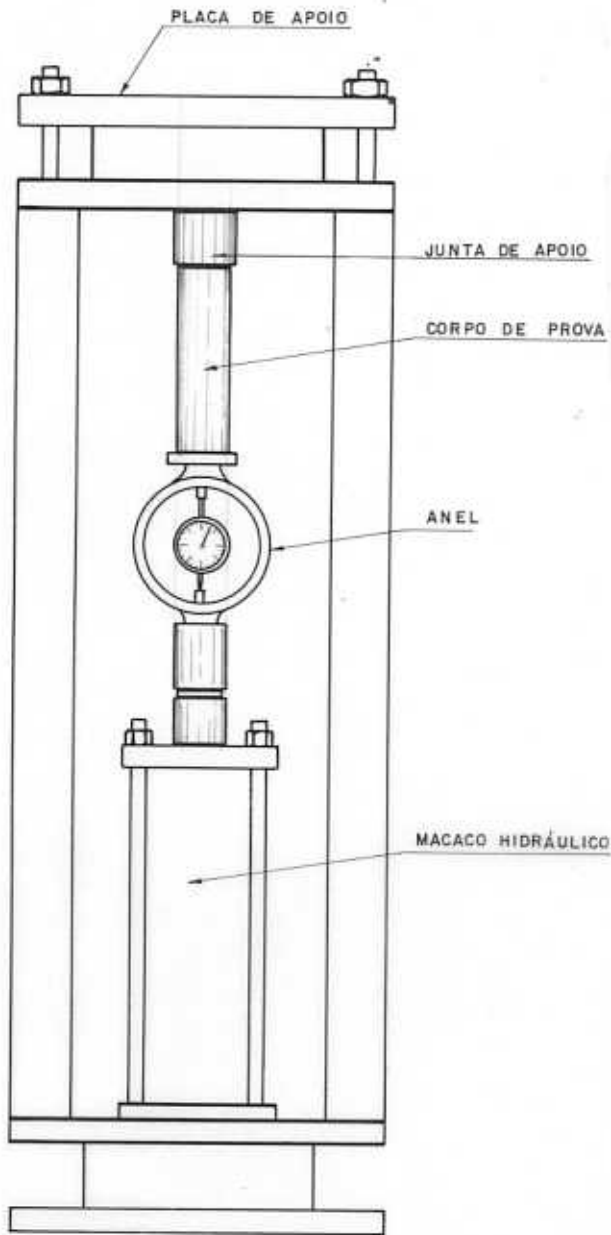


FIG. 39 - MÁQUINA DE ENSAIO DE COMPRESSÃO

Os corpos de prova eram colocados na máquina de ensaio e a cada parcela de carga aplicada, através do macaco hidráulico, eram medidas as deformações com relógios comparadores instalados no corpo de prova, para determinação do módulo de elasticidade, de carregamento em carregamento, até o limite de proporcionalidade, embora o ensaio prosseguisse até a ruptura.

Construía-se com esses dados uma curva da tensão em função da deformação, determinando o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura.

Os resultados obtidos foram os seguintes:

CP Nº	σ_R (Kg/cm ²)	E (Kg/cm ²)
1	205,30	95445
2	192,34	107828
3	186,02	57701
4	160,16	55275
5	217,13	63766
6	158,55	107840
7	239,16	63696
8	242,62	86489
9	292,82	75827
10	249,77	82108
11	206,05	64661
12	242,81	72927
Média	216,06	77797

d - Dimensionamento Propriamente Dito

Como foi visto no capítulo anterior, existem basicamente dois tipos de solicitações nas paredes de um silo cilíndrico que são:

1 - Tração, nas chapas de compensado, devido à pressão horizontal do material sobre as chapas.

2 - Compressão nas chapas de compensado devido ao atrito do material sobre as paredes.

O esforço de compressão, devido ao atrito do material com as paredes, provoca flambagem nas chapas de compensado, nos montantes e no silo propriamente dito.

Com os dados dos ensaios realizados é feito o dimensionamento, tendo em vista as solicitações:

1 - Tração nas chapas de compensado:

Pelo cálculo anterior tem-se que o esforço máximo de tração nas paredes é:

$$T = 58,50 \text{ kg/cm}$$

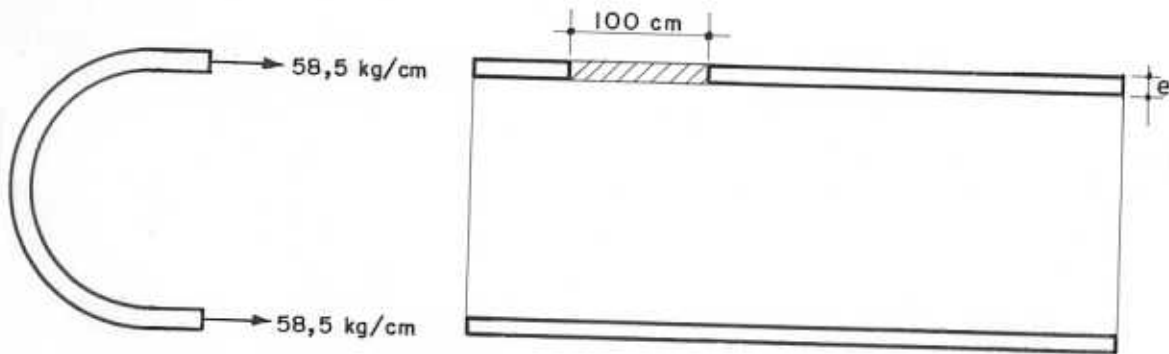


FIG. 40 - CORTE LONGITUDINAL DO SILO

Sabe-se que:

$$\sigma_T = \frac{P}{S}$$

Considerando uma faixa de 100 cm ao longo do meridiano, tem-se que (figura 40):

$$S = 100 e$$

$$P = T \cdot 100$$

$$\sigma_T = \frac{T \cdot 100}{100 \cdot e} = \frac{T}{e} = \frac{58,5}{e} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Pelos ensaios de tração realizados, chega-se a uma tensão média de ruptura igual a:

$$\sigma_{RT} = 296,7 \text{ kg/cm}^2$$

Introduzindo um coeficiente de segurança 5 na tração, vem:

$$\bar{\sigma}_T = 0,2 \sigma_{RT} = 296,7 \cdot 0,2 \text{ kg/cm}^2 = 59,3 \text{ kg/cm}^2$$

Portanto:

$$e = \frac{58,5}{\sigma_T} = \frac{58,5}{296,7 \cdot 0,2} = 0,98 \text{ cm}$$

$$e \approx 1 \text{ cm}$$

Isto leva a concluir que, para o esforço de tração, é necessária e suficiente uma chapa de 1 cm de espessura para as paredes.

2 - Compressão nas chapas de compensado:

A força de atrito do material ensilado sobre as paredes por metro linear periférico à profundidade z é:

$$F_z = \delta r \frac{z^2}{z + A} \quad (\text{ver capítulo anterior})$$

Para $z = 15 \text{ m}$, vem:

$$F_{15} = 720 \cdot 1,25 \frac{15^2}{15 + 10,21}$$

$$F_{15} = 80,33 \text{ kg/cm periférico}$$

Sabe-se que:

$$\sigma_c = \frac{P}{S} \rightarrow \sigma_c = \frac{F_z}{e}$$

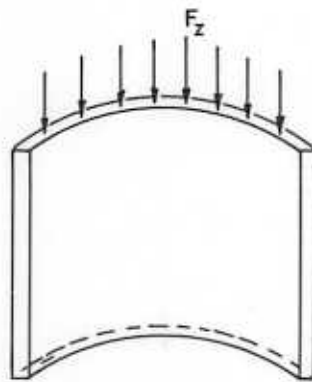


FIG. 41 - ESFORÇOS DE COMPRESSÃO NA PAREDE

Pelos ensaios de compressão realizados, chega-se a uma tensão média de ruptura igual a:

$$\sigma_{R_c} = 216,1 \text{ kg/cm}^2$$

Introduzindo um coeficiente de segurança 5 na compressão, vem:

$$\bar{\sigma}_c = 0,2 \sigma_{R_c} \quad (\text{NB-11})$$

$$\bar{\sigma}_c = 0,2 \cdot 216,1 = 43,2 \text{ kg/cm}^2$$

$$e = \frac{F_z}{\bar{\sigma}_c} = \frac{80,33}{43,2} = 1,86 \text{ cm}$$

$$e \approx 2 \text{ cm}$$

Isto leva a concluir que para o esforço de compressão $\bar{\sigma}$ necessária e suficiente uma chapa de 2 cm de espessura para as paredes,

Flambagem:

Podem ocorrer três casos de flambagem nestas estruturas: a flambagem nas chapas de compensado, a flambagem nos montantes e a flambagem no silo total. Cada tipo será estudado isoladamente.

1 - Flambagem nas chapas de compensado:

A flambagem que pode ocorrer nas chapas de compensado é verificada através do problema de estabilidade lateral de vigas.

Considera-se uma chapa engastada nos dois montantes da seguinte maneira (figura 42).



FIG. 42- LIGAÇÃO DO MONTANTE

Atua nas chapas uma carga uniformemente distribuída de 80,33 kg/cm (carga máxima de compressão nas paredes, na cota de 15 m a partir do cume do silo).

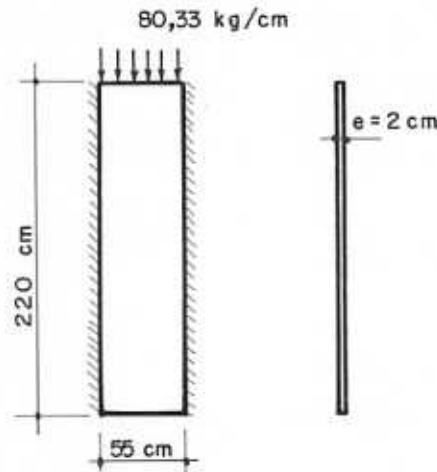


FIG.43 - CARGA DE COMPRESSÃO NA CHAPA

O momento máximo para uma viga bi-engastada, com carga distribuída vale:

$$M = \frac{p \ell^2}{12}$$

onde:

$$\ell = 55 \text{ cm}$$

$$p = 80,33 \text{ kg/cm}$$

$$M \approx 20250 \text{ kg.cm}$$

e a tensão de flexão atuante vale:

$$\sigma_f = \frac{M}{J} y$$

onde y é a distância do centro de gravidade até a borda comprimida

$$J = \frac{b h^3}{12} = \frac{2 \cdot 220^3}{12} = 1774667 \text{ cm}^4$$

$$e y = \frac{h}{2} = 110 \text{ cm}$$

$$\sigma_{fat} = \frac{20250}{1774667} \cdot 110$$

$$\sigma_{fat} = 1,23 \text{ kg/cm}^2$$

A NB-11, artigo 56, relata que:

"Dispensar-se-á a demonstração de estabilidade de vigas de seção retangular contra a flambagem lateral quando a tensão

na borda comprimida não ultrapassar os seguintes valores:

a) - Viga com $\lambda' \leq \lambda'_0$

$$\sigma'_f = \frac{4}{3} \sigma_{fat} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\lambda'}{\lambda'_0}\right)$$

b) - Viga com $\lambda' > \lambda'_0$

$$\sigma'_f = \frac{0,26 E_m}{k \lambda'}$$

sendo:

$\lambda' = \frac{l_1}{b}$ = relação entre a distância entre os apoios laterais da zona comprimida e a largura da seção transversal:

$$\lambda'_0 = \frac{0,39 E_m}{k \bar{\sigma}_f}$$

$\bar{\sigma}_f$ = tensão admissível a flexão (madeira verde)

k = função da relação $\frac{d}{b}$ entre a altura e a largura da seção transversal."

para $\frac{d}{b} = \frac{220}{2} = 110 \rightarrow k = 152$

$$\lambda' = \frac{55}{2} = 27,5$$

$$\lambda'_0 = \frac{0,39 \cdot 106314}{152 \cdot 61,2} = 4,45$$

$$\lambda' > \lambda'_0$$

$$\sigma'_f = \frac{0,26 \cdot 106314}{152 \cdot 27,5} = 6,61 \text{ kg/cm}^2 > 1,23 \text{ kg/cm}^2 \text{ OK}$$

2) - Flambagem nos Montantes:

Como já foi dito, houve necessidade da colocação dos montantes para facilidade de ligações e para resistência à flambagem das paredes.

Optou-se por montantes de seção $(6 \times 12) \text{ cm}^2$, de peroba rosa, de comprimento igual a 5 m.

Como foi visto anteriormente, a carga máxima de compressão foi de 80,33 kg/cm periférico, ocasionando flambagem no montante.

Considerando o comprimento de influência de cada montante igual a 55 cm (meia chapa), a parcela de carga absorvida pelo montante será (figura 44):

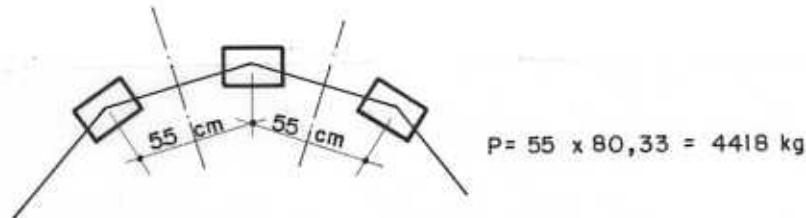


FIG.44- COMPRIMENTO DE INFLUÊNCIA DO MOMENTO

Admitindo peça longa, $\lambda_0 < \lambda \leq 140$

$$\sigma_{\delta l} = \frac{\pi^2 E}{4 \lambda^2} \leq \sigma_{at} = \frac{P}{S}$$

$$\lambda^2 = \frac{\pi^2 ES}{4 P}$$

Sabe-se que :

$$\lambda = \frac{l_{\delta l}}{i} \quad e \quad i = \sqrt{\frac{J}{S}}$$

$$\frac{l_{\delta l}^2}{\frac{J}{S}} = \frac{\pi^2 ES}{4 P}$$

$$l_{\delta l}^2 = \frac{\pi^2 EJ}{4 P} \quad l_{\delta l} = \sqrt{\frac{\pi^2 EJ}{4 P}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EJ}{P}}$$

$$l_{\delta l} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EJ}{P}}$$

Onde l representa a distância entre os contraventamentos do montante para que não haja flambagem.

O valor do módulo de elasticidade E da peroba rosa foi tirado do boletim nº 33 do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) e vale:

$$E = 94100 \text{ kg/cm}^2$$

$$l_{fl} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{94100 \cdot J}{4418}}$$

$$J_{\min} (6 \times 12) = \frac{6^3 \cdot 12}{12} = 216 \text{ cm}^4$$

$$l_{fl} = 106,54 \text{ cm}$$

$$l_{fl} \approx 110 \text{ cm} \rightarrow l_{fl} = \frac{l}{2} \text{ (peça engastada-engastada)}$$

$$\therefore l = 220 \text{ cm}$$

Portanto há necessidade de se fazer contraventamentos a cada 2,20 m, ou seja, a cada chapa de 2,20 m.

3) - Flambagem total do Silo:

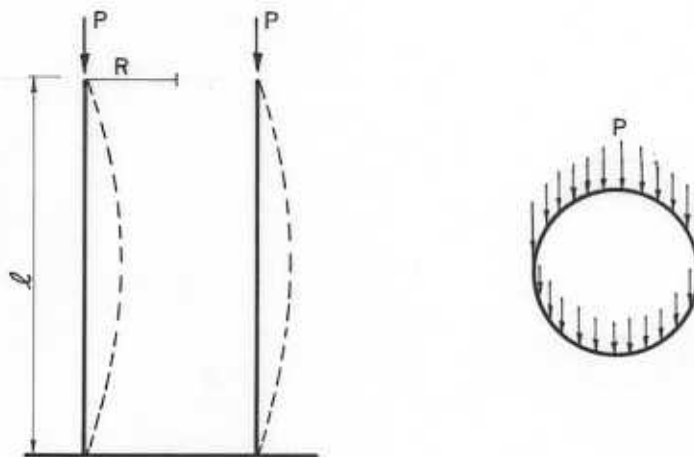


FIG. 45 - FLAMBAGEM NO SILO

A carga máxima de compressão atuante nas paredes do silo foi de 80,33 kg/cm.

Fazendo uma equivalência de áreas, montantes com chapas, ou seja, distribuindo a área dos montantes nas chapas, aumentou-se a espessura das mesmas conforme segue (figura 46).

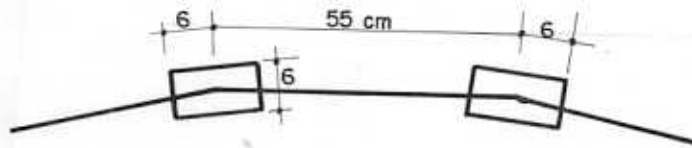


FIG. 46 - EQUIVALÊNCIA DE ÁREA

A área de 72 cm² distribuída na chapa aumenta sua espessura de 1,3 cm.

Portanto, a chapa terá "espessura" média de:

$$(2 + 1,3) = 3,3 \text{ cm}$$

Cálculo do Índice de esbeltez λ

$$\lambda = \frac{l}{i}$$

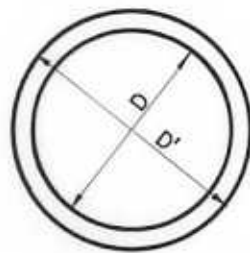


FIG. 47 - DIAMETRO INTERNO E EXTERNO DO SILO

$$D' = 506,6 \text{ cm}$$

$$J_0 = \frac{\pi}{64} (D'^4 - D^4)$$

$$D = 500 \text{ cm}$$

$$J_0 = 165.244.059 \text{ cm}^4$$

$$S = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D^2)$$

$$S = 5218 \text{ cm}^2$$

$$i = \frac{J}{S}$$

$$i = 177,95 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{1500}{177,95}$$

$$\lambda = 8,43 < 40 \text{ peça curta}$$

Quando $\lambda < 40$, a peça não flamba, ela pode romper por compressão simples.

$$\sigma_c = \frac{P}{S} \begin{cases} P = \pi D \cdot p = \pi \cdot 500 \cdot 80,33 = 126.182 \text{ kg} \\ S = 5218 \text{ cm}^2 \end{cases}$$

$$\sigma_{cat} = \frac{126182}{5218} = 24,2 \text{ kg/cm}^2 < \bar{\sigma}_c = 43,2 \text{ kg/cm}^2$$

Ligações:

Como foi visto anteriormente, a função do montante, além de solucionar o problema de flambagem, foi principalmente atuar como elemento de ligação das chapas de compensado, através de sua área disponível de colagem.

O tipo de cola usado é à base de resorcinol. Ensaios realizados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, com corpos de prova colados, levaram a uma tensão de ruptura da cola de 85 kg/cm^2 .

Admitindo um coeficiente de segurança de 2,5 a tensão admissível para essa cola será 34 kg/cm^2 .

Analisando agora o estado de tensões de um montante, vem: (figura 48):

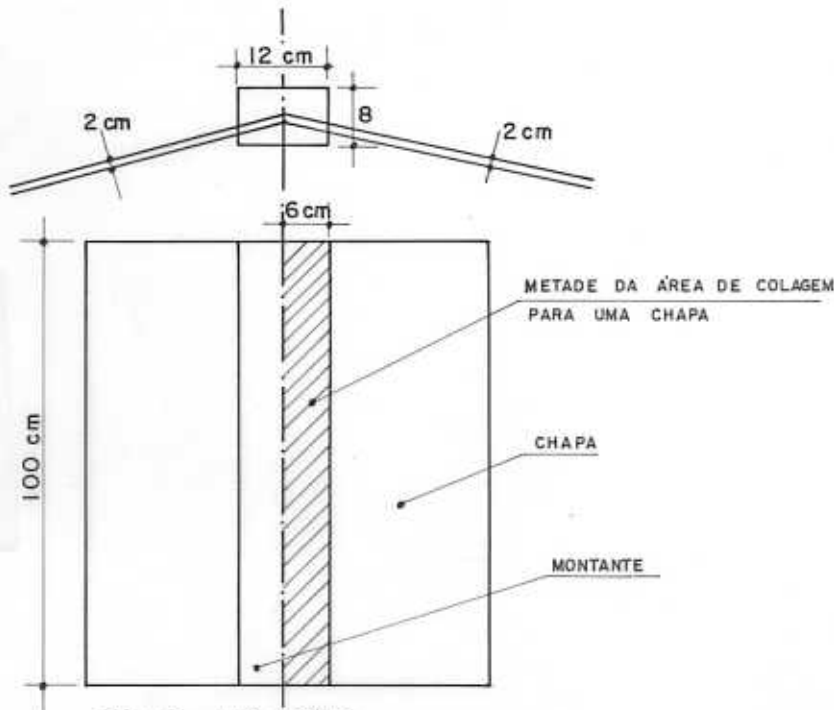


FIG. 48 - LIGAÇÕES

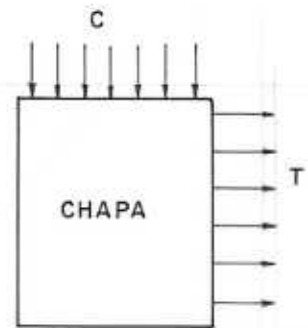


FIG. 49 - ESTADO DE TENSÕES NA CHAPA

Os valores máximos de tração e compressão são, respectivamente, 58,50 kg/cm e 80,33 kg/cm.

$$\tau = \frac{|\sigma_t| + |\sigma_c|}{2}$$

$$\sigma_t = \frac{T}{e} \approx 29 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_c = \frac{Fz}{e} \approx 40 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_{at} \approx 34 \text{ kg/cm}^2$$

$$\bar{\tau}_{cola} \approx \tau_{at} \quad \text{OK}$$

XII - EXPERIMENTAÇÃO EM MODELOS REDUZIDOS DE PAPEL E EM CORPOS DE PROVA DE PAPEL

a) - Modelos de Papel:

Para uma prē-estimativa das tensões e prē-avaliação dos esforços e funcionamento do silo, optou-se inicialmente para modelos de papel na escala 1:20.

O tipo de papel usado para os modelos foi o papel ma deira semi Kraft, cor caqui, disponível no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira.

Com a escala adotada para os modelos (1:20), as suas dimensões são: 25 cm de diâmetro por 75 cm de altura e a espessura de 0,25 mm.

Foram construídos e ensaiados cinco modelos reduzi dos.

O primeiro modelo foi ensaiado apenas para conhecimento de seu comportamento característico, sem medidas de deformações. Em seguida, os outros 4 modelos foram ensaiados tendo dois deles suas deformações medidas através de extensômetros elétricos e os outros dois através de extensômetros indutivos.

b) - Ensaio de Corpos de Prova de Papel:

Para o cálculo e análise das deformações ocorridas no modelo, houve necessidade do conhecimento de algumas características mecânicas do material em estudo, no caso o papel.

O autor realizou vários ensaios em corpos de prova de papel de dimensões (20 X 5) cm² para a determinação do módulo de elasticidade e da tensão de ruptura à tração.

Alguns desses corpos de prova foram retirados de um modelo ensaiado, onde já haviam sido instalados alguns extensômetros elétricos para comparar as deformações ocorridas no ensaio do modelo com as ocorridas nos corpos de prova.

Os ensaios nos corpos de provas foram realizados em uma máquina INSTRON da Universidade Federal de São Carlos e os resultados obtidos foram os seguintes:

C.P. Nº	σ_{TR} (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
1	128	10150
2	149	10666
3	120	10500
4	200	15000
5	190	13050
6	210	13500
7	132	9500
8	130	9100
9	133	9800
10	125	8900
11	144	10500
12	131	9300
Média	150	10850

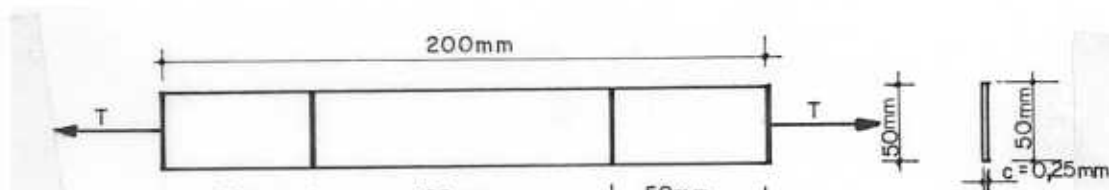


FIG. 50 - DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA DE PAPEL

Com os resultados obtidos nos ensaios pode-se partir para o dimensionamento do modelo de papel.

c) - Cálculo do Silo Modelo de Papel:

As dimensões do modelo na escala 1:20 são, respectivamente, 25 cm de diâmetro e 75 cm de altura. Foi feito o cálculo das tensões até 150 cm de altura, pois em um dos ensaios realizados, dobrou-se a altura do silo para verificar o seu comportamento neste estágio de carregamento.

Como já foi visto anteriormente, os esforços críticos para dimensionamento são os de tração e os de compressão.

Sabe-se que o esforço de tração atuante nas paredes de um silo, por centímetro periférico vale:

$$T_z = R \cdot q_z$$

onde:

R = raio do silo

q_z = pressão horizontal sobre as paredes à profundidade z.

$$q_z = q_{\max} \left[1 - \left(\frac{z}{A} + 1 \right)^{-2} \right]$$

onde:

q_{\max} = pressão horizontal máxima

A = abscissa característica

z = cota vertical do silo contada de cima para baixo

$$A = \frac{2R}{4 \operatorname{tg} \phi' \cdot \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) - \frac{h}{3}}$$

onde:

ϕ' = ângulo de atrito do material com as paredes do silo (para a areia 27°).

ϕ = ângulo de atrito interno do material (para areia 30°).

h = altura do cone superior do material ensilado

$$h = R \cdot \operatorname{tg} \phi$$

E o esforço de compressão atuante nas paredes de um silo por centímetro periférico vale:

$$F_z = \delta \kappa \frac{z^2}{z + A}$$

onde:

$$\kappa = 6,25$$

δ = peso de um metro cúbico de material ensilado

F_z = esforço de compressão nas paredes por centímetro periférico à profundidade z

$$\delta = 1,57 \text{ g/cm}^3, \text{ para a areia}$$

Com essas fórmulas, em função da altura do silo, foi feita uma tabela com os valores dos esforços de compressão e tração nas paredes do silo em questão.

z (medida de cima p/baixo) (cm)	q_z^2 (kg/cm ²)	T_z (kg/cm)	$\epsilon_T \cdot 10^{-6}$ Calculado	F_z (kg/cm)	$\epsilon_{Fz} \cdot 10^{-6}$ Calculado
10	0,007699	0,096238	355	0,022104	- 81
20	0,011558	0,144475	533	0,072159	- 266
30	0,013764	0,172050	634	0,137145	- 506
40	0,015142	0,189275	698	0,211041	- 778
50	0,016060	0,200750	740	0,290678	- 1072
60	0,016701	0,208763	770	0,374232	- 1380
70	0,017168	0,214600	791	0,460578	- 1698
80	0,017517	0,218963	807	0,548983	- 2024
90	0,017786	0,222325	820	0,638951	- 2356
100	0,017997	0,224763	829	0,730133	- 2692
110	0,018165	0,227063	837	0,822277	- 3032
120	0,018302	0,228775	843	0,915195	- 3375
130	0,018415	0,230188	849	1,008747	- 3719
140	0,018509	0,231333	853	1,102823	- 4066
150	0,018588	0,232350	857	1,197339	- 4415

Cálculo de ϵ_T e ϵ_{Fz}

Sabe-se que: $\sigma = \frac{P}{S}$

Portanto: $\epsilon_T = \frac{T_z}{e}$ e $\epsilon_{Fz} = \frac{F_z}{e}$

e = espessura da parede do modelo.

Da resistência dos materiais vem que, para um estado duplo de tensões:

$$\epsilon_T = \frac{\sigma_T}{E} - \mu \frac{\sigma_C}{E}$$

$$\epsilon_C = \frac{\sigma_C}{E} - \mu \frac{\sigma_T}{E}$$

Não foi possível a determinação do coeficiente de Poisson μ para o papel, devido a impraticabilidade de serem medidas as deformações transversalmente à direção da carga aplicada.

Por outro lado, sendo o papel um material tipicamente anisotrópico, tem coeficiente de Poisson desprezível. Timoshenko (20) adota para a cortiça (material obtido a partir da madeira, como o papel) μ igual a zero.

Hipótese semelhante foi adotada para as chapas de madeira compensada com que foi construído o modelo reduzido e projetado o protótipo.

Desse modo:

$$\epsilon_T = \frac{\sigma_T}{E} = \frac{T_z}{Ee}$$

$$\epsilon_C = \frac{\sigma_C}{E} = \frac{F_z}{Ee}$$

O módulo de elasticidade (E) à compressão do papel, foi adotado igual ao da tração, devido a impossibilidade de sua determinação experimental.

Pelos ensaios realizados, chegou-se ao valor médio do módulo de elasticidade igual a 10.850 kg/cm^2 .

e portanto:

$$\epsilon_T = \frac{T_z}{10850 \cdot 0,025} = 0,003687 T_z$$

e:

$$\epsilon_{Fz} = \frac{F_z}{10850 \cdot 0,025} = 0,003687 F_z$$

Cálculados os valores de ϵ_T e ϵ_{Fz} completa-se a tabela anterior.

d) - Ensaio Realizados:

Como foi dito anteriormente, foram realizados ensaios em cinco modelos, sendo que no primeiro modelo não foram medidas deformações, apenas verificado o seu comportamento característico.

Os cinco modelos ensaiados serão analisados com os carregamentos a seguir:

d.1) - Primeiro Modelo:

O primeiro modelo de papel tinha 75 cm de altura por 25 cm de diâmetro, fixo num disco de madeira compensada funcionando como base do silo.

O carregamento foi feito com areia, sem interrupção, pois não havia leituras a fazer. Verificou-se o comportamento do silo com a variação do carregamento.

Notou-se, neste ensaio preliminar, que não houve ruptura (rasgo) no papel, apenas seu esmagamento, com dobras no sentido vertical ficando óbvia a tensão crítica de compressão.

d.2) - Segundo Modelo:

O segundo modelo de papel tinha as mesmas dimensões e características do primeiro.

Para uma determinação inicial das deformações, foram instalados 2 extensômetros elétricos na altura de 10 cm a partir da base, o que corresponde a medir as deformações a 2 m do piso, no protótipo.

O carregamento foi feito com areia de densidade $1,57 \text{ g/cm}^3$, despejada em volumes iguais de 5,23 litros (vasilhame padrão).

As deformações foram medidas nos intervalos de aplicação da carga, ou seja, colocado um volume de 5,23 l, liam-se as deformações, sucessivamente até preencher totalmente o silo.

Um dos extensômetros elétricos colocado a 10 cm da base, foi instalado no sentido horizontal para medir a tração na parede e o outro, instalado na mesma cota, no sentido vertical para medir a compressão na parede.

Os extensômetros foram fixados com cola especial (IS - 03).

Os resultados obtidos foram os seguintes:

Quantidade (Volume de 5,23 l)	Deformação Vertical ϵ_c (compressão)	Deformação Horizontal ϵ_T (tração)
1	$- 100 \cdot 10^{-6}$	$+ 40 \cdot 10^{-6}$
2	$- 180 \cdot 10^{-6}$	$+ 75 \cdot 10^{-6}$
3	$- 250 \cdot 10^{-6}$	$+ 110 \cdot 10^{-6}$
4	$- 330 \cdot 10^{-6}$	$+ 145 \cdot 10^{-6}$
5	$- 400 \cdot 10^{-6}$	$+ 185 \cdot 10^{-6}$
6	$- 670 \cdot 10^{-6}$	$+ 310 \cdot 10^{-6}$
7	$- 790 \cdot 10^{-6}$	$+ 360 \cdot 10^{-6}$

Comparando as deformações obtidas experimentalmente com as calculadas teoricamente, nota-se que as deformações teóricas são bem maiores. Esta discrepância deve-se ao fato de a cola enrijecer o papel, ou seja, na hora da colagem do extensômetro a cola espalhava-se no papel enrijecendo o trecho da fixação do extensômetro, ocasionando deformações menores.

Percebe-se, porém, no ensaio a compatibilidade de deformações, pois o quociente entre a deformação de compressão ϵ_c e a deformação de tração ϵ_T mantém o mesmo valor (aproximadamente 2) tanto experimentalmente como teoricamente.

d.3) - Terceiro Modelo:

O terceiro modelo de papel tinha 150 cm de altura por 25 cm de diâmetro, o que corresponde a dobrar a altura do protótipo. Esta solução foi adotada para uma melhor interpretação das deformações nas paredes.

As características do carregamento adotado foram as mesmas do modelo anterior.

Neste terceiro modelo foram colocados oito (8) extensômetros elétricos, sendo dois a dois, opostos diametralmente, fixos às cotas 20, 40 60 e 80 cm a partir da base do modelo, o que corresponde a medir as deformações às alturas de 4, 8, 12 e 16 metros no protótipo.

Quatro extensômetros foram colocados, na posição horizontal para medir a tração no paralelo e quatro na posição vertical para medir a compressão no meridiano.

Os extensômetros foram fixados com cola especial (I.S - 03).

Os resultados médios obtidos de três ensaios foram os seguintes:

Quant. Volume de 5,23 l	Deformação Vertical Compressão $\epsilon_c (10^{-6})$				Deformação Horizontal Tração $\epsilon_T (10^{-6})$			
	$\epsilon_c(20)$	$\epsilon_c(40)$	$\epsilon_c(60)$	$\epsilon_c(80)$	$\epsilon_T(20)$	$\epsilon_T(40)$	$\epsilon_T(60)$	$\epsilon_T(80)$
1	- 0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	- 310	0	0	0	80	0	0	0
4	- 321	- 305	0	0	86	76	0	0
5	- 325	- 316	0	0	90	80	0	0
6	- 328	- 320	- 290	0	92	85	67	0
7	- 332	- 323	- 301	0	93	88	76	0
8	- 335	- 326	- 304	- 320	95	91	80	58
9	- 363	- 329	- 307	- 332	101	95	89	65
10	- 397	- 357	- 310	- 336	107	102	93	77
11	- 431	- 390	- 313	- 338	112	106	94	81
12	- 459	- 424	- 339	- 342	118	113	99	86
13	- 527	- 451	- 371	- 374	126	119	105	91

Comparando as deformações obtidas experimentalmente com as calculadas, observa-se que as deformações teóricas são maiores.

Justifica-se essa diferença por a cola enrijecer a região da fixação dos extensômetros, dando deformações menores que as esperadas.

Observa-se também que as deformações de compressão são bem maiores que as de tração, como o esperado na sucessão das medidas.

d.4) - Quarto Modelo:

O quarto modelo do silo de papel tinha 75 cm de altura por 25 cm de diâmetro (escala 1:20); fixo em uma base de madeira compensada circular de 25 cm de diâmetro.

O carregamento foi realizado através de cargas de 5 kg de areia, de densidade $1,57 \text{ g/cm}^3$ e no intervalo de aplicação das cargas (cada 5 kg), eram lidas as deformações até a carga total no silo (55 kg).

Devido ao problema de enrijecimento do papel na região das medidas das deformações, pela fixação do extensômetro elétrico, neste modelo, optou-se pelos extensômetros indutivos.

Para uma primeira avaliação do funcionamento do extensômetro indutivo no papel, foram colocados apenas dois no sentido vertical, medindo a compressão nas paredes, visto ser o esforço predominante em estruturas dessa natureza.

As deformações nos extensômetros indutivos foram lidas com um voltímetro digital acoplado a um registrador do tipo X Y, que traçava o gráfico das deformações em função da carga (5 em 5 kg).

Estes extensômetros foram colocados à altura de 20,5 cm a partir da base do modelo, em posições diametralmente opostas.

Os Resultados Médios Obtidos de 4 Ensaios Foram os Seguintes:

Carga (Kg)	ϵ_1 (10^{-6}) (20,5 cm)	ϵ_2 (10^{-6}) (20,5 cm)
0	- 0	- 0
5	- 94	- 95
10	- 175	- 199
15	- 284	- 205
20	- 395	- 310
25	- 501	- 417
30	- 649	- 531
35	- 702	- 647
40	- 860	- 759
45	- 977	- 872
50	- 1105	- 995
55	- 1341	- 1096

A deformação teórica calculada na cota onde foram instalados os extensômetros indutivos (20,5 cm) é de 0,001150 e o ensaio mostra que a deformação experimental média nesta cota é:

$$\frac{0,001341 + 0,001096}{2} = 0,001218$$

Portanto, os aparelhos usados para medir as deformações neste ensaio (extensômetros indutivos) são os que forneceram resultados mais próximos dos obtidos pelo cálculo.

Serão os usados a seguir para a leitura das deformações em várias alturas, no quinto modelo.

d.5) - Quinto Modelo:

Os quatro modelos descritos até agora foram construídos com apenas uma folha do papel madeira citado. Nesses ensaios notou-se que em alguns pontos havia o dobramento do papel, significando perda de estabilidade local.

Tendo em vista esse fato, construiu-se um modelo com montantes verticais (também de papel) colados interna e externamente, a distância de 2,5 cm entre seus eixos.

Dimensões dos montantes: 0,5 cm de largura; 0,5 mm de espessura e 75 cm de comprimento.

O carregamento foi o mesmo do modelo anterior.

Neste quinto modelo, foram instalados quatro indutivos nas cotas: 4,5 cm; 16 cm; 28 cm e 38,5 cm a partir da base. Cada indutivo mediu a deformação em um trecho de 17 cm.

Para comparação das deformações teóricas e experimentais, tomou-se como referência a cota média do comprimento do extensômetro indutivo.

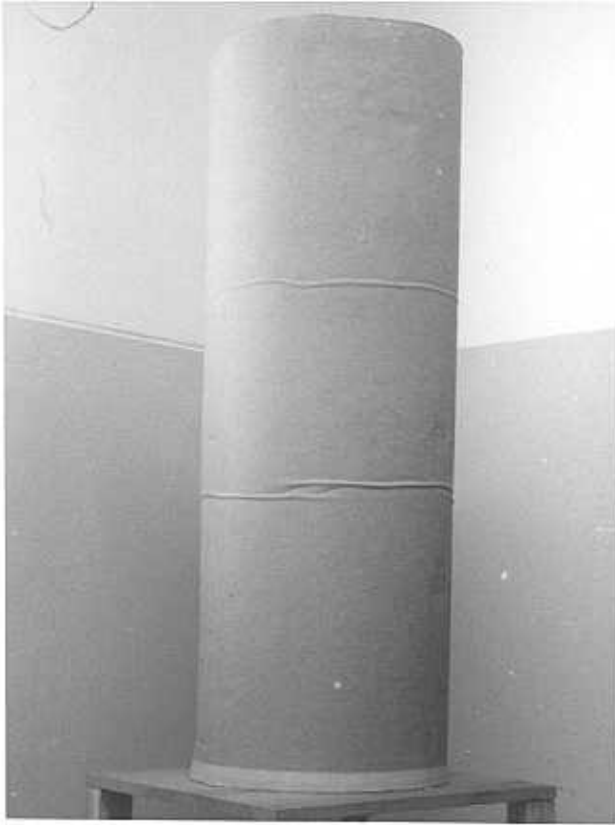
Para a leitura das deformações usou-se o mesmo equipamento do ensaio do quarto modelo.

Os Resultados Médios Obtidos de 4 Ensaíos Foram:

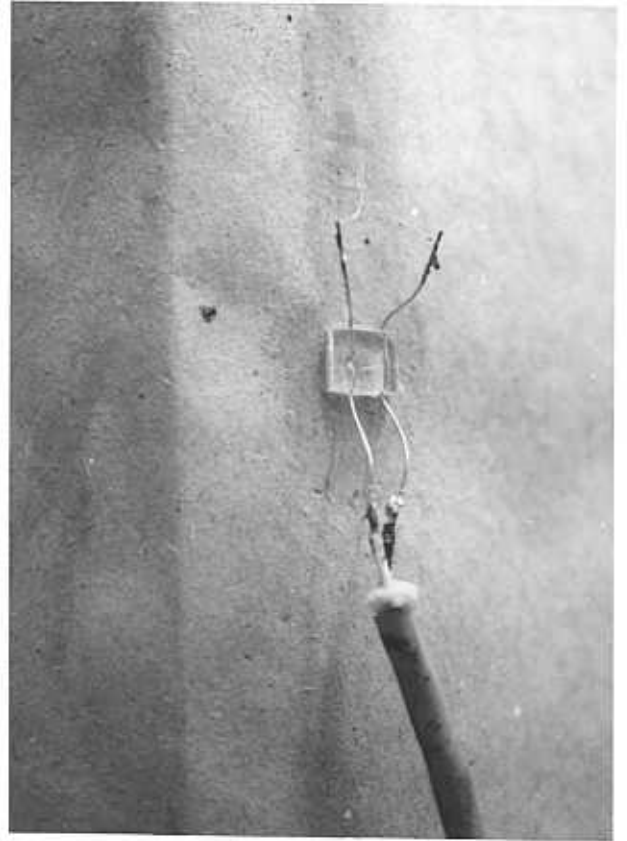
Carga (kg)	$\epsilon_1 \cdot 10^{-6}$ (cota 47 cm)	$\epsilon_2 \cdot 10^{-6}$ (cota 37 cm)	$\epsilon_3 \cdot 10^{-6}$ (cota 25 cm)	$\epsilon_4 \cdot 10^{-6}$ (cota 13 cm)
0	0	0	0	0
5	0	0	0	0
10	- 20	0	0	0
15	- 39	- 27	0	0
20	- 55	- 43	- 78	0
25	- 61	- 64	- 109	- 137
30	- 79	- 81	- 192	- 219
35	- 96	- 107	- 221	- 466
40	- 117	- 180	- 329	- 556
45	- 128	- 230	- 430	- 724
50	- 137	- 338	- 481	- 739
55	- 171	- 371	- 532	- 760

Comparando-se os valores experimentais com os calculados, verifica-se uma diferença de 100%, correspondente ao aumento da rigidez do modelo, provocado pelos montantes de papel.

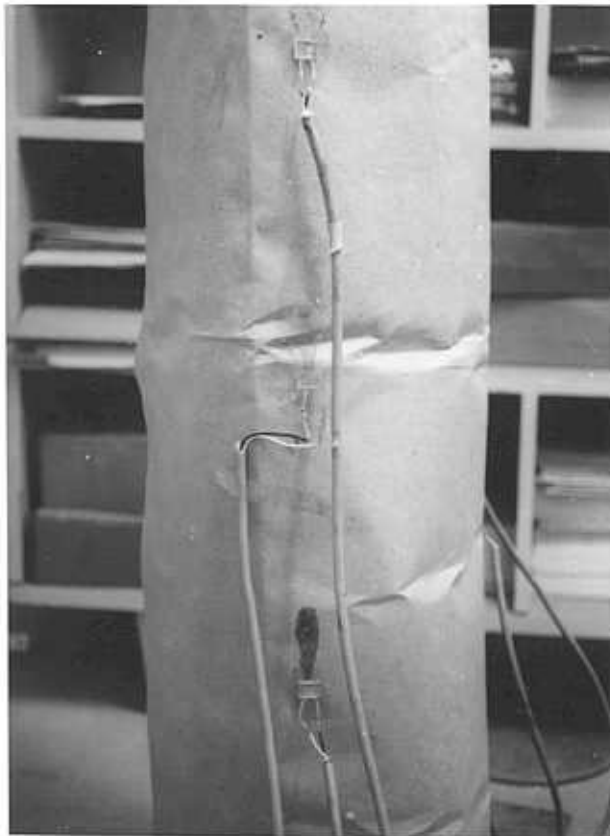
Notou-se também neste ensaio que não houve dobramento do papel, o que significa que o montante absorve parcela considerável da carga de compressão das paredes.



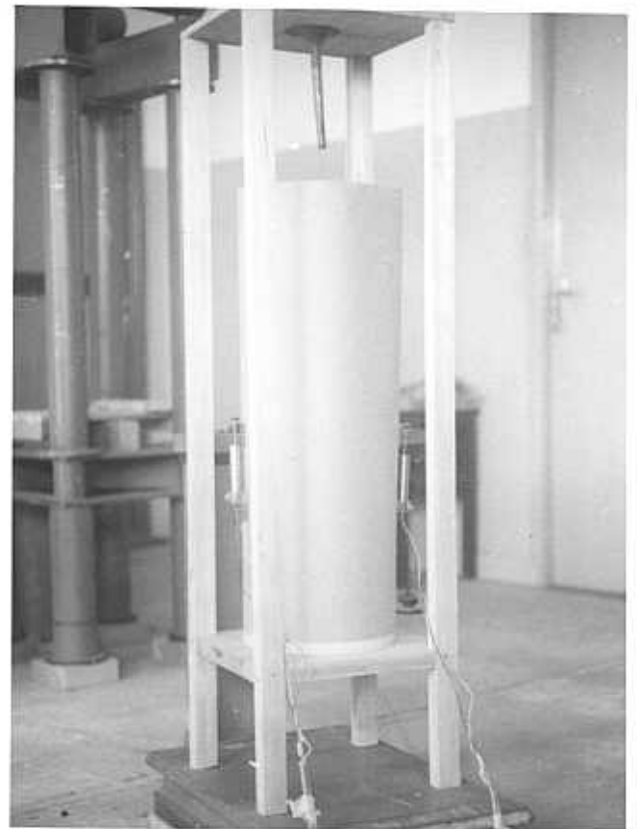
1º MODELO - VISTA GERAL



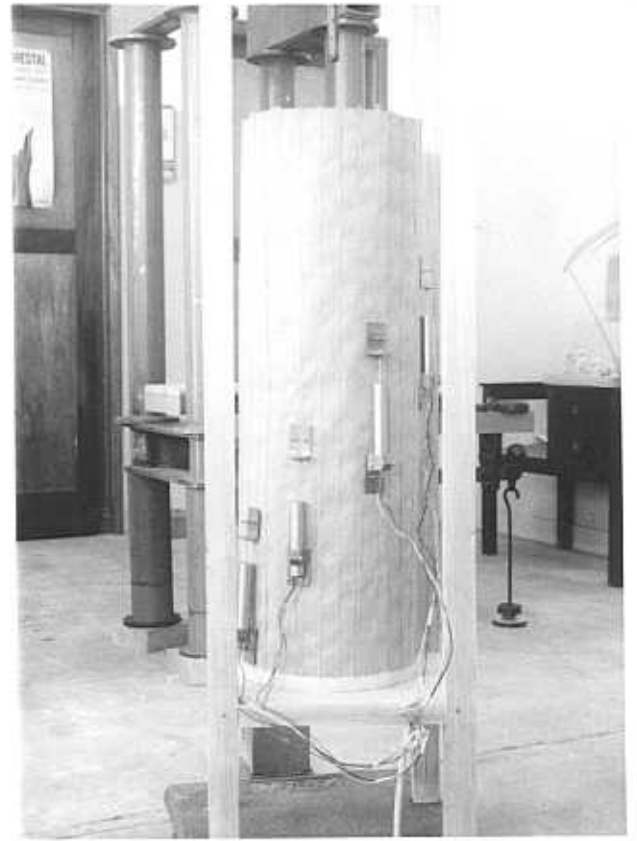
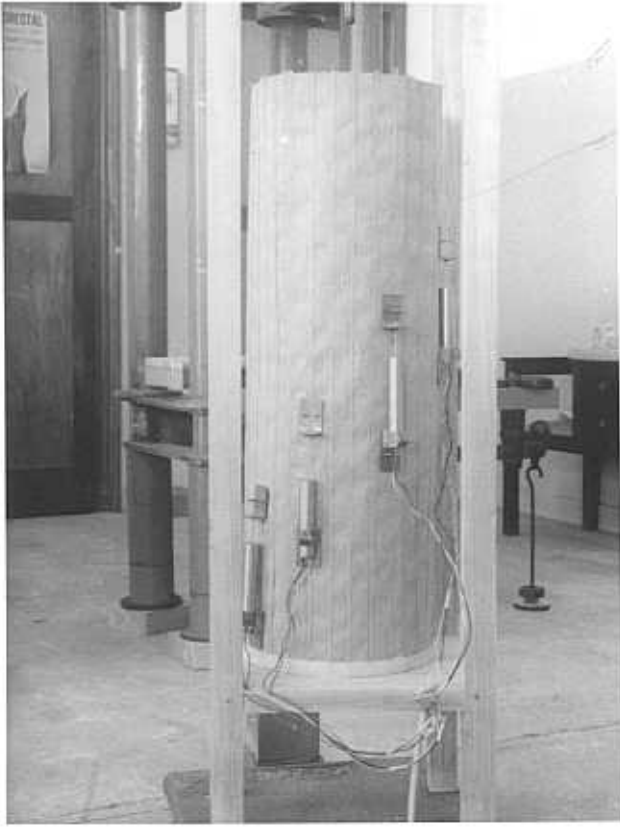
2º MODELO - ASPECTO DA FIXAÇÃO DO EXTENSÔMETRO



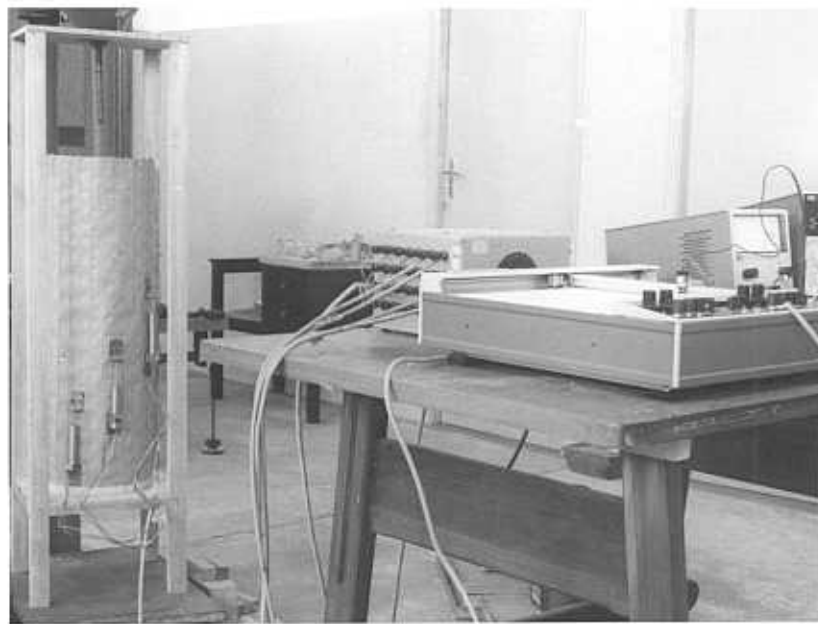
3º MODELO - DETALHE DO DOBRAMENTO



4º MODELO - SISTEMA DE CARREGAMENTO



5º MODELO - VISTA GERAL E DETALHE DOS TRANSDUTORES INDUTIVOS



5º MODELO - EQUIPAMENTO PARA LEITURA DAS DEFORMAÇÕES

AMOSTRA DO PAPEL USADO PARA OS MODELOS REDUZIDOS:

Características:

$$\sigma_{RT} = 155 \text{ kg/cm}^2.$$

$$E = 11.500 \text{ kg/cm}^2.$$

Tipo - semê Kraft.

Gramatura - 14 g/m^2 .

Resistência ao estouro (Mullen - Tester) = 32 lb/pol^2 .

Absorção (Cosb - Test) = 110 g/m^2 de H_2O .

Espessura = $0,25 \text{ mm}$.

Umidade = $\pm 7\%$.

Composição = apenas de papel ondulado com alta
Separação.

XIII - EXPERIMENTAÇÃO EM MODELO POUÇO REDUZIDO DE SILO DE COMPENSADO E DE CORPOS DE PROVA DE COMPENSADO

a) - Preparação dos Compensados:

Para manter a escala 1:10 adotada para o modelo, foi necessário a aquisição de lâminas de madeira visando a montagem das chapas de compensado que compõem o silo. No mercado, foi possível se encontrarem lâminas de 0,6 milímetros de espessura, de cedro. Como a espessura das paredes reais é de 20 milímetros, sua espessura no modelo é de 2 milímetros, resultando assim a necessidade de se utilizarem 3 lâminas de 0,6 mm, com duas superfícies de colagem, de espessura aproximada 0,1 mm para a obtenção da espessura desejada.

Como se sabe, a madeira compensada é composta de diversas lâminas e suas fibras fazem entre si um ângulo de 90° "compensando" as diferenças de propriedades mecânicas ao longo de direções diferentes das fibras. Por esse motivo, as lâminas de cedro adquiridas foram cortadas segundo duas direções: normal e paralela às fibras do material, com a finalidade de imitar a chapa de compensado real.

Sabe-se também que as dimensões das chapas de compensado atingem 2,20 m por 1,10 m, o que resultaria, no modelo reduzido, dimensões de 22 cm X 11 cm. Porém, pareceu mais interessante a adoção das dimensões de 22 cm X 5,5 cm, visando facilitar a montagem, dado o seu formato.

Em seguida, foi providenciada a colagem das 3 lâminas componentes da chapa em modelo reduzido. Utilizou-se a cola CASCO-PHEN, fartamente encontrada no comércio, seguindo as indicações de preparo e aplicação indicadas pelo fabricante. As lâminas coladas (duas delas com fibras paralelas ao maior eixo e uma com fibras perpendiculares a tal eixo) compõem as chapas de madeira compensada com que o silo em modelo reduzido foi construído.

b) - Preparação dos Montantes:

Imitando os montantes do silo real (em Peroba rosa), os montantes do modelo foram confeccionados em Pinho do Paraná, em dimensões: 0,6 X 1,2 cm (contra os 6 X 12 X 500 cm do real).

A justificativa do emprego do Pinho do Paraná ao invés da Peroba rosa encontra-se na disponibilidade do material, com as dimensões desejadas, no LaMEM e na dificuldade de ser obtido bom rendimento em peças de Peroba rosa de pequenas dimensões. Outro ponto a comentar é o fato de que os montantes são elementos construtivos no silo, visto a resistência das chapas de compensado à tração e à compressão.

O projeto determina que sejam usados montantes internos e externos para proporcionar a fixação das chapas. Por isso, dado o formato circular do silo, foi necessária a execução de chanfros nos montantes, conforme os desenhos abaixo (figura 51).

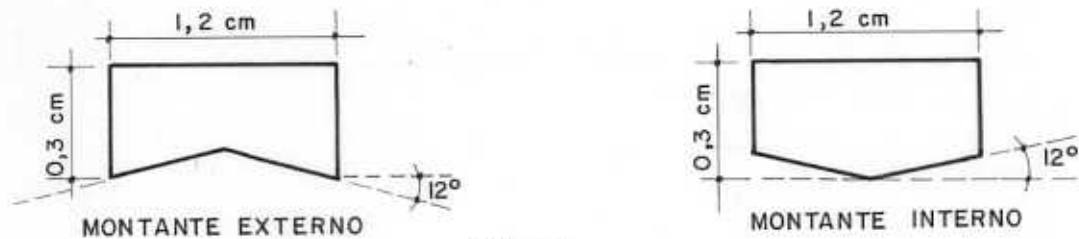


FIG. 51

Dado o caráter especial do chanfro a ser executado, foi elaborada uma ferramenta para essa finalidade, pelo Autor. Essa ferramenta constituiu-se, fundamentalmente, numa lâmina adaptável à tupias, com as condições de executar os dois tipos de chanfros necessários (figura 52), para o perfeito ajustamento entre os montantes e as chapas de madeira compensada.

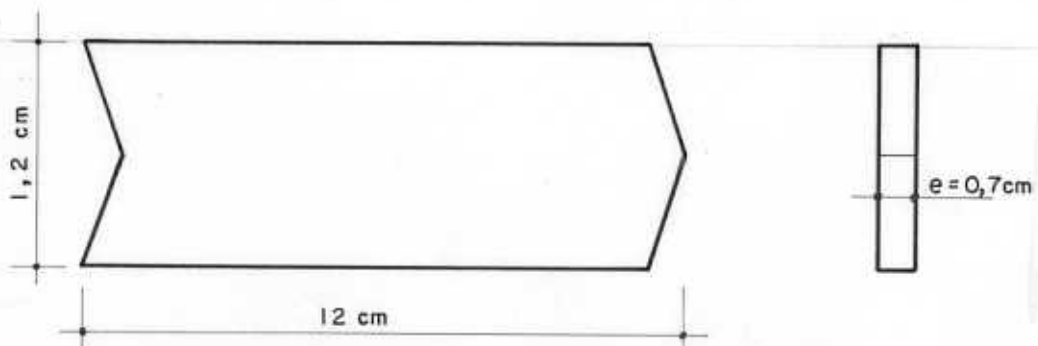


FIG. 52 - LÂMINA PARA CHANFRAR O MONTANTE

c) - Ensaio das Chapas para Determinação da Tensão de Ruptura:

O compensado estudado possuía três lâminas sendo que duas delas (0,12 cm) trabalham no sentido paralelo ao eixo de tração e uma (0,06 cm) à compressão (figura 53).

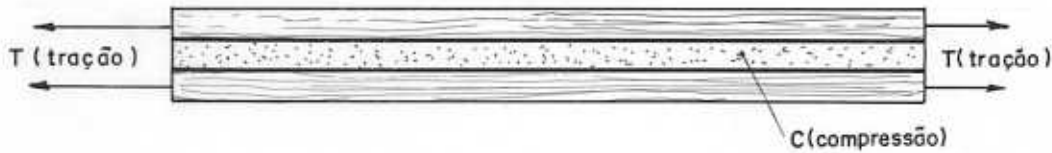


FIG. 53- COMPENSADO USADO NO MODELO

Ensaio realizado com uma lâmina, à tração, no LaMEM pelo Autor, levaram aos seguintes resultados:

CP Nº	Espessura e (cm)	Largura b (cm)	Área S (cm ²)	P _R (Ruptura) (kg)	σ _T (Ruptura) kg / cm ²
1	0,07	5,12	0,36	100	277,78
2	0,65	5,05	0,33	110	333,33
3	0,065	4,95	0,32	135	421,88
4	0,07	4,88	0,34	150	441,18
				média.....	368,54

Foram também realizados ensaios de tração (as 3 lâminas coladas), no compensado de cedro, obtendo-se os seguintes resultados:

CP Nº	Espessura e (cm)	Largura b (cm)	Área S (cm ²)	P _R (Ruptura) (Kg)	σ _T (Ruptura) kg / cm ²
1	0,215	5,05	1,09	385	353,21
2	0,215	5,11	1,10	270	245,45
3	0,210	5,03	1,06	250	235,85
4	0,220	5,14	1,13	330	292,04
				média.....	281,64

O módulo de elasticidade do cedro à flexão (NB-11) adotado para cálculo foi retirado do boletim nº 31 do Instituto de Pesquisas Tecnológicas e vale 85.000 kg/cm².

Conhecidas as tensões de ruptura do material e o módulo de elasticidade (E), pode-se dimensionar o modelo.

d) - Cálculo Teórico dos Esforços Atuantes no Modelo do Silo de Compensado de Cedro de Diâmetro 0,5 m e Altura 1,5 m:

d.1 - Pressão Horizontal sobre as Paredes, à Profundidade z:

$$q_z = q_{m\bar{x}} \left[1 - \left(\frac{z}{A} + 1 \right)^{-2} \right]$$

onde:

$$q_{m\bar{x}} = \frac{\delta D}{4 \operatorname{tg} \phi'}$$

e:

$$A = \frac{D}{4 \operatorname{tg} \phi' \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)} - \frac{h}{3}$$

e:

$$h = \frac{D}{2} \operatorname{tg} \phi$$

d.2 - Esforços de Tração nas Paredes do Silo por Metro Linear Periférico:

$$T = R \cdot q_z$$

d.3 - Força de Atrito do Material Ensilado sobre as Paredes por Metro Linear Periférico à Profundidade z:

$$F_z = \delta h \frac{z^2}{z + A}$$

TABELA 9 - Esforços de Tração e Compressão nas Paredes do Modelo

z (cm) de cima pa- ra baixo	q_z (kg/cm ²)	T (kg/cm) Periférico	F_z (kg/cm) Periférico	ϵ_T teórico 10^{-6}	ϵ_{Fz} teórico 10^{-6}
10	0,009	0,225	0,025	+ 22	- 5
20	0,015	0,375	0,088	+ 37	- 17
30	0,020	0,500	0,179	+ 49	- 35
40	0,023	0,575	0,289	+ 56	- 57
50	0,026	0,650	0,413	+ 64	- 81
55	0,027	0,675	0,480	+ 66	- 94
60	0,028	0,700	0,549	+ 69	- 108
70	0,029	0,725	0,693	+ 71	- 136
75	0,030	0,750	0,768	+ 74	- 151
80	0,031	0,775	0,844	+ 76	- 165
90	0,032	0,800	1,001	+ 78	- 196
95	0,032	0,800	1,081	+ 78	- 212
100	0,033	0,825	1,163	+ 81	- 228
110	0,033	0,825	1,328	+ 81	- 260
115	0,034	0,850	1,412	+ 83	- 277
120	0,034	0,850	1,497	+ 83	- 294
130	0,035	0,875	1,668	+ 86	- 327
135	0,035	0,875	1,755	+ 86	- 344
140	0,035	0,875	1,842	+ 86	- 361
150	0,036	0,900	2,018	+ 88	- 396

Salienta-se que as deformações teóricas obtidas na Tabela 9 são válidas para silos circulares de dimensões citadas, porém com paredes de espessura constante.

No presente caso, existem elementos (os montantes) que enrijecem a estrutura. Então, há necessidade de se fazerem hipóteses de redistribuição de esforços para os elementos envolvidos na construção.

Deve-se definir a porcentagem de carga absorvida pelo montante e a porcentagem de carga absorvida pela chapa.

e) - Cálculo da Porcentagem de Carga de Compressão Absorvido pela Chapa e pelo Montante:

A estimativa da porcentagem de carga absorvida pela

chapa com relação ao montante será feita considerando-se a área transversal de cada elemento. (figura 54).

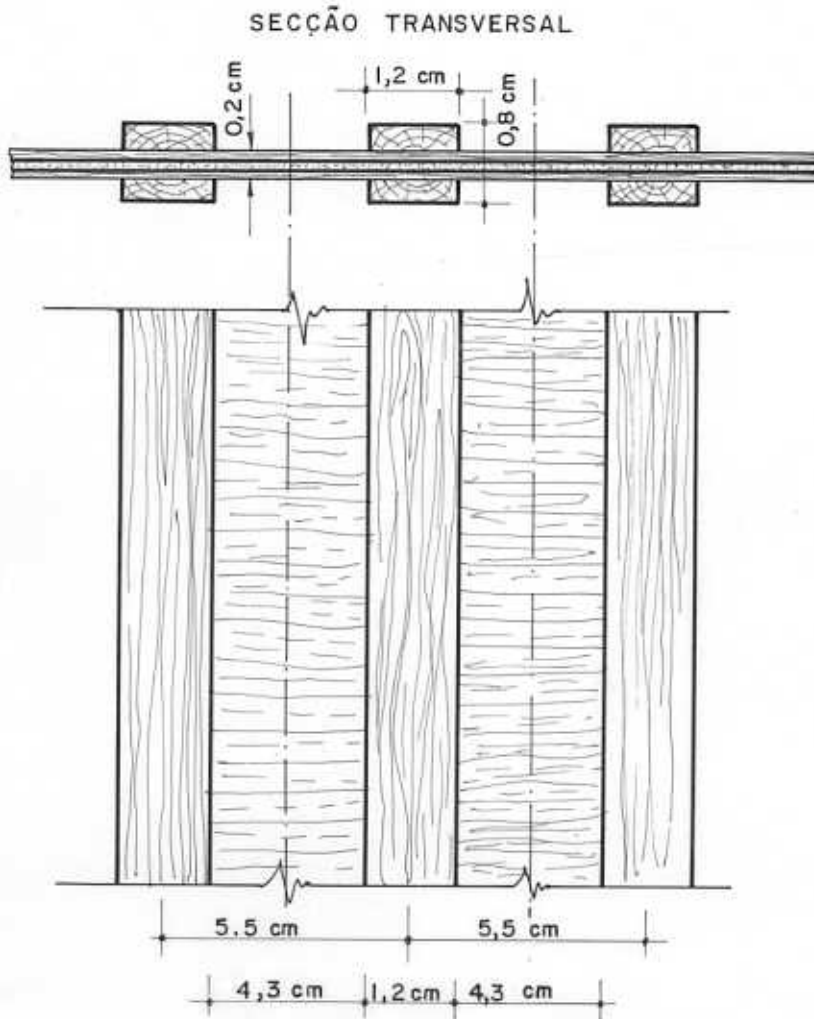


FIG. 54- SECÇÃO TRANSVERSAL DA PAREDE DO SILO

e.1) - Área da Chapa:

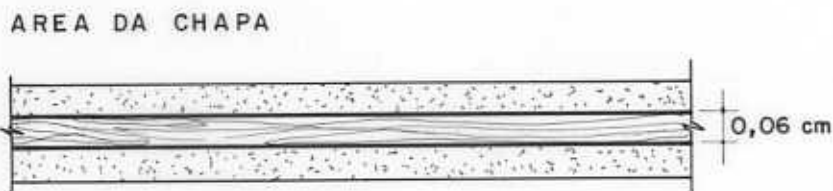


FIG. 55- CORTE LONGITUDINAL NA CHAPA

A chapa é formada de três lâminas, duas coladas segundo a direção dos esforços de tração e uma segundo a direção de compressão; conclui-se que apenas uma lâmina trabalha à compressão e duas trabalham à tração.

Portanto, a área da chapa solicitada à compressão é: $0,06 \times 5,5$ cm, ou seja duas vezes a metade da largura da chapa (vão livre entre montantes).

$$\therefore S_c = 5,5 \cdot 0,06$$

$$S_c = 0,330 \text{ cm}^2$$

e.2 - Área do Montante:

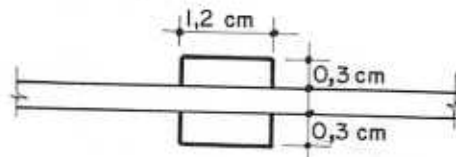


FIG. 56 - SEÇÃO DO MONTANTE

O montante tem seção transversal de $(0,6 \times 1,2)$ cm².

$$\therefore S_M = 0,6 \times 1,2$$

$$= 0,72 \text{ cm}^2$$

e.3 - Relação de Áreas:

Fazendo uma relação entre a área do montante e a área da chapa, chega-se a:

$$\frac{S_M}{S_c} = 2,2 \quad \therefore S_M = 2,2 S_c$$

Lembrando que:

$$\sigma = \frac{P}{S} = E \epsilon$$

$$P = E \epsilon S$$

para a chapa: $P_c = E_c \cdot \epsilon_c \cdot S_c$

e para o montante: $P_M = E_M \cdot \epsilon_M \cdot S_M$

Se:

$$S_M = 2,2 S_c$$

$$\therefore P_M = E_M \cdot \epsilon_M \cdot 2,2 S_c$$

e:

$$P_c = E_c \cdot \epsilon_c \cdot S_c \rightarrow S_c = \frac{P_c}{E_c \cdot \epsilon_c}$$

Substituindo:

$$P_M = E_M \cdot \epsilon_M \cdot \frac{2,2 P_c}{E_c \cdot \epsilon_c}$$

$$P_M = \frac{E_M}{E_c} \cdot \frac{\epsilon_M}{\epsilon_c} \cdot 2,2 P_c$$

Do Boletim nº 31 do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) tem-se o valor do módulo de elasticidade do cedro igual a 85.000 kg/cm^2 (E_c).

$E_M = 70.000 \text{ kg/cm}^2$ (Pinho do Paraná, média dos valores obtidos de ensaios no LaMEM).

$$\therefore \frac{E_M}{E_c} = 0,83$$

que substituindo:

$$P_M = 0,83 \cdot 2,2 \cdot \frac{\epsilon_M}{\epsilon_c} \cdot P_c$$

$$P_M \approx 1,83 \cdot \frac{\epsilon_M}{\epsilon_c} P_c$$

Os valores de ϵ_M e ϵ_c foram obtidos no ensaio, colocando-se extensômetros elétricos nos montantes em quatro diferentes alturas e extensômetros indutivos nas chapas em cinco alturas diferentes.

Com esses valores, verifica-se a porcentagem de carga absorvida pelo montante e pela chapa, visto que a deformação teórica calculada é válida para paredes de espessura constante.

TABELA 10 - Valores Experimentais de ϵ_M / ϵ_C

z (cm)	$\epsilon_M \cdot 10^{-6}$	$\epsilon_C \cdot 10^{-6}$	ϵ_M / ϵ_C
75	- 50	- 38	1,32
95	- 76	- 58	1,31
115	- 88	- 90	0,98
135	- 106	- 133	0,80
		Média....	1,10

A média da relação ϵ_M / ϵ_C obtida experimentalmente é 1,10, o que era esperado, visto que para o montante e a chapa trabalharem juntos a relação ϵ_M / ϵ_C tem que ser igual a um.

$$\therefore P_M = 2,0 P_C$$

f) - Montagem do Silo e de sua Base:

Com 210 chapas de madeira compensada e os montantes prontos, passou-se à montagem do modelo reduzido do silo em estudo.

Inicialmente foi construída a base, de madeira aglomerada em formato circular, plana, com diâmetro de 50 cm. Tal base foi dotada de um orifício central de uma polegada de diâmetro e tramela para regular a saída do material ensilado durante a operação de esvaziamento do silo.

Para a montagem propriamente dita do modelo reduzido, foi adotada uma sequência de colagem de modo a sistematizar a tarefa. Construiu-se uma guia para receber cada um dos montantes internos do modelo. Na continuação eram coladas no montante interno as chapas de compensado e sobre estas, o que viria a ser o montante externo do silo. Como a adesão não é instantânea, sendo necessário vinte e quatro horas para que a colagem se complete, foram utilizados pequenos pregos (tachas) com a finalidade de se manterem unidas as diversas superfícies.

Visando tornar a montagem mais prática, as chapas e os montantes foram reunidos em módulos congregando 5 chapas no sentido periférico e altura igual a 1,50 metros (altura final do modelo).

Uma vez prontos os módulos, passou-se ao fechamento do silo, com o posicionamento definitivo dos módulos. Para isso

foi preciso a construção de uma estrutura auxiliar composta de 6 (seis) montantes de madeira de 2 cm por 4 cm de seção transversal com uma plataforma circular à meia altura e outra na seção do topo do silo para enrijecer a estrutura vertical de montantes e facilitar o fechamento do modelo na justaposição dos diversos módulos.

Concluída a montagem do silo em toda a sua periferia, retirou-se a estrutura auxiliar de montantes e plataformas circulares pela parte superior do modelo, ficando, o mesmo, pronto para a realização dos ensaios.

g) - Colocação dos Medidores de Deformação (Extensômetros):

Terminada a construção do modelo, o autor instalou 24 (vinte e quatro) medidores de deformação nos pontos em que desejava determinar tensões para a comparação com os resultados teóricos calculados.

Dentre os vinte e quatro extensômetros usados, dez deles foram instalados para medir as deformações devidas à compressão, dez para medir as deformações devidas à tração nas chapas de compensado e quatro para medir as deformações devidas à compressão nos montantes (figura 57).

Os tipos de extensômetros usados foram: o indutivo e o resistivo.

O extensômetro indutivo, de marca Hewlett Packard, (figura 59), consiste de duas partes: uma haste móvel e um cilindro. O movimento da haste no interior do cilindro produz uma variação de indutância, transformada pelo transdutor em variação de voltagem, constatada em um Voltímetro Digital da mesma marca. Uma variação de 1 mv no Voltímetro, corresponde a uma deformação de 1 milésimo de milímetro.

O extensômetro resistivo usado, de marca Kyowa, (figura 58), consiste de uma resistência que é colocada nos pontos onde se quer medir deformações. A variação do comprimento dessa resistência com a ação de um carregamento é constatada em um Strain Indicator de mesma marca. Como esses extensômetros elétricos já tem um tamanho padronizado, a leitura obtida no Strain Indicator multiplicada por 10^{-6} é a deformação específica procurada.

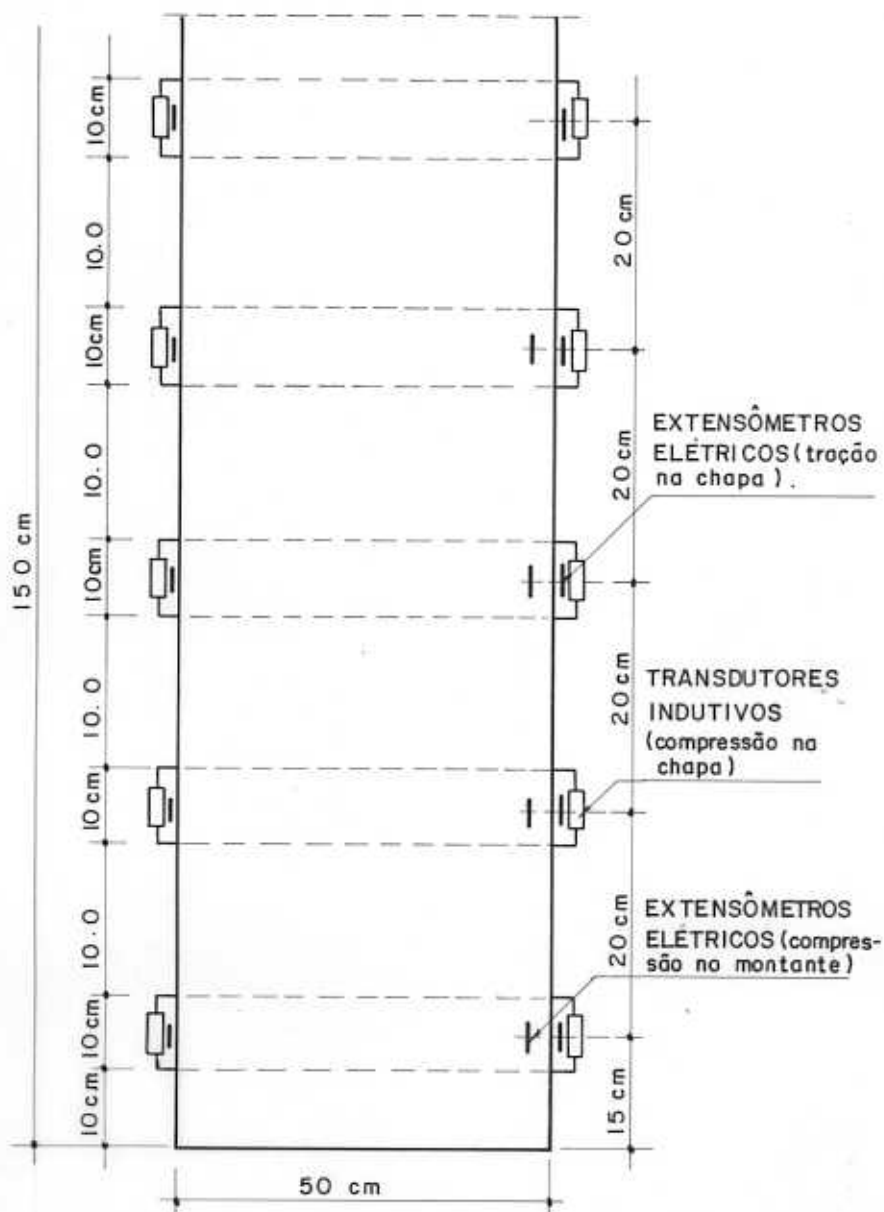


FIG. 57 - POSIÇÃO DOS EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS



FIG. 58 - EXTENSOMETRO ELÉTRICO DE RESISTÊNCIA

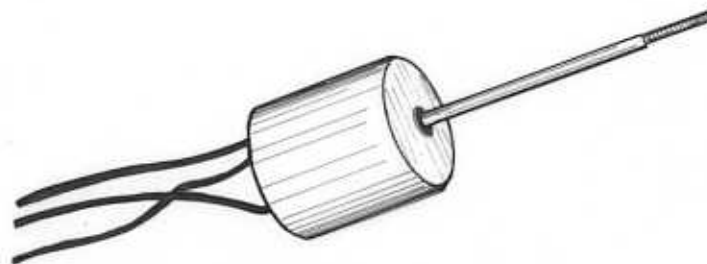


FIG. 59 - EXTENSÔMETRO INDUTIVO

Observa-se pela fig. 57 que foram tomadas duas leituras diametralmente opostas, na mesma cota, para uma análise da média dos resultados.

Nota-se também a colocação de quatro extensômetros elétricos nos montantes para a leitura das suas deformações.

h) - Equipamentos Usados para os Extensômetros:

Para a leitura das dez deformações obtidas dos extensômetros indutivos, usou-se o voltímetro de marca Hewlett Packard acoplado a um comutador de capacidade para doze pontos, de marca Huggenberg Zllrich. Além disso, fez-se o gráfico da deformação em função da carga no X Y Recorder de marca Hewlett Packard (figura 60).

Para a leitura das outras catorze deformações dos extensômetros elétricos, usou-se o Strain Indicator de marca Kyowa, acoplado a um comutador de capacidade para vinte e quatro pontos, de mesma marca.

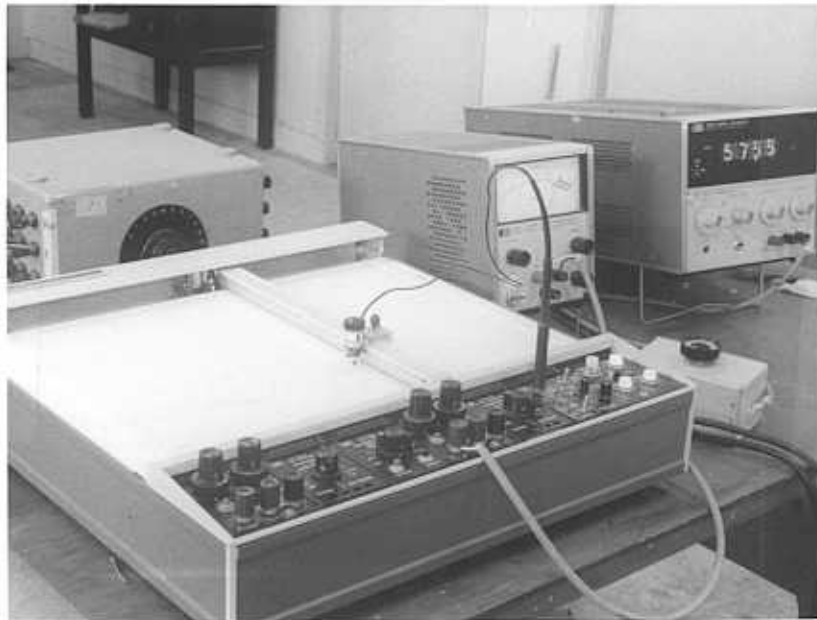


FIG. 60 - Equipamentos para Leitura das Deformações

i) - Carregamento do Modelo:

i.1 - Tipo do Material Usado:

Devido à facilidade de manipulação e obtenção, optou-se pela areia para o carregamento do modelo.

A densidade aparente da areia foi determinada de acordo com os métodos brasileiros:

$$\delta = \frac{M}{V}$$

onde:

M = massa = peso

V = volume aparente

O volume foi conseguido enchendo-se uma caixa de 15 l com areia, jogada a 10 cm de altura, para não haver problemas de compactação.

Peso da caixa vazia = 3.600 g

Peso da caixa cheia de areia = 27.100 g

∴ peso da areia = 27.100 - 3.600 = 23.500 g

e:

$$\therefore \delta = \frac{23.500 \text{ g}}{15.000 \text{ cm}^3} = 1,57 \text{ g/cm}^3$$

O ângulo de atrito interno da areia foi tirado da tabela 7 do capítulo VII deste trabalho e vale 32°; o ângulo de atrito entre o material e as paredes do silo, obtido dessa mesma tabela, vale 27°.

Conhecendo-se assim as principais características do material, pode-se partir para o cálculo das tensões teóricas atuantes no modelo.

i.2 - Esquema de Carga Usado:

O carregamento, com areia de densidade aparente 1,57 g/cm³, foi feito através de diversas cargas de 25 Kg, correspondendo ao volume de uma caixa de dimensões (20 X 20 X 40) cm³.

A primeira carga de 25 kg corresponde ao volume do cone de altura h mais o peso correspondente ao volume do cilindro de altura h' (figura 61).

A altura do cone superior do material ensilado é:

$$h = \frac{D}{2} \cdot \operatorname{tg} \phi$$

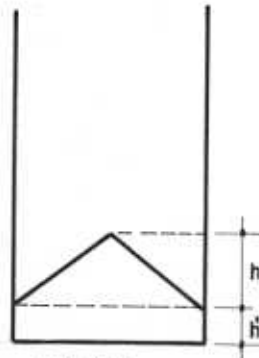


FIG. 61

onde $\phi = \text{ângulo de atrito do material (para a areia } 32^\circ)$

$$\therefore h = \frac{50}{2} \cdot \operatorname{tg} 32^\circ \approx 16 \text{ cm}$$

O volume do cone é:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{h}{3} = \frac{\pi D^2 h}{12} = 10.471,98 \text{ cm}^3$$

$$\text{em peso } + p = 10.471,98 \cdot \frac{1,57}{1000} \approx 16 \text{ kg}$$

O volume do cilindro de altura h' vale:

$$V = \frac{25 - 16}{1,57 \cdot 10^3} = \frac{9 \cdot 1000}{1,57} = 5.732,48 \text{ cm}^3$$

$$\frac{\pi D^2}{4} \cdot h' = 5.732,48 \text{ cm}^3$$

$$h' \approx 3 \text{ cm}$$

Portanto para o 1º carregamento de 25 kg, tem-se:

$$h = 16 \text{ cm} \quad \text{e} \quad h' = 3 \text{ cm (figura 62).}$$

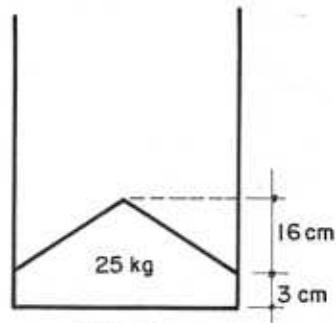


FIG. 62

Para o segundo carregamento de 25 kg, tem-se:

Cálculo de h'' :

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h''$$

$$V = \frac{25.000}{1,57} = 15.923,57 \text{ cm}^3$$

$$\therefore h'' = \frac{15.923,57 \cdot 4}{\pi \cdot 50^2}$$

$$\therefore h'' = 8,0 \text{ cm (figura 63)}$$

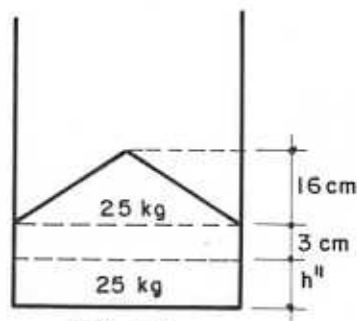


FIG. 63

E assim sucessivamente até o carregamento completo do silo.

O número de carregamento (x) de 25 kg é:

$x = 18$ carregamentos (figura 64)

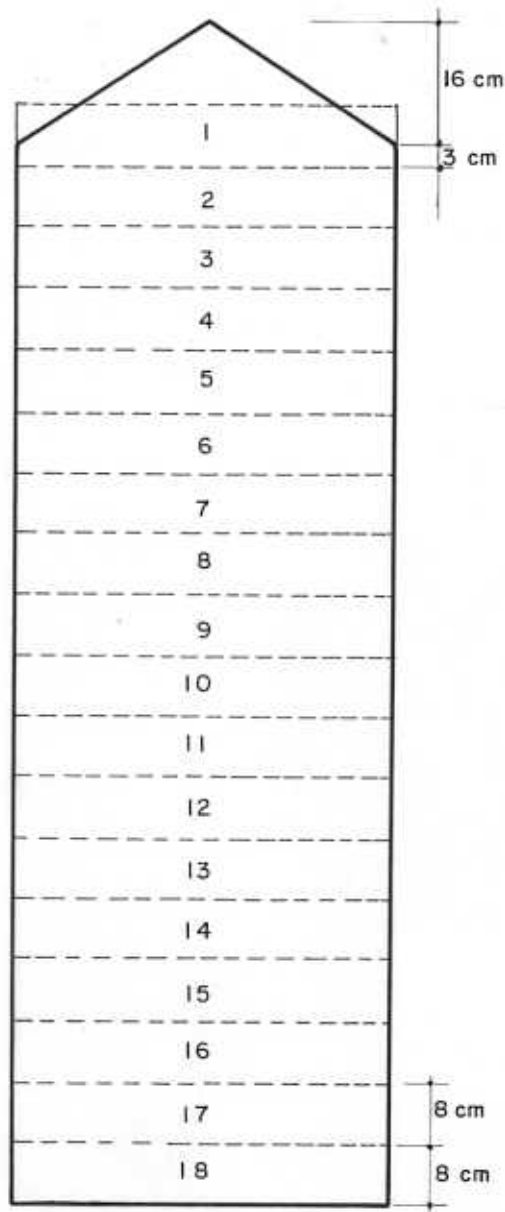


FIG. 64

A carga total do modelo do silo \bar{e} : $18 \cdot 25 = 450$ kg.

Devido às aproximações feitas nos carregamentos e ao cone invertido de areia que permanecia depositado no fundo do modelo (sua base era reta), o número real de carregamentos obtidos foi 16 (dezesseis), a partir do segundo ensaio realizado sobre o modelo.

i.3 - Medição das Deformações:

Como já foi dito, o carregamento do silo foi feito de 25 kg em 25 kg. Nos intervalos de cargas liam-se as deformações, tanto dos transdutores como dos extensômetros elétricos e plotavam-se cada ponto das deformações dos transdutores em função da carga aplicada.

Portanto, para cada 25 kg de areia, eram obtidos vinte e quatro leituras e dez pontos plotados no gráfico.

O carregamento prosseguia dessa maneira até a carga total no modelo.

Foram feitos quatro ensaios e retirada a média para comparação com as deformações teóricas de cálculo.

j) - Resultados Obtidos:

As deformações médias obtidas de quatro ensaios do modelo, na escala 1:10, de compensado de cedro, 1,5 m de altura por 0,5 m de diâmetro, foram as seguintes:

TABELA 11 - Deformação de Tração nas Paredes do Silo, nas Alturas Consideradas:

Carga kg	$\epsilon_T \cdot 10^{-6}$ (55 cm)	$\epsilon_T \cdot 10^{-6}$ (75 cm)	$\epsilon_T \cdot 10^{-6}$ (95 cm)	$\epsilon_T \cdot 10^{-6}$ (115 cm)	$\epsilon_T \cdot 10^{-6}$ (135 cm)
0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	12
100	0	0	0	8	27
125	0	0	7	19	38
150	0	0	17	25	43
175	0	0	28	36	55
200	0	0	34	45	62
225	0	10	41	51	67
250	5	25	49	59	71
275	13	33	56	65	78
300	20	41	61	70	82
325	36	49	64	76	88
350	49	53	72	81	95
375	63	67	77	87	98
400	71	78	81	94	103

TABELA 12 - Deformações de Compressão nas Chapas de Compensado de Cedro, nas Alturas Consideradas:

Carga	$\epsilon_c \cdot 10^{-6}$	$\epsilon_c \cdot 10^{-6}$	$\epsilon_c \cdot 10^{-6}$	$\epsilon_c \cdot 10^{-6}$	$\epsilon_c \cdot 10^{-6}$
kg	(55 cm)	(75 cm)	(95 cm)	(115 cm)	(135 cm)
0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	- 11
75	0	0	0	0	- 22
100	0	0	0	0	- 34
125	0	0	0	- 7	- 41
150	0	0	0	- 17	- 52
175	0	0	0	- 20	- 61
200	0	0	- 10	- 25	- 70
225	0	0	- 13	- 37	- 79
250	0	- 12	- 17	- 43	- 84
275	0	- 17	- 25	- 55	- 102
300	0	- 21	- 30	- 61	- 110
325	- 4	- 28	- 37	- 70	- 119
350	- 8	- 31	- 45	- 75	- 126
375	- 14	- 35	- 51	- 82	- 129
400	- 22	- 38	- 58	- 90	- 133

TABELA 13 - Deformações de Compressão nos Montantes de Pinho do Paraná nas Alturas Consideradas.

Carga	$\epsilon_M \cdot 10^{-6}$	$\epsilon_M \cdot 10^{-6}$	$\epsilon_M \cdot 10^{-6}$	$\epsilon_M \cdot 10^{-6}$
kg	(75 cm)	(95 cm)	(115 cm)	(135 cm)
0	0	0	0	0
25	0	0	0	0
50	0	0	0	- 5
75	0	0	0	- 11
100	0	0	0	- 21
125	0	0	- 13	- 29
150	0	- 9	- 24	- 36
175	0	- 14	- 35	- 44
200	0	- 22	- 46	- 55
225	6	- 30	- 56	- 63
250	- 15	- 37	- 61	- 74
275	- 21	- 46	- 65	- 83
300	- 29	- 55	- 70	- 90
325	- 38	- 61	- 76	- 94
350	- 43	- 69	- 81	- 99
375	- 47	- 72	- 85	- 102
400	- 50	- 76	- 88	- 106

k) - Análise de Resultados:

No cálculo teórico do modelo feito anteriormente, foram determinadas as deformações teóricas de compressão e de tração nas paredes do silo. Verifica-se porém, neste cálculo, que as deformações são válidas para um silo de paredes de espessura constante (no caso 2 mm). Como, para efeito de ligação, houve necessidade da colocação dos montantes ocasionando um rearranjo na distribuição de esforços e conseqüentemente, na distribuição de deformações são feitas algumas hipóteses para comparação das deformações teóricas e experimentais.

Considerando a área de influência de um montante:

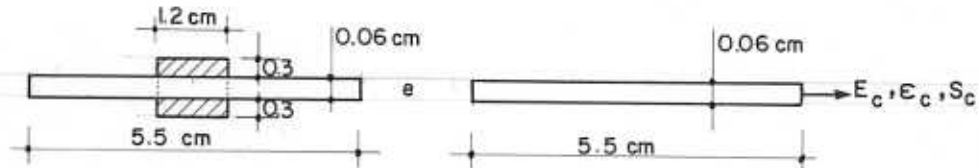


FIG.65 - COMPRIMENTO DE INFLUÊNCIA DA CHAPA E DO MONTANTE

$$\sigma_t = \left(2 \frac{a}{2} + b\right)t = \sigma_c \cdot t \cdot a + \sigma_M \cdot b \cdot c$$

$$\sigma_t = \frac{t \cdot a \cdot \sigma_c + b \cdot c \cdot \sigma_M}{t(a+b)}$$

$$P_T = P_M + P_c$$

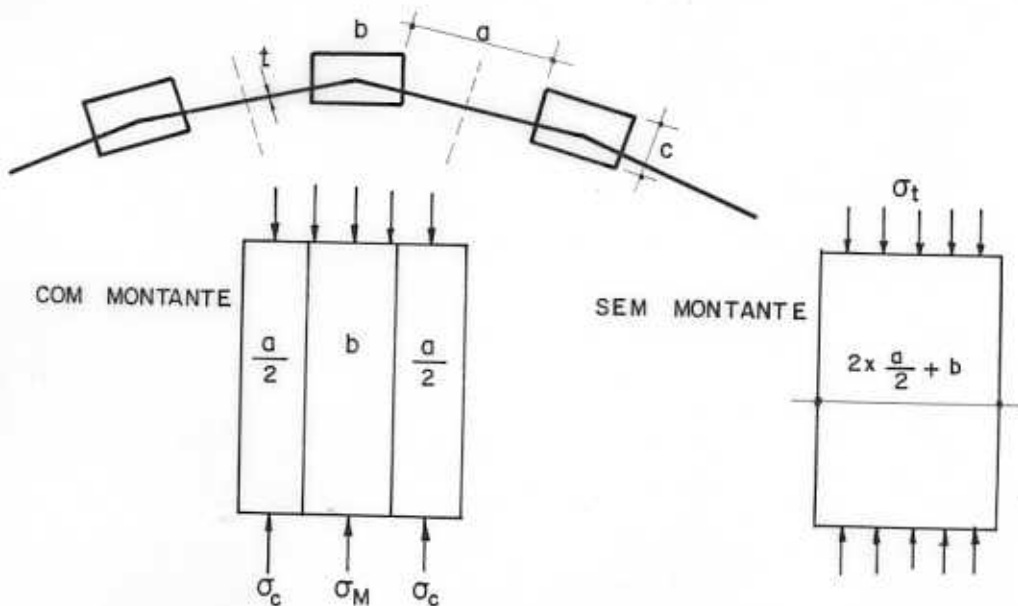


FIG.66 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NA CHAPA

$$E_M = 70.000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\epsilon_c = \text{experimental}$$

$$\epsilon_M = \text{experimental}$$

$$S_c = 0,06 \cdot 5,5 = 0,33$$

$$S_M = 0,6 \cdot 1,2 = 0,72$$

$$E_c = 85.000 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_T = E_{\text{cedro}} = 85.000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\epsilon_T = ?$$

$$S_T = 0,06 \cdot 5,5 = 0,33$$

$$P_T = P_M + P_c$$

$$E_T \epsilon_T S_T = E_M \cdot \epsilon_M + E_c \cdot \epsilon_c \cdot S_c$$

para $z = 75 \text{ cm}$:

$$\epsilon_T = \frac{70000 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \cdot 0,72 + 85000 \cdot 10^{-6} \cdot 0,33 \cdot 38}{85000 \cdot 0,33}$$

$$\epsilon_T = 128 \cdot 10^{-6}$$

para $z = 95 \text{ cm}$:

$$\epsilon_T = \frac{70000 \cdot 0,72 \cdot 76 \cdot 10^{-6} + 28050 \cdot 58 \cdot 10^{-6}}{28050}$$

$$\epsilon_T = 195 \cdot 10^{-6}$$

para $z = 115 \text{ cm}$:

$$\epsilon_T = \frac{70000 \cdot 0,72 \cdot 88 \cdot 10^{-6} + 28050 \cdot 90 \cdot 10^{-6}}{28050}$$

$$\epsilon_T = 248 \cdot 10^{-6}$$

para $z = 135$ cm:

$$\epsilon_T = \frac{70000 \cdot 0,72 \cdot 106 \cdot 10^{-6} + 28050 \cdot 133 \cdot 10^{-6}}{28050}$$

$$\epsilon_T = 324 \cdot 10^{-6}$$

k.1 - Comparação dos Resultados Obtidos Experimentalmente com os Resultados Teóricos Calculados:

A tabela abaixo mostra as deformações obtidas no ensaio e as deformações teóricas de tração e de compressão nas cotas consideradas para o silo totalmente carregado.

COTA z (cm)	T R A Ç Ã O		C O M P R E S S Ã O	
	ϵ Teórico	ϵ Experiment.	ϵ Teórico	ϵ Experiment.
Contado de cima para baixo				
55	$66 \cdot 10^{-6}$	$71 \cdot 10^{-6}$	- $94 \cdot 10^{-6}$	=====
75	$74 \cdot 10^{-6}$	$78 \cdot 10^{-6}$	- $151 \cdot 10^{-6}$	- $128 \cdot 10^{-6}$
95	$78 \cdot 10^{-6}$	$81 \cdot 10^{-6}$	- $212 \cdot 10^{-6}$	- $195 \cdot 10^{-6}$
115	$83 \cdot 10^{-6}$	$94 \cdot 10^{-6}$	- $277 \cdot 10^{-6}$	- $248 \cdot 10^{-6}$
135	$86 \cdot 10^{-6}$	$103 \cdot 10^{-6}$	- $344 \cdot 10^{-6}$	- $324 \cdot 10^{-6}$

Notam-se, na tabela acima, pequenas diferenças entre as deformações teóricas e experimentais, devidas principalmente à heterogeneidade da madeira e às considerações feitas com relação ao compensado: apenas uma lâmina trabalha à compressão e duas lâminas à tração.

É evidente que há contribuições de compressão e tração normais, mas desprezíveis, dadas as características mecânicas da madeira.

l) - Comparações entre Modelo e Protótipo:

As dimensões do protótipo são as seguintes:

$$\text{Altura} = 15 \text{ m}$$

$$\text{Diâmetro} = 5 \text{ m}$$

$$\text{Espessura da parede} = 2 \text{ cm}$$

$$\text{Montantes} = (6 \times 12) \text{ cm}^2$$

$$\text{Carregamento: milho de densidade } 0,7 \text{ t/m}^3$$

As dimensões do modelo são as seguintes:

$$\text{Altura} = 1,5 \text{ m}$$

$$\text{Diâmetro} = 0,5 \text{ m}$$

$$\text{Espessura da parede} = 0,2 \text{ cm}$$

$$\text{Montantes} = (0,6 \times 1,2) \text{ cm}^2$$

$$\text{Carregamento: areia de densidade } 1,53 \text{ t/m}^3$$

A relação de volume \bar{v} :

$$V_{\text{total protótipo}} = \frac{\pi \cdot 5^2}{4} \cdot 15 = 294524311 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{total modelo}} = \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} \cdot 1,5 = 294524,311 \text{ cm}^3$$

$$V = 1000 v$$

A relação de massa \bar{m} :

$$M_{\text{protótipo}} = V \cdot D = 294524311 \cdot 0,0007$$

$$\therefore M_{\text{protótipo}} = 206167,018 \text{ Kg}$$

$$M_{\text{modelo}} = v \cdot d = 294524,311 \cdot 0,00153$$

$$M_{\text{modelo}} = 450,622 \text{ Kg}$$

$$\therefore M = 457,52 \text{ m}$$

Para continuarem as relações entre modelo e protótipo, o modelo deveria ter sido carregado com um material cuja relação entre as massas fosse:

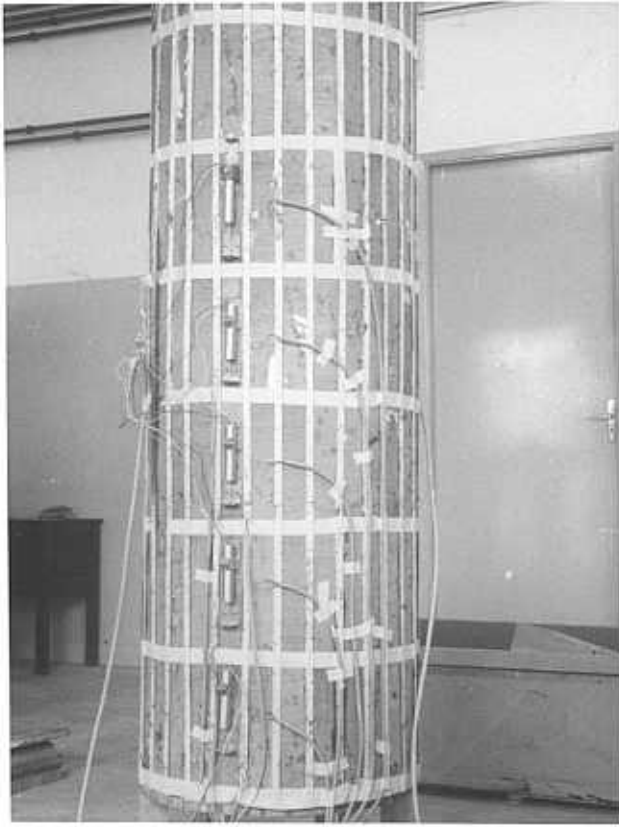
$$M = 1000 m$$

O material usado (no caso a areia) forneceu uma relação de :

$$M = 457,52 m$$

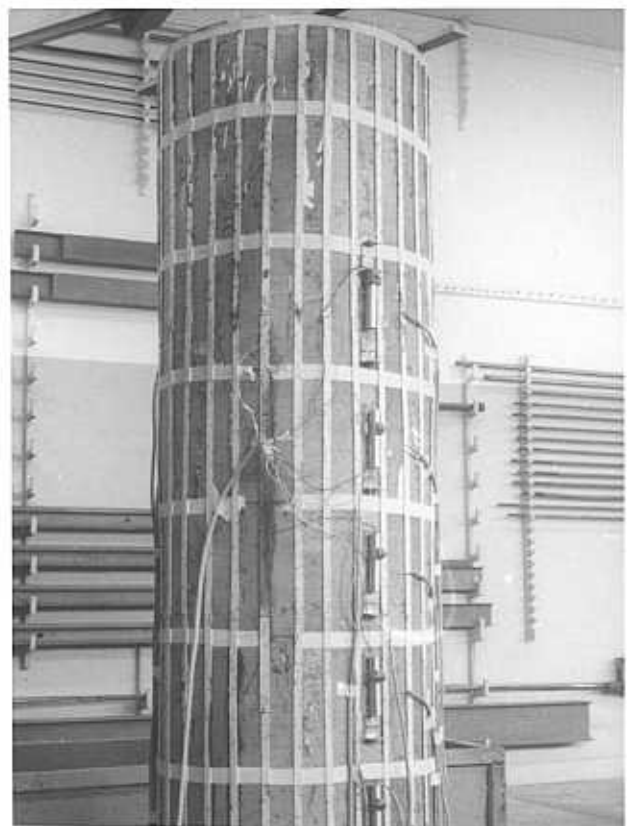
Portanto, o carregamento no modelo foi 2,2 vezes maior que o carregamento correspondente ao real e conseqüentemente, as deformações lidas são maiores, ocasionando um ensaio de melhor interpretação. Isto tornou-se evidente com o cálculo do modelo para comparação das deformações.

Deve ser ressaltado, que seria impossível conseguir cereal que reduzido dez vezes desse as mesmas características do cereal real.



MODELO DE COMPENSADO

Vista geral e aspecto dos
transdutores indutivos.



MODELO DE COMPENSADO

Vista geral e aspecto dos
transdutores indutivos

XIV - PROJETO E DETALHAMENTO FINAL DO SILO - PROTÓ -

TIPO:

A finalidade fundamental de se terem realizado todos os ensaios em modelos reduzidos de papel, de se terem montado desde as chapas de compensado até os montantes para o modelo reduzido do silo de madeira, foi a de se projetar e construir um silo, com as dimensões anteriormente citadas e colocá-lo desempenhando plenamente as funções para as quais foi concebido.

Silos desse porte são indicados para armazenamento a nível de fazenda, dado o baixo custo da construção e da ensilagem, a economia havida pela supressão do transporte até uma sede maior e a valorização a curto prazo da propriedade rural, pois o custo da construção de um silo de tal porte corresponde ao custo da conservação do mesmo volume de grãos em um centro de ensilagem durante um intervalo de tempo relativamente curto.

Além do tratamento do silo explicado no item a deste capítulo, para desenvolvimento do projeto do silo real, foram definidas três fases distintas: base ou infra-estrutura; super estrutura e cobertura. Cada uma delas será, a seguir pormenorizada.

a) - Tratamento da Madeira:

A proteção de peças de madeira que entram em contato com alimentos era inviável até verificar-se que o quinolinolato de cobre se mostrou não tóxico aos seres humanos, nas condições normais de tratamento. Assim, madeira utilizada em caixas de colheitas, transporte, armazenamento e acondicionamento de frutas, hortaliças e cereais pode ser adequadamente protegida sem riscos ao consumidor, com preservador à base de QUINOLINOLATO DE CÔBRE SOLUBILIZADO.

O tratamento deve ser feito na madeira seca e a solução preservadora pode ser aplicada com pincel ou rolos. Aplica-se o produto em várias demãos até que a madeira não mais o absorva.

O tratamento poderá ser efetuado por imersão. Nesse caso, o período de tempo durante o qual a madeira deve permanecer submersa é controlado por pesagens antes e durante o tratamento. Entretanto, salienta-se que a absorção é muito maior no início e decresce rapidamente com o decorrer do tempo. Recomendam-se reten

ções de 3,2 kg do produto por metro cúbico de madeira. Isso corresponde a aproximadamente 128 kg da solução a 2,5% por metro cúbico de madeira.

Após o tratamento aguarda-se que o odor do solvente desapareça, antes de utilizar a madeira.

O quinolinolato já está comercializado no Brasil.

b) - Base ou Infra-Estrutura:

Pelo cálculo teórico do silo em questão, visto anteriormente, determina-se o valor $0,78 \text{ kg/cm}^3$ da pressão vertical máxima; pois:

$$p_{m\acute{a}x} = \frac{q_{m\acute{a}x}}{\text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)}$$

onde:

ϕ é o ângulo de atrito interno do material.

É interessante ressaltar que, se fosse calculada a pressão vertical máxima sobre o fundo, partindo da altura multiplicada pelo peso específico do material, a pressão seria igual a $1,08 \text{ kg/cm}^2$.

A diferença $(1,08 - 0,78) \text{ kg/cm}^2$ é a porcentagem (contribuição) do atrito do cereal sobre as paredes e do cereal sobre o cereal, absorvida pelas paredes do silo, diminuindo assim o valor da pressão máxima vertical sobre o fundo.

Com base nesse valor, nota-se que não haveria necessidade de grandes fundações para o silo, pois os piores solos apresentam resistência de $0,5 \text{ kg/cm}^2$.

A necessidade de uma boa fundação para um silo deve-se à ação da carga accidental de vento.

A NB-5, item 7, encara o problema de vento da seguinte maneira:

"O efeito global do vento, que se compõe de pressão e sucção, é suposto equivalente ao de uma pressão que se exerce normalmente às superfícies a barlavento e igual ao produto $c \cdot q$ de duas quantidades (cujos valores são dados abaixo), onde q é a pressão de obstrução e c é o coeficiente de forma".

A pressão de obstrução q é função da altura e para 15 m vale 60 kg/m^2 .

O coeficiente c é função da forma e do tipo de construção e no caso de edificação cilíndrica, vale 0,7.

Portanto, $c q = 60 \cdot 0,7 = 42 \text{ kg/m}^2$.

Considerando, logicamente, o silo vazio e o centro de aplicação da resultante da ação do vento coincidente com o centro de gravidade do silo, tem-se:

$$\text{Resultante da ação do vento} = V = 42 \cdot D \cdot H$$

$$\therefore V = 42 \cdot 5 \cdot 15$$

$$V = 3.150 \text{ kg}$$

Essa resultante provocará, na base, um momento de:

$$3.150 \cdot 7,5 = 24 \text{ t.m}$$

O esforço de tração ou compressão em cada estaca será:

$$M = F \cdot d$$

$$24 = F \cdot 5$$

$$\therefore F = 4,8 \text{ t}$$

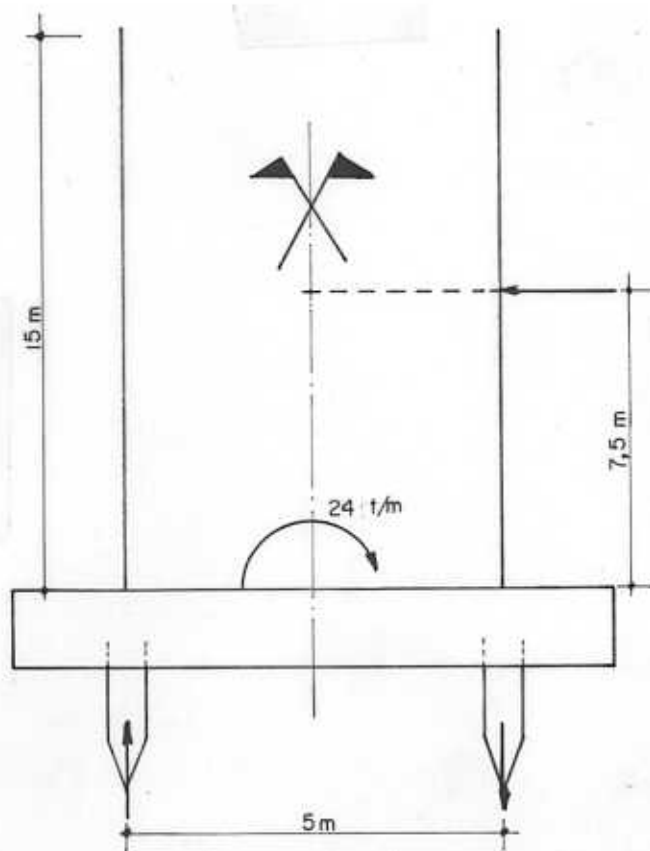


FIG.67 - ESFORÇOS DEVIDO AO VENTO NO SILO

Portanto, para o caso presente, há necessidade de estacas que resistam a um esforço de tração de cinco toneladas.

Uma sugestão adotada neste projeto (figura 70) é a de oito estacas que resistam 1,5 toneladas à tração, adotada também a hipótese de que, no local da construção, não há direção preferencial de atuação do vento. Dimensiona-se as estacas à tração pensando que, se uma estaca resiste um certo valor à tração, resistirá pelo menos ao dobro à compressão. Também foi visto que em geral existem dois tipos de descargas em silos: o por gravidade e o sistema de dutos descrito anteriormente.

O tipo de descarga influi diretamente no tipo de base e deve ser estudado separadamente em cada caso.

Na figura (71) ilustra-se um tipo de base com canais para a aeração dos cereais.

c) - Superestrutura:

Como foi visto na superestrutura do silo, serão utilizados basicamente dois tipos de materiais: as vigas de peroba rosa de seção (6 cm X 12 cm) e as chapas de compensado de dimensões comerciais de (1,10 m X 2,20 m X 0,02 m).

Como o silo tem 30 arestas de 0,55, as chapas de compensado deverão ser cortadas no meio para dar a dimensão de 0,55 m X 2,20 m. As emendas das chapas no sentido vertical (a cada 0,55m) serão através de montantes chanfrados a 120° para o perfeito fechamento do diâmetro de projeto (5 m). No sentido horizontal, as emendas das chapas (a cada 2,20 m) também serão através de montantes de 6 cm X 12 cm (2 cm X 3 cm X 12 cm), que, além de vedação, terão a finalidade de contraventamentos ao longo do meridiano (figura 69).

O chanfro de 120° no montante de ligação vertical será dado através de uma faca, adaptável à tupia, projetada pelo Autor, como feita na montagem do modelo (figura 68).

O montante de seção (6 cm X 12 cm) será primeiramente serrado dando dois montantes (interno e externo) de seção (3 cm X 12 cm). O montante interno será chanfrado com a face 2 da faca (figura 68) e o montante externo com a face 1 (figura 68).

Os montantes externos serão embutidos na base de concreto; em seguida serão coladas as chapas de compensado e depois, colados e pregados os montantes internos. O prego simplesmente será elemento de pressão inicial até "a adesão" da cola propriamente dita.

Em seguida, serão colados e pregados os montantes horizontais de seção 3 cm X 12 cm (internos e externos).

d) - Cobertura:

Para a cobertura, serão usadas tesouras convencionais de madeira, apoiadas sobre os montantes do silo.

Como o silo tem 5 metros de diâmetro, será projetada uma tesoura de 7 m de comprimento ficando um metro de beiral em toda a periferia.

Serão usadas telhas de barro cozido e vigas de seção (6 X 12) cm² para os banzos, diagonais e montantes da tesoura em questão (figura 72).

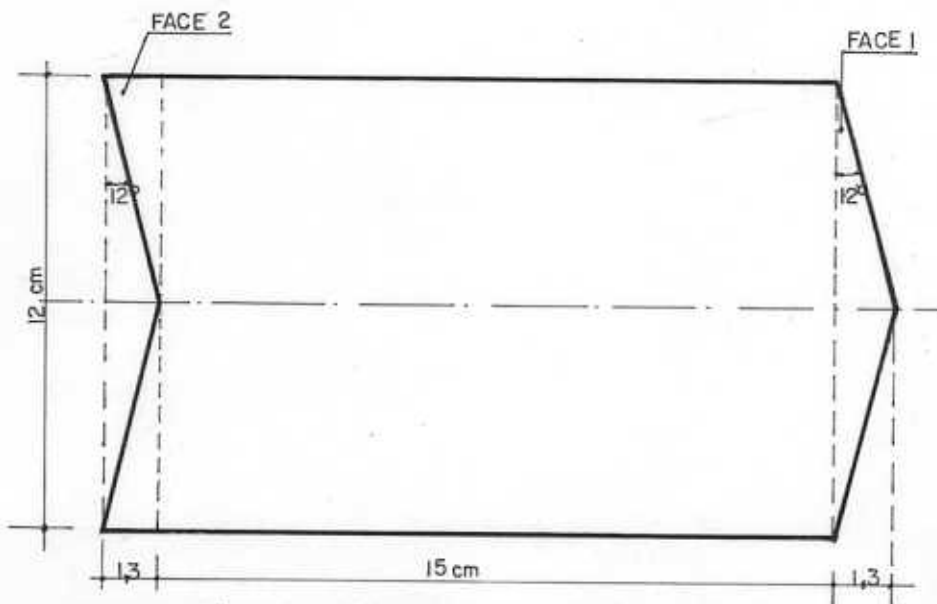
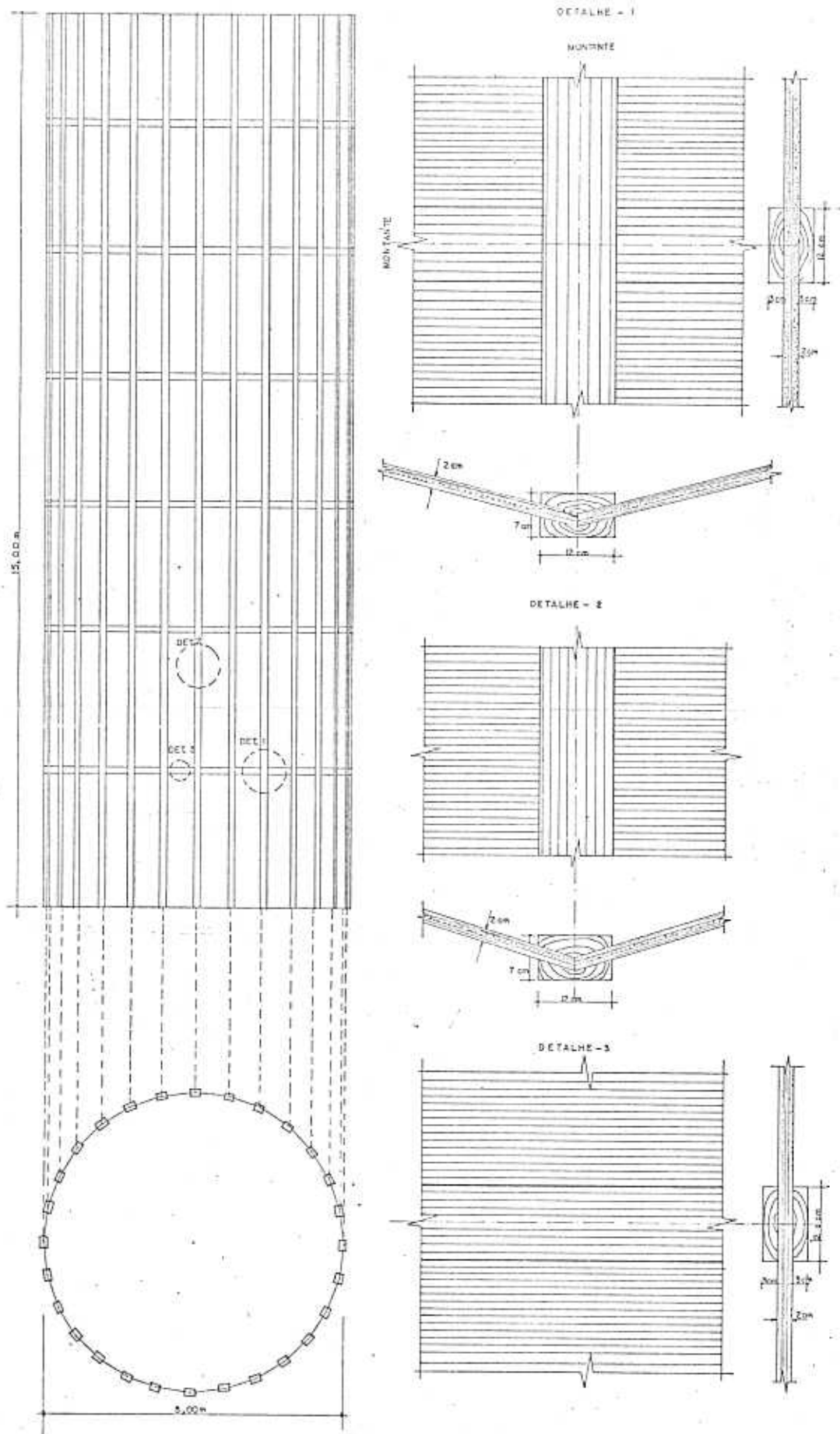


FIG. 68- LÂMINA PARA CHANFRAR OS MONTANTES



ESC. 1/100

FIG. 69 - ELEVACÃO E DETALHES DO PROTÓTIPO

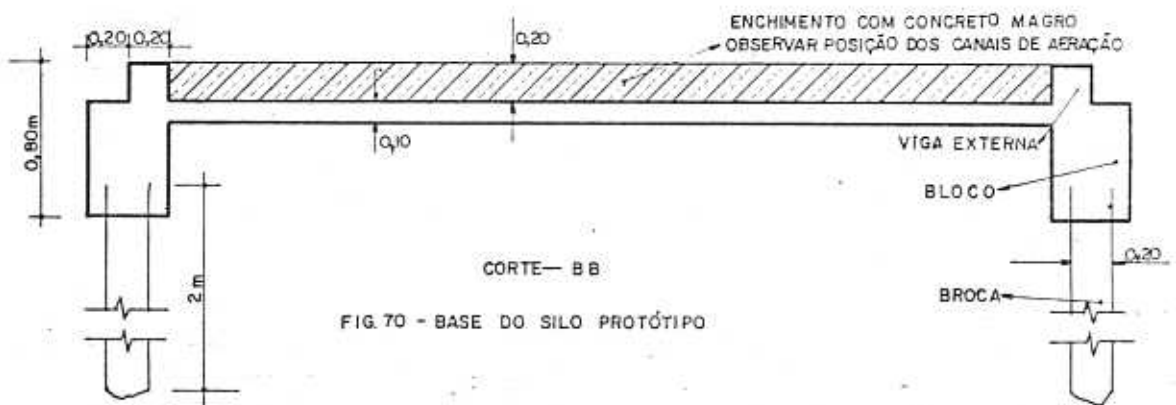
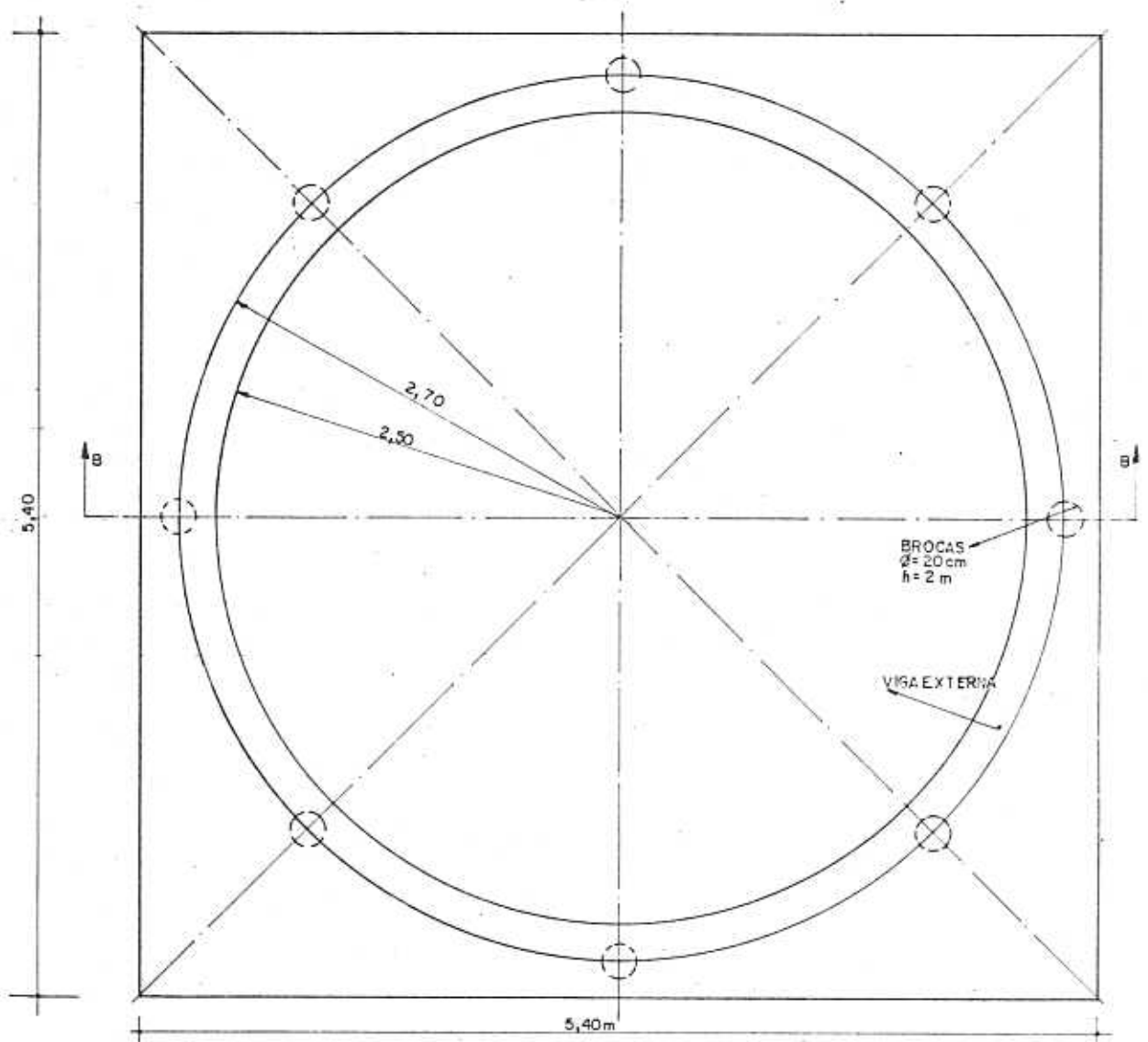
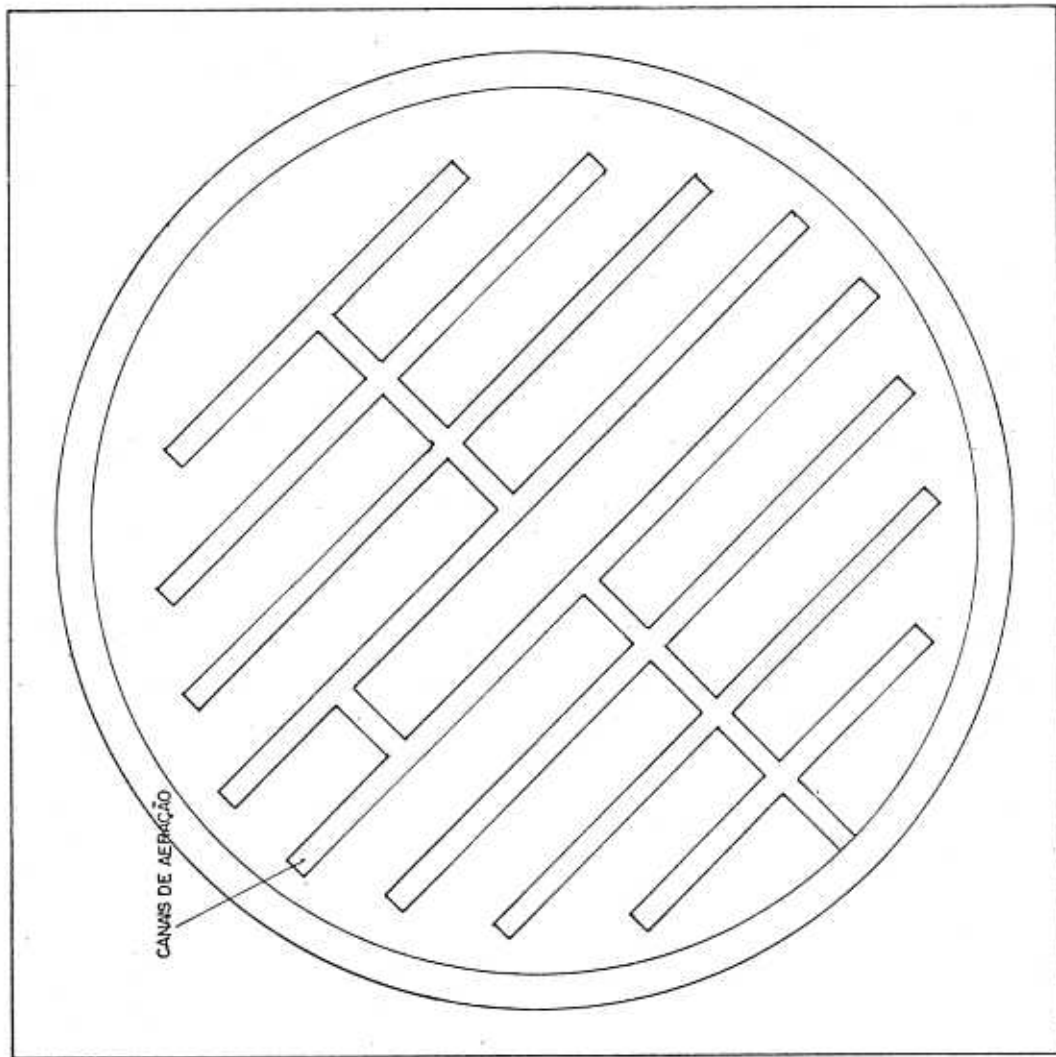
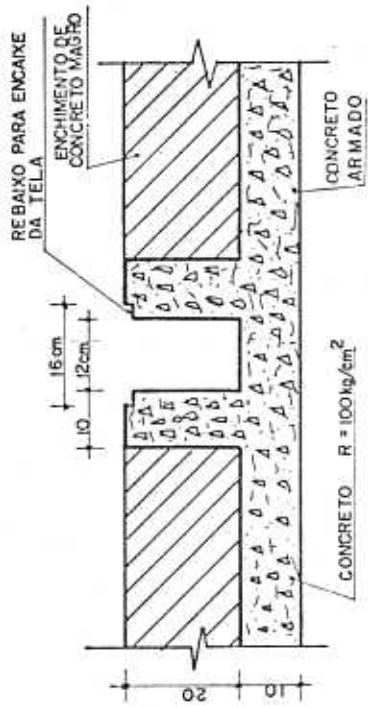


FIG. 70 - BASE DO SILO PROTÓTIPO

SISTEMA DE AERAÇÃO



DETALHE DOS CANAIS



ARMAÇÃO DAS PAREDES DOS CANAIS

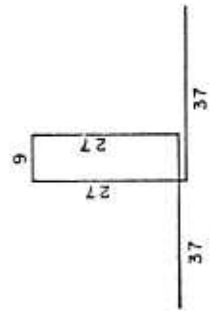
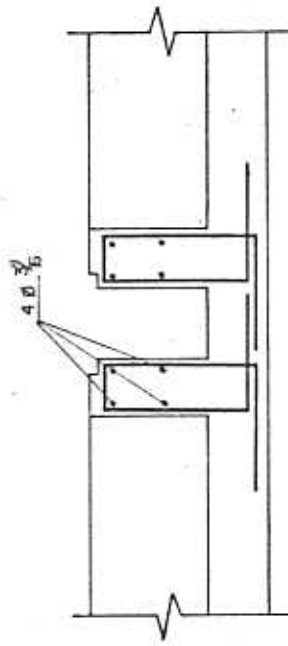


FIG. 71 - SISTEMA DE AERAÇÃO

COBERTURA DO SILO
TRELIÇA DE MADEIRA - VÃO 7 metros

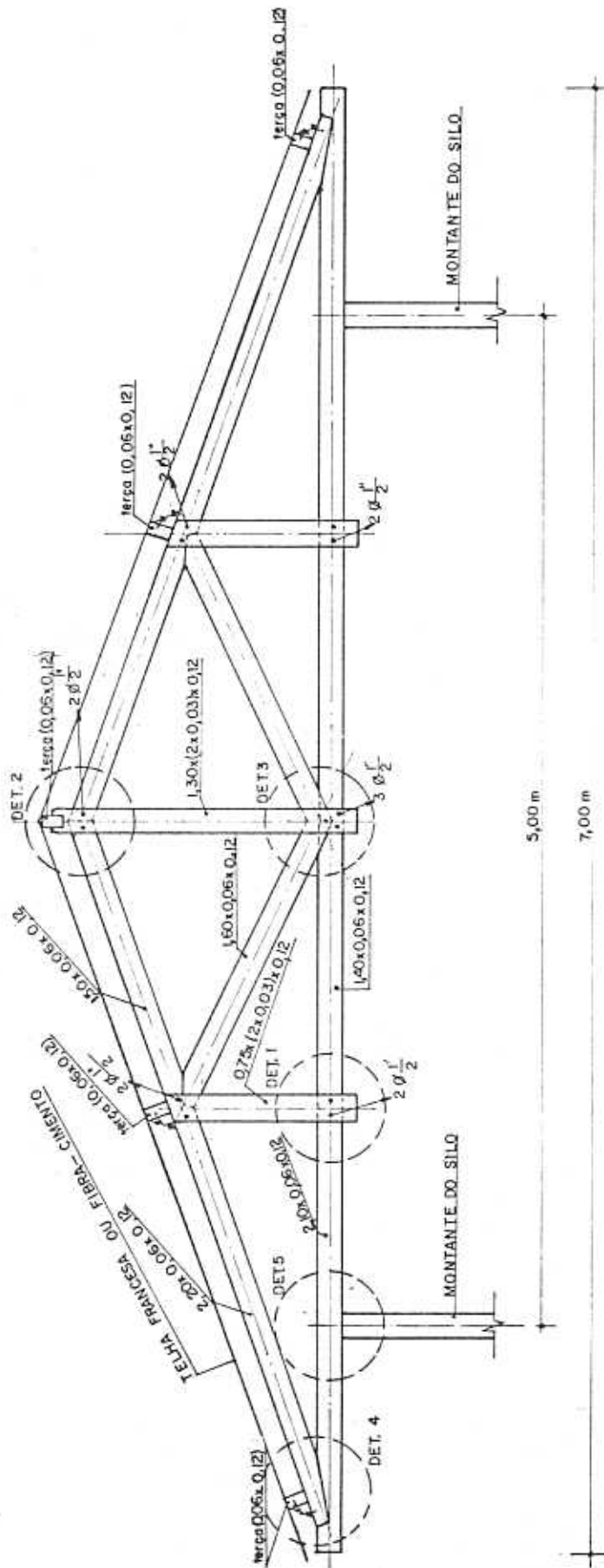
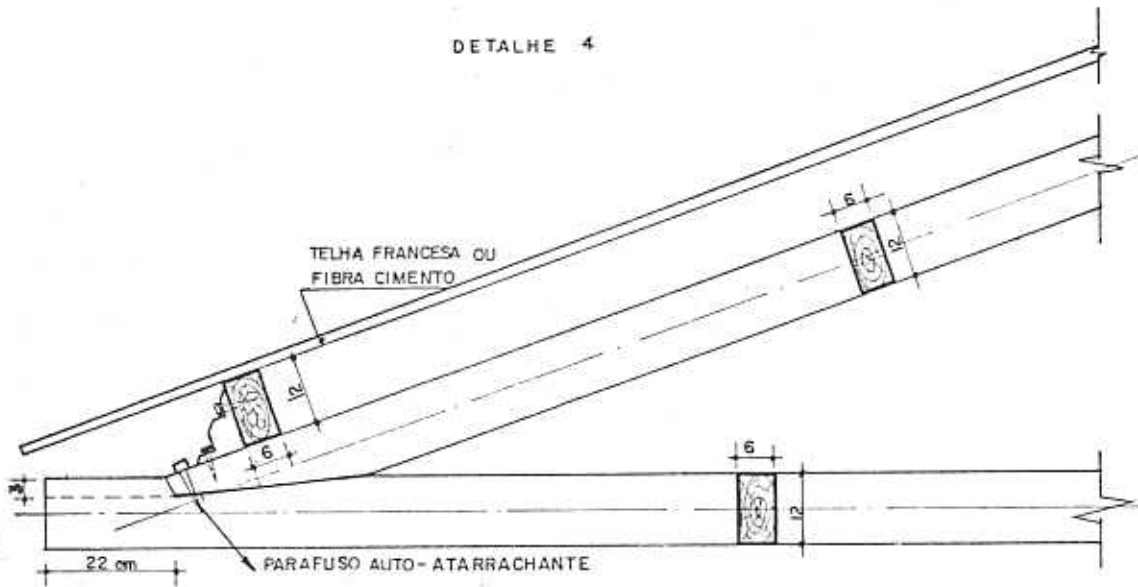


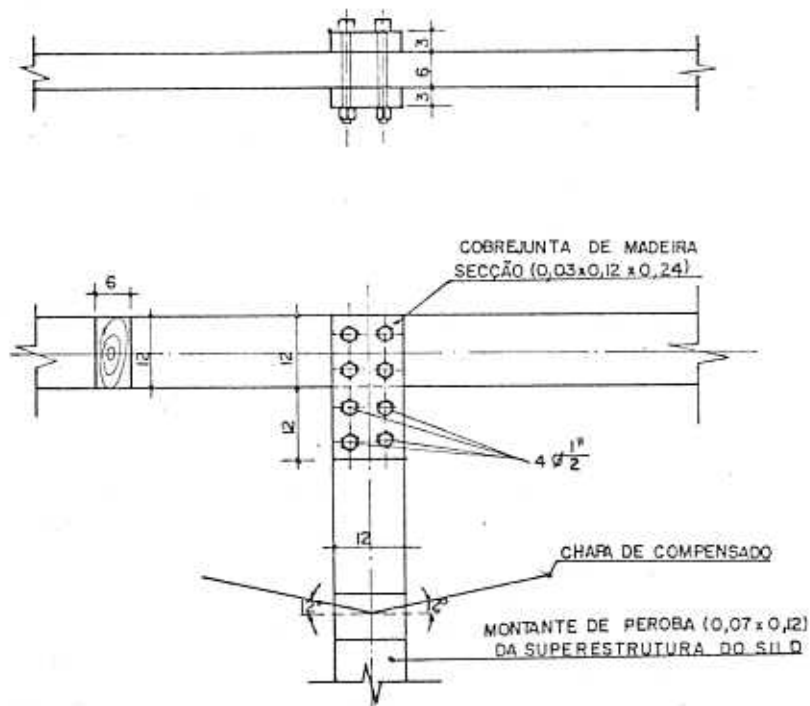
FIG. 72 - COBERTURA DO SILO

DETALHE 4

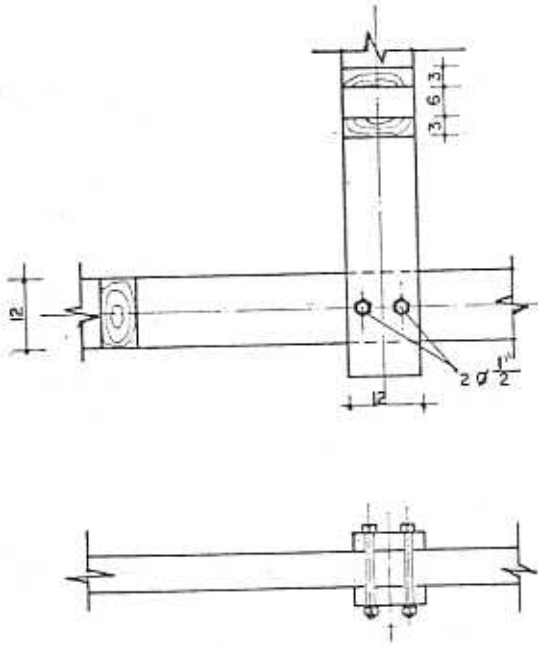


DETALHE 5

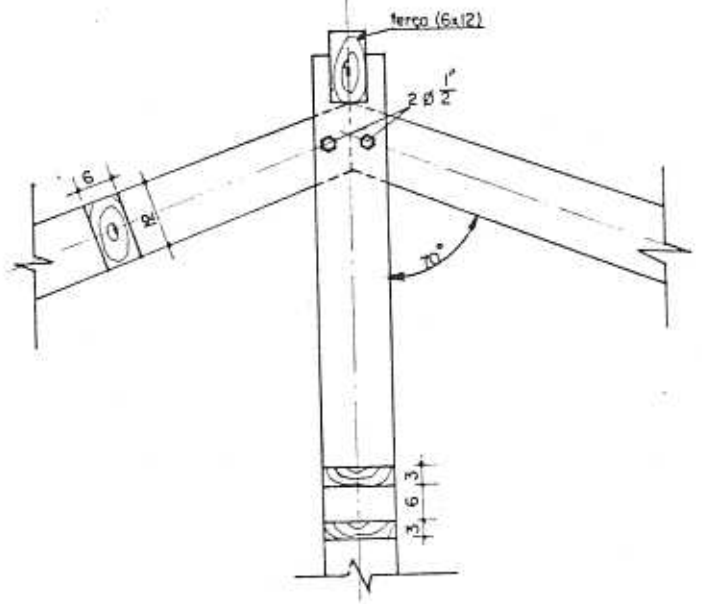
FIXAÇÃO DA TESOURA NO SILO



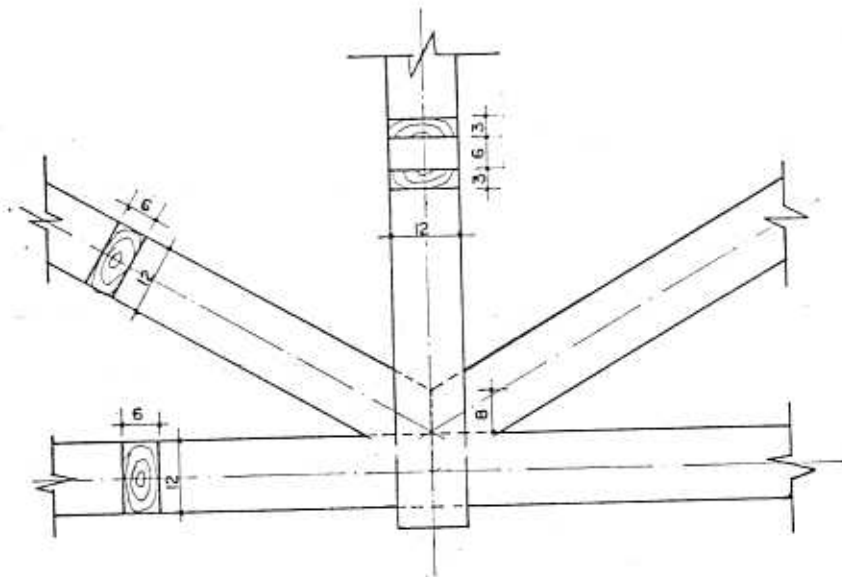
DETALHE 1



DETALHE 2



DETALHE 3



XV - CONCLUSÕES E PREVISÃO DE TRABALHOS POSTERIORES

Os silos, de um modo geral, são elementos de fundamental importância para o desenvolvimento da agricultura e economia brasileira.

Em particular, os silos de chapas de madeira compensada, ao nível de fazenda, são amplamente viáveis e significativamente econômicos, tanto no aspecto teórico como no construtivo.

Se o mesmo silo fosse projetado em concreto armado teria paredes de no mínimo, oito (8) centímetros de espessura. Supondo os custos, por metro cúbico, iguais para o concreto armado e a madeira, o silo de madeira custaria no mínimo quatro vezes menos.

Por outro lado, os silos metálicos são inconvenientes devido a elevada temperatura mantida em seu interior pela transmissão de calor das chapas para o cereal, ocasionando sua germinação. Além disso, o custo por metro quadrado de parede metálica é duas vezes maior que o de parede de madeira.

O estudo e a experimentação desenvolvidos para a realização do presente trabalho abriram, por outro lado, novas perspectivas para a concepção do projeto, deixando a certeza de que esse estudo deve prosseguir, considerando-se especificamente a utilização racional da madeira em sua construção.

Os ensaios foram realizados com a finalidade de confirmar as hipóteses da teoria de A. Reimbert quando aplicada a silos de madeira, visto que essa teoria foi suposta válida para todos os materiais.

Pretende-se examinar, em trabalho a seguir, com mais detalhes, as características das sementes produzidas no Brasil, a redistribuição dos esforços solicitantes nas paredes dos silos na descarga, enfim, aspectos gerais e específicos que possam influir no dimensionamento dos elementos estruturais do silo. Também será examinada a possibilidade da aplicação de compensado curvo ou de outras seções, mais adequadas à construção do silo com paredes maciças.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

1. Instituto de Pesquisas Tecnológicas - Tabelas de Resultados Obtidos para Madeiras Nacionais - Boletim nº 31 - 2.^a Edição - São Paulo, 1956.
2. Brotero, F.A. - Métodos Adotados no I.P.T. para o Estudo de Madeiras Nacionais, Boletim nº 31 - 2.^a edição - São Paulo - 1956.
3. Hellmeister, J.C. - Estruturas de Madeira - São Carlos, 1971.
4. Hellmeister, J.C. - Sobre a Determinação das Características Físicas da Madeira - São Carlos, 1973.
5. Deutsche Industrie Normen - Bemessung Ausführung Beschaffenheit DIN 11622 - August, 1973.
6. Carneiro, O. - Construções Rurais 5.^a edição - Piracicaba, 1953.
7. Reimbert, M.A. - Silos - 5.^a edição - Paris, 1956.
8. Guerrini, A. - Traitê de Béton Armê - Tome XI - Paris, 1969.
9. Flügge, W. - Stress in Shells - Second Edition - New York, 1973
10. Gilson, J.E. - Computer Analyses of Cylindrical Shells, London 1961.
11. Gilson, J.E. - The Design of Shell Roofs - Third Edition - London, 1968.
12. Langendonck, T - Resistência dos Materiais e Estática das Construções - São Paulo, 1961.
13. Cibrazem - 2º Seminário Nacional de Armazenagem - Brasília, 1971.
14. Cibrazem - Manual de Armazenagem na Fazenda - Brasília, 1975.

15. Brandão, F. - Manual do Armazenista - CASEMG, 1962.
16. CESA - Grãos: Beneficiamento e Armazenagem - Sulina, 1974.
17. Cibrazem - Pesquisa Básica para um Programa Global de Armazenagem Intermediária - Livro S/A.
18. Monro, H.A.V. - Manual de Fumigação Contra Insetos - FAO - nº 56, 1962.
19. Puzzi, D. - Conservação dos Grãos Armazenados, 1973.
20. Timoshenko, S.P. - Resistência dos Materiais - Vol. 1 e 2 - 1969

