

**ESTUDO DE SILOS METÁLICOS PRISMÁTICOS
PARA FÁBRICAS DE RAÇÃO**

JOSÉ WALLACE BARBOSA DO NASCIMENTO

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlito Calil Junior

**São Carlos
1996**

**DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais
À minha esposa Márcia Verônica
Ao meu filho Fillipe
À minha filha Ana Luiza

... Cantar a beleza de ser um eterno aprendiz ...

Luiz Gonzaga Jr. (Gonzaguinha)

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Carlito Calil Junior pela orientação segura, a amizade e sinceridade, durante todo o período deste trabalho.

À Universidade Federal da Paraíba em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola por me haver concedido a oportunidade para a realização deste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pela Bolsa de Estudo concedida.

Ao Laboratório de Madeiras e Estrutura de Madeiras (LaMEM) da Escola Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Aos Professores Sérgio P. B. Proença e José Jairo de Sáles, pelo apoio nas análises.

Aos colegas Francisco Carlos Gomes e Ernani Carlos de Araújo pelo convívio e amizade.

Ao colega Luiz Fernando Loureiro Ribeiro pela colaboração na utilização do software LUSAS.

Ao Sr. Sílvio Antonio Ferro pela colaboração na realização dos ensaios de propriedades físicas e pela amizade.

Aos Srs. José Francisco Nascimento e Jaime Galindo pela colaboração nos ensaios de resistência e rigidez dos painéis.

A Lisete Pereira da Silva pelo incentivo e apoio dispensado.

À oficina Mecânica da escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo pela construção dos painéis.

Aos funcionários do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras (LaMEM) pela atenção e amizade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE QUADROS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO	1
2 EVOLUÇÃO TÉCNICA DAS FÁBRICAS DE RAÇÕES	4
2.1 Contextualização	4
2.2 Descrição dos Elementos Constituintes de uma Fábrica de Rações	5
2.3 Antigas Fábricas de Rações	8
2.4 Moderna Fábrica de Rações	9
2.4.1 Inglaterra	10
2.4.1.1 Tipos de Fábricas	10
2.4.1.2 Fábrica de Rações mais Econômica	13
2.4.2 Espanha	15
2.4.3 Estados Unidos	27
2.4.4 Israel	27
2.5 Conclusões	28
3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS RAÇÕES E SEUS COMPONENTES PARA O PROJETO DE FLUXO E DE PRESSÕES DE SILOS METÁLICOS ELEVADOS	29
3.1 Metodologia Utilizada	30
3.2 Determinação da Densidade em Função da Consolidação	31
3.3 Granulometria	32
3.4 Determinação do Lugar Geométrico Instantâneo de Deslizamento (IYL)	32

3.4.1 Amostras Para a Determinação do IYL	32
3.5 Ensaio Realizados	33
3.5.1 Ângulo de Atrito Interno(Φ_i)	34
3.5.2 Efetivo Ângulo de Atrito Interno(δ)	34
3.5.3 Tensão Máxima de Consolidação (σ_m)	34
3.5.4 Resistência ao Deslizamento (σ_c)	34
3.6 Determinação do Lugar Geométrico Instantâneo de deslizamento com a Parede (IWYL)	35
3.7 Ensaio Realizados	36
3.8 Função Fluxo (FF)	36
3.9 Fator Fluxo (ff)	36
3.10 Resultados e Discussões	36
3.10.1 Granulometria	36
3.10.2 Propriedades Físicas das Rações e Alguns de seus Ingredientes	38
3.11 Conclusões	39
4 RECOMENDAÇÕES PARA O PROJETO DE FLUXO E DE AÇÕES EM SILOS METÁLICOS VERTICAIS	41
4.1 Propriedades dos Produtos Armazenados	42
4.2 Tipos de fluxo	42
4.3 Pressões em Silos	45
4.3.1 Campo de Aplicação	46
4.3.2 O Valor de K (relação entre as pressões horizontal e vertical)	46
4.3.3 Pressões de Carregamento	46
4.3.4 Pressões de Descarregamento Central	48
4.3.5 Pressão Não Uniforme	49
4.3.6 Pressões Adicionais em Silos com Fluxo de Massa	50
4.3.7 Pressões na Descarga Excêntrica	51
4.4 Pressões Sobre Fundo Plano ($\alpha \leq 20^\circ$)	51
4.5 Pressão Normal às Paredes da Tremonha ($\alpha > 20^\circ$)	51
4.5.1 Pressão normal devido ao produto dentro da tremonha	51
4.5.2 Pressão do Produto Sobre a Tremonha	51
4.6 Orientação no Projeto Estrutural de Silos Metálicos	53
4.7 Informações a Serem Fornecidas ao Projetista e ao Usuário	56
4.7.1 Objetivos e Requisitos	56
4.7.2 Informações a Serem Fornecidas pelo Usuário	56
4.7.2.1 Materiais a Serem Manipulados	57

4.7.2.2 Responsabilidade do Projetista	57
4.7.3 Informações a Serem Fornecidas pelo Projetista	58
4.7.3.1 Manual de Projeto e Operação	58
4.7.3.2 Projeto Para a Integridade do Fluxo	58
4.7.3.3 Projeto Para a Integridade da Estrutura	59
4.7.3.4 Acesso, Inspeção, Limpeza e Manutenção	60
4.7.3.4.1 Acesso	60
4.7.3.4.2 Inspeção.....	60
4.7.3.4.3 Limpeza	60
4.7.3.4.4 Manutenção	60
4.7.3.4.5 Segurança	61
4.8 Conclusões	61
5 CLASSIFICAÇÃO DAS AÇÕES, COMBINAÇÕES E FATORES	
DAS AÇÕES	62
5.1 Ações Permanentes	62
5.2 Ações Variáveis	62
5.3 Ações Excepcionais	63
5.4 Determinação das Ações Variáveis Normais Devidas ao Produto	
Armazenado	63
5.4.1 Densidade do Produto Armazenado	63
5.4.2 Ângulo de Atrito com a Parede	63
5.4.3 Efetivo Ângulo de Atrito Interno	63
5.4.4 Consistência das Propriedades Físicas dos Produtos	64
5.4.5 Pressões nas Paredes dos Silos	64
5.4.6 Ações em Contensões Laterais	64
5.4.7 Cargas nos Elementos Estruturais Internos aos Silos	65
5.4.8 Pressão ou Sucção Interna de Gás	65
5.4.9 Ação do Vento.....	65
5.5 Determinações das Ações Variáveis Especiais	65
5.5.1 Diferencial de Temperatura	65
5.5.2 Ações Devidas à expansão do Produto Armazenado	66
5.6 Determinação das Ações Excepcionais	67
5.6.1 Ações de Impacto de Veículo	67
5.6.2 Pressão Causada pela Explosão Interna	67
5.7 Combinações das Ações	67
5.8 Fatores de Ações	69

5.9 Conclusão	70
6 SILOS METÁLICOS PRISMÁTICOS PARA ARMAZENAMENTO DE RAÇÕES	73
6.2 Dimensionamento das Paredes Conformadas Horizontalmente.....	76
6.2.1 Espessuras de Chapas nas Paredes de Ondas Trapezóidal	76
6.2.1.1 Flexão Geral Sob as Paredes.....	77
6.2.1.2 Flexão Obliqua Sobre a Parede	78
6.2.1.3 Flexão Local.....	80
6.2.2 Espessuras de Chapas nas Paredes de Ondas Ziguezague	80
6.2.2.1 Flexão Geral Sobre as Paredes.....	80
6.2.2.2 Flexão Obliqua Sobre a Parede com Onda Ziguezague	81
6.2.2.3 Flexão Local	83
6.3 Dimensionamento das Colunas dos Silos Multicelulares	83
6.3.1 Colunas de Canto (C_1).....	83
6.3.2 Colunas de Borda (C_2).....	84
6.3.3 Colunas Central (C_3)	84
6.4 Esforços nas Paredes de Silos Prismáticos	84
6.4.1 Determinação dos Esforços de Trações nas Paredes Verticais	85
6.4.2 Determinação dos Momentos Fletores nas Paredes dos Silos	86
6.4.2.1 Momento nos Cantos	86
6.4.2.2 Momento Fletor no Meio do Vão da Parede	87
6.4.3 Determinação dos Esforços nas Paredes do Silo Segundo Troistky	87
6.4.3.1 Teoria de Pequenas Deformações	87
6.4.3.2 Teoria de Grandes Deformações	89
6.4.4 Determinação dos Momentos Fletores nas Paredes dos Silos Calculado pelo Método dos Deslocamentos Segundo GRAY (1973)	90
6.4.4.1 Células Quadradas Isoladas	90
6.4.4.2 Células Retangulares Isoladas	90
6.4.5 Células múltiplas	90
6.4.6 Caso Geral Para Três Células	92
6.5 Colunas de Sustentação Para Silos Prismáticos	98
6.5.1 Tipos de Colunas	98
6.5.2 Cargas	98
6.5.3 Ação do Vento	99
6.5.4 Forças Axiais nas Colunas sob Cargas Verticais	100
6.6 Momento Fletor nas Colunas sob Ação do Vento	102

6.6.1 Coluna de Sustentação com Apoio Articulado	102
6.6.2 Colunas de Sustentação Engastadas	103
6.7 Aplicação do Método simplificado Para Cálculo de Colunas de Sustentação de Silos Prismáticos Segundo GRAY (1973)	104
6.7.1 Uma Linha de Colunas	105
6.7.2 Duas Linhas de Colunas	105
6.7.3 O Pórtico Com Três ou Mais Linhas de Colunas	108
7 ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DOS PAINÉIS COM CONFORMAÇÃO ZIGUEZAGUE HORIZONTAL	110
7.1 Materiais e Métodos	110
7.1.1 Análise Teórica	110
7.1.2 Procedimento Experimental	111
7.1.2.1 Descrição dos Ensaios	111
7.1.2.2 Painéis	111
7.1.2.3 Anel Dinamométrico	113
7.1.2.4 Extensômetros Elétricos	114
7.1.2.5 Transdutores Diferenciais	116
7.2 Ensaio Preliminar	117
7.3 Carregamento Utilizado	117
8 RESULTADOS E DISCUSSÕES	118
8.1 Deslocamentos	119
8.2 Tensões	121
8.2.1 Painel 1	121
8.2.2 Painel 2	122
CONCLUSÕES	128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
REFERÊNCIAS CONSULTADAS	135
ANEXO A	144
ANEXO B	146
ANEXO C	148
GLOSÁRIO	150

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Esquema de uma fábrica moderna de ração	6
FIGURA 02 - Sistema de recepção das antigas fábricas de ração	8
FIGURA 03 - Antiga fábrica de ração	9
FIGURA 04 - Fábricas de rações mais econômicas	10
FIGURA 05 - Vista parcial de uma fábrica de ração	12
FIGURA 06 - Vista de uma moderna fábrica de ração	13
FIGURA 07 - Diagrama de uma fábrica moderna e econômica	14
FIGURA 08 - Planta de uma fábrica de ração	16
FIGURA 09 - Instalação da fábrica citada na Figura 08	17
FIGURA 10 - Grupo de tremonhas para expedição de ração	19
FIGURA 11 - Células de dosificação com pesagem automática	20
FIGURA 12 - Extrator de múltiplo efeito	21
FIGURA 13 - Instalação de uma fábrica de ração	21
FIGURA 14 - Expedição de ração a granel diretamente sobre o caminhão	22
FIGURA 15 - Fábrica de ração a granel	22
FIGURA 16 - Fase final da instalação de uma fábrica de ração	23
FIGURA 17 - Fábrica de ração apta a entrar em funcionamento	24
FIGURA 18 - Fábrica de ração com silos multicelulares, com células octogonais .	24
FIGURA 19 - Fábrica totalmente vertical de silos multicelular com células quadradas	25

FIGURA 20 - Detalhes do revestimento externo de uma fábrica de ração	26
FIGURA 21 - Fábricas com silos prismáticos metálicos e cilíndricos de concreto ..	27
FIGURA 22 - Tipos de fluxo	45
FIGURA 23 - Determinação gráfica do tipo de fluxo	45
FIGURA 24 - Pressão adicional no fluxo de massa	50
FIGURA 25 - Pressão normal às paredes da tremonha com produto dentro da tremonha	52
FIGURA 26 - Pressão normal à tremonha devido ao produto sobre a tremonha	53
FIGURA 27 - Painel de conformação trapezoidal	73
FIGURA 28 - Painel de conformação ziguezague	73
FIGURA 29 - Onda trapezoidal com eixo YY	76
FIGURA 30 - Onda trapezoidal com eixo ZZ	77
FIGURA 31 - Perfil com conformação ziguezague com eixo YY	79
FIGURA 32 - Perfil da onda ziguezague com o eixo ZZ	80
FIGURA 33 - Tipos de colunas existentes em um silo multicelular	81
FIGURA 34- Sistema estrutural de um silo com paredes de chapas lisas	83
FIGURA 35 - Forças de tração existentes no corpo e tremonha em silo prismático .	83
FIGURA 36 - Forças de tração atuantes e silos prismáticos	84
FIGURA 37 - Diagrama de momentos fletores	85
FIGURA 38 - Placa com bordas engastadas	86
FIGURA 39 - Placa com bordas simplesmente apoiadas	87
FIGURA 40 - Parede do silo trabalhando a flexo-tração	88
FIGURA 41 - Distribuição de momentos e rotação nos cantos	89
FIGURA 42 - Silo multicelular com diagrama obtido pelo método dos esforço	89
FIGURA 43 - Silo multicelular em linha com diagrama obtido pelo método dos esforços	92
FIGURA 44 - Silo multicelular com células carregadas alternadamente	93

FIGURA 45- Propagação de momento devido a uma célula cheia no centro de um silo multicelular	93
FIGURA 46 - Silos prismáticos multicelulares de seções diferentes	95
FIGURA 47 - Tipos de coluna de sustentação e suas respectivas áreas de influências	99
FIGURA 48 - Excentricidade da carga vertical devido a ação do vento	100
FIGURA 49 - Colunas de sustentações articuladas para silos multicelulares	101
FIGURA 50 - Coluna de sustentações engastado para sustentação de silos	102
FIGURA 51 - Caso mais simples de colunas de sustentação, em linha	104
FIGURA 52 - Duas linhas de colunas de sustentação articuladas	105
FIGURA 53 - Colunas de sustentação engastadas com elementos horizontais como os respectivos pontos de inflexão	106
FIGURA 54 - Pórtico com três linhas de colunas	108
FIGURA 55 - Malha construída para análise no LUSAS	110
FIGURA 56 - Painel construído para realização dos ensaios de rigidez	112
FIGURA 57 - Vista dos painéis propostos para fábricas de ração	112
FIGURA 58 - Pontos de aplicação da força de tração	113
FIGURA 59 - Vista do sistema de tração utilizado	113
FIGURA 60 - Pontos onde foram instalados os extensômetros elétricos	114
FIGURA 61 - Instalação dos extensômetros nos painéis	114
FIGURA 62 - Pontos onde foram instalados os transdutores diferenciais (LVDTs).	115
FIGURA 63 - Instalação dos transdutores diferenciais (LVDTs) sob os painéis	115
FIGURA 64 - Colchão de areia sobre o painel	117
FIGURA 65 - Placa de madeira sobre o colchão de areia	117
FIGURA 66 - Detalhe da onda central e os pontos de análise.....	119
FIGURA 67 - Deslocamento nos 5 pontos da onda central do painel 1	120
FIGURA 68 - Deslocamento nos 5 pontos da onda central do painel 2	120
FIGURA 69 - Tensões determinadas no ponto 2 do painel 1	121

FIGURA 70 - Tensões determinadas no ponto 4 do painel 1	122
FIGURA 71 - Curvas de tensões determinadas para o ponto 2 do painel 2	123
FIGURA 72 - Curvas de tensões determinadas para o ponto 4 do painel 2	124
FIGURA 73 - Vista da perda de estabilidade local da onda central do painel 2	125
FIGURA 74 - Tensões próximas ao ponto 1 do painel 2	125
FIGURA 75 - Tensões próximas ao ponto 3 do painel 2	126
FIGURA 76 - Tensões próximas ao ponto 5 do painel 2	126

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - Níveis de cargas utilizados nos ensaios	34
TABELA 02 - Granulometria das rações e seus ingredientes	39
TABELA 03 - Propriedades físicas das rações e alguns de seus ingredientes	39
TABELA 04- Propriedades dos produtos armazenados segundo a DIN 1055	43
TABELA 05 - Seção transversal e seus respectivos raios hidráulicos	47
TABELA 06 - Emprego dos limites do ângulo de atrito interno (ϕ_i), atrito com a a parede (ϕ_w) e a relação das pressões horizontal e vertical (K) ...	64
TABELA 07 - Classificação e combinações das ações	68
TABELA 08 - Coeficiente de ponderação dos estados limites últimos para utilização em projetos de silos em função dos tipos de ações	70
TABELA 09 - Coeficientes de proporcionalidade de placas engastadas	86
TABELA 10 - Coeficientes de proporcionalidade para placa simplesmente apoiada	86

LISTA DE QUADROS

QUADRO 01 - Resumo dos custos para fábrica de ração com capacidade para 30 ton/h	11
QUADRO 02 - Resumo dos custos de implantação de um fábrica de ração para 30 ton por hora - solução simplificada	15
QUADRO 03 - Resumo dos custos de implantação de um fábrica de ração para 20 ton por hora - solução simplificada	18
QUADRO 04 - Disposições contrutivas dos silos multicelulares prismáticos	74

LISTA DE SÍMBOLOS

- ν - coeficiente de Poisson
 α - ângulo de inclinação da parede da tremonha com o plano horizontal
 ∞ - coeficiente de proporcionalidade para a chapa
 γ - densidade do produto armazenado
 μ - maior coeficiente de atrito do produto com a parede ($\text{tg}\phi_w$)
 α_1 - ângulo que forma o perfil inclinado com a vertical, em graus
 σ_c - resistência de consolidação
 ϕ_e - efetivo ângulo de atrito do produto armazenado
 ϕ_i - ângulo de atrito interno do produto armazenado
 ϕ_{il} - menor ângulo de atrito interno do produto armazenado
 ϕ_{iu} - maior ângulo de atrito interno do produto armazenado
 σ_m - tensão máxima de consolidação
 ϕ_w - ângulo de atrito do produto armazenado com a parede do silo
 ϕ_{w1} - menor ângulo de atrito do produto armazenado com a parede do silo
 ϕ_{wu} - maior ângulo de atrito do produto armazenado com a parede do silo
 a - profundidade da onda
 C - coeficiente de sobre pressão descarregamento central
 C_k - coeficiente de sobre pressão não uniforme de descarregamento
 d - diâmetro do silo, página 49
 d_c - diâmetro incrito do silo
 E - módulo de elasticidade do material da parede
 F - força concentrada devido a ação do vento
 F_{π} - força de atrito total em kg_f sobre a célula do lado L
 f_y - tensão admissível do material da parede
 H' - comprimento de uma onda, em cm
 H'' - comprimento de uma e meia onda, em cm
 h - altura do corpo do silo na página 46
 I - momento de inércia
 K - relação entre a pressão horizontal e vertical
 K_{su} - razão da pressão horizontal e vertical, após a dilatação
 L - lado do silo
 N_{ten} - atrito vertical por unidade de circunferência

- P_{hc} - pressão horizontal de carregamento
 P_{hd} - pressão horizontal de descarregamento
 P_n - pressão normal às paredes da tremonha
 $P_{q,sw}$ - força de atrito vertical induzido pela dilatação
 P_s - pressão adicional na transição em silos com fluxo de massa
 P_{sw} - pressão devido a dilatação do produto
 P_{vc} - pressão vertical de carregamento
 P_{vd} - Pressão vertical de descarregamento
 P_w - pressão de atrito na parede da tremonha
 P_{wc} - pressão de atrito no carregamento
 P_{wd} - pressão de atrito no descarregamento
 r - raio do silo
 R - raio hidráulico
 S - seção da onda
 S_1, S_2, S_3 - área efetiva das colunas, página 82
 t - espessura da parede do silo
 T_a e T_b - trações atuando na parede por unidade de profundidade y
 W_{xx} - momento resistente da chapa segundo o eixo XX , em cm^3
 W_{yy} - momento resistente da chapa segundo o eixo YY , em cm^3
 W_{zz} - momento resistente da chapa segundo o eixo ZZ , em cm^3
 z - profundidade abaixo da superfície efetiva
 z_0 - profundidade da superfície efetiva
 I_{yy} - momento de inércia segundo o eixo YY
 I_{zz} - momento de inércia segundo o eixo ZZ
 k_i - coeficiente de rigidez
 L_i - comprimento do perfil inclinado
 L_c - comprimento do perfil reto
 M_{xx} - momento fletor segundo o eixo XX
 M_{yy} - momento fletor segundo eixo YY
 M_{zz} - momento fletor segundo eixo ZZ

RESUMO

Nascimento, J. W. B. Sobre o estudo de silos metálicos prismáticos para fábricas de ração. São Carlos, 1996. 152p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Esta pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de fornecer subsídios técnicos para projetos de silos prismáticos metálicos para uso industrial, mais especificamente para fábricas de ração, como também contribuir para o desenvolvimento da futura norma brasileira específica para projeto de ações e fluxo em silos. Apresenta-se uma análise da evolução técnica das fábricas de ração no mundo até os dias de hoje com a concepção atual, atendendo às exigências de mercado que, a cada dia, torna-se mais competitivo e necessita do controle de qualidade total para preencher os pré-requisitos das normas nacionais e internacionais, já que o país está abrindo o mercado ao capital externo. Determinou-se as propriedades físicas de dois tipos de ração e de seus ingredientes, que são utilizados na maioria das rações fabricadas no país. Estas são as primeiras propriedades determinadas no país, com a máquina TSG70-140 conhecida em nível mundial como "Jenike Shear Cell" e recomendada pela maioria das normas de ações em silos existentes no mundo, com a finalidade da adoção dos parâmetros necessários para o cálculo das ações e fluxo de produtos armazenados. Foram estudados os painéis de construção de silos prismáticos para fábrica de ração com conformação zigzague na horizontal e inclinação de 20° com o plano vertical, para aumentar a inércia das paredes e não acumular ração, que provocaria deterioração e/ou infestação de fungos e bactérias os quais contaminariam as rações, provocando danos econômicos aos fabricantes e aos criadores de animais. Foram feitos ensaios para determinar a rigidez e a resistência dos painéis conformados em zigzague, em escala natural, que formaram as paredes dos silos prismáticos para a construção modular. Os resultados experimentais foram comparados com os obtidos com as teorias simplificadas propostas para o cálculo estrutural de silos e com o software estrutural LUSAS, que utiliza o métodos dos elementos finitos. A comparação dos resultados teóricos com os obtidos experimentalmente mostram que a teoria de TROITSKY (1988) apresenta boa correlação, portanto é adequada para o dimensionamento dos painéis.

Palavras-chave: Silos; Prismáticos; Metálicos; Projeto; Propriedades físicas

ABSTRACT

Nascimento, J. W. B. Study steel prismatic silos for ration industry. São Carlos, 1996. 152p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This research was developed purposing to generate technical hints for the design of steel prismatic silos for industrial use, especially in the powder industry, as well as to contribute for the set up latter on of a Brazilian standard specifically for the design of actions and flow in silos. The world powder industry technological evolution up to now was evaluated, trying to take care of the trade demand, that always becomes more competitive, and thus requiring a total quality control to match the national and international standards, mostly because the Brazilian trade getting so much attractive to the foreign capital. It was determined the physical properties of the ingredients of two kinds of powder, which are used in most of the powder made in Brazil. These are the first properties evaluated in Brazil with the TSG70-140 machine, that is known over the world as "Jenike Shear Cell", and is recommend by most of the silo action standard existing in the word, with the purpose of adopting the necessary parameters to calculation of action and flow of materials storage. It was studied construction panels of prismatic silo for powder industry, with zigzag conformation and a slope of 20° from the vertical plan to increase the wall inertia and do not accumulate powder, that it would cause deterioration and/or infestation of fungus and bacterias that would contaminate the powder resulting economical damage to manufacture and animal criator. It was done tests in to determine the rigidity and strength of the panels in full scale, that will make up the formed prismatic silo wall for modular construction. The experimental results were compared to simplified theories proposed to structural calculations of silos, and to the results given by the LUSA software which utilities finites elements. These comparisons showed that the theory of TROITSKY (1988) presents a good correlation, and so it is suitable for the panel design.

Keywords: Silos; Prismatic; Steel; Design; Physics Propiety

1 INTRODUÇÃO

O Brasil atualmente destaca-se no contexto mundial com a produção de frangos e suínos, ocupando a posição do principal exportador na América Latina. Esta produção depende essencialmente de ração industrializada; daí a importância do país possuir tecnologia de construção de silos para fábricas de ração. Atualmente a maioria ou, quase todas as fábricas brasileiras são do tipo horizontal; enquanto isto, nos países desenvolvidos, a predominância é de fábricas do tipo verticais com capacidade de até 150 toneladas por hora, para atender o mercado sempre crescente.

Desde o princípio da produção de ração, utilizaram-se silos para armazenamento de cereais e, posteriormente, silos para ração; atualmente com esta nova concepção de fábricas verticais, exigem-se estruturas multicelulares, tanto para armazenagem da matéria-prima, como da ração, pois sob os silos, instalam-se equipamentos de dosagem e pesagem para controle dos ingredientes da composição final do produto.

As fábricas de ração necessitam basicamente de dois tipos de armazenagem em silos: um para produtos granulares e o outro para produtos pulverulentos. O primeiro normalmente não apresenta problemas com relação ao fluxo, enquanto o segundo exige fluxo controlado.

As propriedades físicas dos produtos armazenados são muito importantes para o processamento dos sistemas de armazenagem durante o carregamento e o descarregamento.

No carregamento, pode ocorrer compactação e segregação. Durante o descarregamento, a formação de abóbadas estáveis sobre a boca de descarga pode acarretar sérios problemas de fluxo e problemas estruturais na instalação; a caída posterior dessas abóbadas dá origem à pressões muito elevadas sobre as paredes dos

silos e tremonhas. A formação do conduto de descarga provoca sérias segregações e avarias nos elementos mecânicos de descarga (RAVENET, 1983).

Todos esses problemas relatados podem, também, ocorrer numa célula corretamente projetada desde que as propriedades físicas dos produtos armazenados variem em proporção acima do previsto. Daí, a importância de se determinarem os limites superior e inferior dessas propriedades para se obter um projeto funcional.

Neste estudo são apresentadas as propriedades físicas de duas rações e seis principais ingredientes, que são os mais utilizados pela maioria dos fabricantes brasileiros. Estas são as primeiras propriedades publicadas no país, determinadas na máquina de ensaio "Jenike Shear Cell" recomendada pela maioria das normas existentes no mundo.

Infelizmente, ainda é muito comum encontrar-se projetistas que seguem o princípio de cálculo estrutural de silos idêntico ao de reservatório de líquidos. Esta suposição é incorreta porque os sólidos podem transmitir tensão de cisalhamento sob condição estática (ângulo de atrito maior que zero) fato que não ocorre com os líquidos; além de que, produtos sob o efeito de pressão se compactam e são capazes de formar arcos estáveis sobre a boca de descarga.

Problemas em projetos de silos começaram a ser discutidos a partir de 1895, quando Janssen publicou as expressões para o cálculo das pressões nas paredes e no fundo dos silos, levando em consideração que parte do peso do produto armazenado era transmitido por atrito às paredes.

Essa teoria serviu como base para as primeiras normas de cálculos das ações em silos e as pesquisas posteriores que ainda se realizam. Alguns anos depois foi reavaliada, diante das inúmeras falhas apresentadas em muitos silos, devido ao processo de descarga. Na década de cinquenta se investigaram profundamente as situações de descargas e o comportamento estrutural dos silos, mantendo-se a teoria de Janssen com algumas adaptações e, abandonando-se, progressivamente, as demais (AYUGA, 1995).

Na década de oitenta, houve uma revisão em quase todas as normas internacionais, incorporando-se os últimos avanços técnicos, com uso da teoria de Janssen generalizada e complementada com trabalhos posteriores. O método dos elementos finitos foi bastante utilizado para análise teórica dessas estruturas, juntamente com o estudo da determinação das propriedades físicas dos produtos.

A norma DIN 1055 (1987) é atualmente a mais utilizada para o cálculo das ações e fluxo em silos, pois sofreu várias revisões, devido ao grande número de acidentes ocorridos com a utilização das versões anteriores.

Atualmente, tem-se diversificado os trabalhos de pesquisas, coexistindo três grupos claramente definidos: os que estudam as ações e deformações em silos reais e/ou em modelos reduzidos, os que se dedicam a melhorar os modelos do comportamento dos produtos (leis constitutivas dos produtos armazenados) e os que estudam os esforços nas estruturas (tanto estáticos como dinâmicos) normalmente com base no método dos elementos finitos.

No projeto de silos, as principais ações são provenientes dos produtos armazenados. Em projeto de silos como de qualquer outra estrutura é recomendado avaliar as combinações de ações possíveis de ocorrer durante sua vida útil, seguindo-se os grupos de ações definidos na NBR 8681 (1984). Com base nessa norma no Capítulo 5 foi feita uma classificação dos tipos de ações para cada grupo e, apresentando-se como sugestão, a matriz de combinações de ações e alguns coeficientes de ponderação dos estados limites últimos e de utilização para serem empregados nos projetos. Este tema é mais um dos que devem ser amplamente discutidos nos próximos anos para que possa constar na futura norma brasileira de ações e fluxo em silos a exemplo da norma australiana AS3774 (1990).

Silos industriais são comumente construídos nas periferias das grandes cidades, onde o valor imobiliário é significativo no custo de implantação das empresas. Essa é uma das causas por que os silos prismáticos são bastante utilizados, mesmo que possuam algumas desvantagens estruturais em relação aos cilíndricos. TROISTSKY (1980) afirma que, apesar dos silos com grande capacidade armazenadora serem muito utilizados nas indústrias, a literatura técnica contém pouquíssimas informações dos problemas apresentados em seus projetos.

RAVENET (1983;1990) foi um dos poucos pesquisadores que dedicou parte de seus livros ao estudo de silos prismáticos até por que como diretor técnico de uma indústria de silos, construiu várias centenas de silos prismáticos multicelulares para fábricas de ração e outras aplicações.

Este trabalho tem como objetivo principal fornecer subsídios técnicos para projetistas e usuários de silos prismáticos destinados ao armazenamento de ração e seus ingredientes, visando, também, contribuir com uma proposta para a futura norma brasileira de ações e fluxo em silos.

2 EVOLUÇÃO TÉCNICA DAS FÁBRICAS DE RAÇÃO

Realizar-se-á aqui uma análise descritiva e técnica da evolução ocorrida no projeto de fábricas de ração até se alcançar os mais altos índices de economia e rentabilidade. Far-se-á um estudo comparativo da estimativa de custos de diversos elementos que compõem uma fábrica de ração e tudo isso para diferentes projetos propostos na Inglaterra e na Espanha. Um dos objetivos dos fabricantes de ração é conseguir um produto alimentício suficientemente balanceado e rico em proteínas, calorias e vitaminas que, ao ser consumido pelos animais, proporcione boa conversão alimentar com conseqüente incremento da produção animal.

2.1 Contextualização

Não faz muitos anos que os pecuaristas alimentavam seus rebanhos com alimentos naturais, misturados de forma mais ou menos homogênea, mas sem estudar a fundo os componentes ricos em proteínas e minerais que oferressem o máximo de produção com um mínimo de alimento. Assim, foi evoluindo de forma progressiva a fabricação da ração que se denomina de balanceada.

Essa ração balanceada é rica em proteínas e minerais; uma vez formulada tem que ser fabricada; nesse momento, intervém o projeto estático de edificios e silos, como também dinâmico de máquinas. Por outro lado, tem-se os elementos eletrônicos de controle da instalação desde o painel de comando até a expedição do produto fabricado.

Do ponto de vista estático, o estudo dos silos é muito importante já que se faz necessário conseguir silos herméticos para os cereais, e células para as farinhas onde não se produzam interrupções no fluxo de descarga (que parariam o processo de fabricação)

nem segregações granulométricas que redundariam em diminuição da capacidade alimentar do produto. As últimas técnicas preconizam fábricas do tipo verticais com predominância de fluxo por gravidade sobre o transporte para se evitar separação de partículas.

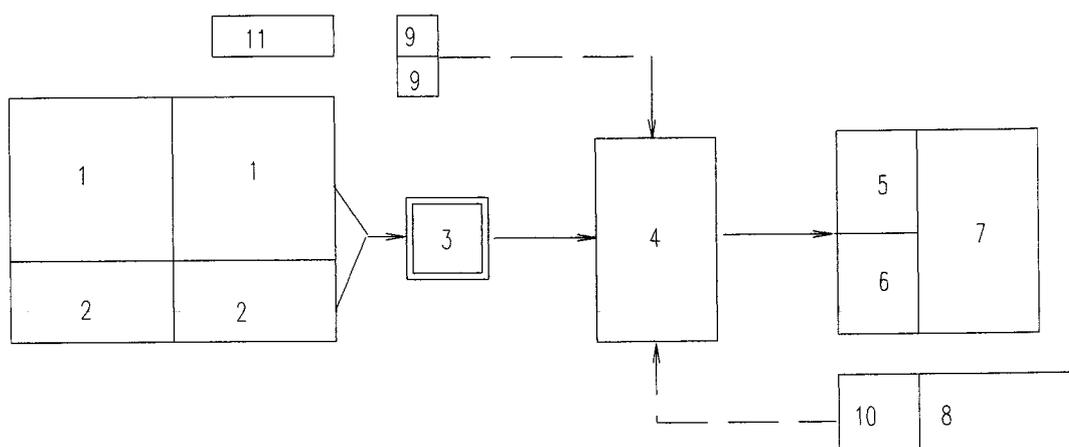
Do ponto de vista dinâmico, a maquinaria há de cumprir o objetivo para o qual foi projetada. Fundamentalmente, se chegou à conclusão de que é mais simples realizar a mistura de farinhas. Os grãos são adequadamente triturados em moinhos de martelos com a finalidade de se conseguir granulometria a mais homogênea possível. As farinhas, junto com os minerais e vitaminas (todos de diferente granulometria) misturam-se da forma, também mais homogênea possível. Essa mistura constitui a ração balanceada. A partir desse momento existem no mercado duas tendências:

- Expedição (mediante sacos, ou a granel) de uma mistura mais ou menos homogênea de produtos de granulometria variável com os possíveis problemas de separação e seleção por parte dos animais.
- A ração balanceada sofre grande transformação ao ser prensada e convertida em cubinhos, ou cilindros compactos, operação denominada granulado ou pellet. Essa operação, representa encarecimento do produto elaborado, e também uma série de vantagens, entre as quais: evitar a separação dos ingredientes e assim impedir que os animais os selecionem, porque são os mais saborosos; contudo são os menos alimentícios; dessa forma, comerão toda a ração balanceada.

Não obstante, as últimas pesquisas realizadas têm demonstrado que no processo de granulação produzem-se altas temperaturas, seja no processo de prensagem, ou pela adição do vapor de água. As altas temperaturas deterioram parcialmente a riqueza alimentícia do produto, mas ainda não se avaliou quantitativamente a grandeza dessa perda, as quais por outro lado, não deve ser muito elevada já que a tendência do mercado é a de granular cada vez mais.

2.2 Descrição dos Elementos Constituintes de uma Fábrica de Ração

Esquemáticamente uma fábrica moderna de ração consta das seguintes partes mostradas na Figura 1.



- 1 - silos de armazenagem de cereais;
- 2 - silos de armazenagem de farinhas;
- 3 - células de moinho;
- 4 - células de dosificação;
- 5 - células de expedição de ração a granel;
- 6 - células de expedição de ração em sacos;
- 7 - células de ração e granulado para carga a granel
- 8 - armazém para ração ensacada;
- 9 - moega;
- 10 - armazém de corretores minerais;
- 11- armazéns de gorduras e caldeira para produção de vapor de água.

FIGURA 01 - Esquema de uma fábrica moderna de ração

Em seguida, far-se-á uma pequena descrição sobre esses elementos:

1 - Silos para armazenamento de cereais: os cereais comumente armazenados são o milho, ou a cevada. É recomendável elevar o número de células e reduzir sua capacidade, já que, dessa forma, consegue-se um armazenamento por qualidade, espécies, umidades etc. Essa seleção redundante de maneira decisiva em:

- aproveitamento integral da instalação;
- melhoramento da ração fabricada pela seleção efetuada e pela possibilidade de realizar dosificações nos grãos;
- redução no custo da ração fabricada.

2 - Silos para armazenamento de farinhas: a maioria das farinhas recepcionadas a granel são ensiladas diretamente nas células de dosificação, pois intervêm em pequena quantidade. Existem dois tipos de farinha (de soja e de girasol) que intervêm no processo de forma muito elevada, para as quais se necessita de células especiais e com capacidade aproximadamente de 10% a 20% da capacidade dos cereais.

3 - Células de moinho: normalmente se utilizam pequenas células de pré-espera; uma para cada moinho.

4 - Células de dosificação: de pequena capacidade e elevadas em número, estão destinadas ao armazenamento de farinhas recepcionadas a granel; farinhas de soja dos silos de armazenagem e farinhas procedentes dos moinhos. Além disso, utiliza-se uma célula para armazenar carbonato e outra para fosfato. Ao efetuar a dosificação dessas farinhas em função da fórmula prevista, comumente se adicionam à mão, os corretores e vitaminas que intervêm em pequenas quantidades. Normalmente costuma-se adicionar gorduras vegetais nas rações balanceadas e que chegam a ser na base de 7%. Tanto nas células de armazenagem de farinhas como nas de dosificação, deve-se tomar precauções especiais para conseguir fluxo de descarga contínuo e sem interrupção.

5 e 6 - Célula de ração balanceada para expedição a granel e, em sacarias: a ração balanceada passa para essas células onde se instalam os dispositivos de granulado e ensacado, respectivamente.

7 - Células de ração e granulado para carga a granel: em regimes muito industrializados a expedição a granel chega até 85% da ração produzida. Nesse caso necessita-se de capacidade de armazenagem muito elevada, alcançando-se valores superiores às células de dosificação.

8 - Armazém para ração ensacada: atualmente o sistema de ensacamento e costura é automático, assim como o transporte em pelletes. A movimentação dentro dos armazéns e o carregamento em caminhões é feito através de empilhadeiras.

9 - Moega: pelo menos 95% da recepção de grãos e farinhas é feito a granel e seu armazenamento se realiza através de transportadores de canecas. Os 5% restantes são recebidos em sacos; pode-se armazenar em galpões anexos, ou descarregar diretamente sobre as moegas para o armazenamento nas células de dosificação.

10 - Fabricação de corretores: os corretores normalmente são fabricados num anexo do galpão, ou em sala no seu interior. Nas fábricas de grande capacidade, as células de dosificação ficam próximas às células para corretores para melhorar o processo de mistura.

11- Armazém de gordura vegetal e caldeira para a produção de vapor de água: em todas as rações que se fabricam atualmente, adiciona-se uma porcentagem de gordura, variável com a fórmula e o tipo da ração. A caldeira para produção de vapor de água é necessária, pois é utilizada para misturar a gordura e aumentar o rendimento da granulação.

2.3 Antigas Fábricas de Ração

Ainda se conserva na fachada de algumas antigas fábricas de ração, a frase "Moenda de Ração". O sistema mais elementar para fabricação de ração, consistia em pequena tremonha de concreto, feita no solo do armazém, onde se descarregavam todos os ingredientes, tanto cereais como as farinhas; ali eram dosificadas à mão, por meio de recipientes e, em seguida eram transportados por roscas sem fim, inclinadas, para alimentar os moinhos de martelos, onde se trituravam a mistura, como é mostrado na Figura 02.

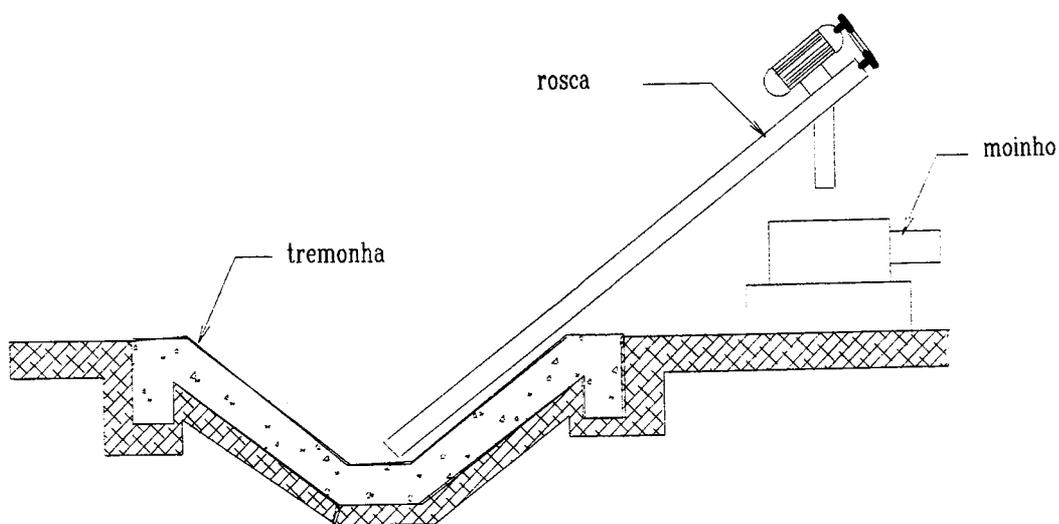


FIGURA 02 - Esquema do sistema de recepção das antigas fábricas de ração.

Nesse sistema elementar foram implementando outras máquinas que melhoraram o processo, como descrito a seguir:

- uma misturadora abaixo dos moinhos que homogeneizava a mistura;
- uma balança para pesar os cereais e farinhas, eliminando-se o sistema volumétrico;
- uma ensacadora e costuradora;
- uma granuladora.

A fabricação se realizava num armazém e a movimentação do produto entre máquinas, através de transportadoras horizontais, elevadores e/ou de roscas inclinadas. As matérias primas ficavam de um lado do armazém e a ração balanceada do outro lado. Dessa forma nasceu a denominada fábrica de ração horizontal, cujo esquema elementar é mostrado na Figura 03.

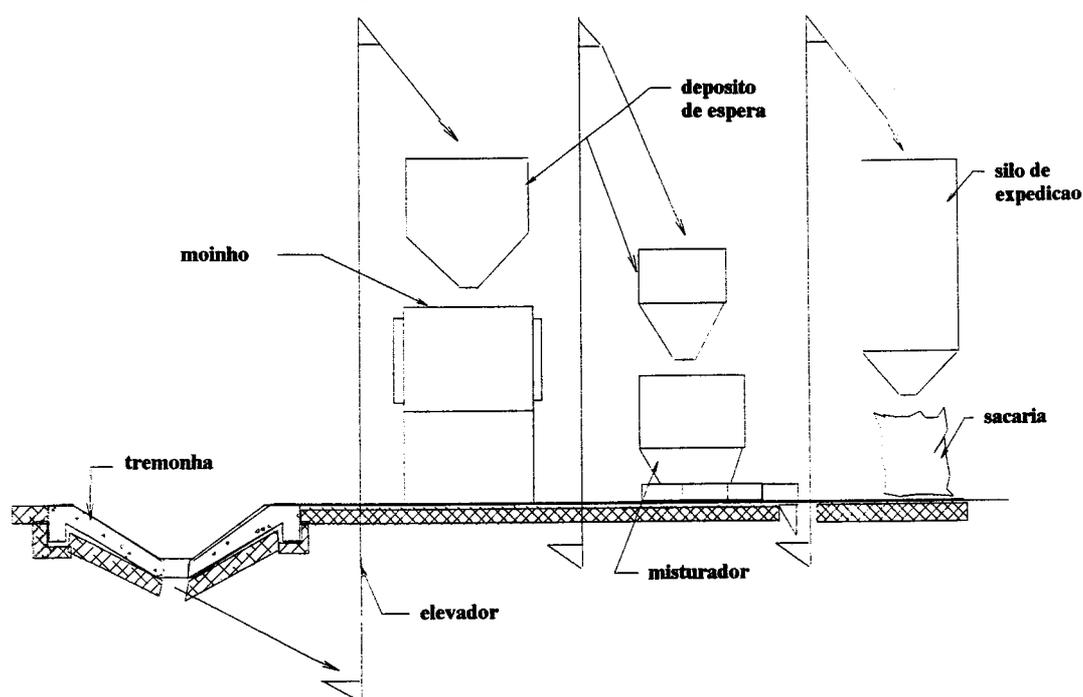


FIGURA 03 - Diagrama de uma antiga fábrica de ração

Esse sistema funcionou corretamente durante muitos anos, até que o aumento do custo da mão de obra e da energia, obrigaram à modificação do projeto em busca de minimização dos custos.

2.4 Moderna Fábrica de Rações

No item anterior foi visto que, a partir de um moinho e por adição de alguns elementos, as fábricas cresciam horizontalmente. Se a produção horária tivesse que ser aumentada devido à demanda, surgiram novos equipamentos, tais como:

- células para moinhos;

- células de dosificação;
- células de granulado;
- células para expedição em sacarias;
- células para carga a granel da ração balanceada.

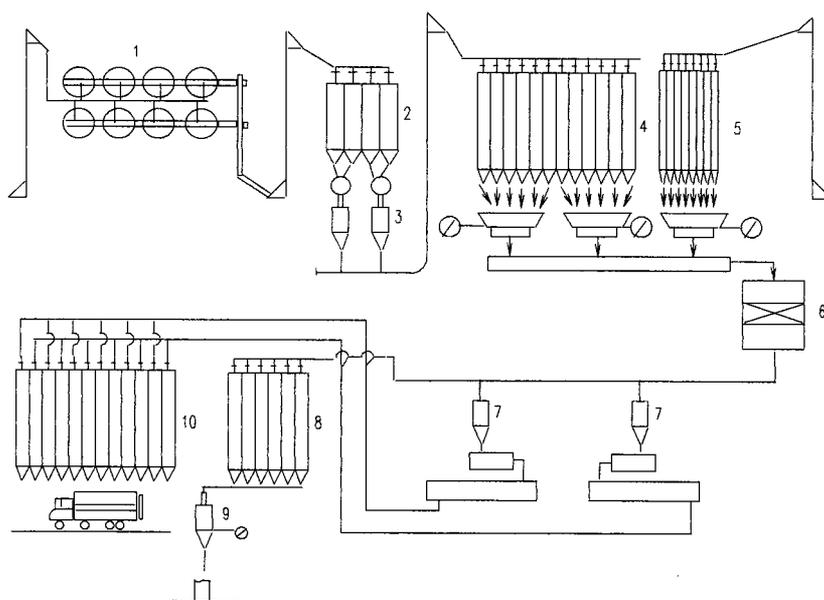
Nesse momento é quando surge o dilema de continuar adicionando elementos ao sistema existente, ou pensar seriamente em nova concepção de fábrica.

Em seguida estudaremos as últimas tendências existentes para projetos de fábricas de ração, analisando os tipos de instalação de alguns países:

2.4.1 Inglaterra

2.4.1.1 Tipos de Fábricas

De acordo com a Figura 04, numa fábrica de ração, deve constar fundamentalmente de:



- 1 - silos para armazenamento de cereais, são cilíndricos e de grande capacidade;
- 2 - células de moinho;
- 3 - moinhos;
- 4 - células para armazenamento de grãos moídos;
- 5 - células para armazenamento de farinhas;
- 6 - misturador;

- 7 - granulado;
- 8 - células de granulado. Duas no total e de pequena capacidade;
- 9 - ensacamento;
- 10 - células de expedição de ração a granel.

FIGURA 04 - Diagrama de uma fábricas de ração mais econômicas

Essas células são as maiores em número no processo de fabricação e, também as maiores em capacidade, depois dos silos de armazenamento.

A fábrica descrita de forma esquemática foi projetada para uma produção de 30 toneladas por hora. No Quadro 01 são apresentados os custos de cada um dos elementos integrantes da fábrica descrita, assim como a porcentagem do custo parcial de cada elemento e, como dado final, o custo da tonelada hora (RAVENET, 1987).

Deve-se levar em consideração que todas as células da fábrica são cilíndricas e que se deve construir um edifício que abrigue as células, a maquinaria e os mecanismos de transporte.

QUADRO 01 - Resumo da estimativa dos custos para fábrica de ração com capacidade de produção para 30 ton/h.

descrição dos elementos integrantes	preço \$(USA)	% de custo de cada elemento
silos de armazenagem de matéria prima	56.000	5,33
máquinas - carga e descarga - silos	28.000	2,67
transporte - seção moínhos	14.000	1,33
moínhos	21.000	2,00
máquinas - transporte	35.000	3,33
células intermediárias	70.000	6,67
sistema de dosificação e mistura	56.000	5,33
área de granulado e de resfriamento	42.000	4,00
máquina - transporte de ração	28.000	2,67
área de ensacamento	14.000	1,33
células da ração balanceada	42.000	4,00
armazém	210.000	20,00
edifício de fábrica e fundações	280.000	26,67
oficinas, serviços e marquises	70.000	6,67
eletricidade	84.000	8,00
TOTAL	1.050.000	100,00

O custo por tonelada/hora de fabricação é de 35.000 dólares. Esses preços podem ser considerados global, pois incluem alguns detalhes tais como:

- depósitos e tubos para adição de gordura no processo de mistura;
- caldeiras para produção de vapor de água utilizado no movimento da gordura e para o granulado.

A Figura 05 mostra um tipo de fábrica como descrito anteriormente, da esquerda para a direita, tem-se:

- silos poligonais para armazenamento;
- silos intermediários quadrados metálicos para seleção de materiais e armazenamento de farinhas;
- edifício da fábrica com todo o maquinário em seu interior para o moinho, dosificação, ração balanceada a granel, granulado e ensacado;
- silos cilíndricos para armazenamento de grãos;
- edifício da fábrica;
- silos quadrados metálicos para armazenamento de ração.



FIGURA 05 - Vista parcial de uma fábrica de rações

A Figura 06 mostra outro tipo de fábrica semelhante à anterior, mas com distribuição diferente dos setores; começando da esquerda para a direita, tem-se:

- silos cilíndricos para armazenamento de grãos;
- edifício da fábrica;
- silos quadrados metálicos para armazenamento de farinhas e ração.

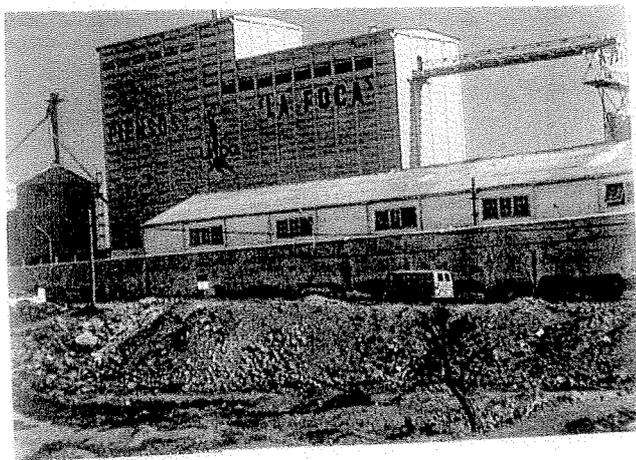
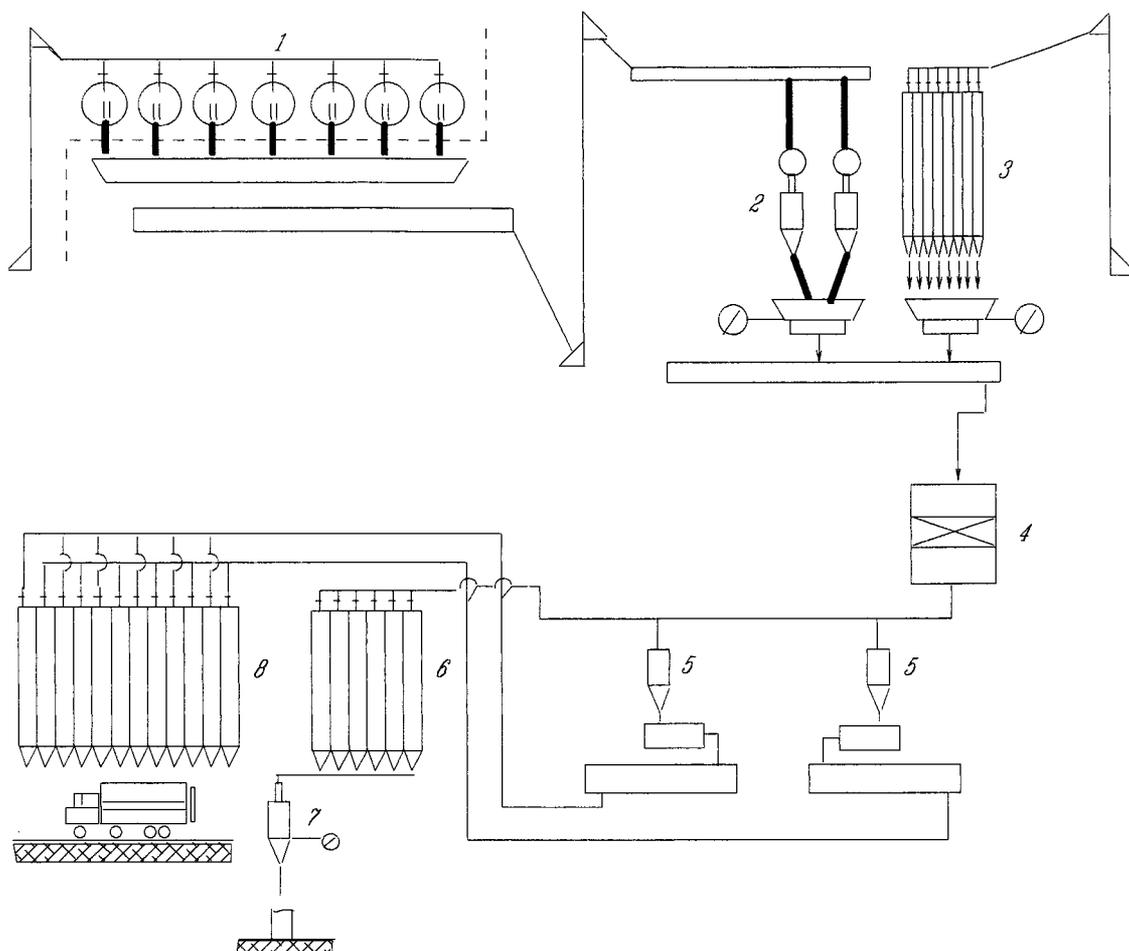


FIGURA 06 - Vista parcial de uma moderna fábrica de ração.

2.4.1.2 Fábrica de Ração mais Econômica.

Na fábrica descrita anteriormente, havia-se previsto uma série de células denominadas "de armazenagem intermediárias" e cujo custo era de 70.000 dólares que representavam 6,7% do custo da instalação. Estas células destinadas ao armazenamento de grãos moídos tem que possuir grande capacidade já que a densidade deste produto é de aproximadamente 500 kg/m³.

Eliminando-se as células intermediárias, puderam ser construído alguns silos pequenos, cilíndricos e elevados para armazenagem de cereais com descarga através de rosca; e sua posterior pesagem, logo depois de triturados no moinho, são misturados com as farinhas. Com essa solução, torna-se necessário aumentar o grupo de moinhos para capacidade horária da fábrica. No mínimo, duplica-se o número de moinhos e isso representa uma redução total de 21.000 dólares. Na Figura 07 é mostrado o diagrama do novo projeto de fábrica.



1. silos de armazenagem de cereais;
2. moinhos;
3. células de armazenagem de farinhas;
4. misturadora;
5. granulado;
6. ensacado;
7. células de expedição em sacos;
8. silos de expedição a granel.

FIGURA 07 - Diagrama de uma fábrica moderna e econômica.

Segundo este novo projeto, apresenta-se no Quadro 02 o estudo econômico de custos. Essa solução apresenta sério problema: não existindo células-pulmões de produto moído, no caso de quebra de um moinho, automaticamente a fábrica pára. Esse detalhe tão importante deixa dúvidas se essa economia é positiva ou, se pelo contrário, pode apresentar sérios problemas econômicos.

QUADRO 02 - Resumo da estimativa de custo de implantação de um fábrica de ração para 30 ton por hora - solução simplificada.

descrição dos elementos integrantes	preço \$USA	% de custo de cada elemento
silos de armazenagem de matéria prima	84.000	10,53
máquinas - carga e descarga - silos	28.000	3,51
transporte - seção moínhos	28.000	3,51
moínhos	42.000	5,26
sistema de dosificação e mistura	56.000	7,02
planta de granulado e esfriado	42.000	5,26
máquina - transporte produto acabado	28.000	3,51
planta de ensacamento	14.000	1,75
células de produtos acabados	42.000	5,26
armazém	210.000	26,32
edifício da fábrica e fundações	70.000	8,77
oficinas, serviços e marquises	70.000	8,77
eletricidade	84.000	10,53
TOTAL	798.000	100,00

O preço por tonelada por hora de fabricação é de 26.600 dólares.

2.4.2 Espanha

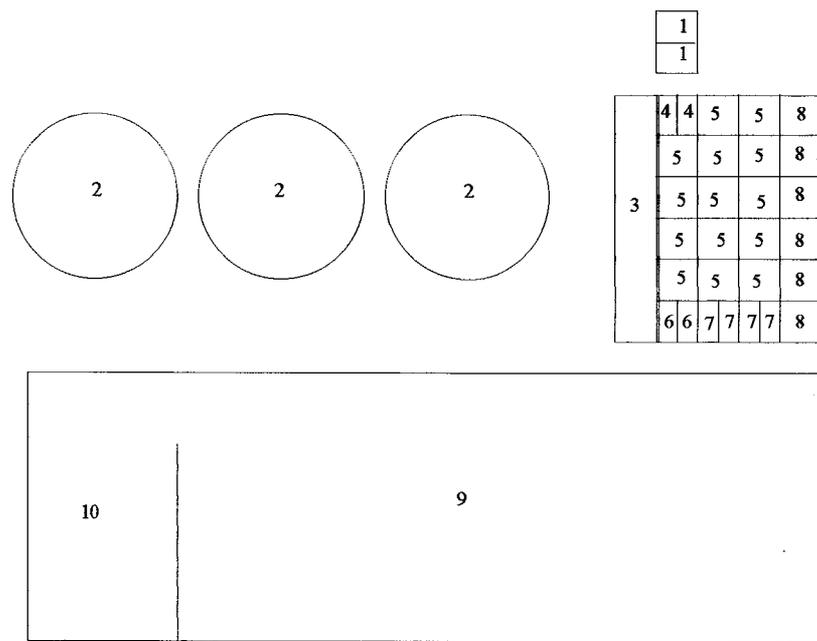
A Espanha entrou no processo de desenvolvimento tecnológico das fábricas de ração e pode-se afirmar que tem alcançado os mais altos conhecimentos nesse campo.

Pode-se dizer em comparação aos sistemas ingleses visto anteriormente, que introduziu melhora importantíssima nesse setor: as células são autoportantes e suas paredes externas formam parte do edifício da fábrica; portanto, anexando na parte superior o local para a maquinaria e, prevendo-se os vãos para a instalação dos elevadores e escadas de acesso, as próprias células que formam o edifício da fábrica.

Como o edifício da fábrica é ligado por um lado aos silos de armazenamento de matérias primas, esses podem ser metálicos (cilíndricos ou quadrados), ou mesmo de concreto armado (também nas duas versões) uma das paredes pode ser comum à

fábrica e, nesse caso, tem-se o único conjunto no qual se pode incluir células para o armazenamento de farinhas a granel.

Na Figura 8, mostra-se a planta baixa de uma instalação com silos cilíndricos para o armazenamento de cereais a granel, com o corpo da fábrica com galpão em anexo.



- 1 - moega;
- 2 - silos para armazenamento de cereais;
- 3 - torre da escada, elevadores, transporte e limpeza de grãos;
- 4 - células de moinho;
- 5 - células de dosificação;
- 6 - células para expedição em sacarias;
- 7 - células para armazenamento de ração granulada
- 8 - células para expedição a granel;
- 9 - galpão para produtos fabricados;
- 10 - oficina.

FIGURA 08 - Planta baixa para uma fábrica de ração

Na Figura 09, é mostrada a instalação descrita anteriormente em fase de construção. No primeiro plano o edifício da fábrica autoportante com os silos cilíndricos para cereais, as moegas para recepção de grãos e farinhas, e as roscas para carga a granel de ração. Na parte posterior do edifício, local para os produtos fabricados, e ensacados e as oficinas.

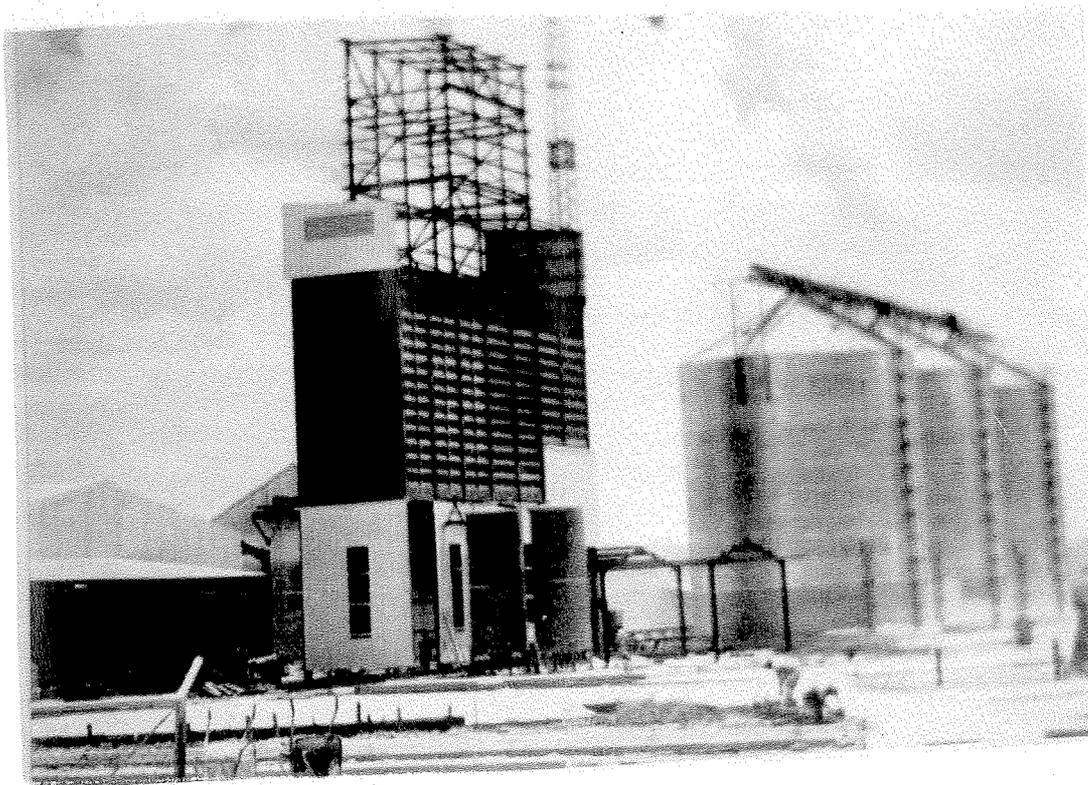


FIGURA 09 - Vista parcial da instalação da fábrica citada na Figura 08

No Quadro 03, apresenta-se o resumo dos custos em dólares da instalação descrita nas Figuras 8 e 9, para produção de 20 ton/hora.

Melhoria a introduzir:

- programador eletrônico de pesagem automática \$ 22.000,00
- instalação para gordura \$ 14.450,00
- instalação para melaço \$ 16.000,00

O preço por tonelada por hora de fabricação é de 24.700 dólares. Esse tipo de fábrica é mais econômica que as inglesas anteriormente estudadas, apesar da menor capacidade horária.

No Quadro 03 foram introduzidas três melhorias, tais como:

- um programador eletrônico para o sistema de pesagem automática que nos permite dispor de uma série de misturas sem a necessidade da intervenção humana;
- instalação de gorduras;
- instalação de melaço;

Com esses novos elementos o preço tonelada/hora é de 27.300 dólares.

Quadro 03 - Resumo da estimativa dos custos de implantação de uma fábrica de ração para 20 ton por hora - solução simplificada.

Descrição dos elementos integrantes	preço \$(USA)	% do custo de cada elemento
Silos metálicos cilíndricos	58.000	11,74
Máquinas de carga e descarga	18.000	3,64
Transporte e seção de moinhos	19.000	3,85
Moinhos	35.000	7,09
Seção de dosificação e mistura	56.000	11,34
Área de granulado e resfriamento	43.000	8,70
Máquinas de transporte de produtos fabricados	19.000	3,85
Área de ensacamento	15.000	3,04
Edifício e células da fábrica	68.000	13,77
Alicerce	20.000	4,05
Armazém	85.000	17,21
Oficinas, serviços	34.000	6,88
Eletricidade	24.000	4,86
Total	494.000	100,00

Mostra-se na Figura 10 um grupo de tremonha de dosificação numa fábrica de 30 toneladas/hora; a maioria das tremonhas têm bocas de saída dilatadas e direcionadas.

Na Figura 11 tem-se um centro de dosificação com pesagem e mistura automática: em primeiro plano o processo de montagem, as tremonhas são orientadas para o centro de dosificação, alimentando a rosca de extração.

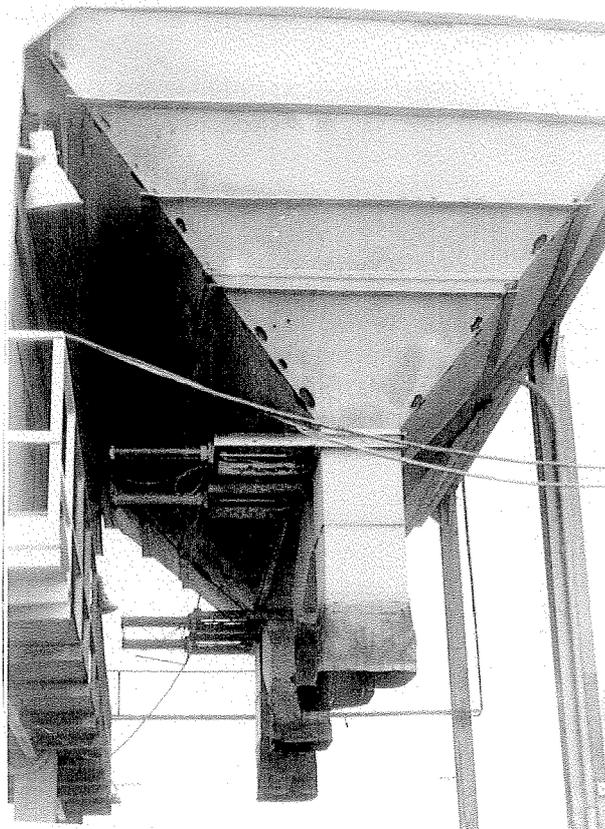


FIGURA 10 - Grupo de tremonha para expedição de ração

Na Figura 12 vê-se um extrator de múltiplo efeito, aplicado a uma célula destinada a armazenamento de farinha de soja. Esta farinha com alto teor de proteínas, é indispensável em modernas fábricas de ração. Para produtos muito coesivos, todas as precauções são poucas para conseguir boa descarga.

Segundo o processo de fabricação que cada indústria segue, precisa-se em maior ou menor grau de um ou outro elemento da fábrica. Sendo assim, na Figura 13 mostra-se um edificio em fase de montagem, posteriormente será coberto com telhas de fibrocimento para seu acabamento final.

Para evitar grandes filas de caminhões e conseqüentemente, atraso na expedição de ração foi necessário construir dois silos de expedição, como é visto na Figura 14.

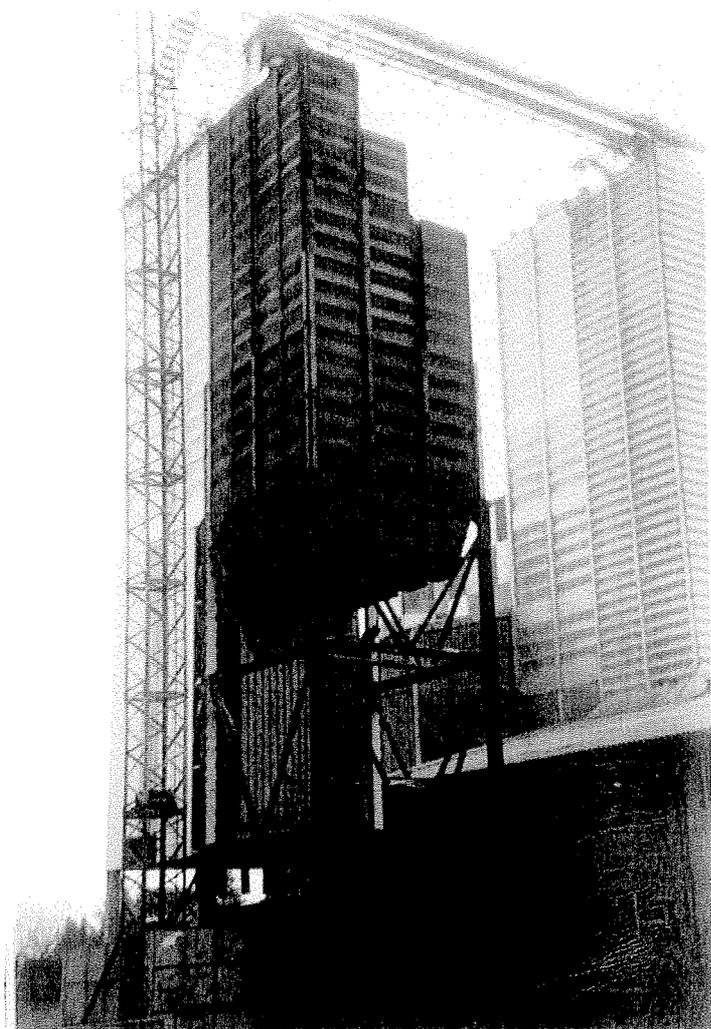


FIGURA 11 - Células de dosificação com pesagem automática



FIGURA 12 - Extrator de múltiplo efeito

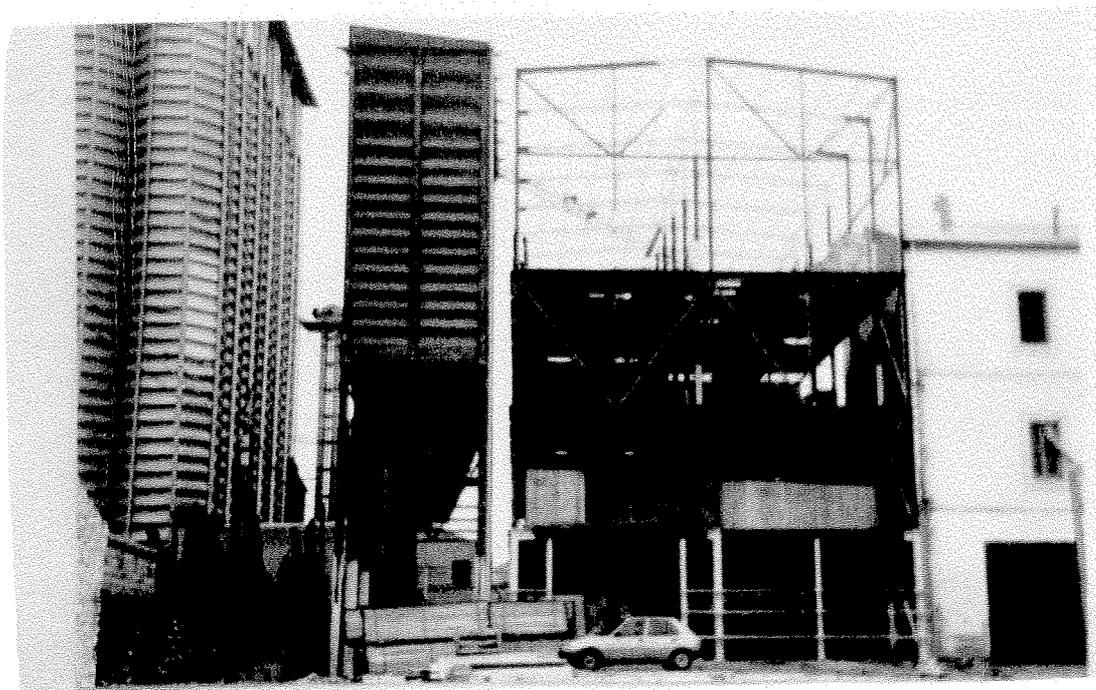


FIGURA 13 - Instalação de uma fábrica de ração

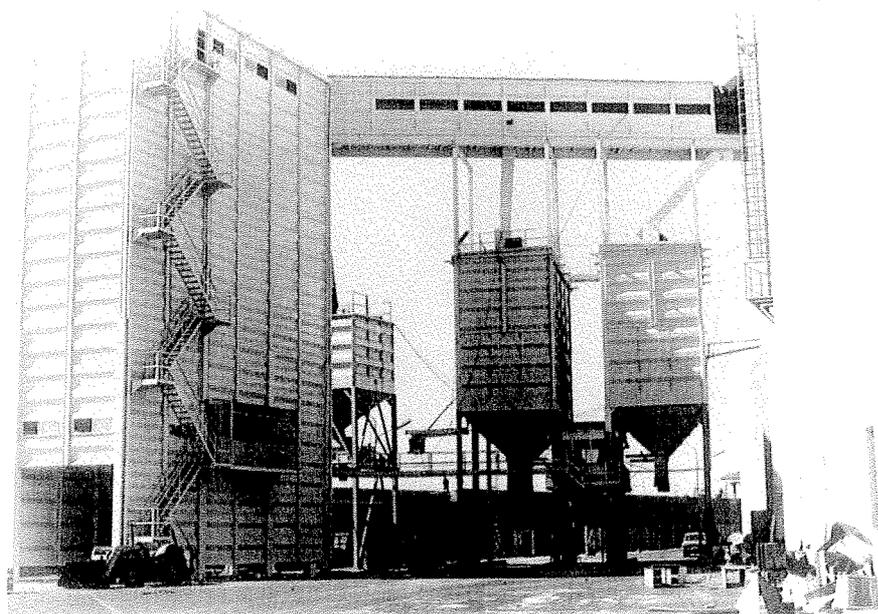


FIGURA 14 - Expedição de ração a granel diretamente sobre o caminhão

No primeiro plano da Figura 15 se vê a fábrica com a carga de ração a granel, onde se coloca uma balança com precisão decimal entre as células e o caminhão, e seu deslocamento sobre o trilho.

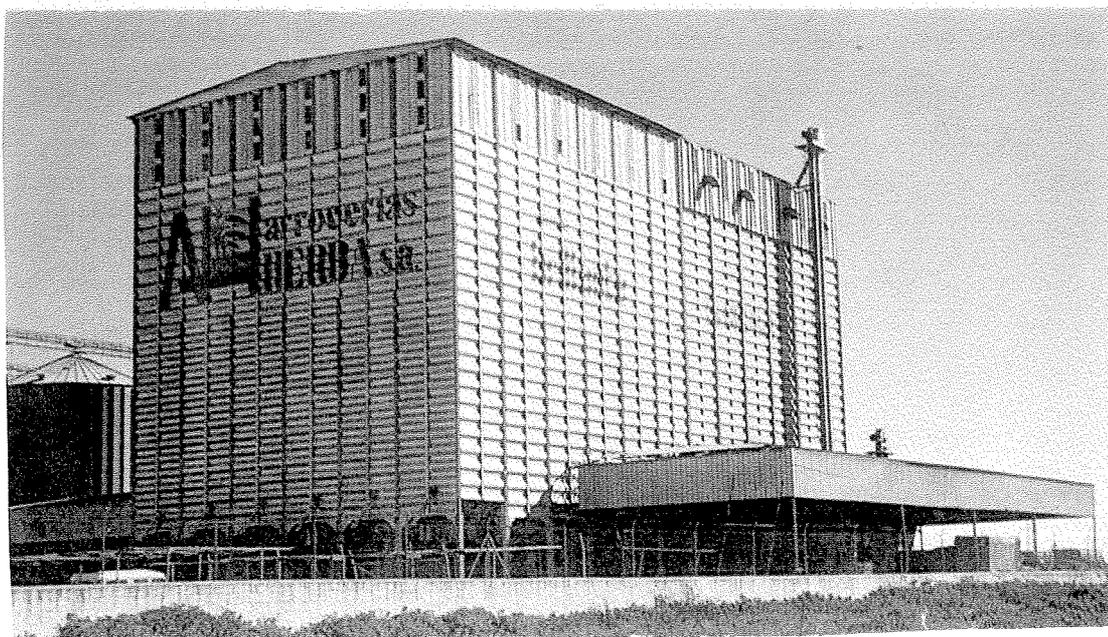


FIGURA 15 - Fábrica de ração a granel

Na continuação, encontra-se o silo para armazenamento de farinha de soja e, em último plano, os silos cilíndricos para armazenamento de cereais. No local de uma das células instalaram-se elevadores para o carregamento das células para grãos e farinhas.

Na Figura 16 é representada uma fábrica igual às descritas e, em fase de montagem: à direita a fábrica com suas seções de moinhos, dosificação e mistura, granulado, ensacamento e expedição de ração. À esquerda, o armazenamento de cereais e farinhas. Foi projetado o descarregamento de farinhas por gravidade sobre elementos de transportes mecânico.

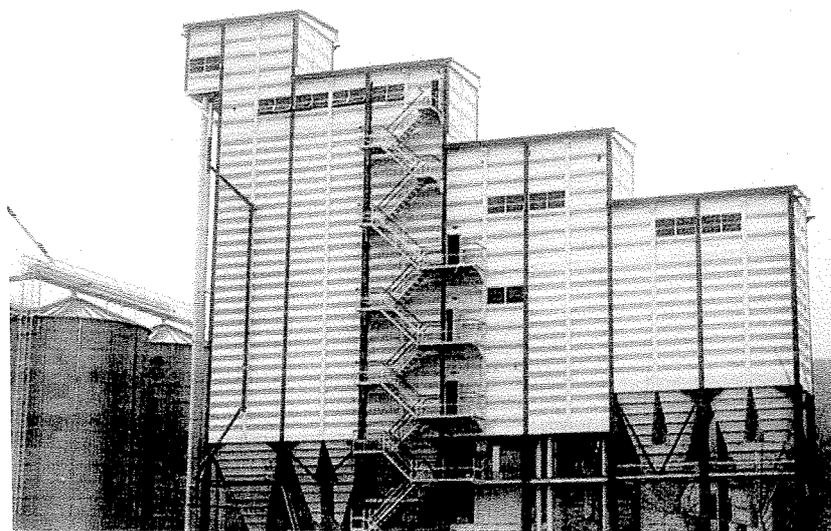


FIGURA 16 - Fase final da instalação de uma fábrica de ração

A fábrica da Figura 17, encontra-se concluída e está preparada para iniciar seu funcionamento. Além dos edifícios da fábrica e de armazenagem no primeiro plano nota-se à esquerda as oficinas, e à direita o armazem para produtos fabricados.

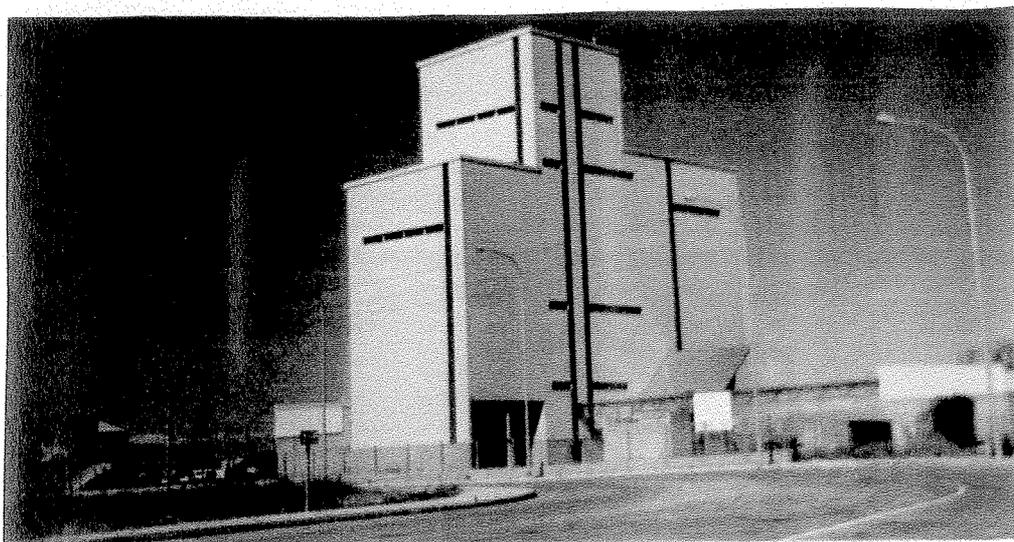


FIGURA 17 - Fábrica de ração apta a entrar em funcionamento.

Segundo essa linha de fábrica, novas variantes aparecem com referência a silos para armazenamento. Assim, na Figura 18 projetaram-se 24 células octogonais, sendo 14 para armazenamento de cereais e 10 destinadas ao armazenamento de farinhas.

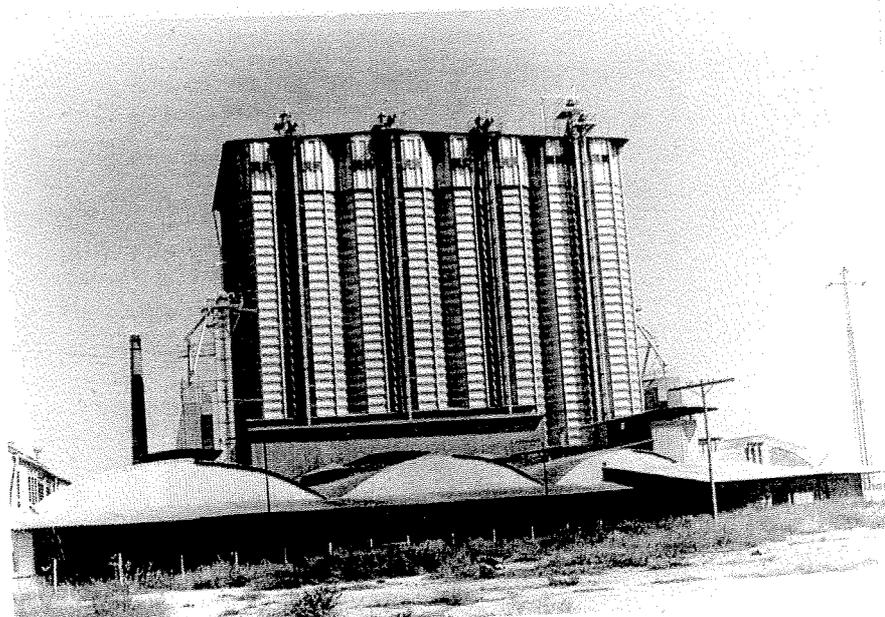


FIGURA 18 - Fábrica de ração com silos multicelulares e células octogonais.

Todos esses conjuntos encontram-se no edifício da esquerda. No centro está a torre (a parte mais alta) construída com painéis pré-fabricados e, onde se abrigam todos os elementos mecânicos. À esquerda, a fábrica de ração. Em frente desse edifício encontra-se parte do armazém destinado aos produtos fabricados e, em primeiro plano, o prédio das oficinas.

Na Espanha observa-se dessa maneira, a expansão das fábricas de ração, onde têm aparecido novos projetos; porém, sempre em volta do mesmo tema. Na Figura 19 o armazenamento de cereais efetua-se através de silos de concreto armado quadrado (na direita) e algumas dessas células também são utilizadas para o armazenamento de farinhas.

A esquerda foi construída uma fábrica totalmente vertical, já que se utilizam somente elevadores, tanto a carga como a descarga são feitos por gravidade (exceto na dosificação, quando são necessárias as roscas para a pesagem correta).

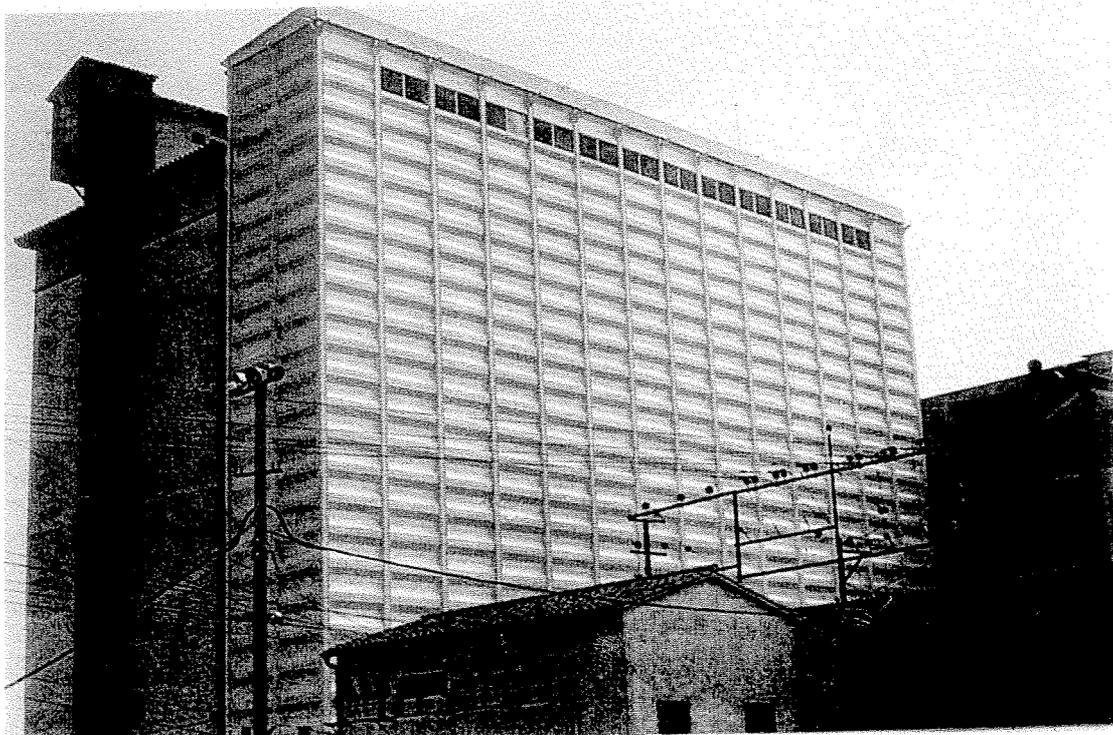


FIGURA 19 - Fábrica totalmente vertical de silos multicelular com células quadradas

O edifício da fábrica foi construído em estrutura metálica, exceto o corpo das células. Posteriormente se faz o revestimento de toda a fábrica com chapas onduladas e galvanizadas, como mostra a Figura 20.

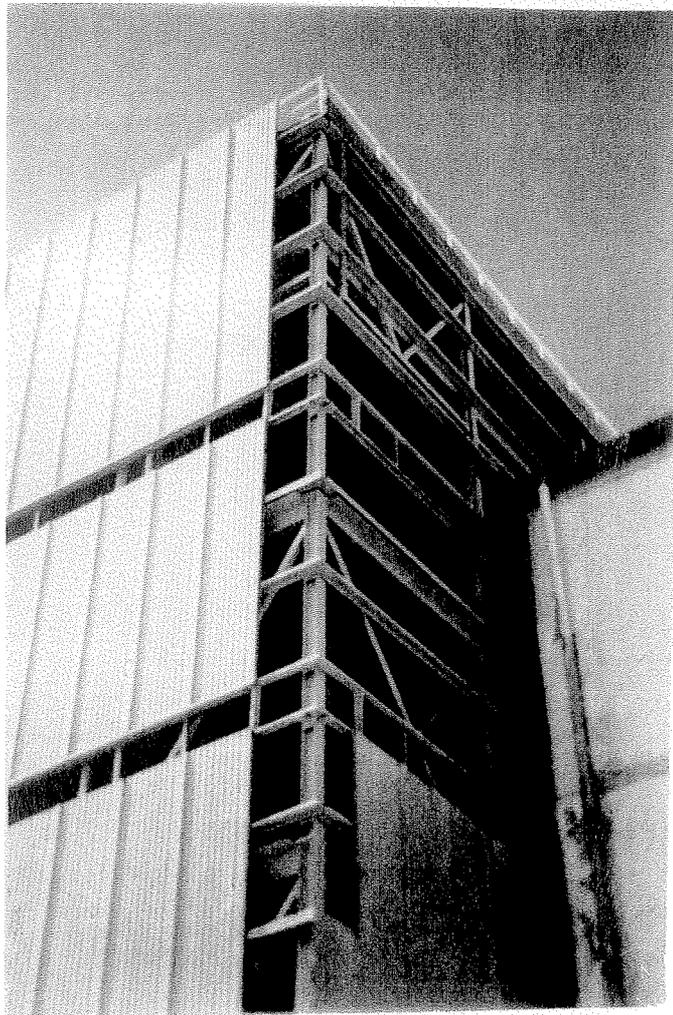


FIGURA 20 - Detalhe do revestimento externo de uma fábrica de ração

Outro edifício idêntico ao anterior, dos denominados verticais, é apresentado na Figura 21, e tem sido anexado a silos cilíndricos de concreto com intercélulas divididas e destinadas ao armazenamento de farinhas.

Podemos dizer que se tem apresentados todas as possíveis fábricas de ração que se possa construir e cremos que o futuro industrial que pretenda construir uma fábrica de

ração possa revisar os tipos existentes, e escolher àquele que mais lhe interessar, tanto econômica como tecnicamente.

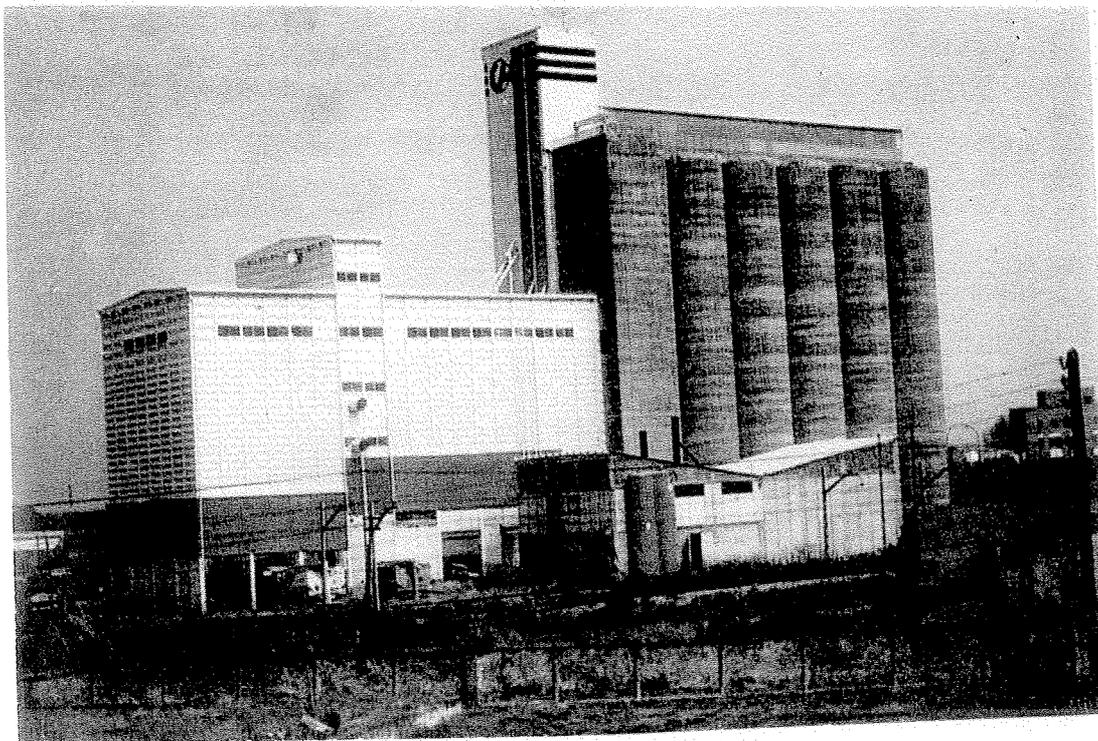


FIGURA 21 - Fábricas com silos prismáticos metálicos e cilíndricos de concreto

2.4.3 Estados Unidos

Nos Estados Unidos utilizam-se instalações com um custo bastante reduzido para rápida amortização. Devemos considerar que a evolução da tecnologia é tão rápida que logo as instalações perdem sua novidade, ficando defasadas. Nessas instalações, praticamente desaparece o edifício da fábrica, encontrando-se toda a instalação ao ar livre.

2.4.4 Israel

As informações de instalações construídas em Israel, apresentam as seguintes características:

- silos de concreto armado poligonais para o armazenamento de cereais;

- fábrica construída com estrutura de concreto armado e do tipo denominado por gravidade;
- silos metálicos cilíndricos para armazenamento de cereais de custo reduzido, apoiados sobre o solo;
- anexo à fábrica, células de ração balanceada para expedição a granel.

2.5 Conclusão

Como conclusão desse estudo preliminar, podemos dizer que as fábricas de ração apresentam tendências de construção vertical, células prismáticas para todo o processamento interno das farinhas e rações, silos cilíndricos e poligonais, e unidades extras para armazenamento de cereais, já que há tendência mundial à escassez de cereais, que pode ser muito perigosa para as fábricas de ração, pois estas podem pára por falta de um determinado cereal importante da formulação da ração.

3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICA DAS RAÇÕES E SEUS COMPONENTES PARA O PROJETO DE FLUXO E DE PRESSÕES DE SILOS METÁLICOS ELEVADOS

Esse capítulo tem por finalidade principal, a caracterização das rações e seus ingredientes pela determinação dos parâmetros utilizados nos projetos de fluxo e estrutural de silos que são:

- densidade em função da consolidação;
- granulometria;
- ângulo estático de atrito interno;
- efetivo ângulo de atrito interno;
- ângulo cinemático de atrito entre o produto armazenado e dois tipos de materiais da parede (aço liso, aço rugoso);
- função fluxo instantânea (FF);
- fator fluxo da tremonha (ff).

O equipamento utilizado para as determinações é o aparelho de cisalhamento de translação conhecido em nível internacional por "JenikeShear Cell".

Para essa pesquisa foram ensaiados 8 produtos, sendo duas rações denominadas pela fábrica que as produz: ração rbl2 e ração rbl20; fubá e 5 tipos de farelos utilizados nas rações que são: farelo de soja, farelo de pena, farelo de carne, farelo de trigo e farelo de vísceras.

Com os parâmetros determinados com esse equipamento é possível a determinação e a predição das pressões que ocorrerão na estrutura e, principalmente, nos tipos de fluxo (massa ou funil) muito importantes para o processamento e expedição da ração.

3.1 Metodologia Utilizada

A metodologia de ensaio utilizada para determinação das propriedades físicas das rações e alguns de seus ingredientes, foi a proposta por MILANI (1993). Através do aparelho de cisalhamento direto de movimento de translação (máquina de ensaio TSG 70-140) conhecido como por "Jenike Shear Cell".

A determinação das propriedades dos produtos armazenados, depende do conhecimento dos lugares geométricos de deslizamento, determinados pela relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal para o produto armazenado, avaliando-se como desliza em relação a si próprio e com o material da parede de construção do silo. Tais informações são determinadas em testes de laboratório, usando-se células especiais de cisalhamento desenvolvidas para produtos armazenados. Através desse aparato, pode ser determinada a tensão sob armazenamento e, as condições de fluxo que podem ocorrer nos silos destinados ao armazenamento e expedição da ração.

Em testes instantâneos, o sólido é conduzido à uma condição de deformação estável sob pressão normal prédefinida num plano de cisalhamento. Isso é conseguido em dois estágios. No primeiro estágio, chamado de rotador, o sólido é rotado em célula de cisalhamento sob pressão com a finalidade de preparar amostra uniforme. No segundo estágio, chamado pré-shear, uma camada do sólido através da área total da célula de cisalhamento é forçada a deformar sob pressão e tensão cisalhante até que uma força de cisalhamento estável ou quase aproximada é alcançada. Um processo de otimização é usado para determinar as pressões mais adequadas de rotações. Algumas vezes, uma seqüência de diminuição das pressões de pré-shear é também necessária. Nos testes em função do tempo, um terceiro estágio de consolidações sob pressão estática é aplicado para determinar o efeito tempo, isto é, o efeito do tempo no produto armazenado.

A determinação do lugar geométrico de deslizamento (YL) e do lugar geométrico de deslizamento da parede (WYL) representa, também, o caminho para prever a forma da tremonha e as dimensões da boca de descarga que irá fornecer, quando possível, determinado fluxo do produto armazenado e predeterminado tipo de fluxo. Esses parâmetros também são necessários para o cálculo das pressões nas paredes do corpo do silo e da tremonha.

A resistência do sólido ao cisalhamento é medida, inclusive para determinar sua capacidade de formar obstruções para o fluxo, tais como arcos ou condutos.

Para a determinação dos lugares geométricos de deslizamento foi utilizada a célula de cisalhamento por translação de Jenike, por ser a mais utilizada em todo o mundo para essa determinação sendo, também a mais versátil (JENIKE & JOHANSON, 1979). Com a finalidade de uniformização dos resultados, em nível internacional foi utilizado o método de ensaio da FEDERAÇÃO EUROPEIA DE ENGENHEIROS QUÍMICOS, grupo de trabalho "Mecânica dos Produtos Armazenados"(1982).

A finalidade principal dos ensaios foi determinar as seguintes propriedades:

- densidade do produto em função da consolidação ;
- granulometria;
- lugar geométrico de deslizamento instantâneo (IYL);
- lugar geométrico de deslizamento instantâneo com a parede(IWYL);
- função fluxo instantânea (FF);
- função fluxo com o tempo (FFt);
- fator fluxo da tremonha (ff).

Foram determinadas essas propriedades para 8 produtos doados pela Cooperativa Agrícola Mista do Vale do Rio Mogi Guaçu (COOPERGUAÇU) localizada no município de Descalvado -SP:

- ração rbl2;
- ração rbl 20;
- fubá;
- farelo de soja;
- farelo de pena
- farelo de carne;
- farelo de trigo;
- farelo de vísceras.

3.2 Determinação da Densidade em Função da Consolidação

JENIKE (1964) mostra que a influência da compressibilidade de um produto (mudança da densidade com a pressão de consolidação) no processo de fluxo é desprezível. Entretanto, a densidade de um produto necessita ser calculada,

pois é um parâmetro importante para a determinação do fluxo e das pressões em silos.

O método mais fácil de medir a densidade é pesar toda a célula (célula + produto) após o ensaio, subtrair o peso próprio da célula e dividir o valor restante pelo volume da célula.

3.3 Granulometria

Como regra geral, os produtos que não contêm partículas menores do que 0,25 mm são produtos de fluxo livre (CALIL Jr.,1990). Evidentemente, existem exceções à regra. Por exemplo, os grãos fermentam sob adversos teores de umidades e condições atmosféricas, adquirindo resistência e deixando de ser de fluxo livre. A farinha de soja contém óleo, que sob condições de alto teor de umidade e temperatura unem as partículas, formando uma massa de difícil fluxo.

A fluabilidade de um produto, contendo diferentes dimensões de partículas (incluindo finas e grossas) é, invariavelmente, governada pelas propriedades de fluxo das frações finas. As partículas grossas são agente passivo no processo. Entretanto, as dimensões das partículas grossas afetarão a tendência de agrupamento na boca de descarga, e o impacto, podem causar compactação do produto ao longo do canal de fluxo.

3.4 Determinação do Lugar Geométrico Instantâneo de Deslizamento (IYL)

3.4.1 Amostras para a Determinação do IYL

Cada uma das células de cisalhamento mencionada, pode ser obtida em duas dimensões diferentes, dependendo da distribuição das dimensões das partículas do produto a ser testado, sendo que a célula pequena é a mais fácil e rápida de ser operada. Cada célula possui dimensão máxima de partícula que podem ser utilizadas, como por exemplo: 4mm na célula pequena standard de Jenike. Partículas maiores do que essa dimensão, podem sempre ser removidas da amostra por peneiramento sem mudança significativa nos resultados obtidos, desde que não constituam mais do que 70% do peso total da amostra a ser testada. É importante ressaltar que a remoção das partículas maiores pode conduzir a erros no caso de materiais úmidos.

Pelo menos três YL devem ser determinados. Para cada YL, a amostra é consolidada para densidade, correspondendo à tensão de compressão pela repetição de rotações parciais na tampa da célula. Para essa densidade de "equilíbrio", os

valores de cisalhamento devem então ser determinados para o mínimo de três tensões de compressão menor e diferentes daquela estabelecida na densidade de equilíbrio. Pesos sugeridos para materiais de diferentes densidades são dados na referência JENIKE (1979).

Para materiais coesivos, o YL pode apresentar curvatura convexa para baixo, mas, no procedimento normal de análise, considera-se uma linha reta, que é mais fácil de ser trabalhada e, fornece valores estatisticamente equivalentes. Deve, também, ser notado que, em produtos relativamente compressíveis, contendo grandes protuberâncias, compactações consideráveis podem ser causadas por enchimento rápido, devido ao impacto do material armazenado. Para sólidos que não se consolidam com o tempo, a pressão de impacto deve, ser usada nas determinações do YL e da Função Fluxo do produto (FF).

3.4.2 Determinação Simplificada do IYL

Se o produto parece ser de fluxo livre ou o efeito da variação dos parâmetros, como: teor de umidade, temperatura e tempo de consolidação, são rapidamente determinados, então é permissível adotar procedimento de teste simplificado, embora isso necessite ser confirmado pelo valor da Função Fluxo do Produto. Esse procedimento simplificado consiste em determinar a tensão de deslizamento somente na carga de consolidação e noutra carga; então, a função torna-se uma linha reta entre os dois pontos.

3.5 Ensaios Realizados

Para cada produto em estudo foram determinados de 3 a 4 lugares geométricos instantâneos de deslizamento (IYL) com cargas de consolidação de pré-shear iguais a 10kg_f, 7 kg_f, 5 kg_f e 2 kg_f. Para cada valor de consolidação de pré-shear, executaram-se três ensaios com cargas de consolidação de shear, correspondendo a IYL. O quadro a seguir, mostra os níveis de carregamento de pré-shear e shear (kg_f)

De cada gráfico do IYL, determina-se o ângulo de atrito interno(ϕ_i), efetivo ângulo de atrito interno(ϕ_c), tensão máxima de consolidação (σ_m) e resistência ao deslizamento (σ_c) para a determinação da função fluxo (FF).

TABELA 01 - Níveis de cargas utilizados nos ensaios

IYL#1	IYL#1	IYL#2	IYL#2	IYL#3	IYL#3	IYL#4	IYL#4
pré-shear	shear	pré-shear	shear	pré-shear	shear	pré-shear	shear
10,0	7,0	7,0	5,0	5,0	3,5	2,0	1,5
10,0	5,0	7,0	3,5	5,0	2,0	2,0	1,0
10,0	3,5	7,0	2,0	5,0	1,0	2,0	0,5

3.5.1 Ângulo de Atrito Interno(ϕ_j)

Esse é o ângulo que o IYL forma com a horizontal. Para IYL convexo para cima, este ângulo diminui com o aumento da tensão de compressão. Um método prático para determinar esse ângulo é encontrado na referência JENIKE (1980).

3.5.2 Efetivo Ângulo de Atrito Interno(ϕ)

Esse é o ângulo com a horizontal de uma linha entre a origem e a tangente ao IYL no semicírculo de Mohr da maior tensão de consolidação. A variação desse parâmetro deve ser considerada, determinando-se o valor superior (ϕ_u), o valor inferior (ϕ_l) e, usando os valores como indicados nas equações de fluxo e pressão. Desde que as tangentes às curvas do YL ao círculo de Mohr, tendam a ser incertas, o efetivo ângulo de atrito interno é, na prática, sempre construído com uma linha entre a origem e o ponto final do IYL.

3.5.3 Tensão Máxima de Consolidação (σ_m)

É a tensão normal obtida pelo segundo círculo de Mohr, plotado através do ponto correspondente às condições de consolidação da amostra e tangente ao IYL. O maior dos dois valores da intersecção é a tensão máxima principal de consolidação σ_m .

3.5.4 Resistência ao Deslizamento (σ_c)

Essa é a tensão normal obtida pelo primeiro círculo de Mohr, plotado através da origem das coordenadas e tangente ao IYL. A intersecção desse semi-círculo com o eixo das tensões normais, determina a resistência (ou tensão) máxima ao deslizamento do produto σ_c .

3.6 Determinação do Lugar Geométrico Instantâneo de Deslizamento com a Parede (IWYL)

Os IWYL são determinados na mesma célula de cisalhamento usada para a determinação do IYL pela remoção célula inferior, instalando-se um fundo do material da parede a ser testado. É então determinado o IWYL para a variedade de pressões de consolidação que são esperadas para atuar nas paredes do silo. Já que as medidas sempre mostram variação considerável, deve ser determinado um mínimo de cinco pontos.

O IWYL é desenhado no mesmo diagrama do IYL e seu ponto de intersecção determinado com o círculo de Mohr de maior consolidação. O ponto mais alto da intersecção é escolhido. O ângulo da linha que liga esse ponto, à origem, é o ângulo de atrito com a parede ϕ_w para a particular tensão de consolidação. Os testes são repetidos para outras tensões de consolidação.

Desde que o IWYL é importante parâmetro, tanto para o fluxo como para o cálculo das pressões, deve ser determinado para todas as condições desfavoráveis (teor de umidade, corrosão, abrasão, revestimento da superfície etc.) num intervalo de YL. Então, a linha formando a parte superior do intervalo, mostra o maior ângulo de atrito com a parede (σ_{wu}) que é tomada para a determinação dos ângulos da tremonha e para o cálculo das forças no plano da parede; e, aquela formando a linha inferior do intervalo, isso é, dando o menor ângulo de atrito com a parede (σ_{wl}), é usada para o cálculo das pressões.

Quando se usa a célula de cisalhamento para determinar o IWYL, as partículas grossas do produto não devem ser removidas na amostra a ser testada.

Se o valor do ângulo de atrito com a parede se aproxima do valor do efetivo ângulo de atrito interno, então o atrito torna-se, particularmente entre as partículas do produto do que do produto com a parede, a chamada condição "parede rugosa". Nesse caso, se $\phi > \delta - 3^\circ$, então, $\sin\delta$ é usado para calcular o atrito com a parede no lugar de $\tan\phi$. A condição de paredes corrugadas é intermediária entre "parede rugosa" e condições de atrito com a parede, dependendo do perfil exato. Como adoção conservativa, os valores da "parede rugosa" devem ser usados para os valores superiores do ângulo de atrito com a parede, mas utilizando os mesmos valores inferiores para a condição da banda inferior.

3.7 Ensaio Realizados

Para cada produto em estudo foram determinados de 2 a 4 lugares geométricos instantâneos de deslizamento com parede (IWYL) com cargas de consolidação de shear iguais a 5kgf, 4kgf, 3kgf, 2kgf, 1kgf e 0,5kgf. Os materiais de parede utilizados para determinação do ângulo de atrito com o produto armazenado, foram aço: com superfície lisa e outro com superfície rugosa.

3.8 Função Fluxo (FF)

A capacidade do produto de fluir depende da resistência desenvolvida, devido à consolidação e, como resultado da resistência, o produto é capaz de formar um arco estável, ou efeito tubo (CALIL Jr, 1990). A pressão de deslizamento não confinada é uma medida da resistência do produto numa superfície livre, apresentando a função da máxima pressão de consolidação. Essa função é denominada de "função fluxo instantânea", ou simplesmente "função fluxo".

De modo geral a função fluxo do produto não depende somente da pressão de consolidação, mas também de outros fatores como: tempo de armazenamento, teor de umidade e temperatura.

A determinação da função fluxo é feita plotando-se os pontos da tensão máxima de consolidação, versus resistência inconfineda de deslizamento, tensões estas determinadas através dos lugares geométricos instantâneo de deslizamento.

3.9 Fator Fluxo (ff)

Enquanto há um número infinito de possíveis obstruções ao fluxo, a experiência mostra que o produto fluirá, se um arco não se desenvolver no canal de fluxo. Em canais de fluxo de massa, isto é suficiente. Em canais de fluxo de funil é, também, importante garantir que o produto seja incapaz de sustentar um tubo vertical vazio de altura excessiva (formação do efeito tubo).

O fator fluxo é usado para indicar a fluabilidade do canal. Quanto maior a tensão máxima de consolidação σ_m em um canal, menor a tensão máxima principal σ_1 atuando na obstrução; menor será a fluabilidade no canal, ou seja, quanto menor o valor do fator fluxo melhor é a fluabilidade do canal.

O fator fluxo da tremonha (ff) é uma função da forma da tremonha e das propriedades do produto armazenado e, pode ser determinado com boa aproximação pela seguinte equação (BMHB, 1985):

$$ff = \frac{Y(1 + \operatorname{sen} \phi_{iu})}{2(X-1)F(\alpha)\cos(\alpha)}$$

$$Y = \frac{[2(1 - \cos \alpha)]^m \theta^{1-m} \cos \theta + \operatorname{sen} \beta (\operatorname{sen} \theta)^{1+m}}{(1 - \operatorname{sen} \alpha_{iu})(\operatorname{sen} \theta)^{2+m}}$$

$$X = \frac{2^m \operatorname{sen} \phi_{iu}}{1 - \operatorname{sen} \phi_{iu}} \left(\frac{\operatorname{sen}(\beta + \theta)}{\cos \alpha} + 1 \right)$$

$$\theta = \beta + 90 - \alpha$$

$$F(\alpha) = \left(\frac{65}{220 - \alpha} \right)^m \left(\frac{200}{290 - \alpha} \right)^{1-m}$$

$$2\beta = \phi_{iu} + \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{\operatorname{sen} \phi_{iu}}{\operatorname{sen} \delta_{iu}} \right)$$

onde:

$m = 0$ para silo retangular com $L \geq 3d$

$m = 1$ para silo eixo simétrico

Para silo retangular com $L \leq 3d$, o valor de “m” será encontrado por interpolação entre 0 e 1

3.10 Resultados e Discussões

3.10.1 Granulometria

A determinação da granulometria foi realizada, utilizando-se o método de peneiramento realizada com amostra previamente pesada e peneirada (num jogo de peneiras) durante 10 minutos com velocidade de 50 rpm. No final, pesou-se a quantidade de produto retido em cada peneira e, se determinou a percentagem.

CALIL Jr. (1984) cita que a classificação dos produtos armazenados é feita em função das dimensões do diâmetro das partículas; recomenda-se a seguinte classificação:

$D \leq 0,42\text{mm}$ - granular

$0,42 \leq D \leq 0,149$ - pulverulento coesivo ou não

$0,149 \leq D \leq 0,079$ - pulverulento coesivo fino

$D \leq 0,079$ - pulverulento coesivo extra fino

Os resultados obtidos nos ensaios de granulometria das rações e seus ingredientes são apresentados na Tabela 02; verificou-se que as rações e os farelos de cereias tiveram os maiores percentuais retidos na peneira de malha 0,50mm, mas apresentaram também, grande quantidade de produto retido na malha 0,21mm, que permite classificá-los como produto pulverulento coesivo. Os farelos de carne e vísceras são de difícil classificação, pois são classificados seguindo as recomendações de CALIL Jr. (1984) como granular e pulverulento, respectivamente. Mas, tais ingredientes, apresentam alto teor de gordura que dificulta a classificação, pois quando peneirados formam pequenos grãos esféricos que mascaram o resultado. Esse fato também ocorre em pequenas proporções com as rações, pois chegam a ter até 6% de gorduras vegetais. De forma geral, podemos classificá-los como produtos pulverulentos a pulverulentos coesivos.

3.10.2 Propriedades Físicas da Ração e Alguns de Seus Ingredientes

A Tabela 03 apresenta o resumo das propriedades físicas dos produtos estudados. Como regra geral, devem ser utilizados os dois limites das propriedades determinadas para o dimensionamento de silos, sendo o limite superior para o projeto de fluxo e o limite inferior para o projeto das ações.

As propriedades que estão com um único valor é devido ao fato de que a variação dos dados experimentais não foram significativos; talvez seja necessário número maior de ensaios para se ter um intervalo de confiança representativo, baseado numa análise estatística com nível de confiança bastante elevado.

Não foi possível a determinação do ângulo de atrito interno e o efetivo ângulo de atrito interno do farelo de trigo pela metodologia proposta por MILANI (1993) e JENIKE & JOHANSON (1979), pois o produto, apresenta compressibilidade bastante alta; segundo JENIKE & JOHANSON (1979) produtos com essas características são considerados de compactação livre. Produtos iguais devem ser trabalhados de forma intensiva para se chegar à uma metodologia de ensaio, pois a maior dificuldade ocorre quando se varia a carga normal na célula, e não, se consegue a estabilização no cisalhamento.

TABELA 02 - Granulometria das rações e seus ingredientes

malha mm	ração rbl2	ração rbl20	farelo carne	farelo soja	farelo vísceras	farelo trigo	farelo pena	fubá
4,76	-	-	2,27	-	-	-	92,00	-
2,38	-	-	4,51	-	0,68	-	0,46	-
2,00	3,28	2,92	-	0,23	11,16	1,30	-	2,51
1,68	7,15	2,98	39,24	0,90	24,92	1,94	1,30	5,79
1,00	26,40	14,74	35,05	12,94	36,00	9,16	2,80	23,29
0,50	40,94	40,34	-	49,25	-	35,32	3,50	40,59
0,42	7,79	6,69	18,22	8,72	36,54	10,10	-	7,34
0,21	12,65	20,69	0,53	16,35	8,20	26,52	-	14,73
0,053	1,56	10,80	-	11,40	-	15,46	-	5,44

TABELA 03 - Propriedades físicas das rações e alguns de seus ingredientes

produto	densidade kN/m ³	ângulo de atrito interno	efetivo ângulo de atrito	atrito da parede de aço liso	atrito da parede de aço rugoso	teor de umidade % (b.u.)
ração rbl2	8,3	45/48	37/50	13	18	13
ração rbl20	6,8	43/53	42/50	11/13	16	11
fubá	7,5	53/54	49/52	13	19	13
farelo-soja	7,1	45/68	27/56	10	16	12
farelo-pena	6,6	36/37	31/35	9	16	07
farelo-carne	9,0	50/51	42/43	9/11	16	11
farelo-trigo	-	-	-	10/12	16	12
farelo-vísceras	6,5	50/51	45/47	11	17/19	09

3.11 Conclusão

Os resultados obtidos correspondem à primeira tabela nacional sobre as propriedades físicas de ração e seus ingredientes, determinados através do equipamento "Jenike Shear Cell" e, segundo a metodologia internacional normalizada pela Federação Europeia de Engenheiros Químicos, grupo de trabalho de Mecânica

dos Produtos Armazenados, a qual é adotada por todos os grupos de pesquisa do mundo.

Até o momento, todos os valores dessas propriedades utilizadas para o projeto de pressões e fluxo em silos no Brasil são adotadas da bibliografia internacional, ou determinadas através de equipamentos não apropriados para esta finalidade; obviamente esse procedimento não é correto, considerando-se a variabilidade dos produtos armazenados.

Nesse contexto, consideramos que os dados determinados sejam de grande utilidade para os projetistas de silos e engenheiros que trabalham com processamento de produtos agrícolas no Brasil. Com isso estamos dando nossa contribuição para os profissionais que trabalham na área específica de projetos de silos.

4 RECOMENDAÇÕES PARA O PROJETO DE FLUXO E DE AÇÕES EM SILOS METÁLICOS VERTICAIS

As ações em silos, devidas ao produto armazenado são variáveis espacial e temporárias e, portanto, não podem ser calculadas com certeza absoluta. Todas as teorias existentes em silos, falham nessa consideração, pois todos os parâmetros relevantes e, mesmo aqueles que podem ser considerados com certeza absoluta são sujeitos a variações (CALIL, 1990).

Ensaio em silos reais, mostram que as ações devido ao armazenamento podem ser distribuídas assimetricamente, e que as ações de fluxo são sujeitas a grandes flutuações. Nenhum desses fenômenos é adequadamente considerado nas teorias de ações em silos.

Apesar desse fato ser conhecido e reconhecido em nível mundial, existem até o presente momento poucos dados estatísticos das medidas da variabilidade das ações e da confiança na predição do fluxo de massa. A maioria dos grupos internacionais de estudos de normalização tem indicado para a avaliação das sobrepensões de descarga, coeficientes de majoração das ações de carregamento baseados em experiências com o armazenamento de produtos conhecidos, com resultados analisados através de ruínas e deformações em silos reais (CALIL, 1993).

Um estudo realizado por CALIL (1990), mostra que a prática de alguns códigos é nova, pois a maioria é de publicação recente e de primeira edição BMHB (1985), AS 3774 (1990), FIP/ISO (1989) em execução. Existem também, na maioria deles, muita restrição a seu uso, como por exemplo: serem válidos

somente para silos de concreto ACI (1983) e SNBATI (1975), e para silos altos DIN 1055 (1987).

CALIL (1993) apresentou proposta de norma brasileira para o projeto de fluxo e de ações em silos verticais baseada nas normas internacionais, aproveitando o melhor de cada norma, resguardando as experiências práticas na utilização dentro das responsabilidades de cada item do projeto.

4.1 Propriedades dos Produtos Armazenados

A primeira decisão a ser tomada consiste em saber se o produto é de fluxo livre, ou não. Um produto particular deve ser designado como de fluxo livre, se em uso prévio no armazenamento em silo e, descarregado por gravidade (sem aditivos de descarga) nunca mostrou quaisquer problemas de fluxo, ou no máximo 3% do peso das partículas apresentou diâmetro menor que 250 μ m. Observa-se, entretanto, que o teor de umidade, a temperatura e o impacto durante o carregamento, podem causar coesão num sólido normal de fluxo livre.

Para produto de fluxo livre, somente é necessário obter o ângulo de atrito do produto com a parede, dentro de limitada variação de teor de umidade e de outras propriedades fornecidas pelas normas, ou (o que é mais recomendado) realizar ensaios. Para produtos que não são de fluxo livre, os aparelhos de cisalhamento são usualmente necessários; a retirada das amostras dos produtos devem ser as mais representativas possíveis. Se são disponíveis resultados de ensaios para produtos com as mesmas características, então, podem ser usados com a adequada amplitude de variação entre os valores superiores e inferiores. Entretanto, os fatores modificantes devem ser observados em todos os casos e, portanto o fator do tempo de armazenamento como qualquer outra conhecida mudança no armazenamento, deve ser sempre especificado. A Tabela 04 apresenta as propriedades para alguns produtos propostas pela DIN 1055 (1987).

4.2 Tipos de Fluxo

A segunda decisão é saber qual tipo de fluxo será utilizado no projeto, se fluxo de massa, ou fluxo de funil, como mostra a Figura 22. O tipo de fluxo determina as características de descarga do material, o tipo de segregação, a formação ou não

de zonas de produto sem movimento e, se o silo pode ser descarregado completamente.

Também determina a distribuição de pressões nas paredes do silo, na fundação, na integridade e no custo da construção. A determinação do tipo de fluxo deve ser feita quando: da elaboração do projeto do silo, ou quando houver mudanças em sua estrutura, ou na manipulação dos produtos a serem armazenados.

Tabela 04- Propriedades dos produtos armazenados segundo a DIN 1055 (1987)

Produto	Densidade kN/m ³	Atrito interno (°)	Coeficiente de atrito com a parede		
			canaletas	rugosa	lisa
cimento	16	27	0,50	0,45	0,40
farinha	7	42	0,50	0,35	0,25
milho	8	30	0,60	0,40	0,25
trigo	9	30	0,60	0,40	0,25
cevada	8	27	0,50	0,35	0,25
açúcar	9	30	0,55	0,50	0,45
clinker	18	36	0,60	0,55	0,45
cal	6	25	0,50	0,40	0,35
areia	16	36	0,60	0,50	0,40
fosfatos	22	27	0,55	0,50	0,40
carvão	10	30	0,60	0,50	0,45
soja	8	25	0,50	0,40	0,25
calcário	13	27	0,55	0,50	0,40
beterraba	7	30	0,55	0,45	0,35
batatas	8	30	0,50	0,40	0,35
carvão em pó	8	25	0,55	0,50	0,40

Como regra geral, o fluxo de massa deve ser o escolhido se:

- a vazão de descarga é controlada sem indevidas flutuações;
- a segregação das partículas deve ser minimizada;
- o tempo de armazenamento no silo não deve ser indevidamente prolongado (com possibilidades de deterioração do produto armazenado);
- o local disponível seja adequado para instalação de tremonha cujos lados são muito inclinados, ou, quando possível, usar-se equipamentos de descarga nas tremonhas de lados menos inclinados.

O fluxo de funil deve ser escolhido se:

- as vantagens citadas anteriormente para o fluxo de massa não forem de particular importância;
- algumas flutuações na vazão de descarga, alguma segregação e tempo de armazenamento prolongado para o produto armazenado não causarem desvantagens;
- os locais adequados, ou altura forem limitados, ou antieconômicos;
- o espaço for utilizado ao máximo;
- as saídas múltiplas forem necessárias;
- o produto é de fluxo livre, particularmente se também contiver partículas grandes, que possam compactar o produto em tremonhas com lados muito inclinados.

O fluxo de massa requer sempre uma tremonha. O ângulo de inclinação das paredes da tremonha deve ser determinado pelo gráfico da Figura 23 DIN 1055 (1987). Para fluxo de funil, não é preciso uma tremonha para produto de fluxo livre, embora seja necessária para completa descarga por gravidade. Silos de fundo plano podem ser descarregados por meio de elementos mecânicos de descarga como, por exemplo: roscas sem fim. Se o silo já está construído, ou encontra-se fora do projeto padrão, então ocorre que a inclinação da tremonha e sua superfície, fornecem um tipo de fluxo que não é de massa e nem de funil. Nesses casos para evitar comportamentos instáveis de fluxo, será necessário:

- fazer as paredes da tremonha mais rugosas; ou
- fazê-las mais lisas; ou
- usar vibração, ou outros métodos que possuam o efeito de reduzir o atrito na parede da tremonha.

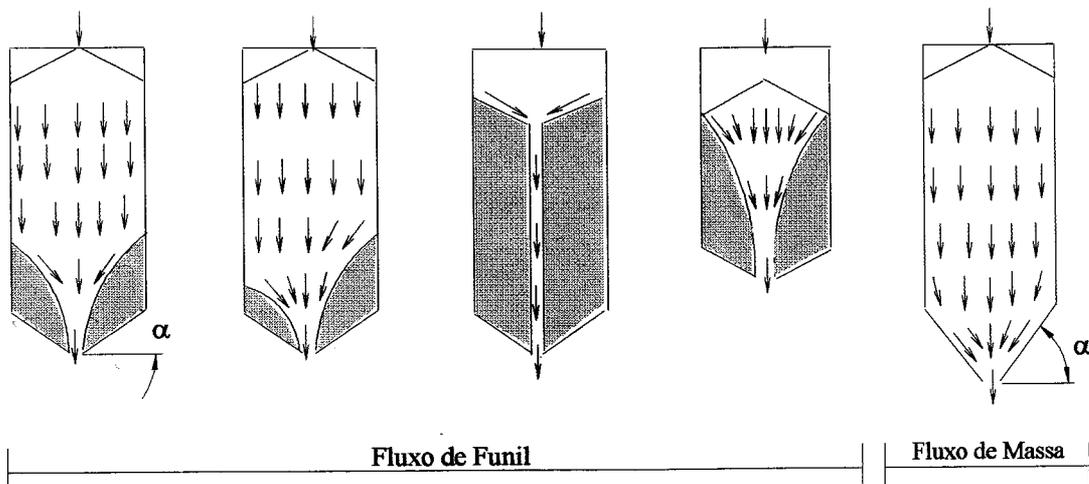


FIGURA 22 - Tipos de fluxo

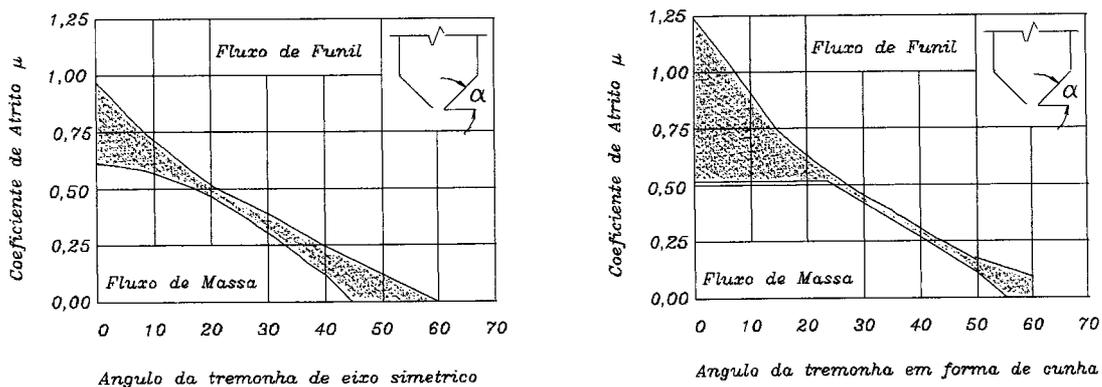


FIGURA 23 - Determinação gráfica do tipo de fluxo (DIN 1055, 1987)

4.3 Pressões em Silos

Para o cálculo das pressões em silos altos, sugere-se a adoção da norma DIN 1055 (1987) pois é um dos itens de maior responsabilidade, e essa norma foi completamente reformulada de sua antiga versão datada de 1964, em vista de experiências práticas em sua utilização, baseadas em acidentes com silos reais.

Os cálculos devem ser feitos para condições de descarga na seção paralela (corpo do silo) e para a condição de carregamento na tremonha (para fluxo de

massa, ou fluxo de funil, ou para ambos e, isto pode acontecer, mas se devem evitar os regimes de contorno) e escolher o valor máximo em cada caso.

4.3.1 Campo de Aplicação

- válida para qualquer material de construção do silo;
- silos verticais e prismáticos;
- dimensões do silo: $\frac{H}{d} > 0,80$

$$\frac{P_{vc}}{\gamma} < 25 \text{ m}$$

- não é válida para produtos fortemente coesivos e produtos granulares que incham.

Formas e Dimensões das Seções Transversais das Células - Raio Hidráulico.

$$R = \frac{A(\text{área})}{U(\text{perímetro})}$$

A Tabela 05, apresenta alguns valores do raio hidráulico em função da geometria e do lado do silo.

4.3.2 O Valor de K (relação entre as pressões horizontal e vertical)

O valor de K é definido na norma alemã pela expressão: $K = 1,2 (1 - \sin \phi_1)$; coeficiente de empuxo de solos multiplicado por 1,2. O fator 1,2 foi escolhido para garantir que em pequenas alturas do produto armazenado, ou seja, na parte superior do silo, resultem curvas de ações mais completas.

4.3.3 Pressões de Carregamento

- Pressão horizontal:

$$P_{hc} = \frac{\gamma R}{\mu} \left(1 - e^{-\frac{\mu K}{R} Z} \right)$$

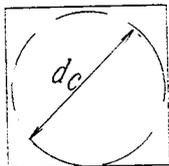
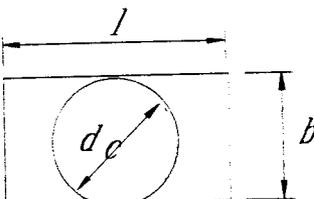
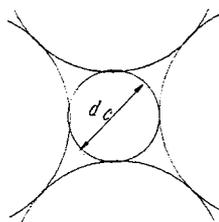
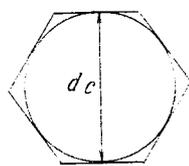
- Pressão vertical:

$$P_{vc} = \frac{\gamma R}{\mu K} \left(1 - e^{-\frac{\mu K}{R} Z} \right)$$

- Pressão de atrito por 1,0m de superfície de parede

$$P_{wc} = \gamma R \left(1 - e^{-\frac{\mu K}{R} Z} \right)$$

TABELA 05 - Seção transversal e seus respectivos raios hidráulicos

SEÇÃO TRANSVERSAL	RAIO HIDRÁULICO (R)	DIAGRAMA
Circular	$0,25 d_c$	
Quadrada	$0,25 d_c$	
Retangular considerando o lado b		
para l/b = 1,0	$0,25 d_c$	
para l/b = 1,5	$0,27 d_c$	
para l/b = 2,0	$0,30 d_c$	
para l/b = 4,0	$0,33 d_c$	
para l/b = 5,0	$0,35 d_c$	
- considerando o lado l		
para l/b = 1,5	$0,30 d_c$	
para l/b = 2,0	$0,33 d_c$	
para l/b = 4,0	$0,40 d_c$	
para l/b = 5,0	$0,50 d_c$	
Intercélular	$0,30 d_c$	
Poligonal	$0,27 d_c$	

4.3.4 Pressões de Descarregamento Central

- Pressão horizontal: $P_{hd} = P_{hc} \times C$

O coeficiente de sobrepressão de descarregamento central "C" é dado pela DIN 1055 (1987) para os seguintes produtos:

- açúcar, calcário, cimento, cinzas, pó de carvão e cal hidratada = 1,2
- cascalho de concreto, fosfatos, beterraba, carvão, coque e ferro = 1,3
- trigo, cevada, farinha, areia, soja, batatas, escória de caldeira = 1,4
- cascas = 1,5
- milho = 1,6
- ração = 1,7

- Pressão vertical: $P_{vd} < P_{vc}$

- Pressão de atrito nas paredes: $P_{wd} = 1,1 \times P_{wc}$

4.3.5 Pressão Não Uniforme (DIN 1055, 1987)

Durante o descarregamento pode ocorrer pressão não uniforme, a qual seria adicionada à pressão horizontal de descarregamento, determinada para a condição uniforme, como segue:

Para silos cilíndricos, a sobrepressão localizada será determinada de acordo com (1) abaixo, com a seguinte exceção: se os silos são enrijecidos na base e no topo e, as paredes resistem às pressões horizontais (devido ao produto armazenado) então, em vez da hipótese de uma pressão adicional, o incremento da pressão horizontal será assumida, como mostra o item (2) a seguir apresentado.

A pressão não uniforme causada por interconexões monolíticas entre silos em sistema multicelular, não deve ser considerada.

(1) Aplicação de distribuição da pressão parcial em adição à pressão horizontal de descarga, considera a sobrepressão $p_o = \beta \times P_{hd}$ para atuar em duas áreas diametralmente opostas. Assume-se que cada área tenha lado $l = 0,2D$. A sobrepressão total em cada área é $P_o = p_o(0,04d^2)$. O fator β é determinado pela expressão seguinte; é necessário o cálculo dessa sobrepressão no meio do silo e o uso

da meia altura do incremento de pressão para determinar o valor da sobrepressão em outra profundidade. A parede será verificada para a pressão não uniforme. Calculam-se as paredes submetidas a essa pressão; o suporte estático oferecido pelo produto armazenado não deve ser considerado.

O coeficiente β será determinado pela seguinte expressão:

$$\beta = \beta_h \times \beta_a \times \beta_r \times \beta_g.$$

sendo:

β_h - coeficiente de esbeltez do silo:

para $h/d_c < 1$	$\beta_h = 1,00$
para $1 \leq h/d_c \leq 4$	$\beta_h = 0,20 h/d_c + 0,80$
para $h/d_c > 4$	$\beta_h = 1,60$

β_a - coeficiente de excentricidade:

para $a/r < 1/3$	$\beta_a = 1$
para $a/r \geq 1/3$	$\beta_a = 3 (a/r)$

sendo a = excentricidade da boca de descarga

β_r - coeficiente de rigidez do silo

para $r/t \leq 70$	$\beta_r = 0,30$
para $r/t \geq 100$	$\beta_r = 0,05$
para $70 < r/t < 100$	interpolação linear

β_g - função do tipo de produto

- açúcar, areia, cascalho para concreto = 0,40
- trigo, cevada, calcário, cimento, fosfato, soja, beterraba, batata, cinza = 0,50
- farinha, carvão, coque, escória de caldeira e cal hidratada = 0,60
- cascas = 0,70
- milho = 0,90
- ração = 1,00

(2) Incremento de pressão no descarregamento

Em lugar do método do item (1) pode-se incrementar a pressão de descarga. Nesta aproximação, o incremento da pressão é feito pela multiplicação do coeficiente C_k pela pressão horizontal de descarga. O valor do coeficiente C_k é determinado por:

$$P_{hd} = P_{hc} \times C \times C_k \text{ uniformemente distribuída:}$$

- para silos cilíndricos:

$$r/t \leq 70 \quad C_k = 1 + \beta (0,5 + 0,02 r/t)$$

$$r/t \geq 100 \quad C_k = 1 + 3\beta \sqrt{\frac{h}{d_c}}$$

$$70 < r/t < 100 \quad \text{interpolação linear}$$

- para silos poligonais e prismáticos:

$$C_k = 1 + 0,8\beta$$

4.3.6 Pressões Adicionais em Silos com Fluxo de Massa

As pressões adicionais, devido ao fluxo de massa na transição do corpo do silo com a tremonha, serão dadas pelo menor valor das seguintes equações:

$$P_s = \gamma \times z$$

$$P_s = \gamma \times d_c$$

Considera-se que a pressão adicional varie linearmente de $0,30D$ acima e abaixo da transição, como é mostrado na Figura 24.

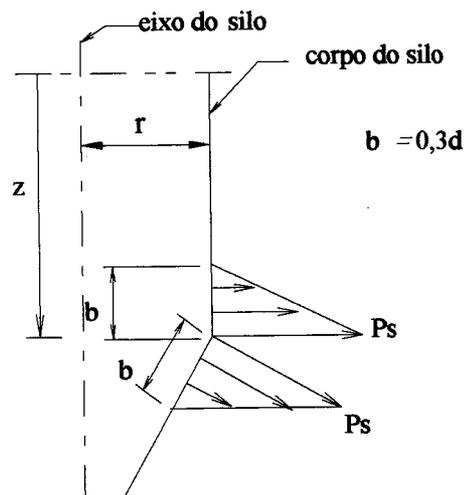


FIGURA 24 - Pressão adicional no fluxo de massa

4.3.7 Pressões na Descarga Excêntrica

Quando houver excentricidade na descarga, a norma DIN 1055 (1987) adota o coeficiente de excentricidade β_a , como definido no item 4.3.5.

Esse coeficiente multiplicado por outros coeficientes que levam em consideração a esbeltez do silo (β_h), a rigidez do silo (β_r) e o produto a ser armazenado (β_g), constitui o coeficiente (β) que deve multiplicar a pressão de descarga central P_{hd} . Esta pressão deve ser considerada atuando numa área quadrada de lado igual a $0,8r$ diametralmente oposta à parede lateral, até metade da altura do cilindro, e manter o crescimento percentual da solicitação resultante para a altura total.

4.4 Pressões Sobre Fundo Plano ($\alpha < 20^\circ$)

Para silos com a relação altura/lado maior que 1,5, a pressão vertical atuando no fundo do silo será assumida uniformemente distribuída e dada pela equação:

$$P_{vd}(z) = C_b \times P_{vc}(z) \leq \gamma \times H$$

onde é $C_b = 1,5$ para todos os casos, exceto para produtos que propiciem formação de abóbadas, onde $C_b = 1,8$.

Para silos com relação altura/lado menor que 1,5, com uma distribuição não uniforme de pressão, a pressão vertical pode ser assumida como:

$$P_{vd}(z) = C_b \times P_{vc}(z) \leq \gamma \times z^*$$

Nesse caso para a determinação da pressão vertical de carregamento, a profundidade z^* será igual à altura da parede do silo e, igual a $1,5D$ no centro do silo.

4.5 Pressão Normal às Paredes da Tremonha ($\alpha \geq 20^\circ$)

4.5.1 Pressão Normal Devido ao Produto Dentro da Tremonha

A pressão normal às paredes da tremonha, devida ao produto dentro da mesma, como mostra a Figura 25 é dada pela equação:

$$P_n = \frac{2,4\gamma RK(\text{sen}^2\alpha)}{\sqrt{\mu}}$$

$$P_w = \frac{P_n}{2}$$

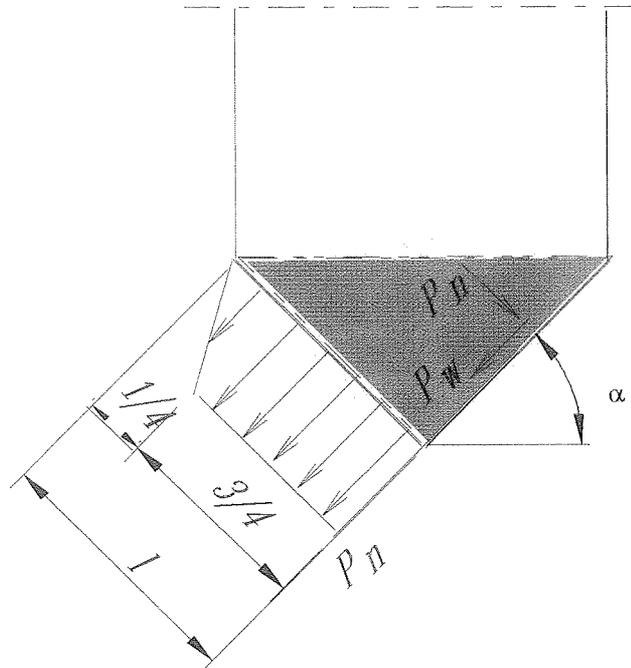


Figura 25 - Pressão normal às paredes da tremonha com produto dentro da tremonha

4.5.2 Pressão do Produto Sobre a Tremonha

A pressão normal às paredes da tremonha, devido ao produto sobre a linha de transição do corpo do silo e a tremonha, como mostra a Figura 26, é dada pelas equações abaixo:

$$P_{no} = (P_{vc} C_b \cos^2\alpha + P_{hc} \text{sen}^2\alpha) \left(1 + \frac{\text{sen}2\alpha}{4\mu}\right)$$

$$P_{nu} = P_{vc} C_b \cos^2\alpha$$

$$P_w = \frac{P_n}{2}$$

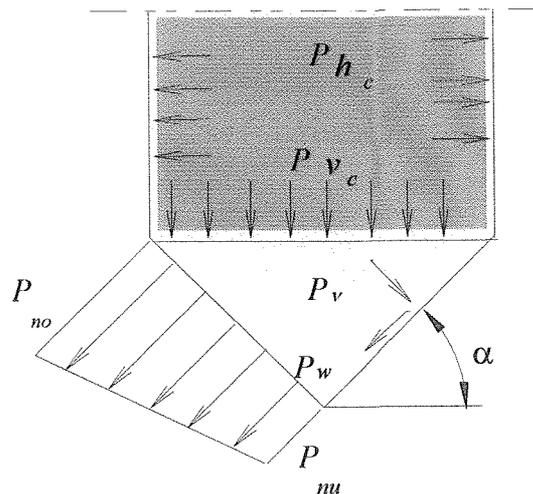


FIGURA 26 - Pressão normal à tremonha devido ao produto sobre a tremonha

4.6 Orientação no Projeto Estrutural de Silos Metálicos

Na determinação das pressões em silos, atenção especial deve ser dada às hipóteses dos cálculos estruturais e, o modo associado de ruptura da estrutura do silo.

O aumento das pressões em pequenas partes da estrutura é sempre tratado como se estendessem em todo o perímetro do silo na mesma profundidade; o que é uma hipótese não conservadora e, certamente, conduz a interpretações erradas das tensões induzidas na estrutura.

Importante distinção também precisa ser feita entre silos metálicos e silos de concreto armado com relação à resposta estrutural. Comumente os silos de concreto armado são altos, e seu projeto conduzido por condições relativamente simples. Os silos metálicos de todas as geometrias apresentam formas estruturais mais variáveis, pois o projetista tem condições de alterá-las pelo uso de anéis de enrijecimento, colunas verticais, ligações por abas, ou topo, placas curvas, ou paredes corrugadas e detalhes de suporte.

É mais fácil fazer recomendações sobre silos metálicos do que sobre silos de concreto, devido à variabilidade de parâmetros já mencionada. Desta forma, a mesma estratégia de cálculo para silos metálicos não pode ser aplicada a silos de concreto, devido à consideração preponderante referir-se, geralmente, à ruptura por flambagem (ROTTER, 1985).

Os silos metálicos apresentam-se usualmente, como finas estruturas em casca ($250 < R/t < 2000$). Cascas finas são estruturas eficientes, transmitindo suas ações predominantemente por tensões no plano, ou membrana. Silos metálicos, geralmente, respondem flexivelmente às altas e localizadas pressões do produto armazenado. Como as altas pressões observadas em ensaios durante a descarga podem ser relacionadas à rigidez das paredes, os silos metálicos não precisam ter grande coeficiente de sobrepressão usada para silos de concreto. Pesquisas nesse campo ainda estão em relativo estágio preliminar.

Quando parte do silo metálico é solicitada à tração biaxial (como nas tremonhas) a parede se comporta de maneira dúctil, e um completo mecanismo plástico precisa se desenvolver antes da ruptura. Elevadas pressões localizadas nas paredes são então redistribuídas antes que ocorra um colapso estrutural.

Entretanto, quando a parede é solicitada por força de compressão em pelo menos uma direção, torna-se propícia a ruptura por flambagem. Em silos cilíndricos, sem colunas, solicitados pelas típicas distribuições de Janssen, Walker ou Jenike, é fácil mostrar que a ruptura como consequência de excessivas pressões internas é o modo determinante perto do topo do silo. Além disso, a espessura da parede nessa região é, geralmente, controlada por detalhes construtivos que impõem a espessura mínima da parede. Para a maioria das paredes dos silos, a flambagem sob compressão axial tende a ser predominante da determinação da sua espessura.

Como a flambagem por compressão axial não é, usualmente, um modo de ruptura frágil, a maior tensão de compressão local precisa ser encontrada. Quando as pressões na parede estão em padrão simples de eixo simétrico (constante ao longo da circunferência em um certo nível) essas compressões axiais são somente devidas ao atrito do produto com a parede, superposição de ações e condições desiguais de apoios. Ignorando-se a última condição (usualmente não considerada no cálculo) a força de atrito do produto sobre a parede é a principal consideração de cálculo. A preocupação com pressões normais de pico na transição, nas teorias de WALTERS (1973) e JENIKE et al. (1973), conseqüentemente tendem a enfatizar os aspectos errados das ações nas paredes de silos metálicos. A carência de rupturas por fraturas em silos metálicos em serviço, enfatizam a observação.

A resistência à flambagem de uma casca cilíndrica sob compressão axial é aumentada substancialmente quando a casca é pressurizada internamente: quanto maior a pressão, maior se torna a resistência. O calculista, que desejar utilizar essa vantagem na resistência, precisa estimar a menor pressão interna que possa obter

atuando simultaneamente com a compressão axial na parede. Embora, esse fato seja reconhecido na Norma Alemã (DIN 1055) tem recebido pouca atenção dos teóricos e experimentadores em pressões em silos, os quais têm tentado principalmente definir a pressões máximas na parede.

A segunda causa de compressão axial que conduz à ruptura por flambagem em silos metálicos cilíndricos é das pressões que variam ao longo da circunferência em certa altura. A distribuição de pressões desse tipo é normalmente associada pelo calculista à descarga excêntrica JENIKE (1967), mas pode também ser devido à variação ao acaso das pressões durante a descarga, e são especificadas na Norma DIN 1055 (1987). Não é suficiente projetar as paredes do silo para ter resistência adequada à tração circunferencial para suportar a maior pressão esperada, simultaneamente em todos os pontos; tal fato assume o tipo de carregamento errado e implica na indução de compressão axial.

Simplificadamente com um tipo de carga local, a casca se comporta como se consistisse somente de um painel curvo com largura igual à da circunferência de aplicação da carga, mas com um comprimento igual à altura do silo. No topo do silo há um anel de rigidez; o painel atua como uma viga em balanço, apoiada, mas onde o topo é livre, havendo a tendência de deformar para fora da circunferência e então, a resposta é como uma viga em balanço simples.

O modelo é super simplificado, no entanto, serve para ilustrar, porque grandes tensões de compressão aparecem perto da base do silo por concentração local de pressão.

As tensões axiais são totalmente sensíveis à forma da pressão localizada: se é retangular, ou na forma de saliência circular, induzem à deformações locais para fora da circunferência. As deformações pré-flambagem podem reduzir a resistência à flambagem da parede de maneira semelhante às imperfeições geométricas.

Outra importante característica de silos metálicos deve ser notada. Silos metálicos cilíndricos apresentam-se frequentemente como estruturas com relação altura/diâmetro (lado) entre 0.5 e 2.0. Para tais estruturas, a relação entre as pressões horizontal e vertical (K) no produto armazenado é de fundamental importância. O uso de $K = 0,4$ para todos os materiais armazenados JENIKE, JOHANSON & CARSON (1973) pode ser justificado para células altas onde K tem pequeno efeito, entretanto para silos baixos é necessária maior precisão. Além disso, a variação de pressão perto do primeiro contacto do produto armazenado com a parede, afeta significativamente o cálculo, mas não é bem tratado na maioria

das pressões em silos. Também tem sido mostrado por ROTTER (1983) que carregamento excêntrico de silos baixos é muitas vezes o controlador do caso de carga, mas poucos dados experimentais são avaliáveis no resultado das pressões nas paredes (CALIL, 1987).

Os modos de ruptura mencionados, indicam que as recomendações para o cálculo das pressões nas paredes dos silos metálicos devem enfatizar:

- as máximas forças acumulativas de atrito nas paredes;
- a mínima pressão normal coexistente com a máxima força de atrito na parede;
- as pressões em silos baixos sob carregamento concêntrico e excêntrico;
- as reduções de carga provenientes da flexibilidade estrutural;
- a grandeza e a forma precisa do aumento, ou diminuição das pressões localizadas na parede das células.

Quando os pontos são comparados com aqueles correspondentes, relativos aos silos de concreto, fica claro que são necessárias regras completamente diferentes para os dois tipos de estruturas. Os trabalhos de pesquisas nas últimas duas décadas em pressões nas paredes dos silos, tem infelizmente, demonstrado pouca atenção à maioria desses pontos.

4.7 Informações a Serem Fornecidas ao Projetista e ao Usuário

4.7.1 Objetivos e Requisitos

Muitos acidentes ocorridos em silos também são devido à falta de definição das responsabilidades e das restrições na utilização das unidades armazenadoras. Por exemplo: é muito comum projetar-se um silo para produtos granulares e, posteriormente, no mesmo armazenar-se produtos pulverulentos. Essas informações e responsabilidades devem constar em documento. Sugere-se para esse item a adoção da norma britânica (CALIL, 1990) pois é a que melhor apresenta as informações.

4.7.2 Informações a Serem Fornecida pelo Usuário

O usuário deverá estipular seus objetivos para o silo, ou silos requeridos, incluindo os seguintes fatores e outros relevantes, além das possíveis mudanças no uso:

- armazenamento com descarga infrequente;

- armazenamento com descarga freqüente e contínua;
- descarga para transporte (rodovia ou ferrovia);
- descarga para o processo ou, o empacotamento;
- importância da descarga a ser controlada e/ou com possíveis paradas.

4.7.2.1 Materiais a Serem Manipulados

O usuário deve indicar a natureza de todos os produtos a serem armazenados no silo e, para cada produto, fixar os teores de umidades mínimas e máximas, a distribuição das dimensões das partículas mais grossas e das mais finas, e as densidades mais altas e mais baixas do produto armazenado, bem como a indicação de sua fluabilidade. A menor densidade deve referir-se a qualquer das condições de carregamento previstas.

O fluxo e as pressões são altamente sensíveis às propriedades dos materiais, e o usuário deve aceitar a responsabilidade pelas conseqüências em qualquer mudança no uso, incluindo os bjetivos originais e os subseqüentes entendimentos com o projetista.

É de responsabilidade do usuário fornecer também as seguintes informações ao projetista:

- área e altura disponível para a construção do silo;
- quantidade máxima de produto a ser armazenado;
- condições de carregamento e descarga indicando;
- máxima vazão de carregamento;
- máximas e mínimas vazões de descarga;
- se a descarga é contínua e intermitente, e o grau de controle necessário;
- os limites de segregação permissíveis;
- o tipo de equipamento de descarga a ser conectado com o silo;
- os perigos associados ao material armazenado, como por exemplo: toxicidade e propriedades explosivas;
- propriedades corrosivas do material no estado seco e úmido;
- tendência de formação de revestimento de superfície, devido por exemplo: a tração eletrostática, ou fusão;

- temperatura máxima e a mínima do produto a ser armazenado no silo;
- possível contaminação física, ou biológica;
- probabilidade de ocorrência de vibrações de máquinas, tráfego ou dispositivos de descarga;
- instrumentos a serem colocados no silo para medidas;
- se o silo, além do armazenamento, será também usado para esfriar, secar, misturar, ou outros processos;
- indicar qualquer experiência anterior com o armazenamento do produto em questão.

4.7.2.2 Responsabilidade do Projetista

Deve ser de responsabilidade do projetista assegurar que a informação fornecida seja detalhada o suficiente para o perfeito projeto, e que a integridade do fluxo e da estrutura do silo seja mantida sobre a variação total das condições de uso e propriedades dos produtos fornecidos pelo usuário, garantindo que as condições de manutenção e operação colocadas no Manual de Projeto e Operação (MPO) sejam observadas.

4.7.3 Informações a Serem Fornecidas pelo Projetista

4.7.3.1 Manual de Projeto e Operação

O projetista do silo deverá fornecer ao usuário um manual, contendo todas as informações necessárias para a operação e manutenção eficiente e segura do silo. O documento poderá ser menos detalhado para silos com pequenas dimensões (até 100 m³ de capacidade).

Todas as informações fornecidas pelo usuário devem ser colocadas no manual.

4.7.3.2 Projeto para a Integridade do Fluxo

O projetista deverá indicar para que tipo de fluxo, e para qual produto o silo foi projetado, e as condições de aeração e manutenção a serem observadas com a finalidade de evitar dificuldades no fluxo. Isso deve incluir pelo menos o seguinte:

- o produto ou produtos a serem armazenados;

- se o projeto é baseado em testes de cisalhamento, os limites dos efetivos ângulos de atrito interno e de atrito com a parede;
- limites na distribuição das dimensões das partículas;
- limites no teor umidade (incluindo colocação de água) e umidade do ar;
- limites na densidade;
- limites no tempo de armazenamento;
- limites na temperatura;
- limites no método e vazão de carregamento;
- limites na vazão de descarga;
- conexão com o equipamento de descarga;
- tipo e modo de operação de aditivos de fluxo, se houver;
- limites na restrição de qualquer fluxo, como registros ou válvulas rotatórias;
- limites nas mudanças da superfície interna das paredes do silo, previstas ou não (por exemplo, a corrosão);
- limites na excentricidade de descarga;
- quaisquer características que conduzam a resíduos do material no silo;
- características de segurança;
- características especiais para o fluxo de produtos destinados à alimentação humana.

4.7.3.3 Projeto para a Integridade da Estrutura

Para a integridade do projeto, o projetista deverá especificar pelo menos o seguinte:

- o método, ou métodos usados na determinação das pressões no silo;
- quaisquer pressões adicionais levadas em consideração, como as devidas a carregamento excêntrico, ações dinâmicas, aditivos de descaga etc;
- qualquer compensação para a pressão de explosão;
- quaisquer limites nas modificações estruturais, tanto para o carregamento como para a descarga dos produtos;
- fatores de segurança utilizados, incluindo corrosão e abrasão se aplicáveis.

4.7.3.4 Acesso, Inspeção, Limpeza e Manutenção

O projetista deverá indicar a manutenção requerida para a estrutura, os métodos e frequência de inspeção, e o critério a ser aplicado.

4.7.3.4.1 Acesso

Deve ser especificado no Manual de Projeto e Operação (MPO) que todos os silos devem ter pelo menos uma vez por ano, inspeções externa e interna. Para esse propósito deve haver acessos, incluindo escadas e, onde necessário, plataformas. As escadas e plataformas de acesso, devem ser adequadamente fixadas na estrutura do silo e, devem merecer atenção particular com relação à possibilidade de colapso de arcos ou abóbadas do produto. As portas de inspeção devem ter dispositivos de fechamento com chaves. Na entrada do acesso para a limpeza, devem ser previstos pontos de conexão para seguros, ou para passarelas seguras e protetoras.

4.7.3.4.2 Inspeção

Na inspeção deverão ser verificadas as superfícies internas e externas das paredes (avaliando-se qualquer corrosão, fissura, flambagem etc.) as condições do equipamento de carga e descarga, a existência de produto que possa ter consolidado e (possivelmente, deteriorado nas partes do silo) e qualquer recalque, ou dano nas fundações ou colunas. Nos casos de pós perigosos, precisam ser verificadas suas decomposições nas várias partes do sistema, e o próprio funcionamento de qualquer equipamento de controle. A inspeção deve, também, ser feita nos equipamentos e acessórios de carga e descarga.

4.7.3.4.3 Limpeza

Se o produto a ser armazenado deteriora com o tempo, tendendo a grudar, ou corroer as paredes, a parte interna do silo deve ser limpa em intervalos curtos o suficientes para prevenir ações estruturais. A rotina para a limpeza deve ser especificada para o usuário pelo projetista.

4.7.3.4.4 Manutenção

É usual para a boa manutenção, que não seja realizada pelo mesmo pessoal que opera o equipamento. Deve haver sistema formal para controlar a transferência do equipamento da operação para a manutenção, isto é, permitir que o sistema funcione. Causa comum de explosões é o uso de soldas ou ferramentas de corte

em lugares onde existem pós explosivos. Para prevenir deve ser adotado um sistema formal que assegure que o lugar seja limpo, ou seu conteúdo tornado não inflamável, antes que o trabalho seja executado.

4.7.3.4.5 Segurança

O projetista deverá indicar as precauções de segurança a serem observadas, de acordo com os seguintes cuidados: explosões; escape de pós tóxicos ou gases nocivos; transbordamento; acidentes com o pessoal de operação e manutenção; coagulação do produto seguido por movimento destrutivo, ou colapso.

4.8 Conclusão

A conclusão referente ao estudo realizado refere-se aos cálculos das pressões e, são principalmente baseados na teoria de Janssen, incluindo o caso de silos baixos. As maiores diferenças são causadas quase sempre pelos diferentes parâmetros adotados para o produto armazenado, particularmente pelos diferentes valores da relação entre as pressões horizontais e verticais K , pelos diferentes coeficientes de atrito com a parede μ e pelos mais ou menos empíricos coeficientes de sobrepressão C . Como a maioria dos parâmetros são determinados por meio de métodos probabilísticos e empíricos, e alguns fenômenos, como por exemplo: o chamado "mudança", não estão muito bem entendidos (em princípio, obviamente) não faz sentido usar fórmulas que são muito complicadas para o projeto de silos.

É muito importante definir inicialmente o tipo de instalação, cilíndrica ou prismática, metálica ou de concreto, já que da escolha depende o cálculo a se realizar, levando-se em conta os momentos fletores, efeitos de ovalização, flambagem etc.

É muito importante definir, também, a relação altura-lado do silo e as características dos produtos a armazenar para se poder estabelecer hipóteses de cálculos corretas, que permitam executar uma construção segura e econômica de acordo com as recomendações internacionais existentes.

5 CLASSIFICAÇÃO, COMBINAÇÕES E FATORES DAS AÇÕES

No projeto de silos devem ser consideradas as ações abaixo, além de outras que possam surgir em casos especiais (NBR 8681, 1984):

- ações permanentes;
- ações variáveis;
- ações excepcionais.

5.1 Ações Permanentes

As ações permanentes são constituídas pelo peso próprio da estrutura, da plataforma e dos equipamentos mecânicos instalados na cobertura e/ou suspensos pela tremonha.

Deve-se estimar os limites inferior e superior e usá-los para a combinação com todas as ações, e adotar a condição mais desfavorável.

5.2 Ações Variáveis

No projeto de silos devem ser consideradas as seguintes ações variáveis normais:

- carga acidental devido ao produto armazenado. Essa carga deve ser dividida em outras duas, que são as cargas de carregamento do produto no silo e as cargas induzidas pelo fluxo do produto armazenado;
- forças das correias transportadoras presas à estrutura do silo;
- pressão ou sucção interna dos gases;
- forças de contenção lateral;
- força de fixação de elementos externo na estrutura;

- ação do vento.

Além disso devem ser consideradas as ações variáveis especiais:

- ação devido ao recalque diferencial da fundação;
- ação devido ao diferencial de temperatura;
- expansão do produto na descarga.

5.3 Ações Excepcionais

No projeto de silos devem ser consideradas as seguintes ações excepcionais:

- impacto de veículos;
- pressão de explosão de pós.

5.4 Determinação das Ações Variáveis Normais Devido ao Produto Armazenado

As propriedades físicas dos produtos armazenados em silos, podem mudar com o tempo. As combinações mais desfavoráveis das propriedades (para cada caso) dependem do efeito da ação considerada. Portanto, é necessário definir os limites superior e inferior das propriedades dos produtos armazenados.

5.4.1 Densidade do Produto Armazenado

A densidade do produto será considerada a maior para o cálculo das pressões horizontais e verticais, e a menor para o cálculo do tipo de fluxo.

5.4.2 Ângulo de Atrito com a Parede

O ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w) usado para calcular as pressões e a tração será utilizado com os valores superior e inferior de acordo com o objetivo. O valor adequado para cada situação é dado na Tabela 06.

5.4.3 Efetivo Ângulo de Atrito Interno

O efetivo ângulo de atrito interno do produto (ϕ_i) usado para definir as pressões e a força de atrito nas paredes dos silos será, também, adotado com valor superior ou inferior de acordo com a aplicação. O limite adequado para cada situação é dado na Tabela 06.

5.4.4 Consistências das Propriedades Físicas dos Produtos

Para qualquer caso, deve-se estabelecer a consistência das propriedades físicas dos produtos, o ângulo de atrito com a parede (ϕ_w), que não pode ser maior do que o efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_i).

Recomenda-se a determinação dos valores superior e inferior dos efetivos ângulos de atrito interno (ϕ_i) e do atrito do produto com a parede (ϕ_w) utilizando-se a metodologia adotada por MILANI (1993).

TABELA 06 - Emprego dos limites do ângulo de atrito interno (ϕ_i), atrito com a parede (ϕ_w) e a relação da pressão horizontal e vertical (K) (AS 3774, 1990)

Aplicação das Propriedades	Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w)	Ângulo de atrito interno (ϕ_i)	Relação das pressões horizontal e vertical (K)
pressão horizontal máxima na parede do silo	inferior	superior	inferior
força máxima por atrito na parede do silo	superior	superior	inferior
carga vertical máxima na tremonha	inferior	inferior	superior
pressão máxima na tremonha	valor inferior para tremonha	-	superior

5.4.5 Pressões nas Paredes dos Silos

As pressões nas paredes dos silos foram discutidas separadamente no Capítulo 4, "Recomendações Para Projeto de Fluxo e Ações em Silos Metálicos Verticais", que são as ações decorrentes do tipo de fluxo e das pressões de carregamento e descarregamento com a boca da tremonha centrada e excêntrica.

5.4.6 Ações em Contensões Laterais

Onde um sistema de contenção lateral na subestrutura é necessário para oferecer estabilidade ao silo, as forças de restrição devem ser determinadas de acordo

com a norma específica de projeto. Uma força mínima lateral de 2,5% das ações permanentes, será usada no cálculo dessas restrições (AS 3774, 1990).

5.4.7 Cargas nos Elementos Estruturais Internos nos Silos

As cargas nos elementos estruturais internos acima do nível de transição são maiores sob condição de fluxo. Para elementos internos abaixo da transição, as forças devem ser determinadas de acordo com a pressão sobre os elementos, ou seja, pressão vertical, pressão horizontal e força de atrito.

5.4.8 Pressão ou Sucção Interna de Gás

A pressão, devido aos ventiladores de extração de pó será combinada com os dados fornecidos pelo fabricante do sistema de controle de pós, mas nunca, se deverá apresentar pressão menor que 0,3 kPa.

5.4.9 Ação do Vento

As estruturas de armazenamento expostas à ação do vento, devem ser calculadas de acordo com a norma brasileira NBR 6125 (1988).

O vento de sucção em silos sem cobertura, silos em construção, ou silos tendo grandes aberturas, devem ser considerados separadamente no cálculo. O coeficiente negativo de pressão deve ser tomado como -0,80. Particularmente para silos retangulares serão fornecidas algumas recomendações no Capítulo 6.

5.5 Determinações das Ações Variáveis Especiais

Atenção especial deve ser dada para pequenos recalques com relação às deformações locais verticais da fundação; o recalque diferencial total deve ser dividido em suas partes constituintes.

Onde o recalque diferencial próximo do silo for uniforme, as cargas devem ser introduzidas no silo por estruturas adjacentes, que são fixas. Essas cargas devem ser consideradas.

5.5.1 Diferencial de Temperatura

Quando a radiação solar causar aquecimento de um lado do silo, a temperatura da parede exposta ao sol será tomada como 30°C acima da temperatura na sombra para silos metálicos, ou 20°C para silos de concreto.

Quando houver uma mudança súbita na temperatura ambiente, pode conduzir a uma diferença térmica entre a parede do silo e o produto armazenado; o diferencial será adotado como 1,2 vezes a maior temperatura ambiente conhecida ocorrida em 24 horas.

O diferencial térmico entre o silo e outra estrutura conectada, deverá ser examinado.

5.5.2 Ações Devidas à Expansão do Produto Armazenado

Onde houver variação do teor de umidade do produto armazenado após o carregamento do silo, as mudanças na pressão horizontal e nas forças de atrito nas paredes, devem ser determinadas, como descrito abaixo.

Segundo AS 3774 (1990), para base muito rígida de silos e a variação do teor de umidade exceder 1%, a pressão horizontal será determinada pela seguinte equação:

$$P_{sw} = \frac{\gamma R}{\mu} C_{sw}$$

onde:

$$C_{sw} = \left(e^{+\frac{\mu K_{su}}{R} z} - 1 \right)$$

Tais pressões não são adicionais a pressão de carregamento ou descarregamento, mas constitui um caso separado de ação. O sinal positivo na expressão para C_{sw} deve ser observado com cuidado.

A razão da pressão horizontal e vertical (K_{su}) será determinada por meios adequados. Na ausência de dados experimentais, K_{su} será tomado com 1,0.

O atrito vertical é, também, induzido pela dilatação, tendendo a provocar tração vertical na parte interna da parede. A tração será determinada pela seguinte equação:

$$P_{q,sw} = \mu P_{sw}$$

A somatória destas ações de atrito vertical na parede por unidade de profundidade no perímetro do silo será:

$$N_{ten} = \gamma R \left(\frac{\mu K}{R} C_{sw} - z \right)$$

O fundo do silo deve ser projetado para resistir à maior pressão vertical de:

$$P_v = \frac{\gamma R}{\mu K_{sw}} C_{sw}$$

Quando a variação do teor de umidade for menor do que 1%, utilizar-se-ão os mesmos valores, a não ser que se faça experimentos para avaliar.

5.6 Determinação das Ações Excepcionais

5.6.1 Ações de Impacto de Veículo

Quando houver possibilidade de ocorrer colisão de veículo com a estrutura de suporte, ou com o silo, onde não é prevista com proteção adequada, forças de impacto apropriadas devem ser aplicadas à estrutura.

5.6.2 Pressão causada pela explosão interna

O perigo da explosão interna será pesquisado onde o produto armazenado no silo, possuir partículas finas inflamáveis. Muitos produtos vegetais, animais, carbonáceos e compostos orgânicos sintéticos, podem formar poeira, sujeita à explosão. A faísca elétrica é muitas vezes suficiente para iniciar uma explosão. O potencial da explosão deve ser investigado por ensaios, quando necessário.

Certos produtos emitem gases inflamáveis durante o armazenamento. A potência desses gases, que são produzidos durante o armazenamento serão considerados e, quando necessário serão pesquisados e testados.

5.7 Combinações das Ações

Cada elemento da estrutura deve ser calculado para carga e combinação de cargas apropriadas. Os valores característicos superior e inferior das cargas, devem ser aplicados a cada elemento estrutural, considerando o estado limite último e o estado limite de utilização. A Tabela 07 dá as combinações propostas pela AS3774 (1990).

A probabilidade de ter as cargas numa combinação atuante com seus valores característicos deve ser considerada, com todas as cargas, variando aleatoriamente. Na falta de métodos para análise probabilística a AS3774 (1990) oferece uma idéia de combinação de carga com a identificação do elemento estrutural que é propício à

redução da resistência, quando um ou mais tipos de cargas numa combinação convergem para o valor característico inferior. Exemplos típicos são: (a) paredes de silos cilíndricos com carga axial, quando a pressão horizontal, devido ao produto quando armazenado é levada em consideração a análise de flambagem; (b) também parafusos de ancoragem sob cargas de armazenamento devido às condições de carga externa.

TABELA 07 - Classificação e combinações das ações

classificação das ações			combinações			
grupo de ação	tipo de ação	descrição da ação	1	2	3	4
A ações permanentes	A.1	peso próprio do silo, estrutura de sustentação, planta mecânica e equipamentos (nota 2)	X	X	X	X
B ações variáveis normais	B.1	ação gravitacional do produto armazenado	X	X	X	-
	B.2	ações iniciais nas paredes do silo	X	-	-	-
	B.3	ação induzida pelo fluxo do produto armazenado	-	X	-	-
	B.4	força das correias transportadoras e carregamento, atuando sobre o silo (nota 3)	X	X	X	-
	B.5	ação ativa da plataforma e cobertura	X	X	X	-
	B.6	pressão interna do gás ou sucção (nota 4)	-	X	-	-
	B.7	força de contenção lateral	X	X	X	-
	B.8	impacto causado pelo descarregamento	-	-	X	-
	B.9	forças de fixação da estrutura (nota 5)	-	-	X	-
C ações variáveis especiais	C.1	ação do vento	-	-	(X)	(X)
	C.2	ação devido ao recalque diferencial da fundação	-	-	(X)	-
	C.3	ação devido ao diferencial de temperatura	-	-	(X)	-
	C.4	ação sísmica	-	-	(X)	-
	C.5	expansão do produto na descarga	-	-	(X)	-
D ações excepcionais	D.1	impacto de veículo	-	-	(X)	-
	D.2	pressão de explosão de pó	-	-	(X)	-

Notas:

1. Para combinação 3 das ações, os componentes marcados com (X) serão considerados para combinar com aqueles marcados também com X e será adotado o efeito mais desfavorável.
2. O peso próprio da estrutura, a fixação das instalações mecânicas e dos equipamentos. À ação identificada como do tipo A.1, será usada para todas as combinações; os valores superior e inferior e, a alternativa mais desfavorável será adotada. À plataforma mecânica e os equipamentos instalados na cobertura, ou suspensos pela tremonha serão incluídos o limite superior para verificação da resistência e do cálculo da estabilidade da estrutura.
3. Forças induzidas na estrutura do silo pelas correias transportadoras e no carregamento, serão determinadas, usando-se a condição de operação mais desfavorável que ocorra. As forças de atrito induzidas pelo carregamento serão calculadas com base na pressão vertical, e será incluída na pressão horizontal na tremonha. Considerar-se-á no projeto, a força de arraste longitudinal das correias transportadoras, que são suportadas pela estrutura. Onde a força inicial for pouco favorável, o valor será utilizado no projeto. Quanto às vibrações e impacto transmitido à estrutura do silo, proveniente da plataforma, correias e outros equipamentos, deverão ser pesquisados.
4. Forças devido às restrições laterais, de modo que o braço de apoio (contraventamento de outra estrutura; mão francesa etc.) e vigas rígidas, necessárias para propiciar a estabilidade da estrutura serão determinadas por análise adequada.
5. Onde a estrutura do silo é usada para dar estabilidade às galerias para o transporte de produtos ou estruturas adjacentes, as ações transmitidas para essas estruturas serão incluídas no projeto da estrutura do silo.
6. A colisão de veículo nas colunas, ou nas paredes dos silos não é prevista pela medida positiva; a força de impacto determinada por uma análise dinâmica será aplicada para os suportes.

5.8 Fatores de Ações

Dois conjuntos de fatores de cargas são especificados: um conjunto para estados limites últimos e, outro para estados limites de utilização.

Os valores dos coeficientes de ponderações de carga da Tabela 08 refletem o conceito probabilístico do código dos estados limites, nos quais variam de acordo com as classes de carregamento, incluída em cada combinação particular de carga desde que seja impossível abordar toda combinação de carga existente, numa grande variedade de silos; o calculista deve cuidar somente de investigar todas as condições especiais que possam aparecer e, aplicar os valores apropriados dos fatores de cargas. A Tabela 08 mostra os valores dos estados limites últimos e, os estados limites de utilização para cada tipo de ação.

TABELA 08 - Coeficiente de ponderação dos estados limites últimos para utilização em projetos de silos em função dos tipos de ações.

grupo e tipo de ações	descrição	Coeficiente de Ponderação	
		estados limites últimos	estados limites de utilização
A	ações permanentes	1,4	1,0
A.1	ação gravitacional do produto armazenado	1,25	1,0
B.2 e B.3	ação induzida na parede pelo produto	1,5	1,1
B.2 e B.3	ação devido ao produto aplicada à estrutura de suporte	1,5	1,0
B.4 A B.9	outras ações normais de serviços	1,8	1,1
C	ações provável para combinação com ações do grupo A e B	1,4	0,9
D	ações acidentais para combinação com ações do grupo A e B	1,25	0,8

5.9 Conclusão

Atualmente há a tendência mundial na elaboração de projetos estruturais, adotando o critério de dimensionamento nos estados limites com o objetivo da realização de projetos estruturais mais seguros e econômicos. Assim, se faz necessária a determinação mais precisa das ações que atuam nas estruturas dos silos. Tomando como base a Norma Brasileira de Ações e Segurança nas Estruturas (NBR 8681) classificamos as ações para silos nos três grupos citados. Por falta da norma brasileira de ações em silos, propomos que sejam adotadas as recomendações da AS3774 (1990) para combinações de ações em projetos de silos. As combinações citadas

não serão consideradas como regra geral, mas como referência para que os projetistas sejam alertados para circunstâncias especiais de combinações e como ponto de partida para discussão ampla, que no futuro possa ser incluída na elaboração da norma brasileira de projeto de silos.

6 SILOS METÁLICOS PRISMÁTICOS PARA ARMAZENAMENTO DE RAÇÃO

O sistema de construção, consiste numa pré-fabricação de painéis metálicos para as paredes na indústria, que, mediante a conformação horizontal, ofereça a resistência suficiente para resistir às pressões exercidas pelos produtos armazenados. Não obstante as diversas soluções de conformação das paredes propostas até o momento, somente dois tipos progrediram e são utilizados nas construções de grandes silos (RAVENET, 1990):

- conformação trapezoidal: A Figura 27 mostra o tipo de conformação com um ângulo na parede inclinada, variando de 45 a 60 graus. Para manter a rigidez da chapa dobrada, colocam-se platibandas soldadas em suas extremidades. Esse tipo de conformação é utilizada em silos para armazenamento de produtos granulares de fácil descarga.
- conformação zig-zague: Na Figura 28 vemos o tipo de conformação com o ângulo da parede inclinada de 70 a 72 graus. Esse tipo de conformação é utilizado em silos para armazenamento de produtos pulverulentos coesivos.

Nas duas soluções já apresentadas, a distância entre as conformações, assim como a largura dos painéis, dependem do fabricante, do país e/ou da norma. Os painéis são fabricados com as platibandas na indústria por meio de soldagem. A montagem é realizada "in situ", parafusando-se, ou se soldando quatro platibandas, formando, dessa forma uma coluna da união de duas, três ou quatro paredes de silos prismáticos.

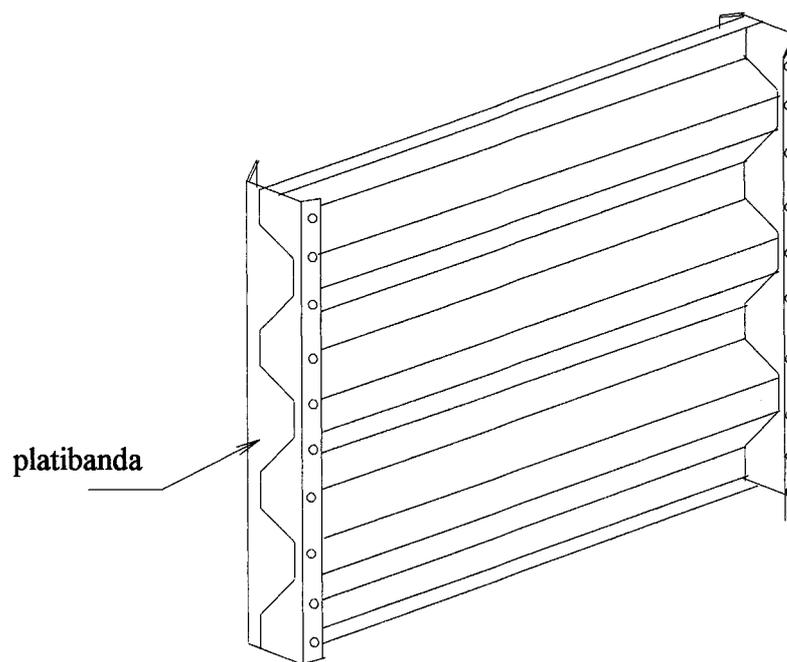


FIGURA 27 - Painel de conformação trapezoidal

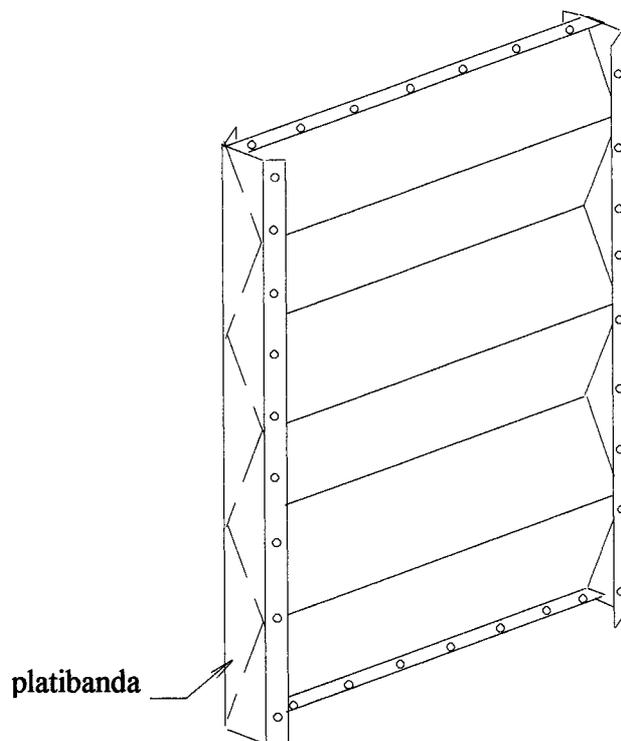


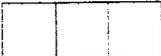
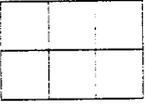
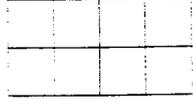
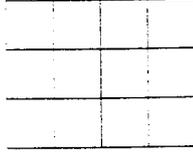
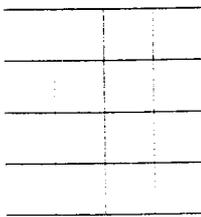
FIGURA 28 - Painel de conformação ziguezague

Apresenta-se no Quadro 04 um esquema das disposições de silos multicelulares prismáticos, que podem ser construídos analisando-se o tipo do projeto (RAVENET,1983).

Pode-se construir desde uma célula: silo tipo 1, a partir de uma célula e continuar com uma linha de células até chegar ao tipo 1-n. Na segunda linha, formam-se silos do tipo 2, desde o 2-2 até o 2-n. O tipo 3, começa por 3-3 (com nove células) e segue até 3-n. Para os três tipos de silos, o sistema de carga e descarga é idêntico à série do tipo 1, adicionando-se unicamente diversos tubos de carga.

Para os silos do tipo 4 (como são células múltiplas de quatro) são necessários dois sistemas de cargas e de descargas.

QUADRO 04 - Disposições contrutivas dos silos multicelulares prismáticos

tipo	1	2	3	4
1	 C = 4	 C = 3,5	 C = 3,33	 C = 3,25
2		 C = 3	 C = 2,83	 C = 2,75
3			 C = 2,67	 C = 2,58
4				 C = 2,50

No Quadro 04 foi mostrado cada tipo de célula e seu respectivo coeficiente C , que é a relação entre o número de paredes e o número de células. Deve-se levar em consideração, que uma parede interna é comum a duas células e, quanto maior o número de paredes internas, maior será a economia e menor o coeficiente C . O coeficiente é máximo para célula do tipo 1-1.

Os tipos dessas instalações são muito construídos nas indústrias, onde há limitação territorial e se precisa do máximo de capacidade de armazenagem com o mínimo de terreno. A mecanização desses silos é muito simples; basta colocar um transportador superior de carregamento e outro inferior de descarga, unidos por um elevador de canecas.

As vantagens de um silo multicelular prismático com relação a um silo cilíndrico são:

- devida a existência de muitas células, pode-se realizar uma transilagem do produto armazenado no caso de existir problemas de aquecimento do produto;
- pode-se selecionar o produto a armazenar em célula específica em função das suas propriedades físicas;
- a descarga de um silo multicelular efetua-se por gravidade, enquanto que no silo cilíndrico unicelular, a maioria da vezes a descarga realiza-se por meio de rosca sem fim, devido ao alto custo de elevação do silo com o correspondente gasto de energia.

Nessas instalações aparecem outros fatores que influem no custo final, os quais são:

- construção de um recinto superior para colocação e inspeção da maquinaria;
- elevar o corpo do silo sobre pilares e suspender as tremonhas para se conseguir descarga por gravidade, encontrando-se toda a instalação sobre a cota 0.

6.2 Dimensionamento das Paredes conformadas horizontalmente

6.2.1 Espessuras de Chapas nas Paredes de Ondas Trapezóidais

RAVENET (1992) recomenda fazer um estudo dos três tipos de flexões que podem ocorrer nas paredes dos silos durante o armazenamento de produtos agrícolas, que são:

- flexão geral no vão entre colunas sob efeito de empuxo horizontal do produto armazenado;

- flexão oblíqua entre colunas, sob o efeito da resultante do empuxo horizontal e da força de atrito do produto armazenado sobre a parede;
- flexão local das superfícies verticais, ou inclinadas das conformações sob os efeitos do empuxo e da força de atrito definidos anteriormente.

6.2.1.1 Flexão Geral nas Paredes

Na Figura 29 é apresentado o perfil da onda trapezoidal.

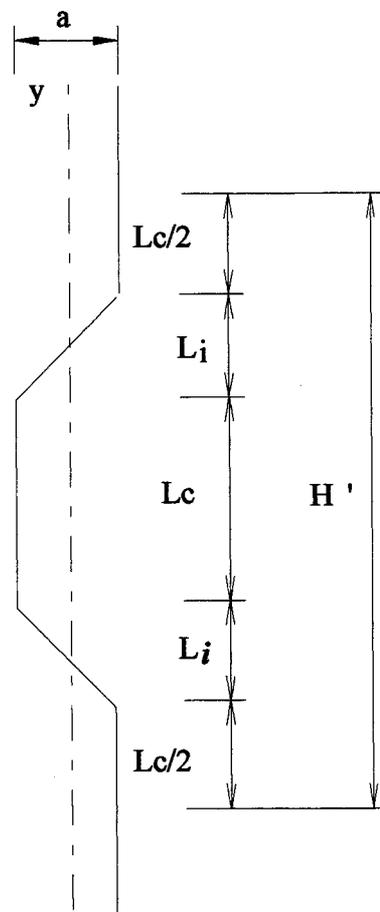


FIGURA 29 - Onda trapezoidal com eixo yy

O momento de inércia segundo eixo YY, é dado por:

$$I_{YY} = \frac{2}{12} t L^3 \cos^2 \alpha + 2 \left(\frac{1}{12} L_c t^3 + t L_c \frac{a^2}{4} \right)$$

O módulo de resistência segundo eixo YY, é dado por:

$$W_{yy} = \frac{2 I_{yy}}{a}$$

Esforços transmitidos às paredes do silo prismático pelo produto armazenado:

O momento fletor, devido ao produto armazenado é dado por:

$$M_{yy} = \frac{P_h L^2}{12} 100 H'$$

O esforço de tração na parede devido ao produto armazenado, é dado por:

$$T = \frac{P_h L}{2} H'$$

A tensão atuante nas paredes dos silos devido à flexão geral é dado pela expressão:

$$\sigma_{\text{chapa}} = \frac{P_h L^2 100 H'}{12 W_{yy}} + \frac{P_h L H'}{2 S}$$

6.2.1.2 Flexão oblíqua nas paredes

É mostrado na Figura 30 o perfil da onda trapezoidal com eixo ZZ que corresponde ao módulo de menor resistência.

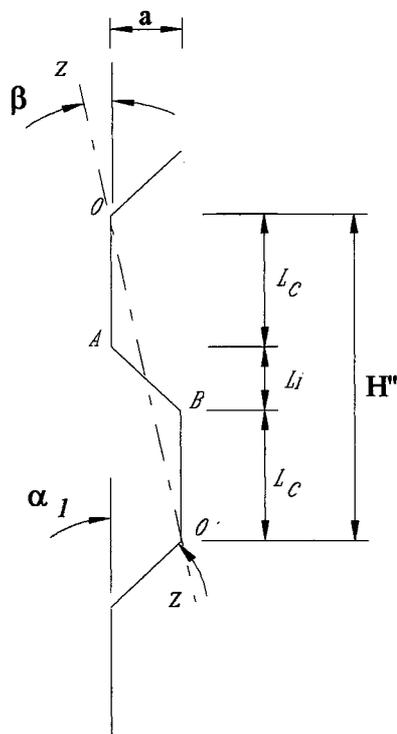


FIGURA 30 - Onda trapezoidal com eixo ZZ

O momento de inércia do perfil trapezoidal segundo o eixo ZZ é dado pela expressão:

$$I_{zz} = \frac{1}{12} t L_c^3 \operatorname{sen}^2(\alpha_1 - \beta) + 2 \left(\frac{1}{12} L_c^3 t \operatorname{sen}^2 \beta + L_c t \frac{b^2}{4} \right)$$

$$\beta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{a}{H'}$$

O módulo de resistência segundo o eixo ZZ:

$$W_{zz} = \frac{I_{zz}}{b}$$

Momento fletor na parede, devido ao produto armazenado, segundo o eixo ZZ:

$$M_{zz} = \frac{P_h L^2 100 H'}{24}$$

O esforço de tração, devido ao produto armazenado:

$$T = \frac{P_h L}{2} H'$$

A tensão atuante nas paredes dos silos devido à flexão oblíqua é dada por:

$$\sigma_{\text{chapa}} = \frac{P_h L 100 H'}{12 W_{zz}} + \frac{P_h L H'}{2 S}$$

6.2.1.3 Flexão local

O módulo de resistência em um metro de comprimento de onda vale:

$$W_{xx} = \frac{1}{6} 100 t^2$$

A tensão atuante nas paredes dos silos, devido à flexão local é dada por:

$$\sigma_{\text{chapa}} = \frac{P_h L^2 100}{12 W_{xx}} = \frac{P_h L^2}{2 t^2}$$

6.2.2 Espessuras de Chapas nas Paredes de Ondas Ziguezague

6.2.2.1 Flexão Geral Sobre as Paredes

A Figura 31 mostra o perfil da onda ziguezague com eixo YY.

O momento de inércia do perfil abaixo segundo o eixo YY:

$$I_{yy} = \frac{2}{12} t L_c^3 \cos^2 \alpha_1$$

O módulo de resistência, segundo o eixo YY

$$W_{yy} = \frac{2 I_{yy}}{a}$$

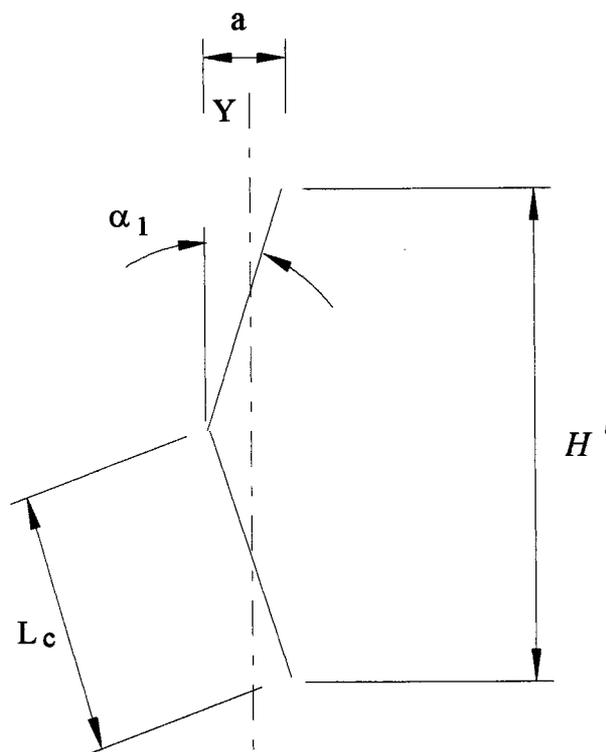


FIGURA 31 - Perfil com conformação ziguezague com eixo YY

6.2.2.2 Flexão Oblíqua na Parede com Onda Ziguezague

A Figura 32 mostra o perfil da onda ziguezague com o eixo ZZ.

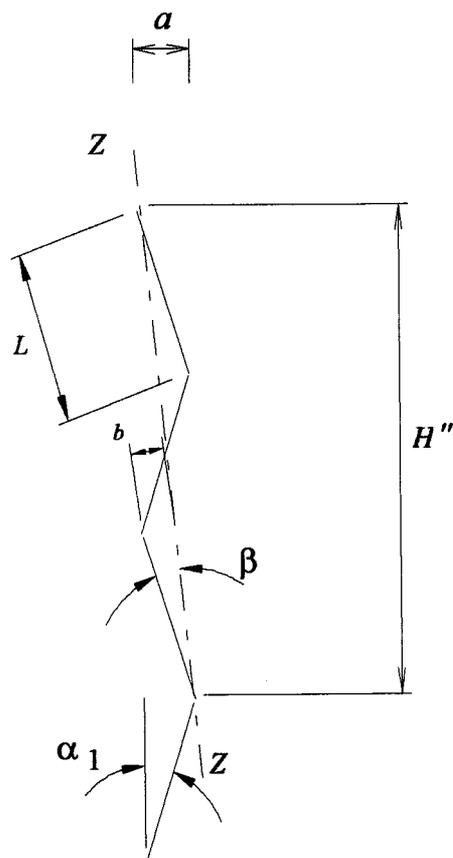


FIGURA 32 - Perfil da onda zigzague com o eixo ZZ

O momento de inércia da conformação zigzague, segundo o eixo ZZ:

$$I_{zz} = \frac{2}{12} t L_c^3 \cos^2(\alpha_1 - \beta) + \frac{1}{12} \left\{ t L_c^3 \cos(\alpha_1 - \beta) + 2 t L_c \cos(\alpha_1 - \beta) \frac{b^2}{4} \right\}$$

onde:

$$b = L \operatorname{sen}(\alpha_1 - \beta)$$

O módulo de resistência, segundo o eixo ZZ:

$$W_{zz} = \frac{I_{zz}}{b}$$

Para se calcular o momento fletor, o esforço de tração e a tensão atuante deste perfil com relação aos eixos YY e ZZ, segue-se o mesmo princípio utilizado para a onda trapezoidal.

6.2.2.3 Flexão Local

O cálculo do módulo de resistência e da tensão atuante de flexão é idêntico ao utilizado para conformação trapezoidal.

6.3 Dimensionamento das Colunas dos Silos Multicelulares

Em silos metálicos prismáticos multicelulares, existem colunas que correspondem à união de dois, três e quatro painéis que suportam as forças de atrito (RAVENET, 1992) como é mostrado na Figura 33. As espessuras das colunas são função da altura relativa e da posição geométrica.

A força de atrito máxima que pode ocorrer em silo quadrado de lado L , corresponde ao peso total da massa armazenada, dada por:

$$F_{\text{tr}} = L^2 H \gamma$$

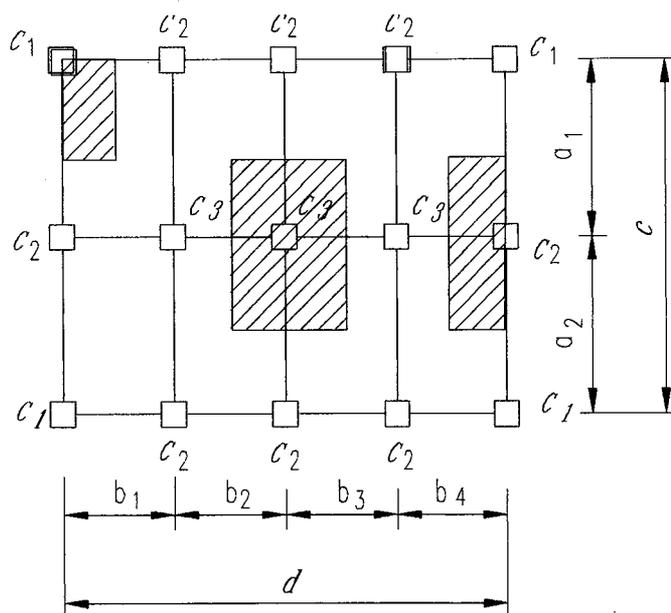


FIGURA 33 - Tipos de colunas existentes em um silo multicelular

6.3.1 Colunas de Canto (C₁)

Como é mostrado na Figura 33, as colunas estão localizadas nos quatro cantos de um silo multicelular; a força axial é decorrente da força de atrito do produto armazenado sobre as paredes e , para esse tipo de coluna, a força corresponde a um quarto da força de atrito total de uma célula.

A força atuante sobre essas colunas é dada por:

$$F_{C_1} = \frac{F_{rt}}{4 S_1}$$

6.3.2 Coluna de Borda (C₂)

São as colunas localizadas nas bordas dos silos multicelulares como mostra a Figura 33; a exemplo da anterior a força axial atuante é proveniente da metade da força de atrito total de uma célula.

A força atuante sobre essas colunas é dada por:

$$F_{C_2} = \frac{F_{rt}}{2 S_2}$$

6.3.3 Coluna Central (C₃)

Essas são localizadas no interior dos silos multicelulares e é comum a quatro células como mostra a Figura 33; conseqüentemente, a força axial atuante sobre esta coluna é a força de atrito total de uma célula.

A força atuante sobre essa coluna será:

$$F_{C_3} = \frac{F_{rt}}{S_3}$$

6.4 Esforços nas Paredes de Silos Prismáticos

TROISTSKY (1980) define que silos prismáticos são compostos de armação rígida fechada por uma chapa reforçada com enrijecedores, como mostra a Figura 34. Obviamente a definição é para silos com paredes lisas (sistema que está em desuso) pois silos com paredes com conformação trapezoidal e zigzague são mais eficientes e econômicos.

O sistema estrutural é analisado e projetado, considerando-se os esforços de tração, compressão e momento fletor, devido à ação do produto armazenado, como mostra a Figura 35.

Comumente, o plano da chapa é calculado para o vão entre os enrijecedores intermediários, que podem ser verticais, ou horizontais. As chapas podem ser consideradas como articuladas, ou engastadas entre os enrijecedores.

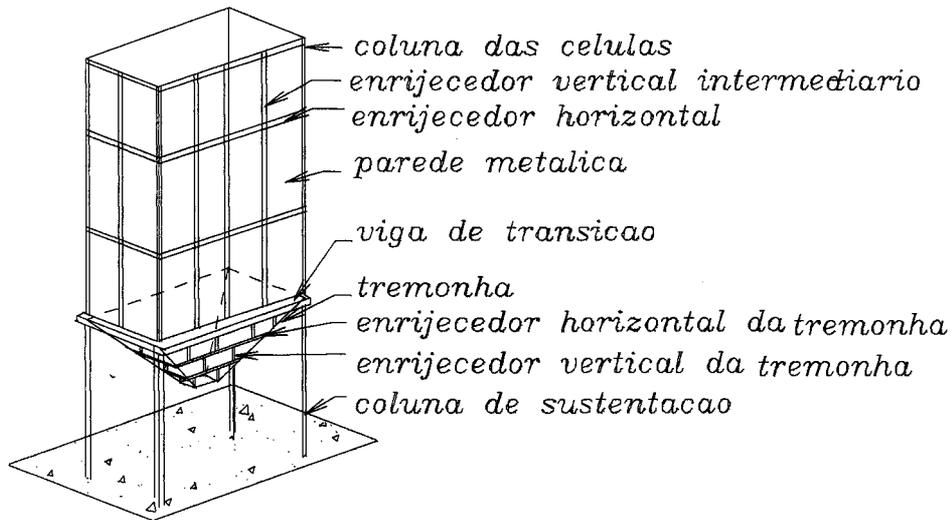


FIGURA 34- Sistema estrutural de um silo de paredes de chapas lisas

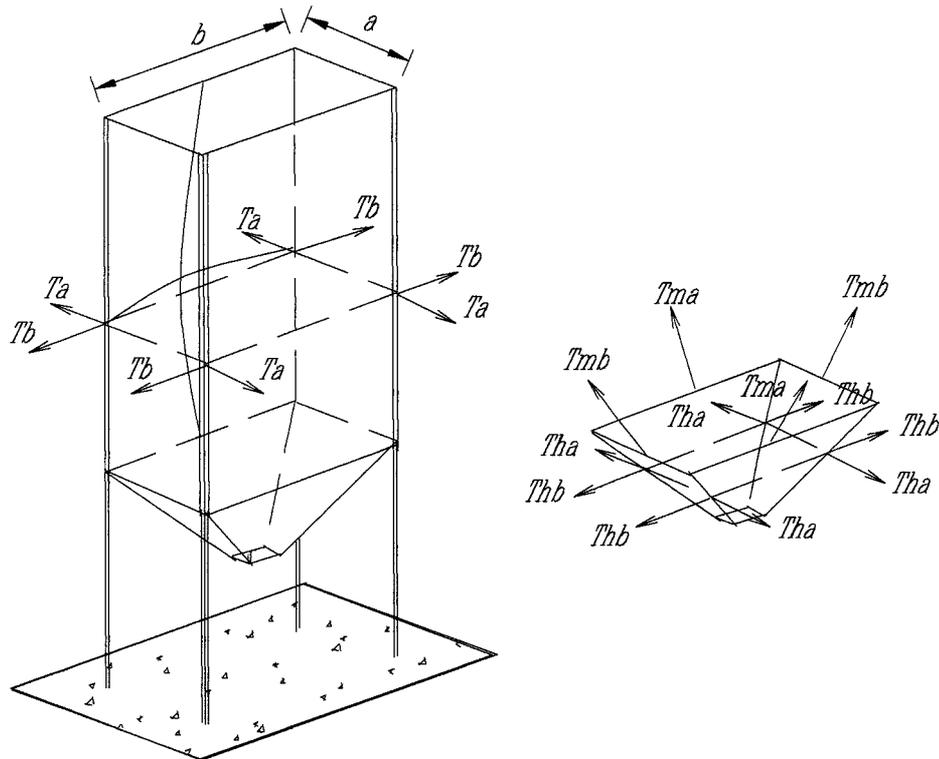


FIGURA 35 - Forças de tração existente no corpo e tremonha em silos prismáticos

6.4.1 Determinação dos Esforços de Trações nas Paredes Verticais

A tração horizontal mostrada na Figuras 36, atuando nas paredes verticais do silo multicelular, devido ao produto armazenado, é citadas por MORAL(1947), TROITSKY(1982) e RAVENET (1992) sendo dada pelas expressões:

$$T_a = P_{hd} \times \frac{b}{2} \quad \text{para o lado "a"}$$

$$T_b = P_{hd} \times \frac{a}{2} \quad \text{para o lado "b"}$$

Quando as duas células estiverem cheias, a análise da tração deverá ser feita considerando a tração devida a reação das duas paredes adjacentes e será dada por:

$$T = P_{hd} \times a$$

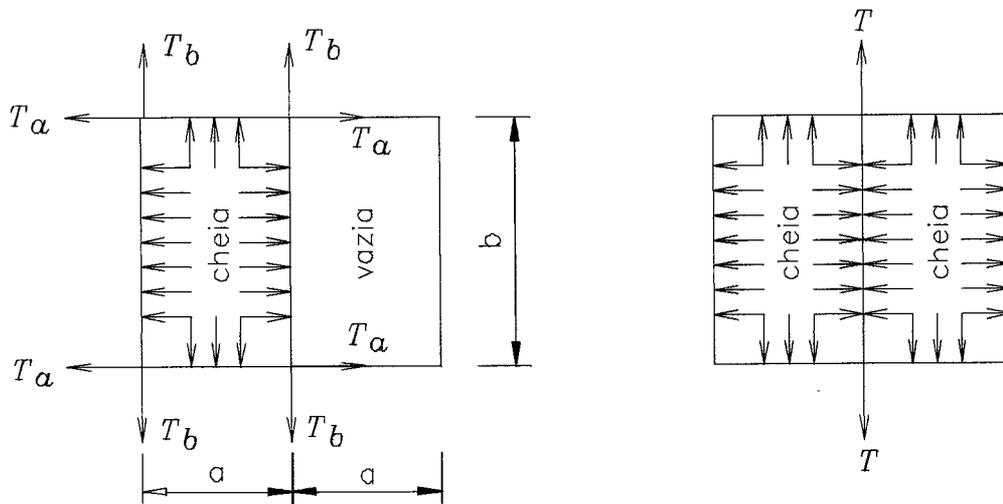


FIGURA 36 - Forças de tração atuante e silos prismáticos

6.4.2 Determinação dos Momentos Fletores nas Paredes dos Silos

A Figura 37 mostra o diagrama de momentos fletores nas paredes laterais dos silos prismáticos quando carregados e são determinados pelas equações fornecidas em: MORAL(1947), GRAY (1973), REIMBERT (1979) e TROITSKY(1982):

6.4.2.1 Momento nos Cantos:

$$M_c = \frac{-P_{ha} \times a^2 + P_{hb} \times b^2}{12(1 + k_i)}$$

onde:

$$k_i = \frac{I_b \times a}{I_a \times b}$$

Se as duas paredes têm o mesmo momento de inércia $I_a = I_b$, então, o momento fletor nos cantos será:

$$M_c = \frac{-(P_{ha} \times a^3 + P_{hb} \times b^3)}{12(a + b)}$$

6.4.2.2 Momento Fletor no Meio do Vão

$$M_a = \frac{P_{ha} \times a^2}{8} + M_c$$

$$M_b = \frac{P_{hb} \times b^2}{8} + M_c$$

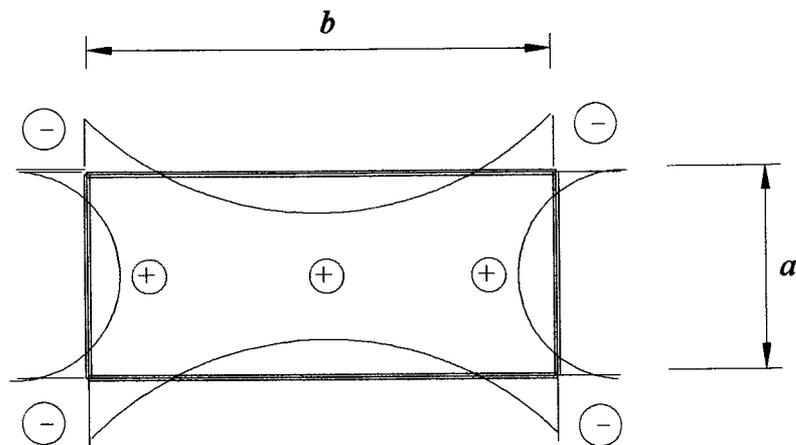


FIGURA 37 - Esquema do diagrama de momentos fletores

6.4.3 Determinação dos Esforços nas Paredes do Silo Segundo Troistky

6.4.3.1 Teoria de Pequenas Deslocamentos

As paredes dos silos são distribuídas com chapas metálicas entre os enrijecedores, ou colunas, transformando-se dessa forma num pórtico. As paredes são projetadas para suportar os esforços de momento fletor e tração longitudinal; despreza-se o cisalhamento.

Comumente o plano da parede sofre deformações simultaneamente nas duas direções, isto é, em ângulo reto e paralelo às colunas desde que a seguinte condição seja aceita:

$$\frac{b}{a} \leq 3$$

A pressão não uniforme devido ao produto armazenado ao longo das paredes no sentido vertical, pode ser transformada em trechos de pressão uniforme, atuando em segmentos verticais. A aproximação introduzida, certamente difere do carregamento real, mas o resultado final será seguro, como requer a prática.

Para placas retangulares carregadas uniformemente pela pressão horizontal do produto armazenado e, com as bordas engastadas, como mostra a Figura 38, o momento fletor máximo será no centro da placa.

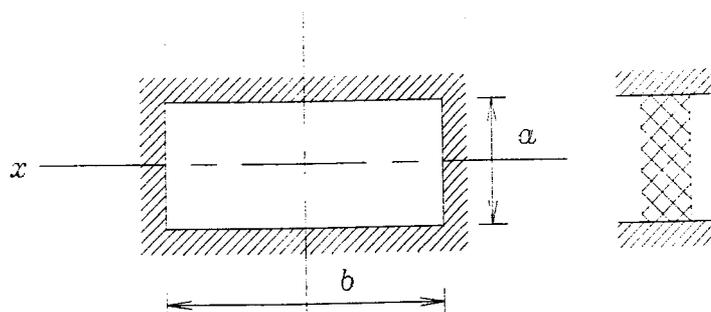


FIGURA 38 - Placa com bordas engastadas

Para uma chapa retangular uniformemente carregada, o momento fletor máximo é dado por:

$$M_{\max} = \eta P_h a^2 b$$

onde: $b > a$

O coeficiente η é dado na Tabela 09.

TABELA 09 - Coeficientes de proporcionalidade de placas engastadas

a/b	1,0	1,25	1,50	1,75	2,0	∞
η	0,0513	0,0605	0,0757	0,0817	0,0829	0,0853

Para placas que tenham as bordas simplesmente apoiadas, como mostra a Figura 39, o momento fletor máximo atuará no centro e será calculado pela mesma equação, mudando-se apenas o coeficiente η_1 , dado na Tabela 10.

TABELA 10 - Coeficientes de proporcionalidade para placas simplesmente apoiadas

a/b	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
η_1	0,0479	0,0553	0,0626	0,0693	0,0753	0,0812	0,0862
a/b	1,7	1,8	1,9	2,0	3,0	4,0	∞
η_1	0,0908	0,0948	0,0985	0,1017	0,1189	0,1235	0,1250

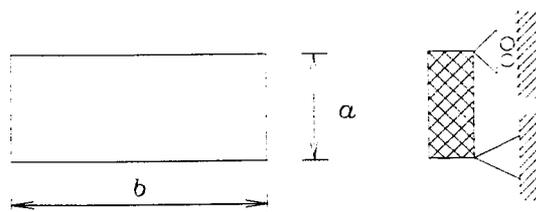


FIGURA 39 - Placa com bordas simplesmente apoiada

Para paredes onde o momento fletor atua numa direção com a relação $\frac{b}{a} > 3$, o momento fletor máximo para uma placa simplesmente apoiada é:

$$M = \frac{P_{hd} a^2}{8}$$

Para placa engastada:

$$M_{\max} = \frac{P_{hd} b^2}{12}$$

A espessura da placa (parede) é determinada pela equação:

$$t = \sqrt{\frac{b M_{\max}}{6 f_y}}$$

6.4.3.2 Teoria de Grandes Deslocamentos

Outro método para a análise de paredes dos silos verticais, considera que a parede trabalhará flexo-tracionada, a qual permite grandes deslocamentos, conforme mostrado na Figura 40, TROITSKY (1980). O momento fletor para uma faixa da parede vertical, tendo uma unidade de largura, comprimento L e considerada como simplesmente apoiada é dado pela seguinte expressão:

$$M = \frac{P_{hc} L^2}{8} \left(1 - 1,032 \frac{S_1}{S_1 + S_E} \right)$$

onde:

$$S_1 = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{4(P_{hc}L)^2 Et}{(1-\nu^2)}}$$

$$S_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2(1-\nu^2)}$$

Segundo TROITSKY (1980) as placas podem ser calculadas como uma membrana, tendo grandes deformações. Considera-se uma faixa da placa submetida à pressão uniforme.

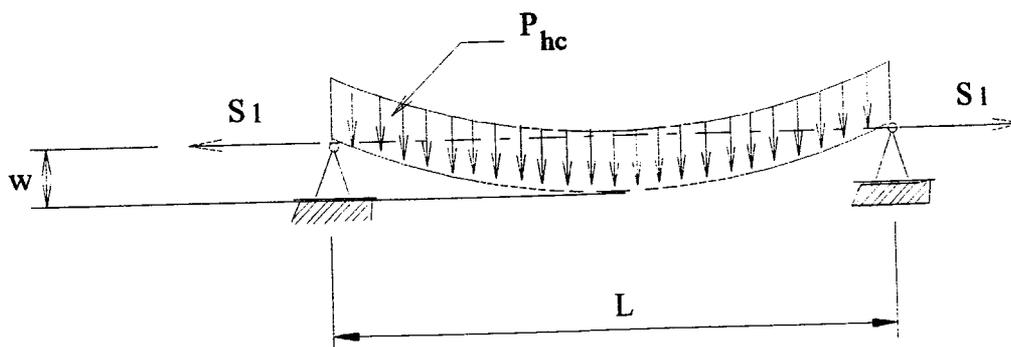


FIGURA 40 - Parede do silo trabalhando à flexo-tração

A tensão da parede calculada por esta teoria é dada pela seguinte expressão:

$$f = \frac{S_1}{t} + \frac{6M}{t^2} \leq \phi f_y$$

6.4.4 Determinação dos Momentos Fletores nas Paredes dos Silos Calculados pelo Método dos Deslocamentos Segundo GRAY (1973)

6.4.4.1 Células Quadradas Isoladas

O comportamento de uma célula quadrada, isolada, cheia com produto, exercendo pressão lateral P_{hc} . O momento de engastamento em cada um dos quatro lados é $0,083 P_{hi} l^2$ e não há rotação nas junções (nós) quando ocorrer o equilíbrio em todos os lados.

6.4.4.2 Células Retangulares Isoladas

Para uma única célula é provável que a pressão horizontal seja maior no centro do que nos cantos. Portanto, a suposição mostra-se satisfatória (particularmente se a célula possui boca de descarga concêntrica) em que todas as quatro paredes são submetidas à alguma pressão. Numa célula retangular, a pressão no lado maior é superior que a do outro lado, mas se as paredes são flexíveis, a parede maior vai fletir para fora, enquanto a parede do outro lado terá flexão contrária. As paredes maiores deformar-se-ão na direção da pressão horizontal,

tendo que resistir somente à pressão ativa; enquanto isso, a parede menor deforma-se na direção contrária à pressão horizontal. Na prática é muito comum assumir-se a pressão uniforme em todo o perímetro e isso dá resultados satisfatórios.

Para as células retangulares, como mostrada na Figura 41, o momento de engastamento nos lados maior e menor são respectivamente M_a e M_b .

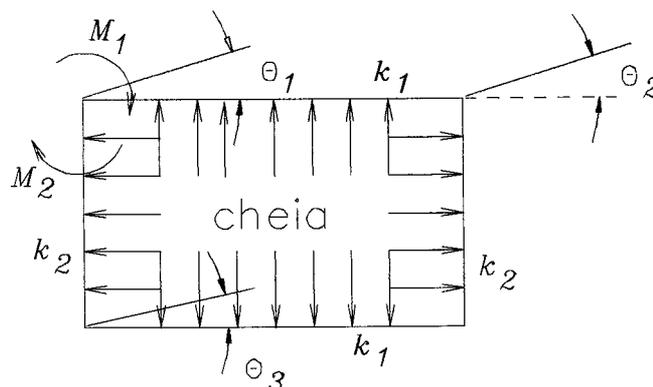


FIGURA 41 - Distribuição de momentos e rotação nos cantos

$$M_1 = M_a + 4Ek_1\theta_1 + 2Ek_1\theta_2$$

$$M_2 = M_b + 4Ek_2\theta_1 + 2Ek_2\theta_3$$

$$\text{Por simetria } \theta_1 = -\theta_2 \text{ e } \theta_3 = -\theta_1$$

$$\text{desde que: } M_1 + M_2 = 0 \text{ e } E\theta_1 = \frac{-M_a - M_b}{2(k_1 + k_2)}$$

daí,

$$M_1 = M_a + \frac{k_1}{k_1 + k_2}(-M_a - M_b)$$

se $b = 2a \rightarrow k_2 = 2k_1$, então

$$M_1 = 0,667M_a - 0,333M_b$$

$$M_1 = -0,667M_a + 0,333M_b$$

Assumindo que a pressão seja igual nos dois lados, tem-se:

$$M_a = -0,083P_h b^2$$

$$M_b = +0,083P_h a^2$$

para $b = 2a$

$$M_b = -0,25 M_a$$

$$M_1 = -0,0625P_h b^2$$

$$M_1 = 0,25P_h b^2$$

6.4.5 Células Múltiplas

Para estruturas multicelulares surge um problema a respeito da pressão horizontal. Quando as duas células são iguais e uma ao lado da outra, carregando-se a do lado esquerdo, a parede desse lado deformará. Agora, se se carregar a outra célula, a pressão horizontal dessa (pressão ativa) na parede esquerda será insuficiente para superar a pressão passiva do outro lado e, a parede ficará fletida, mesmo quando as duas células estiverem cheias. Somente em casos excepcionais, quando os silos forem carregados exatamente no mesmo instante, a parede não se deformará.

Os momentos fletores nas paredes dos silos multicelulares dependem da ordem em que as células são carregadas. A análise pode ser feita pelo método dos deslocamentos, mas na prática raramente é analisada por esse método. A Figura 42 mostra um silo multicelular com duas células. Existem seis nós de rotação, que são reduzidos por simetria para três desde que $\theta_1 = -\theta_2$ e $\theta_4 = \theta_3$ e $\theta_6 = -\theta_5$. Se " M_a " é o momento de engastamento do lado maior chamada agora de M_1 e " M_b " é o momento da extremidade do lado menor chamada de M_2 .

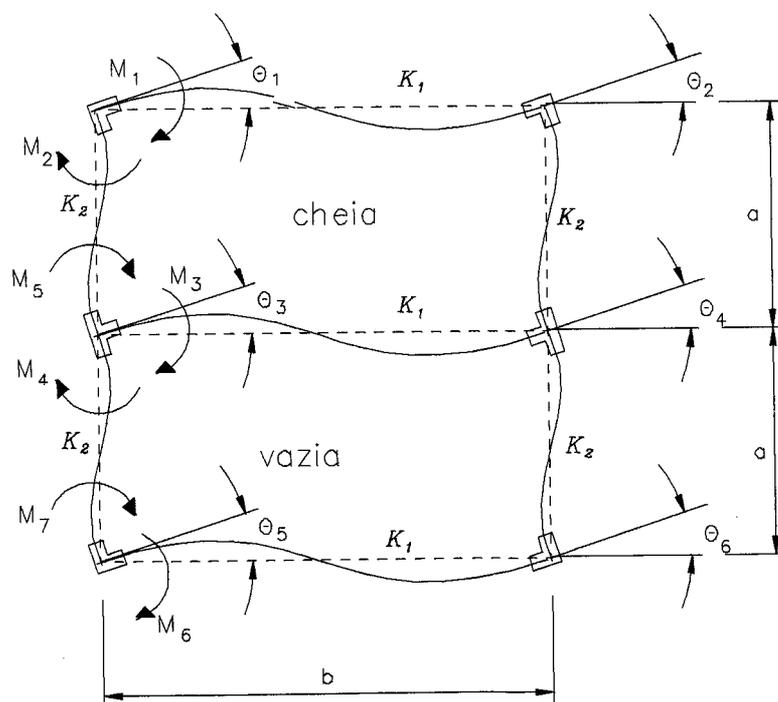


FIGURA 42 - Silo multicelular com diagrama do método dos esforços

tem-se:

$$E\theta_1(2k_1 + 4k_2) + E\theta_3(2k_2) = -M_a - M_b$$

$$E\theta_1(2k_2) + E\theta_3(2k_1 + 8k_2) + E\theta_5(2k_2) = +M_a + M_b$$

$$E\theta_1(2k_2) + E\theta_5(2k_1 + 4k_2) = 0$$

Para se obter os resultados numéricos, substitui-se $b = 2a \rightarrow k_2 = 2k_1$, daí se obtém:

$$M_a = -0,083P_h b^2$$

$$M_1 = -0,0625P_h b^2$$

$$M_3 = +0,0713P_h b^2$$

$$M_4 = -0,0377P_h b^2$$

$$M_5 = -0,0337P_h b^2$$

$$M_6 = -0,0047P_h b^2$$

O maior momento é o M_3 , com incremento de 14% em relação à única célula.

Se as duas células fossem carregadas exatamente no mesmo instante, $\theta = 0$ passaria a existir só uma incógnita; para essa condição ter-se-ia:

$$M_1 = -0,071P_h b^2$$

$$M_5 = +0,0042P_h b^2$$

Desde que a célula superior seja carregada primeiro, assume-se que a parede dessa célula fletiu; em seguida, carrega-se a inferior. O momento fletor é agora $M_6 = -0,0075P_h b^2$, com incremento de 21% com relação à única célula.

Todos esses resultados são para células com o comprimento igual a duas vezes a largura e, que todas as paredes tenham a mesma espessura.

Considerando, agora, um silo multicelular em linha tipo 1 citado no Quadro 01, como mostra a Figura 43 e as células sejam carregadas alternadamente; para esse caso tem-se só uma incógnita; como em todos os cantos existem rotação positiva e negativa, alternativamente.

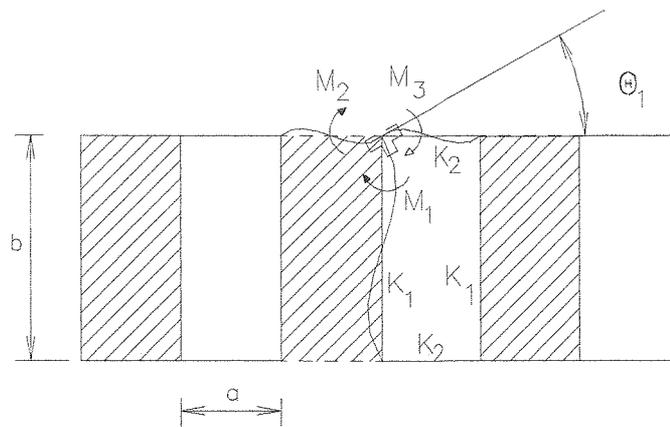


FIGURA 43 - Silo multicelular em linha com diagrama do método dos esforços

$$M_1 = M_a + Ek_2\theta_1(4 - 2)$$

$$M_2 = M_b + Ek_2\theta_1(4 - 2)$$

$$M_3 = Ek_2\theta_1(4 - 2)$$

$$M_1 + M_2 + M_3 = 0$$

Para a condição em que todas as paredes tenham a mesma espessura e $b = 2a \rightarrow k_2 = 2k_1$

$$M_a = -0,083P_h b^2$$

$$M_b = +0,083P_h a^2$$

$$M_b = 0,25M_a$$

$$E\theta_1(10k_1) = -M_a - M_b$$

$$M_1 = -0,0707P_h b^2$$

$$M_2 = +0,0457P_h b^2$$

$$M_3 = +0,025P_h b^2$$

Desse modo, o momento fletor M_1 é 13% maior que o momento fletor de uma única célula. Se todas as células fossem carregadas simultaneamente, o momento fletor nas bordas seria $M_3 = +0,0208P_h b^2$ atuando como está demonstrado na Figura 43. Mas, se as células forem carregadas alternadamente, as paredes das células cheias fletirão primeiro e M_3 manterá o valor inicial, fazendo com que o momento final seja:

$$+0,025P_h b^2 - 0,0208P_h b^2 = +0,0042P_h b^2$$

Considerando-se um silo multicelular com células retangulares e carregadas alternadamente, formando um tabuleiro de xadrez, como está na Figura 44, as rotações dos nós e os momentos fletores serão iguais ao de uma célula isolada.

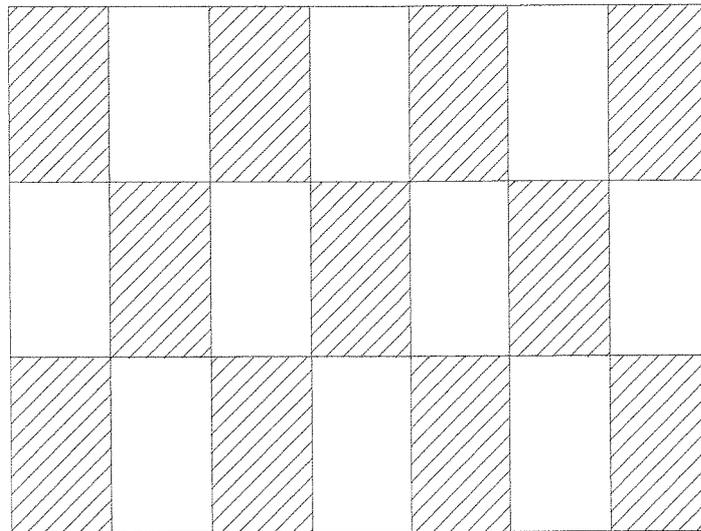


FIGURA 44 - Silo multicelular com células carregadas alternadamente

Um silo multicelular com uma célula central carregada e as outras vazias, como mostra a Figura 45, a solução dessa situação é muito complicada. Sabe-se que as rotações nos nós das células vazias são menores e diminuem ainda mais, quando se afastam da célula carregada e são positivas e negativas, alternativamente.

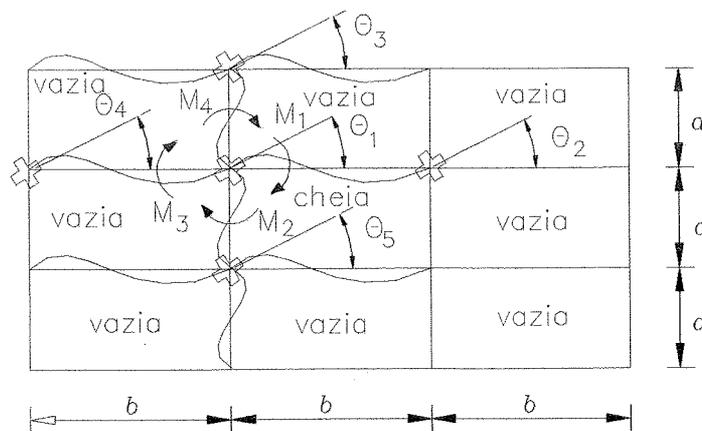


FIGURA 45 - Propagação de momento, devido à célula cheia no centro de um silo multicelular

$$M_1 = -M_a + Ek_1\theta_1(4 - 2)$$

$$M_2 = -M_b + Ek_2\theta_1(4 - 2)$$

$$M_3 = Ek_1\theta_1(4 - 0,4)$$

$$M_4 = Ek_2\theta_1(4 - 0,4)$$

sendo :

$$M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = 0$$

Passando as expressões acima para valores numéricos, assumindo a condição que todas as paredes tenham a mesma espessura e $b = 2a \rightarrow k_2 = 2k_1$, tem-se:

$$M_a = -0,083P_h b^2$$

$$M_b = +0,083P_h b^2$$

$$M_b = -0,25M_b$$

$$M_1 = -0,0758P_h b^2$$

$$M_2 = +0,0357P_h b^2$$

$$M_3 = +0,0134P_h b^2$$

$$M_a = +0,0267P_h b^2$$

O valor de M_1 no exemplo acima é 21% maior do que o de uma célula isolada.

Se uma linha de célula está carregada da esquerda para direita da Figura 46 e estejam juntas, então, neste caso $M_1 = -0,083P_h b^2$. Carregando-se uma linha de células de cima para baixo da Figura 46 para esta condição

$$M_2 = +0,083P_h b^2 = +0,0283P_h l^2.$$

6.4.6 Caso Geral Para Três Células

Para três células com dimensões diferentes, como mostra a Figura 46, tem-se oito incógnitas de rotações nos nós. Se as células são simétricas em relação à linha central no sentido longitudinal, as incógnitas reduzem-se a quatro e, o problema pode ser resolvido por um sistema de quatro equações. Por simetria $\theta_5 = -\theta_1$, $\theta_6 = -\theta_2$, $\theta_7 = -\theta_3$ e $\theta_8 = -\theta_4$. Se todas as paredes não são chanfradas tem-se:

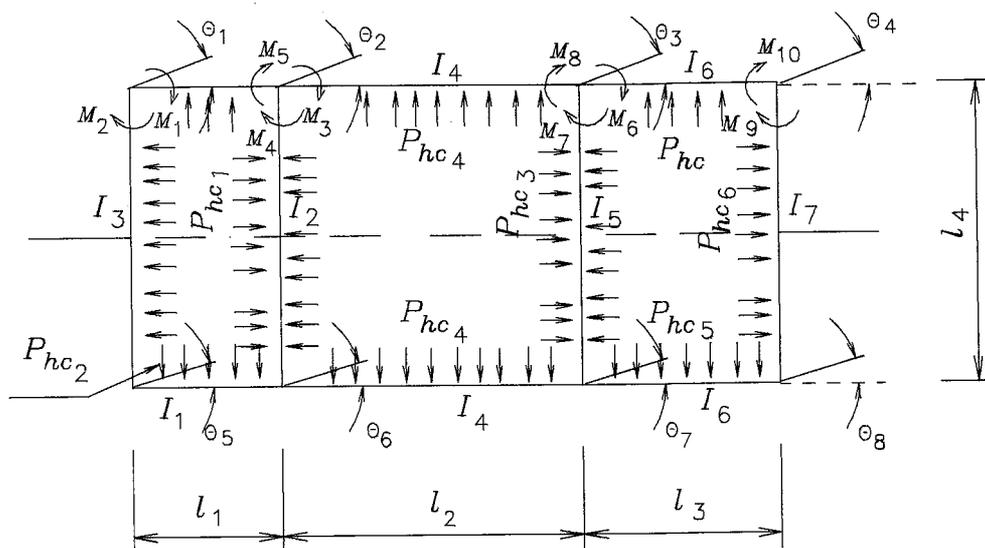


FIGURA 46 - Silos prismáticos multicelulares de seções diferentes

$$M_1 = a + 4EI_1\theta_1 + 2EI_1\theta_1$$

$$M_2 = b + 4EI_3\theta_1 - 2EI_3\theta_1$$

$$M_3 = c + 4EI_4\theta_2 + 2EI_4\theta_3$$

$$M_4 = d + 4EI_2\theta_2 - 2EI_2\theta_2$$

$$M_5 = -a + 4EI_1\theta_2 + 2EI_1\theta_1$$

$$M_6 = e + 4EI_6\theta_3 + 2EI_6\theta_4$$

$$M_7 = f + 4EI_5\theta_3 - 2EI_5\theta_3$$

$$M_8 = -c + 4EI_4\theta_3 + 2EI_4\theta_2$$

$$M_9 = g + 4EI_7\theta_4 - 2EI_7\theta_4$$

$$M_{10} = -e + 4EI_6\theta_4 + 2EI_6\theta_3$$

Onde:

$$a = \frac{-P_{hc} l_1^2}{12}; \quad b = +\frac{P_{hc1} l_4^2}{12}; \quad c = \frac{-P_{hc4} l_2^2}{12}; \quad d = +\frac{(P_{hc3} - P_{hc1}) l_4^2}{12};$$

$$e = \frac{-P_{hc5} l_3^2}{12}; \quad f = +\frac{(P_{hc6} - P_{hc3}) l_4^2}{12}; \quad g = \frac{-P_{hc6} l_4^2}{12}$$

sendo:

$$M_1 + M_2 = 0$$

$$M_3 + M_4 + M_5 = 0$$

$$M_5 + M_7 + M_8 = 0$$

$$M_9 + M_{10} = 0$$

Essas expressões tornam-se:

$$E\theta_1(4I_1 + 2I_3) + E\theta_2(2I_1) = -a - b$$

$$E\theta_1(2I_1) + E\theta_2(4I_1 + 2I_2 + 4I_4) + E\theta_3(2I_4) = +a - c - d$$

$$E\theta_2(2I_4) + E\theta_3(4I_4 + 2I_5 + 4I_6) + E\theta_4(2I_6) = +c - e - f$$

$$E\theta_3(2I_6) + E\theta_4(4I_6 + 2I_7) = +e - g$$

Conhecendo-se os valores de I_1, I_2, I_3 etc. podem-se resolver as equações acima. Caso se deseje solução geral é melhor mudar os símbolos a, b, c , etc. e expressar os momentos em termos destes símbolos. Podemos considerar uma célula cheia e outra vazia para proporcionar o momento fletor máximo.

Se as paredes possuírem formas chanfradas (espessura no centro menor que nas bordas), tomar-se-á o coeficiente adequado para os momentos de engastamento e os valores corretos de C_1 e C_2 .

6.5 Colunas de Sustentação Para Silos Prismáticos

6.5.1 Tipos de Colunas

Os silos são normalmente suportados por meio de estruturas próprias, tais como: colunas ou saia (skirts) fixadas na fundação de concreto armado. A estrutura de suporte do tipo saia (parede de fechamento e sustentação) entre o silo e a fundação pode ser de chapa metálica. A escolha final depende do custo, serviços necessários, estética e, preferência do cliente. Para estruturas relativamente baixas, a saia de sustentação pode ser mais econômica e, ainda se pode utilizar como depósito de equipamentos. Para silos altos, as colunas de sustentação são mais adequadas e este tipo de coluna será melhor discutido nesse item.

6.5.2 Cargas

Serão discutidas só as cargas peculiares às colunas de silos. A seleção dos tipos de fundação e o método de cálculo, recomenda-se pesquisar na literatura especializada uma vez que estes não serão abordados.

Consideram-se as seguintes ações:

- ação permanente: peso da estrutura e equipamentos;
- ações variáveis: peso do produto armazenado e vento.

As combinações das ações a serem consideradas no projeto das colunas e fundação para verificação da resistência, estabilidade e reação das pressões, devem considerar:

- ações permanentes e variáveis (todas as células cheias);
- ações permanente e ação do vento;
- carregamento assimétrico em silos multicelular.

Considera-se que metade das células estão cheias e as restantes vazias:

- ações permanentes e variáveis
- ações permanentes, variáveis e do vento
- ações permanentes e variáveis em todas as células, mas só com uma célula cheia (pode governar o momento e a placa de fundação).

6.5.3 Ação do Vento

O vento pode afetar a estabilidade dos silos vazios, particularmente quando são altos, silos finos(estreitos) e multicelulares. Pressão na fundação e resistência das colunas, pode ser pior do que o vento, atuando no silo cheio.

Forças de terremoto podem afetar a estabilidade e resistência da estrutura. Colunas e paredes, suportando o silo, podem ser particularmente variáveis e outras fundações podem ser afetadas.

Existem evidências experimentais que só é necessário considerá-los pelo peso do produto armazenado quando se calculam as forças, devido a terremotos. Os mesmos pesquisadores não usam menos que 80% de peso do produto armazenado como ação permanente efetiva, W_{eff} , da qual determinam as forças sísmicas. Menores percentagens são sugeridas, mas torna-se necessário mais pesquisas para caracterizar os valores menores.

Quando o fundo do silo é suportado independentemente das paredes, sua estrutura e o fundo independente, suportam parte da força lateral, devido à ação

sísmica do peso efetivo do produto armazenado. SAFARIAN E HARRIS (1985), sugerem o cálculo da distribuição acima, como:

- uma parte da força devido a W_{eff} , de acordo com enrijecedores relativos às duas estruturas;
- forças, devido ao peso efetivo do produto dentro da tremonha, mais o coeficiente de atrito interno, vezes o peso efetivo do produto acima da tremonha;

Para o projeto estrutural do silo, adota-se o maior valor das duas condições abaixo:

- A força total, devido ao W_{eff} , menos o calculado acima para o fundo independente da estrutura;
- 50% da força total devido ao W_{eff} .

6.5.4 Forças Axiais nas Colunas sob Cargas Verticais

As colunas dos silos multicelulares são comumente carregadas por forças axiais e horizontais, causando momentos nas colunas (GIESELSKY, 1970).

As forças axiais nas colunas são causadas pelo peso próprio da estrutura e o peso do produto armazenado.

Momento causado pela ação do vento.

Forças axiais nas colunas serão determinadas considerando-se o peso próprio do silo, mais o peso do produto armazenado e as forças, devido à pressão do vento. As forças axiais são calculadas para atuar no topo da coluna, considerando-se o peso e a ação total distribuída no raio da área de influência. Em geral, os silos multicelulares prismático têm dimensões diferentes no plano, como mostra a Figura 47.

Colunas de sustentação dos cantos:

$$P_1 = \frac{qa_1b_1}{4}$$

Colunas de sustentação de borda:

$$P_2 = \frac{q}{4}(a_2 + a_3)b_1$$

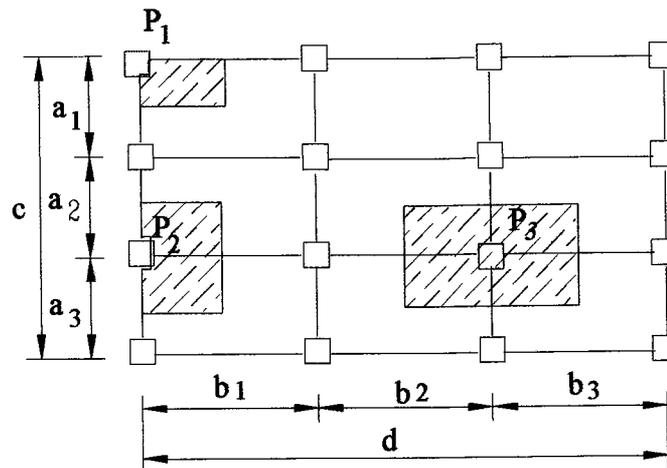


FIGURA 47 - Tipos de colunas de sustentações e suas respectivas áreas de influências

Colunas de sustentação central:

$$P_3 = \frac{q}{4}(a_2 + a_3)(b_2 + b_3)$$

Supondo que todas as células tenham as mesmas dimensões, ou seja: $a_1 = a_2 = a_3 = d$ e $b_1 = b_2 = b_3 = c$ para essa condição tem-se:

$$P_1 = \frac{qdc}{4}$$

$$P_2 = \frac{qdc}{2}$$

$$P_3 = qdc$$

Para determinar as forças axiais nas colunas, devido ao vento, atuando no corpo do silo é necessário calcular o momento resultante em relação ao centro de gravidade da área transversal do silo multicelular.

$$e = \frac{M}{\sum N}$$

e a distância do centro de gravidade de todas as áreas transversais das colunas de sustentações do lado do sotavento, como mostra a Figura 48, será dada por:

$$x_0 = \frac{\sum A_i x_i}{\sum A_i}$$

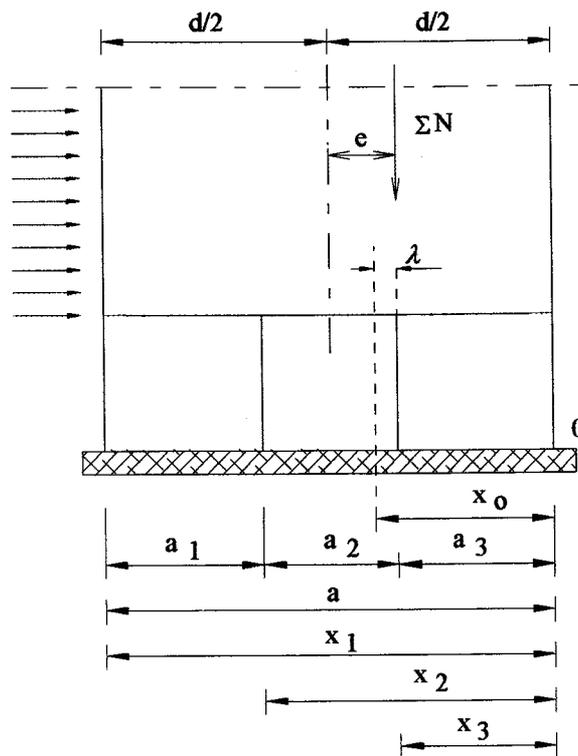


FIGURA 48 - Excentricidade da carga vertical devido à ação do vento

O momento é dado pela somatória das forças axiais nos topos das colunas de sustentação com relação ao centro de gravidade de todas as áreas das colunas, dada por:

$$M = \sum N\lambda = \sum N\left(e - \frac{d}{2} + x_0\right)$$

Se o momento M é conhecido, a força numa coluna pode ser encontrada pela equação:

$$N' = \frac{M_x}{\sum x^2}$$

A força axial resultante numa coluna é:

$$N = N_n \pm \frac{M_x}{\sum x^2}$$

Quando o comprimento das células são iguais, o cálculo da força axial é simplificado. Para o caso de três células tendo o comprimento igual a l , a força axial é dada por:

$$N = N_n \pm \frac{M_x}{5l^2n}$$

6.6 Momento Fletor nas Colunas sob Ação do Vento

A pressão do vento provoca momentos fletores nas colunas de sustentação dos silos. A distribuição de momentos fletores nas colunas, depende do tipo de vinculação. Dois casos básicos mais utilizados nas hipóteses de cálculos são os articulados e engastados.

6.6.1 Coluna de Sustentação com Apoio Articulado

No caso de coluna de sustentação com apoio articulado, a resultante da pressão do vento é aplicada no topo das colunas, como mostra a Figura 49.

$$Wh = H_1h + H_2h + H_3h + H_4h$$

ou

$$W = H_1 + H_2 + H_3 + H_4$$

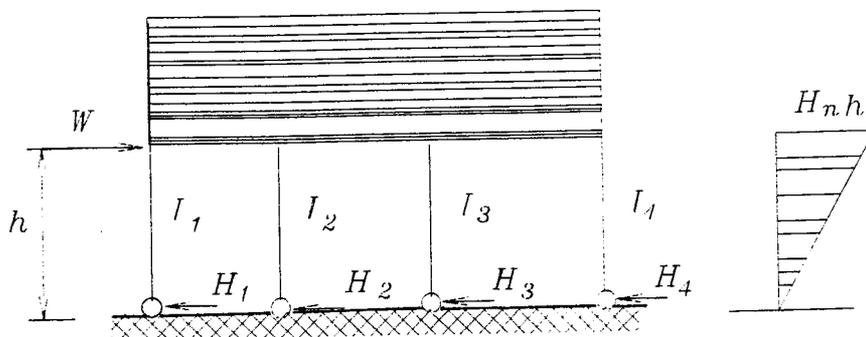


FIGURA 49 - Colunas de sustentação articuladas para silos multicelulares

e

$$M_1 = Wh \frac{I_1}{\sum I}$$

$$M_2 = Wh \frac{I_2}{\sum I}$$

$$M_3 = Wh \frac{I_3}{\sum I}$$

$$M_4 = Wh \frac{I_4}{\sum I}$$

onde:

$$\sum I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

Se as seções transversais das colunas de sustentações são conhecidas, calculam-se os momentos fletores e os momentos de inércias pelas equações citadas anteriormente.

6.6.2 Colunas de Sustentação Engastadas

Para essa análise só se consideram duas linhas de coluna de sustentação engastadas. então, nesse caso, assume-se que o momento fletor é zero na metade da coluna de sustentação, como mostra a Figura 50.

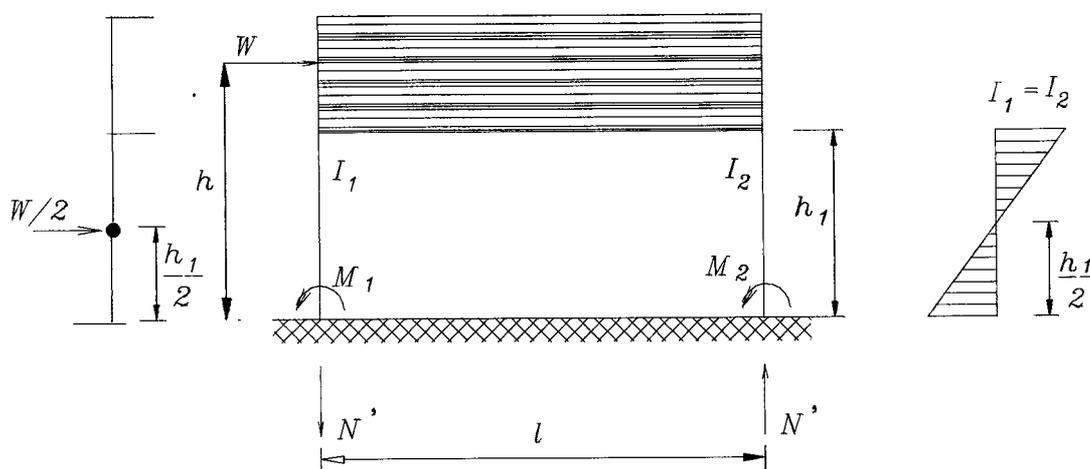


FIGURA 50 - Coluna de sustentação engastada

O momento de engastamento e as forças cortantes nas colunas de sustentação, são:

$$M_1 = M_2 = \frac{Wh_1}{4}$$

$$N' = \frac{Wh - Wh_1/2}{l} = \frac{W}{l}(h - h_1/2)$$

A força resultante axial, atuando nas colunas de sustentação é obtida como resultado de forças cortantes N' é a força axial, devido ao peso próprio da estrutura e o peso do produto armazenado no silo.

A análise semelhante pode ser feita para um número "n" de linhas de coluna de sustentação de silos multicelulares

6.7 Aplicação do Método simplificado Para Cálculo de Colunas de Sustentação de Silos Prismáticos Segundo GRAY (1973)

A aplicação desse método é baseada nas seguintes suposições:

- a rigidez de um elemento submetido ao momento fletor é diretamente proporcional a $\frac{I}{l}$;
- os suportes são rígidos o suficiente para sustentar efetivamente as colunas;
- o ponto de inflexão é na metade do painel e a coluna de sustentação. Quando existir na extremidade do elemento uma rótula não há ponto de inflexão;
- as colunas de sustentação internas suportam o dobro do cisalhamento das outras colunas, devido ao efeito de duplo enrijecimento;
- quando as colunas são consideradas engastadas na base, o leito da fundação e o cálculo da base devem ser feitas para justificar a condição assumida.

No exemplo numérico, a pressão do vento é dada de $1,5 \text{ kN/m}^2$ numa área projetada do tanque e, para simplificar, a pressão do vento nas colunas é desprezada. Para pequenos tanques de água sobre grandes torres, o momento total do vento será grande, devido a pressão do vento nas colunas e, neste caso, é necessário a modificação nos cálculos que podem ser feitos facilmente, como foi mostrado anteriormente na descrição geral do método simplificado. Nos exemplos serão usados números redondos para simplificação; o objetivo principal constitui a demonstração deste método.

6.7.1 Uma Linha de Colunas

O caso mais simples o qual pode ocorrer em superestrutura que é suportada em "n" colunas numa linha normal a F, sendo F a carga total do vento, que deve ser

suportada por todas as colunas; o diagrama da força de cisalhamento e momento fletor são mostrados na Figura 51.

Uma linha de "n" colunas normais a F, divide o resultado por "n" (isto é, F é a força de carga do vento distribuída em uma coluna).

6.7.2 Duas Linhas de Colunas

Duas linhas de colunas articuladas na base. O caso é mostrado na Figura 52, o cisalhamento em cada coluna, ou linha de coluna é $P/2$ e o momento fletor varia linearmente de zero na base a $Fh/2$ no topo.

Tomando os momentos das forças externas acima do ponto B, encontramos:

$$Vl - Ph = 0 \Rightarrow V = \frac{Ph}{l}$$

Para "n" colunas em linhas, divide-se o resultado por "n".

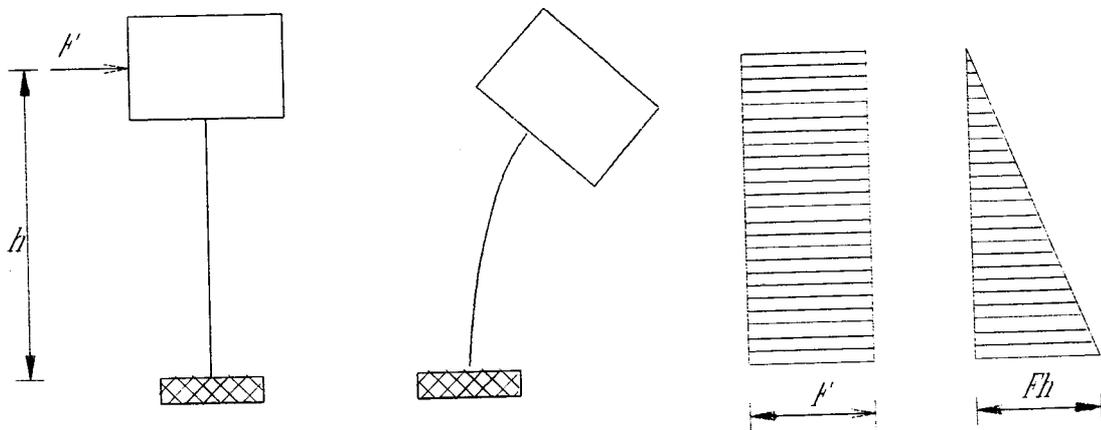


FIGURA 51 - caso mais simples de colunas de sustentação em linha.

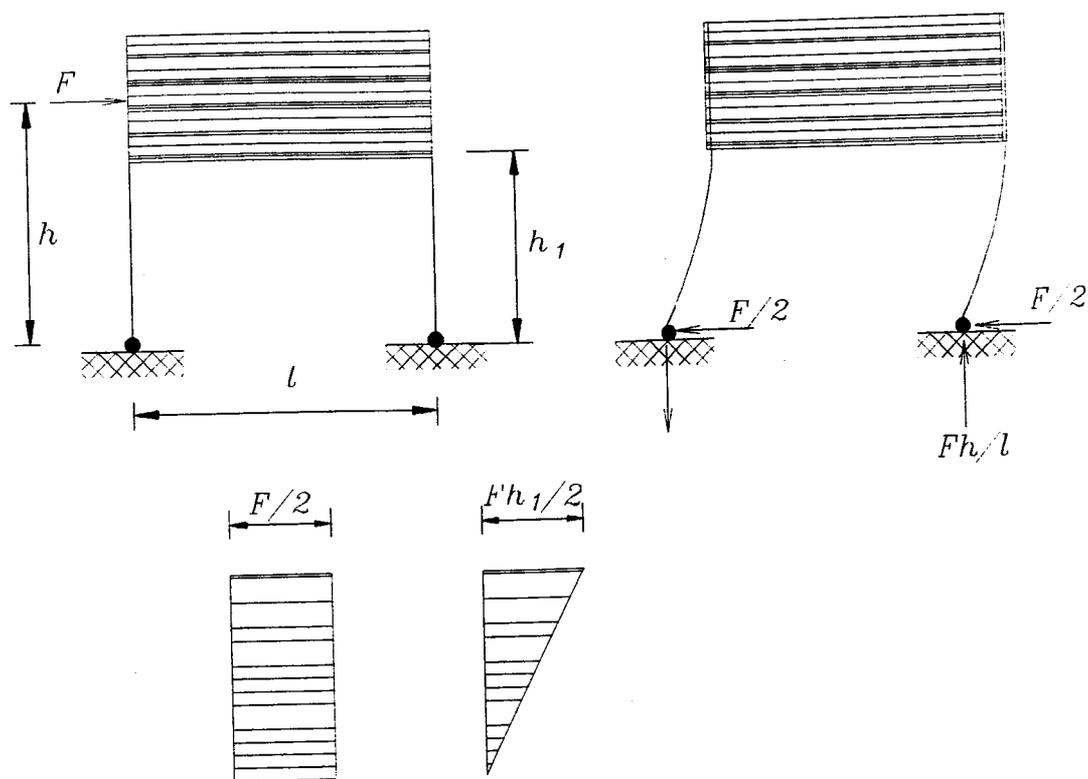


FIGURA 52 - Duas linhas de colunas de sustentação articuladas.

Duas colunas engastadas na base, referindo-se à Figura 53 e, fazendo o momento fletor, devido a força externa:

$$Fh - Vl - M_a - M_b = 0$$

$$M_a = M_b = \frac{Fh_1}{4}$$

$$V = \frac{F}{l} \left(h - \frac{h_1}{2} \right)$$

se $h = h_1$, tem-se:

$$V = \frac{1}{2} \left(\frac{Fh}{l} \right)$$

O esforço total numa coluna é devido a:

- ação permanente da estrutura e do produto armazenado;
- ação direta do vento, isto é $\pm V$;
- momento fletor devido ao vento.

Pórtico usado para sustentação de silos é composto de elementos horizontais e colunas engastadas na base como mostra a Figura 53 e, os pontos de inflexão são assumidos quando ocorrer na metade das duas colunas e dos elementos. O ponto de inflexão no painel abaixo, e em seu topo, é rígido, afastando-se do ponto médio e aproximando-se da extremidade mais flexível para o nó do elemento.

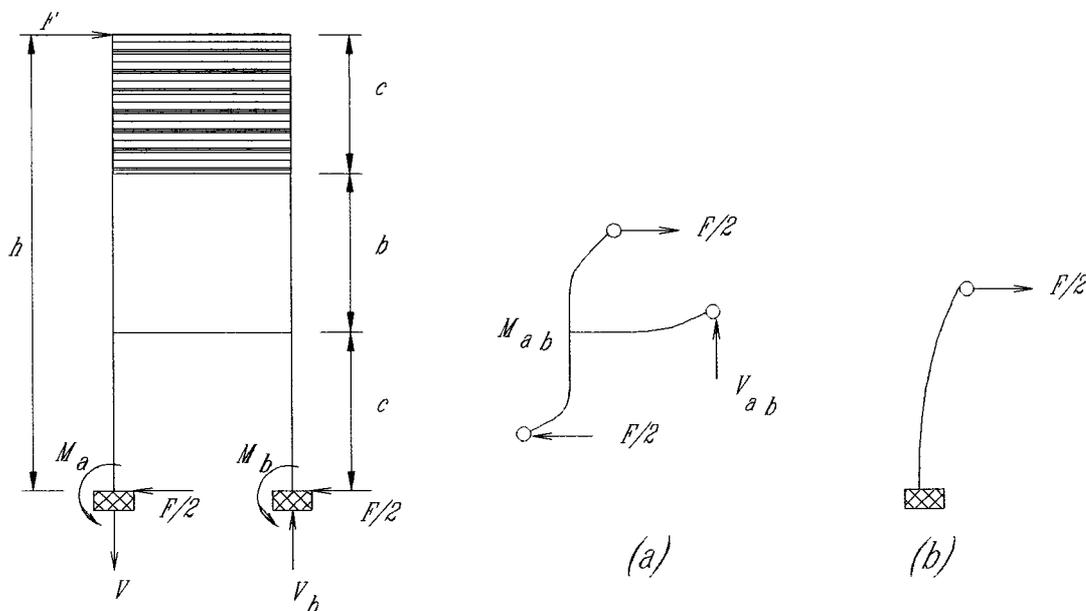


FIGURA 53 - Colunas de sustentação engastadas com elementos horizontais com os respectivos pontos de inflexão.

O diagrama (a) da Figura 53, mostra o nó do elemento inferior com uma parte da coluna acima e abaixo; daí os momentos na coluna na parte superior e inferior, respectivamente, são:

$$M_{ab} = \frac{F}{2} \times \frac{b}{2}$$

$$M_{ab} = \frac{F}{2} \times \frac{a}{2}$$

Para o equilíbrio, o momento no elemento deve ser igual à soma destes momentos, isto é:

$$V_{ab} = \frac{F(a+b)}{2l}$$

O momento no elemento causado pela ação do vento é aproximadamente o dobro do momento na coluna. O elemento será calculado para resistir ao momento e ao cisalhamento, notando-se que o momento encontrado para o elemento no nó e que esse se reduz numa taxa regular para zero no meio do comprimento.

Para encontrar a reação V , tomamos os membros acima de B:

$$V = \frac{F\left(h - \frac{a}{2}\right)}{l}$$

6.7.3 O Pórtico Com Três ou Mais Linhas de Colunas

A Figura 54 mostra um pórtico com três colunas de sustentação. As colunas internas são unidas por elementos de ambos os lados, nesse caso são mais rígidas que as externas e podem ser assumidas para resistir ao dobro do cisalhamento.

Em outras palavras; se a ação do vento é F , cada coluna externa resiste $F/4$ e as internas $F/2$.

Os momentos nas colunas são:

$$M_a = M_c = \frac{F}{4} \times \frac{a}{2}$$

$$M_b = \frac{F}{2} \times \frac{a}{2}$$

A ação do vento direto nas colunas internas é zero e nas colunas externas é:

$$V = \frac{F\left(h - \frac{a}{2}\right)}{l}$$

Se a força máxima na coluna B devido ao momento M_b exceder a força, pelo cisalhamento na coluna C, a força máxima combinada ocorre na coluna B; caso contrário ocorre na coluna C.

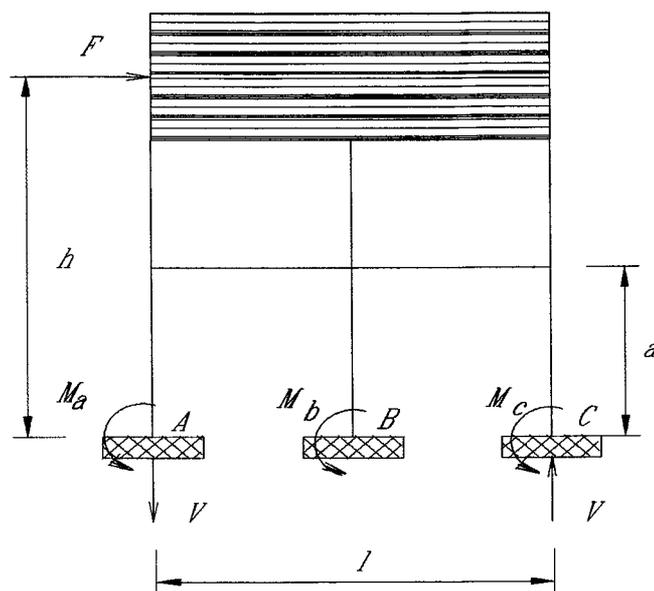


FIGURA 54 - Pórtico com três linhas de colunas

7 ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DOS PAINÉIS COM CONFORMAÇÃO ZIGUEZAGUE HORIZONTAL

7.1 Materiais e Métodos

7.1.1 Análise Teórica

A análise teórica foi realizada, utilizando-se as teorias simplificadas, propostas por Ravenet (teoria de vigas bi-engastadas) e Troitsky (teoria de viga bi-apoiada, considerando o efeito de membrana). Ambas são citadas nos itens 6.2 e 6.4. Para o cálculo da tensão atuante foi considerada a inércia com relação ao eixo YY citado no item 6.2.

Também foi feita uma análise baseada no método dos elementos finitos, utilizando-se o software LUSAS (1992) adquirido pelo Departamento de Engenharia de Estrutura da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. O elemento utilizado foi o QSL8 para que os elementos da malha possuíssem oito nós. Para a análise dos deslocamentos e das tensões utilizou-se o método de Gauss com cinco pontos (sendo um no centro e os outros distribuídos nos quatro cantos dos elementos). Esse ponto central coincide com os pontos onde foram instalados os extensômetros elétricos e transdutores diferenciais. A escolha do ponto central de Gauss foi para que o resultado sofresse pouca interferência da perturbação de bordas dos elementos. Para os dois painéis, a malha foi construída da seguinte forma: na largura, os elementos de borda apresentem 2,5cm e os demais 5,0cm; nas superfícies inclinadas os de bordas 3,5cm e os outros 5,0cm, Como mostra a Figura 55. Considerou-se o carregamento uniformemente distribuído nos elementos do painel; uma força de tração foi aplicada de um lado; enquanto o outro lado ficou engastado. Analisou-se, também, o painel, considerando-se engastamento em ambas as bordas.

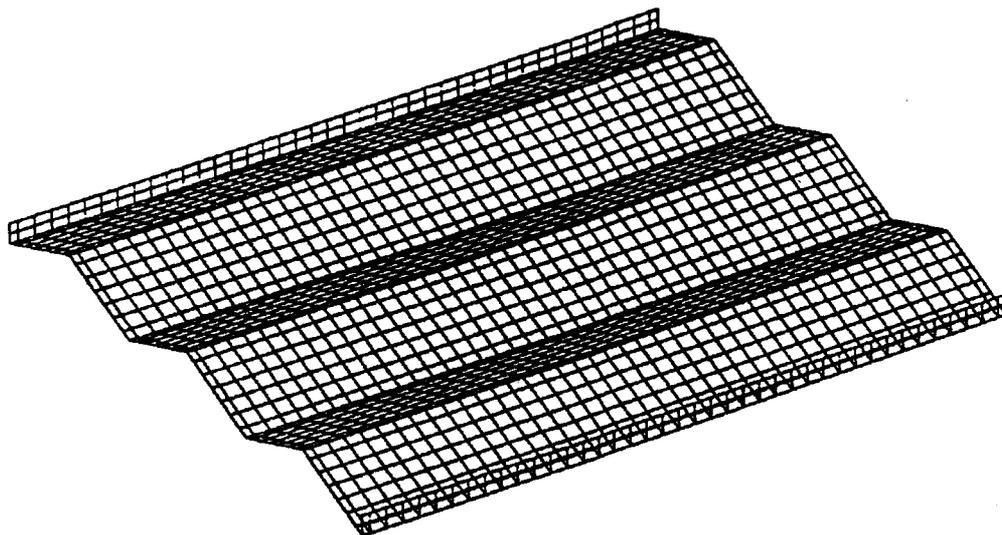


FIGURA 55 - Malha construída para análise no software LUSAS

7.1.2 Procedimento Experimental

O presente trabalho experimental foi realizado no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras (LaMEM) do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Os experimentos foram realizados em painéis com conformação ziguezague horizontal que correspondem aos painéis das paredes normalmente utilizados em silos metálicos prismáticos para armazenamento de ração.

Os principais objetivos dos experimentos foram: a determinação da resistência e a rigidez dos painéis (que serão utilizados nas paredes dos silos prismáticos) simulando as condições de trabalho de um silo. Para essa finalidade, construíram-se dois painéis em escala real para representar as paredes de silos quadrados de lados iguais a 1,0m e 2,0m.

Os ensaios foram divididos em duas fases: na primeira realizou-se o carregamento de tração que representa a reação da parede adjacente devido à pressão horizontal exercida pelo produto; na segunda com os painéis tracionados, o carregamento foi feito colocando-se areia sobre os painéis até sua perda de estabilidade a qual ocorreu por flambagem local na parte comprimida.

7.1.2.1 Descrição dos Ensaios

Para a realização dos ensaios em laboratório foram instalados medidores de força (anel dinamométrico) de deformações (extensômetro elétrico de resistência) e de deslocamentos (transdutores diferenciais) nos painéis acoplados a um sistema de aquisição de dados Hewlett Packard, modelo 3497A pertencente ao Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira.

7.1.2.2 Painéis

Para a realização dos ensaios, construíram-se dois painéis na oficina mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, sendo um com largura de 1,0m e o outro com 2,0m, ambos possuindo 1,82m do comprimento. Esses painéis foram conformados em zig-zague horizontal, com inclinação de 20° com o plano vertical e altura da onda de 11cm. Utilizou-se a chapa de aço SAE 1010 de espessura nominal de 0,91mm. As extremidades dessas chapas foram soldadas às colunas pelo processo de soldagem mig. As colunas tinham seção caixão de 13cm e comprimento de 1,82m, construídas com aço SAE 1010 com espessura nominal de 1,9mm. A Figura 56 mostra as dimensões utilizadas na construção dos referidos painéis e a Figura 57 mostra os painéis fabricados.

Para melhor interpretação das análises que será feita no capítulo posterior, passaremos a chamar de painel 1, àquele que possui largura de 1,0m e painel 2 o outro com largura de 2,0m.

7.1.2.3 Anel Dinamométrico

Para medir a força de tração aplicada aos painéis através de esticadores foram utilizados quatro anéis dinamométrico com capacidade de 210N. A Figura 58 mostra os pontos de aplicação das forças de tração na coluna e o espaçamento entre si. Na Figura 59 é visto o sistema de tração utilizado nos ensaios. A força de tração aplicada no painel 1 foi 112,5N e no painel 2 de 187,5N; essas são equivalentes às forças de tração das paredes adjacentes de silos quadrados de lado igual às larguras dos painéis.

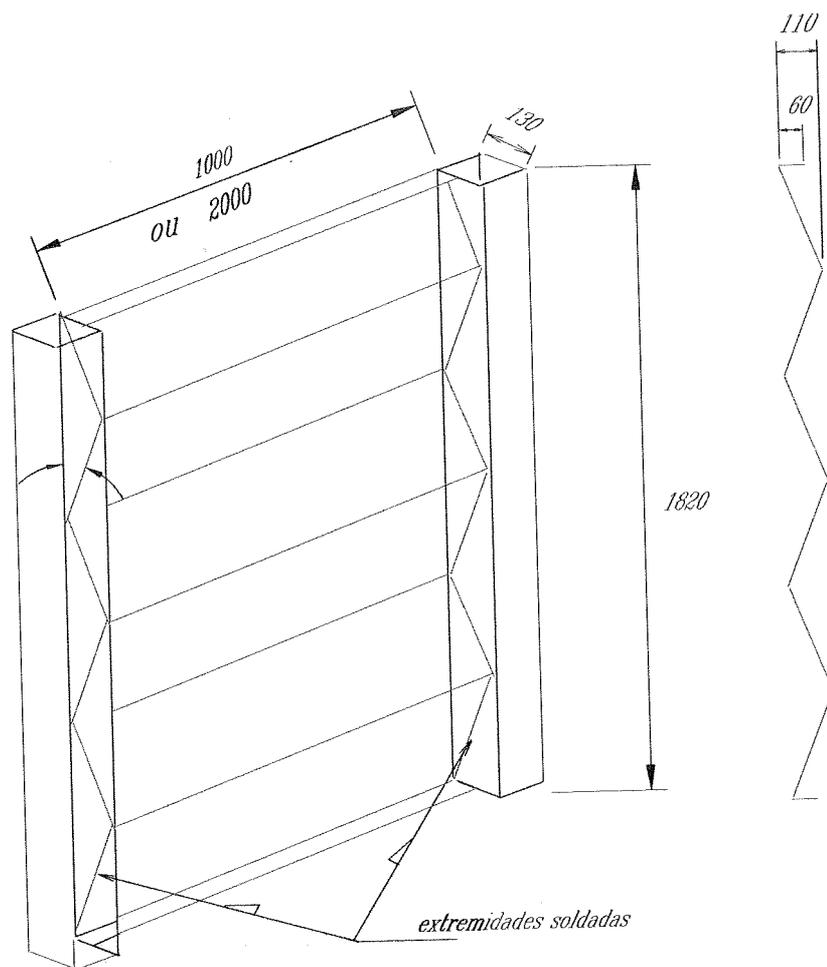


FIGURA 56 - Painel construído para a realização dos ensaios de resistência e rigidez

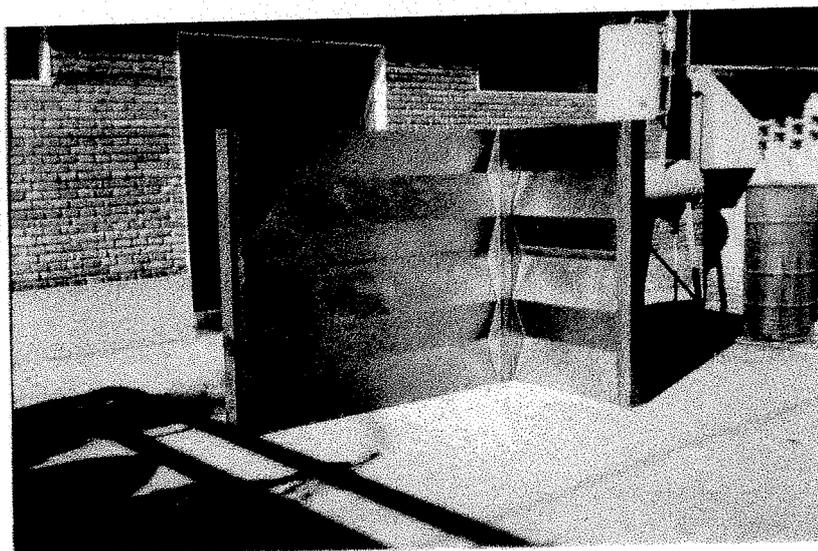


FIGURA 57 - Vista dos painéis propostos para fábricas de ração

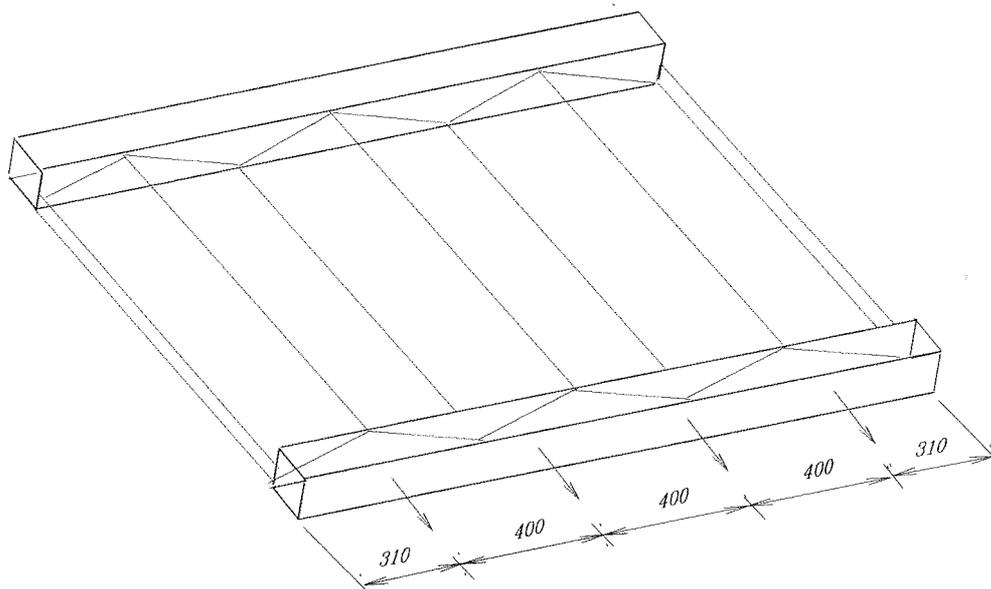


FIGURA 58 - Pontos de aplicação da força de tração.

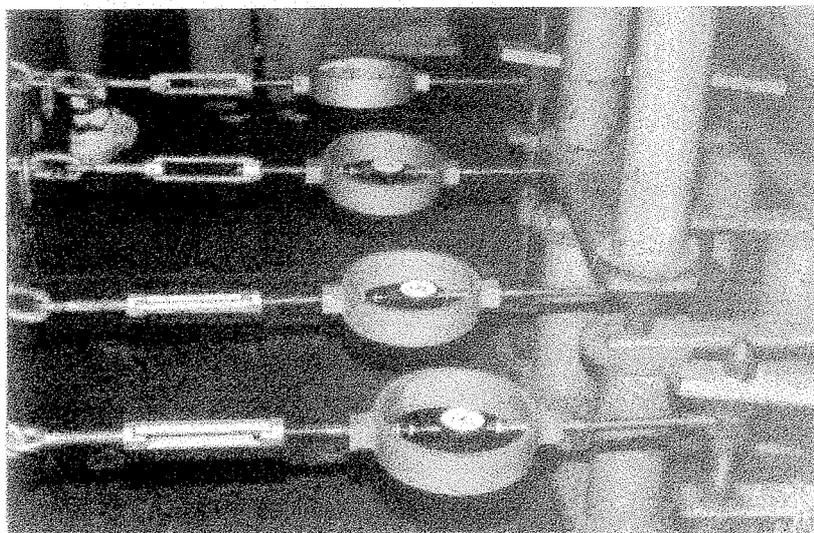


FIGURA 59 - Vista do sistema de tração utilizado.

7.1.2.4 Extensômetros Elétricos de Resistência

Os extensômetros elétricos instalados nos painéis foram do tipo KFC-5-C1-11 com comprimento de 5mm; resistência de $120\Omega \pm 0,3$; fator gage $2,1 \pm 1\%$, fabricado pela KYOWA Ltda. A Figura 60 mostra os pontos onde foram instalados os extensômetros.

Foram instalados dois extensômetros para cada ponto de medição no painel, como mostram as Figuras 60 e 61, tanto na superfície superior como na inferior, para determinar as deformações no estado duplo de tensão. Como se pode ver nessas figuras, os pontos estão localizados nos nós do eixo central da malha. No painel 2 também foram instalados extensômetros na superfície inferior, a 1,75cm dos pontos que foram conformados no sentido longitudinal das ondas.

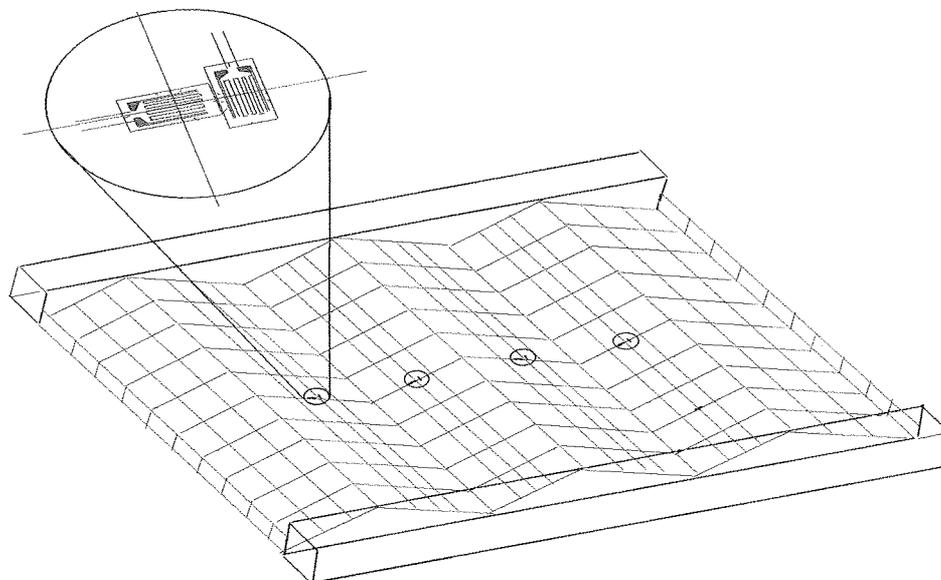


FIGURA 60 - Pontos onde foram instalados os extensômetros elétricos

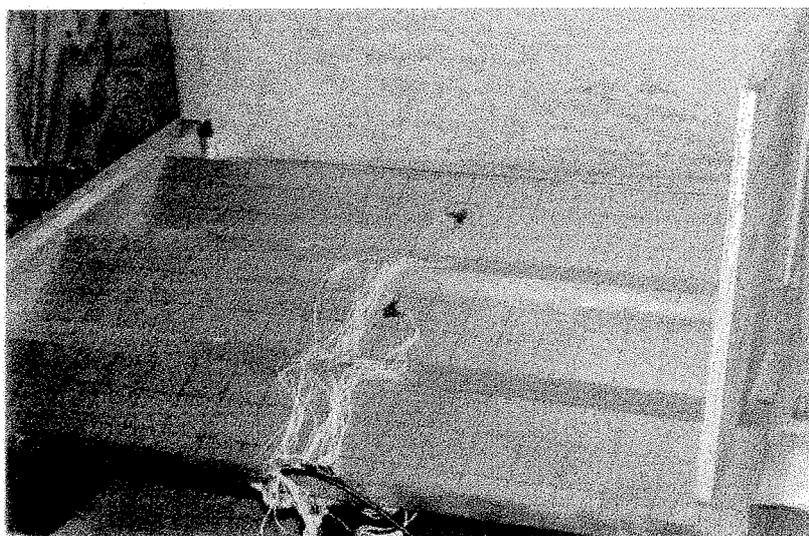


FIGURA 61 - Instalação dos extensômetros nos painéis

7.1.2.5 Transdutores Diferenciais

Os transdutores diferenciais (LVDTs) utilizados foram os fabricados pela Hewlett Packard, modelo 14 DCDT500 que possuem uma variação de deslocamento de 25mm e trabalham com voltagem de excitação de 24 volts.

Foram instalados 13 transdutores diferenciais no eixo central, no sentido longitudinal como é mostrado nas Figura 62 e 63.

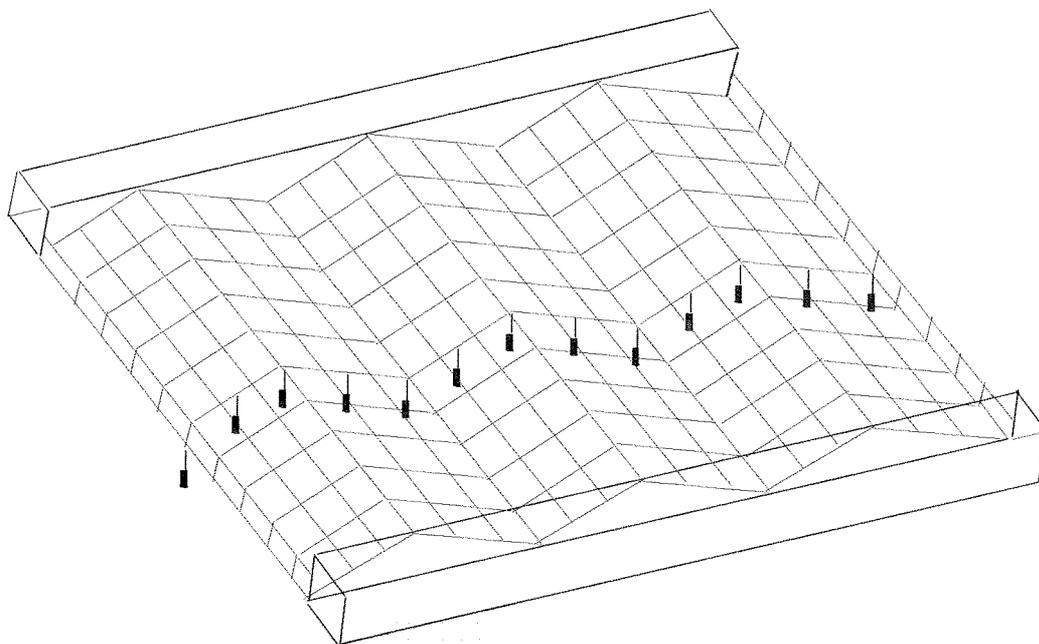


FIGURA 62 - Pontos onde foram instalados os transdutores diferenciais (LVDTs).

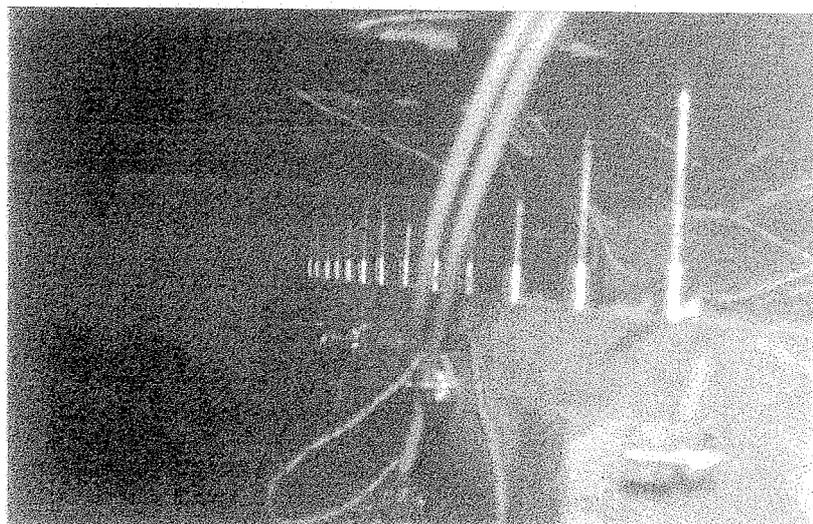


FIGURA 63 - Instalação dos transdutores diferenciais (LVDTs) sob os painéis.

7.2 Ensaio Preliminar

Para a análise do sistema experimental de vinculação e carregamento dos painéis, utilizou-se o painel 1. Inicialmente, tentou-se fazer o carregamento com o sistema de ar comprimido, gentilmente emprestado pelo Professor Pericles Brasiliense Fusco do Departamento de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Como o sistema era composto de vários colchões quadrados com 50cm de lado, nos ensaios preliminares, não se apresentou como bom método de ensaio, pela forma dos colchões, associado à irregularização da superfície do painel com conformação zigzague, provocando carregamento não uniforme, além de trazer alguns problemas experimentais e provocar algumas deformações locais. Como o painel estava totalmente instrumentado, optou-se pela continuidade dos ensaios utilizando-se outros materiais de carregamento. Utilizou-se água, a qual proporcionou boa uniformidade de carregamento; porém, o volume do colchão utilizado foi insuficiente para atingir a carga desejada. Finalmente, utilizou-se areia que, a exemplo da água, apresentou boa uniformidade, ocupando todos os espaços formados pela conformação dada ao painel.

7.3 Carregamento Utilizado

Para o carregamento dos painéis foi construído um caixão de madeira para conter a areia sobre o painel. O carregamento foi realizado em camadas uniformes de areia previamente pesadas. As leituras das deformações e dos deslocamentos foram realizadas em intervalos de cargas de aproximadamente 1,15kPa, para o painel 1 como mostra a Figura 64. Após essa carga colocou-se uma placa de madeira de 25mm de espessura; aplicou-se os próximos incrementos de carga através de cilíndrico hidráulico, como é mostrado na Figura 65.

No painel 2, o carregamento seguiu o mesmo procedimento do painel anterior, modificando-se os intervalos de cargas, que foi de aproximadamente 1,38 kPa até 7kPa. Nesse caso, não foi necessária a colocação da placa de madeira e nem a utilização do cilindro hidráulico.

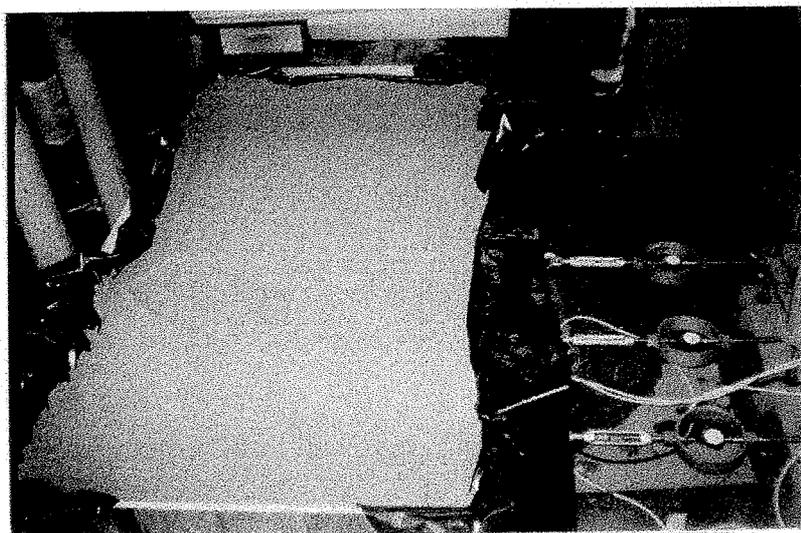


FIGURA 64 - Colchão de areia sobre o painel



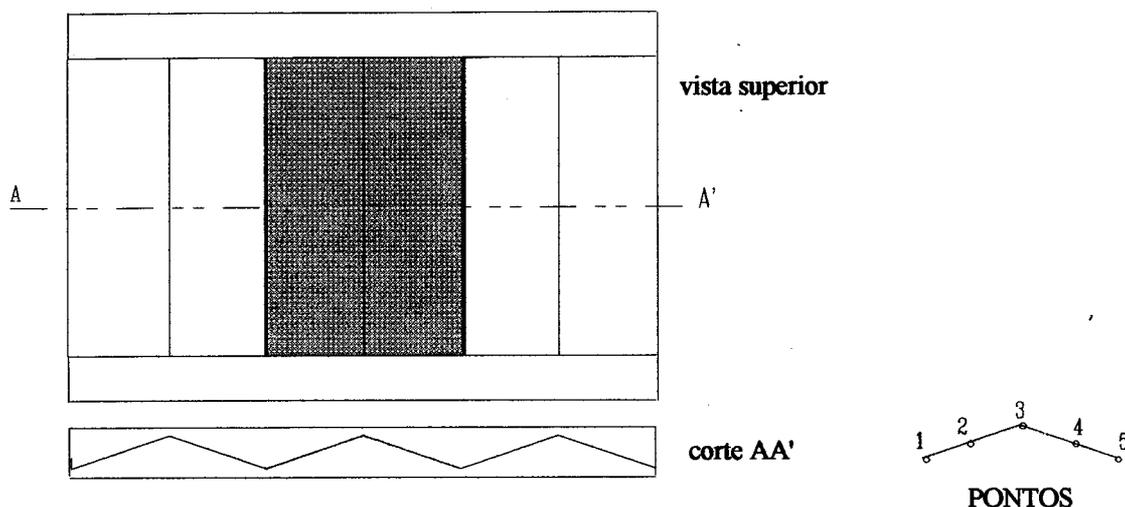
FIGURA 65 - Placa de madeira sobre o colchão de areia.

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Quanto à análises dos resultados experimentais e teóricos foram realizadas apenas as medições na onda central dos painéis, porque as outras duas ondas sofrem perturbações, devido às condições de borda, além do que, nos silos reais construídos com esses painéis a parede será formada por vários painéis sobrepostos; portanto, o comportamento da onda central do painel ensaiado, representa mais fielmente aquilo que ocorrerá na realidade com os silos.

Os métodos simplificados para o dimensionamento das paredes dos silos prismáticos mais utilizados são: a teoria de viga bi-engastada utilizada por RAVENET (1983, 1990) e por REIMBERT&REIMBERT (1980) e o método proposto por TROITSKY (1982) que é a viga bi-articulada, considerando-se o efeito de membrana. Como foi citado em capítulos anteriores, existem poucas informações técnicas sobre o dimensionamento de silos prismáticos, embora sejam bastante utilizados no setor industrial. Para uma análise mais rigorosa, utilizou-se o método dos elementos finitos por meio do software LUSAS (1992).

Também para análise experimental, a onda central do painel foi instrumentada em cinco pontos, como mostrada na Figura 66.



FIGUARA 66 - Detalhe da onda central e os pontos de análises

8.1 Deslocamentos

A Figura 67 mostra os deslocamentos do painel 1 determinados pelo LUSAS para as condições engastadas e articuladas, e pela teoria de viga bi-articulada e bi-engastada, para a pressão de 6,86kPa. Os deslocamentos determinados pelo LUSAS são correspondentes aos pontos da onda, onde foram instalados transdutores diferenciais. Os deslocamentos obtidos pelos métodos simplificados são determinados para a linha neutra e, comparado com os pontos 1, 3 e 5, que representam os deslocamentos de viga. Como se vê na Figura 67 os deslocamentos nesse painel com os dois tipos de restrição imposto ao modelo, não apresentaram diferenças significativas. Com isto, podemos concluir que o modelo numérico utilizado para a análise, não reproduziu as condições em que foi realizado o ensaio. Os deslocamentos nos 5 pontos da onda do painel 2, foi para a pressão de 5,55kPa e foram bastante diferentes para os dois tipos de restrição impostos no LUSAS. Como se observa na Figura 68, os deslocamentos experimentais nos pontos 1, 3, e 5 ficaram um pouco acima dos deslocamentos fornecidos pelo LUSAS para a condição de engaste/articulação, enquanto que para os pontos 2 e 4, os deslocamentos experimentais ficaram entre as duas restrições dadas. As teorias de vigas bi-engastada e bi-articulada ficaram também numa faixa intermediária.

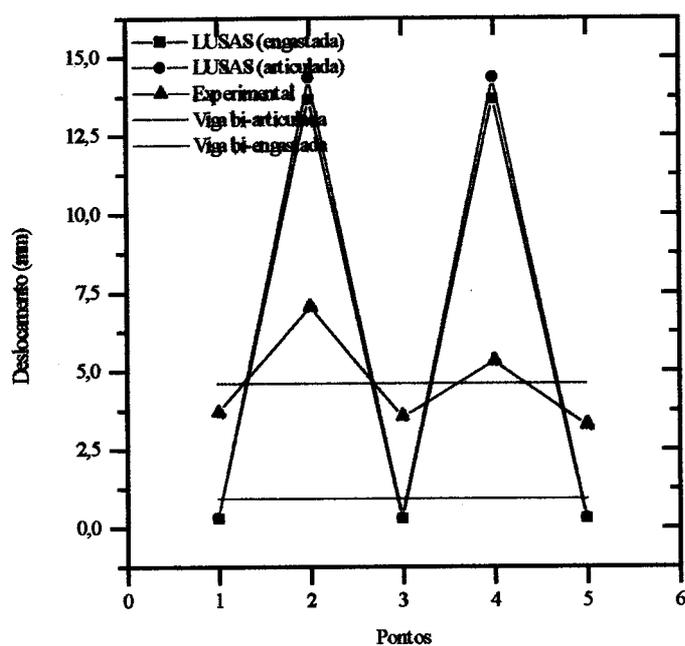


FIGURA 67 - Deslocamentos nos 5 pontos da onda central do painel 1

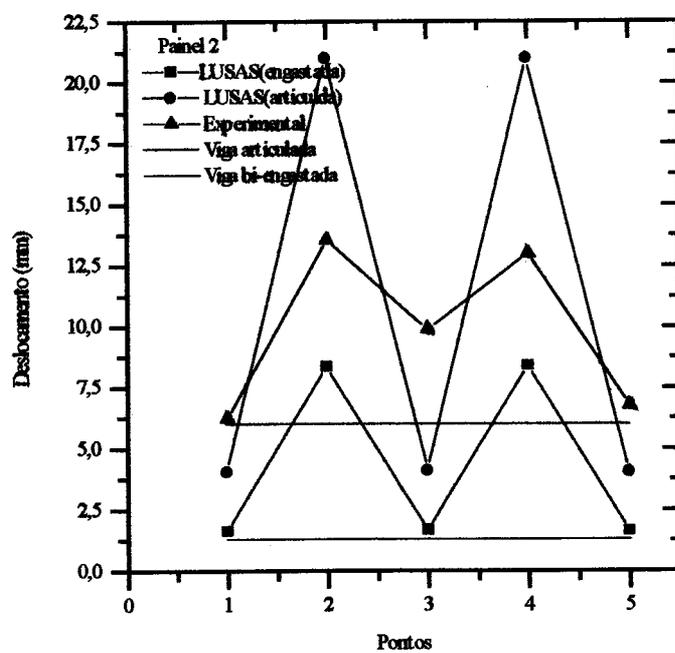


FIGURA 68 - Deslocamentos nos 5 pontos da onda central do painel

8.2 Tensões

8.2.1 Painel 1

Como foi citado no capítulo anterior, este painel foi escolhido para nele se realizar os ensaios preliminares; por isto é que só foram instalados extensômetros no meio de cada superfície inclinada das ondas; mais especificamente para a onda central nos pontos 2 e 4, por serem simétricos em relação ao ponto 3, que é o ponto central do painel. As tensões foram analisadas no sentido longitudinal das ondas, ou seja, no sentido do vão entre as colunas, pois é neste sentido que se calculam as tensões pelos métodos simplificados; desta forma podemos confrontar os resultados teóricos com os experimentais. Nas Figuras 69 e 70 são apresentadas as curvas das tensões obtidas pelos métodos simplificados e dos elementos finitos e as tensões experimentais determinadas nos pontos 2 e 4. Observa-se que as curvas dadas pelo LUSAS nos dois pontos afastam-se bastante das curvas das tensões experimentais, depois da metade do carregamento, como também possuem comportamento totalmente distinto. Isto confirma que o modelo numérico proposto não conseguiu representar fielmente as condições de ensaio, a exemplo do que ocorreu com os deslocamentos.

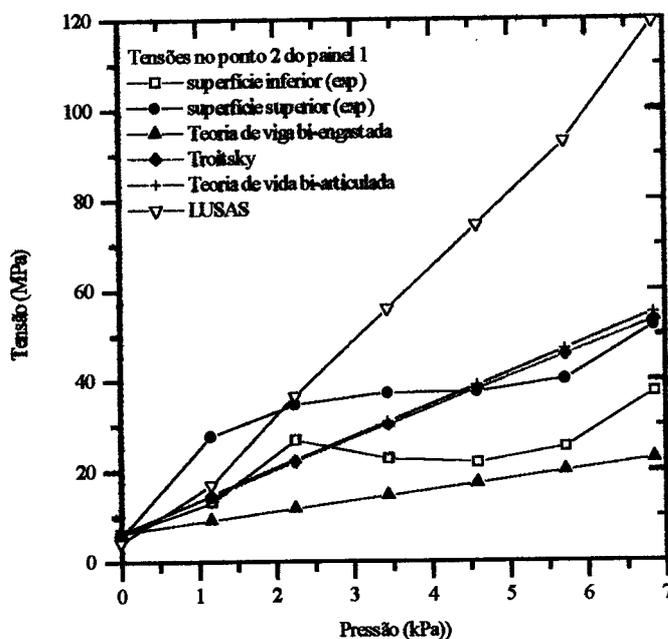


FIGURA 69 - Tensões determinadas no ponto 2 do painel 1

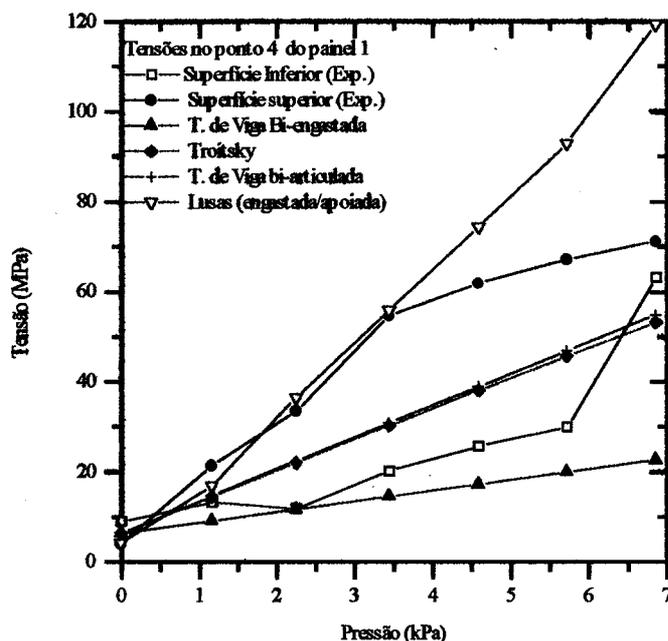


FIGURA 70 - Tensões determinadas no ponto 4 do painel 1

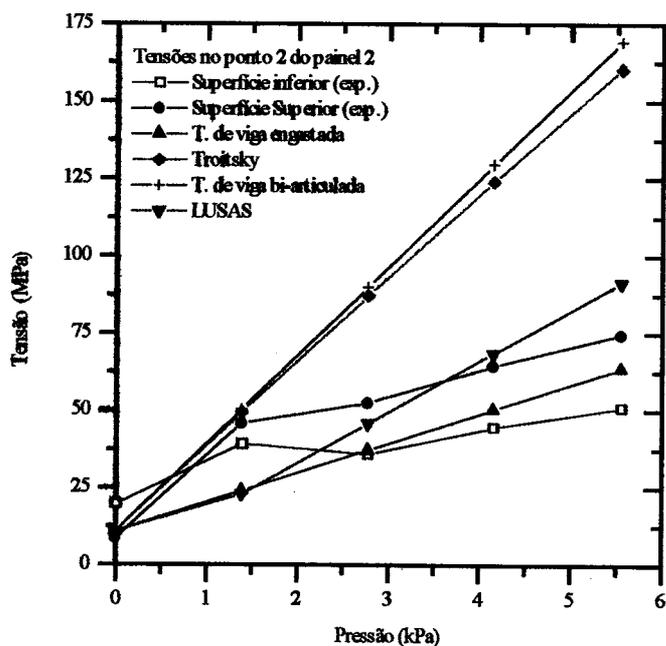
Nos dois pontos as tensões obtidas pela teoria de viga bi-engastada ficaram abaixo das experimentais; significa dizer que este método subestima as tensões no painel. Já o método proposto por TROITSKY (1982) foi o que melhor se comportou com relação às tensões experimentais, principalmente, na superfície inferior, onde as fibras externas da chapa estão tracionadas. Para a análise visual nos gráficos foram colocadas também as tensões da superfície superior, em módulo, porque são de compressão.

8.2.2 Painel 2

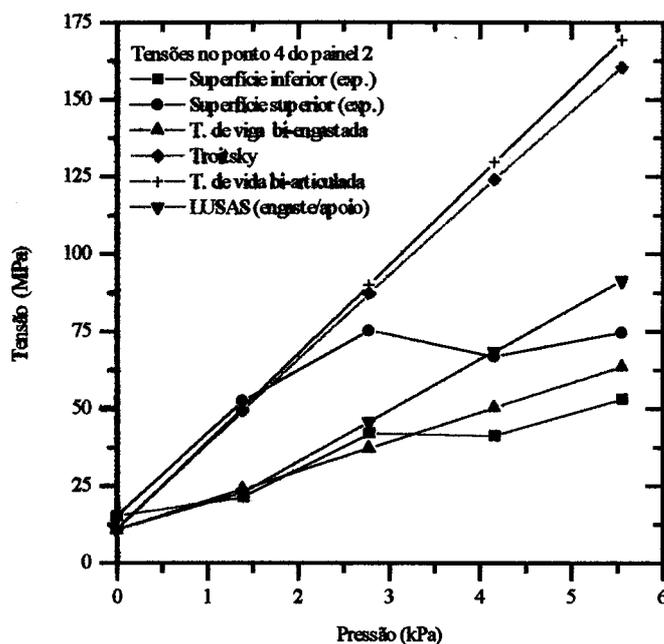
Após a realização do ensaio preliminar optou-se pela análise das tensões não somente nos pontos 2 e 4, mas em todos (1 a 5). Assim como no painel 1, onde as tensões foram analisadas no sentido longitudinal das ondas. As Figuras 71 e 72 mostram as curvas das tensões nos pontos 2 e 4, curvas experimentais, calculadas pelos métodos simplificados e as fornecida pelo LUSAS. Para esse painel, observa-se que as teorias de viga bi-articulada e à proposta por TROITSKY (1982) são muito conservadoras em relação às experimentais. As fornecidas pelo LUSAS tiveram bom comportamento em relação às tensões experimentais da superfície inferior e da superior. Isto nos leva a

concluir que o modelo numérico para o painel conseguiu representar de maneira satisfatória as condições em que foram realizados os ensaios. A teoria de viga bi-engastada foi a que obteve melhor comportamento, com relação às tensões experimentais na superfície inferior; verifica-se pequeno aumento da diferença entre elas com o aumento da pressão normal.

Como a geometria do painel não é plana, devido a sua conformação, associada ao critério de dimensionamento (que é realizado por meio de teorias simplificadas) devemos trabalhar com hipótese de cálculos que se aproximem das tensões fornecidas pelo LUSAS, pois, como foi observado anteriormente, possui bom comportamento em relação às tensões de tração e compressão nas superfícies do painel.



FIGUARA 71 - Curvas de tensões determinadas para o ponto 2 do painel 2



FIGUARA 72 - Curvas de tensões determinadas para o ponto 4 do painel 2

Neste painel também analisou-se as tensões próximas aos pontos 1, 3 e 5, mais precisamente a 1,75cm do eixo longitudinal, onde estava localizado cada ponto. As Figuras 74, 75 e 76 mostram as curvas teóricas e experimentais das tensões nestes pontos, das teorias citadas anteriormente e às experimentais; observa-se que o comportamento das tensões fornecidas pelo LUSAS, a teoria de viga bi-articulada, e à proposta por Troitsky superestimaram as tensões no painel comparadas com às experimentais, enquanto que a teoria de viga bi-engastada, apresentou excelente comportamento, onde a diferença entre as tensões não são consideradas significantes para os pontos 1 e 3 e, para o ponto 5 ocorreu um pequeno desvio na última carga, a qual, pode ser associado a alguma imperfeição geométrica na construção do painel. Mas de maneira geral, pode-se dizer que a teoria apresentou boa compatibilidade com os dados experimentais. Talvez este fato seja porque não ocorre rotação nesses pontos, por ocorrer um equilíbrio de momentos no sentido da inclinação, devido à conformação zigzague imposta ao painel para adquirir maior inércia e melhor fluabilidade da ração.

A carga limite última do painel ocorreu por instabilidade local próximo ao ponto 3 e nos dois outros simétricos, com a pressão de 7kPa, devido à plastificação de conformação do painel nas regiões, como é mostrado na Figura 73.

Como se pode observar nas figuras, a teoria de viga bi-engastada é a que apresenta melhor comportamento. Isto mostra que a conformação zigzague imposta ao painel aumenta a rigidez nos pontos mencionados.

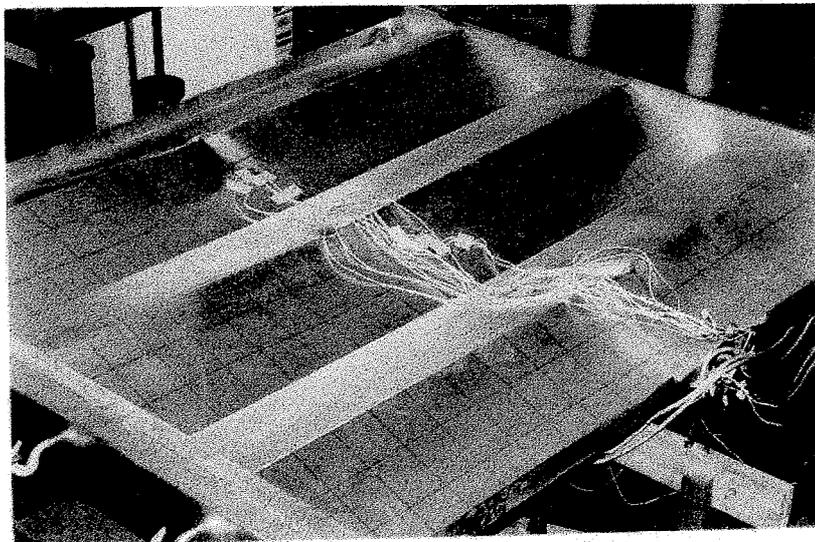


FIGURA 73 - Vista da perda de estabilidade local da onda central do painel 2

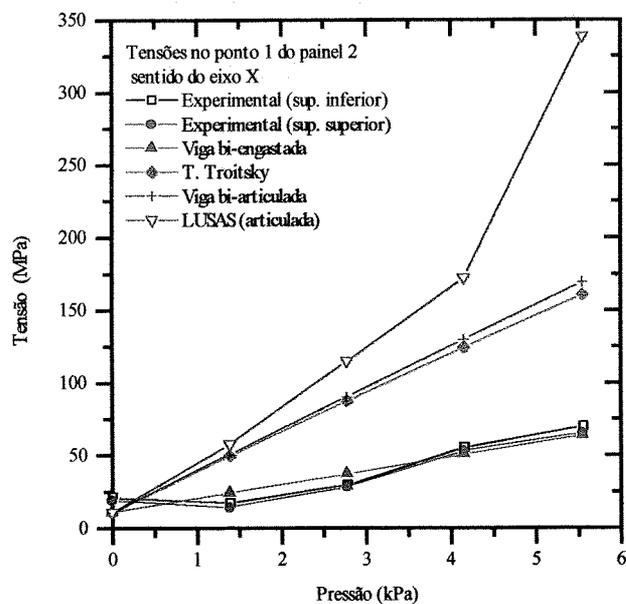


FIGURA 74 - Tensões próximo ao ponto 1 do painel 2

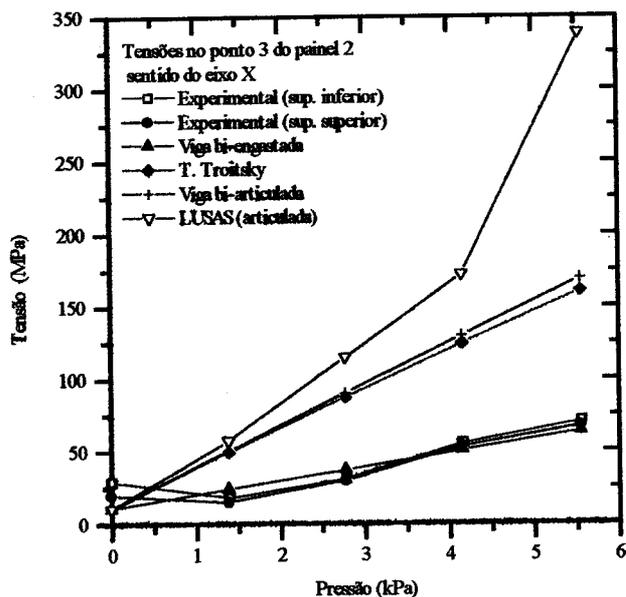


FIGURA 75 - Tensões próximo ao ponto 3 do painel 2

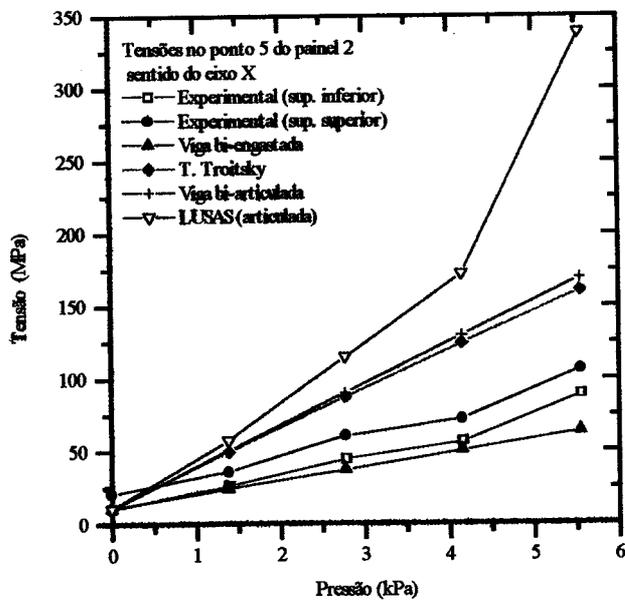


FIGURA 76 - Tensões próximo ao ponto 5 do painel 2

Quando às tensões atuantes nas paredes dos silos são calculadas pelos métodos simplificados; soma-se a tensão devido ao momento fletor, à tensão devida a tração na parede provocada pela reação das paredes adjacentes. Como a tração é independente do carregamento do painel analisado, resta como variável o momento fletor. Sendo este último dado por $\frac{P_h l^2}{24}$ ou, $\frac{P_h l^2}{8}$, dependendo da hipótese de cálculo adotada (engastada ou articulada), questionam-se as constantes dos denominadores. As curvas das tensões determinadas pela teoria de viga bi-engastada subestimaram as tensões experimentais, enquanto aquelas determinadas como vigas bi-articuladas superestimou a expectativa.

Como geralmente a espessura da parede dos painéis é pequena e essas são soldadas às colunas, que possuem alto momento de inércia, é aceitável a hipótese de que por ser delgada, a parede se comporte com uma ligação semi-rígida (nem é engastada e nem articulada). Com isso, pode-se considerar a hipótese de viga articulada para o dimensionamento, mas à proposta por TROITSKY (1982) é a mais recomendada por considerar o efeito membrana.

Recomenda-se, também, a verificação das tensões pelo método de viga bi-engastada, porque, o dimensionamento das paredes dos silos são realizadas em função das tensões e a máxima por este método deve ser analisada no anteprojeto.

CONCLUSÕES

- Pelo dinamismo e globalização da economia, o setor industrial nacional de ração terá que mudar o sistema horizontal das fábricas (tão comum no país) para o sistema vertical, devido à concorrência dos fabricantes dos países que formam o Mercado Comum do Cone Sul. Atualmente a tendência mundial é para fábricas verticais, porque oferecem maior funcionalidade e menor custo de produção.
- O maior problema que ocorre no processamento e no dimensionamento de silos para armazenamento de ração é o fluxo do produto no seu interior. As propriedades físicas das rações e de seus ingredientes, que foram determinadas no capítulo 3, serão de grande importância para os profissionais que trabalham no dimensionamento, processamento e na fabricação de ração. Essas propriedades físicas são as primeiras a serem determinadas no Brasil, utilizando-se a máquina de cisalhamento de translação conhecida como “Jenike Shear Cell” e, seguindo a metodologia recomendada pela maioria das normas internacionais de ação e fluxo em silos. Dessa forma, se estar contribuindo para que os profissionais que trabalham na área específica de projeto de silos, elaborem-nos com as reais propriedades físicas de produtos fabricados no país.
- Como o Brasil ainda não possui norma para elaboração de projeto de pressões e fluxos em silos, estudou-se as recomendações para a elaboração de projetos de silos. Na falta de uma norma brasileira, recomenda-se o trabalho desenvolvido por CALIL (1990).

- Para a combinação das ações atuantes em silos com vista ao critério de dimensionamento pelo método dos estados limites, propõe-se que sejam utilizadas as recomendações da norma australiana AS 3774 (1990).
- O uso de painéis com conformação zigzague, apresenta uma série de vantagens estruturais, construtivas e funcionais. A conformação dada aos painéis, aumenta o momento de inércia e conseqüentemente há diminuição da quantidade de material usado na fabricação. Também oferece a possibilidade de construção modular, fabricando painéis com chapa conformada; soldando-se suas bordas em platibandas que serão unidas por parafusos, ou soldadas "in loco", formando-se dessa forma, as colunas dos silos prismáticos. A funcionalidade destes painéis está na inclinação imposta, pois é maior do que o efetivo ângulo de atrito interno, produzindo fluxo de massa no corpo do silo e, desta forma, não deixando existir acúmulo de produtos nas paredes, os quais provocariam focos de bactérias e fungos, coisa indesejável numa instalação destinada ao armazenamento de ração.
- A principal vantagem de silos com paredes conformadas é a não utilização de enrijecedores horizontais. Pois em silos multicelulares, tal uso provocaria obstrução do fluxo do produto próximo às paredes. As obstruções favorecem a formação do fluxo de funil que, em seu estado limite último, provocaria a formação de arcos instáveis, produzindo impacto de grande massa de produto nas paredes e no fundo do silo.
- Com base nas análises teóricas e experimentais realizadas para determinar às tensões nos painéis 1 e 2, concluímos que a teoria proposta por TROITSKY (1988) é a mais adequada pela simplicidade de cálculo e boa adequação com os resultados experimentais.

Para futuros trabalhos, sugere-se:

- Estudo de um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos utilizando o LUSAS (por exemplo), para melhor representar o comportamento experimental do painel 1.

- Construção de um protótipo para análises das pressões nas paredes em condição real.
- Avaliação da influência da plastificação nos topos das ondas na perda de instabilidade local.
- Avaliações das pressões de atrito nas paredes e sua distribuição para as colunas.
- Estudo das pressões em tremonhas piramidais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CONCRETO INSTITUTE (ACI-313) (1983). **Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos and bukers for storing granular materials.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8681 (1984). **Ações e segurança nas estruturas.** Rio de Janeiro.
- _____. (ABNT). NBR 6123 (1988). **Força devidas vento em edificações.** Rio de Janeiro.
- AUSTRALIAN STANDARD - AS3774. (1990). **Loads on bulks solids containers.**
- AYUGA. F. (1995). Los empujes del material almacenado en silos. **Informes de la construcción.** v.46, n.436.
- BMBH (1985). British metaterials handling board. **Draf cade of practice for the design of silos, bins, bankers and hoppers.** Inglaterra, 101p.
- CALIL Jr., C. (1984). **Sobrepreçoes en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos.** São Carlos - SP. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 184p.
- _____. (1990). **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais.** São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

_____. (1992). **Recomendações para o projeto e construção silos segundo a ISO.** In: **XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola.** Santa Maria, p.148-158.

_____. (1993). **Propriedades físicas de alguns produtos de para o projeto de fluxo e pressão de estruturas de armazenamento.** In: **XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola.** Ilhéus-BA. p.987-1017.

DIN 1055 (1987). Lastannahmen fur Bauter Blatt 6. Lasten in silozellen. Alemanha. 12p.

FEA, LUSAS. (1992). User's Manual: LUSAS Theory manual. Finite Element Analysis Ltd, Surrey 1992

FIP/ISO (1989). Recomendation for concreto silo design. Federation internacional de precontrainte.

GIESELKI, R. et. al. (1970). Behalter, bankers, silos, shornsteine, fornehturne and freileitunestaste. Berlin. Verlag Von Wilhelm Ernst und Sohn.

GRAY, W. S. (1973). Concrete water towers, bankers, silo & other elevel structure. 5 ed. Cement Association. 372p.

JENIKE, A. W. (1964). Storage and flow of silos. Bolletin on the University of Uthar. Bolletin n.123 of the Utah Engineering Experimental Station. Salt Lake. Utah.

_____. (1964). **Storage and flow of solids.** Bolletin of the University of Utah. Sat Lake city. Utah. Estados Unidos, 1964, 197p.

JENKE, A. W. & JOHONSON, J. (1979). Flow factor Tester and consolidating bench operating instructions. Jenike&Johonson, Inc, North Billerica, Massachusetts - USA, 40p. (Manual Técnico)

MILANI, A. P. (1993). Determinação das propriedades de produtos armazenados para projetos de pressões e fluxo em silos. São Carlos, 272p.

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

MORAL, F. (1947). **Hormigon armado**. Madrid. Editorial Dossat S. A. p.595-622.

RAVENET, J. (1979). **Dimensiones optimas de silos para almacenamiento de harinas**. Espanha Agricola. p.21-27.

_____. (1983). **Silo: Deformaciones, falhas, explosiones, prevencion de**. Ed. Tecnicos Asociados. Barcelona.

_____. (1983). **Silo: Flujo de vaciado de solidos, formacion de bovedas**. Ed. Tecnicos Asociados. Barcelona.

_____. (1983). **Silo: Teoria, investigacion e construccion**. Ed. Tecnicos Asociados. Barcelona.

_____. (1990). **Silos**. Barcelona. 330p.

REIMBERT, M. and REIMBERT, A. (1979). **Teoria e práticas**. Editorial Americanas. Buenos Aires. 463p.

ROTTER, J. M. (1983). **Stress amplification in unstiffend steel silos and tanks**. Research report n. 437. School of Civil and Mining Engineering University of Sidney.

_____. (1985). **The analysis and design of bins design of steel bins for the storage of bulk solids**. School of Civil and Mining Engineering University of Sidney.

_____. (1985). **Design of steel bins for the storage of bulk solids**. University Sidney. p.55-67.

_____. (1983). **Structure design of steel bins for bulks solids**. Sidney. Institute Constructon, 30p.

SAFARIAN, S. S.; HARRIS, E. C. (1985). **Design and construction of silos and bunkers**. Van Nostrand Reinold Company. 468p.

- SNBATI (1975). Reglas para proyect y calculo de silos de homigón. Sidicato Nacional de Hormigón Armado e Teécnicas Industrializadas.
- TROITSKY, M. S. (1980). **On the structural analysis of retangular steel bins.** Journal of power & bulk solids. v.4 n.4, p.19-25
- _____. (1980). **Design consideration for retangular steel bins.** Canadian Structural Engineering Conference. p.1-41.
- _____. (1988). **Tubular steel structures.** Cap. 7 Analysis and design of bins and bunkers. p.7.1-7.72
- WALTERS, J. K. (1973). **A theoretical analysis of stress in axially symetric hopper and bunkers.** Chemical Enginnering Science.

BIBLIOGRAFICAS CONSULTADA

- ATEWOLOGUN, A. O.; RISKOWSKI, G. L.; BUCK, N. L. (1991). Experimental determination of janssen stress ratio by four methods for soybeans under static conditions. **American Society of Agricultural Engineerig**, ASAE, v.34, n.5, p.2193-2198.
- ATEWOLOGUN, A. O.; RISKOWSKI, G. L.; BUCK, N. L. (1992). An in mass transducer for measuring the static pressure ratio (K) in grain storage bins. **American Society of Agricultural Engineerig**, ASAE, v.35, n.5, p.1659-1664.
- AXE, D. E. (1996). Mezclando los ingredientes adecuadamente. **Industria Avicola. Publicacion Avicola Watt**. v. 40, n.4, p.7-16.
- AZCUI, J. F. (1993). La evolución de la industria fel alimento. **Industria Avicola. Publicacion Avicola Watt**. v. 43, n.4, p.14-17.
- BENINK, E. J. (1989). A new theory for hopper stresses during discharge. **Bulk solids handling**. v.9, n.4, p.4429-432, out.
- BIRKS, A. H. (1991). The definition of two extreme types of bulk solids and ther effect of stress distribution in the vertical section of silos. **Powder handling & processing**. v.3, n.2, p.141-146.
- BISHARA, A. G. (1985). Interaction of bins and storage bulk solids. **Design of steel bins for the storage of bulk solids**. University of Sidney, p.27-33.
- _____. (1989). Wall yield locus to wall friction angle variation anaysis and implications. **Third international conference in bulk material, storage, handling amd transportation**, New Clastle, p.74-77

- BLIGHT, G. E. (1990). Load and temperature strain of welded plane plate grain silo. **Powder handling & processing**. v.2, n.2, p.25-29, mar.
- _____. (1990). Measured loading on a small steel grain silo. **Powder handling & processing**. v.2, n.2, p.153-158, jun.
- _____. (1991). Structure: fill interaction in steel grain silo. **Powder handling & processing**. v.3, n.1, p.43-48, mar.
- BROEISMA, G. (1972). **Behavior of granular materials**. London. Stam Technical Publications. 266p.
- BUCKLIN, R.A.; THOMPSON, S. A. and ROSS, I. J. (1992). Comparason of recently introduced design guidance for grain storage with pressure measurement from full-sized bins. **Powder handling & processing**. v.3, n.3, p.241-247, sep.
- CHANG, C. S.; CONVERSE, H. H.; STEELE, J. L. (1991). Flow rates of grain through varios shapes of vertical and horizontal orificies. **American Society of Agricultural Engineerig**, ASAE, v.34, n.4, p.1789-1796.
- CILONI, A. D. (1984). **Contribuição ao estudo das estruturas em folhas prismáticas**. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- CLANCY, M .B.; EBNER, P. B. (1994). **Tecnologia para la fabricación de alimentos balanceados**. Cap.4 : Silos. American Feed Industry Association, Inc.
- CLINCH, J. A. (1985). Minimum consideration in design of bins for bulk solids. **Design of steel bins for the storage of bulk solids**. University of Sidney, p.198-204.
- DRESCHER, A. (1993). On the criteria for mass flow in hoppers. **Powder technology**. v.73, p.251-260.
- EIBL, J. (1989). Silo design problems. **Third international conference in bulk material, storage, handling amd transportation**, New Clastle, p.53-55.
- EUROCODE 1: ENV(1991-4). (1993). Basis of design and actions on structures. Part 4: **Actions on silos and tanks**. CEN/TE 250/SCI/1993/N108.

- GAYLORD, E. H.; GAYLORD, C. N. (1984). **Design of steel bins for storage of bulk solids**. Prentice-Hall, inc. Englewood Cliff, New Jersey, 359p.
- GU, Y. H.; ARNOLD, P. C. and McLEAN, A. G. (1992). A principal parameter for predicting the flowrate of fine powder from mass flow bins. **Powder handling & processing**. v.4, n.4, p.369-373. nov.
- GU, Y. H.; ARNOLD, P. C.; McLEAN, A. G.(1992). Modeling of air pressure distributions in mass flow bins. **Powder technology**. v.72, p.157-166.
- HATAMURA, Y. and TAKEUCHI, T. (1991). A proposal for an intelligent silo based on measured phenomena. **Advanced powder technology**, v.2, n.4, p.285-295.
- HUANG, C. Y. and ANSOURIAN, P. (1989). Behaviour and design of prismatic steel tanks. **Third international conference in bulk material, storage, handling and transportation**, New Castle, p.223-228.
- JAVARONI, C. E. (1993). **Perfis de aço conformados a frio por dobramento de chapa fina: fundamentos teóricos para dimensionamento de barras**. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- JENIKE, A. W. (1967). Quantitative design of mass-flow bins. **Powder technology**. v.1, p.237-244.
- _____. (1969). On the theory of Bin loads. **Journal of engineering for industry**, ASME, p.339-344.
- _____. and JOHNSON, J. R. (1968). Bin loads. **Journal of the structural division**, ASCE, v.94, n. 4, p.1011-1041.
- _____, A. W. and JOHNSON, J. R. (1970). Review of the principles of flow of bulk solids. **CIMtransactions**. v. LXXIII, p.141-146.
- _____, A. W. and JOHNSON, J. R. (1973). Bin loads part 2. **Journal of engineering for industry**, ASME, v.94, n. 4, p.1-5, feb.
- _____, A. W. and JOHNSON, J. R. (1973). Bin loads part 3. **Journal of engineering for industry**, ASME, v.94, n. 4, p.6-12, feb.

- _____, A. W. and JOHONSON, J. R. (1973). Bin loads part 4. **Journal of engineering for industry**, ASME, v.94, n. 4, p.13-16, feb.
- KAMATH, S.; PURI, V. M.; MAMBECK, H. B. (1994). Flow property measurement using the Jenike cell for wheat flour at various moisture contents and consolidation times. **Powder technology**. v.83, p.293-297.
- KRUYT, N. P. (1994). **Aspects of constitutive relations for cohesionless granular materials**. 149p.
- LOHNES, R. A. (1993). Lateral stress ratios for particulate materials. **Powder handling & processing**. v.5, n.4, p.331-336.
- McLEAN, A. G. (1985). Contont gencarted loads en bins and silos. **Design of steel bins for the storage of bulk solids**. University of Sidney, p.15-26.
- McLEAN, A. G.; ARNOLD, P. C.; MARTINS, D. J. (1983). Simplified mass-flow bin wall load predictions. **Bulk Solids Handling: Silos, Hoppers, Bins & Bunkers for Storing Bulk materials**. A/86, v.3, n.4, nov.
- MOLENDI, M.; HORABIK, J.; ROSS, I. J. (1993). Loads in model grain bins as affected by filling methods, **American Society of Agricultural Engineerig**, ASAE, v.36, n.3, p.915-919.
- MURRY, N. W. (1985). Design aspects of thin-walled steel silos. **Design of steel bins for the storage of bulk solids**. University of Sidney. p.158-163.
- OEMS, M; ROBERTS, A. W.; ARNOLD, P. C.; McLEAN, A. G. (1987). **Bin wall loads: The influence of flow pattern**. Paper 9. Storage, flow and handling of bulk solids. Ed. A.W. Roberts. University of Newcastle.
- PESCHI, I. A. S. Z. (1991). New silo theory based on the developmpent of expansion zone. **Powder handling & processing**. v.3, n.1, p.25-41, mar.
- RAVENET, J. (1978). Silos metalicos para almacenamiento de harinas de trigo. **Tecnica Molitoria**, p.755-770, nov.
- _____. (1984). .Productos pulverulentos cohecivos (I). **Manutencion y Almacenaje**, v.40, p.648-651.

- _____. (1984). Silos en las fabricas de harinas. **Manutencion y Almacenaje**, v.40, p.198-204.
- _____. (1979). Dimensions optimas de los silos para almacenamiento de harinas. **España Agricola**, nov.
- _____. (1979). Diseño y construccion de uma fabrica de pienso compuesto. **Manutencion y Almacenaje**, v.60, p.643-650.
- _____. (1981). Problemas en silos. **Manutencion y Almacenaje**, v.60, p.69-75.
- REIBERT, M. and REIBERT, A. (1993). Calculation of silos and storage retaining walls. **Powder handling & processing**, v.5, n.1, p.59-61, mar.
- ROBERTS, A W. (1995). 100 years of Janssen. **Bulk Solids Handling**. v.15, n.3, july/septembar
- ROBERTS, A. W. (1987). **Wall loads in large steel and concrete bind and solids**. Paper 8. Storage, flow and handling of bulk solids. Ed. A.W. Roberts. University of Newcastle.
- ROBERTS, A. W. (1987). **Wall pressures in mass-flow bins**. Paper 7. Storage, flow and handling of bulk solids. Ed. A.W. Roberts. University of Newcastle.
- ROBERTS, A. W. (1989). Some aspects of grain silo wall pressure research - influence of moisture content on loads generated and control of pressure in tall, multi-outlet silos. **Third international conference in bulk material, storage, handling amd transportation**, New Clastle, v.11-23.
- _____. Z. H.; ARNOLD, P. C.; McLEAN, A. G.(1992). Modeling of air pressure distributions in mass flow bins. **Powder technology**. v.72, p.121-130.
- _____. Z. H.; ARNOLD, P. C.; McLEAN, A. G.(1992). Prediction of the flowrate of bulk solids from mass flow bins with conical hoppers.
- ROTTER, J. M. (1989). The strenghtening effect of stored solids on the buckling of cylindrical steel silos. **Third international conference in bulk material, storage, handling amd transportation**, New Clastle, p.216-222.

- _____. J. M. (1985). Bending theory of shells for bins and silos. **Design of steel bins for the storage of bulk solids**. University of Sidney, p.71-81.
- _____. J. M. (1985). Uckling under axial compression. **Design of steel bins for the storage of bulk solids**. University of Sidney, p.122-131.
- ROY, B. C. (1993). Study of mass flow rates from side discharged bins. **Powder handling & processing**. v.5, n.3, p.267-271, sep.
- SAFARIAN, S. S. and HARRIS, E. C. (1991). Empirical method for computing bending moments in circular silos walls due to asymmetric flow. **Powder handling & processing**. v.3, n.3, p.249-251, sep.
- SCHULZE, D. and SCHWEDES, J. (1993). Bulk solids flow in the hopper/feeder interface. **Powder handling & processing**. v.5, n.4, p.341-348, nov.
- SCHWEDES, J. (1983). Evolution of bulk solids technology since 1974. **Bulk Solids Handling: Silos, Hoppers, Bins & Bunkers for Storing Bulk materials**. A/86, v.3, n.1, mar.
- SCHWEDS, J. and SCHULE, D. (1990). Measurement of flow properties of buks solids. **Proceding of second wold congress particle technology**, Kyoto, Japan, p.61-69, sep.
- SHMIDT, L. C. and WU, Y. H. (1989). Automation in measurement and data processing of silo wall pressure. **Third international conference in bulk material, storage, handling amd transportation**, New Clastle, p.44-47.
- SITKEI, G. (1986). **Mechanics of agricultural materials**. Elsevier. 488p.
- SUNDURAN, V. and COWIN, S. C. (1989). On the determination of the pressure for deep bins. **Third international conference in bulk material, storage, handling amd transportation**, New Clastle, p.298-308.
- SUZUKI, M.; AKASHI, T.; MATSUMOTO, K. (1985). Flow behavior and stress conditions in small and medium silos. **Bulk Solids Handling: Silos, Hoppers, Bins & Bunkers for Storing Bulk materials**. A/86, v.5, n.3, jun.

- THOMPSON, S. A.; BUCKLIN, R. A.; BATHICH, C. D.; ROSS, I. J. (1988). Verification in the apparent coefficient of friction of wheat on galvanized steel. **American Society of Agricultural Engineerig**, ASAE, v.31, n.5, p.1518-1524.
- TIMOSHENKO, S. P. (1969). **Resistência dis materiais**. Traduzido por: José Rodrigues de Carvalho. Ao Livro Técnico S.A, v.1.
- TIMOSHENKO, S. P. (1966). **Resistência dis materiais**. Traduzido por: Domicio Falcão Moreira, v. 2.
- TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. (1961). **Theory of elastic stability**. New York. McGraw-Hill Book Company.
- TIMOSHENKO, S. P.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. (1959). **Theory of plates and shells**. New York. McGraw-Hill Book Company.
- TRAHAIR, N. S. (1985). Characteristics of structural form. **Design of steel bins for the storage of bulk solids**. University of Sidney, p.55-70.
- TRAHAIR, N. S. (1985). Criteria of failure. **Design of steel bins for the storage of bulk solids**. University of Sidney, p.113-121.
- van LEEUWENSTIJN, P. L. L.; WILK, J. L. A.; HAAKER, G. (1994). Flow properties of powders using four testers - measurement compaarason and assessment. **Powder technology**. v.76, p.277-289.
- van LEEUWENSTIJN, P. L. L.; WILK, J. L. A.; HAAKER, G. (1994). Investigation of the influence of wall stiffnes on the stress ratio in mmmoth silos. **Powder technology**. v.78, p.213-220.
- WESTBROOK, R. (1988). **Structural enginnering design in pratice**. Longman scientific&technical.
- Wilms, H. (1985). Calculation of stresses in silos by method of characteristics. **Bulk Solids Handling: Silos, Hoppers, Bins & Bunkers for Storing Bulk materials**. A/86, v.5, n.2.
- YU, W. (1991). **Cold-formed steel design**. New York. John Wily&Sond, Inc. 631p.
- ZAGOTTIS, D. (1988). **Pontes e grandes estrutura: introdução a teoria das placas e das cascas**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ZHANG, Q.; BRITTON, M. G.; KIEPER, R. J. (1994). Interaction between wheat and a corrugated steel surface. **American Society of Agricultural Engineerig**, ASAE, v.37, n.3, p.951-956.

ANEXOS

ANEXO A

QUADRO 1 - Deslocamentos em (mm) experimentais nos pontos da onda central do painel 1

Pressão (kg _f /m ²)	Pontos				
	1	2	3	4	5
0	0	0,02	0,02	0,01	0
117	1,21	2,13	1,31	1,64	0,69
225	1,6	3,28	1,8	2,31	1,21
345	2,18	4,15	2,13	2,98	1,6
460	2,74	5,03	2,55	3,67	2,18
573	3,26	5,89	3,02	4,44	2,74
686	3,69	7,04	3,53	5,32	3,26

QUADRO 2 - Dados experimentais das deformações no ponto 2 do painel 1

PRESSÃO NORMAL (kg _f /m ²)	DEFORMAÇÕES (μ strain)				TENSÕES (kg _f /cm ²)	
	PONTO 1				PONTO 2	
	INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR	SUPERIOR
	ε _x	ε _y	ε _x	ε _y	σ _x	σ _x
0	-20	-22	-19	-14	61.4	-53.5
117	-84	90	-92	-93	131.5	-276,7
225	-88	119	-115	-115	265.7	-345,0
345	-84	147	-143	-61	226.5	-372,2
460	-65	171	-154	-27	218.7	-374,1
573	-61	184	-172	-7	250.8	-401,8
686	-97	207	-232	24	375.3	-518,8

QUADRO 3 - Dados experimentais das deformações no ponto 4 do painel 1

PRESSÃO NORMAL (kg _f /m ²)	DEFORMAÇÕES (μ strain)				TENSÕES (kg _f /cm ²)	
	PONTO 1				PONTO 2	
	INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR	SUPERIOR
	ε _x	ε _y	ε _x	ε _y	σ _x	σ _x
0	28	-31	19	-12	90.9	-52.2
117	28	-49	-72	-67	132,5	-212,5
225	40	-39	-94	-170	117.7	-334,6
345	161	-25	-149	-291	388.8	-545,3
460	187.1	-32	-182	-287	453.8	-618,7
573	212.6.9	-35	-223	-226	514.7	-671,1
686	251	-49	-271	-123	614.2	-710,5

QUADRO 4 - Tensões determinadas pelos métodos teóricos para o painel 1

pressão (kg _f /m ²)	Tensão (kg _f /cm ²)			
	T. de viga bi-engastada	Troitsky	T. de viga bi-articulada	LUSAS (articulada)
0	63,99	63,99	63,99	42,66
117	91,42	145,4	146,27	169,1
225	117,03	220,51	223,11	363,5
345	145,14	302,18	307,43	557,4
460	172,05	379,73	388,15	742,3
573	198,69	455,98	468,09	928,1
686	225,37	531,79	548,11	1193

ANEXO B

QUADRO 5 - Deslocamentos (mm) experimentais nos pontos da onda central do painel 2

Pressão (kg _f /m ²)	Pontos				
	1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0
139	2,18	3,94	2,77	2,31	2,11
278	3,69	7,11	4,95	4,83	3,91
417	5,01	10,73	7,18	8,47	5,51

QUADRO 6 - Dados experimentais das deformações no ponto 2 do painel 1

PRESSÃO NORMAL (kg _f /m ²)	DEFORMAÇÕES (μ strain)				TENSÕES (kg _f /cm ²)	
	PONTO 1				PONTO 2	
	INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR	SUPERIOR
	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_x	ϵ_y	σ_x	σ_x
0	67	-60	-40	10	196.1	-85.4
139	194	-83	-226	95	390.2	-455.7
278	226	-237	-269	142	357.5	-522.5
417	265	-241	-348	231	444.7	-643.1
556	298	-260	-416	313	507.7	-743.3

QUADRO 7 - Dados experimentais das deformações no ponto 4 do painel 2

RESSÃO NORMAL (kg _f /m ²)	DEFORMAÇÕES (μ strain)				TENSÕES (kg _f /cm ²)	
	PONTO 1				PONTO 2	
	INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR	SUPERIOR
	ε _x	ε _y	ε _x	ε _y	σ _x	σ _x
0	50	-52	-37	4	151,4	-151,8
139	93	5	-72	39	211,2	-524,5
278	143	82	-93	61	273,2	-751,6
417	149	303	-151	238	134,1	-668,3
556	199	359	-182	290	210,7	-745,4

QUADRO 8 - Tensões determinadas pelos métodos teóricos para o painel 1

pressão (kg _f /m ²)	Tensão (μ strain) (kg _f /cm ²)			
	T. de viga bi-engastada	Troitsky	T. de viga bi-articulada	LUSAS (articulada)
0	106,66	106,6	106,6	106
139	238,66	493,7	502,7	227,9
278	370,67	870,7	898,6	456,6
417	502,67	1240,2	1294,7	683,8
556	634,68	1603,5	1690,7	913,4

ANEXO C

QUADRO 1 - Dados experimentais das deformações no ponto 1 do painel 2

PRESSÃO NORMAL (kg _f /m ²)	DEFORMAÇÕES (μ strain)				TENSÕES (kg _f /cm ²)	
	PONTO 1				PONTO 1	
	ESQUERDO		DIREITO		ESQUERDO	DIREITO
	ε _x	ε _y	ε _x	ε _y	σ _x	σ _x
0	96	-18	93	-35	209	190
139	234	-531	221	-532	172	141
278	376	-829	379	-856	293	282
416	562	-1076	560	-1106	550	526
556	732	1436	735	-1510	695	650

QUADRO 2 - Tensões determinadas pelos métodos teóricos para os pontos próximo dos pontos 1, 3 e 5 do painel 2

pressão (kg _f /m ²)	Tensão (kg _f /cm ²)			
	T. de viga bi- engastada	Troitsky	T. de viga bi- articulada	LUSAS (articulada)
0	106,6	106,7	106,7	106
139	238,7	493,8	502,7	574
278	370,7	870,7	898,7	1147
416	502,7	1240,3	1294,7	1720
556	634,7	1603,6	1690,7	3384

QUADRO 3 - Dados experimentais das deformações no ponto 3 do painel 2

PRESSÃO NORMAL (kgf/m ²)	DEFORMAÇÕES (μ strain)				TENSÕES (kgf/cm ²)	
	PONTO 3				PONTO 3	
	ESQUERDO		DIREITO		ESQUERDO	DIREITO
	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_x	ϵ_y	σ_x	σ_x
0	101	-24	70	-40	290,0	199,1
139	238	-303	221	-520	182,0	150,1
278	378	-820	384	-851	304,5	297,2
416	561	-1158	558	-1101	549,9	530,4
556	733	-1430	731	-1500	702,1	668,9

QUADRO 4 - Dados experimentais das deformações no ponto 5 do painel 2

PRESSÃO NORMAL (kgf/m ²)	DEFORMAÇÕES (μ strain)				TENSÕES (kgf/cm ²)	
	PONTO 5				PONTO 5	
	ESQUERDO		DIREITO		ESQUERDO	DIREITO
	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_x	ϵ_y	σ_x	σ_x
0	71	-85	107	-58	105	206
117	202	-303	243	-291	256	359
225	356	-545	433	-570	444	1011
345	593	-1158	672	-1201	567	2261
460	800	-1383	885	-1418	888	2637

GLOSSÁRIO

- ângulo de atrito com a parede: tangente do coeficiente de atrito com a parede.
- ângulo de atrito interno com o tempo (ϕ_t): inclinação do TYL do ponto tangente com o círculo de Mohr de tensões passando através da origem.
- ângulo do efetivo lugar geométrico de deslizamento (δ): inclinação do efetivo lugar geométrico de deslizamento (EYL) como especificado por Jenike.
- ângulo de repouso: o máximo ângulo do talude do produto medido com a horizontal.
- canal de fluxo: canal é aquela parte da massa do produto que ocorre o fluxo quando a boca de descarga é aberta ou acionado o alimentador.
- círculo de Mohr de tensões: representação gráfica do estado de tensões nos eixos de tensão normal e cisalhamento, isto é, plano $\sigma \times \tau$
- coeficiente de atrito com a parede: a relação entre a tensão de cisalhamento na parede com a tensão normal na parede obtidos no lugar geométrico de deslizamento com a parede (WYL).
- compactação: o processo de redução do volume por aplicação de tensões.
- consolidação crítica: um produto está consolidado criticamente em relação à tensão normal aplicada, quando ele desliza sem mudanças na densidade e em estado de tensão constante.
- consolidação: o processo de aumentar a resistência de um produto.
- deslizamento (Y): deformação plástica do produto
- deformação plástica (ou fluxo): deformação irreversível quando se retira a tensão.
- eixo simétrico: o termo eixo simétrico é comumente usado para descrever a geometria do silo ou tremonha. Silos e tremonhas de eixo simétrico tem seção transversal circular ou poligonal equilátero com relação ao eixo vertical.
- fator fluxo (ff): relação entre a tensão máxima de consolidação σ_m em um produto fluindo em um canal e a tensão máxima principal σ_1 que pode causar parada no fluxo.

- valor do fator fluxo depende da geometria da tremonha, especialmente da inclinação das paredes do canal, do ângulo de atrito com a parede e o ângulo de atrito interno como descrito pelo ângulo do efetivo lugar geométrico de deslizamento.
- fluxo de massa: tipo de fluxo na tremonha ou no silo caracterizado pela ausência de zonas de produtos estacionários, isto é, todo o produto incluindo aquele adjacente à parede, está em movimento quando o silo é descarregado.
- fluxo de funil: tipo de fluxo na tremonha ou no silo caracterizado pela ocorrência de fluxo confinado a uma região central acima de boca de descarga enquanto que o produto adjacente às paredes permanece estacionário. Esta zona central tem a forma de um funil e se estende até o topo ou intercepta a parede do silo em algum ponto acima da tremonha.
- função fluxo (FF): gráfico da resistência ao deslizamento inconfinado versus tensão máxima de consolidação para um produto específico.
- lugar geométrico de deslizamento do produto (YL): curva da tensão de cisalhamento versus tensão normal. Esta curva é quase sempre uma linha reta, resultando em um ângulo constante de atrito interno.
- lugar geométrico de deslizamento com o tempo (TYL): o lugar geométrico de um produto que permaneceu em repouso durante um certo tempo sob tensão normal.
- resistência ao deslizamento inconfinado (σ_c): tensão máxima principal do círculo de Mohr de tensões sendo tangente ao lugar geométrico de deslizamento com a mínima tensão principal igual a zero. Um sinônimo para resistência à compressão.
- super consolidação: um produto está super consolidado em relação à tensão normal aplicada, quando o deslizamento é acompanhado por um aumento da densidade e da tensão cisalhante.
- sub consolidação: um produto está sub consolidado em relação à tensão normal aplicada, quando o deslizamento é acompanhado por um aumento da densidade e da tensão cisalhante.

- tensão máxima de consolidação (σ_m): tensão máxima principal dada pelo círculo de Mohr de tensões do estado estável de fluxo. Este círculo é tangente ao efetivo lugar geométrico de deslizamento.
- tensão máxima principal (σ_1): tensão normal máxima principal representada pelo círculo de Mohr de tensões. É o valor máximo do ponto de intersecção do círculo de Mohr com o eixo normal de tensões.
- tensão principal: tensão normal atuando no plano onde não existe tensão de cisalhamento.