

**UM ESTUDO DOS SILOS PARA AÇÚCAR:  
PROPRIEDADES FÍSICAS DO MATERIAL ARMAZENADO,  
RECOMENDAÇÕES CONSTRUTIVAS, NORMATIVAS E  
ANÁLISE ESTRUTURAL.**

IARA MARTA DA SILVA MANFRIM

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia  
de São Carlos da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia.

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Sérgio Persival B. Proença

São Carlos  
1994

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Ao meu filho SAMUEL, que nos deixou tão precocemente em 88, mas marcou profundamente minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao orientador Prof. Dr. Sérgio P. B. Proença pelas diretrizes seguras e permanente incentivo.

Ao Edmur, Saulo e Caio pela paciência, estímulo e incansável compreensão, me perdoando pelo tempo deles roubado.

À minha mãe que esteve sempre presente, iluminando-me e fortalecendo-me.

Ao meu pai quem sempre acreditou em seus filhos e não mediu esforços para nos ajudar a conseguir nossos objetivos.

Aos meus irmãos, à toda minha família aos meus amigos que acreditaram e ajudaram-me nos tempos difíceis.

À Usina São Martinho, na pessoa do Sr. Fábio Ribeiro Lotufo quem influenciou, de maneira expressiva, na decisão do tema deste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS .....	ii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	iii
RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	v
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 ARMAZENAMENTO DE AÇÚCAR CRISTAL A GRANEL .....	3
2.1 Condições prévias para o açúcar a ser armazenado .....	3
2.1.1 Higroscopicidade, umidade e temperatura .....	3
2.1.2 Secagem do açúcar cristal .....	5
A. Secador horizontal .....	6
B. Secador vertical .....	7
2.2 Condições para armazenamento de açúcar em silos .....	9
2.2.1 Sobre as possibilidades de armazenamento .....	9
A. Sistema sem ventilação e sem aquecimento .....	10
B. Sistema sem ventilação e com aquecimento .....	10
C. Sistema com ventilação e sem aquecimento .....	11
D. Sistema com ventilação e com aquecimento .....	12

2.2.2 Sobre o isolamento, aquecimento e ventilação de silos de açúcar .....	14
A. Isolamento e aquecimento da parede do silo .....	14
B. Variação da temperatura em silos ventilados e sem aquecimento .....	16
C. Quantidade de ar necessária para remover a umidade em células estabilizadoras e em silos ventilados com aquecimento .....	17
D. Sobre a maturação do açúcar em células estabilizadoras .....	18
E. Condições sobre a ventilação do açúcar no silo .....	20
2.4 Sobre a explosão do pó de açúcar .....	21
2.5 Sobre os sistemas existentes para carregamento e descarregamento dos silos .....	22
2.5.1 Silos com sistema de espalhamento localizado fora do espaço de armazenamento .....	23
2.5.2 Silos com sistema de espalhamento localizado dentro do espaço de armazenamento .....	24
3 SOBRE ESTIMATIVA DAS PRESSÕES E INDICAÇÕES NORMATIVAS .....	26
3.1 Generalidades .....	26
3.2 Recomendações normativas .....	27
3.2.1 Campo de aplicação da norma DIN 1055 .....	28
3.2.2 Considerações sobre os tipos de fluxo - DIN 1055 .....	29
3.2.3 Pressões nas paredes da célula .....	32
4 PROPRIEDADES FÍSICAS DO AÇÚCAR CRISTAL BRANCO .....	34
4.1 Densidade do material em função da consolidação .....	36

4.2 Granulometria .....	36
4.3 Critério de deslizamento (YL) .....	37
4.3.1 Determinação do YL .....	37
A. Ângulo de atrito interno .....	39
B. Ângulo de atrito interno equivalente .....	39
C. Tensão máxima de consolidação .....	39
D. Resistência ao deslizamento .....	39
4.4 Função fluxo .....	40
4.5 Determinação do critério de deslizamento com a parede (WYL) .....	41
4.6 Efeitos do tempo .....	42
4.6.1 Sobre a determinação do critério de deslizamento dependente do tempo (TYL) .....	43
4.6.2 Sobre a determinação do critério de deslizamento com a parede dependente do tempo (TWYL) .....	43
4.7 Fator fluxo (ff) .....	43
4.8 Resultados obtidos .....	44
 5 ASPECTOS DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL .....	 47
5.1 Silos em tubos cilíndricos .....	48
5.1.1 Distribuição de esforços internos devidos à pressão interna .....	48
5.1.1.1 Sobre as ações, esforços solicitantes e equações de equilíbrio ..	49
A. Sobre as ações .....	49
B. Esforços solicitantes .....	50
C. Equações de equilíbrio .....	53

5.1.2 Regime de membrana .....	54
5.1.3 Regime de flexão .....	56
5.1.4 Exemplos .....	57
A. Reservatório com base engastada .....	58
B. Silo com base engastada .....	59
5.2 Silo discretizado: análise por elementos finitos .....	60
5.2.1 Formulação geral do método dos elementos finitos .....	61
5.2.2 Estudo do silo como sólido axissimétrico .....	64
A. Primeiro exemplo: reservatório de água .....	66
B. Segundo exemplo: silo de açúcar .....	67
5.2.3 O "software" Lusas .....	67
5.2.4 Análise do silo como pórtico curvo .....	69
5.2.5 Exemplos .....	71
A. Primeiro exemplo: reservatório de água .....	72
B. Segundo exemplo: reservatório de água .....	73
C. Terceiro exemplo: silo de açúcar .....	74
D. Comparação entre $N_{\theta}$ e $M_y$ obtidos pela teoria das cascas cilíndricas delgadas e o "LUSAS" .....	75
6 CONCLUSÕES .....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	79

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 01.</b> Influência dos vários teores de substâncias redutoras sobre a umidade do açúcar x umidade relativa do ar .....	5
<b>Figura 02.</b> Esquema de um secador horizontal .....	7
<b>Figura 03.</b> Esquema de um secador vertical .....	9
<b>Figura 04.</b> Esquema de sistema com ventilação e com aquecimento ...	12
<b>Figura 05.</b> Perdas de calor e custos por tonelada de açúcar armazenado como função da capacidade do silo .....	15
<b>Figura 06.</b> Relação entre umidade do açúcar e tempo de acondicionamento para várias temperaturas .....	18
<b>Figura 07.</b> Modelo físico da superfície de um cristal de açúcar .....	19
<b>Figura 08.</b> Sistema de enchimento utilizado pela LUCKS e DDS ...	23
<b>Figura 09.</b> Esquema do manuseio do açúcar durante esvaziamento do silo .....	24
<b>Figura 10.</b> Sistema de enchimento e espalhamento utilizado pelos silos Weibull .....	25



<b>Figura 11.</b> Sistema ABR .....	25
<b>Figura 12.</b> Fases de um escoamento tipo funil .....	30
<b>Figura 13.</b> Tipos de fluxo-DIN1055 .....	31
<b>Figura 14.</b> Determinação gráfica do tipo de fluxo-DIN1055 .....	32
<b>Figura 15.</b> Distribuição das pressões no silo .....	33
<b>Figura 16.</b> Esquema do aparelho de cisalhamento de Jenike .....	35
<b>Figura 17.</b> Critério para deslizamento .....	38
<b>Figura 18.</b> Função fluxo .....	40
<b>Figura 19.</b> Critério de deslizamento e ângulo de atrito com a parede .	41
<b>Figura 20.</b> Corte longitudinal e transversal do silo com a distribuição de pressão considerada .....	50
<b>Figura 21.</b> Tensões atuantes no elemento genérico de cascas .....	51
<b>Figura 22a.</b> Esforços solicitantes de Membrana .....	52
<b>Figura 22b.</b> Esforços solicitantes de Flexão .....	52
<b>Figura 23.</b> Esforços solicitantes finais .....	53
<b>Figura 24.</b> Esquema de reservatório com topo livre e base articulada móvel .....	55
<b>Figura 25.</b> Esquema de reservatório/silo com distribuição de pressão linearizada .....	57

<b>Figura 26a.</b> Diagrama de para reservatório (casca) .....	58
<b>Figura 26b.</b> Diagrama de para reservatório (casca) .....	58
<b>Figura 27a.</b> Diagrama de para silo (casca) .....	59
<b>Figura 27b.</b> Diagrama de para silo (casca) .....	59
<b>Figura 28.</b> Silo discretizado em vigas e pilares .....	60
<b>Figura 29a.</b> Estrutura e carregamento axissimétricos .....	64
<b>Figura 29b.</b> Tensões atuantes no elemento axissimétrico .....	64
<b>Figura 30a e b.</b> Esforços internos solicitantes e (reservatório) .....	66
<b>Figura 31a e b.</b> Esforços internos solicitantes e (silo) .....	67
<b>Figura 32.</b> Deslocamentos nodais do elemento BS4 .....	69
<b>Figura 33.</b> Sistema de coordenadas local para o elemento BS4 .....	70
<b>Figura 34.</b> Malha utilizada para discretizar o silo/reservatório .....	71
<b>Figura 35a.</b> Diagrama de para reservatório (discretizado) .....	72
<b>Figura 35b.</b> Diagrama de para reservatório ( discretizado) .....	72
<b>Figura 36a.</b> Diagrama de para reservatório (discretizado) .....	73
<b>Figura 36b.</b> Diagrama de para reservatório (discretizado) .....	73
<b>Figura 37a.</b> Diagrama de para silo (discretizado) .....	74
<b>Figura 37b.</b> Diagrama de para silo (discretizado) .....	74

<b>Figura 38a. Comparação (reservatório) .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 38b. Comparação (reservatório) .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 39a. Comparação (silo) .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 39b. Comparação (silo) .....</b>	<b>76</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01.</b> Comparação dos sistemas básicos para armazenamento de açúcar .....	13
<b>Tabela 02.</b> Comparação entre os tipos de aquecimento .....	16
<b>Tabela 03.</b> Parâmetros do processo de estabilização em algumas usinas de açúcar .....	17
<b>Tabela 04.</b> Ângulo de atrito entre o material e a parede - DIN 11055 .....	29
<b>Tabela 05.</b> Níveis de carregamento empregados para a definição das densidades de equilíbrio e os valores de $\sigma e \tau$ .....	38
<b>Tabela 06.</b> Propriedades físicas do açúcar cristal branco (determinadas neste trabalho) .....	44
<b>Tabela 07.</b> Propriedades físicas do açúcar cristal branco (recomendadas pelas várias normas existentes) .....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT** - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACI** - American Institute of Steel Construction
- BMHB** - British Materials Handling Board
- CFBC** - Canadian Farm Building Code
- DIN** - Deutsches Institut für Normung
- FIP** - Fédération Internationale de la Précontrainte
- ISO** - International Organization for Standardization
- NBR** - Norma Brasileira Registrada
- NCSE** - National Committee on Structural Engineering
- SNBATI** - Syndicat National du Béton Armé et Techniques Industrialisées.

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	- área da seção transversal
D	- diâmetro
E	- módulo de elasticidade
H	- altura
K	- relação entre as pressões horizontais e verticais
M	- capacidade do silo
$M_i$	- momento fletor
$N_i$	- esforço normal
$Q_i$	- esforço cortante
$Q_z$	- quantidade de calor
R	- raio hidráulico da célula
TCH	- tonelada de cana por hora
U	- perímetro
$W_p$	- carga normal de consolidação
$W_s$	- carga normal empregada no teste de cisalhamento
$c_i$	- concentração da solução saturada na temperatura t
h	- espessura da parede
k	- coeficiente de transferência de calor
$p_i$	- pressão na direção i
r	- raio
$t_c$	- temperatura do açúcar no interior do silo

$t_{\infty}$	- temperatura do meio ambiente
$s$	- espessura da lâmina de solução saturada
$u, w$	- deslocamentos
$z$	- cota medida a partir do nível superior máximo do material ensilado
$\delta$	- ângulo de atrito interno equivalente
$\gamma$	- peso específico do material ensilado
$\varepsilon$	- deformação específica
$\theta$	- rotação
$\phi$	- ângulo de atrito interno do material ensilado
$\phi', \phi_w$	- ângulo de atrito entre o material e a parede da célula
$\mu'$	- coeficiente de atrito material/parede
$\nu$	- coeficiente de Poisson
$\rho_c$	- densidade do cristal
$\rho_i$	- densidade da solução de açúcar na temperatura $t$
$\sigma_i$	- tensão normal na direção $i$
$\tau_{ij}$	- tensão tangencial no plano $ij$

## RESUMO

**MANFRIM, I.M.S. Um estudo dos silos para açúcar: propriedades físicas do material armazenado, recomendações construtivas, normativas e análise estrutural.** 1994, São Carlos. p. 82 Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho trata dos silos para armazenamento a granel do açúcar cristal branco. Inicialmente abordam-se as condições ideais que o açúcar deve apresentar para uma adequada armazenagem. Em seguida descrevem-se os equipamentos que o silo deve apresentar para manter aquelas condições ideais.

Tendo-se em vista a análise estrutural comentam-se de um lado as recomendações da norma alemã para a estimativa das pressões nas paredes do silo. De outro lado, apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização do material, realizados em laboratório. Entre os parâmetros de interesse destacam-se: granulometria, densidade, ângulo de atrito interno, ângulo de atrito interno equivalente e ângulo de atrito entre o produto armazenado e o material da parede.

Apresenta-se finalmente uma análise estrutural simplificada, em primeira ordem, dos efeitos da pressão horizontal exercida pelo material ensilado sobre a parede do silo. Avalia-se a distribuição dos esforços solicitantes a partir do confronto entre uma análise discreta, tratando a estrutura como um conjunto de pilares e vigas curvas, e de outra contínua, na qual a estrutura da parede é tratada como casca.

Os procedimentos de cálculo considerados são oriundos da aplicação da teoria das cascas delgadas e do método dos elementos finitos.



## ABSTRACT

**MANFRIM, I.M.S. A study of the silos to sugar: physic properties of stored material, constructive and normative recommendations and structural analysis. 1994, São Carlos. p. 82 Dissertation (Master) - School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo.**

This work deals with the silos for barn storage of white crystal sugar. First, ideal conditions are reported about the sugar that must have suitable storage. Following this, the equipment which the silo must present to keep those ideal conditions, are related.

With regard to structural analysis the recommendations of some international norms are commented on the estimation of the pressure silo walls. In this particular item the results of the tests, done in laboratory, of material characterization are presented too. Among the references of interest are as follows: granulometry, density, angle of internal attrition, angle of equivalent internal attrition and angle of attrition between the stored product and the wall material.

Finally a simplified structural analysis, in first order, of the effects of radial pressure exercised by the material into the silo against the silo wall. The distribution of the demanded efforts since the confrontation between a tactful analysis, with attention to the structure as a set of pillars and curved beams, and to the other that is continued, in which the wall structure is considered as a shell.

The calculus proceedings considered are derived from the theory of application of the thin shells and of the methods of the finite elements.

## 1 INTRODUÇÃO

Embora a produção de açúcar ocorra apenas em determinado período, no Brasil de maio a novembro, o consumo é distribuído de maneira regular ao longo do ano. Portanto deve-se armazenar grandes quantidades para garantir o abastecimento nas épocas não produtivas.

Há dois sistemas para armazenar o açúcar cristal: em sacos ou a granel em silos.

No primeiro sistema, o açúcar é colocado em sacos logo após ser produzido e, em seguida, depositado em armazéns. Este procedimento requer, de um lado, grande mão de obra para ensacar o açúcar, empilhar e desempilhar os sacos e, de outro, grande quantidade de material para empacotamento. Segundo GILJAM (1970), armazenar açúcar em sacos de 50Kg requer, em média, 1.25 homem-hora por tonelada do produto, enquanto que, em silos apenas 0.1185 homem-hora por tonelada do produto, correspondendo a menos que 10% do valor anterior.

A técnica para armazenamento a granel desenvolveu-se ao longo dos tempos, mas foi a partir da década de 50 que os silos para armazenamento de açúcar a granel tiveram uma rápida evolução, particularmente no que se refere à concepção estrutural em correspondência ao aumento da capacidade de armazenagem.

Paralelamente surgiram problemas relacionados à questão do armazenamento por longo período. Problemas como aglomeração do açúcar decorrente da transição entre os estados de equilíbrio, variação do teor de umidade durante o período, acondicionamento e controle médio de armazenagem, equipamento de carga e descarga; passaram a exigir, para sua solução, estudos nos campos da físico-química, engenharia química, engenharia mecânica, engenharia civil, etc, portanto, além do alcance da tecnologia convencional então empregada.

A evolução deste sistema de armazenamento conduziu-nos a diferentes sistemas estruturais em casca cilíndrica fechada, em pórticos curvos, elevados ou apoiados no solo. As diretrizes para o projeto destes tipos de estruturas estão indicadas em diversas normas internacionais, as quais destacam como aspecto de grande importância a determinação das pressões nas paredes do silo devidas ao

material armazenado. Nesse particular, a caracterização das propriedades físicas como densidade, granulometria, ângulo de atrito interno, ângulo de atrito interno equivalente, ângulo de atrito entre o produto armazenado e o material da parede, deve ser suficientemente criteriosa.

O objetivo deste trabalho é apresentar, de um lado, estudos sobre o problema de armazenamento do açúcar e, de outro, definir diretrizes básicas para a análise e projeto dos silos. Destacam-se entre outros aspectos:

a) determinação das propriedades físicas e de fluxo do açúcar, objetivando uma estimativa das pressões por parte do produto sobre a estrutura do silo;

b) análise das principais recomendações normativas existentes;

c) cálculo da distribuição dos esforços internos solicitantes ao longo dos elementos estruturais, baseando-se em indicações de normas e estabelecendo-se comparações com o estudo da teoria das Cascas Delgadas de Revolução e de programas baseados no Método dos Elementos Finitos.

No capítulo 2 são abordadas as condições que, de um lado, o açúcar deve apresentar para uma adequada armazenagem e, de outro lado, que o silo deve apresentar para que não haja alterações nas características do material que possam levá-lo à deterioração.

Para o projeto estrutural é necessário o conhecimento das pressões na parede sob condições estáticas (de carregamento) e dinâmicas (de descarga), bem como outras cargas que possam atuar na estrutura. Abordam-se no capítulo 3 apenas as pressões estáticas e apresentam-se em forma de resumo as recomendações da norma DIN-1055 relativas à estimativa das pressões e caracterização do tipo de fluxo.

No capítulo 4 trata-se da determinação das propriedades físicas de interesse e dos critérios de deslizamento do produto.

No capítulo 5 é apresentada uma análise estrutural simplificada (efeito do carregamento radial) de silos apoiados no solo.

Os métodos de cálculo utilizados são: "Teoria das cascas cilíndricas delgadas", e códigos de cálculo baseados no método dos elementos finitos.

Finalmente, no capítulo 6, apresentam-se as conclusões e as propostas para continuidade da pesquisa.

## **2 ARMAZENAMENTO DE AÇÚCAR CRISTAL A GRANEL**

O silo deve oferecer condições para que não surjam alterações nas características do material armazenado que possam levá-lo à deterioração. Entre tais condições deve-se garantir:

- a. Ambiente hermeticamente fechado;
- b. Controle do nível de maturação do açúcar;
- c. Manutenção do equilíbrio entre o açúcar e o ar;
- d. Isolamento térmico;
- e. Operações automáticas;
- f. Controle do risco de explosões.

Por sua vez, para o seu adequado armazenamento o açúcar deve preencher uma série de exigências.

Neste ítem, abordam-se, inicialmente, as condições que o açúcar deve apresentar para adequada armazenagem e, posteriormente, comentam-se as condições que devem ser proporcionadas pelo silo.

### **2.1 CONDIÇÕES PRÉVIAS PARA O AÇÚCAR A SER ARMAZENADO**

#### **2.1.1 HIGROSCOPICIDADE, UMIDADE E TEMPERATURA**

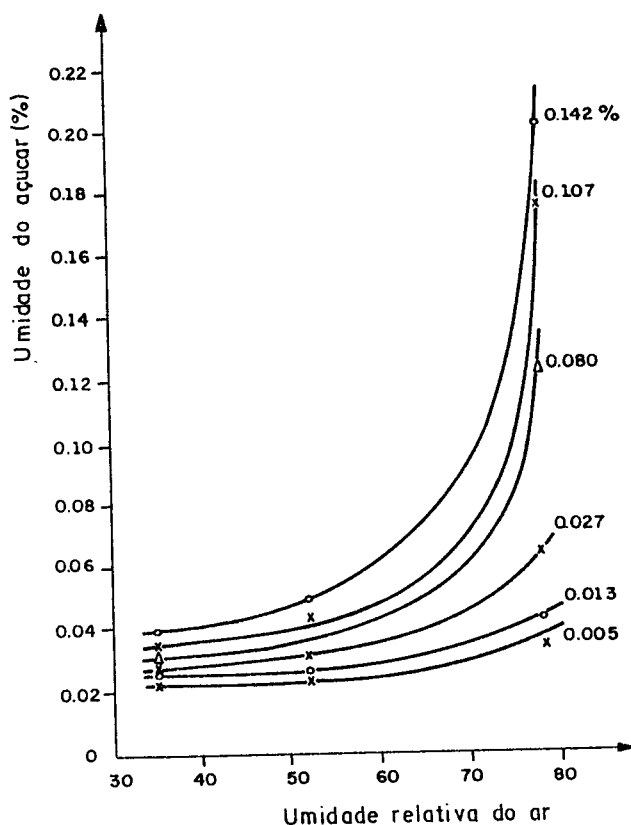
O açúcar ao ser armazenado por um longo período em silos, deve cumprir certas condições que são decisivas. A principal condição é o teor de substâncias redutoras, o qual não deve exceder 0.01% do açúcar a ser armazenado. A

presença de quantidades maiores acarretam um aumento substancial na higroscopicidade do açúcar. A figura 1, ilustra a influência dos teores de substâncias reductoras sobre a relação umidade relativa do ar - umidade do açúcar. Um teor suficientemente baixo de substâncias reductoras no açúcar é conseguido por um processamento tecnológico nas usinas.

Outra condição importante para o armazenamento de açúcar é a umidade já presente no mesmo. Um grande número de autores estudam os efeitos da umidade do açúcar sobre a mudança da qualidade do mesmo, durante um longo período de armazenagem. A partir de tais estudos, procuram determinar a umidade relativa de equilíbrio do ar, abaixo da qual o armazenamento se torna possível, isto é, sem alteração na qualidade do material. Trabalhos iniciais sugerem que o valor limite superior para a umidade relativa de equilíbrio esteja situado entre 60-75%. Porém, estudos mais recentes, MIKUS E BUDICEK (1982), propõem para o açúcar cristal branco, contendo 99,9% de material seco, uma umidade relativa de equilíbrio máxima de 60%.

Como pode ser notado na figura 1, a situação ideal para armazenamento do açúcar apresenta uma umidade relativa do ar de 35% e uma umidade do açúcar de 0,027%, observado o limite de 0.01% para o teor de substâncias reductoras.

Uma terceira condição básica para o armazenamento decorre da interdependência entre as diferenças máximas de temperatura entre dois pontos, pois, o aumento dessas diferenças induz à aglomeração dos cristais do açúcar armazenado. As condições de temperatura no interior de todo o silo devem manter-se numa faixa entre 25 e 35° C, independente de quaisquer condições climáticas. E deve-se notar ainda que, quanto mais puro o açúcar, mais fácil é a sua deterioração.



**Fig.1** Influência dos vários teores de substâncias redutoras sobre a umidade do açúcar x umidade relativa do ar. (Mikus and Budicek)

### 2.1.2 SECAGEM DO AÇÚCAR CRISTAL

Segundo DELGADO, A.A. (1977), o açúcar, ao sair das centrífugas possui um alto teor de umidade, entre 0.5 a 2.0%, e está a uma temperatura elevada, entre 56 a 60° C, não apresentando, portanto, boas condições para ser armazenado. É necessário que se faça, previamente uma secagem e resfriamento.

A secagem do açúcar tem por objetivo baixar seu teor de umidade, impedindo, assim, o desenvolvimento de microrganismos, que poderiam causar deterioração com conseqüente perda de sacarose. O resfriamento, por sua vez, evita que ocorra o "empedramento" do açúcar, o que provocaria sérios problemas quanto ao manuseio, tanto no transporte como nos sistemas de armazenagem.

Na secagem do açúcar cristal, o ar limpo é usado para a remoção da umidade. Os equipamentos de secagem podem ser divididos de acordo com a sua posição de trabalho; podendo ser: horizontais ou verticais.

## A. SECADOR HORIZONTAL

Este tipo de secador é constituído por um tambor rotativo de chapa, que gira sobre mancais, instalado com seu eixo ligeiramente inclinado em relação ao plano horizontal; segundo DELGADO A.A. (1977), esta inclinação é de 5% aproximadamente. Em determinados projetos, o tambor é dividido em duas partes: a de secagem e a de resfriamento. O conjunto de secagem compõe-se por um transportador de alimentação, aquecedor de ar, exaustor, ciclone e o separador de pó, conforme a figura 2. Completam o conjunto as peneiras classificadoras e os recipientes que recebem o açúcar seco e mantêm continuidade no processo de ensacamento. As peneiras, quando necessárias, classificam o açúcar pelo tamanho dos grãos, ou então, removem torrões.

Para remoção da água contida no açúcar proveniente das turbinas, insufla-se ar quente no interior do tambor. O aquecimento do ar é feito através de um radiador que, auxiliado por um ventilador, insufla o ar aquecido em corrente com o açúcar. O pó de açúcar arrastado com o ar, deve ser recuperado.

Soldadas internamente ao tambor existem pás ou "antepassos dentados" que servem para levantar o açúcar e deixá-lo cair, permitindo um melhor contato com o ar quente.

As dimensões do secador horizontal, variam de acordo com sua capacidade, mas pode-se relacionar alguns parâmetros gerais como:

.comprimento	6.0 - 16.0 m
.diâmetro	0.9 - 2.5 m
.proporção açúcar/ar	1/3
.capacidade (sacos/dia)	800 a 15.000
.número de rotações	4 a 10 rpm

Como dado complementar a superfície para secagem do açúcar nos aparelhos horizontais pode ser estimada pelos valores:

a. Secador horizontal simples

0.44 a 0.85 m<sup>2</sup> /saco/hora

0.66 a 1.27 m<sup>2</sup> /TCH

b. Secador-resfriador horizontal

0.17 a 0.24 m<sup>2</sup> /saco/hora

0.25 a 0.36 m<sup>2</sup> /TCH

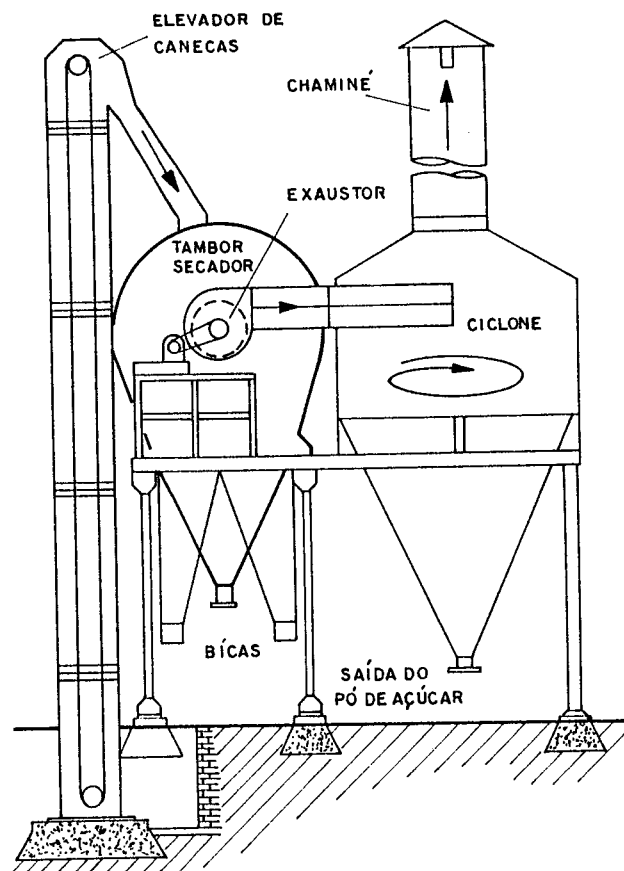


Fig.2 Esquema de um secador horizontal (Delgado A.A.)

## B. SECADOR VERTICAL

São encontrados vários tipos de secadores verticais. De uma maneira geral são constituídos por uma estrutura cilíndrica possuindo internamente uma série de bandejas fixas com dois diâmetros diferentes, dispostas alternadamente. Sobre elas trabalham lentamente braços rotativos, que dão movimento ao açúcar, conduzindo-o de cima para baixo, de uma bandeja para outra, sendo que as bandejas maiores recebem o açúcar na sua periferia e as menores no seu centro, até a sua remoção pelo fundo do aparelho.

Baseado nessa concepção o secador vertical tipo Jenkins, por exemplo, é composto de um cilindro vertical, que possui uma série de compartimentos cônicos abertos no centro, por onde atravessa um eixo que suporta uma série de bandejas de diâmetros menores, conforme figura 3. A velocidade de rotação do eixo é de 2 a 4 rpm.

Neste caso, o açúcar úmido entra no disco superior, que ao girar, lança-o para a periferia, resultando num processo em cascata de disco a disco



orientado pelos compartimentos cônicos laterais. O ar quente que entra pela base em direção ao topo, em contra-corrente com o açúcar que desce, promove um forte contato entre eles. O ar utilizado arrasta consigo pó de açúcar recuperado no coletor de pó. O açúcar seco sai pelo fundo e é conduzido por um transportador.

As dimensões dos secadores verticais variam com os diferentes modelos, mas de maneira geral tem-se:

.capacidade	4.000 a 14.000 sacos/dia
.diâmetro(D)	5.0 a 8.0 m
.altura(H)	7.0 a 12.0 m
.relação H/D	1.4 a 1.5

O volume necessário para secagem do açúcar nos secadores verticais está por volta de  $0.94$  a  $1.08 \text{ m}^3$  /(saco de açúcar/hora) ou  $1.41$  a  $1.62 \text{ m}^3$  /TCH.

O pó de açúcar produzido pode se tornar muito perigoso pois, em contato com o ar há a formação de uma mistura altamente explosiva. Por isso é recomendável a aspiração do pó que fica no ambiente, evitando a sua dispersão.

Maiores informações sobre o procedimento de secagem, em secadores verticais e horizontais, podem ser encontradas em DELGADO, A.A. (1977).

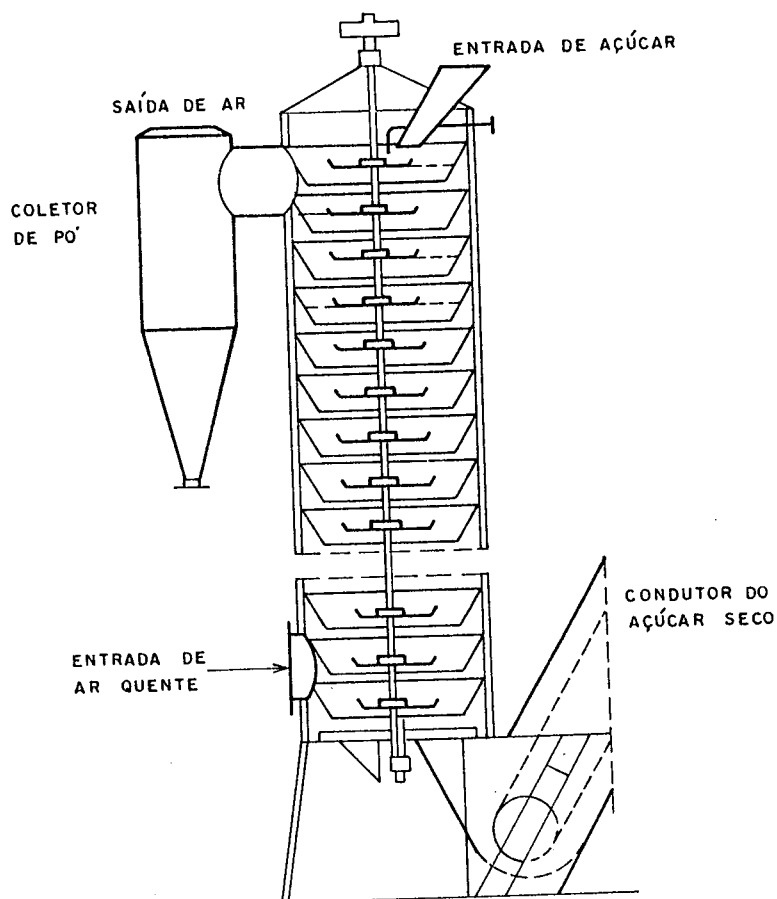


Fig.3 Esquema de um secador vertical (Delgado, A.A.).

## 2.2 CONDIÇÕES PARA ARMAZENAMENTO DE AÇÚCAR EM SILOS

### 2.2.1 SOBRE AS POSSIBILIDADES DE ARMAZENAMENTO

Objetivando manter as condições prévias do açúcar descritas no item anterior, existem quatro possibilidades básicas para armazená-lo em silos:

- a. armazenamento de açúcar em sistemas sem ventilação e sem aquecimento;
- b. armazenamento de açúcar em sistemas sem ventilação e com aquecimento;

c. armazenamento de açúcar em sistemas com ventilação e sem aquecimento;

d. armazenamento de açúcar em sistemas com ventilação e com aquecimento.

Obviamente que os sistemas analisados são utilizados em países de clima frio, que já empregam o armazenamento de açúcar a granel.

### A. SISTEMA SEM VENTILAÇÃO E SEM AQUECIMENTO

Este sistema de armazenamento é temporário e funciona como um estabilizador do açúcar a ser armazenado, ou seja, um local onde o açúcar adquirirá os requisitos necessários à armazenagem por longo período.

Deve ser hermeticamente fechado para que haja a manutenção da umidade, e possuir ainda um isolamento suficiente para garantir uma temperatura interna constante.

Por outro lado, este sistema também pode funcionar como um pulmão de distribuição do açúcar a granel, que não será armazenado por longo período.

### B. SISTEMA SEM VENTILAÇÃO E COM AQUECIMENTO

Este sistema de armazenamento é utilizado tanto para pequenas como para grandes quantidades de açúcar. Existem alguns exemplos na Alemanha, eles são projetados de tal forma que o ar aquecido é impelido para o interior do mesmo, a fim de manter as condições necessárias à armazenagem.

O material deve ser previamente submetido a uma fase de estabilização parcial.

O sistema de aquecimento tem a finalidade de repor perdas de calor devidas a deficiências no sistema de isolamento. O sistema de aquecimento pode ser constituído por uma manta com água quente ou uma manta elétrica.

Aqui também exige-se um silo hermeticamente isolado, a fim de manter-se a umidade relativa de equilíbrio.

### C. SISTEMA COM VENTILAÇÃO E SEM AQUECIMENTO

Grandes quantidades de açúcar podem ser armazenadas com este sistema. Existem exemplos na Alemanha, Polônia e França onde está construído um silo com capacidade para 70.000 toneladas.

A ventilação é feita de baixo para cima, com ar filtrado, para prevenir a penetração de sujeira e impedir o crescimento de bactérias. A função da ventilação é dupla: remoção de umidade e manutenção das perdas térmicas.

A quantidade de ar necessária para a compensação das perdas de aquecimento periférico é muitas vezes maior que a necessária para a remoção de umidade. O ar deve ser cuidadosamente condicionado para evitar a transferência de calor e correspondente resfriamento do açúcar e do ar que estão na parte superior do silo. A pressão de ar necessária aumenta com o aumento da altura da camada de açúcar.

### D. SISTEMA COM VENTILAÇÃO E COM AQUECIMENTO

Este conceito de armazenagem é utilizado em silos construídos, por exemplo, pela ABY Company (Bélgica). O maior silo está na Refinaria de Tirlemontoise S.A. (Wanze) - Bélgica, e possui uma capacidade para 80.000 toneladas.

Em silos desta natureza o açúcar é contínua ou periodicamente ventilado durante a armazenagem, empregando-se apenas a quantidade de ar necessária para evitar o acúmulo de umidade que possa ocorrer no espaço intercrystalino.

As perdas de calor são compensadas pelo aquecimento da manta.

O que determina as características umidade e temperatura do ar a ser insuflado é basicamente a máxima diferença de temperaturas no silo. Por exemplo, quanto maior a diferença de temperatura, menor deverá ser a umidade relativa do ar de entrada, para que o mesmo possa servir como agente removedor da umidade intercrystalina.

A figura 4 mostra um esquema desse sistema de armazenamento.

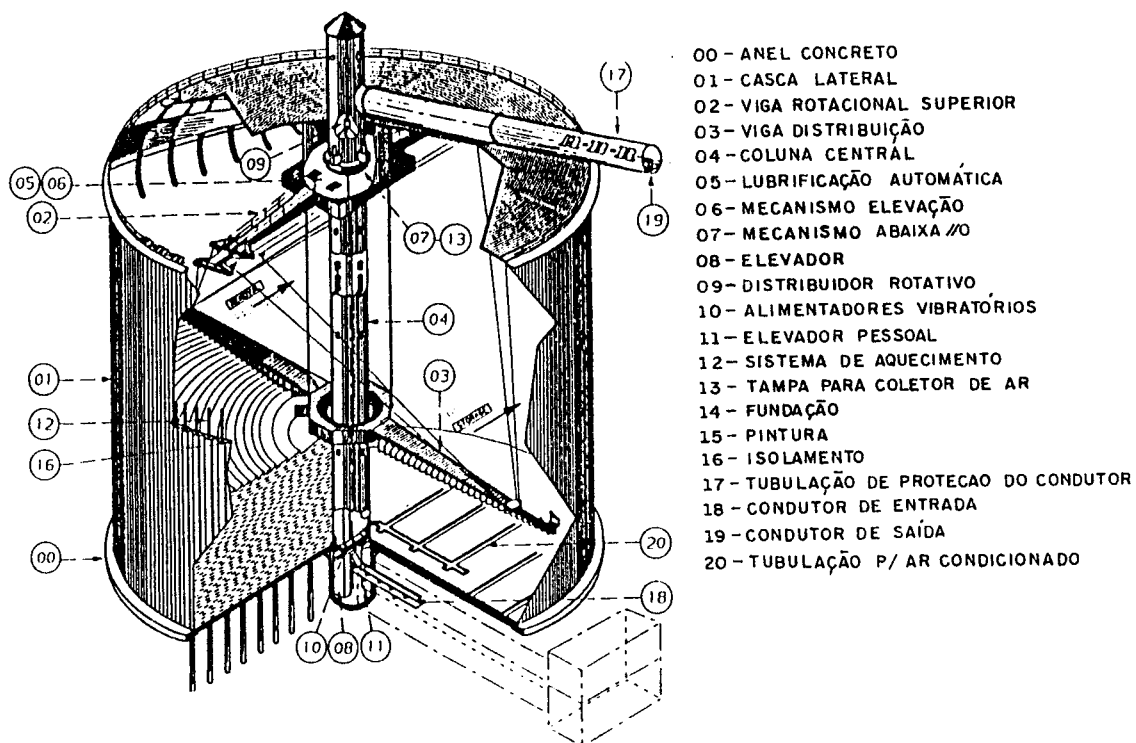


Fig. 4 Esquema de sistema com ventilação e com aquecimento

As vantagens e limitações de cada sistema analisado, A,B,C e D, estão resumidas na tabela 01. Frequentemente são utilizadas diferentes combinações dos sistemas, principalmente em silos celulares, quando algumas das células servem para estabilização e outras para armazenagem.

15

Tabela 01 Comparação dos sistemas básicos  
para armazenamento de açúcar

PROCESSO FÍSICO	VANTAGENS	LIMITAÇÕES
<b>A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Não é necessário controle dos parâmetros do ar,</li> <li>-Economia de energia pela baixa temperatura de armazenamento,</li> <li>-Baixa pressão do ar condicionado para a estabilização do açúcar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Necessário estabilização com ar extremamente seco,</li> <li>-Necessário perfeito isolamento de calor,</li> <li>-Dificuldade técnica para montar e obter silo estanque,</li> <li>-Problemas com expedição de açúcar em meses de verão com altas umidades do ar.</li> </ul>
<b>B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Não apresenta problemas com a expedição durante o verão,</li> <li>-Pode ser usada menor pressão de ar condicionado para a estabilização.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Necessário usar sistema de estabilização,</li> <li>-Manutenção constante da temperatura pelo aquecimento do fundo e da tampa,</li> <li>-Apenas armazenamento de açúcar com qualidade uniforme.</li> </ul>
<b>C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Não apresenta problemas com a expedição durante o verão,</li> <li>-Não exige sistema estabilizante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Necessita de controle seguro da temperatura e umidade do ar,</li> <li>-Necessidade de aumento da pressão do ar condicionado,</li> <li>-Necessidade de perfeito isolamento do fundo e cobertura,</li> <li>-Necessidade de remoção periódica da sujeira,</li> <li>-Alto custo operacional,</li> <li>-Armazenamento de açúcar de alta qualidade.</li> </ul>
<b>D</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Não apresenta problemas com a expedição durante o verão,</li> <li>-Não exige sistema estabilizante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Necessidade de controle seguro da temperatura e umidade do ar,</li> <li>-Necessidade de aumento da pressão do ar condicionado,</li> <li>-Necessidade da remoção periódica de possíveis sujeiras,</li> <li>-Alto custo operacional.</li> </ul>

## 2.2.2 SOBRE O ISOLAMENTO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DE SILOS DE AÇÚCAR

### A. ISOLAMENTO E AQUECIMENTO DA PAREDE DO SILO

Com relação ao isolamento, deve-se ter espessuras entre 40 e 80mm de acordo com as necessidades físicas e condições climáticas do local de operação do silo. O material isolante pode ser mineral, feltro ou plástico.

No que se refere ao aquecimento, para a reposição das perdas de calor, a quantidade de calor necessária por tonelada de açúcar armazenado, é uma função da capacidade do silo cilíndrico, como ilustra o gráfico da figura 5.

Contudo, aquele gráfico foi elaborado para uma temperatura de armazenagem de 20° C e uma temperatura de 7° C para o meio ambiente, além de uma relação altura/diâmetro unitária e um coeficiente de transferência de calor de 0.4 W/m<sup>2</sup> K. Apenas como informação complementar a função que define situações mais gerais é dada por:

$$\frac{Q_z}{M} = \frac{5}{4} \cdot \pi \cdot K \cdot (t_c - t_\infty) \cdot \frac{D^2}{M} \quad (1)$$

onde:

$M$  = capacidade do silo (t)

$D$  = diâmetro do silo

$K$  = coeficiente de transferência de calor através da parede

$t_c$  = temperatura do açúcar no interior do silo

$t_\infty$  = temperatura do meio ambiente

O coeficiente geral de transferência de calor através da parede  $K$ , está entre 0.35 e 0.60 W/m<sup>2</sup> K.

Na figura 5, apresenta-se também, um índice relativo a custos aproximados por tonelada de açúcar armazenada como uma função da capacidade do silo. Como se pode observar, ambas as funções têm um ponto mínimo para silos com capacidade em torno de 60.000 toneladas, enquanto que para um silo com capacidade menor, por exemplo de 10.000 toneladas, o índice de custos por tonelada de açúcar armazenado praticamente dobra. Acrescenta-se a essa informação o fato do custo operacional dos silos de 10.000 toneladas ser em torno de 60% maior que o dos silos de 60.000 toneladas, MIKUS E BUDICEK (1986).

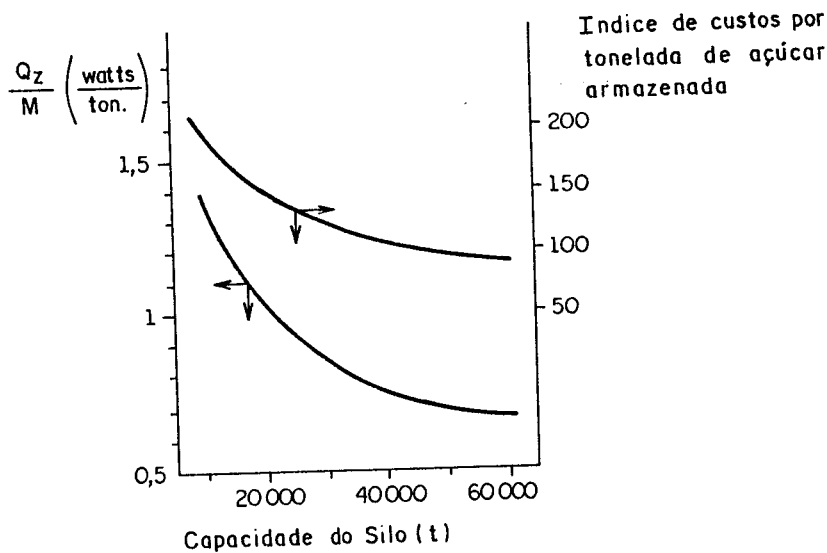


Fig. 5 Perdas de calor e custos por tonelada de açúcar armazenado como uma função da capacidade do silo para  $H/D = 1$ ,  $k = 0,4 Wm^{-1} K^{-1}$ ,  $t_c = 20^\circ C$  e  $t_\infty = 7^\circ C$

As perdas de calor podem ser compensadas tanto pelo aquecimento da manta nas paredes do silo, como pela injeção de ar aquecido através das camadas de açúcar. No caso das paredes, o procedimento mais frequente emprega ar quente que flui através de canais no sentido de baixo para cima retornando por canais localizados fora do silo ou dentro da "haste" central.

A quantidade de ar que circula é função da perda de calor na parede e da máxima diferença de temperatura entre o ar aquecido e o ar de retorno, sendo esta diferença da ordem de  $20^\circ C$ .

As equações gerais para circulação de ar aquecido e detalhes adicionais relativos, por exemplo, à pressão necessária para circulação, encontram-se na referência MIKUS, O. (1986).

A água quente também pode ser utilizada para aquecimento da parede do silo. Tem-se, por exemplo, os silos metálicos da ABY Company, onde a parede é equipada com uma rede de tubos verticais com diâmetro de  $1/2"$  e espaçamento de  $0,75m$ . A quantidade de circulação de água é obtida de maneira análoga à quantidade de ar, destacando-se que neste caso as taxas de circulação podem ser substancialmente reduzidas e o consumo de energia é da ordem de 2 a 5% de  $Q_z$ .

Um terceiro sistema de aquecimento utilizado é o elétrico. Tal sistema é mais comum em silos com cobertura de aço e com pequenas capacidades. Os condutores de aquecimento estão localizados entre a cobertura e o isolamento de calor, com uma distância aproximada de  $0,5m$ , e a carga específica máxima é de  $15W/m$ . Contudo, como o açúcar possui uma baixa condutividade térmica, mesmo à noite a taxa de energia elétrica gasta é muito alta.



A tabela 02 mostra uma comparação entre os três sistemas de aquecimento para silos.

Tabela 02 Comparação dos tipos básicos de Aquecimento

Tipo Básico de Aquecimento	VANTAGENS	DESVANTAGENS
<b>AR</b>	-O calor perdido pode ser utilizado; -Condições climáticas acima do espaço do açúcar podem ser controladas.	-Não pode ser mantida constante a temperatura na parede do silo; -Canais são de metal e silo pode ser de concreto, -10 a 30% a mais de força para fluir ar pelos canais, -Considerável inércia térmica durante regulagem.
<b>ÁGUA</b>	-O calor perdido pode ser utilizado	-Não pode ser mantida constante a temperatura em toda a parede do silo, -Risco de corrosão, -2 a 5% a mais de força necessária para a circulação de água.
<b>RESISTÊNCIA</b>	-Aquecimento uniforme da parede, -Baixo custo de gastos; -Fácil controle.	-O calor perdido não pode ser utilizado, -Alto custo operacional, -Depende de condutores externos.

## B. VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM SILOS VENTILADOS SEM AQUECIMENTO

No projeto de silos sem aquecimento, é essencial o conhecimento das zonas de distribuição da temperatura do açúcar armazenado, em função dos parâmetros individuais de operação.

Com base no modelo matemático da transferência de calor dado por HIMMELBLAU, D.M. e BISCHOFF, K.B. (1968), a quantidade de ar necessária

para a ventilação da camada de açúcar pode ser determinada de tal forma que as diferenças de temperatura no silo não excedam o valor máximo permitido (20° C).

### C. QUANTIDADE DE AR NECESSÁRIA PARA REMOVER A UMIDADE EM CÉLULAS ESTABILIZADORAS E EM SILOS VENTILADOS COM AQUECIMENTO

Segundo BUDICEK E MIKUS (1986), a diferença entre uma célula de estabilização e um silo ventilado é que a primeira serve a um curto período de armazenagem e o silo é empregado para um tempo longo.

A título de ilustração a tabela 03, mostra um estudo da quantidade de ar aplicada em depósitos ventilados, servindo para a estabilização do açúcar. A umidade do ar de entrada não é mencionada, contudo pode ser tomada como variando entre 20 e 40%.

Tabela 03 Parâmetros do processo de estabilização em algumas usinas de açúcar

USINAS	CAPACIDADE DO SILO (ton.)	AR ASPIRADO (m <sup>3</sup> /h)	QUANT.ESPEC. (m <sup>3</sup> /h.ton.)
Crockett(New)	260	1583	6.08
Crockett(Old)	48	1083	22.57
Canadá a.Cominion	900	1083	1.20
Imperial	125	5250	42.00
Liverpool	900	4750	5.25
Plaistow	45	333	7.40
Thames	42	333	7.92
Southdown	165	1750	10.60
Supreme	175	333	1.90
Gramercy	2250	4160	1.85

## D. SOBRE A MATURAÇÃO DO AÇÚCAR EM CÉLULAS ESTABILIZADORAS

As dimensões das células estabilizadoras são uma função da produção do açúcar cristal e, do tempo gasto para a estabilização do mesmo, que pode variar de 25 a 72 horas.

Estabilização do açúcar, chamado frequentemente de "amadurecimento" ou "condicionamento", é um tratamento objetivando a redução da umidade, procurando um equilíbrio entre a umidade superficial do açúcar e o meio ambiente, antes do armazenamento por um longo período.

CHAPMAN (1971) considera a taxa de redução da umidade do açúcar, durante o processo de estabilização, como sendo uma função do tempo e da temperatura do mesmo, como pode ser visto na figura 6.

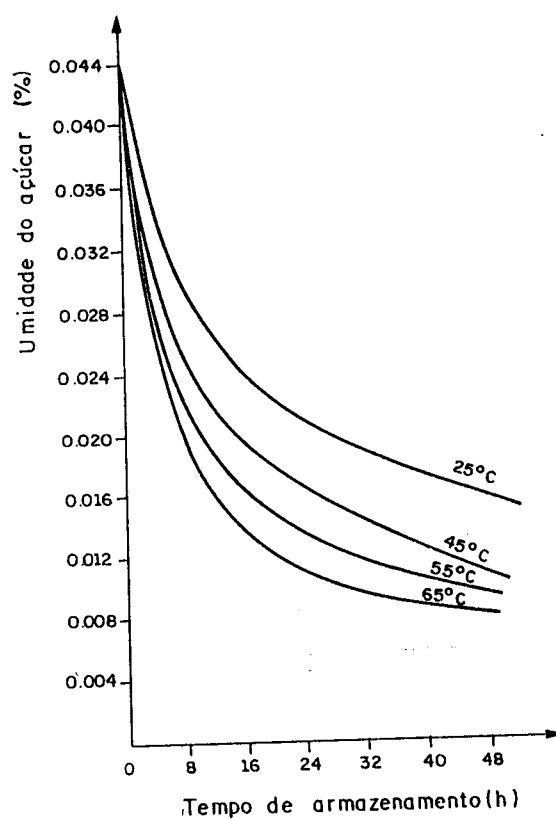


Fig. 6 Relação entre a umidade do açúcar e tempo de acondicionamento para várias temperaturas.

Um esquema representativo do processo físico de estabilização de um cristal de açúcar está indicado na figura 7.

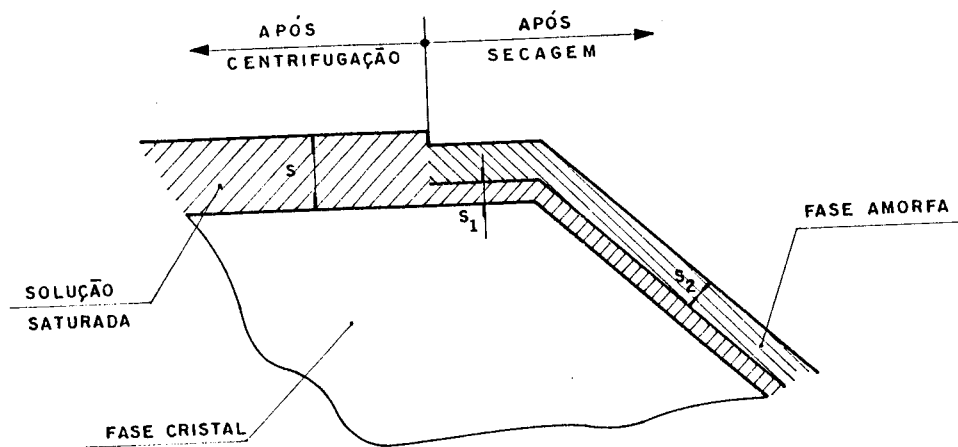


Fig. 7 Modelo físico da superfície de um cristal de açúcar

Por razões de simplicidade, admite-se um cristal regular e isento de umidade no seu interior. Após a centrifugação, toda a umidade fica concentrada sobre a superfície, na forma de uma película líquida de solução saturada  $s$ . A temperatura do açúcar após a centrifugação é aproximadamente de  $70^{\circ}\text{C}$  e para açúcares finos a umidade chega a 2%.

A espessura da lâmina de solução saturada  $s$  sobre a superfície é dada pela fórmula seguinte:

$$s = \frac{\rho_c \cdot 0.02}{(100 - c_1)} \cdot \frac{1}{\rho_1 a} \cdot 100$$

onde:

$\rho_c$  = densidade do cristal

$\rho_1$  = densidade da solução de açúcar na temp.  $t$

$c_1$  = concentração da solução saturada na temp.  $t$

(2)

No secador, a umidade é removida rapidamente da superfície da película, onde se desenvolve uma solução supersaturada de sólidos, tendo o caráter amorfo da sucrose ( $s_1$  na figura 7). Esta camada retarda a remoção da umidade da película líquida original  $s_1$ . Admitindo-se ter uma superfície super seca e, conhecendo-se a umidade do açúcar após a secagem (em torno de 0.1%), pode-se determinar a espessura das camadas  $s_1$  e  $s_2$  de maneira análoga à indicada para  $s$ , utilizando-se parâmetros adequados à cada camada.

Em resumo, durante a estabilização ocorre:

- a) Formação da camada  $s_2$  a partir da cristalização da sucrose sobre a estrutura cristalina principal e migração de suas moléculas através da camada  $s_1$ ,
- b) Migração de umidade através da camada  $s_2$  em direção ao espaço intercrystalino,
- c) Retirada da umidade acumulada no espaço intercrystalino através do ar de aspiração.

Verifica-se que o processo de estabilização é controlado primeiramente pela cristalização e formação da camada  $s_2$ , seguido da difusão interna através da mesma. Consequentemente, um aumento excessivo da quantidade de ar aspirado não intensificará o processo como um todo.

## E. CONSIDERAÇÕES SOBRE A VENTILAÇÃO DO AÇÚCAR NO SILO

A ventilação do açúcar no silo durante o período de armazenagem consome muita energia. Para uma correta definição sobre o sistema de ventilação, devem ser consideradas as características geométricas individuais do silo, a resistência aerodinâmica do açúcar armazenado e também o tipo dos elementos ou aberturas para entrada de ar nas camadas de açúcar.

Segundo ZAVORONKOV (1952), existem três tipos de fluxo na camada granular: molecular, laminar e turbulento.

Quanto aos elementos alimentadores de ar para o interior dos silos a bibliografia faz poucas indicações, contudo os seguintes requisitos são estipulados:

- a. as linhas alimentadoras de ar não devem ter um contato direto com o açúcar;
- b. o fluxo de ar para aspiração não deve ser turbulento;
- c. elementos de geometria simples e de baixo custo;
- d. fácil limpeza;
- e. não deve haver risco de entupimento.

A distribuição dos elementos de ventilação é igualmente importante para que o ar não se distribua através de canais formados na camada de açúcar e, portanto, se evite um escoamento turbulento.

Os projetos de ventilação, que obedecem aos requisitos mencionados são variados.

Em alguns casos a ventilação no silo se dá através de canais periféricos, objetivando a relocação das perdas de calor próximas à parede. Em outros, a ventilação se dá com distribuição uniforme por toda a área do fundo.

## 2.4 SOBRE A EXPLOSÃO DO PÓ DE AÇÚCAR

O pó de açúcar surge em decorrência dos atritos mecânicos dos cristais, nas linhas de produção; principalmente nas centrífugas, secadores, manuseio durante a classificação e linhas de transporte. O pó também está presente no local de armazenamento, suspenso no ar ou assentado sobre a superfície.

Uma propriedade muito desfavorável do pó é a sua explosividade. WASMUND (1977), desenvolveu uma pesquisa sobre as causas que levam à explosão e mostrou que em 29.2% dos casos o início se dá através de uma faísca surgida de um impacto ou atrito.

A oxidação do açúcar pode ser comparada a um processo de combustão lenta, onde o calor é removido logo após a sua formação. Quando ocorre uma perturbação neste processo e o calor não é removido, a temperatura do açúcar se eleva muito rapidamente e atinge o ponto de ignição espontânea.

Três condições devem ser satisfeitas simultaneamente para que a explosão ocorra:

a. Concentração adequada do pó de açúcar, sendo o valor limite inferior médio, segundo SCHNEIDER (1969), igual a  $10\text{g/m}^3$ , para partículas em torno de 0.07mm;

b. Ocorrência de faísca pelo atrito do material ou algum equipamento;

c. Quantidade adequada de oxigênio para a queima.

Deve-se tomar precauções para evitar o risco de explosão:

a. Utilizando-se equipamentos de carga e descarga adequados evitando-se, de um lado, alturas de queda elevadas do açúcar na armazenagem e de outro lado, escapes laterais das correias transportadoras;

b. Eliminando-se fontes de ignição internas ao silo, isolando-se todas as fontes de corrente, válvulas de ação rápida, válvulas de fechamento rotacional, etc. Aterrar o silo e os equipamentos para minimizar o risco de descarga elétrica. Selecionar e dar atenção especial à localização dos equipamentos elétricos. Controlar cuidadosamente o trabalho com soldas;

c. Prevendo aberturas superiores, com áreas previamente dimensionadas, para que caso ocorra a explosão, permita-se a saída do pó não

queimado e dos produtos da explosão, limitando-se a pressão a níveis que o silo resista sem ruptura;

d. Limitando-se a quantidade de oxigênio no interior do silo a um nível insuficiente para alimentar a combustão, substituindo-o pelo nitrogênio ou outro gás inerte.

## **2.5 SOBRE OS SISTEMAS EXISTENTES PARA CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO DOS SILOS**

Os silos de baixa capacidade, largamente utilizados em usinas de açúcar ou indústrias alimentícias em geral, são operados sem equipamentos mecânicos especiais. O enchimento é realizado através de uma abertura central, localizada na parte superior da unidade de armazenamento, e o descarregamento se dá nos silos elevados através de uma abertura situada no fundo de um funil cônico (tremonha), com paredes inclinadas em torno de 50 a 60°. O diâmetro máximo para este tipo de silo está em torno de 12m; contudo, projetou-se um silo de concreto protendido com capacidade para 7.000m<sup>3</sup> e diâmetro em torno de 30m com funil de descarregamento (tremonha) cônico, com apenas uma abertura de descarga central (companhia BINISHELs-Milão). Este conceito de projeto pode ser utilizado sem restrições, desde que os requisitos para um armazenamento adequado do açúcar por um longo período sejam observados.

Uma desvantagem do carregamento através de um tubo central é a formação de um cone de enchimento da carga, o que limita a capacidade de armazenamento do silo. Para acabar com esta limitação, é utilizado um sistema de espalhamento rotacional, que auxilia também na operação de esvaziamento. Em silos cilíndricos de grande capacidade, com diâmetros acima de 12m, são instalados sistemas de enchimento uniforme tanto externos (LUCKS-DDS) como internos (ABR-Weibull) ao espaço de armazenamento.

## 2.5.1 SILOS COM SISTEMA DE ESPALHAMENTO LOCALIZADO FORA DO ESPAÇO DE ARMAZENAMENTO

Este sistema foi projetado pela Company FMW(1981) e instalado em silos tipo LUCKS. Uma de suas vantagens é a simplicidade pois é equipado apenas com uma ponte de emergência, outras vantagens são a diminuição do risco da contaminação do açúcar por bactérias e do risco de explosão. O acesso humano no espaço de armazenamento é praticamente impossível.

O sistema de abastecimento para esse tipo de silo é a presença de um condutor radial que possui em sua extremidade concêntrica dois condutores giratórios possibilitando um enchimento uniforme e de maneira automática. Na figura 8, mostra-se um esquema desse sistema utilizado em um silo com capacidade para 30.000 toneladas, instalado na usina de JULICH (Alemanha).

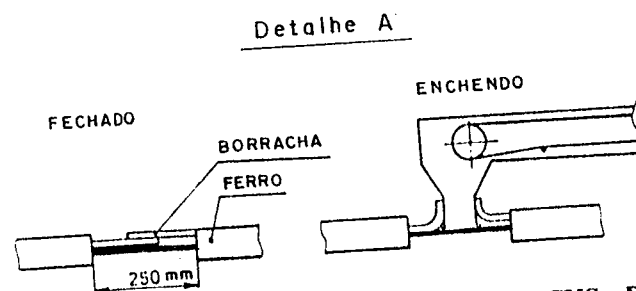
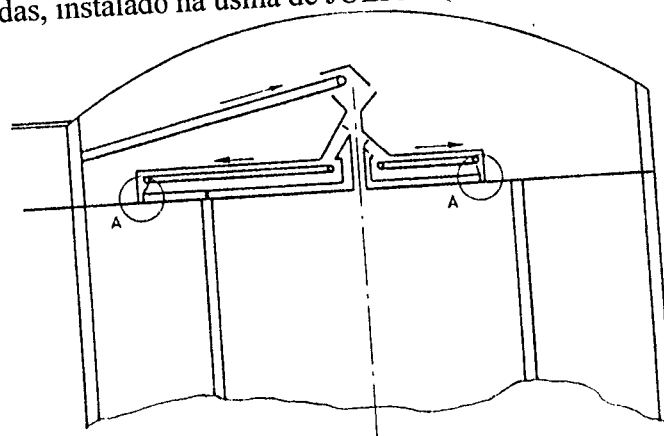
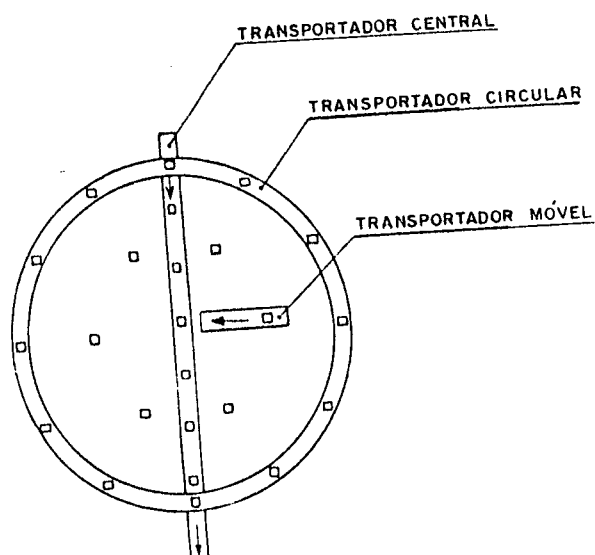


Fig.08. Sistema de enchimento utilizado pela LUCKS e DDS

O descarregamento é realizado através de um número de aberturas que se ligam a um sistema de conversores, localizado na parte inferior do silo. É constituído por um conversor anular para o descarregamento do espaço externo, por um conversor móvel que transporta o açúcar de uma "boca" de saída para outro conversor, localizado diametralmente, que leva o açúcar para a área externa ao silo. Na figura 9, tem-se o diagrama do manuseio do açúcar durante o descarregamento.





**Fig. 9** Esquema do manuseio do açúcar durante esvaziamento do silo (Mikus and Budicek).

Silos construídos em usinas de açúcar na Alemanha têm sistema similar, sendo que no fundo existe um canal, ou cones de saída com ângulo inferior a  $45^\circ$ . Num dos maiores silos de açúcar do mundo, na usina de CONNANTRE (França), com capacidade para 70.000 t, o carregamento é realizado através de um conversor giratório localizado no espaço superior do silo. O conversor pode ser conectado automaticamente a qualquer uma das aberturas de carregamento, sendo similar ao do tipo LUCKS-DDS, descrito anteriormente.

### 2.5.2 SILOS COM SISTEMA DE ESPALHAMENTO LOCALIZADO DENTRO DO ESPAÇO DE ARMAZENAMENTO

Entre as vantagens deste sistema destacam-se a possibilidade de obtenção de um efetivo nível horizontal para o material ensilado e o descarregamento através de uma abertura central ou de um número de aberturas no corredor abaixo do silo.

Como desvantagens mencionam-se a necessidade de manutenção, a frequente entrada de operadores no espaço de armazenamento e ainda a abrasão dos cristais de açúcar quando em contato com o equipamento de espalhamento mecânico.

A fração do pó de açúcar desenvolvido durante o espalhamento chega a 1%.

Em silos de grande capacidade são largamente utilizados dois tipos de espalhamentos mecânicos:

a. Uma ponte rolante com açúcar suspenso, desenvolvido pela Weibull Company, figura 10.

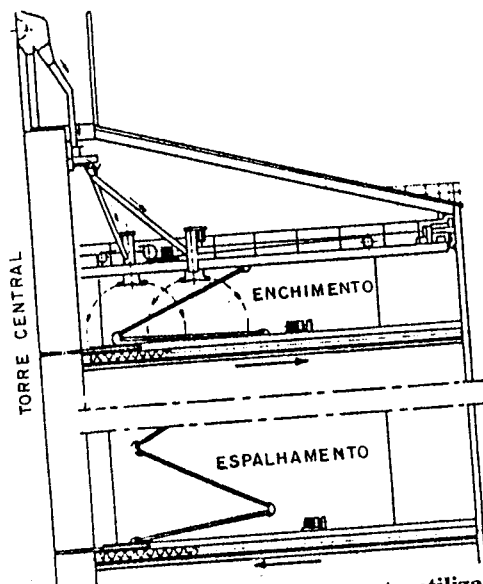


Fig. 10 Sistema de enchimento/espalhamento utilizados pelos silos Weibull

b. Um espalhador tipo "rodo", utilizado em silos da ABR Company figura 11.

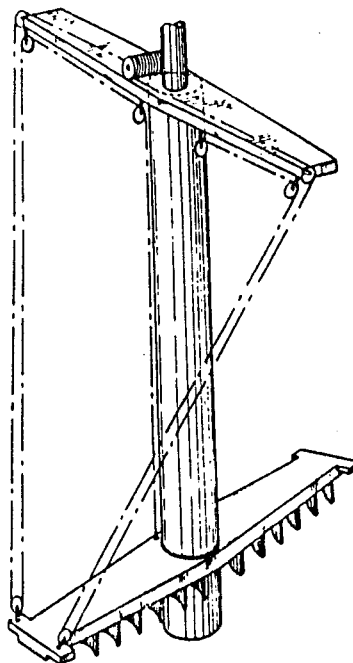


Fig.11 Sistema de enchimento/espalhamento utilizados pelos silos ABR

### 3 SOBRE ESTIMATIVA DAS PRESSÕES E INDICAÇÕES NORMATIVAS

#### 3.1 GENERALIDADES

A estimativa das pressões nas paredes dos silos é ainda objeto de estudos. Existe uma variedade muito grande de aproximações para a sua distribuição, que variam entre as de natureza estática (silo carregado) e dinâmica (silo em operação). Sabe-se, por exemplo, que sob condições de operação as pressões exercidas são diretamente relacionadas ao tipo de fluxo do material, principalmente nos silos elevados em fase de descarga.

Entretanto além do tipo de fluxo há muitas outras variáveis que influenciam na distribuição e natureza das cargas, tais como:

- método de carregamento,
- vazão de carregamento,
- segregação no carregamento,
- variações nas propriedades de fluxo do material armazenado,
- tendência do material armazenado de sobreconsolidar,
- imperfeições geométricas de construção,
- temperatura e variações de temperatura,
- umidade.

Não existe um modelo analítico para as pressões nas paredes do silo que inclua todos os parâmetros relevantes. Os modelos existentes podem somente levar em consideração um limitado número de fatores sob restritas condições.

No desenvolvimento da maioria das normas, muito pouca atenção tem sido dada para o exame estatístico ou probabilístico das pressões. Acredita-se que seja porque os pesquisadores têm geralmente abordado a envoltória dos máximos valores observados, e com isso não é fácil determinar a probabilidade de sua ocorrência, CALIL JR, C. (1990).

21

Analisando-se os procedimentos mais utilizados para a determinação das pressões, verifica-se que é dada pouca atenção para variáveis mencionadas anteriormente, acrescentando-se ainda uma série de hipóteses simplificadoras, como por exemplo:

- as propriedades do material armazenado são invariáveis,
- as estruturas são perfeitamente rígidas e livres de imperfeições,
- o carregamento não induz a impacto significativo sobre a estrutura e a sobreconsolidação imediata do material,
- o material ensilado é homogêneo, isotrópico e incompressível.

Tem-se verificado, por outro lado, que estas simplificações conduzem

à estimativas conservativas para as pressões.

As normas analisadas apresentam muitas diferenças em suas recomendações, desde os valores dos parâmetros dos produtos a armazenar até os valores dos coeficientes de sobrepressão para considerar o efeito dinâmico da descarga do produto armazenado.

### 3.2 RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

No que se refere à estimativa das pressões em silos as normas internacionais existentes são basicamente apoiadas em duas teorias: a **teoria de Janssen (1895)**, para cargas iniciais ou de natureza estática e a **teoria de Jenike (1968,1977)** para cargas decorrentes do fluxo de material, em silos com fluxo de massa ou fluxo de funil.

Entre as mais importantes normas internacionais podem ser citadas: a Francesa SNBATI(1975), a Canadense CFBC(1983), a Americana ACI313 (1983), a Inglesa BMHB(1985), a Australiana NCSE(1986), a Alemã DIN1055 (1987) e a Européia FIP/ISO.

Neste trabalho optou-se pela norma alemã, pois a mesma foi recentemente reformulada com base em observações realizadas em silos reais.

A seguir passam a ser comentadas as principais recomendações relativas à estimativa das pressões e caracterização do tipo de fluxo.

### 3.2.1 CAMPO DE APLICAÇÃO DA NORMA DIN1055

Relacionam-se, inicialmente, os símbolos utilizados pela norma:

A = Área da seção transversal

U = Perímetro

R = Raio hidráulico da célula (=A/U)

H = Altura da célula

D = Diâmetro da seção circular ou menor dimensão da  
seção retangular

z = Cota medida a partir do nível superior máximo do  
material ensilado

$\phi$  = Ângulo de atrito interno do material ensilado

$\phi'$  = Ângulo de atrito entre o material e a parede da  
célula

$\mu' = \tan \phi'$

K = Relação entre as pressões horizontais e verticais  
(=  $1.2(1 - \sin \phi)$ )

$\gamma$  = Peso específico do material ensilado

Esta norma se aplica aos casos de células verticais, cilíndricas ou prismáticas, com fundo horizontal ou em forma de tremonha, com relação altura/diâmetro maior que 0.8 e podendo as paredes ser constituídas por qualquer material estrutural.

Os materiais ensilados considerados pela norma são os granulares ou pulverulentos nos quais a coesão é pequena em relação ao atrito interno. A norma não aborda os materiais fortemente coesivos e materiais granulares que incham com o aumento do teor de umidade, o que pode levar a cargas superiores às determinadas.

Quanto às propriedades físicas do produto ensilado, peso específico e ângulo de atrito interno do material, são fornecidos por outra norma alemã: DEUTSCH INDUSTRIE NORMEN. O ângulo de atrito entre o material e a parede é dado como uma fração do ângulo de atrito interno, como mostra a tabela 4. Para materiais com grãos de diâmetro médio entre 0.06 a 0.20mm, estima-se o valor daquele ângulo através de uma interpolação linear. Caso o ângulo de atrito interno sofra alterações com a variação de umidade, o mesmo deve ser avaliado experimentalmente. No caso do açúcar cristal branco optou-se pela determinação em laboratório das propriedades físicas, conforme será comentado adiante.

Tabela 4. Ângulo de atrito entre o material e a parede - DIN 1055

MATERIAL ENSILADO	Ângulo de atrito entre o produto e a parede $\phi'$	
	(graus)	
	Na carga ( $\phi'_c$ )	Na descarga ( $\phi'_d$ )
Material granular com diâmetro médio do grão maior que 2 mm	0.75 $\phi$	0.60 $\phi$
Material pulverulento com diâmetro médio do grão menor que 0.06mm	1.00 $\phi$	1.00 $\phi$

O coeficiente entre as pressões horizontal e vertical (K) é suposto constante ao longo da altura da célula. Na situação de carregamento seu valor corresponde, aproximadamente, ao coeficiente de empuxo em repouso, admitido igual a  $K_c = 0.50$ . Na fase de descarregamento adota-se  $K_d = 1.00$ , representando o fato de que, segundo a norma, as pressões horizontal e vertical são aproximadamente iguais nesta fase.

### 3.2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS TIPOS DE FLUXO

A norma alemã classifica os tipos de fluxo ou escoamento de material em: fluxo global ou de massa e fluxo em funil.

O comportamento do material ensilado durante a descarga obedece às características de um dos dois tipos de escoamento ou então de um tipo híbrido.

No escoamento tipo funil, que pode ocorrer nos silos com ou sem tremonha, ao abrir-se o orifício de saída apenas os grãos logo acima deste entram em movimento, formando-se um canal denominado canal de escoamento. Durante a descarga, a região ocupada pelo canal cresce em dimensão avançando na direção da superfície livre do material e, às vezes, aumentando simultaneamente de diâmetro. Obviamente os grãos só começam a se movimentar quando são atingidos pelos limites do canal de escoamento, enquanto que os grãos fora deste canal permanecem inertes. Alcançada a superfície livre do material, o topo do canal alarga-se e o

escoamento prossegue com os grãos da superfície livre deslizando sobre a camada de grãos imediatamente inferior. Na figura 12 ilustram-se as várias etapas de um escoamento tipo funil.

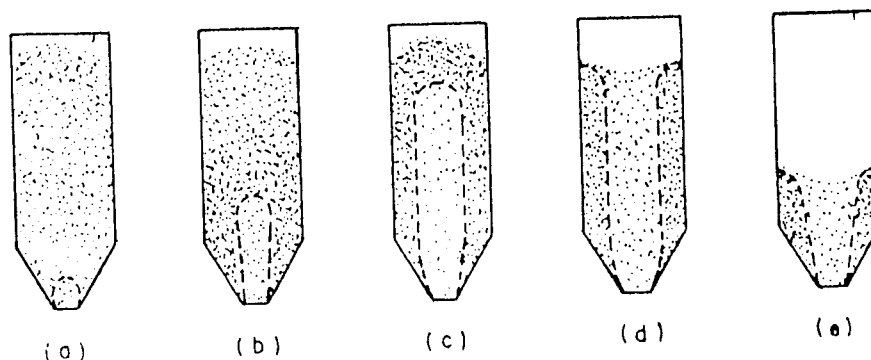


Fig. 12 Fases de um escoamento tipo funil

No escoamento de massa, característico dos silos com tremonha, todo ou quase todo o material dentro do silo entra em movimento ao abrir-se o orifício de saída. Neste tipo de escoamento, os limites laterais do canal de escoamento coincidem com as paredes do silo.

A superfície livre neste tipo de escoamento, logo após a abertura da saída, tem um movimento descendente sem modificar sua forma ou, às vezes, apresenta uma pequena depressão, mantendo sua forma até atingir uma certa distância do fundo do silo, quando então a superfície livre parece desmoronar.

Pode-se ter uma descarga que apresente características dos dois tipos de escoamento, um caso híbrido. Nesta situação o material tem no início um escoamento do tipo funil e, após o canal de escoamento atingir a superfície livre, tem-se uma movimentação de toda a massa ensilada, ocorrendo a partir de então um escoamento tipo massa. LENCZNER (1963), observou tal tipo de comportamento quando realizou experiências com areia compacta.

Cada tipo de escoamento apresenta vantagens e desvantagens. Como regra geral, o fluxo de massa deve ser escolhido se a vazão de descarga é controlada, não ocorrendo grandes flutuações. O fluxo do tipo funil apresenta taxa de descarga muito variável com o tempo, podendo o material ser descarregado por meio de jorros intermitentes devido à formação e posterior colapso de abóbodas no interior do canal de escoamento.

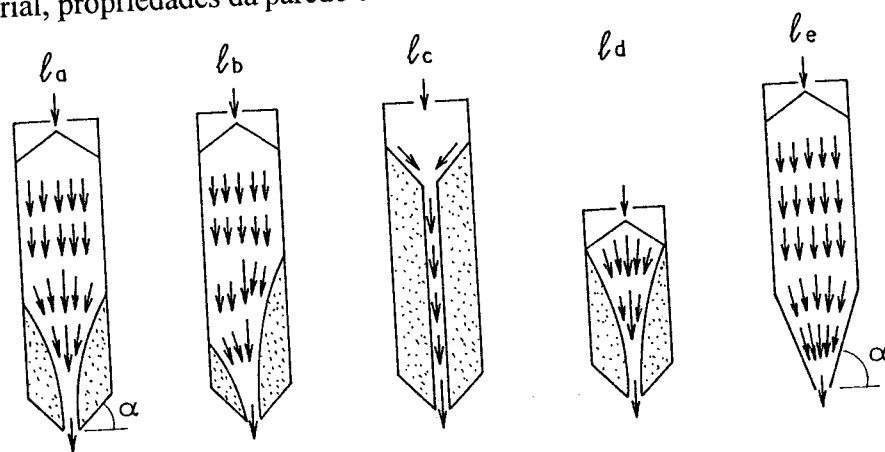
A segregação das partículas é pequena no fluxo massa, contrária ao fluxo tipo funil onde há pouca mistura quando o material escoo dentro do canal. No início do escoamento existe uma predominância de partículas pequenas e após o canal alcançar a superfície livre as partículas maiores começam a entrar em movimento.

Para materiais que se deterioram com o tempo o escoamento tipo funil é desaconselhável, principalmente no caso do silo ser raramente esvaziado pois a deterioração tende a ocorrer nas partículas que ficam nas regiões inertes mais profundas.

De um modo geral deve-se evitar este tipo de fluxo se flutuações na vazão de descarga, segregação das partículas e um tempo prolongado de armazenamento provocar a deterioração do material.

Por outro lado o fluxo de funil pode ser escolhido, com vantagens, em silos que contém materiais constituídos por partículas duras e abrasivas, pois neste tipo de escoamento há um desgaste menor das paredes da célula.

A figura 13 ilustra os tipos de fluxo. Nota-se, entretanto, que dentro da definição geral de fluxo de funil, há variações que dependem da forma do silo, material, propriedades da parede e sistemas de carregamento e descarga.



la, lb, lc e ld - variações do fluxo funil  
le - fluxo massa  
Fig.13 Tipos de fluxo- DIN 1055

As normas internacionais, de uma maneira geral, apresentam basicamente dois gráficos para a determinação do tipo de fluxo que ocorrerá no interior da célula. Estes gráficos permitem estabelecer o tipo de fluxo em função do coeficiente de atrito com a parede, da inclinação das paredes da tremonha e o do tipo de tremonha (com abertura circular ou retangular). Na figura 14, relativa à norma



DIN 1055 a zona de transição entre o fluxo massa e o fluxo funil é representada pela área hachurada.

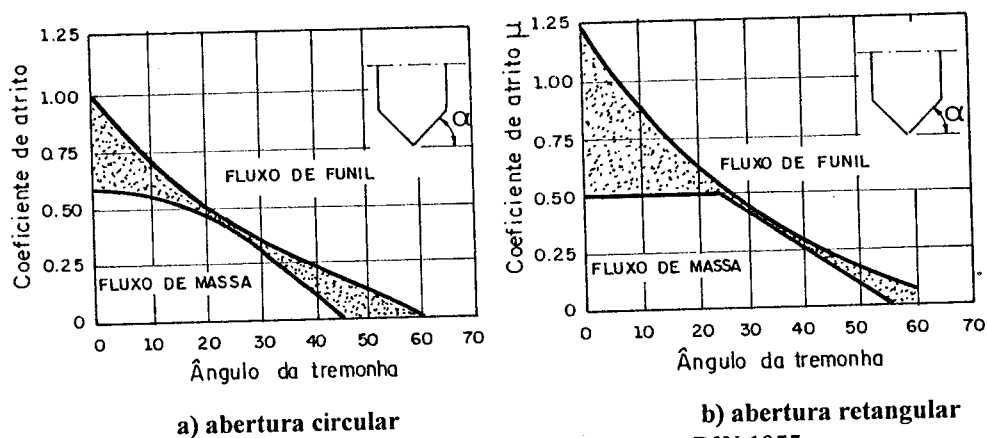


Fig.14 Determinação gráfica do tipo de fluxo - DIN 1055

### 3.2.3 PRESSÕES NAS PAREDES DA CÉLULA

Os efeitos da natureza dinâmica dos procedimentos de carga e descarga são na verdade levados em conta através de uma análise estática considerando-se um fator de sobrepressão.

Neste trabalho, apresentam-se apenas as recomendações para as pressões estáticas, indicando-se a própria norma ou a referência CALIL JR,C.(1990) para consulta sobre o cálculo de pressões adicionais devidas ao descarregamento central ou excêntrico, quando for o caso.

Denomina-se pressão estática àquela exercida pelo material em repouso no interior da célula e da tremonha, interessando para a análise estrutural as que atuam sobre as paredes e fundo da célula. Após o enchimento da célula, o peso do material confinado é suportado em parte pelas paredes, devido ao atrito e em parte pelo fundo da célula. De um modo geral existem pressões perpendiculares às paredes, denominadas horizontais, pressões paralelas às paredes devidas ao atrito e pressões verticais atuando na seção transversal da massa ensilada, (ver figura 15)

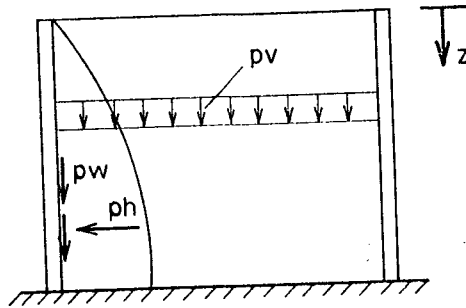


Fig.15 Distribuição das pressões no silo

As expressões propostas na DIN 1055 para a estimativa das pressões são as seguintes:

a. Pressões horizontais

$$phf(z) = \frac{\gamma R}{\mu'} (1 - e^{-\frac{\mu' K}{R} z}) \quad (3)$$

b. Pressões verticais

$$pvf(z) = \frac{\gamma R}{\mu' K} (1 - e^{-\frac{\mu' K}{R} z}) \quad (4)$$

c. Pressões de atrito por unidade de superfície de parede

$$pwf(z) = \gamma R (1 - e^{-\frac{\mu' K}{R} z}) \quad (5)$$

## 4 PROPRIEDADES FÍSICAS DO AÇÚCAR CRISTAL BRANCO

Objetivando o projeto das estruturas dos silos de armazenamento, particularmente no que se refere à estimativa das pressões que ocorrerão na estrutura e os tipos de fluxo, de massa ou funil, torna-se importante a caracterização das propriedades do açúcar cristal branco e a consequente determinação de parâmetros de interesse como:

- .Densidade em função da consolidação,
- .Granulometria,
- .Critério para deslizamento, do qual derivam o ângulo de atrito interno e o ângulo de atrito interno equivalente,
- .Ângulo de atrito entre o produto armazenado e o material da parede,
- .Fator de fluxo da tremonha (ff),
- .Resistência ao cisalhamento.

O ângulo de atrito interno e o ângulo de atrito interno equivalente, são determinados a partir da representação geométrica de um critério de deslizamento estabelecido com base na relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal num ponto do material armazenado. Com tal critério pode-se avaliar em que níveis de solitação o material desliza relativamente a si próprio. As relações críticas para os diversos níveis de tensão normal e de cisalhamento, que definem o critério, são obtidas através de testes em laboratório, usando células especiais de cisalhamento.

Por sua vez o ângulo de atrito entre o produto armazenado e o material da parede resulta da representação geométrica de um segundo critério obtido com ensaios análogos aos do critério anterior, nos quais os fundos das células especiais são substituídos pelo material da parede.

Nos testes ditos instantâneos, o material contido na célula, submetido a uma pressão normal pré-estabelecida, é conduzido a uma condição de deformação estável que define um plano de cisalhamento, e isto é conseguido em dois estágios.

No primeiro, chamado consolidação, objetiva-se preparar uma amostra uniforme. No segundo estágio uma camada do sólido é forçada a se deformar até que um determinado nível de força de cisalhamento seja alcançado. Nos testes ditos de tempo, procura-se determinar o efeito do tempo de armazenamento em repouso. Neste caso, a fase de consolidação sob uma pressão estática se desenvolve por um período de seis horas no caso do açúcar, MILANI, A.P. (1993).

Neste trabalho, realizou-se os ensaios de caracterização empregando-se o aparelho de cisalhamento de translação, conhecido por "Jenike Shear Cell", utilizado internacionalmente, ilustrado na figura 16. Composto por uma célula de cisalhamento circular, um pendural para a colocação de pesos, um suporte de carga acionado eletro-mecanicamente, uma célula de carga e um registrador. Detalhes da execução dos ensaios serão descritos mais adiante.

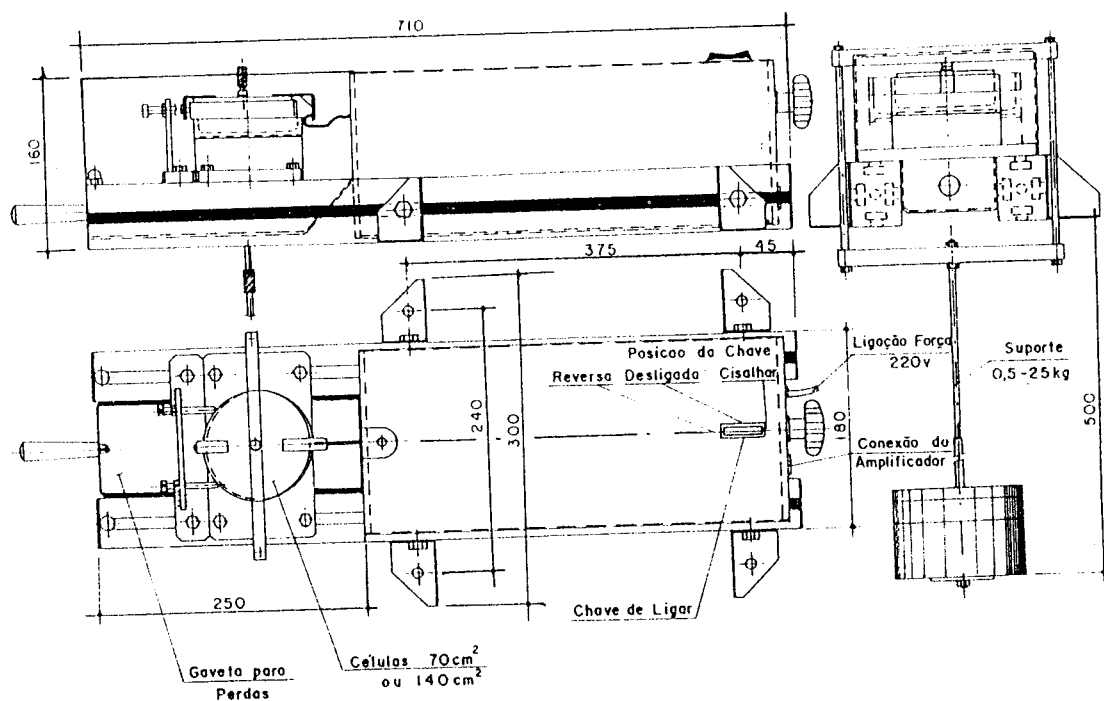


Fig. 16 Esquema do aparelho de cisalhamento de Jenike

A caracterização geométrica dos critérios para deslizamento do material (YL) e para deslizamento do material relativamente à parede (WYL) proporciona condições também para pre-definir, no caso de silos elevados, a forma da tremonha e as dimensões da boca de descarga, que irão condicionar o tipo de fluxo do material em descarga. Nesses casos a resistência do material ao cisalhamento é um parâmetro importante, que se pode relacionar com a formação de obstruções para o fluxo, como arcos ou condutos.

## 4.1 DENSIDADE DO MATERIAL EM FUNÇÃO DA CONSOLIDAÇÃO

A densidade do material armazenado necessita ser calculada por ser um parâmetro importante na determinação das pressões em silos. Por outro lado, JENIKE(1980) mostra que a influência da compressibilidade de um produto (mudança da densidade com a pressão de consolidação) no processo de fluxo é desprezível.

Um método fácil de encontrar a densidade é pesar toda a célula (célula+produto) após o ensaio, subtrair o peso próprio da célula e dividir este peso pelo volume da mesma.

Os resultados obtidos para o caso do açúcar cristal branco estão contidos na tabela 06.

## 4.2 GRANULOMETRIA

A granulometria tem influência sobre as condições de fluxo. Como regra geral, os produtos que não contém partículas menores de 0.25mm são materiais de fluxo livre, segundo a BMHB(1985). Evidentemente existem exceções; por exemplo, os grãos fermentam sob umidades e condições atmosféricas adversas, se existirem, adquirindo resistência e alterando as características do fluxo. A farinha de soja, por sua vez, contém óleo que sob condições de alta umidade e temperatura une as partículas em uma massa de difícil fluxo. Em outro exemplo os materiais em lasca ou fibrosos, como cavacos de madeira, se agrupam e podem formar obstruções para o fluxo, (a maioria dos minérios, como o carvão, se comportam desta maneira).

Já a capacidade de fluir de um produto contendo diferentes dimensões de partículas, finas e grossas, é governada pelas propriedades de fluxo das frações finas. Nesse caso as partículas grossas são um agente passivo no processo. Entretanto, a dimensão das partículas grossas afetará a tendência de agrupamento na boca de descarga, e o impacto das partículas grossas e pesadas pode causar compactação do produto ao longo do canal de fluxo.

Os resultados obtidos na caracterização da granulometria do açúcar cristal branco analisado, estão contidos na tabela 06.

### 4.3 CRITÉRIO DE DESLIZAMENTO (YL)

Para a realização do ensaio de cisalhamento pode-se optar entre duas células disponíveis, dependendo das dimensões das partículas do produto a ser testado. Cada célula tem uma dimensão máxima de partícula que pode ser usada, como por exemplo 4mm na pequena célula standard de Jenike. Observa-se que a pequena célula é mais fácil e rápida de ser operada.

Como os parâmetros do material, em particular o ângulo de atrito interno, dependem do nível de consolidação do mesmo, pelo menos três representações do critério devem ser determinadas. Para cada uma delas a amostra é inicialmente consolidada apresentando uma certa densidade em correspondência a uma tensão de compressão atuante na tampa da célula. A partir da "densidade de equilíbrio", o critério é caracterizado geometricamente por pontos que correspondem a valores de cisalhamento determinados para, pelo menos, três valores de tensões de compressão (diferentes e menores daquele estabelecido na densidade de equilíbrio).

O YL fica geometricamente caracterizado no diagrama  $(\sigma, \tau)$ , fig. 17.

Para materiais coesivos, o YL pode ter uma curvatura convexa, mas no procedimento normal de análise considera-se uma aproximação linear que facilita a determinação das propriedades de interesse.

#### 4.3.1 DETERMINAÇÃO DO YL

Nos ensaios realizados com açúcar cristal branco, foram determinadas três representações geométricas em correspondência a densidades de equilíbrio, obtidas com cargas de consolidação iguais a 10Kg, 7Kg e 5Kg. Para cada nível de consolidação obtiveram-se três pontos ou pares  $(\sigma, \tau)$ .

Na tabela 05, estão apresentados os níveis de carregamento empregados para a definição das densidades de equilíbrio ( $W_p$ ), os níveis menores de carga utilizados no ensaio de cisalhamento ( $W_s$ ) e os correspondentes valores obtidos para  $\sigma$  e  $\tau$ ,  $(\sigma_s$  e  $\tau_s)$ .

De cada gráfico do YL, determinam-se, segundo procedimentos que se descrevem em seguida, o ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ), o ângulo de atrito interno equivalente ( $\delta$ ), a tensão máxima de consolidação ( $\sigma_m$ ) e a resistência ao deslizamento ( $\sigma_c$ ).

Tabela 05. Níveis de carregamento empregados para a definição das densidades de equilíbrio e valores de  $\sigma$  e  $\tau$ .

IYL	CÉLULA	Wp (Kgf)	Ws (Kgf)	$\sigma_s$ (gf/cm <sup>2</sup> )	$\tau_s$ (gf/cm <sup>2</sup> )
1	S	10	7.0	115.104	103.389
			5.0	85.689	78.774
			3.5	63.617	56.961
2	S	7	5.0	85.667	78.794
			3.5	63.589	59.189
			2.0	41.483	38.473
3	S	5	3.5	63.571	60.762
			2.0	41.484	38.059
			1.0	26.758	26.121

S = célula standard

YL = critério de deslizamento

Wp = carga consolidação (Kgf)

Ws = Carga normal empregada no teste de cisalhamento (Kgf)

Se o material parece ser de fluxo livre (coesão baixa), como o açúcar analisado, e ainda o efeito da variação de parâmetros, como umidade, temperatura e tempo de consolidação, é considerado de pouca influência sobre o mesmo, é possível adotar um procedimento de teste simplificado para a determinação do critério de deslizamento. Este procedimento consiste em determinar a tensão de deslizamento na carga de consolidação (ponto P, fig.17) e em uma outra carga, com nível de pressão inferior, tomando-se uma linha reta entre os dois pontos correspondentes do diagrama.

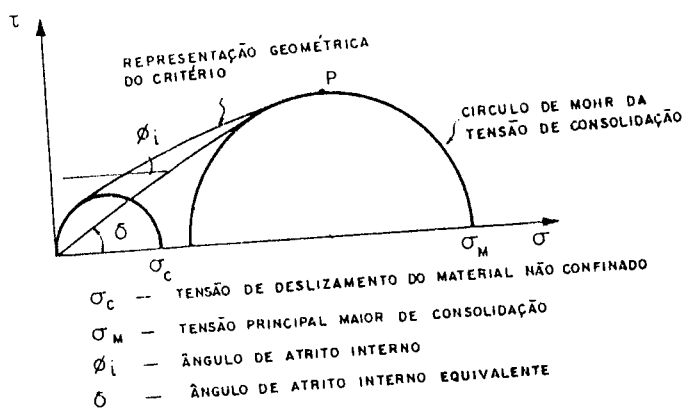


Fig.17 Critério para deslizamento

### A. ÂNGULO DE ATRITO INTERNO ( $\phi_i$ )

Este é o ângulo que a tangente do YL em cada ponto forma com a horizontal. Para um YL convexo (centro de curvatura do lado negativo do eixo  $\tau$ , no diagrama  $\sigma, \tau$ ),  $\phi_i$  diminui com o aumento da tensão de compressão. Um método prático para determinar um valor representativo do ângulo é proposto em JENIKE, (1979) e está baseado numa regressão linear sobre os dados obtidos, tomando-se a inclinação da reta para  $\phi_i$ .

### B. ÂNGULO DE ATRITO INTERNO EQUIVALENTE ( $\delta$ )

Este é o ângulo com a horizontal de uma reta entre a origem e a tangente ao YL no semi círculo de Mohr da tensão de consolidação do material. Tendo-se em vista que esta tangente tende a ser tomada de modo impreciso, o ângulo de atrito interno equivalente é na prática sempre determinado a partir de uma linha entre a origem e o ponto P do semi círculo de Mohr, conforme indicado na figura 17.

### C. TENSÃO MÁXIMA DE CONSOLIDAÇÃO ( $\sigma_m$ )

É definida como a tensão principal máxima (compressão positiva) obtida de um estado de tensão correspondente ao par nível máximo de consolidação e respectiva tensão de cisalhamento do ensaio (ponto P, na figura 17).

É interessante observar que ao chamado nível máximo de consolidação corresponde uma situação teórica onde o fluxo, se ocorrer, se dará sem variação no volume do produto, isto é, a densidade constante.

### D. RESISTÊNCIA AO DESLIZAMENTO ( $\sigma_c$ )

É obtida por um círculo de Mohr que passa pela origem das coordenadas e é tangente ao YL. A intersecção deste semi-círculo com o eixo das tensões normais determina o valor da resistência ao deslizamento.



#### 4.4 FUNÇÃO FLUXO (FF)

A capacidade do produto de fluir é associada à resistência  $\sigma_c$  desenvolvida pelo mesmo devido à consolidação; como resultado desta resistência na fase de descarga o produto armazenado é capaz de formar um arco estável ou efeito tubo, que interfere no processo de fluxo.

A resistência do deslizamento ( $\sigma_c$ ) é uma função da máxima pressão de consolidação, pois depende do conhecimento do YL. A relação entre  $\sigma_c$  e  $\sigma_m$  é denominada "função fluxo". Sua determinação é feita plotando-se os valores de tensão máxima de consolidação versus resistência ao deslizamento (figura 18).

Vale ressaltar que de maneira geral, também a função fluxo do produto depende de outros fatores como tempo de armazenamento, umidade e temperatura, além da pressão de consolidação.

No caso do açúcar, por ser material de fluxo livre, obedecidas as condições ideais de armazenamento, não se caracteriza a função fluxo.

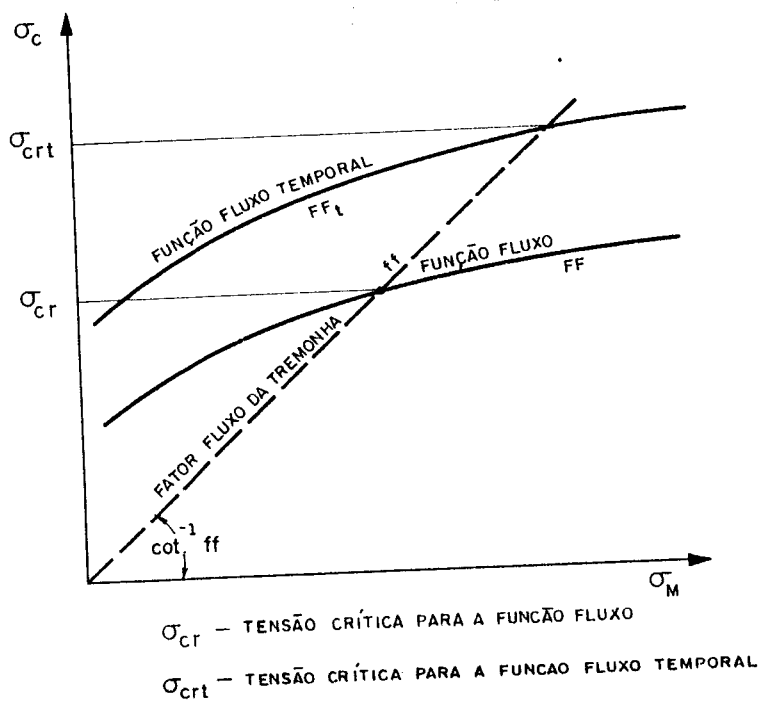


Fig. 18 Função fluxo

## 4.5 DETERMINAÇÃO DO CRITÉRIO DE DESLIZAMENTO COM A PAREDE (WYL)

Os WYL são determinados mediante ensaios realizados com a mesma célula de cisalhamento usada para a determinação do YL. Remove-se a parte do fundo da célula e instala-se um novo fundo composto pelo material da parede a ser testado, determinando-se, então o WYL para uma variedade de pressões de consolidação que são esperadas na parede do silo. As medidas de ensaio sempre mostram variações consideráveis, assim sendo, para a caracterização de cada WYL são determinados um mínimo de cinco pontos a serem plotados no sistema  $\sigma, \tau$ .

O WYL da parede é representado no mesmo diagrama do YL. O ângulo de atrito com a parede ( $\varphi_{wu}$ ) para uma particular tensão de consolidação é determinado pela inclinação da reta que liga a origem à intersecção do WYL com o círculo de Mohr da maior consolidação no ponto de maior  $\sigma$ , (ver figura 19).

Sabendo-se que o WYL é importante, tanto para o fluxo como para o cálculo das pressões, ele deve ser determinado levando-se em conta condições desfavoráveis que combinam umidade, corrosão, abrasão, revestimento da superfície, etc. Desse modo, obtem-se no diagrama, uma faixa onde se localizam os diferentes WYL determinados. O maior ângulo de atrito com a parede ( $\varphi_{wu}$ ), definido a partir do WYL mais inclinado é tomado para a determinação dos ângulos da tremonha nos silos elevados e para o cálculo das forças no plano da parede em qualquer silo; e o menor ângulo de atrito é empregado para o cálculo das pressões.

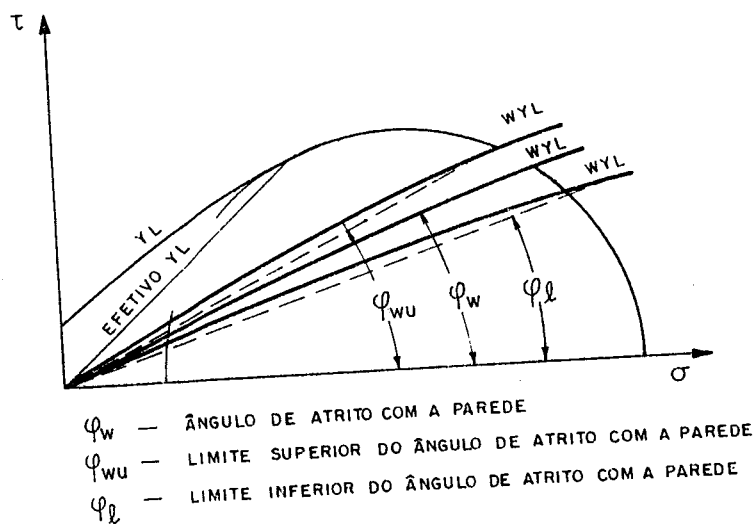


Fig.19 Critério de deslizamento com a parede e ângulo de atrito com a parede.

Com relação aos ensaios realizados no caso do açúcar foram determinadas duas curvas representativas do WYL.

Os materiais de parede utilizados para a determinação do ângulo de atrito do produto armazenado com a mesma foram os seguintes:

- . Aço liso
- . Aço rugoso
- . Alumínio
- . Concreto
- . Madeira compensada
- . Plástico

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 06.

#### **4.6 EFEITOS DO TEMPO**

Muitos produtos adquirem resistência quando estão continuamente sob carga devido ao escape de ar do seu meio, da migração de umidade ou movimento de partículas para um estado mais denso ou como resultado de vibração causada, por exemplo, por maquinaria, tráfego, vento ou contato físico e/ou químico entre as superfícies das partículas. O processo de consolidação ao longo do tempo evolui até um determinado limite, diferente para cada material, a partir do qual atinge-se o chamado estado estável. Se houver possibilidade de consolidação evolutiva, é importante considerá-la na determinação do critério de deslizamento. Desse modo definem-se dois critérios que podem ser empregados: um dito instantâneo, comentado em 4.4, e outro dependente do tempo; de cada um resultam valores diferentes para os parâmetros de interesse.

Em correspondência ao critério dependente do tempo, determinam-se também, de modo análogo ao descrito para as condições instantâneas, uma função de fluxo e um ângulo de atrito equivalente. Estes parâmetros, quando significativos, devem ser usados como valores superiores na estimativa de resistência e fluxo.

Como regra geral, em favor da segurança no dimensionamento do silo, usam-se os limites superiores para o projeto de fluxo e os inferiores para o cálculo de pressões.

Com a finalidade de avaliar o efeito do tempo no caso do açúcar, foram determinados os critérios de deslizamento dependente do tempo (TYL), e os critérios de deslizamento com relação à parede dependente do tempo (TWYL).

Observa-se que para o açúcar não se caracteriza uma função de fluxo dependente do tempo, que pode, no entanto, existir para outros materiais.

#### 4.6.1 SOBRE A DETERMINAÇÃO DO CRITÉRIO DE DESLIZAMENTO DEPENDENTE DO TEMPO (TYL)

Para a determinação do TYL, deixou-se o produto em repouso sob carregamento, durante seis horas antes de realizar o ensaio de cisalhamento.

Os níveis de tensão normal tanto na fase de consolidação quanto no ensaio foram os mesmos empregados nos ensaios instantâneos.

Os resultados obtidos para os parâmetros estão contidos na tabela 06.

Observa-se que não houve variação significativa do ângulo de atrito interno do material e ângulo de atrito interno equivalente.

#### 4.6.2 SOBRE A DETERMINAÇÃO DO CRITÉRIO DE DESLIZAMENTO COM A PAREDE DEPENDENTE DO TEMPO (TWYL)

Como se observa da análise dos resultados apresentados na tabela 06, o ângulo de atrito com a parede sofreu algumas modificações com relação àquele determinado no ensaio instantâneo, o que leva à conclusão que nas condições do ensaio a consolidação do material teve determinada influência.

### 4.7 FATOR FLUXO (ff)

Um produto fluirá se um arco, material arranjado em forma de abóbada, não se desenvolve no canal de fluxo. Em regime de fluxo de massa, de fato a não formação do arco garante o livre escoamento do material. Já nas condições de fluxo tipo funil, em lugar do efeito arco, é necessário garantir que o produto seja incapaz de proporcionar a formação de um tubo vertical vazio no canal de fluxo.

O fator fluxo é um parâmetro usado para indicar a capacidade de condução do material no canal de escoamento. Quanto menor o valor do fator de fluxo melhor é a capacidade de condução do material no canal e, portanto, menores as possibilidades de interrupção do fluxo.

Os problemas relacionados aos fluxos de massa e funil são importantes em silos elevados que apresentam tremonha. Nessas condições, o fator fluxo está relacionado não só ao produto armazenado mas também à forma da tremonha.

ENSTAD, (1975) fornece uma aproximação para o valor numérico do fator de fluxo.

## 4.8 RESULTADOS OBTIDOS

Para o cálculo das pressões nos silos podem ser consultadas várias normas. Todas elas indicam valores de parâmetros para as propriedades físicas dos produtos a armazenar.

Apresentam-se, na tabela 6, os resultados obtidos neste trabalho, para as propriedades físicas do açúcar cristal branco e na tabela 7, os valores para o peso específico, ângulo de atrito interno e coeficiente de atrito com a parede, recomendadas pelas diversas normas.

Tabela 6. Propriedades físicas do açúcar cristal branco (determinadas neste trabalho)

GRANULOMETRIA							
Peneiras	25#	30#	35#	40#	50#	70#	100#
	(0.71)	(0.59)	(0.50)	(0.42)	(0.297)	(0.21)	(0.149)mm
Retenção em peso nas peneiras em 500g	135.1	0	263.9	46.9	29.6	19.7	4.8 g
VALORES INSTANTÂNEOS							
Densidade (KN/m <sup>3</sup> )	8.8 a 9.2						
Ângulo de atrito interno	42°						
Ângulo de atrito interno equivalente	42°						
Ângulo de atrito com a parede:							
aço liso	23°						
aço rugoso	26°						
alumínio	18°						
concreto	27°						
madeira compensada	27°						
plástico	14°						

Tabela 6. Propriedades físicas do açúcar cristal branco (determinadas neste trabalho)

VALORES APÓS UM PERÍODO DE ARMAZENAMENTO DE 6 HORAS	
Densidade (KN/m <sup>3</sup> )	9.3 a 9.8
Ângulo de atrito interno	42°
Ângulo de atrito interno equivalente	42°
Ângulo de atrito com a parede:	
aço liso	25°
aço rugoso	26°
alumínio	21°
concreto	28°
madeira compensada	29°
plástico	21°

TABELA 7. Propriedades físicas para o açúcar cristal branco (Recomendadas pelas várias normas existentes)

NORMA	NCSE			ACI		BMHB		SNABATI			DIN1055		
Prop.Fis.	313												
Peso espec. (KN/cm <sup>3</sup> )	8-10			10		9-10		9.2			9.5		
Âng.Atrito Interno(°)	35-40			35		33-40		30			30		
Cof.Atrito c/ parede	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
	0.27-0.47	0.36-0.70	0.47-0.84	0.43	00	0.42-0.51	0.47-0.58	0.50	0.43	0.29	0.55	0.50	0.45

Tipos de superfície:	(1) (13)	- aço liso (inox)
	(2) (5)	- chapas de aço
	(3) (4) (9) (12)	- concreto não revestido
	(6)	- paredes lisas
	(7)	- paredes rugosas
	(8) (11)	- canaletas horizontais
	(10)	- concreto pintado

Embora todas as normas se baseiam na teoria de JANSSEN (1895), para o cálculo das pressões estáticas, isto não implica que apresentem as mesmas pressões para um determinado produto a armazenar, pois como pode ser observado no capítulo 3, a equação de Janssen é função de 4 variáveis: densidade, coeficiente de atrito com a parede, relação entre as pressões horizontais e verticais e o raio hidráulico. Na tabela 7 verifica-se que a variação desses parâmetros é grande e os valores adotados nos levam a resultados bastante conservativos.

Determinou-se estes parâmetros, necessários à equação de Janssen, a fim de estabelecer-se hipóteses de cálculo das pressões corretas e que permitam executar uma estrutura segura e econômica.

## 5 ASPECTOS DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

Apresentam-se neste capítulo algumas considerações sobre a análise estrutural dos silos verticais.

Inicialmente, as ações que deveriam ser consideradas para o cálculo estrutural seriam aquelas devido ao peso próprio do silo, as provocadas pelo material ensilado, o peso próprio de equipamentos, a variação de temperatura e o efeito do vento; outras ações que poderiam surgir em função de recalques diferenciais, vibração de máquinas, etc.

O peso próprio da estrutura é determinado a partir das dimensões préfixadas pelo projetista, baseando-se em recomendações de normas, em projetos já executados e na própria experiência.

As ações exercidas pelo material armazenado podem ser determinadas através do método do capítulo 3 deste trabalho.

As ações dos equipamentos são fornecidas pelos fabricantes mediante consulta. E, os equipamentos, em sua maioria, estão instalados na torre do silo, não solicitando de maneira expressiva a célula. No interior da mesma são instalados equipamentos para aeração, dispositivos para a determinação de temperatura, umidade e nível do material ensilado, cujo peso próprio pode ser introduzido no cálculo estrutural sem maiores dificuldades. Os transportadores podem ser fixados no teto do silo, desde que seu peso seja considerado no cálculo da cobertura.

A variação de temperatura pode produzir esforços não desprezíveis, principalmente em silos de várias células solidárias e em regiões com grandes variações de temperatura.

O efeito do vento deve ser considerado no cálculo estrutural das paredes, pilares e fundações, sendo muito importante a verificação da estrutura como um todo, pois os silos, principalmente os de estrutura metálica, são extremamente leves, se comparados com suas dimensões, e poderão, quando vazios ou parcialmente



carregados, sofrer deformações ou mesmo colapso se não estiverem suficientemente estruturados para resistirem às pressões exercidas pelo vento. O efeito do vento pode ser determinado com o apoio da NBR 6123/80.

Entretanto, em concordância com os limites estabelecidos para este trabalho, optou-se por uma análise simplificada, em primeira ordem, dos efeitos do material ensilado.

Procurou-se principalmente avaliar a distribuição dos esforços solicitantes a partir do confronto entre uma análise discreta, tratando a estrutura como um conjunto de pilares e vigas curvas, e de outra contínua, na qual a estrutura da parede é tratada como casca.

Os procedimentos de cálculo considerados são oriundos da aplicação da teoria das cascas delgadas e do método dos elementos finitos.

## **5.1 SILOS EM TUBOS CILINDRICOS**

Sob o ponto de vista de sua geometria os silos podem ser cilíndricos ou primáticos. Em particular os silos cilíndricos são construídos em chapa metálica lisa, ondulada ou corrugada; em menor escala encontram-se em concreto armado, protendido, madeira ou outros materiais. A cobertura é geralmente cônica, podendo ser plana ou em cúpula. São constituídos por um único local para armazenamento do material ou vários locais, denominados células. A célula pode estar totalmente apoiada no solo, ou suspensa e apoiada em pilares e vigas que unem os topos dos pilares à célula e ao fundo do silo.

### **5.1.1 DISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS INTERNOS DEVIDOS À PRESSÃO INTERNA**

O tubo cilíndrico por efeito das ações provocadas pelo material ensilado, está submetido basicamente à pressões radiais, e a uma distribuição de pressões devida ao atrito, na direção da geratriz.

O cálculo dos esforços internos solicitantes pode ser feito pela "teoria das cascas cilíndricas delgadas", válida quando a relação entre a espessura  $h$  e o raio médio  $r$  é dada por:  $h/r \leq 1/20$ .

Nessa teoria admite-se, em geral, as seguintes hipóteses fundamentais de *Kirchoff-Love*:

- a) o material que constitui a estrutura é homogêneo, isotrópico e tem comportamento elástico linear;
- b) a espessura é pequena em relação às dimensões e ao raio de curvatura da superfície média;
- c) as tensões normais à superfície média são desprezíveis em relação às demais tensões;
- d) os pontos pertencentes antes da deformação a retas normais à superfície média encontram-se, após a deformação, sobre retas perpendiculares à superfície média deformada;
- e) os deslocamentos são muito pequenos em relação à espessura da casca, sendo possível desprezar a influência deles no estudo das condições de equilíbrio do elemento de superfície.

#### 5.1.1.1 SOBRE AS AÇÕES, ESFORÇOS SOLICITANTES E EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO

##### A. SOBRE AS AÇÕES

Serão consideradas apenas as pressões radiais, realizando-se, portanto, uma análise estática simplificada em primeira ordem. O objetivo, neste caso, é o de estabelecer o confronto com a análise discreta, descrita mais adiante, e apresentar alguns resultados que ilustram o comportamento da estrutura e que são úteis numa fase de anteprojeto. Obviamente, uma análise mais completa do comportamento estrutural exigiria a consideração de um modelo mais complexo, fugindo dos limites inicialmente definidos neste trabalho.

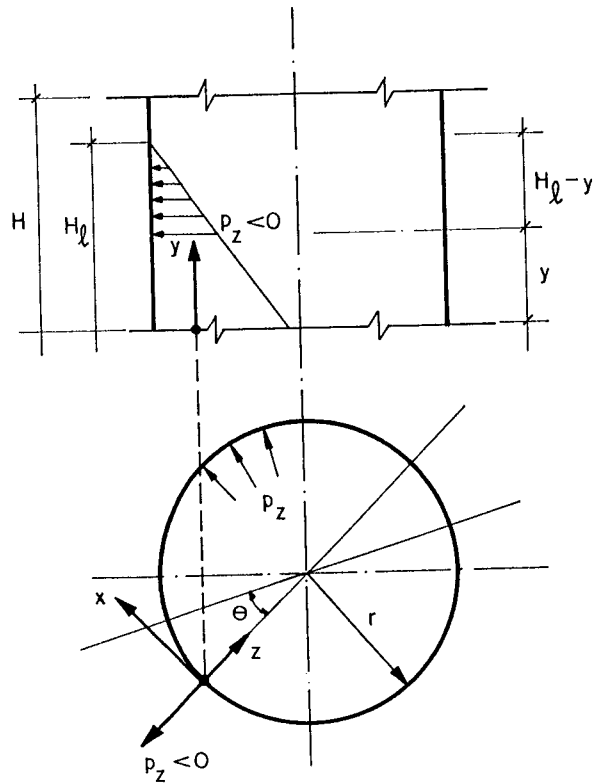


Fig.20 Corte longitudinal e transversal do silo com a distribuição de pressão considerada.

A figura 20 ilustra a distribuição de pressões. Considerando-se ainda, uma variação linear da pressão radial com a altura valem as seguintes relações:

$$\begin{aligned}
 p_x &= p_y = 0 \\
 p_z &= -\gamma_l(H-y)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

onde:  $p_z < 0$ , pois não concordam com  $z > 0$   
 $\gamma_l$  é o peso específico do material

## B. ESFORÇOS SOLICITANTES

Considere-se um elemento genérico de casca, de área igual a  $dS = rd\theta dy$ , delimitado por duas geratrizes e duas diretrizes. Em pontos sobre as faces do elemento atuam tensões  $\sigma$  e  $\tau$  definidas com a notação indicada na figura 21:

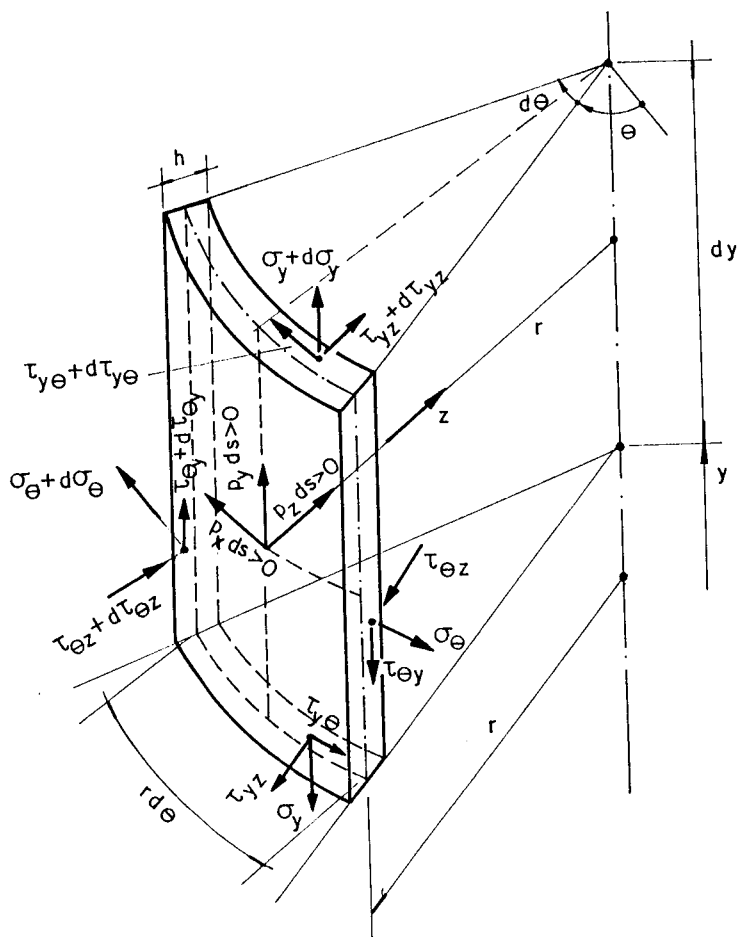


Fig.21 Tensões atuantes no elemento genérico de cascas

As forças e momentos resultantes dessas tensões em cada face são denominados *esforços solicitantes generalizados*, definidos por unidade de largura da face considerada do elemento. Por convenção serão positivos os sentidos dos esforços solicitantes de "membrana" e de "flexão" indicados na figura 22a e b respectivamente.

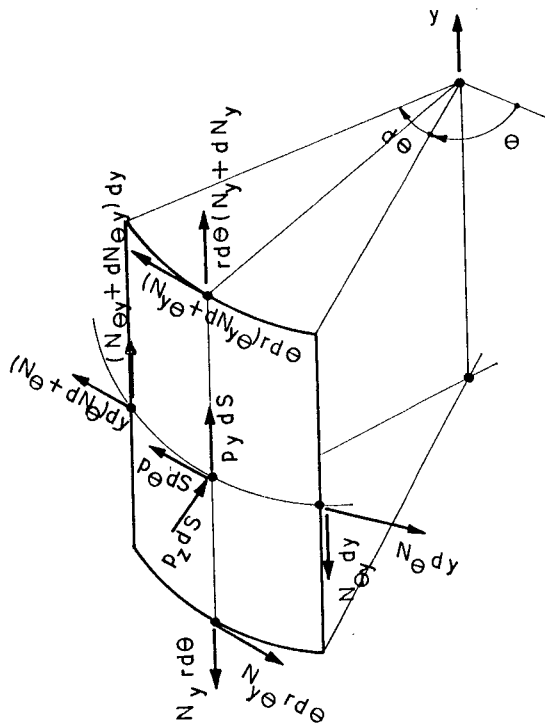


Fig. 22a Esforços Solicitantes  
de "Membrana"

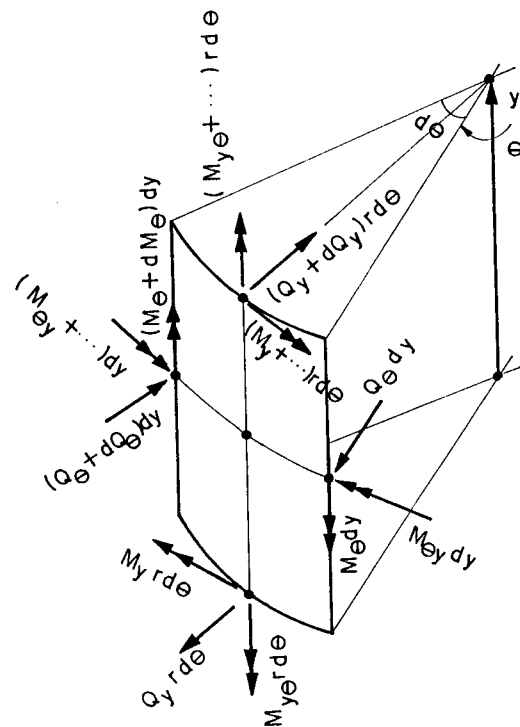


Fig. 22b Esforços Solicitantes  
de "flexão"

As relações que definem os esforços solicitantes são:

$$\begin{aligned}
 N_{\theta} &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{\theta} dz & N_y &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y \left(1 - \frac{z}{r}\right) dz \\
 N_{\theta y} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{\theta y} dz & N_{y\theta} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{y\theta} \left(1 - \frac{z}{r}\right) dz \\
 M_{\theta} &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{\theta} z dz & Q_{\theta} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{\theta z} dz \\
 M_y &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y \left(1 - \frac{z}{r}\right) z dz & Q_y &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{yz} \left(1 - \frac{z}{r}\right) dz \\
 M_{\theta y} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{\theta y} z dz & M_{y\theta} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{y\theta} z \left(1 - \frac{z}{r}\right) dz
 \end{aligned} \tag{7}$$

### C. EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO

A simetria axial de forma e de carregamento implica de imediato em inexistência de variações com a variável  $\theta$  ( $\frac{\partial \dots}{\partial \theta} = 0$ ). Como consequência passam a ser válidas as seguintes simplificações:

1.  $\tau_{\theta z} \equiv 0 \rightarrow Q_{\theta} \equiv 0$
  2.  $\tau_{\theta y} \equiv 0 \rightarrow N_{\theta y} \equiv M_{\theta y} \equiv 0$
  3.  $\tau_{y\theta} \equiv 0 \rightarrow N_{y\theta} \equiv M_{y\theta} \equiv 0$
  4.  $M_{\theta} \equiv 0$
- (8)

Sendo que a última é válida para cascas suficientemente delgadas. Nessas condições dos dez esforços solicitantes restam apenas 4, (fig.

23):

$N_{\theta}, N_y, M_y$  e  $Q_y$

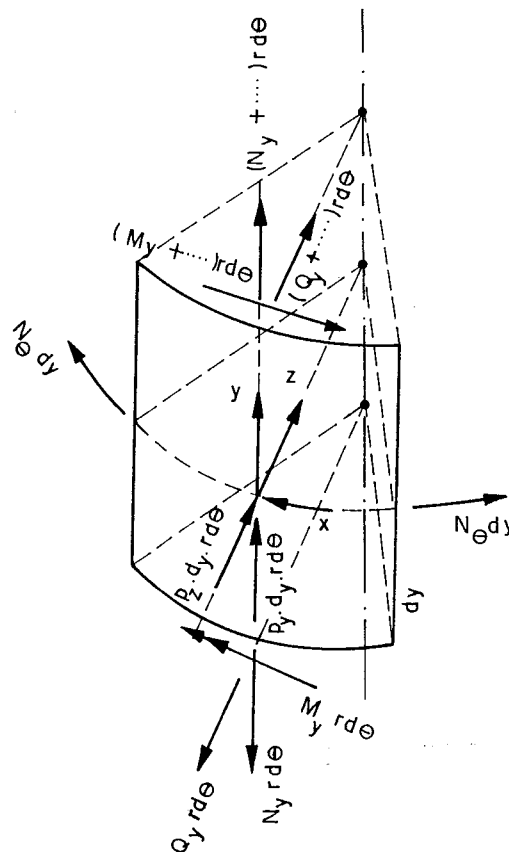


Fig.23 Esforços Solicitantes Finais

As equações de equilíbrio se reduzem a três:

a) Equilíbrio segundo y:

$$-N_y r d\theta + p_y d_y r d\theta + \left(N_y + \frac{\partial N_y}{\partial y} dy\right) r d\theta = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} N_y + p_y = 0$$

b) Equilíbrio segundo z :

$$2\left(N_\theta dy \frac{1}{2} d\theta\right) + p_z dy r d\theta + \left(Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy\right) r d\theta + Q_y r d\theta = 0 \quad (10)$$

$$r \frac{\partial}{\partial y} Q_y + N_\theta + p_z r = 0$$

c) Equilíbrio em torno do eixo x:

$$M_y r d\theta - \left(M_y + \frac{\partial M_y}{\partial y} dy\right) r d\theta + Q_y r d\theta dy = 0 \quad (11)$$

$$-\frac{\partial}{\partial y} M_y + Q_y = 0$$

### 5.1.2 REGIME DE MEMBRANA

No chamado "regime de membrana" admite-se que a casca não tenha rigidez à flexão e que, portanto, deve equilibrar o carregamento movimentando esforços generalizados contidos na superfície média. Assim sendo, das equações de equilíbrio restam como incógnitas apenas os esforços normais  $N_y$  e  $N_\theta$ .

$N_y$  pode ser tratado separadamente, porque a primeira equação de equilíbrio é independente das outras duas. O problema assim se resume em determinar  $N_\theta$  com a segunda equação de equilíbrio:  $N_\theta = -p_z r$ .

Por outro lado, a função que exprime o deslocamento radial passa a ser dada por:  $w(y) = \Delta r = -\varepsilon_\theta r$  (12)

Considerando-se a relação elástica linear de Hooke entre  $\sigma_\theta$  e  $\varepsilon_\theta$  e lembrando que no regime de membrana a distribuição de  $\sigma_\theta$  é constante com a espessura ( o que leva a  $N_\theta = \sigma_\theta \cdot h$  ), resultam, sucessivamente:

$$w(y) = -\frac{\sigma_\theta}{E} r = -\frac{N_\theta}{Eh} r \quad (13)$$

ou ainda pela equação de equilíbrio:

$$w(y) = p_z \frac{r^2}{Eh} \quad (14)$$

No caso particular de uma distribuição hidrostática de pressões ao longo da altura, vale escrever:

$$w(y) = -\gamma_l \frac{r^2}{Eh} (H - y) < 0 \quad (15)$$

A última relação permite verificar que obedecidas as condições do regime de membrana a rotação da parede é constante com a altura:  $w'(y) = \gamma_l \frac{r^2}{Eh}$  (16)

Analisando a equação de  $w(y)$ , verifica-se que o deslocamento varia linearmente, do topo até um valor máximo na base do reservatório. Para existir o regime de membrana é necessário que as condições de contorno sejam estabelecidas, não impedindo deslocamentos radiais e giros diferenciados que impliquem em curvatura diferente de zero. Um esquema teórico compatível com o regime pode ser visto na figura 24.

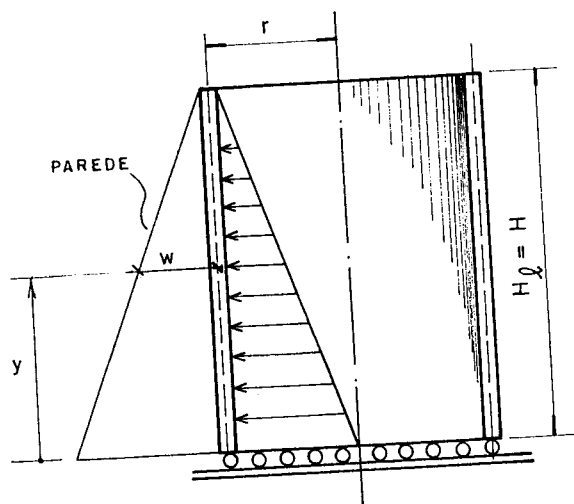


Fig. 24 Esquema de reservatório com topo livre e base articulada móvel



### 5.1.3 REGIME DE FLEXÃO

O regime de flexão passa a existir desde que qualquer condição para o regime de membrana seja violada. Em geral, dada a simetria de forma e carregamento consideradas, esta perturbação se dá em consequência de condições de vinculação.

Para resolver o problema combinam-se as equações de equilíbrio e as seguintes relações entre esforços e deslocamentos:

$$\begin{aligned} N_{\theta} &= -\frac{Eh}{r} w \\ M_y &= -D \frac{d^2 w}{dy^2} \\ Q_y &= -D \frac{d^3 w}{dy^3} \\ M_{\theta} &= \nu M_y \end{aligned} \quad (17)$$

Após algumas passagens obtém-se uma equação diferencial expressa em termos de deslocamentos :

$$\begin{aligned} \frac{d^4 w}{dy^4} + 4\beta^4 w &= \frac{P_z}{D} \\ \text{onde: } D &= \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \\ \beta &\equiv \frac{1.3}{\sqrt{r \cdot h}} \end{aligned} \quad (18)$$

A solução geral  $w(y)$  é composta da solução particular  $w_p$  e da solução da equação homogênea  $w_h$  :

$$w(y) = w_p(y) + w_h(y) \quad (19)$$

A solução homogênea apresenta a seguinte forma geral:

$$w_h(y) = e^{\beta y} (C_1 \cos \beta y + C_2 \operatorname{sen} \beta y) + e^{-\beta y} (C_3 \cos \beta y + C_4 \operatorname{sen} \beta y) \quad (20)$$

Para o caso de pressão hidrostática, tem-se como solução particular:

$$w_p(y) = \frac{p_z r^2}{Eh} \quad (21)$$

a qual coincide com a solução de membrana.

Portanto, para o caso de pressão hidrostática vale escrever:

$$w(y) = \frac{p_z r^2}{Eh} + w_h(y) \quad (22)$$

As constantes  $C_1, C_2, C_3$  e  $C_4$  dependem dos vínculos adotados em cada caso particular considerado. Porém, nos chamados tubos longos, nos quais  $\beta H > 5$ ,  $C_1$  e  $C_2$  devem ser nulas, pois, nestes casos, as perturbações de uma extremidade são amortecidas e não chegam à outra, BILLINGTON (1965). Dessa maneira restam as constantes  $C_3$  e  $C_4$  a determinar.

#### 5.1.4 EXEMPLOS

Para ilustrar a determinação das constantes e, portanto, a aplicação da teoria das cascas optou-se por apresentar dois exemplos. O primeiro, um reservatório de água e o segundo um silo com base engastada. Cabe lembrar que, como será visto mais adiante, no caso do silo a distribuição de carregamento foi considerada variando linearmente ao longo da altura, pois determinou-se a pressão segundo a equação de Janssen e verificou-se que para a relação altura/diâmetro em estudo, a distribuição é muito próxima da linear.

Na figura 25 estão apresentadas as características de geometria de interesse para os dois exemplos.

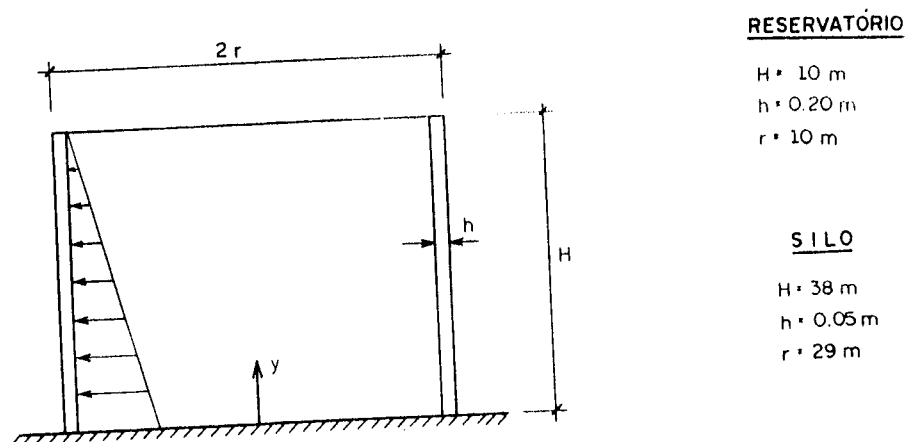


Fig. 25 Esquema de reservatório e silo com distribuição de pressão linearizada

## A. RESERVATÓRIO COM BASE ENGASTADA

O material que compõe a parede do reservatório é um concreto com:

$$f_{ck} = 3 \text{ KN} / \text{cm}^2$$

$$\gamma_{conc.} = 25 \text{ KN} / \text{m}^3$$

O líquido armazenado tem para peso específico  $\gamma_l = 10 \text{ KN} / \text{m}^3$ .

Por efeito do engastamento, valem as seguintes condições em  $y=0$ :

$$w(0) = 0$$

$$w'(0) = 0$$

de onde resultam:

$$C_3 = -\frac{1}{2\beta^3 D} (Q_0 + \beta M_0) \quad (23)$$

$$C_4 = \frac{1}{2\beta^2 D} M_0$$

onde:

$$M_0 = -D(w'') \quad (24)$$

$$Q_0 = -D(w''')$$

Conhecidas as constantes, as relações (17) permitem determinar os valores dos esforços solicitantes.

A distribuição de  $N_\theta$  e  $M_y$  é ilustrada nos gráficos indicados na figura 26a e b respectivamente.

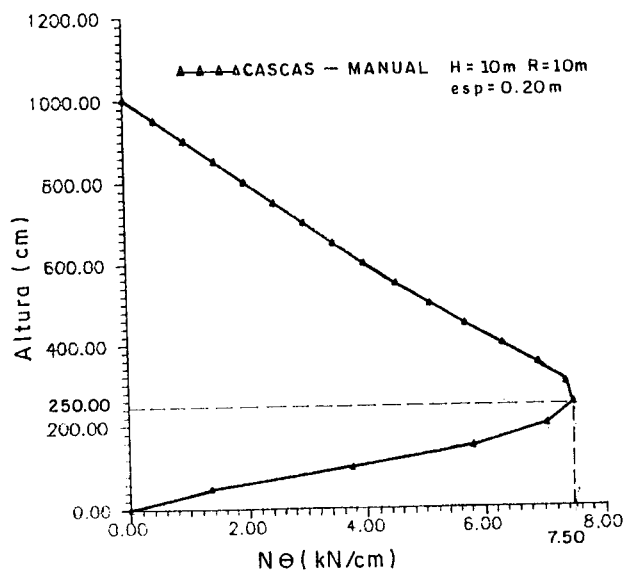


Fig.26a Diagrama de  $N_\theta$  para reservatório (casca)

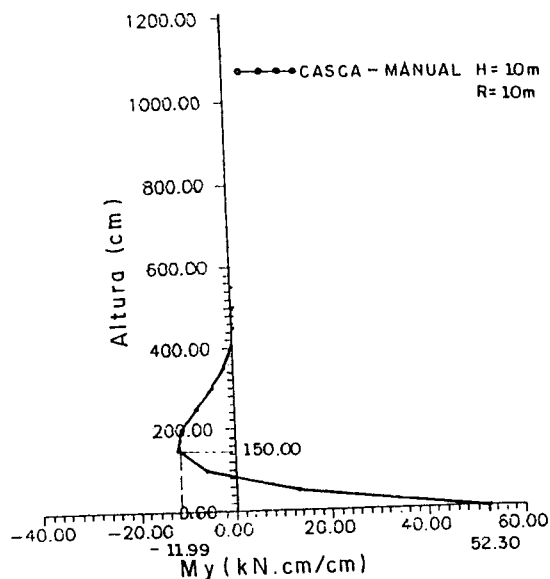


Fig.26b Diagrama de  $M_y$  para reservatório (casca)

A análise da distribuição de  $M_y$  evidencia o fato de que a flexão se localiza numa região próxima à da vinculação, permanecendo a parte superior do reservatório em regime de membrana. De fato, a não propagação dos efeitos de perturbação, gerados pelos vínculos, de uma extremidade à outra do tubo cilíndrico é uma característica dos chamados tubos longos, nos quais o parâmetro  $\beta$ , definido pela (18) em função da geometria do tubo, é igual ou superior a cinco.

## B. SILO COM BASE ENGASTADA

Neste caso o material que compõe a parede do silo é o aço com as seguintes propriedades elásticas:

$$E_{aço} = 21000 \text{ KN} / \text{cm}^2$$

$$\nu = 0.3$$

O material armazenado é o açúcar com peso específico dado por:

$$\gamma_{açúc.} = 9 \text{ KN} / \text{m}^3$$

A distribuição de pressão foi aproximada por uma linear em virtude da pequena diferença desta para aquela definida pela relação de Janssen quando aplicada a este tubo.

Em função de sua geometria este tubo apresenta  $\beta H > 5$  o que implica em amortecimento rápido dos esforços de flexão numa região próxima à da base.

Neste caso, como o vínculo é também um engastamento, a determinação das constantes da relação (20) é análoga à do caso anterior.

A distribuição de esforços está ilustrada na figura 27a e b.

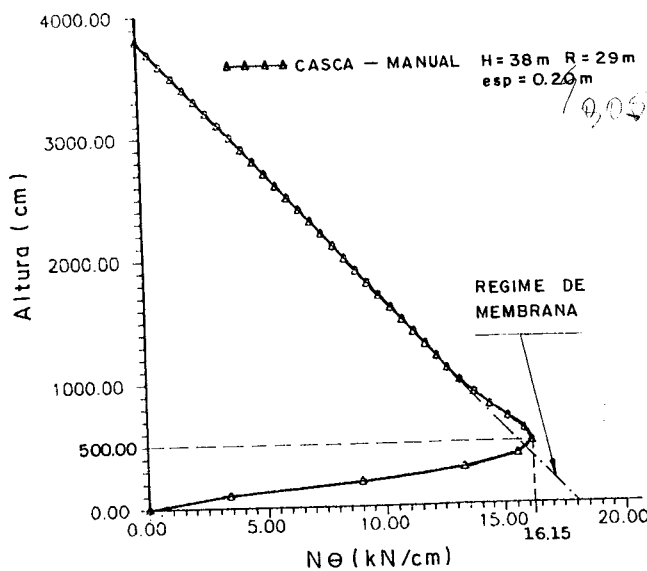


Fig.27a Diagrama de  $N_\theta$   
para silo

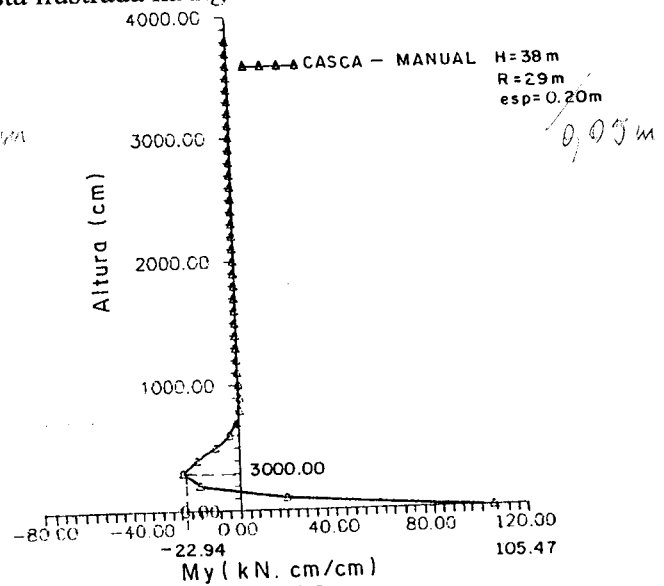


Fig.27b Diagrama de  $M_y$   
para silo

## 5.2 SILO DISCRETIZADO: ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

Analisa-se o silo discretizado em vigas e pilares utilizando-se para o cálculo dos esforços internos solicitantes o "software LUSAS" (1992) baseado no método dos elementos finitos, a fim de estabelecer comparação com os esforços calculados anteriormente como casca.

A figura 28 mostra um exemplo de sistema estrutural discretizado em vigas e pilares.

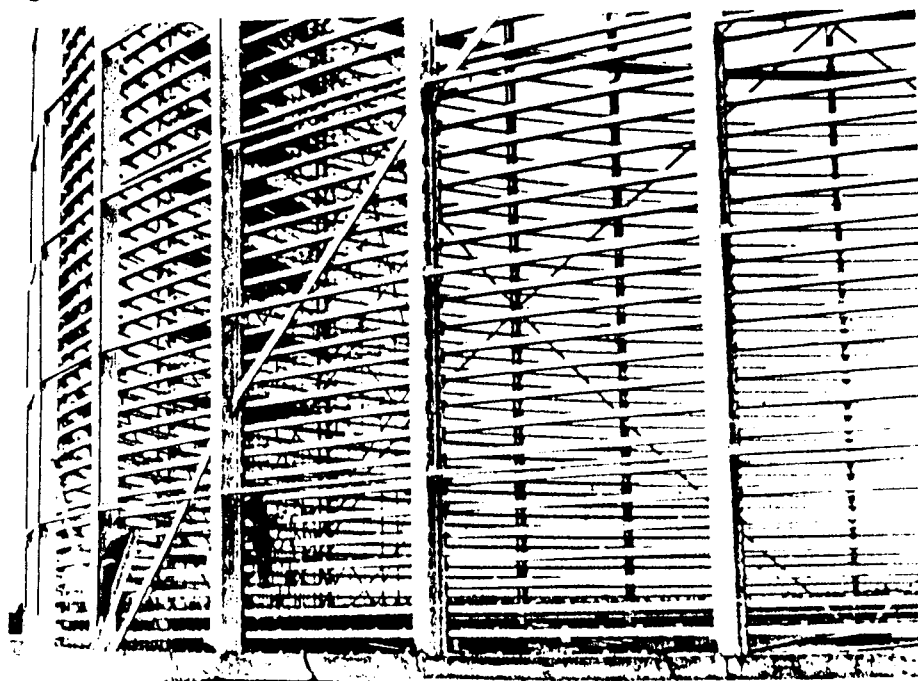


Fig. 28 Silo discretizado em vigas e pilares

Apenas em casos relativamente simples é possível obter soluções exatas para as equações diferenciais obtidas pela teoria das cascas delgadas. Assim, nas situações mais gerais é necessário lançar mão de métodos de solução que proporcionem soluções aproximadas.

A partir de um outro ponto de vista, pode-se afirmar que o objetivo dos métodos numéricos aplicados à análise estrutural, dentre os quais destaca-se o Método dos Elementos Finitos, está em prever o comportamento do sistema estrutural real utilizando uma representação ideal discretizada.

A formulação mais importante do Método dos Elementos Finitos está baseada em deslocamentos. Praticamente todos os sistemas computacionais mais abrangentes foram desenvolvidos usando essa formulação.

Sua aplicação na análise de estruturas envolve as seguintes etapas:

- Idealizar a estrutura como um conjunto de elementos interconectados em um número discreto de pontos ou nós;
- Selecionar funções que descrevam o campo de deslocamentos em cada elemento;
- Expressar o comportamento de cada elemento, a partir de sua geometria e relações constitutivas, em função dos deslocamentos nodais incógnitos;
- Reunir todos os elementos, gerando um sistema de equações em deslocamentos nodais que exprime o comportamento global da estrutura;
- Resolver o sistema de equações e determinar os resultados essenciais da análise ( deslocamentos, deformações, tensões, etc. ).

É importante observar que o emprego de procedimentos numéricos para a resolução do problema acrescenta um nível de aproximação, além do já existente devido às simplificações adotadas quando se concebe o modelo mecânico. Assim, para a utilização do Método dos Elementos Finitos não basta dispor de "software" que ofereça uma biblioteca de elementos abrangente, riqueza de recursos e instruções claras de montagem de arquivos de dados e interpretação de saídas de resultados. É necessário que haja compreensão das características do método, atentando-se para as diferentes possibilidades de ocorrências de erros que lhe são peculiares tais como os relacionados com discretização, integração numérica, solução do sistema de equações, arredondamentos, etc...

### 5.2.1 FORMULAÇÃO GERAL DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Apresenta-se, em seguida, uma breve revisão da formulação das equações que regem o emprego do Método dos Elementos Finitos na análise estrutural.

#### A. Equilíbrio Estático

Seja o equilíbrio de um corpo tridimensional, submetido às forças:

t - força distribuída por unidade de área de superfície

f - força distribuída por unidade de volume

F - força concentrada

Por efeito do carregamento o corpo em sua configuração de equilíbrio apresenta, de um modo geral, um estado de deformação descrito em cada ponto pelo

"vetor"  $\varepsilon$  e uma correspondente distribuição de tensões descrita totalmente pelo "vetor"  $\sigma$ .

O equilíbrio é expresso pelo princípio dos trabalhos virtuais: "A condição necessária e suficiente para o equilíbrio de um sistema material qualquer, é que a soma dos trabalhos de todos os esforços atuantes seja nula para qualquer campo de deslocamentos virtuais, pequeno e possível, (compatível com o sistema e com os vínculos externos)". Então, para qualquer pequeno deslocamento virtual  $\delta u$  imposto ao corpo, a soma do trabalho total interno dever ser igual à soma do trabalho externo:

$$\int_v \delta \varepsilon^T \sigma dv = \int_v \delta u^T f dv + \int_v \delta u^T t dv + \sum \delta u^T F \quad (25)$$

Onde  $\delta \varepsilon$  são deformações virtuais compatíveis com o deslocamento virtual  $\delta u$ .

Por outro lado, na análise por elementos finitos o corpo é representado pela reunião de elementos discretos interconectados por pontos nodais; os deslocamentos internos de um elemento são obtidos interpolando-se os deslocamentos dos pontos nodais correspondentes àquele elemento. Por exemplo para o elemento (e) :

$$u^{(e)} = N^{(e)} a^{(e)}$$

onde:

$$N^{(e)} = \text{é a função de interpolação dos deslocamentos} \quad (26)$$

(normalmente polinomial)

$$a^{(e)} = \text{é o vetor de deslocamentos nodais}$$

As deformações internas do elemento  $\varepsilon^{(e)}$  são obtidas através dos deslocamentos  $a^{(e)}$ , por:

$$\varepsilon^{(e)} = \underset{\approx}{B}^{(e)} a^{(e)}$$

onde:

$$\underset{\approx}{B}^{(e)} = \text{é a matriz da relação deformação - deslocamento} \quad (27)$$

Na elasticidade linear, as tensões internas  $\sigma$  do elemento finito são obtidas através das deformações utilizando-se da relação constitutiva expressa na forma:

$$\sigma^{(e)} = D^{(e)} (\varepsilon^{(e)} - \varepsilon_0^{(e)}) + \sigma_0^{(e)}$$

onde:

$$D^{(e)} = \text{é a matriz de constantes elásticas} \quad (28)$$

$$\sigma_0^{(e)} = \text{vetor de tensões iniciais}$$

$$\varepsilon_0^{(e)} = \text{vetor de deformações iniciais}$$

por exemplo devidas ao efeito térmico.

Portanto tendo-se em vista as equações 26, 27 e 28 a relação 26 dos trabalhos virtuais passa a ser escrita, para a estrutura discretizada em  $n$  elementos, na seguinte forma:

$$\delta a^T \left[ \sum_{e=1}^n \int_{\nu} B^{(e)T} D^{(e)} B^{(e)} dv \right] = \delta a^T \left[ \sum_{e=1}^n \int_{\nu} N^{(e)T} f^{(e)} dv + \sum_{e=1}^n \int_s N^{(e)T} t^{(e)} ds - \sum_{e=1}^n \int_{\nu} B^{(e)T} (\sigma_0^{(e)} - D^{(e)} \varepsilon_0^{(e)}) dv + F \right] \quad (29)$$

onde:

$$n = \text{número de elementos}$$

Finalmente, a equação que exprime o equilíbrio da estrutura pode ser colocada na forma que se segue:

$$K a = R$$

onde:

$$a = \text{vetor de forças nodais globais da estrutura} \quad (30 \text{ e } 31)$$

$$K = \sum_{e=1}^n \int_{\nu} B^{(e)T} D^{(e)} B^{(e)} dv$$

$$R = \text{vetor de forças nodais sobre a estrutura} \quad (32)$$

$$R = R_b + R_s - R_0 + R_c$$

$$R_b = \sum_{e=1}^n \int_s N^{(e)T} f^{(e)} dv \quad (33 \text{ e } 34)$$

$$R_s = \sum_{e=1}^n \int_s N^{(e)T} t^{(e)} ds$$

$$R_0 = \sum_{e=1}^n \int_{\nu} B^{(e)T} (\sigma_0^{(e)} - D^{(e)} \varepsilon_0^{(e)}) dv \quad (35 \text{ e } 36)$$

$$R_c = F$$

A equação 30 descreve o equilíbrio nas situações onde o carregamento aplicado é independente do tempo ou onde as mudanças nos níveis de carregamento ocorrem muito lentamente.



## 5.2.2 ESTUDO DO SILO COMO SÓLIDO AXISSIMÉTRICO

Sendo o silo em estudo e seu carregamento axissimétricos, utilizou-se como primeira alternativa para cálculo dos esforços internos solicitantes pelo método dos elementos finitos, o programa denominado FEPLAS para análise de estados planos e sólidos axissimétricos. O comportamento da estrutura é independente da coordenada circunferencial  $\theta$ , sendo possível ter-se uma análise bidimensional de tensões ao contrário de uma situação tridimensional. A figura 29a e b ilustra a idéia de simetria axial do silo e seu carregamento e as tensões produzidas na parede.

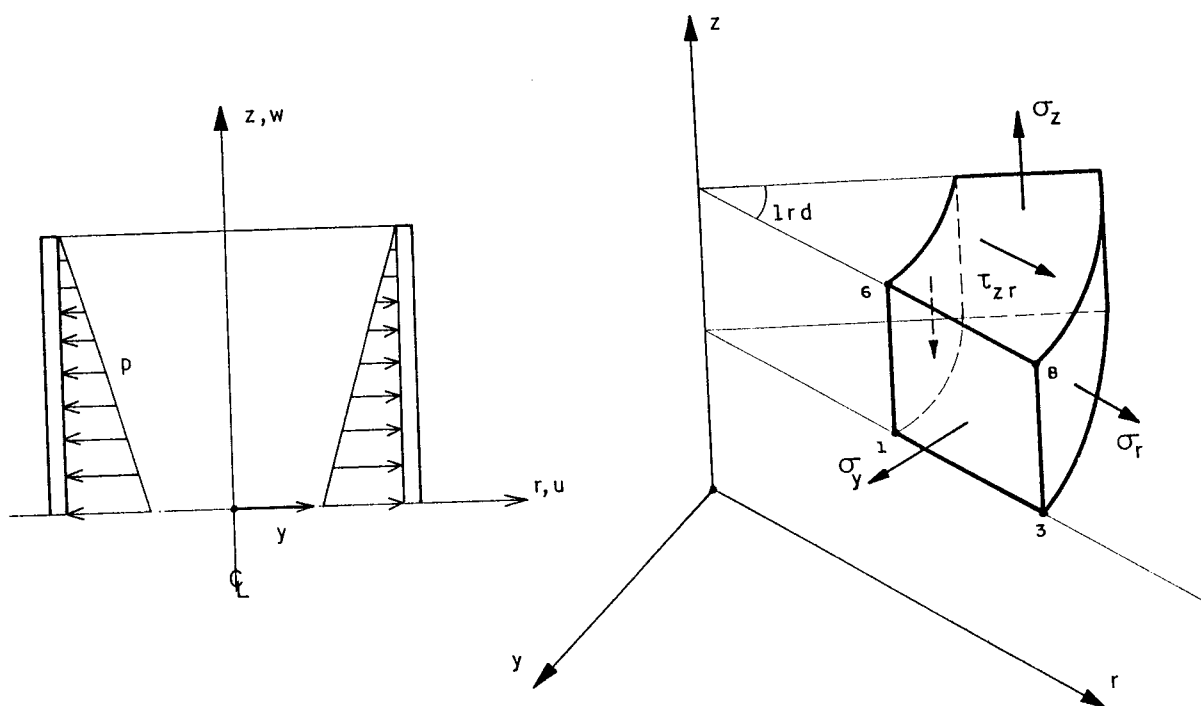


Fig. 29a Estrutura e carregamento axissimétricos

Fig.29b Tensões atuantes no elemento axissimétrico

As expressões gerais do método, descritas no item anterior, são particularizadas para o caso axissimétrico. As formas particulares das principais variáveis de interesse são apresentadas em seguida.

Os deslocamentos podem ser expressos em notação matricial como:

$$u = [u \ w]^T$$

onde:

$u$  = componente de deslocamento na direção radial  $x$

$w$  = componente de deslocamento na direção de  $z$

As componentes de deformações não nulas são representadas por  $\varepsilon = [\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z, \gamma_{rz}]^T$ , relacionando-se com os deslocamentos através das expressões:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} \quad (37 \text{ e } 38)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (39 \text{ e } 40)$$

$$\gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}$$

Por sua vez, as deformações virtuais associadas aos deslocamentos virtuais são dadas por:

$$\delta u = [\delta u, \delta w]^T \quad (41)$$

$$\delta \varepsilon = \left[ \frac{\partial(\delta u)}{\partial r}, \frac{\delta u}{r}, \frac{\partial(\delta w)}{\partial z}, \frac{\partial(\delta u)}{\partial z} + \frac{\partial(\delta w)}{\partial r} \right]^T \quad (42)$$

Por outro lado, a relação tensão-deformação é escrita na forma:

$$\sigma = D \varepsilon \quad (43)$$

onde:

$$\sigma = [\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{rz}]^T$$

sendo:

$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  tensões normais nas direções  $r$ ,  $\theta$  e  $z$  e

$\tau_{rz}$  é a tensão de cisalhamento no plano  $rz$ .

No caso de materiais elástico-lineares, a matriz constitutiva é dada por:

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 \\ 0 & \nu & (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (44)$$

Determinou-se os esforços internos solicitantes em dois exemplos, um reservatório de água e outro silo de açúcar, como sólidos axissimétricos, discretizando-se as paredes do reservatório com 20 elementos isoparamétricos de 8 nós e a do silo com 38 elementos isoparamétricos de 4 nós.

Os resultados obtidos para os esforços internos solicitantes confirmaram os cálculos feitos analisando-se as estruturas como "Casca cilíndricas delgadas fechadas", conforme ilustram as figuras 30 e 31.

### A. Primeiro exemplo: reservatório de água

Dados de geometria:

Altura: 10m

Diâmetro: 20m

Espessura: 20cm

Dados do material da parede:

$$\text{Concreto: } E_c = 3450 \frac{\text{KN}}{\text{cm}^2}$$

$$\nu = 0.2$$

$$\gamma_{\text{água}} = 10 \text{ KN} / \text{m}^3$$

Os resultados obtidos para  $N_\theta$  e  $M_y$  estão apresentados na figura

30a e b.

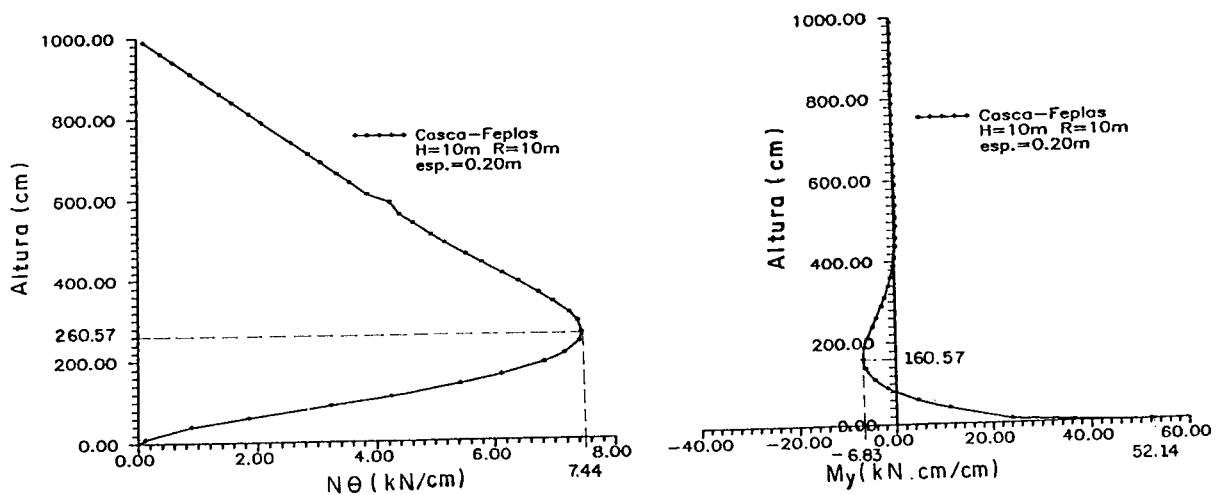


Fig.30a e b Esforços internos solicitantes  $N_\theta$  e  $M_y$  (reservatório)

## B. Segundo exemplo: silo de açúcar

Dados de geometria:

Altura: 38m

Diâmetro: 58m

Espessura: 5 cm

Dados do material da parede:

$$\text{Aço: } E_{\text{aço}} = 21000 \frac{\text{KN}}{\text{cm}^2}$$

$$\nu = 0.3$$

$$\gamma_{\text{açúcar}} = 0.9 \text{ KN} / \text{m}^3$$

Os resultados obtidos para  $N_{\theta}$  e  $M_y$  estão apresentados na figura

31a e b.

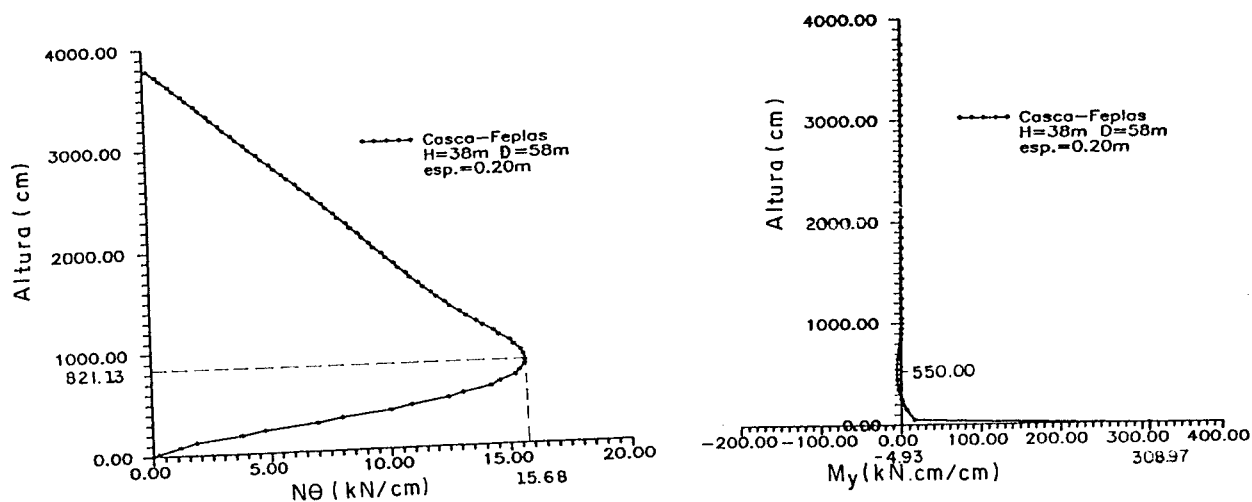


Fig.31 a e b Esforços internos solicitantes  $N_{\theta}$  e  $M_y$  (silo)

### 5.2.3 O "SOFTWARE" LUSAS

Como segunda alternativa para um estudo no Método dos Elementos Finitos, optou-se pela utilização de um "software", já testado, que apresenta como vantagem principal a possibilidade de adotar uma discretização em colunas e vigas curvas, o que leva naturalmente à idéia de um confronto com a análise do silo como casca.

Em essência LUSAS (1992) é um sistema para aplicação do Método dos Elementos Finitos no estudo de problemas nas seguintes áreas da Mecânica Aplicada:

- Estática linear
- Estática não-linear
- Dinâmica linear
- Dinâmica não-linear
- Frequência natural
- Determinação de auto-valores
- Resposta Spectral
- Resposta Harmônica
- Análise acoplada termo-mecânica

Nas análises lineares e não-lineares, dispõe-se de modelos constitutivos que consideram as seguintes possibilidades:

- isotropia linear
- ortotropia e a isotropia linear
- elasto-plasticidade com endurecimento
- plasticidade no concreto com amolecimento
- interfaces bi e tridimensionais
- laminados compostos
- convecção/radiação

No campo das grandes deformações e deslocamentos são utilizadas formulações geométrica não-lineares, a partir da descrição do movimento em forma Lagrangiana Total, Lagrangiana atualizada ou Euleriana.

As condições de contorno para análise não-linear englobam os casos de superfícies lisas ou com atrito, podendo ser prescritos valores de deslocamento, molas, linhas de escorregamento, condução/radiação, etc.

O sistema LUSAS contém em sua biblioteca mais de cem tipos de elementos, dedicados ao estudo de:

- Barras
- Vigas
- Sólidos bi-dimensionais
- Sólidos tri-dimensionais
- Chapas
- Cascas
- Membranas

- Problemas de condução de calor
- Elementos de juntas

São previstas pelo programa uma variedade de condições de carregamento, como:

- cargas concentradas
- cargas distribuídas
- cargas de volume
- velocidades iniciais
- tensões e deformações iniciais
- tensões residuais
- temperatura
- distribuição de temperatura
- controle de deslocamentos

A limitação sobre a quantidade de elementos a serem empregados na discretização está na capacidade de memória do computador utilizado.

## 5.2.4 ANÁLISE DO SILO COMO PÓRTICO CURVO

Para a análise do reservatório e do silo discretizados como pórtico curvo, utilizou-se o elemento de viga BS4, que é um elemento tridimensional, curvo, com três nós e não conforme, onde os deslocamentos e rotações globais são inicialmente quadráticos e interpolados independentemente.

a) graus de liberdade gerais

b) graus de liberdade reduzidos no nó central.

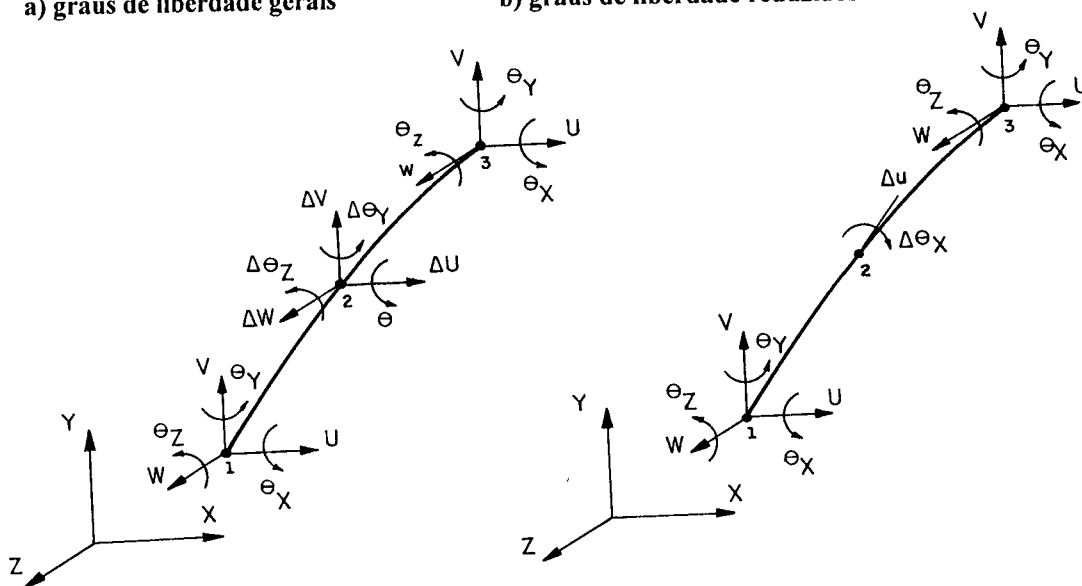


Fig. 32 Deslocamentos nodais do elemento BS4

Os graus de liberdade do elemento são:  $U, V, W, \theta_x, \theta_y, \theta_z$  nos nós extremos. Os graus de liberdade correspondentes ao nó central são eliminados mediante a imposição de deformação por cisalhamento nula, (ver figura 32a e b).

Nos dados referentes ao elemento é necessário acrescentar um quarto de nó, não alinhado com os outros três, para a definição do sistema de coordenadas local. Conforme indicado na figura 33 o eixo local  $x$  é tangente ao eixo do elemento, o  $y$  aponta para o quarto nó e  $z$  completa um sistema dextrorso.

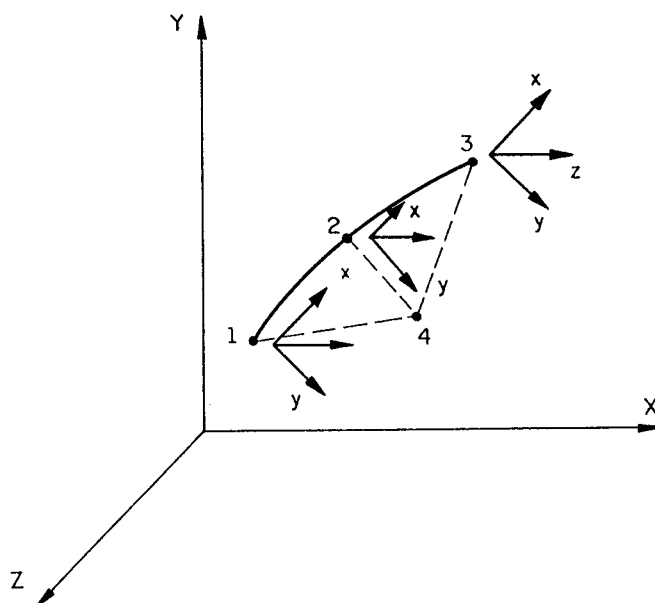


Fig. 33 Sistema de coordenadas local para o elemento BS4

Este elemento pode ser utilizado para análise linear e não-linear em vigas, arcos e pórticos tridimensionais. As propriedades geométricas que devem ser fornecidas são: área da seção transversal, momento de inércia segundo o eixo  $y$ , momento de inércia segundo o eixo  $z$  e o momento de inércia à torção.

O arquivo de saída fornece os seguintes resultados nos nós dos elementos ou nos pontos de Gauss:

Entre os resultados de interesse, o arquivo de saída, além dos deslocamentos e rotações segundo os graus de liberdade, apresenta os momentos de flexão, de torção e força axial.

### 5.2.5 EXEMPLOS

Para ilustrar a aplicação do "software" LUSAS, optou-se por apresentar três exemplos. O primeiro refere-se ao reservatório de água com paredes em concreto armado, engastado na base, vigas de seção 20x30cm, pilares internos de seção 20x50cm e pilares externos de 20x25cm. O segundo apresenta colunas e vigas com alturas idealizadas tais que "fecham" toda a parede do reservatório, a fim de que se estabeleça comparação com a solução como casca. O último exemplo, refere-se ao silo metálico com base engastada onde as vigas são perfis I12"x60.71 e os pilares perfis CS500x207.

Na figura 34, ilustra-se a malha utilizada para o cálculo dos esforços no silo e reservatório discretizados. Optou-se por discretizar um quarto da circunferência com pilares a cada 15°, por uma questão de facilidade de imposição das condições de contorno. Deve-se observar que isto não exigiu esforço complementar significativo devido à possibilidade de geração automática da malha.

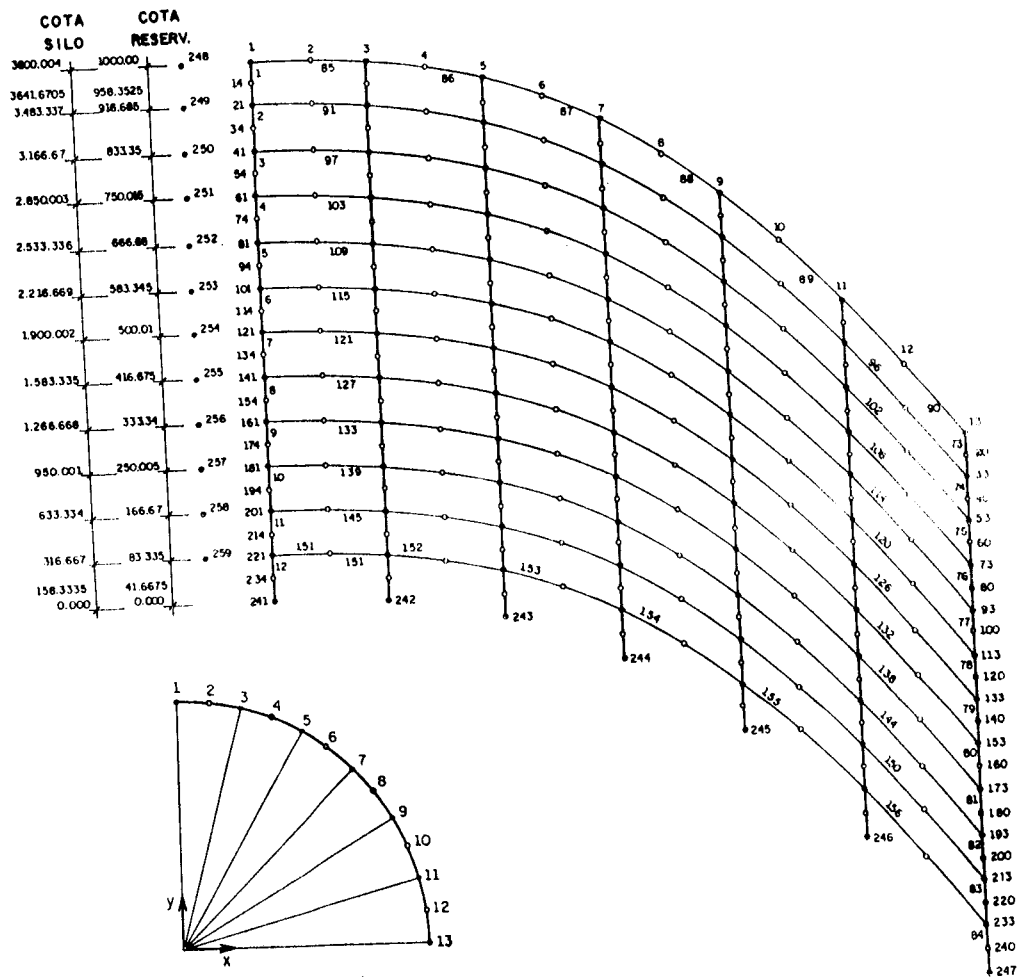


Fig. 34 Malha utilizada para discretizar o silo e o reservatório



### A. Primeiro exemplo: reservatório de água

Dados de geometria:

Vigas ( 20x30 )cm

Pilares internos ( 20x50 )cm

Pilares externos ( 20x25 )cm

Altura: 10m

Espessura: 20cm

Diâmetro: 20m

Dados do material da parede:

Concreto:  $E_c = 3450 \frac{KN}{cm^2}$

$\nu = 0.2$

$\gamma_{\text{água}} = 1.0 KN / m^3$

Os resultados obtidos para  $N_{\theta}$  e  $M_y$  estão apresentados na fig. 35.

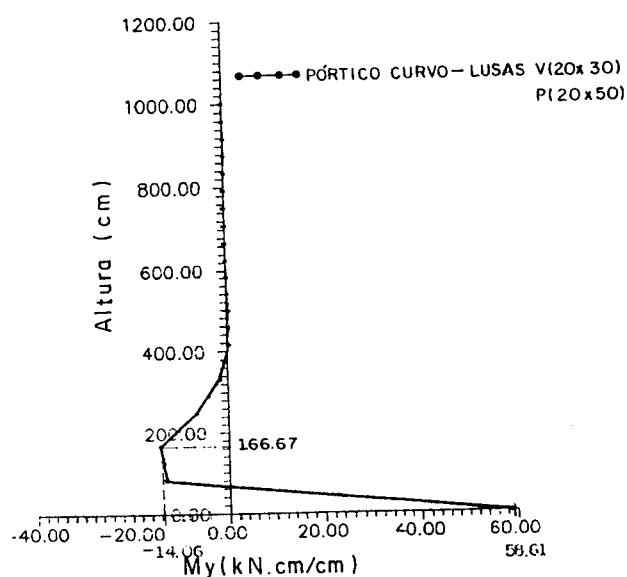
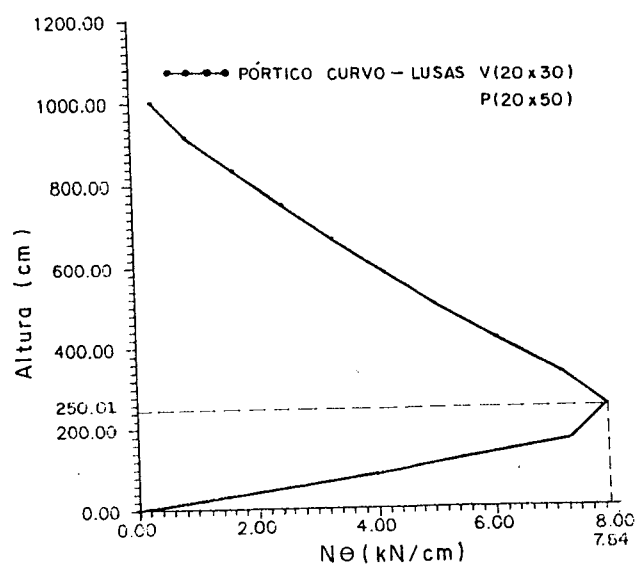


Fig.35a Diagrama de  $N_{\theta}$  para reservatório (discretizado)

Fig.35b Diagrama de  $M_y$  para reservatório (discretizado)

## B. Segundo exemplo: reservatório de água

Dados de geometria:

Viga superior ( 20x41.6675 )cm

Vigas internas ( 20x83.335 )cm

Pilares internos ( 20x261.80 )cm

Pilares externos ( 20x130.90 )cm

Altura: 10m

Diâmetro: 20m

Espessura: 20cm

Dados do material da parede:

Concreto:  $E_c = 3450 \frac{KN}{cm^2}$

$\nu = 0.2$

$\gamma_{\text{água}} = 1.0 KN / m^3$

Os resultados obtidos para  $N_{\theta}$  e  $M_y$  estão apresentados na fig. 36.

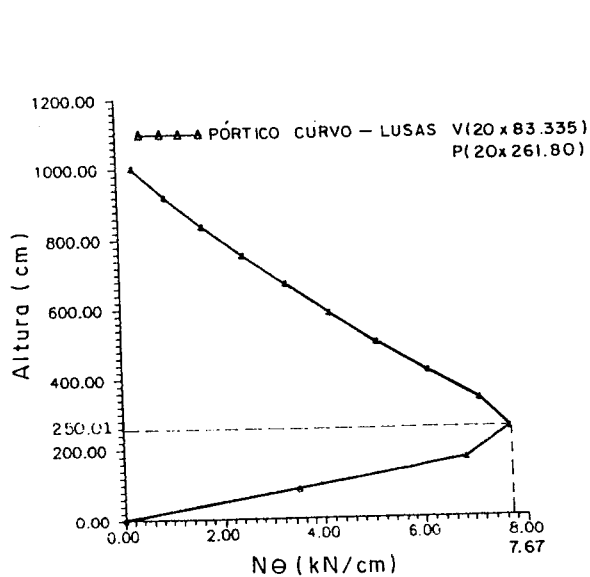


Fig. 36a Diagrama de  $N_{\theta}$  para reservatório (discretizado)

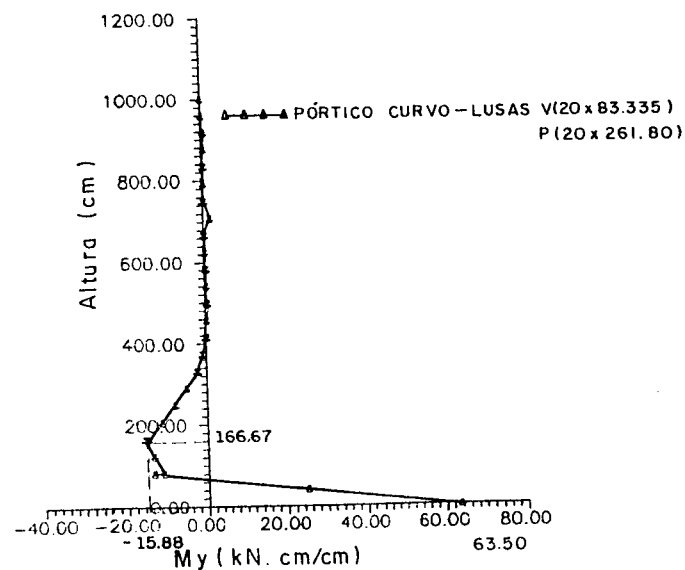


Fig. 36b Diagrama de  $M_y$  para reservatório (discretizado)

### C. Terceiro exemplo: silo de açúcar

Dados de geometria:

Vigas ( 112"x60.71 )

Pilares ( CS500x207 )

Altura: 38m

Diâmetro: 58m

Espessura: 5 cm

Dados do material da parede:

$$\text{Aço: } E_{\text{aço}} = 21000 \frac{\text{KN}}{\text{cm}^2}$$

$$\nu = 0.3$$

$$\gamma_{\text{açúcar}} = 0.9 \text{KN} / \text{m}^3$$

Os resultados obtidos para  $N_{\theta}$  e  $M_y$  estão apresentados na fig. 37.

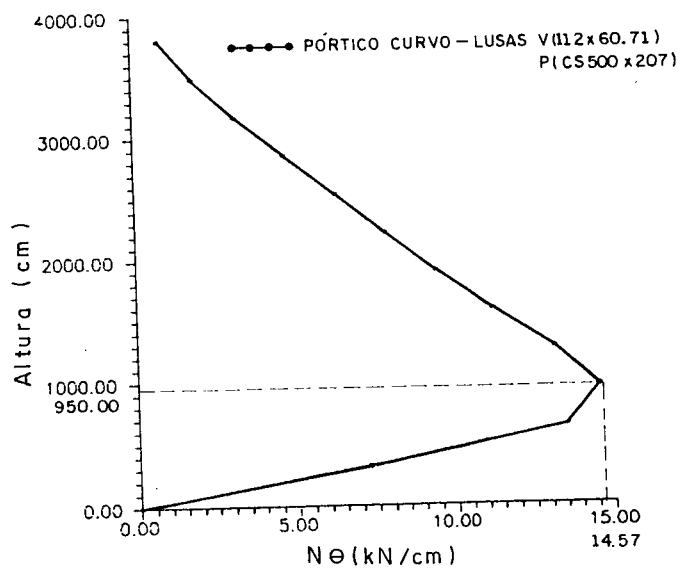


Fig. 37a Diagrama de  $N_{\theta}$  para reservatório (discretizado)

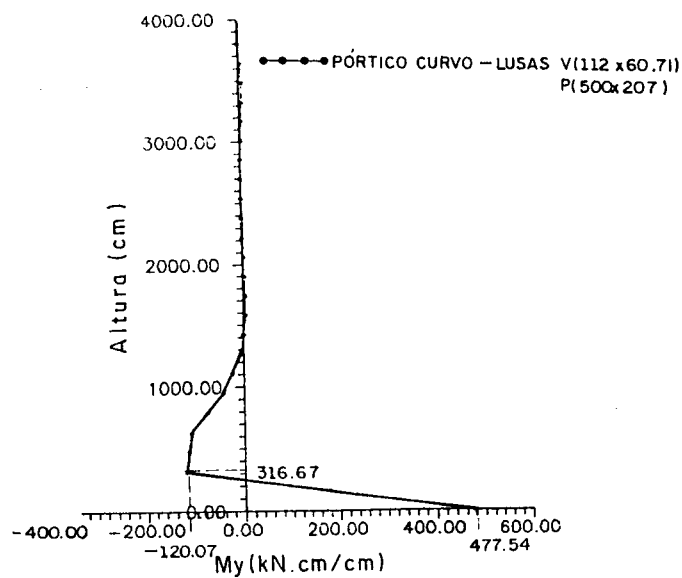


Fig. 37b Diagrama de  $M_y$  para reservatório (discretizado)

### D. Comparação entre $N_\theta$ e $M_y$ obtidos pela Teoria das cascas cilíndricas delgadas e o "LUSAS"

Os gráficos da figura 38 mostram uma boa concordância entre os resultados obtidos pelo "software" LUSAS e a teoria das cascas.

Nos resultados ilustrados na figura 39 a aproximação é menor, entretanto os gráficos apresentam uma forma bastante semelhante.

Isto sugere que possa ser possível, para fins de uma estimativa inicial, de avaliar os esforços num silo composto por um arranjo de vigas curvas e colunas, mediante uma aproximação como casca equivalente. A vantagem seria a de não precisar dispor de um recurso tão avançado quanto o LUSAS.

Obviamente quanto maior o número de vigas e colunas mais as duas soluções tenderão a coincidir, devendo-se ainda observar que nos tubos muito longos o amortecimento dos esforços de flexão é bastante grande numa casca, o que pode "sugerir" ainda que se devam adotar espessuras equivalentes diferentes para avaliar os esforços anulares  $N_\theta$  e de flexão  $M_y$ .

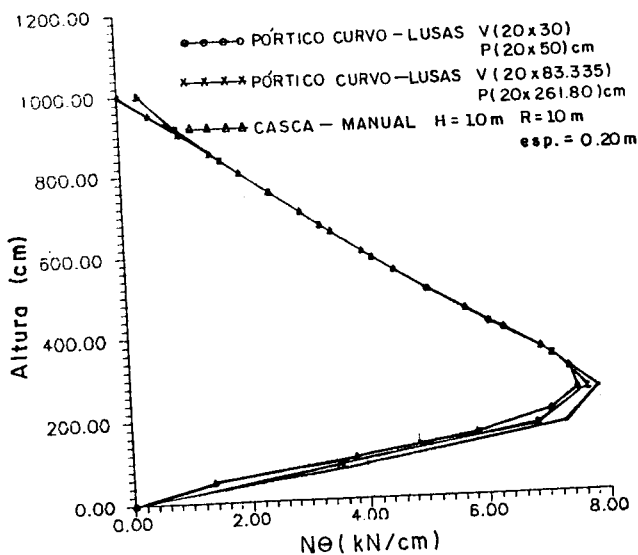


Fig.38a Comparação  $N_\theta$   
(reservatório)

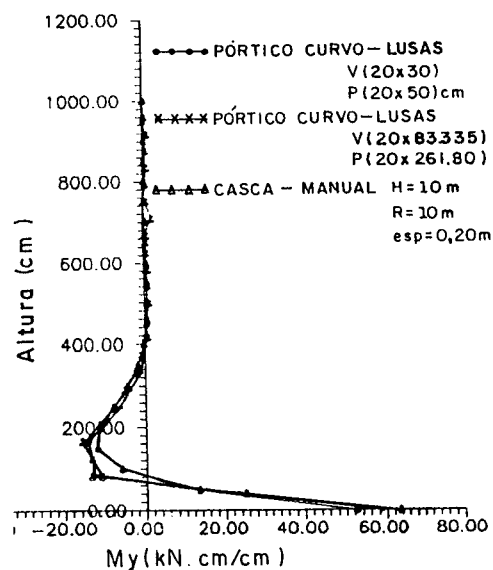
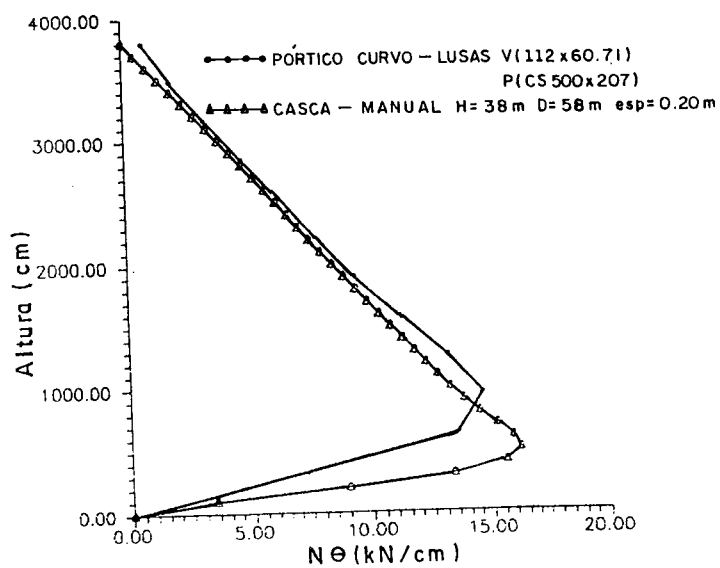
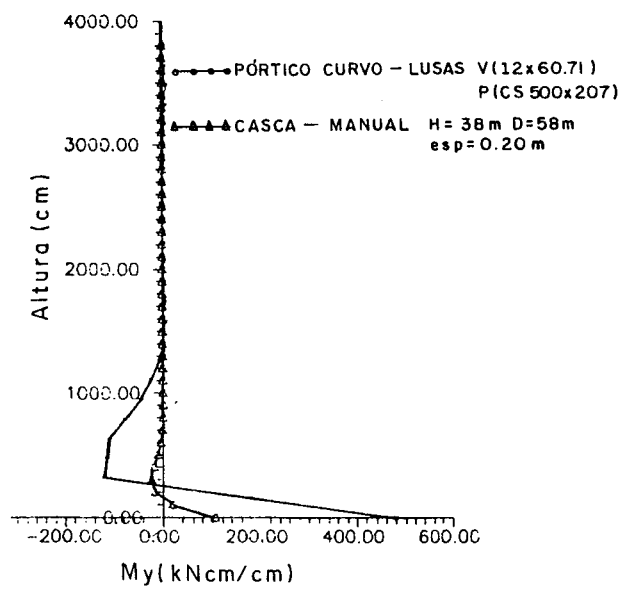


Fig.38b Comparação  $M_y$   
(reservatório)

Fig.39a Comparação  $N_\theta$  (silo)Fig.39b Comparação  $M_y$  (silo)

## 6 CONCLUSÕES

No Brasil, assim como em vários países do mundo, existem problemas quanto ao armazenamento de grãos de maneira geral. De fato, é comum, em determinadas regiões do país, a perda total ou parcial da produção devido a condições inadequadas para o armazenamento por longo período.

Neste trabalho optou-se por fazer um estudo sobre os silos para açúcar cristal branco a granel, particularmente por não existir esta forma de armazenamento no país.

Preocupou-se inicialmente com as condições que o açúcar deve apresentar para uma adequada armazenagem por longo período, principalmente no sentido de se evitar aglomeração do produto.

Em seguida, tratou-se das condições que o silo deve apresentar para que não haja alterações nas características do material armazenado que possam levá-lo à deterioração. Entre tais condições devem-se garantir, basicamente, o isolamento e ventilação adequados.

No que se refere à previsão teórica das pressões que se desenvolvem devidas ao material armazenado foram consultadas as indicações de algumas normas internacionais.

Essas normas são apoiadas em duas teorias: a de Janssen(1895) para a estimativa das cargas estáticas devido ao material ensilado e a de Jenike(1968,1977) para a estimativa das cargas com origem na ação dinâmica do fluxo de material nas situações de carregamento e descarregamento.

Embora todas as normas façam uso das mesmas teorias isto não implica que apresentem as mesmas pressões para um determinado produto a armazenar, pois cada uma delas recomenda valores diferentes para os parâmetros envolvidos, em muitos casos bastante conservativos.

No texto optou-se por detalhar as recomendações da norma alemã, recentemente revista com base em observações feitas em silos construídos.

Com respeito aos parâmetros de interesse do material, o trabalho apresenta os resultados da determinação da densidade, ângulo de atrito do material e ângulo de atrito com a parede, a partir de ensaios realizados em laboratório. Observou-se uma certa diferença entre os valores indicados pelas normas e os obtidos nos ensaios.

Realizou-se um breve estudo sobre a análise estrutural dos silos de superfície, considerando-se uma análise estática em teoria de primeira ordem do efeito da pressão radial exercida pelo material ensilado.

Preocupou-se em avaliar a distribuição dos esforços internos solicitantes a partir do confronto entre as análises da estrutura como casca, como sólido axissimétrico, e através da análise discreta tratando a estrutura como um conjunto de pilares e vigas curvas, os dois últimos casos baseando-se no método dos elementos finitos.

Concluiu-se, com base nos exemplos estudados, que o silo discretizado pode ser pré-avaliado com o auxílio da solução como casca, a qual permite um cálculo bastante expedito, considerando-se áreas de influência para a determinação dos esforços nas vigas curvas. Naturalmente o aprofundamento desta questão e de outras, como a estabilidade estrutural, requerem estudos complementares que fazem parte das perspectivas de continuidade deste trabalho.

Finalmente é importante observar que todo o estudo dos silos para açúcar, do ponto de vista do isolamento, aquecimento e ventilação foi efetuado com base em recomendações adotadas em países onde as variações de temperatura, ar e umidade apresentam determinadas características muitas vezes diferentes das nossas. Tendo-se em vista as nossas condições climáticas é muito provável que a tecnologia envolvida nos nossos silos seja mais simples.

Estes fatores deverão ser observados e testados num primeiro silo de grande porte a ser construído e devidamente instrumentado em usina na região de Ribeirão Preto. Daí poderá surgir a sequência natural para as pesquisas envolvendo também os aspectos relativos à distribuição das pressões e avaliação dos esforços solicitantes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 313 (1977). AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. "Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos and bunkers for storing granular materials". (ACI 313-77). Revised 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA E NORMAS TÉCNICAS (1988): "NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações". Rio de Janeiro.
- ABR ENGINEERING (1981). "Beet sugar factory and white sugar preservation". prospectus.
- BILLINGTON, D.P. (1965). "Thin shell concrete structures". New York, McGraw-Hill.
- BMHB (1985). BRITISH MATERIALS HANDLING BOARD. "Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers". Inglaterra. 101p.
- BRAECKMAN, M. (1975). "White sugar storage in silos". In: ANNUAL MEETING OF SUGAR INDUSTRY TECHNOLOGISTS, 34., Savannah, Georgia, 1975. Proc. p.108-116.
- BREBBIA, C.A.; CONNOR, J.J. (1975). "Métodos de los elementos finitos en la ingeniería civil". Madrid, Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- BRUHN, E.F. (1973). "Analysis and Design of Flight Vehicle Structures". USA, Tri-State Offset.
- BUDICEK,L.; MIKUS,O.; GEBLER,J.; TICHÁ, B. (1980). "Sugar storage in silos I". Listy cukrov., v. 96, p.112 - 116
- BUDICEK,L.; MIKUS,O.; GEBLER,J. (1980). "Sugar storage in silos II" . Listy cukrov., v. 96, p.157-161.
- BUDICEK,L.; MIKUS,O. (1980). "Sugar storage in silos III" . Listy cukrov., v. 96, p. 202-206.



- BUDICEK,L.; MIKUS,O.; HOFFMAN,P. (1981). "Sugar storage in silos IV". Listy cukrov., v. 97, p.25-30.
- BUDICEK, L.; MIKUS, O.; SMID, J. (1981). "Sugar storage in silos V" . Listy cukrov. 97, p.278-282.
- BUDICEK,L.; MIKUS,O.; NEUZIL,L. (1981). "Crystal sugar treatment for storage in silos". In: INTERNATIONAL CONGRESS CHISA 81, 28., Prague.
- CALIL Jr., C. (1982). "Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos". Tese (Doutorado) - Escola Técnica Superior de Engenheiros Industriais de Barcelona, Universidade Politécnic de Barcelona.
- CALIL Jr., C. (1990). "Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais". São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CFBC (1983). CANADIAN FARM BUILDING CODE. Associate Committee on the National Building Code. National Research Council of Canada. Ottawa. 25p.
- CHAPMAN, F.M. (1971). Z.Zuckerind. v. 21, p. 12-17.
- COOK,R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E. (1989). "Concepts and applications of finite element analysis". 3. ed. New York, John Wiley & Sons. 630 p.
- DELGADO, A.A. , CESAR, M.A.A. (1977). "Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana". Piracicaba, ESALQ/ Departamento de Engenharia Rural. v.3
- DIN 1055. DEUTSCH INDUSTRIE NORMEN. Blatt 1.
- DIN 1055 (1987). DEUSTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG.Lastannahmen für Bauten, Blatt 6, "Lasten in Silozellen". Alemanha. 12p.
- FIP/ISO. (1988). FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE. INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. "Recommendation for concrete silo design". Norma Européia.
- FMW (1981). FÖRDERANLAGEN UND MASCHINEN GmbH, WILHELMHAVE. Arbeitspropramm. Wien Blatt 40.0101.
- FORTES FILHO, J. (1985). "Uma introdução ao estudo dos silos". Dissertação (Mestrado) - São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- GILJAM, L.L. (1970). Polytech.Tijdschr.ed Procestechniek p.153-160.

- HIMMELBLAU, D.M.; BISCHOFF, K.B. (1968). "Process analysis and simulation - deterministic systems". New York, John Wiley a Sons.
- JANSSEN, H. A. (1895). Versuche uber Getreidedruck in Silozellen. "Zeischrift des vereines Deutscher Ingenieure". v.29, n.35. p. 1045-9.
- JENIKE, A. W. (1964). "Storage and flow of solids". Bulletin 123. Utah Engineering Experiment Station. University of Utah. Salt Lake City. Utah. USA. 197p. .
- JENIKE, A.W.; JOHANSON, J.R. (1969). "On the theory of bin loads". Journal of Engineering for Industry.
- JOURNAL OF THE STRUCTURAL DIVISION (1967). Proceedings of the American Society of Civil Engineers. February.
- LENCZNER, D. (1963). "An investigation into the behaviour of sand in a model silo". The Structural Engineer, v.41, n.12. p. 389-398. December.
- LUSAS. (1992). "Theory manual". FEA LIMITED.
- MILANI, A.P. (1993). "Determinação das propriedades de produtos armazenados para projeto de pressões e fluxo em silos". Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- MIKUS, O. ; BUDICEK, L. (1986). "Sugar storage in silos". Research and Development Institute of the Sugar Industry. Prague.
- NCSE (1987). NATIONAL COMMITTEE ON STRUCTURAL ENGINEERING. "Guidelines for the assessment of loads on bulk solids containers". The Institution of Engineers Australia, Austrália. 59p.
- NIJHOT, H. H. ; RADEMACHER, F. J. C. (1989). "The Euro-silo: a remote controlled under cover storage-robot for huge quantities of bulk solids". University of Twente, The Netherlands.
- RADEMACHER, F. J. C. (1983). "On the storage of free flowing and non free flowing bulk solids; some new developments". University of Twente, Rotterdam., The Netherlands. 55p.
- RAVENET, J. C. (1977). "Silos: teoria, investigacion, construccion". Barcelona. Editores Técnicos Asociados.
- RAVENET, J. C. (1974). "Sobrepresiones en las paredes de los silos debidos al vaciado y efectos producidos por la forma de la tolva y exentricidade des vaciado". Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Barcelona., Barcelona.

REVISTA SUGAR & AZUCAR. (1987). Febr. and Nov.

REVISTA SILOS, HOPPERS, BINS & BUNKERS (1988).  
Number 1. February.

SNBATI (1975). SYNDICAT NATIONAL DU BÉTON ARMÉ et TECHNIQUES INDUSTRIALISÉES. "Reglas para proyecto y calculo de silos de hormigon". França. 47p.

SCHNEIDER, G. (1969). Zuckerind, v. 22, p. 473-479.

SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TRANSPORTE E ARMAZENAGEM DE AÇÚCAR, Piracicaba, 1985.

SORMOVÁ, S. (1982). "Study of some properties of crystal sugar on the agglomeration". Thesis. Univ. of Chem. Techn., Prague.

WASMUND, R. (1977). Z.Zuckerind, v. 27, p. 581-589.

WIJK, I. L. A. van (1991). "Bulk and solids, handling: Euro type mammoth silos". University of Twente. Enschede. The Netherlands.

ZAVORONKOV, N.M. ; FYRMER, I.E. (1952). Trudy Mosk. Chim. Technolog. Institute, 27, p.91-95.

ZIENKIEWICZ, O.C. ; TAYLOR, R.L. (1991). "The finite element method". 4.ed. London, McGraw-Hill. 2v.