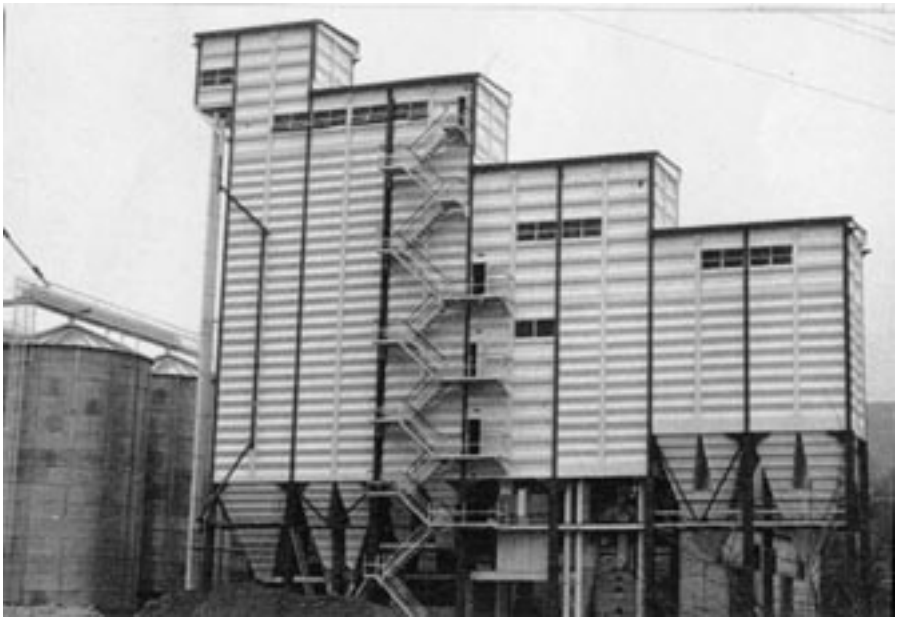
SILOS METÁLICOS MULTICELULARES



Prof. Tit. CARLITO CALIL JUNIOR
Prof. Dr. ERNANI CARLOS DE ARAÚJO
Prof. Dr. JOSÉ WALLACE DO NASCIMENTO

SILOS METÁLICOS MULTICELULARES

Prof. Tit. CARLITO CALIL JUNIOR
Engenheiro Civil EEP/FMEP - 1975
Mestre em Engenharia de Estruturas EESC/USP - 1978
Doutor em Engenharia Industrial ETSEIB/UPC - 1982
Professor Livre-docente EESC/USP - 1989
Professor Titular EESC/USP- 1992

Prof. Dr. ERNANI CARLOS DE ARAÚJO
Engenheiro Civil EM/UFOP - 1980
Mestre em Engenharia de Estruturas EESC/USP - 1992
Doutor em Engenharia de Estruturas EESC/USP - 1997
Professor Adjunto da Escola de Minas - UFOP

Prof. Dr. JOSÉ WALLACE DO NASCIMENTO
Engenheiro Agrícola DEAG/UFPB - 1985
Mestre em Engenharia Agrícola DEAG/UFPB - 1990
Doutor em Engenharia de Estruturas EESC/USP - 1996
Professor Adjunto da Escola de Eng. Agrícola - UFPB

São Carlos
1997

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

Calil Júnior, Carlito
C153s Silos metálicos multicelulares / Carlito Calil Júnior, Ernani Carlos de Araújo, José Wallace do Nascimento. –- São Carlos, 1997.

ISBN 85-85205-09-1

1. Silos metálicos. I. Araújo, Ernani Carlos de. II. Nascimento, José Wallace do. III. Título.

633.20868 - dc20

Impressão e acabamento
Serviço Gráfico - EESC/USP
São Carlos - SP

Dedicamos este livro *in memoriam* do nosso mestre
Prof. Dr. Juan Ravenet,
precursor do atual grupo de pesquisa em silos existente no Brasil

Os autores deste livro agradecem ao Prof. João Bento de Hanai pelas importantes sugestões referidas a este trabalho, ao estudante José Fabrício Ferreira (diagramação), ao Sr. Antônio Carlos R. Adão, pelas orientações na etapa de impressão; e ao Prof. Jurandir Povinelli, cuja autorização permitiu que este livro fosse impresso na gráfica da Escola de Engenharia de São Carlos.

PREFÁCIO

O estudo dos silos metálicos multicelulares no Brasil, iniciou-se com o trabalho "Sobrepresiones en las Paredes de los Silos para Almacenamiento de Productos Pulverulentos Cohesivos", *(Calil, 1982)*, tese de Doutorado apresentada na Universidade Politécnica de Catalunya, em 1982, sob a orientação do Prof. Dr. Juan Ravenet. Os estudos subseqüentes conduziram a apresentação da tese de Livre-Docência "Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais" *(Calil, 1989)*, apresentada na Universidade de São Paulo, em 1989.

As teses de Doutorado "Estudo de Silos Metálicos Prismáticos para Fábricas de Ração" *(Nascimento, 1996)* e "Estudo Teórico e Experimental de Tremonhas Piramidais para Silos Metálicos Elevados" *(Araújo 1997)*, desenvolvidas sob a orientação do Prof. Dr. Carlito Calil Junior, na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, complementaram as pesquisas teóricas e experimentais, necessárias à realização deste trabalho.

Esta nova concepção de silos metálicos multicelulares tem sido largamente utilizada nos mais diversos campos da indústria, durante as últimas décadas na Europa.

As múltiplas aplicações desta instalação aos mais variados processos industriais de armazenamento, mistura, elaboração, ensacamento e expedição a granel, os tornaram imprescindíveis. Estas unidades são construídas em indústrias de estruturas metálicas com elementos pré-fabricados, que são transportados até o local da instalação.

Neste livro são apresentadas as idéias básicas do sistema multicelular, com ênfase na aplicação em fábricas de rações. Para esta finalidade, avaliou-se a importância e definiu-se a metodologia para a determinação das propriedades físicas e de fluxo dos
produtos a armazenar; as recomendações para o projeto estrutural, com a determinação das ações e dos esforços para o dimensionamento dos elementos estruturais do silo e, finalmente, são apresentadas orientações para os projetistas e usuários com a finalidade de manter a integridade da estrutura.

OS AUTORES

INDICE

1 - INTRODUÇÃO p.01

2 - EVOLUÇÃO TÉCNICA DAS FÁBRICAS DE RAÇÃO p.05
2.1 Contextualização
2.2 Descrição dos Elementos Constituintes de uma Fábrica de Ração
2.3 Antigas Fábricas de Ração.
2.4 Moderna Fábrica de Rações.
2.4.1 Inglaterra
2.4.1.1 Tipos de Fábricas
2.4.1.2 Fábrica de Ração mais Econômica.
2.4.2 Espanha
2.4.3 Estados Unidos
2.4.4 Israel
2.5 Conclusão

3 - DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE PRODUTOS ARMAZENADOS p.27
3.1 Metodologia Utilizada
3.2 Determinação da Densidade em Função da Consolidação
3.3 Granulometria
3.4 Determinação do Lugar Geométrico Instantâneo de Deslizamento (IYL)
3.4.1 Amostras para a Determinação do IYL
3.4.2 Determinação Simplificada do IYL
3.5 Ensaios Realizados
3.5.1 Ângulo de Atrito Interno(ϕ_i)
3.5.2 Efetivo Ângulo de Atrito Interno(ϕ)
3.5.3 Tensão Máxima de Consolidação (σ_m)
3.5.4 Resistência ao Deslizamento (σ_c)
3.6 Determinação do Lugar Geométrico Instantâneo de Deslizamento com a Parede (IWYL)
3.7 Ensaios Realizados
3.8 Função Fluxo (FF)
3.9 Fator Fluxo (ff)
3.10 Resultados e Discussões
3.10.1 Granulometria
3.10.2 Propriedades Físicas da Ração e Alguns de Seus Ingredientes
3.11 Conclusão

4. DETERMINAÇÃO DO FLUXO EM SILOS p.39
4.1 - Ângulos de inclinação das tremonhas para fluxos de massa ou de funil
a) Ângulos de inclinação das tremonhas para fluxo de massa
b) Ângulos de inclinação das tremonhas para fluxos de funil
4.2 Dimensões da boca de descarga para tremonhas em fluxos de massa ou de funil
a) Dimensão da boca de descarga para tremonhas em fluxo de massa
b) Dimensão da boca de descarga para tremonhas em fluxo de funil

5 - AÇÕES EM SILOS VERTICAIS E SUAS COMBINAÇÕES .. . p.49
5.1 Ações Permanentes
5.2 Ações Variáveis

5.3 Ações Excepcionais
5.4 Determinação das Ações Variáveis Normais Devido ao Produto Armazenado
5.4.1 Densidade do Produto Armazenado
5.4.2 Ângulo de Atrito com a Parede
5.4.3 Efetivo Ângulo de Atrito Interno
5.4.4 Consistências das Propriedades Físicas dos Produtos
5.4.5 Pressões nas Paredes dos Silos
5.4.6 Ações em Contenções Laterais
5.4.7 Cargas nos Elementos Estruturais Internos nos Silos
5.4.8 Pressão ou Sucção Interna de Gás
5.4.9 Ação do Vento
5.5 Determinações das Ações Variáveis Especiais
5.5.1 Diferencial de Temperatura
5.5.2 Ações Devidas à Expansão do Produto Armazenado
5.6 Determinação das Ações Excepcionais
5.6.1 Ações de Impacto de Veículo
5.6.2 Pressão causada pela explosão interna
5.7 Combinações das Ações
5.8 Coeficientes de Ponderação das Ações
5.9 Conclusões

6 - PRESSÕES EM SILOS VERTICAIS p.59
6.1 Campo de Aplicação
6.2 O Valor de K (relação entre as pressões horizontais e verticais)
6.3 Pressões nas paredes
6.3.1 Pressões de Carregamento
6.3.2 Pressões de Descarregamento Central
6.3.3 Pressões Não Uniformes
6.3.4 Pressões Adicionais em Silos com Fluxo de Massa
6.3.5 Pressões de Descarga Excêntrica
6.4 Pressões Sobre Fundo Plano ($\alpha < 20°$)
6.5 Pressão Normal às Paredes da Tremonha ($\alpha \geq 20°$)
6.5.1 Pressão Normal Devido ao Produto Dentro da Tremonha
6.5.2 Pressão do Produto Sobre a Tremonha

7 - ANÁLISE ESTRUTURAL DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS QUE COMPÕEM OS SILOS VERTICAIS p.67
7.1 - ANÁLISE ESTRUTURAL DAS PAREDES DO CORPO DO SILO p.67
7.1.1 Dimensionamento das Paredes conformadas horizontalmente
7.1.2 Espessuras de Chapas nas Paredes de Ondas Trapezoidais
7.1.2.1 Flexão Geral nas Paredes
7.1.2.2 Flexão oblíqua nas paredes
7.1.2.3 Flexão local
7.1.3 Espessuras de Chapas nas Paredes de Ondas Ziguezague
7.1.3.1 Flexão Geral Sobre as Paredes
7.1.3.2 Flexão Oblíqua na Parede com Onda Ziguezague
7.1.3.3 Flexão Local
7.1.4 Esforços nas Paredes de Silos Prismáticos
7.1.4.1 Determinação dos Esforços de Trações nas Paredes Verticais
7.1.4.2 Determinação dos Momentos Fletores nas Paredes dos Silos
7.1.4.2.1 Momento nos Cantos
7.1.4.2.2 Momento Fletor no Meio do Vão

7.1.5 Determinação dos Esforços nas Paredes do Silo Segundo TROISTKY
7.1.5.1 Teoria de Pequenos Deslocamentos
7.1.5.2 Teoria de Grandes Deslocamentos
7.1.6. Determinação dos Momentos Fletores nas Paredes dos Silos Calculados pelo Método dos Deslocamentos Segundo GRAY (1973)
7.1.6.1 Células Quadradas Isoladas
7.1.6.2 Células Retangulares Isoladas
7.1.6.3 Células Múltiplas
7.1.6.4 Caso Geral Para Três Células
7.2. ANÁLISE ESTRUTURAL DOS ELEMENTOS DA TREMONHA . p.90
7.2.1 Forças de tração horizontais
7.2.2 Forças de tração meridionais
7.2.3 Análise das placas pela Teoria dos Pequenos Deslocamentos (TPD)
7.2.3.1 Generalidades
7.2.3.2 Placas Retangulares com relação $\lambda>3$
7.2.3.3 Placas Retangulares com relação $\lambda<3$
7.2.4 Análise das Placas pela Teoria dos Grandes Deslocamentos (TGD)
7.2.4.1 Generalidades
7.2.4.2 Placas Retangulares pela TGD e com relação $\lambda < 3$
7.2.4.3 Placas Retangulares pela TGD e com relação $\lambda > 3$
7.2.5 Conversões de Placas Triangulares e Trapezoidais em Painéis Retangulares
7.2.6 Enrijecedores
7.2.6.1 Generalidades
7.2.6.2 Largura efetiva
7.2.6.3 Esforços, Deslocamentos e Verificações
7.2.7 Soldas
7.3 ANÁLISE ESTRUTURAL DAS COLUNAS DE SILOS ELEVADOS. p.125
7.3.1 Ações atuantes nas colunas.
7.3.2 Esforços nas Colunas do corpo do silo.
7.3.2.1 Colunas de Canto (C_1)
7.3.2.2 Coluna de Borda (C_2)
7.3.3.3 Coluna Central (C_3)
7.3.3 Forças Axiais nas Colunas sob Cargas Verticais
7.3.4 Momento Fletor nas Colunas sob Ação do Vento
7.3.4.1 Coluna de Sustentação com Apoio Articulado
7.3.4.2 Colunas de Sustentação Engastadas
7.3.5 Aplicação do Método simplificado Para Cálculo de Colunas de Sustentação de Silos Prismáticos (GRAY,1973)
7.3.5.1 Uma Linha de Colunas
7.3.5.2 Duas Linhas de Colunas
7.3.5.3 O Pórtico Com Três ou Mais Linhas de Colunas

8. PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ESTRUTURAIS UTILI-ZADOS NA CONSTRUÇÃO DE SILOS METÁLICOS p.139
8.1 Propriedades dos aços
8.2 Aços para Silos
8.3 Parafusos Estruturais
8.3.1 Parafusos comuns
8.3.2 Parafusos de alta resistência
8.3.3 Nomenclatura internacional
8.4. Soldas

9. RECOMENDAÇÕES FINAIS PARA O PROJETO DE SILOS METÁLICOS VERTICAIS p.157
9.1 Propriedades dos Produtos Armazenados
9.2 Tipos de Fluxo
9.3 Orientação no Projeto Estrutural de Silos Metálicos
9.4 Informações a Serem Fornecidas ao Projetista e ao Usuário
9.4.1 Objetivos e Requisitos
9.4.2 Informações a Serem Fornecidas pelo Usuário
9.4.2.1 Materiais a Serem Manipulados
9.4.2.2 Responsabilidade do Projetista
9.4.3 Informações a Serem Fornecidas pelo Projetista
9.4.3.1 Manual de Projeto e Operação
9.4.3.2 Projeto para a Integridade do Fluxo
9.4.3.3 Projeto para a Integridade da Estrutura
9.4.3.4 Acesso, Inspeção, Limpeza e Manutenção
9.4.3.4.1 Acesso
9.4.3.4.2 Inspeção
9.4.3.4.3 Limpeza
9.4.3.4.4 Manutenção
9.4.3.4.5 Segurança

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS p.167

GLOSSÁRIO p.177

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; e portanto é muito importante o 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 a 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 trabalho 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 cinqüenta 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, apresenta-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 bastantes 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 oferecem 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 edifícios 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, chegou-se 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 mesma forma, também mais homogênea possível. Essa mistura constitui a ração balanceada. A partir desse momento existem no mercado duas tendências:

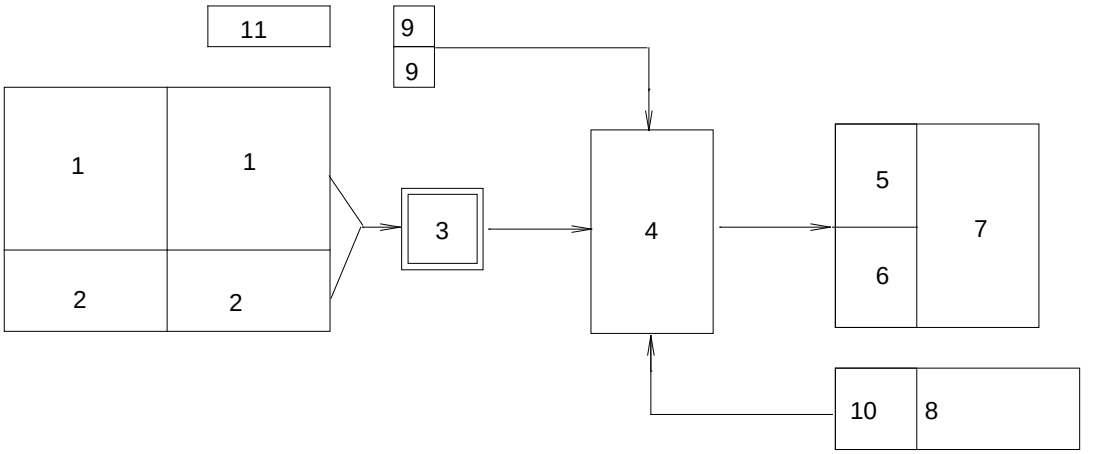
- Expedição (mediante sacos, ou a granel) de uma mistura mais ou menos homogênea de produtos de granulometria variável com os possíveis problemas de separação e seleção por parte dos animais.

- A ração balanceada sofre grande transformação ao ser prensada e convertida em pequenos cubos, 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, se produzem altas temperaturas, seja no processo de prensagem, seja 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, a qual, 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

Esquematicamente uma fábrica moderna de ração consta das seguintes partes mostradas na figura 01.



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, umidade etc. Essa seleção redunda 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 girassol) 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 armazenamento 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 alimen-tar os moinhos de martelos, onde se trituravam a mistura, como é mostrado na figura 02.

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.

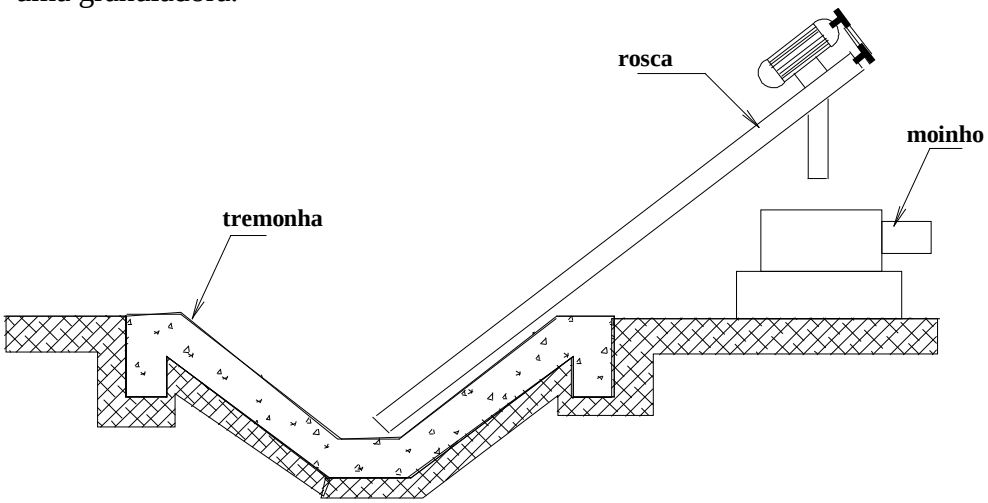


FIGURA 02 - Esquema do sistema de recepção das antigas fábricas de ração.

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.

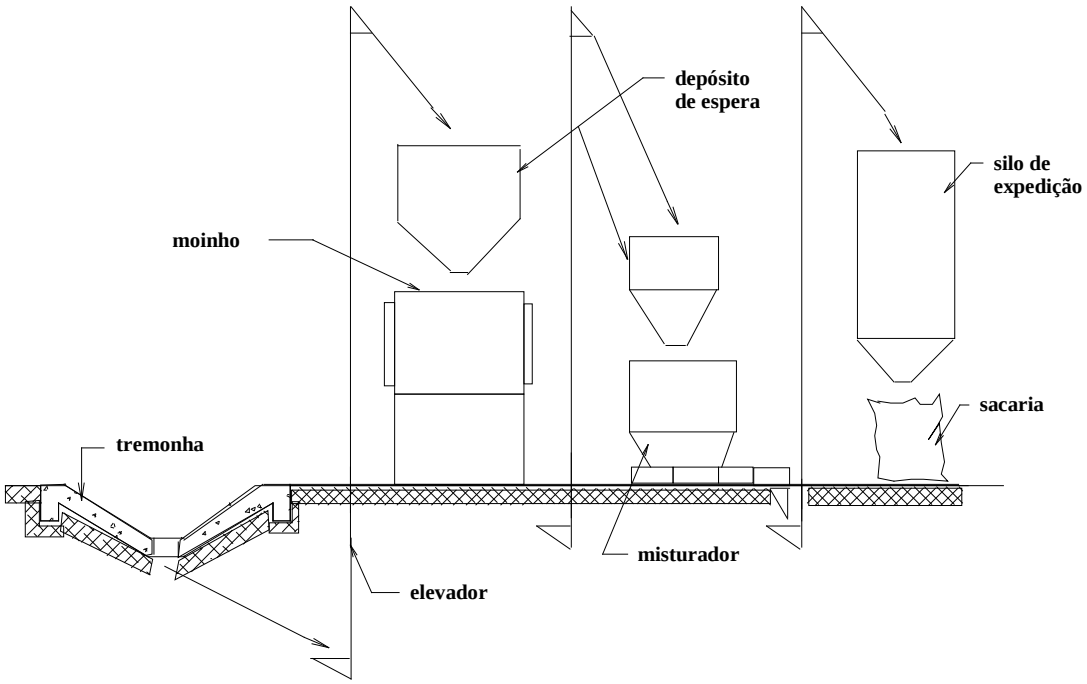


FIGURA 03 - Diagrama de uma antiga fábrica de ração

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, surgiriam 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.

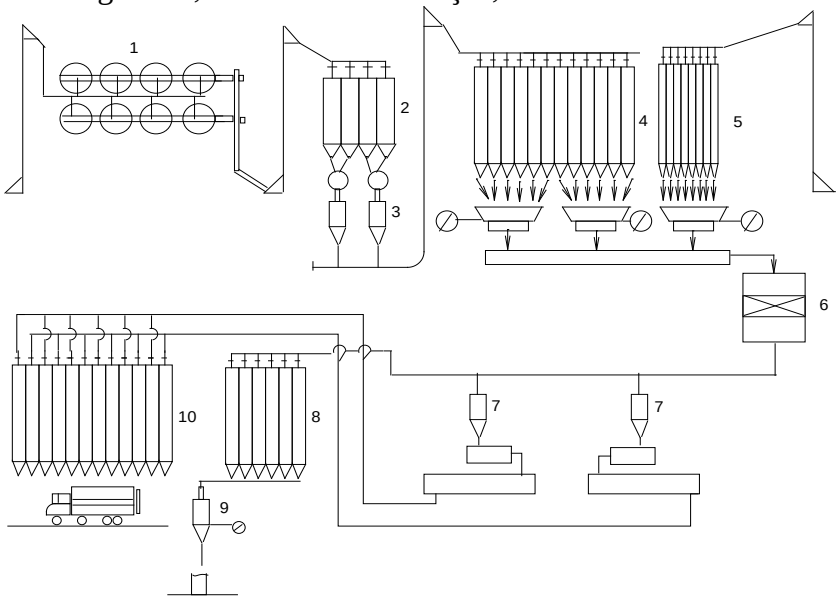
Nesse momento é quando surge o dilema de continuar adicionando elementos ao sistema existente, ou pensar seriamente em nova concepção de fábrica.

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 das 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.

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 moinhos	14.000	1,33
moinhos	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

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

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 maquinaria 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:

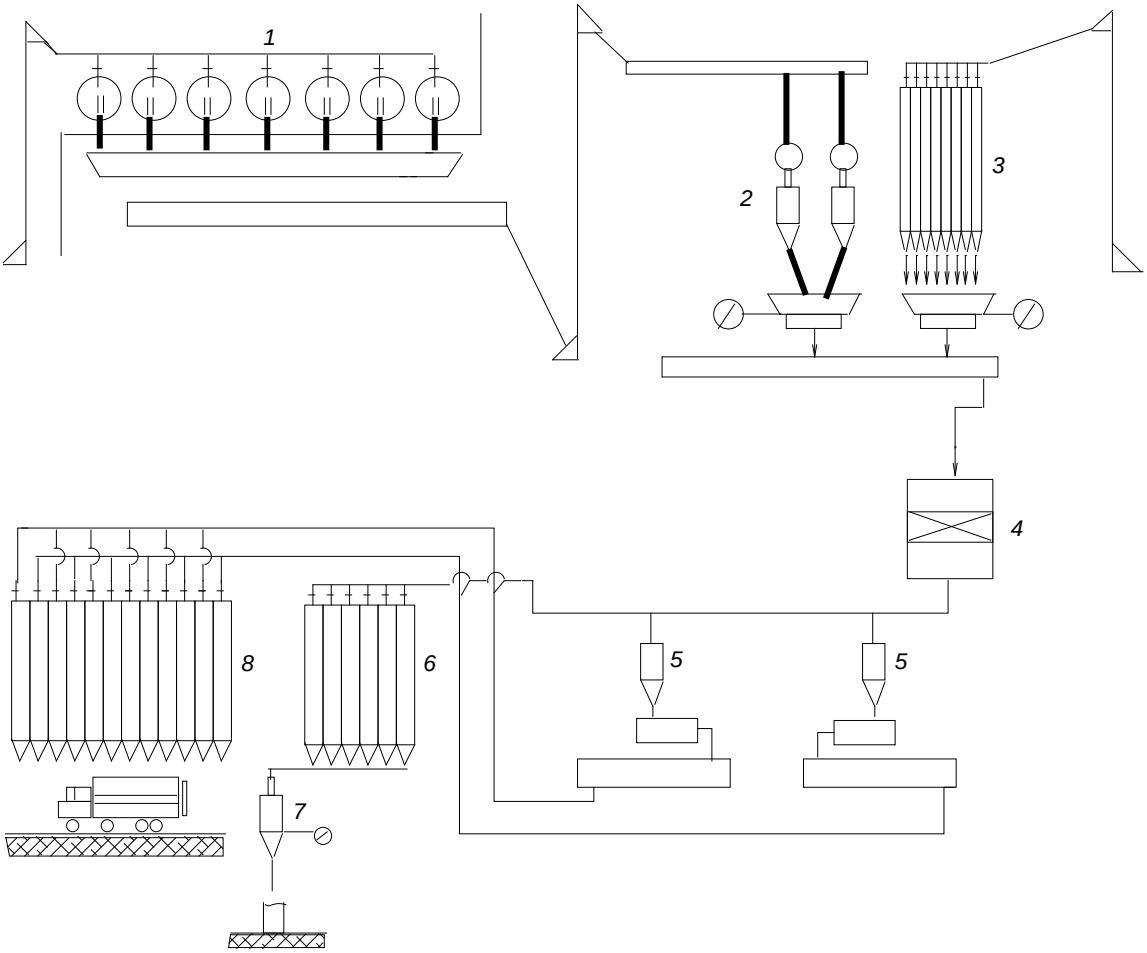
- silos cilíndricos para armazenamento de grãos;
- edifício da fábrica;
- silos quadrados metálicos para armazenamento de farinhas e ração.

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/m^3.

Eliminando-se as células intermediárias, puderam ser construídos 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 moinhos	28.000	3,51
moinhos	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.

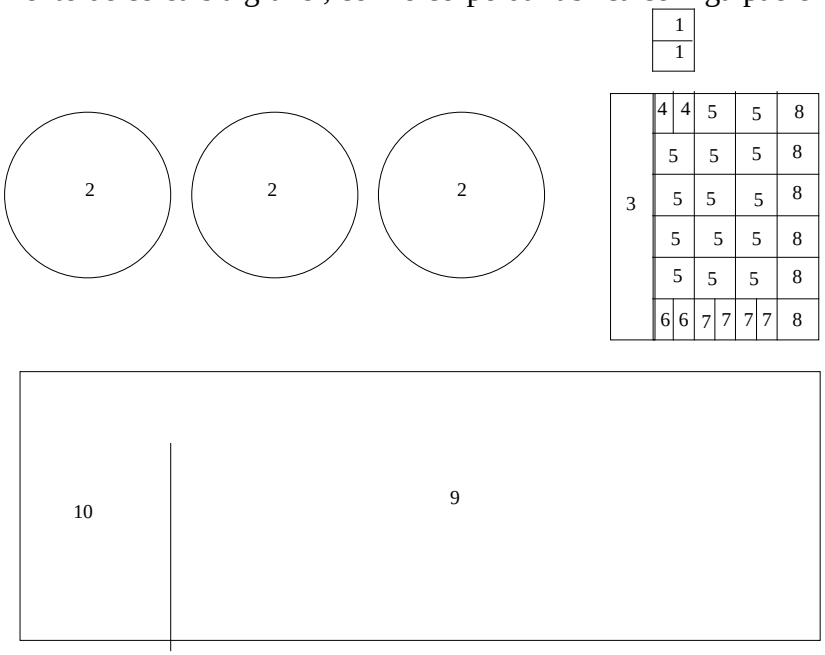
2.4.2 Espanha

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 edifício 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 armazém 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 denominado 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 Conclusões

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 FÍSICAS DE PRODUTOS ARMAZENADOS

A determinação das propriedades físicas de produtos armazenados é o primeiro passo para o projeto de fluxo e estrutural de silos verticais e deve ser realizada nas condições mais severas daquelas esperadas ocorrer no silo. Envolve a determinação dos seguintes parâmetros:

- 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 estas determinações é o aparelho de cisalhamento de translação conhecido em nível internacional por "Jenike Shear Cell".

Como exemplo de determinação destas propriedades 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 ração 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 predefinida 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 predizer 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 EUROPÉIA 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 umidade 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 significante 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_i)

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 interseção 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 interseção desse semicírculo 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 interseção determinado com o círculo de Mohr de maior consolidação. O ponto mais alto da interseção 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 ($\sigma_{w\,u}$) 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 ($\sigma_{w\,l}$), 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 $\phi > \delta - 3°$, 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 Ensaios 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, versos resistência inconfinada 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):

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

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

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

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

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

$$2\beta = \phi i_{\cup} + \operatorname{sen}^{-1}\left(\frac{\operatorname{sen}\phi i_{\cup}}{\operatorname{sen}\delta i_{\cup}}\right)$$

onde:

m = 0 para silo retangular com L ≥ 3d

m = 1 para silo eixo simétrico

Para silo retangular com L ≤ 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 ≤ 0,42mm - granular

0,42 ≤ D ≤ 0,149 - pulverulento coesivo ou não

0,149 ≤ D ≤ 0,079 - pulverulento coesivo fino

D ≤ 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 cereais 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/m3	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-víceras	6,5	50/51	45/47	11	17/19	09

3.11 Conclusões

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

Européia 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. DETERMINAÇÃO DO FLUXO EM SILOS.

O tipo de fluxo determina as características de descarga do material, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de material sem movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente. Também determina a distribuição de pressões nas paredes do silo e fundação, e a integridade e custo da construção. A determinação do tipo de fluxo deve ser feita enquanto o silo está sendo projetado ou selecionado, ou quando são previstas mudanças em sua estrutura ou na manipulação dos materiais a serem armazenados.

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

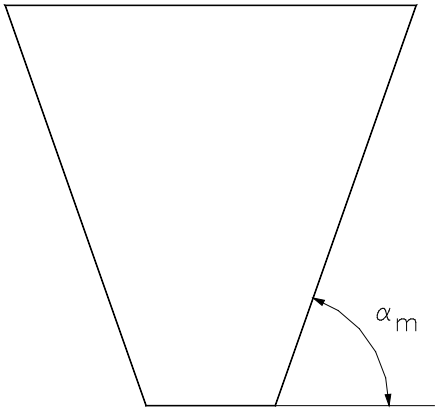


FIGURA 2.5 - Ângulo de inclinação da parede da tremonha

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

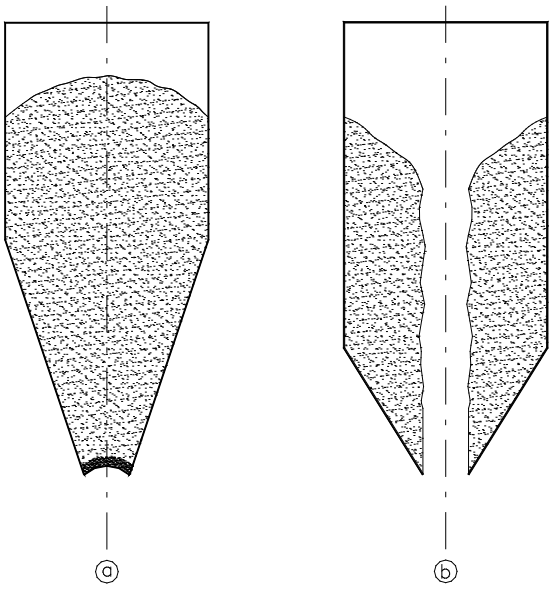


FIGURA 2.6 - Tipos de obstruções de fluxo: a) Arco coesivo; b) Tubo

A escolha da geometria da tremonha depende do tipo de fluxo definido por critérios técnicos. Em geral, o fluxo de massa é usado para produtos que requerem controles de vazão, segregação de partículas e pouco tempo de armazenamento. Enquanto que para o fluxo de funil os produtos não exigem aqueles controles e podem ter um fluxo livre menor (ROBERTS, 1987), (GAYLORD, 1984).

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

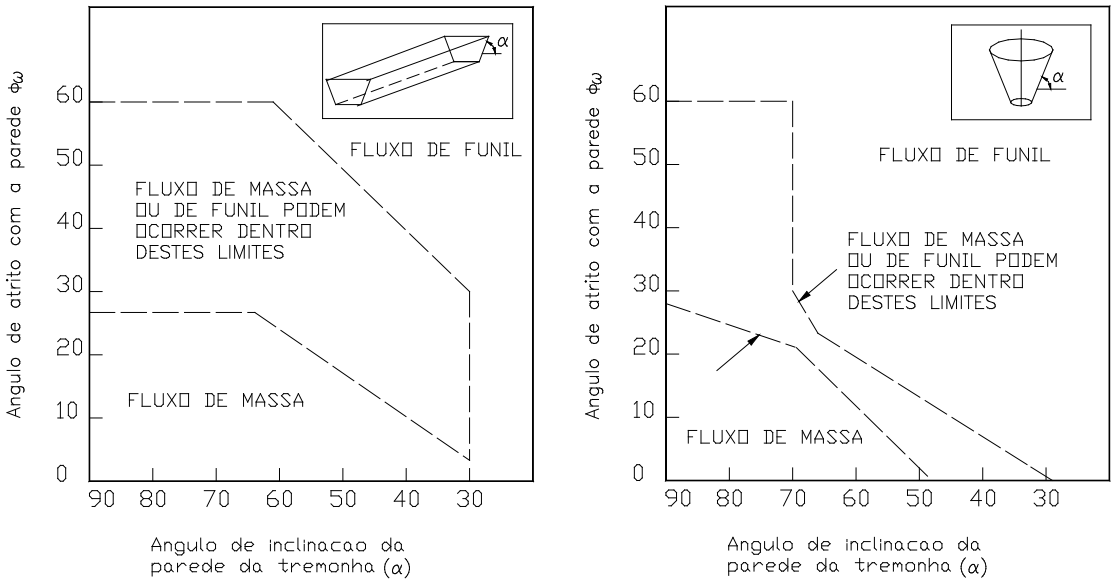


FIGURA 2.7 - Determinação do tipo de fluxo

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

4.2 - Ângulos das tremonhas em fluxos de massa ou de funil

a) Ângulos das tremonhas em fluxo de massa

Para tremonhas piramidais, o ângulo interno $\alpha_m = \alpha_v$ do trapézio diagonal da mesma, deve ser determinado como para tremonhas cônicas. Ou seja:

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

onde:

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

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

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

Se $\phi_{iu} < 25^0$, então considera-se $\phi_{iu} = 25^0$ na equação 02;

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

Os ângulos α_1 e α_2 são aqueles definidos pelas linhas de máximo declive das paredes com as horizontais que passam pelo centro de gravidade da maior seção transversal da tremonha. Para duas paredes adjacentes estes ângulos estão relacionados com α_v por:

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

O ângulo de inclinação α_m deve ser escolhido pelo menos 3^o maior do que o dado pela equação 01 para evitar instabilidades no fluxo. A margem de segurança deve ser aumentada para 5^o ou mais, para materiais com características variáveis (CALIL, 1990).

b) Ângulos das tremonhas em fluxos de funil

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

$$\alpha_m = 25^o + \phi_{wu} \qquad (04)$$

4.3 - Boca de descarga para tremonhas em fluxos de massa ou de funil

a) Boca de descarga para tremonhas em fluxo de massa

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

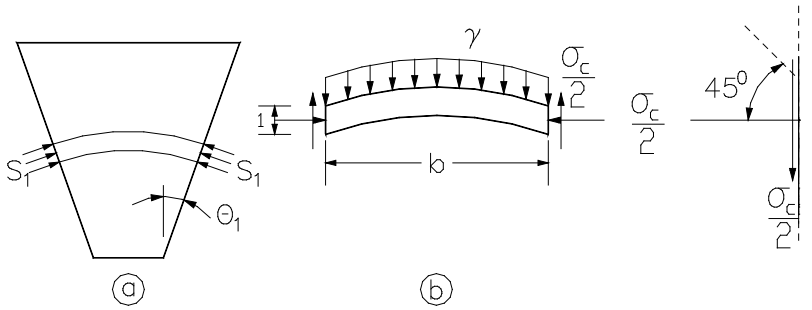


FIGURA 2.8 - Arco ou Cúpula transversalmente a uma tremonha

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

Se a obstrução provocada pelo produto consistir de um arco ou cúpula auto-sustentável, então nos limites superiores e inferiores das superfícies livres a menor tensão principal é zero em qualquer seção e a maior tensão principal é tangente ao arco. O cisalhamento máximo para este sistema de tensões estão sobre um plano a 45^o em

relação à direção principal e é igual à metade da maior tensão principal. O vão máximo do arco que pode ser auto-sustentável sob este sistema de tensões é atingido quando os cisalhamento nas seções verticais dos apoios atingem seus valores máximos. Esta condição ocorre quando a maior tensão principal nos apoios iguala à tensão de deslizamento inconfinada (resistência ao deslizamento) (σ_c) do produto armazenado e atua a 45^o em relação à horizontal (FIG.2.8-b). A tensão de cisalhamento correspondente na seção vertical é $\sigma_c/2$. O equilíbrio das forças verticais de um produto com peso específico "γ" formando um arco de espessura vertical unitária sobre uma abertura retangular de largura "b" e comprimento "l" fornece (GAYLORD & GAYLORD, 1984; TROITSKY, 1982):

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

portanto, tem-se

$$b = \frac{\sigma_c}{\gamma} \qquad (05)$$

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

$$1,0.2\pi.r.\frac{\sigma_c}{2} = \gamma.\frac{\pi d^2}{4}.1,0$$

o que fornece;

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

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

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

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

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

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

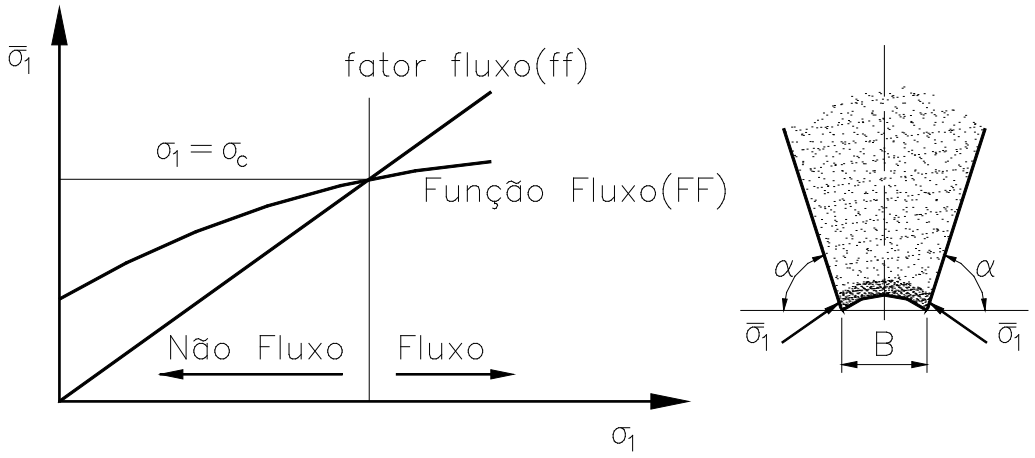


FIGURA 2.9 - Função Fluxo (FF) e fator fluxo (ff) da tremonha (Condição para fluxo de massa)

O "fator fluxo" é definido como sendo a relação entre a tensão de consolidação que pode ser desenvolvida em um arco (σ_1) e a tensão atuante nos apoios do arco ($\overline{\sigma}_1$) (FIG.2.9). Ou seja,

$$ff = \frac{\sigma_1}{\overline{\sigma}_1} \qquad (09)$$

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

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

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

onde,

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

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

sendo,

ϕ_e = efetivo ângulo de atrito interno
ϕ_w = ângulo de atrito do produto com a parede do silo

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

Quando a tensão adquirida em um arco estável "$\overline{\sigma_1}$" for igual à tensão ao deslizamento inconfinada "σ_c", tem-se a condição crítica para que ocorra o fluxo de um produto.

A "Função Fluxo" (FF) é uma curva (FIG.2.9) da tensão ao deslizamento inconfinada (σ_c) em função da maior tensão principal de consolidação (σ_1). A resistência e propriedades de fluxo de um produto são definidos por sua Função Fluxo, que normalmente é obtido através de ensaios usando equipamentos de cisalhamento diretos como o de Jenike ou o de Casagrande. A curva da Função Fluxo é determinada a partir do lugar geométrico de deslizamento (Yield Locus -YL).

Um elemento de produto armazenado em um silo está solicitado pela maior e menor tensão principal (FIG.2.10-a) e são indicadas pelo semicírculo de Mohr (FIG.2.10-b). Se o elemento para esta condição de consolidação é cisalhado sob várias cargas normais, então é obtido o lugar geométrico de deslizamento (FIG.2.10-b). O semicírculo de Mohr através da origem define a tensão de deslizamento inconfinada "σ_c", que representa a resistência do produto em uma superfície livre. Estendendo o lugar geométrico para interceptar o eixo "τ", é definida a coesão aparente C. O ângulo "ϕ_i" é o ângulo de atrito interno(FIG.2.10-b) (CALIL, 1990).

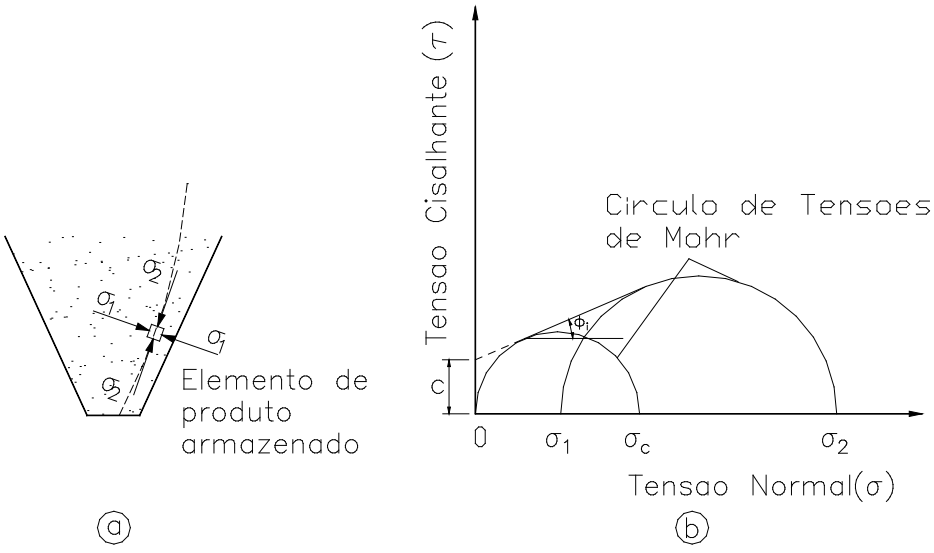


FIGURA 2.10 - Lugar geométrico de deslizamento do produto (Fonte: CALIL, 1990)

Conhecidas as curvas da função fluxo e do Fator Fluxo, o valor crítico de "σ_c", é determinado pela interseção das mesmas (FIG.2.9). Esta figura caracteriza também a situação de fluxo e não fluxo do produto armazenado. Onde a linha de ff varia abaixo da curva de FF, as tensões no arco são insuficientes para causar deslizamento e fluxo. Por

outro lado, onde a linha de ff varia acima da curva de FF, as tensões no arco excedem a resistência do material e o fluxo ocorrerá (CALIL, 1990)(GAYLORD, 1984)(ROBERTS, 1987) (MILANI, 1993).

b) Boca de descarga para tremonhas em fluxo de funil

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

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

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

portanto, tem-se:

$$\tau = \frac{\gamma.D}{4} \qquad (12)$$

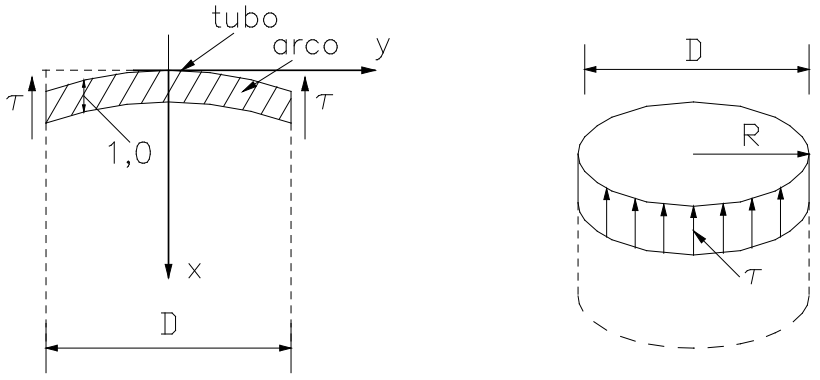


FIGURA 2.11 - Arco transversal a um tubo

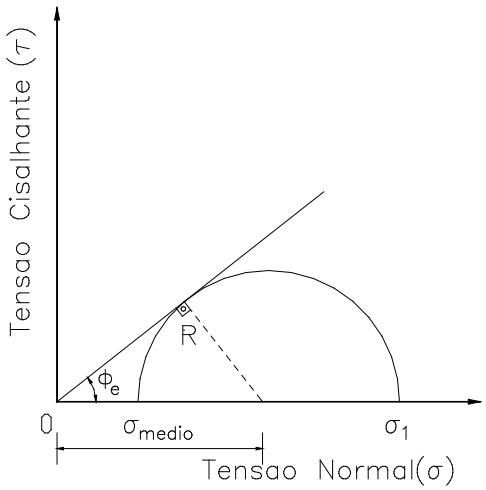


FIGURA 2.12 - Círculo de Mohr

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

$$\sigma_1 = \frac{\gamma . D}{4}\left(\frac{1+\operatorname{sen}\phi_e}{\operatorname{sen}\phi_e}\right) \qquad (13)$$

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

$$\overline{\sigma}_1 = \frac{\gamma . D}{G(\phi_i)} \qquad (14)$$

onde ϕ_i é ângulo de atrito interno do produto armazenado.

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

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

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

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

5 - AÇÕES EM SILOS VERTICAIS E SUAS COMBINAÇÕES

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 propriedade (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 máximo 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 Contenções 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:

$$\text{Nten} = \gamma \text{R}\left(\frac{\mu \text{K}}{\text{R}} Cs\, w - z \right)$$

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

$$\text{Pv} = \frac{\gamma\ \text{R}}{\mu\ \text{Ksw}} \text{Csw}$$

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, corbonáceos 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	B.1	ação gravitacional do produto armazenado	X	X	X	-
ações variáveis	B.2	ações iniciais nas paredes do silo	X	-	-	-
normais	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	C.1	ação do vento	-	-	(X)	(X)
ações variáveis	C.2	ação devido ao recalque diferencial da fundação	-	-	(X)	-
especiais	C.3	ação devido ao diferencial de temperatura	-	-	(X)	-
	C.4	ação sísmica	-	-	(X)	-
	C.5	expansão do produto na descarga	-	-	(X)	-
D	D.1	impacto de veículo	-	-	(X)	-
ações excepcionais	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 Coeficientes de Ponderação das Ações

Dois conjuntos de coeficientes de ponderação das ações 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.

Coeficientes de Ponderação das Ações			
grupo	tipo de ações	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 Conclusões

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 devem ser 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 - PRESSÕES EM SILOS VERTICAIS.

As ações em silos, devidas ao produto armazenado são variáveis no espaço e no tempo 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).

Ensaios 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 sobrepressões 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).

Para o cálculo das pressões em silos altos, recomendamos 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.

5.1 Campo de Aplicação

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

$$\frac{Pvc}{\gamma} \langle\ 25\ m$$

- 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.

5.2 O Valor de K (relação entre as pressões horizontais e verticais)

O valor de K é definido na norma alemã pela expressão: K = 1,2 (1 - sin ϕ_i); 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.

5.3. Pressões sobre as paredes

5.3.1 Pressões de Carregamento

- Pressão horizontal:

$$Phc = \frac{\gamma R}{\mu}\left(1 - e^{-\frac{\mu K}{R} z}\right)$$

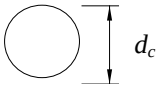
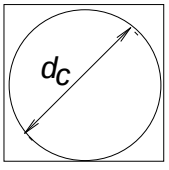
- Pressão vertical:

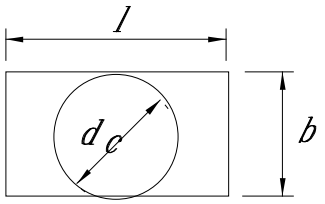
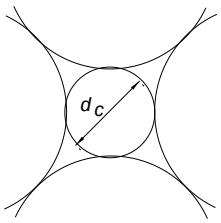
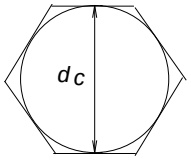
$$Pvc = \frac{\gamma R}{\mu K}\left(1 - e^{-\frac{\mu K}{R} z}\right)$$

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

$$Pwc = \gamma R\left(1 - e^{-\frac{\mu K}{R} z}\right)$$

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 para l/b = 1,5 para l/b = 2,0 para l/b = 4,0 para l/b = 5,0 - considerando o lado l para l/b = 1,5 para l/b = 2,0 para l/b = 4,0 para l/b = 5,0	 0,25 d_C 0,27 d_C 0,30 d_C 0,33 d_C 0,35 d_C 0,30 d_C 0,33 d_C 0,40 d_C 0,50 d_C	
Intercelular	0,30 d_C	
Poligonal	0,27 d_C	

5.3.2 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: $P_{vd} \langle P_{vc}$

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

5.3.3 Pressões Não Uniformes (DIN 1055, 1987)

Durante o descarregamento pode ocorrer pressões não uniformes, as quais seriam adicionadas às pressões horizontais de descarregamento, determinadas 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:

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

- para silos cilíndricos:

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

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

$70 < r/t < 100$ interpolação linear

- para silos poligonais e prismáticos:

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

5.3.4 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:

$$Ps = \gamma \times z$$

$$Ps = \gamma \times dc$$

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

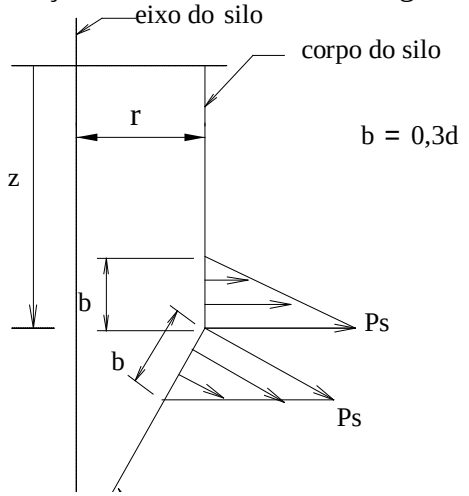


FIGURA 24 - Pressão adicional no fluxo de massa

5.3.5 Pressões de Descarga Excêntrica

Quando houver excentricidade na descarga, a norma DIN 1055 (1987) adota o coeficiente de excentricidade βa, 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 áreas 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.

5.4 Pressões Sobre Fundo Plano ($\alpha < 20°$)

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:

$$Pv\,d\,(z) = C\,b \times Pv\,c(z) \quad \leq \gamma \times H$$

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:

$$Pv\,d\,(z) = C\,b \times Pv\,c(z) \quad \leq \gamma \times z^*$$

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.

5.5 Pressão Normal às Paredes da Tremonha ($\alpha \geq 20°$)

5.5.1 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:

$$Pn = \frac{2{,}4\gamma \; RK\left(sen^2\alpha\right)}{\sqrt{\mu}}$$

$$Pw = \frac{Pn}{2}$$

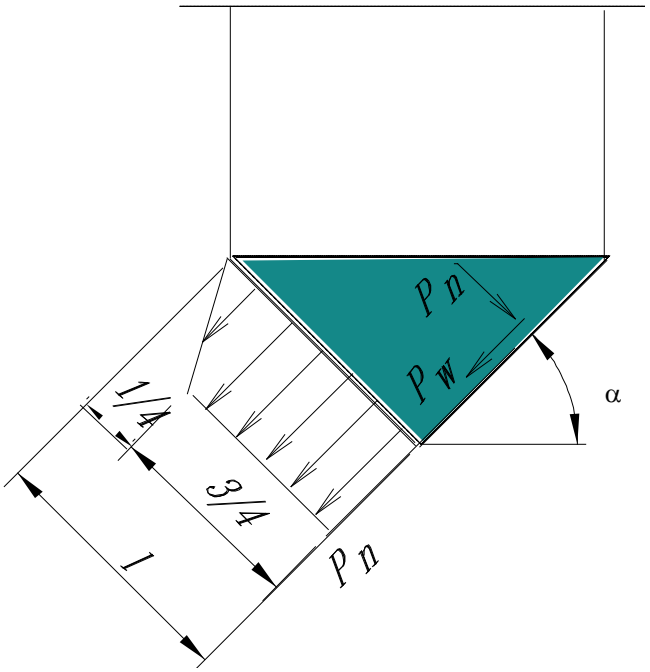


Figura 25 - Pressão normal às paredes da tremonha com produto dentro da tremonha

5.5.2 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:

$$Pno = \left(Pvc \;\; C\,b \;\; \cos^2\alpha + Phc \; sen^2\alpha\right)\left(1 + \frac{sen2\alpha}{4\mu}\right)$$

$$Pnu = Pvc \;\; C\,b \;\; \cos^2\alpha$$

$$Pw = \frac{Pn}{2}$$

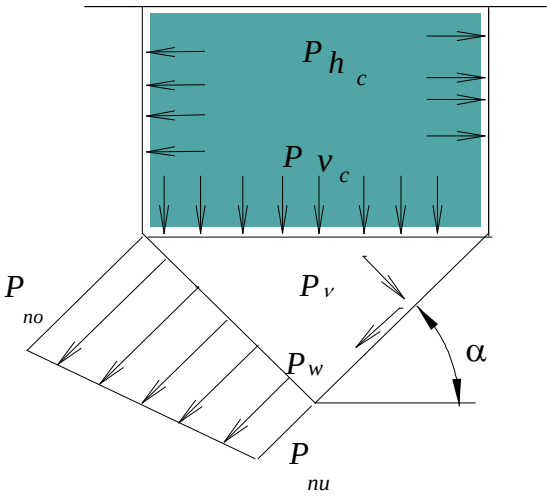


FIGURA 26 - Pressão normal à tremonha devido ao produto sobre a tremonha

7 - ANÁLISE ESTRUTURAL DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS QUE COMPÕEM OS SILOS VERTICAIS

7.1. - ANÁLISE ESTRUTURAL DAS PAREDES DO CORPO DO SILO.

O sistema construtivo, 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 ziguezague: 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 sito", parafusando-se, ou se soldando quatro platibandas, formando, dessa forma uma coluna da união de duas, três ou quatro paredes de silos prismáticos.

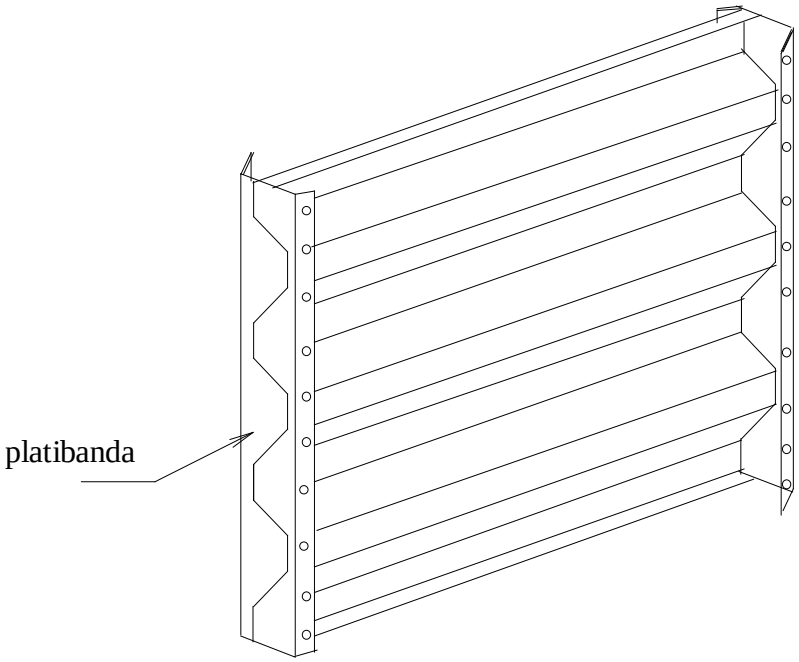


FIGURA 27 - Painel de conformação trapezoidal

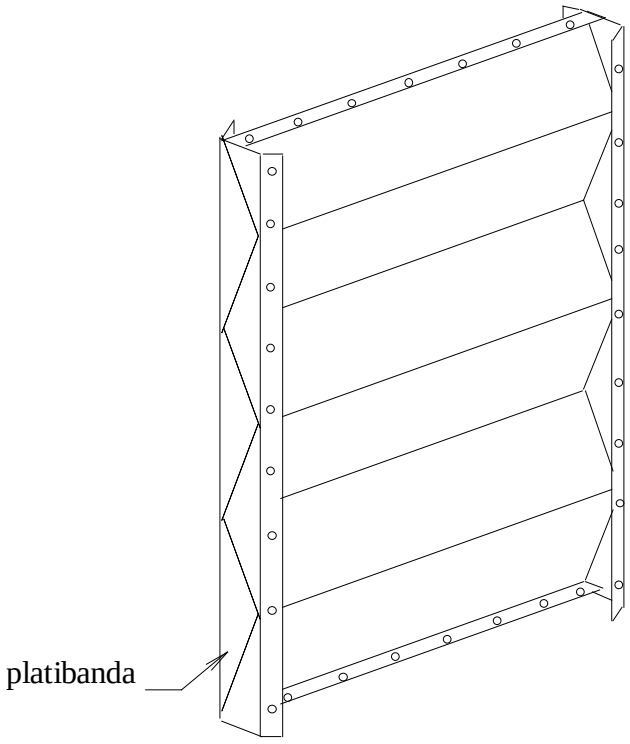


FIGURA 28 - Painel de conformação ziguezague

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 construtivas 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 instalação 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.

7.1.1. Dimensionamento das Paredes conformadas horizontalmente

7.1.2. Espessuras de Chapas nas Paredes de Ondas Trapezoidais

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.

7.1.2.1. Flexão Geral nas Paredes

Na Figura 29 é apresentado o perfil da onda trapezoidal.

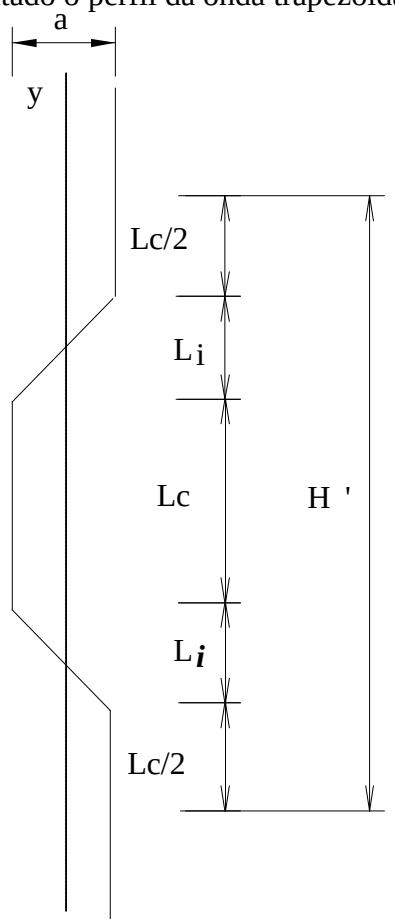


FIGURA 29 - Onda trapezoidal com eixo yy

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

$$I_{YY} = \frac{2}{12}\ t\ L^3_c \cos^2\alpha_1 + 2\left(\frac{1}{12}\ L_c\ t^3 + t\ L_c\ \frac{a^2}{4}\right)$$

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:

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

7.1.2.2. Flexão oblíqua nas paredes

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

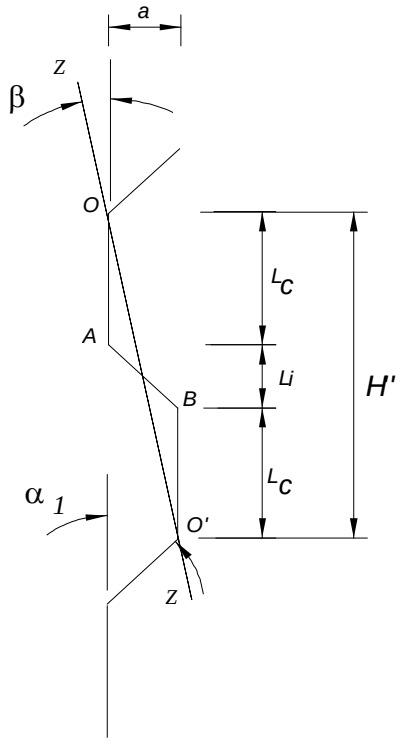


FIGURA 30 - Onda trapezoidal com eixo ZZ

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

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

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

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:

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

7.1.2.3. 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:

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

7.1.3. Espessuras de Chapas nas Paredes de Ondas Ziguezague

7.1.3.1. 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

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

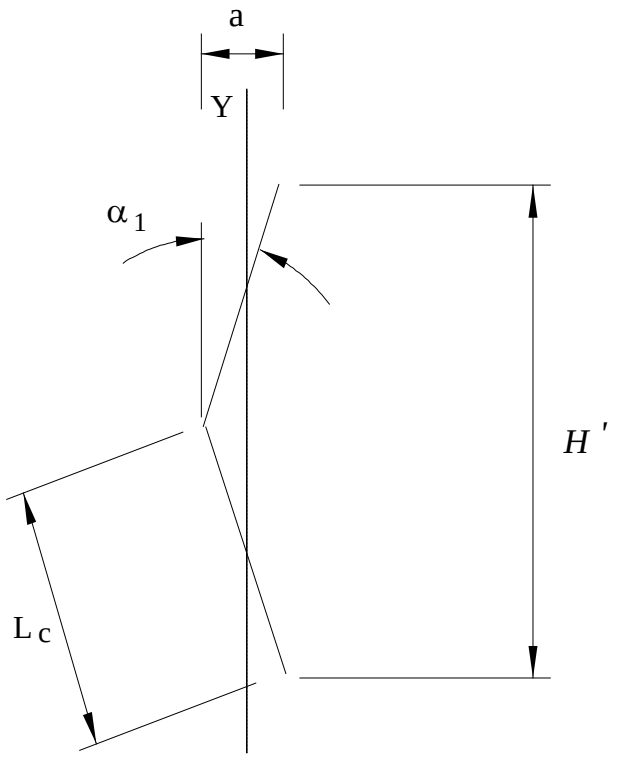


FIGURA 31 - Perfil com conformação ziguezague com eixo YY

7.1.3.2. Flexão Oblíqua na Parede com Onda Ziguezague

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

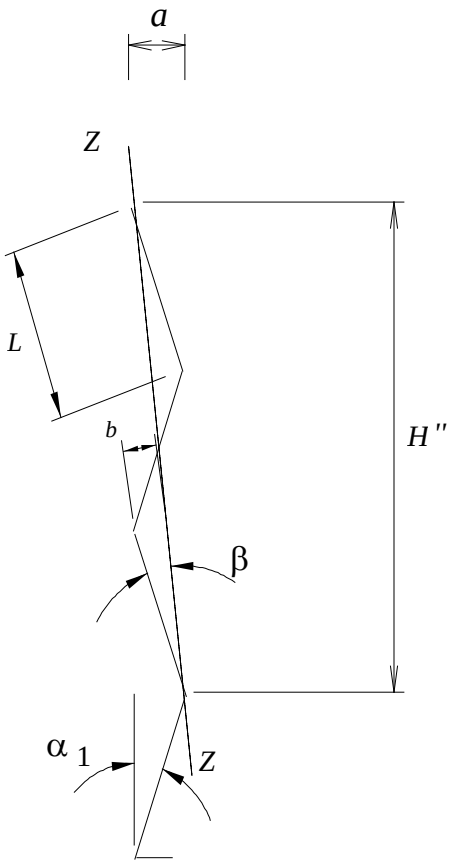


FIGURA 32 - Perfil da onda ziguezague com o eixo ZZ

O momento de inércia da conformação ziguezague, 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:

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

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.

7.1.3.3. Flexão Local

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

7.1.4. 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 ziguezague 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.

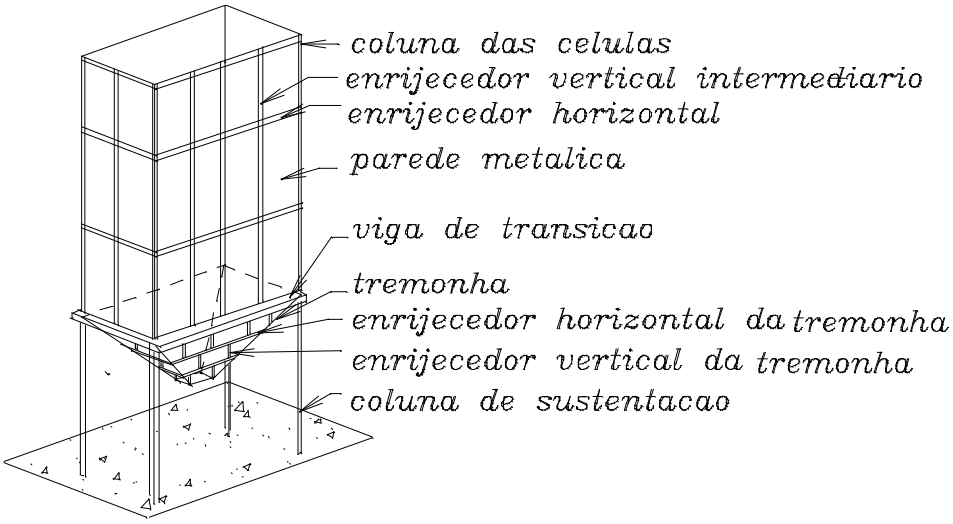


FIGURA 34- Sistema estrutural de um silo de paredes de chapas lisas

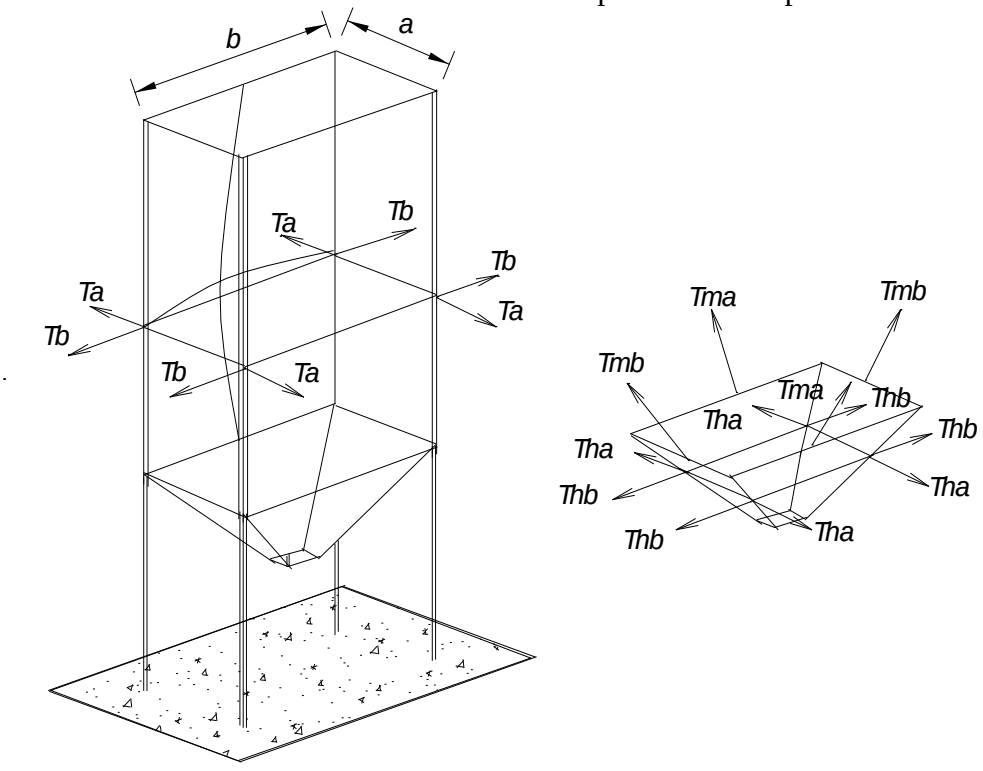


FIGURA 35 - Forças de tração existente no corpo e tremonha em silos prismáticos

7.1.4.1. 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:

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

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

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:

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

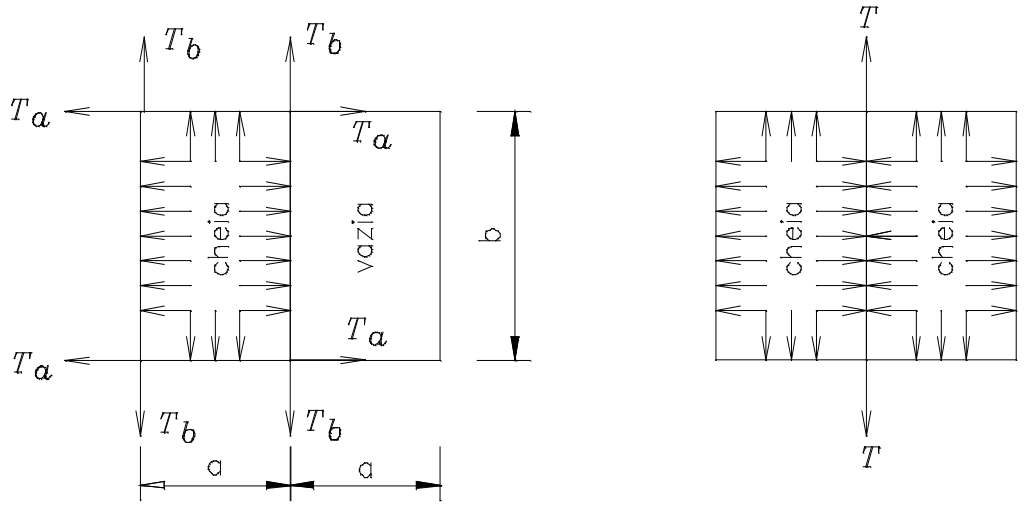


FIGURA 36 - Forças de tração atuante e silos prismáticos

7.1.4.2. 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):

7.1.4.2.1. Momento nos Cantos:

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

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:

$$M_c = \frac{-\left(P_{h_a} \times a^3 + P_{h_b} \times b^3\right)}{12(a + b)}$$

7.1.4.2.2 Momento Fletor no Meio do Vão

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

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

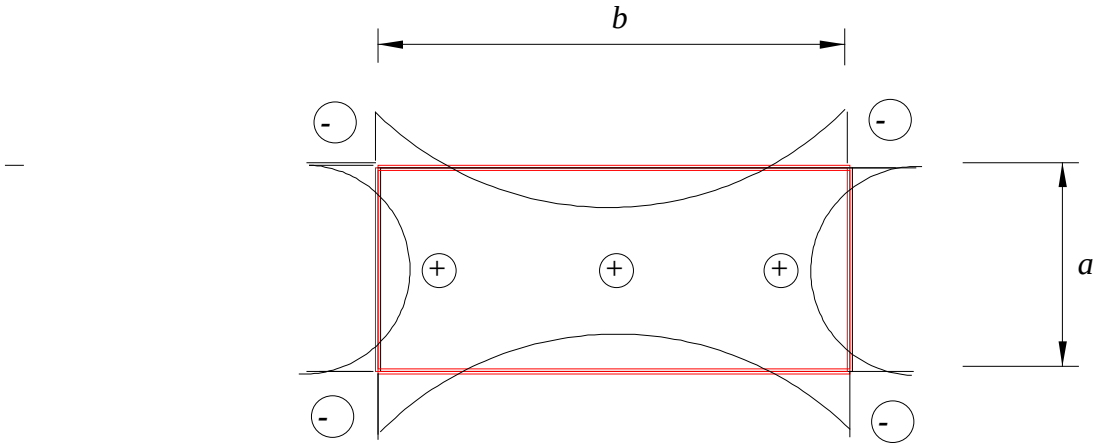


FIGURA 37 - Esquema do diagrama de momentos fletores

7.1.5. Determinação dos Esforços nas Paredes do Silo Segundo TROISTKY(1980)

7.1.5.1. 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.

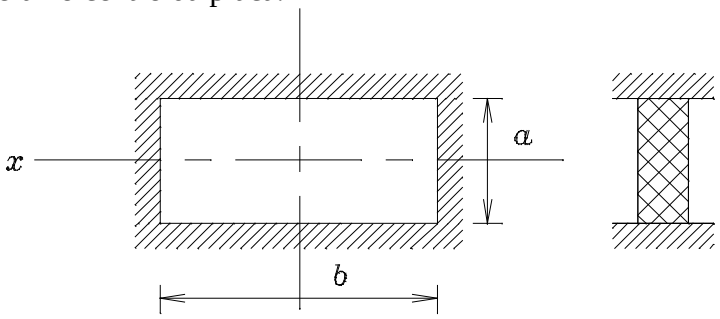


FIGURA 38 - Placa com bordas engastadas

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

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

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

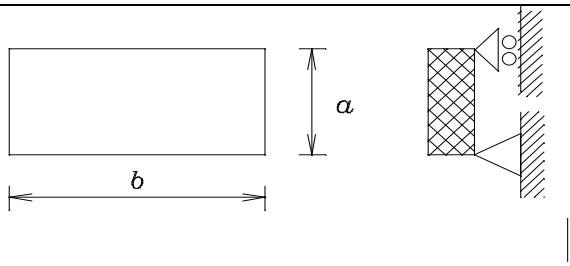


FIGURA 39 - Placa com bordas simplesmente apoiada

Para paredes onde o momento fletor atua numa direção com a relação $\frac{b}{a} \rangle 3$, 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:

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

7.1.5.2. 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:

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

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

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

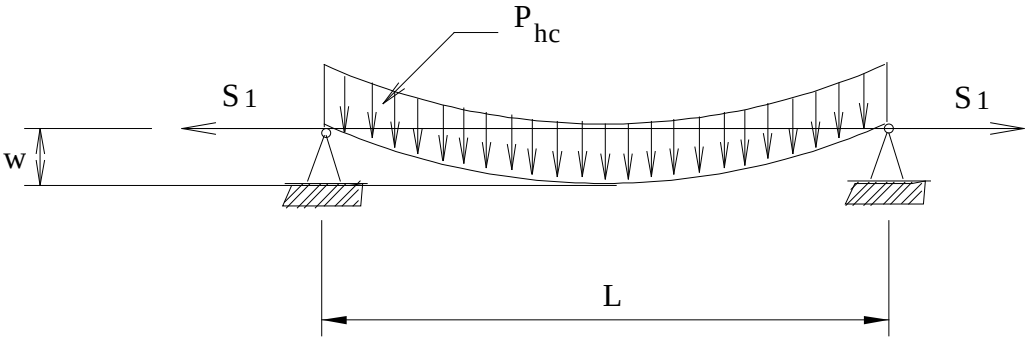


FIGURA 40 - Parede do silo trabalhando à flexo-tração

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

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

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

7.1.6.1. 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 $0{,}083 P_{h_i} l_i^2$ e não há rotação nas junções (nós) quando ocorrer o equilíbrio em todos os lados.

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

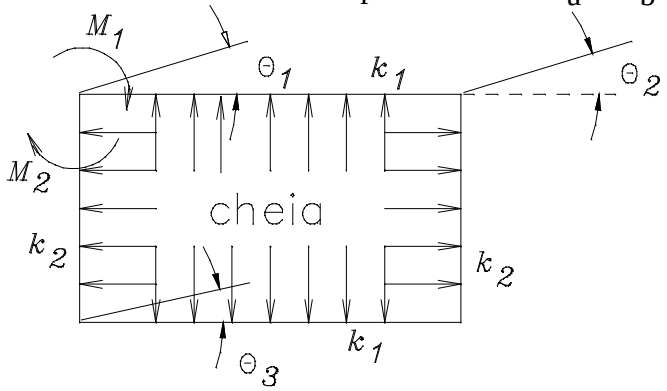


FIGURA 41 - Distribuição de momentos e rotação nos cantos

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

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

Por simetria $\theta_1 = -\theta_2$ e $\theta_3 = -\theta_1$

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

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:

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

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

para $b = 2a$

$$M_b = -0,25\ M_a$$

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

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

7.1.6.3. 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 de M_1 e "M_b" é o momento da extremidade do lado menor chamada de M_2.

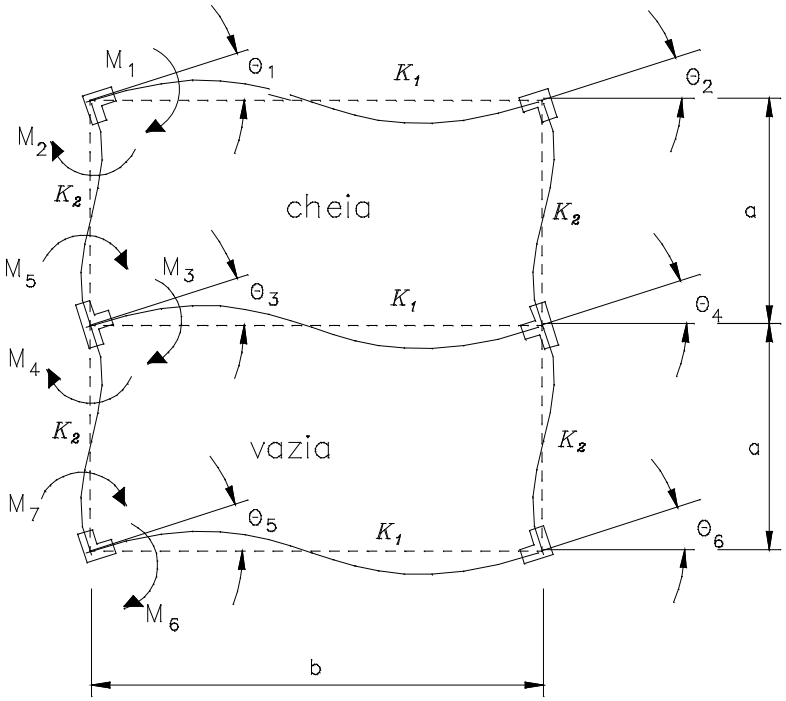


FIGURA 42 - Silo multicelular com diagrama do método dos esforços

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 $M_6 = -0,0075P_h b^2$, 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,, 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.

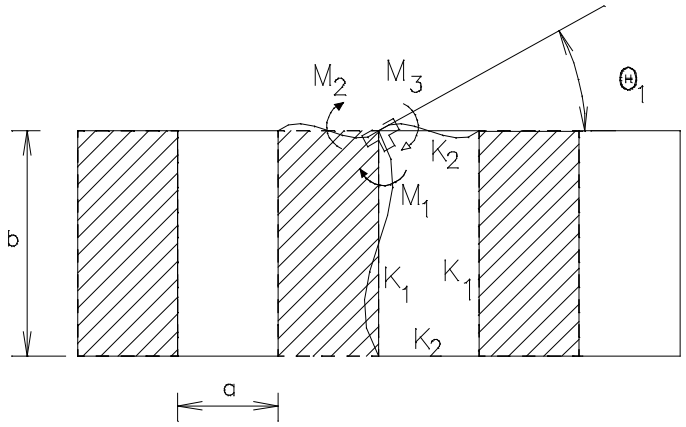


FIGURA 43 - Silo multicelular em linha com diagrama do método dos esforços

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

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

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

$$M_1 + M_2 + M_3 = 0$$

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

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

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

$$M_b = 0,25M_b$$

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

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

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

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

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.

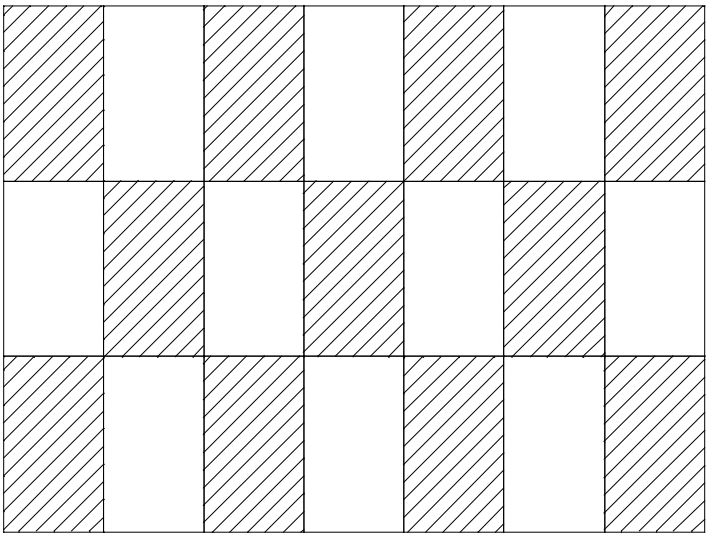


FIGURA 44 - Silo multicelular com células carregadas alternadamente

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.

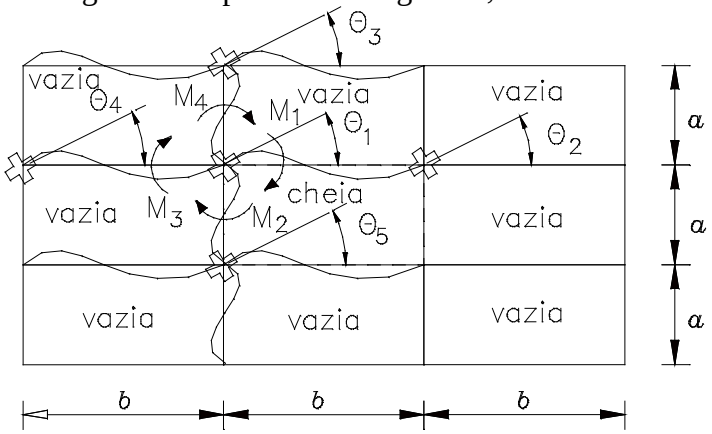


FIGURA 45 - Propagação de momento, devido à célula cheia no centro de um silo multicelular

$$M_1 = -M_a + Ek_1\theta_1(4-2)$$
$$M_2 = -M_b + Ek_2\theta_1(4-2)$$
$$M_3 = Ek_1\theta_1(4-0{,}4)$$
$$M_4 = Ek_2\theta_1(4-0{,}4)$$

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:

$$M_a = -0{,}083 P_h b^2$$
$$M_b = +0{,}083 P_h b^2$$
$$M_b = -0{,}25 M_b$$
$$M_1 = -0{,}0758 P_h b^2$$
$$M_2 = +0{,}0357 P_h b^2$$
$$M_3 = +0{,}0134 P_h b^2$$

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

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 $M_1 = -0,083 P_h b^2$. Carregando-se uma linha de células de cima para baixo da Figura 46 para esta condição

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

7.1.6.4. 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:

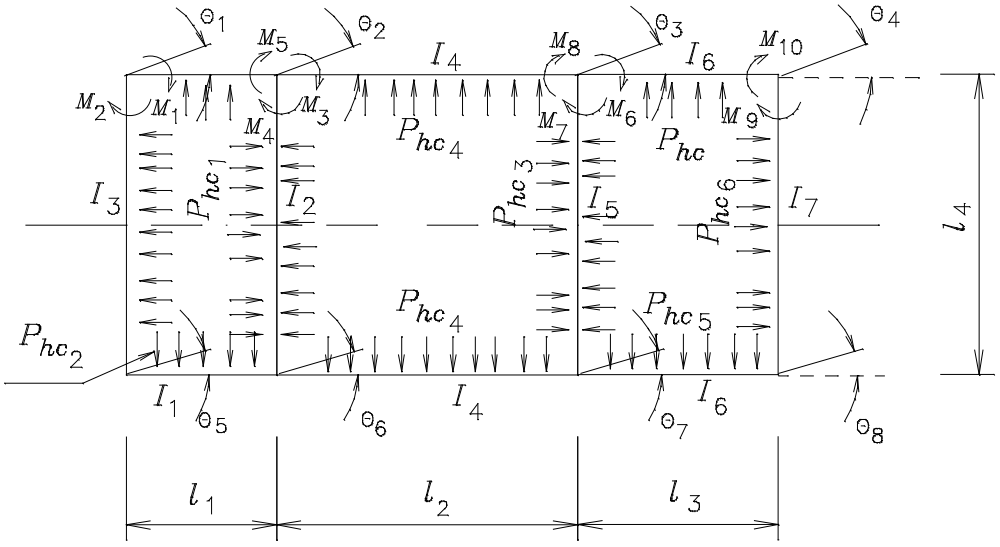


FIGURA 46 - Silos prismáticos multicelulares de seções diferentes

$$M_1 = a + 4EI_1\theta_1 + 2EI_1\theta_1$$
$$M_2 = b + 4EI_3\theta_1 - 2EI_3\theta_1$$
$$M_3 = c + 4EI_4\theta_2 + 2EI_4\theta_3$$
$$M_4 = d + 4EI_2\theta_2 - 2EI_2\theta_2$$
$$M_5 = -a + 4EI_1\theta_2 + 2EI_1\theta_1$$
$$M_6 = e + 4EI_6\theta_3 + 2EI_6\theta_4$$
$$M_7 = f + 4EI_5\theta_3 - 2EI_5\theta_3$$
$$M_8 = -c + 4EI_4\theta_3 + 2EI_4\theta_2$$
$$M_9 = g + 4EI_7\theta_4 - 2EI_7\theta_4$$
$$M_{10} = -e + 4EI_6\theta_4 + 2EI_6\theta_3$$

0nde:

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

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

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.

7.2. - ANÁLISE ESTRUTURAL DOS ELEMENTOS DA TREMONHA

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

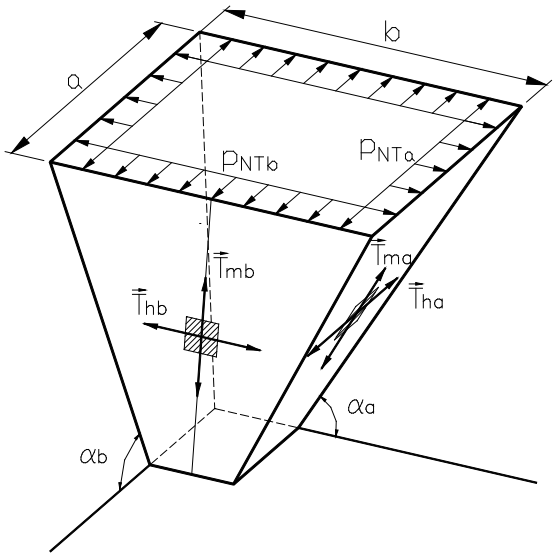


FIGURA 2.29 - Forças de tração horizontais e meridionais

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

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

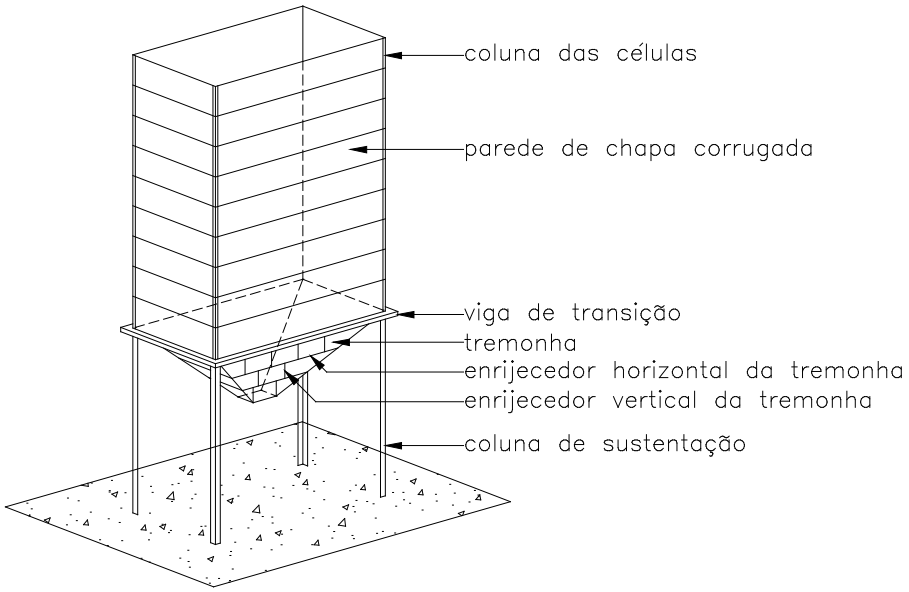


FIGURA 2.30 - Elementos estruturais de um silo prismático

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

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

NEFF & HUSS (1983, 1984), analisaram teoricamente os enrijecedores horizontais de tremonhas piramidais comparando-se os resultados obtidos pelo princípio dos trabalhos virtuais com aqueles obtidos através do método dos elementos finitos.

Neste contexto, as atuais bases para projetos de tremonhas de silos metálicos elevados têm origens em considerações de ordem prática adotadas por engenheiros calculistas que muitas vezes tratam o assunto de forma simplista e isolada. Assim, o super dimensionamento ou o sub-dimensionamento pode levar a estruturas antieconômicas e/ou inseguras. Nesta área, destacam-se RAVENET (1977), TROITSKY (1982), REIMBERT (1983), GAYLORD (1984), SAFARIAM (1985) e WESTBROOK (1988), embora alguns destes engenheiros tenham também se dedicado ao campo da pesquisa.

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

TIMOSHENKO (1940), tratou das teorias clássicas de placas e cascas.

BORN (1962), forneceu as teorias para a análise de estruturas prismáticas e piramidais de placas dobradas interligadas.

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

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

CHIA (1984), fez a análise não linear das placas isotrópicas.

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

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

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

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

7.2.1. - Forças de tração horizontais

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

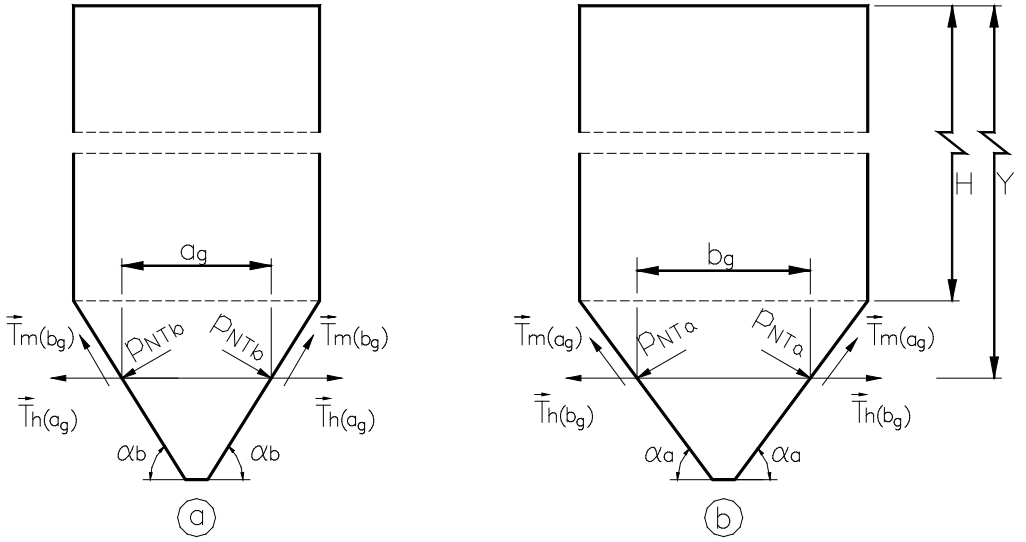


FIGURA 2.31 - Esforços de tração horizontais e meridionais em uma seção transversal genérica

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

$$T_{h(ag)} = p_{NT(bg)}.\operatorname{sen}\alpha_b.\frac{b_g}{2} \qquad (55)$$

$$T_{h(bg)} = p_{NT(ag)}.\operatorname{sen}\alpha_a.\frac{a_g}{2} \qquad (56)$$

onde:

$p_{NT(ag)}$ e $p_{NT(bg)}$ = pressões normais médias sobre as paredes nas posições genéricas "a_g" e "b_g", respectivamente. Estas pressões são calculadas através das expressões (19), (20) e (38);

α_a e α_b = ângulos de inclinações das paredes "a" e "b" relativos à horizontal.

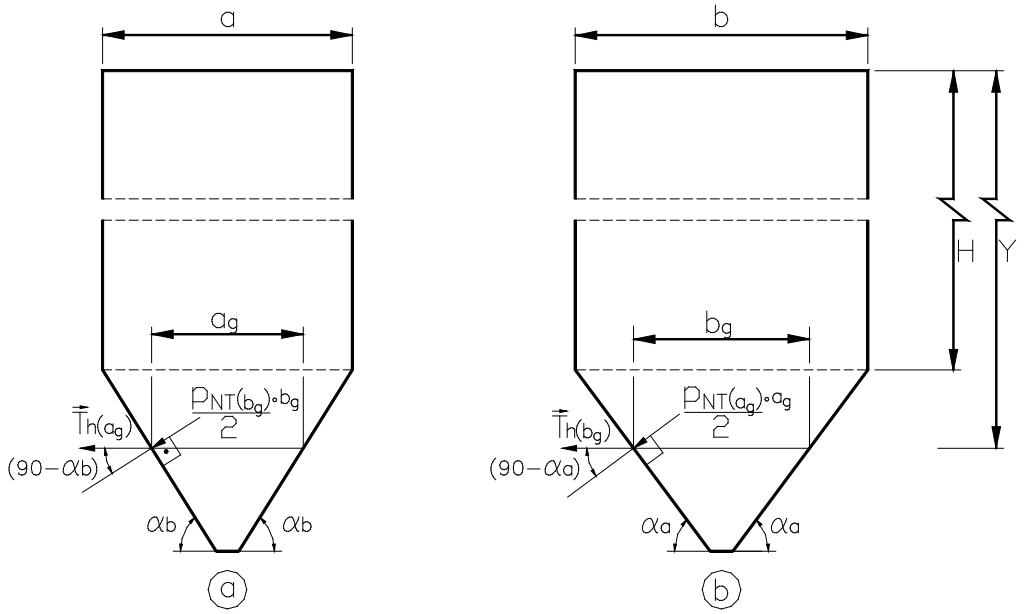


FIGURA 2.32 - Esforços de tração horizontais

7.2.2. - Forças de tração meridionais

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

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

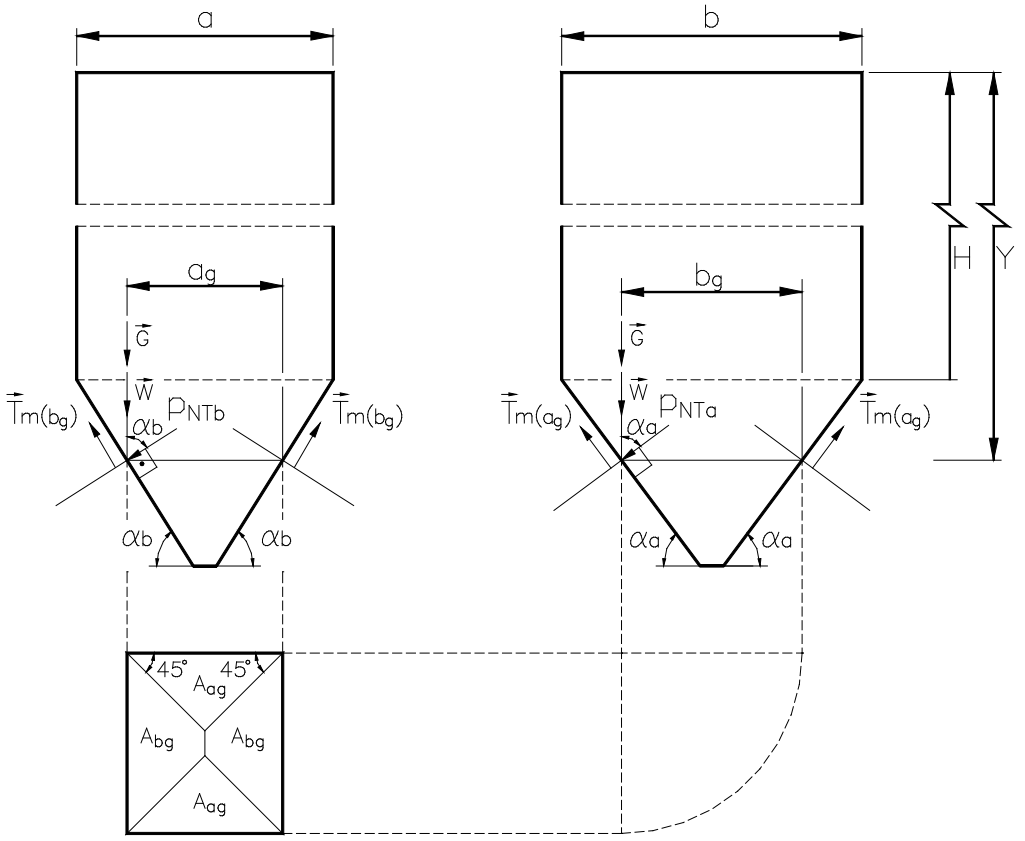


FIGURA 2.33 - Forças de tração meridionais

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

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

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

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

que podem ser relacionados pela seguinte expressão:

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

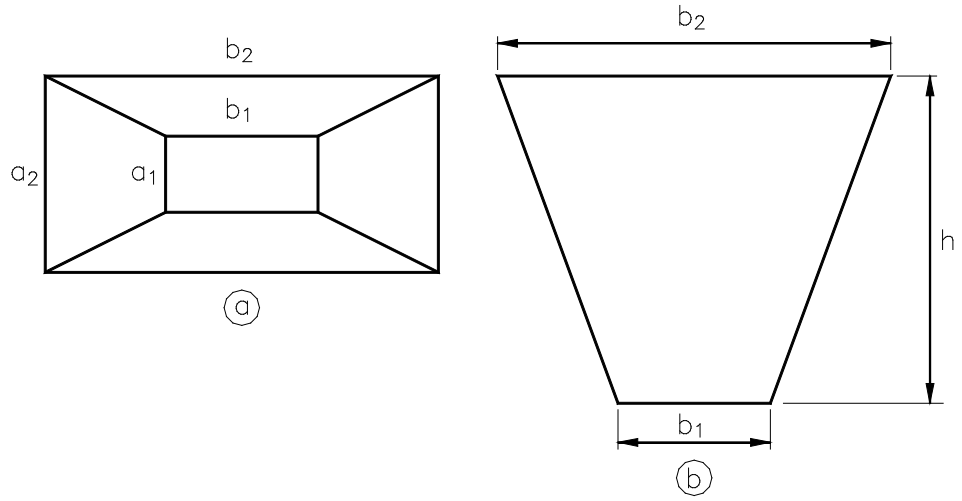


FIGURA 2.34 - Dimensões de um tronco de pirâmide

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

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

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

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

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

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

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

As hipóteses que culminaram nas expressões (61) e (62) são conservadoras e serviram de base para a norma ACI 313/77. Nestas expressões são desprezados os

efeitos do atrito nas paredes da tremonha e os cálculos das pressões são feitos por área de influência.

7.2.3. - Análise das placas pela Teoria dos Pequenos Deslocamentos (TPD)

7.2.3.1. - Generalidades

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

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

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

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

7.2.3.2. - Placas Retangulares com relação λ>3

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

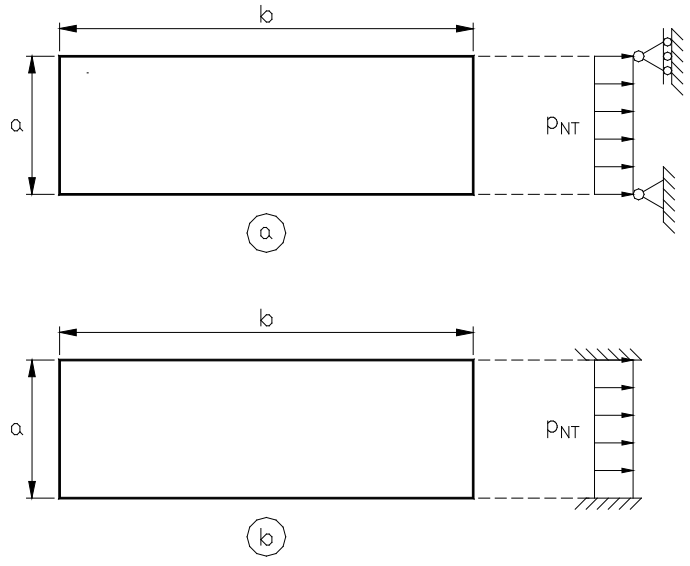


FIGURA 2.35 - Placas com λ > 3: a) Apoiada; b) Engastada

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

$$\Delta_{máx} = \frac{5 p_{NT} . a^4}{384 EI} \qquad (64)$$

$$M_{máx} = \frac{p_{NT} . a^2}{8} \qquad (65)$$

$$\Delta_{máx} = \frac{p_{NT} . a^4}{384 EI} \qquad (66)$$

$$M_{máx} = \frac{p_{NT} . a^2}{12} \qquad (67)$$

7.2.3.3. - Placas Retangulares com relação λ<3

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

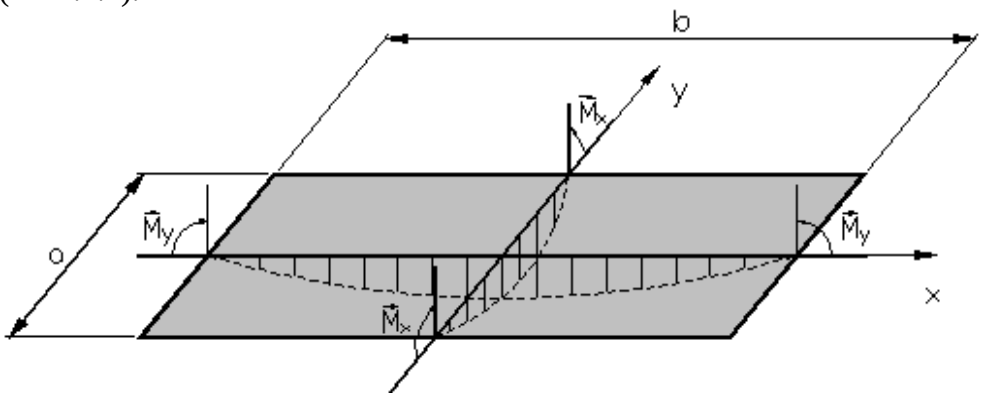
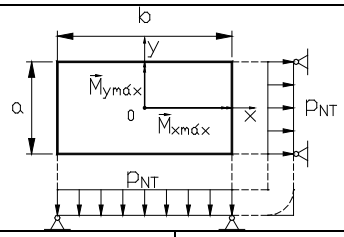


FIGURA 2.36 - Momentos fletores predominantes em placas retangulares com λ<3

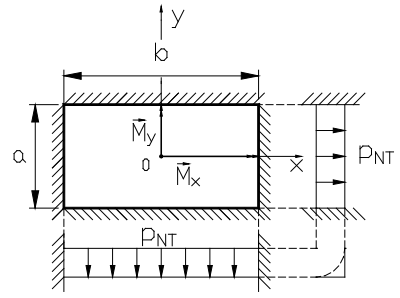
Deslocamentos e Momentos de Flexão para Placas Retangulares Simplesmente Apoiadas e Carga Uniformemente Distribuída (ν = 0.3)



b/a b>a	$w_{máx} = \beta_1 . \frac{p_{NT} . a^4}{E . t^3}$	$(M_x)_{máx} = \beta_2 . p_{NT}$.	$(M_y)_{máx} = \beta_3 . p_{NT}$.
	β_1	β_2	β_3
1.0	0.0443	0.0479	0.0479
1.1	0.0530	0.0553	0.0494
1.2	0.0616	0.0626	0.0501
1.3	0.0697	0.0693	0.0504
1.4	0.0770	0.0753	0.0506
1.5	0.0843	0.0812	0.0499
1.6	0.0906	0.0862	0.0493
1.7	0.0964	0.0908	0.0486
1.8	0.1017	0.0948	0.0479
1.9	0.1064	0.0985	0.0471
2.0	0.1106	0.1017	0.0464
3.0	0.1336	0.1189	0.0404

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

Deslocamentos e Momentos de Flexão em Placas Retangulares com Bordas Engastadas e com Cargas Uniformemente Distribuídas (ν = 0.3)



b/a b>a	$(w)_{x=0,y=0}$	$(M_x)_{x=a/2,y=0}$	$(M_y)_{x=0,y=b/2}$	$(M_x)_{x=0,y=}$	$(M_y)_{x=0,y=}$
	$\beta_1 \frac{p_{NT} . a^4}{E . t^3}$	$-\beta_2 . p_{NT} . a^2$	$-\beta_3 . p_{NT} . a^2$	$\beta_4 . p_{NT} . a^2$	$\beta_5 . p_{NT} . a^2$

	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
1.0	0.0138	0.0513	0.0513		
1.1	0.0164	0.0581	0.0538	0.0264	0.0231
1.2	0.0188	0.0639	0.0554	0.0299	0.0228
1.3	0.0209	0.0687	0.0563	0.0327	0.0222
1.4	0.0226	0.0726	0.0568	0.0349	0.0212
1.5	0.0240	0.0757			
1.6	0.0251	0.0780	0.0571	0.0381	0.0193
1.7	0.0260	0.0799	0.0571	0.0392	0.0182
1.8	0.0267	0.0812	0.0571	0.0401	0.0174
1.9	0.0272	0.0822	0.0571	0.0407	0.0165
2.0	0.0277	0.0829	0.0571		

TABELA 2.2 - Tabela para placas com bordas engastadas e λ<3, (Fonte: TIMOSHENKO, 1940)

Para placas de tremonhas piramidais em que λ<3, o estado de tensões será biaxial.

As experiências relacionadas à ruína por escoamento de materiais dúcteis demonstram boa compatibilidade com o critério da máxima energia de distorção ou também conhecido como critério de von Mises (1913).

Segundo este critério, a tensão equivalente para o estado biaxial de tensões será calculado por:

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

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

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

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

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

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

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

7.2.4. - Análise das Placas pela Teoria dos Grandes Deslocamentos (TGD)

7.2.4.1. - Generalidades

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

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

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

\

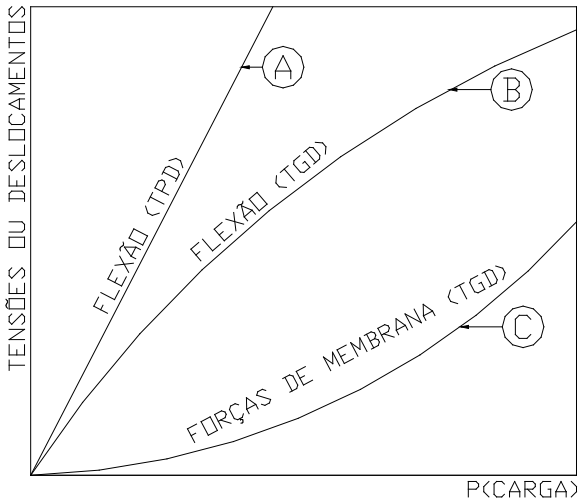


FIGURA 2.37 - Tensões e Deslocamentos em função das cargas para TPD e TGD

A Figura 2.37 mostra as variações das tensões e deslocamentos devidos a uma carga concentrada, perpendicular e no centro de uma placa retangular. O comportamento da placa pela TPD é representado pela curva "A". Esta curva mostra que as tensões e deslocamentos são devidos aos esforços predominantes de flexão. Por outro lado, o comportamento da placa pela TGD é representado pelas curvas "B" e "C". Por esta teoria atuam simultaneamente os esforços de flexão e de membrana. Estes esforços são os responsáveis pelos deslocamentos e tensões. A TPD é linear, enquanto que a TGD é não linear (HARTOG, 1952).

Os cálculos baseados na teoria clássica de placas (TPD) superestimam os deslocamentos e as tensões de placas finas acima de 100% para um grande número de casos práticos.

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

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

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

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

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

7.2.4.2. - Placas Retangulares pela TGD e com relação λ < 3

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

AALAMI & WILLIAMS (1975), fornece tabelas para o cálculo de tensões e deslocamentos das placas pela TGD. Estas tabelas foram elaboradas considerando-se o coeficiente de Poisson igual a 0.3.

Para a utilização das tabelas inicialmente determina-se a relação $\lambda = b/a$, o parâmetro adimensional "Q" (que reflete o efeito da carga transversal "p_{NT}"), o coeficiente linear "k_L" (para os pequenos deslocamentos) e o coeficiente de redução "k_r" (para os grandes deslocamentos). Estes coeficientes são então utilizados para o cálculo das tensões e dos deslocamentos. Valores intermediários para "λ" devem ser interpolados para a determinação mais precisa daqueles parâmetros.

A tabela 2.9 é útil para os casos mais freqüentes na área de silos. O primeiro retângulo (Condições de Contorno para Flexão - C. C. Flexão) da tabela representa simbolicamente as condições de contorno em que a placa é rigidamente apoiada e rotacionalmente livre quando solicitada pela flexão. No segundo retângulo (Condições de Contorno para Membrana - C. C. Membrana) a simbologia representa as condições de contorno em que os deslocamentos no plano são impedidos e as tensões de cisalhamento são iguais a zero quando a placa trabalha pelo efeito membrana.

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

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

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

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

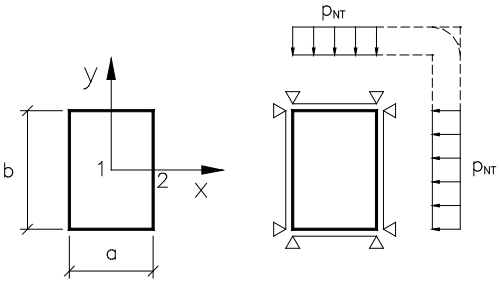
Para casos de tremonhas enrijecidas horizontalmente, deve-se considerar que os enrijecedores absorvam as trações "T_h".

Deslocamentos e Tensões para Placas Retangulares pela TGD (λ <3) (ν = 0.3)

Carga Uniformemente Distribuída

$w=\overline{W}.t \qquad \sigma=\overline{\sigma}.E.(t/a)^2$

$$Q=\frac{a^4.p_{NT}}{t^4.E}$$



(C. C. FLEXÃO) (C. C. MEMBRANA)

$\overline{W}=k_l.k_r.Q \qquad \overline{\sigma}=k_l.k_r.Q$

b/a	Q	$\overline{W}$	$\overline{\sigma}_{bx1}$	$\overline{\sigma}_{by1}$	$\overline{\sigma}_{mx1}$	$\overline{\sigma}_{my1}$	$\overline{\sigma}_{mx2}$	$\overline{\sigma}_{my2}$
1	Linear $k_l \Rightarrow$	$4.434x10^{-2}$	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286
	20	0.666	0.635	0.635	0.184	0.184	0.193	0.038
	40	0.481	0.440	0.440	0.193	0.193	0.207	0.043
	120	0.255	0.215	0.215	0.166	0.166	0.183	0.043
	200	0.185	0.150	0.150	0.147	0.147	0.165	0.041
	300	0.143	0.112	0.112	0.132	0.132	0.149	0.039
	400	0.118	0.091	0.091	0.122	0.122	0.138	0.037
1.5	Linear $k_l \Rightarrow$	$8.438x10^{-2}$	0.486	0.299	0.486	0.299	0.486	0.299
	20	0.476	0.449	0.404	0.185	0.176	0.194	0.073
	40	0.322	0.293	0.249	0.171	0.165	0.181	0.075
	120	0.162	0.140	0.108	0.131	0.131	0.141	0.067
	200	0.116	0.098	0.074	0.114	0.114	0.122	0.062
	300	0.089	0.074	0.055	0.100	0.102	0.108	0.057
	400	0.073	0.061	0.044	0.092	0.094	0.099	0.053
2	Linear $k_l \Rightarrow$	$11.07x10^{-2}$	0.609	0.278	0.609	0.278	0.609	0.278
	20	0.388	0.364	0.298	0.166	0.156	0.172	0.104
	40	0.258	0.235	0.179	0.148	0.144	0.154	0.103
	120	0.127	0.110	0.079	0.110	0.112	0.115	0.087
	200	0.091	0.078	0.055	0.095	0.098	0.099	0.078

	300	0.069	0.059	0.041	0.084	0.088	0.088	0.071
	400	0.057	0.048	0.034	0.076	0.081	0.080	0.065
3	Linear $k_l \Rightarrow$	$13.42x10^{-2}$	0.712	0.244	0.712	0.244	0.712	0.244
	20	0.323	0.306	0.267	0.144	0.145	0.146	0.138
	40	0.212	0.196	0.170	0.126	0.132	0.127	0.128
	120	0.105	0.093	0.081	0.095	0.105	0.095	0.103
	200	0.075	0.066	0.057	0.082	0.093	0.082	0.091
	300	0.057	0.050	0.043	0.072	0.083	0.073	0.081
	400	0.047	0.041	0.036	0.066	0.076	0.066	0.075

TABELA 2.9 - Deslocamentos e Tensões para Placas Retangulares pela TGD (λ<3) (ν = 0.3) (Fonte: AALAMI & WILLIAMS, 1975)

7.2.4.3.- Placas Retangulares pela TGD e com relação λ > 3

Uma placa fina retangular longa e estreita com bordas bi-articuladas ou bi-engastadas pode resistir as pressões externas, parte devido à sua rigidez e parte devido à vinculação do seu plano médio ou efeito membrana. Este efeito tem início tão logo inicia o deslocamento. Desta maneira, a capacidade de carga da placa tende a aumentar na fase elástica (TROITSKY, 1968).

A teoria dos grandes deslocamentos (TGD) aplicada a estes tipos de placas, mostra que as placas com bordas bi-articuladas apresentam maior eficiência estrutural frente as placas com bordas bi-engastadas. Isto ocorre porque os engastamentos provocam a diminuição da força de membrana e o seu conseqüente efeito na diminuição dos momentos de flexão (TIMOSHENKO, 1940), (TROITSKY, 1968), (FEODOSIEV, 1988).

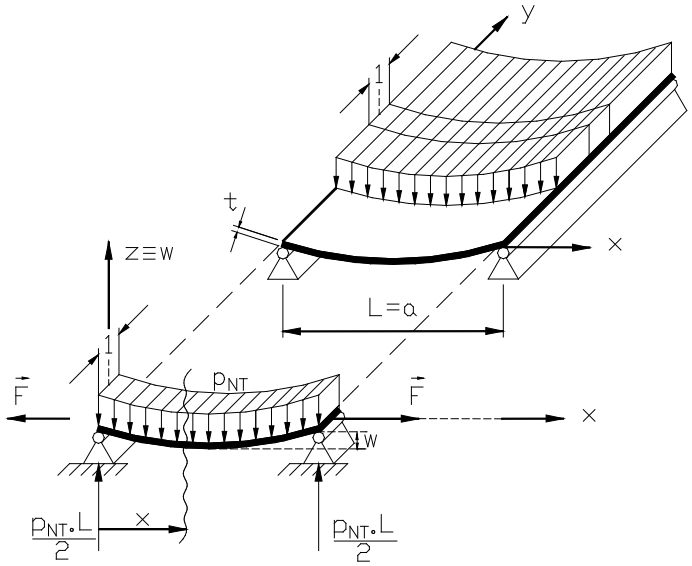


FIGURA 2.38 - Placa retangular bi-articulada e com λ > 3

Considere uma placa longa, fina, retangular, e com bordas bi-articuladas, sujeita a uma carga uniformemente distribuída "p_{NT}" sobre uma faixa de largura unitária (FIG. 2.38). Desta forma, a placa pode ser considerada como uma barra de comprimento "L" e

seção transversal retangular de altura “t”. Então, a equação diferencial dos deslocamentos de uma faixa elementar terá a seguinte forma (TIMOSHENKO, 1940):

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

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

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

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

$$M = \frac{p_{NT}.L}{2}x - \frac{p_{NT}}{2}x^2 - F.w \qquad (85)$$

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

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

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

$$\frac{d^2w}{dx^2} - \frac{4}{L^2}u^2w = -\frac{p_{NT}.L}{2D}x + \frac{p_{NT}}{2D}x^2 \qquad (87)$$

A solução da equação (87), fornece:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

No caso de bordas bi-articuladas, obtém-se uma boa aproximação para "$\vec{F}$", admitindo-se que a curva elástica seja senoidal, ou seja:

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

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

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

De acordo com TIMOSHENKO (1966), os deslocamentos "w_m" de uma barra flexo-tracionada são reduzidos e podem ser aproximados satisfatoriamente pela seguinte expressão:

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

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

$$w_o = \frac{5qL^4}{384D} \qquad (96)$$

E a grandeza adimensional "w_α " é dada por:

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

onde para placas a carga crítica é dada por:

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

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

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

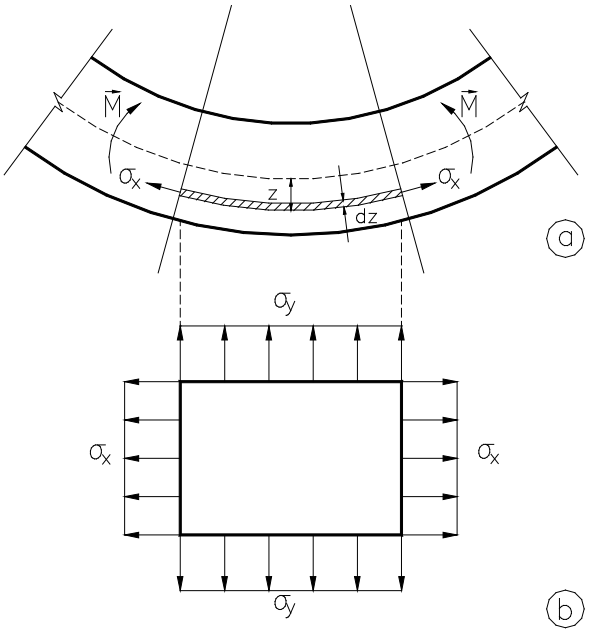


FIGURA 2.39 - Deformações e estado de tensões em um elemento de placa

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

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

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

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

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

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

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

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

$$w_\alpha \left(1 + w_\alpha\right)^2 = \frac{3 {w_o}^2}{t^2} \qquad (104)$$

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

$$x_1^3 - x_1^2 = \frac{3 w_o^2}{t^2} \qquad (105)$$

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

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

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

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

onde:

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

e,

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

As raízes "y_1", "y_2" e "y_3" da equação cúbica reduzida serão:

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

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

sendo:

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

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

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

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

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

$$u = \frac{\pi}{2}\sqrt{w_\alpha} \qquad (115)$$

$$F = \frac{\pi^2 . D . w_\alpha}{L^2} \qquad (116)$$

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

$$M_{máx} = \frac{p_{NT} . L^2}{8}\left[\frac{2(\cosh u - 1)}{u^2 \cosh u}\right] = \frac{p_{NT} . L^2}{8}\varphi_o(u) \qquad (117)$$

onde:

$$\varphi_o = \frac{2(\cosh u - 1)}{u^2 \cosh u} \qquad (118)$$

Analisando-se (117) e (118) conclui-se que os valores de "φ_o" diminuem rapidamente com o aumento de "u". Assim, levando-se também à rápida diminuição do momento $\frac{p_{NT}.L^2}{8}$ devido à tração do efeito membrana decorrente dos grandes deslocamentos.

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

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

onde:

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

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

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

7.2.5. - Conversões de Placas Triangulares e Trapezoidais em Painéis Retangulares

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

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

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

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

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

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

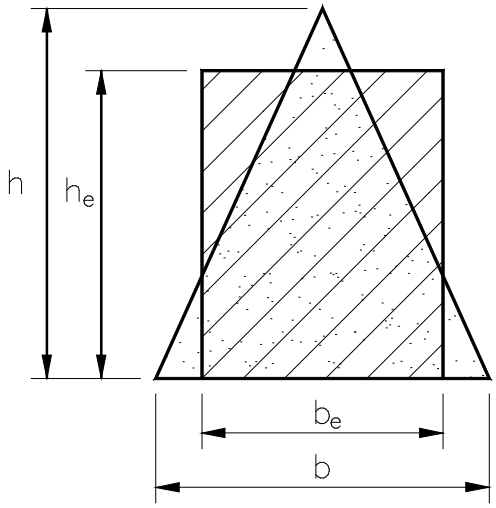


FIGURA 2.40 - Conversão de placa triangular em retangular

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

$$b_e = \frac{2b_1}{3}\frac{\left(b_1 + 2b_2\right)}{\left(b_1 + b_2\right)} \qquad (124)$$

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

onde:

b_1 = dimensão do maior lado dos dois lados paralelos;

b_2 = dimensão do menor lado dos dois lados paralelos;

h = altura do trapézio.

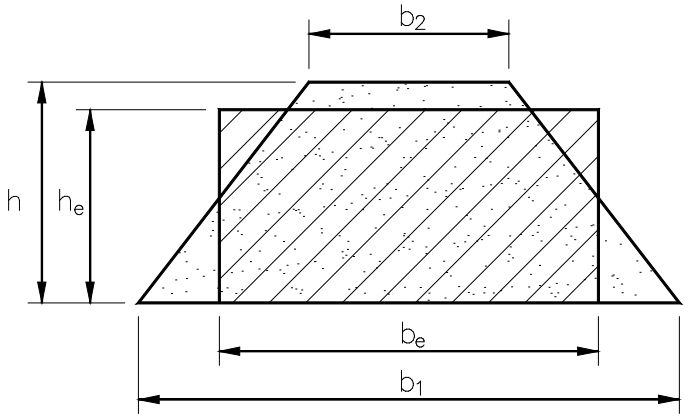


FIGURA 2.41 - Conversão de placa trapezoidal em retangular

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

7.2.6. - Enrijecedores

7.2.6.1. - Generalidades

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

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

A escolha do sistema de enrijecimento das placas de uma tremonha depende do tipo de aplicação e de critérios de otimização. Estes sistemas podem ser formados por enrijecedores horizontais, meridionais e eventualmente a conjugação destes dois tipos (FIG. 2.42).

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

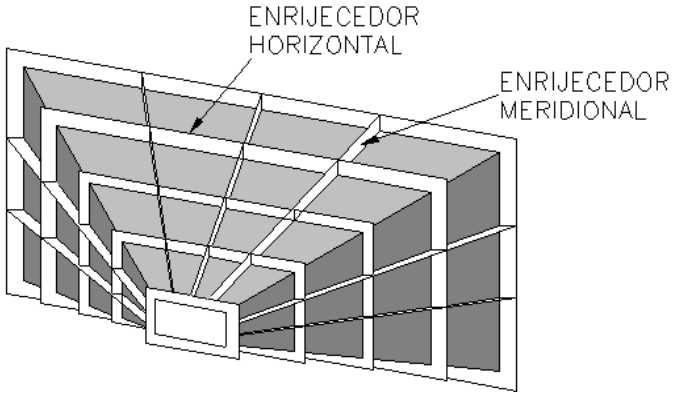


FIGURA 2.42 - Tremonha enrijecida

7.2.6.2. - Largura efetiva

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

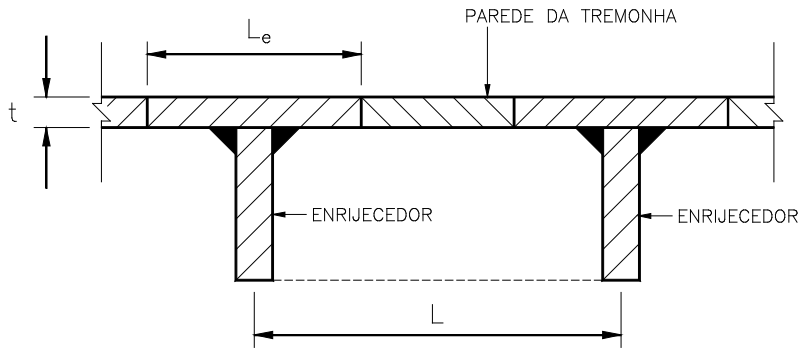


FIGURA 2.43 - Largura efetiva

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

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

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

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

onde:

L = distância entre enrijecedores;

t = espessura da placa;

L_e = largura efetiva.

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

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

7.2.6.3. - Esforços, Deslocamentos e Verificações

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

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

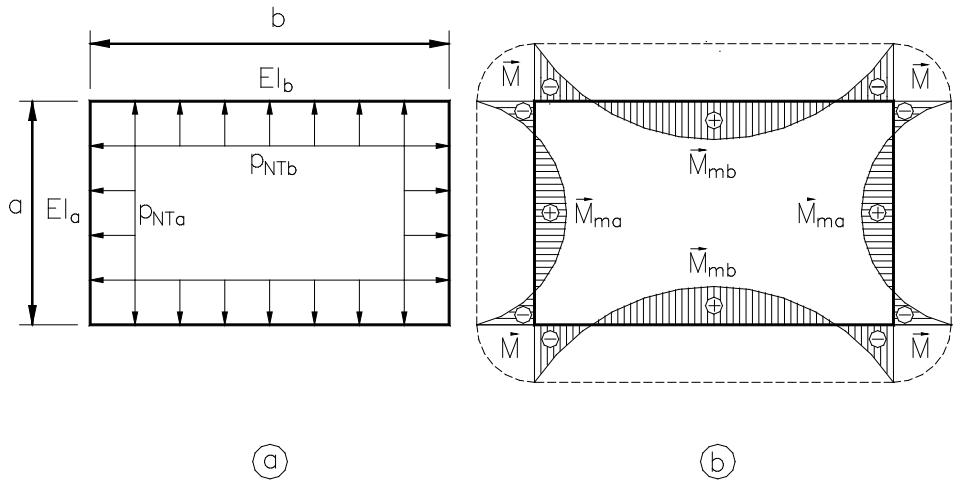


FIGURA 2.44 - Quadro hiperestático (Os diagramas de momentos de flexão estão invertidos na figura para facilidade ilustrativa)

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

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

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

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

$$M_{mb} = -M + \frac{p_{NTb}.b^2}{8} \qquad (131)$$

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

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

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

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

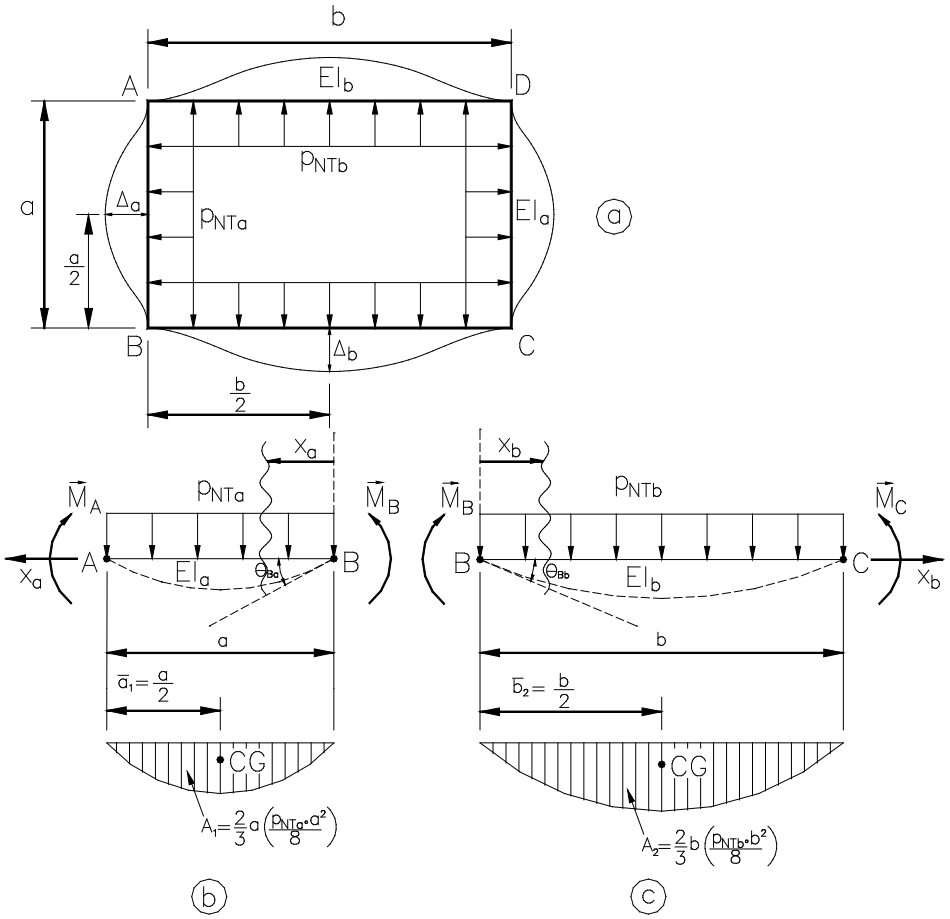


FIGURA 2.45 - Rotações em “B” pelo Teorema Área Momento

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

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

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

$$M_{Sa} = -M + \frac{p_{NTa}.a}{2}x_a - \frac{p_{NTa}}{2}x_a^2 \quad (135)$$

$$M_{sb} = -M + \frac{p_{NTb}.b}{2}x_b - \frac{p_{NTb}}{2}x_b^2 \quad (136)$$

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

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

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

Para $x_a = 0$ tem-se a rotação "θ_{Ba}" fornecida por (133) e para $x_b = 0$ tem-se a rotação "θ_{Bb}" fornecida por (134), então por estas condições de contorno tem-se:

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

$$E.I_b.y'_b = M.x_b - \frac{p_{NTb}.b}{4}x_b^2 + \frac{p_{NTb}}{6}x_b^3 + \left(\frac{p_{NT}.b^3}{24} - \frac{3M.b}{6}\right) \quad (140)$$

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

$$E.I_a.y_a = \frac{M.x_a^2}{2} - \frac{p_{NTa}.a}{12}x_a^3 + \frac{p_{NTa}}{24}x_a^4 + \left(\frac{p_{NT}.a^3}{24} - \frac{3M.a}{6}\right)x + C_{a2}$$

(141)

$$E.I_b.y_b = \frac{M.x_b^2}{2} - \frac{p_{NTb}.b}{12}x_b^3 + \frac{p_{NTb}}{24}x_b^4 + \left(\frac{p_{NT}.b^3}{24} - \frac{3M.b}{6}\right)x + C_{b2}$$

(142)

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

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

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

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

$$\Delta_a = \frac{1}{E.I_a}\left(-\frac{M.a^2}{8} + \frac{5p_{NTa}.a^4}{384}\right) \qquad (145)$$

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

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

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

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

7.2.7.- Soldas

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

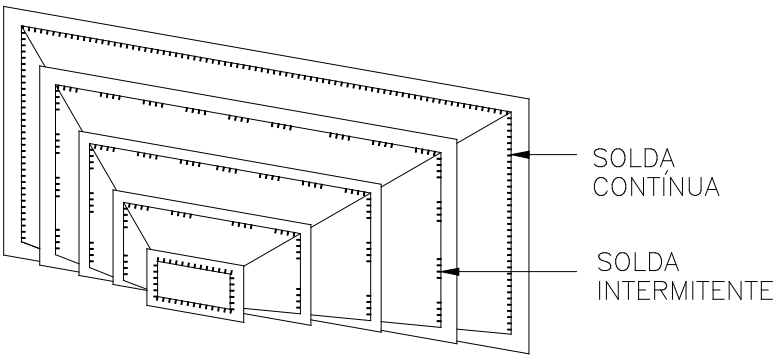


FIGURA 2.46 - Soldas contínuas e intermitentes

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

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

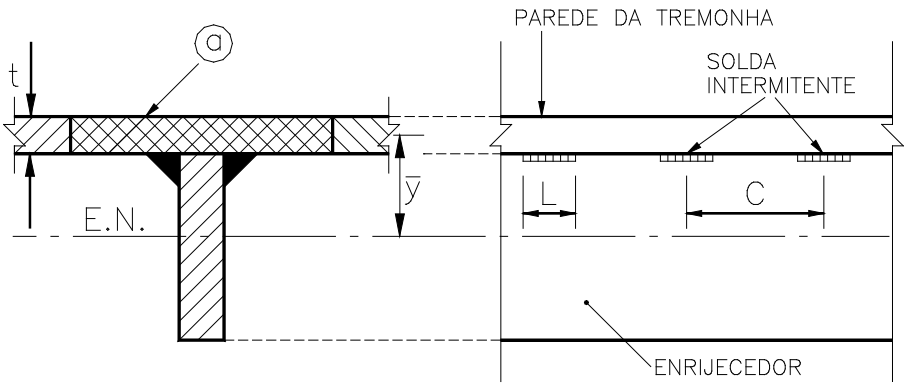


FIGURA 2.47 - Solda de filete

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

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

onde:

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

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

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

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

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

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

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

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

onde:

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

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

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

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

$$c = \frac{2.f_v.t.L.I}{V.a.\overline{y}} \qquad (150)$$

onde:

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

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

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

V = esforço cortante máximo no painel [F];

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

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

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

7.3.- ANÁLISE ESTRUTURAL DAS COLUNAS DE SILOS ELEVADOS

Os silos são normalmente suportados por meio de estruturas próprias, tais como: colunas ou painéis fixados na fundação de concreto armado. A estrutura de suporte do tipo painel (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, os painéis de sustentação podem ser mais econômicos e, ainda se podem utilizados como depósitos de equipamentos. Para silos altos, as colunas de sustentação são as mais adequadas e este tipo de sustentação será melhor discutido nesse item.

7.3.1 Ações atuantes nas colunas.

Neste item serão discutidas apenas 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:

- ações permanentes: 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 fundações para verificação da resistência, estabilidade e reações, devem considerar:

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

Deve-se considerar também 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 (esta situação pode governar o momento e a placa de fundação).

O vento pode afetar a estabilidade dos silos vazios, particularmente quando são altos, silos estreitos e multicelulares. As cargas nas fundações e nas colunas, podem ser piores com o vento atuando no silo cheio.

7.3.2. Esforços nas Colunas do corpo do silo.

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:

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

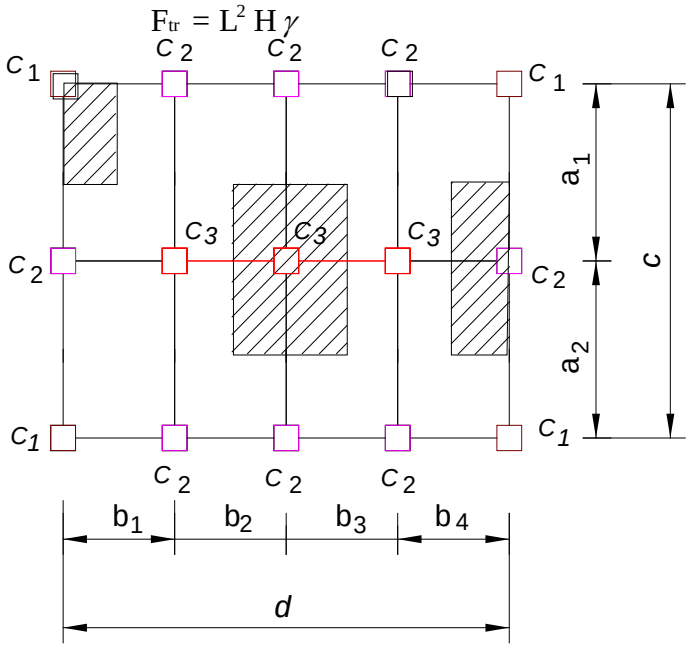


FIGURA 33 - Tipos de colunas existentes em um silo multicelular

7.3.2.1 Colunas de Canto (C_1)

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:

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

7.3.2.2 Coluna de Borda (C_2)

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:

$$Fc_2 = \frac{F_{rt}}{2S_2}$$

7.3.2.3. Coluna Central (C_3)

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:

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

7.3.3. 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 e o momento causado pela ação do vento.

As 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 prismáticos 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:

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

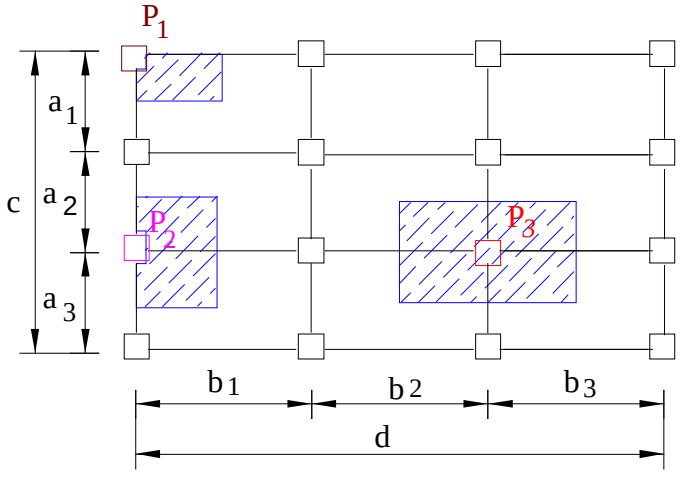


FIGURA 47 - Tipos de colunas de sustentações e suas respectivas áreas de influências

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 $b_1 = b_2 = b_3 = c$, 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, dado por:

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

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:

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

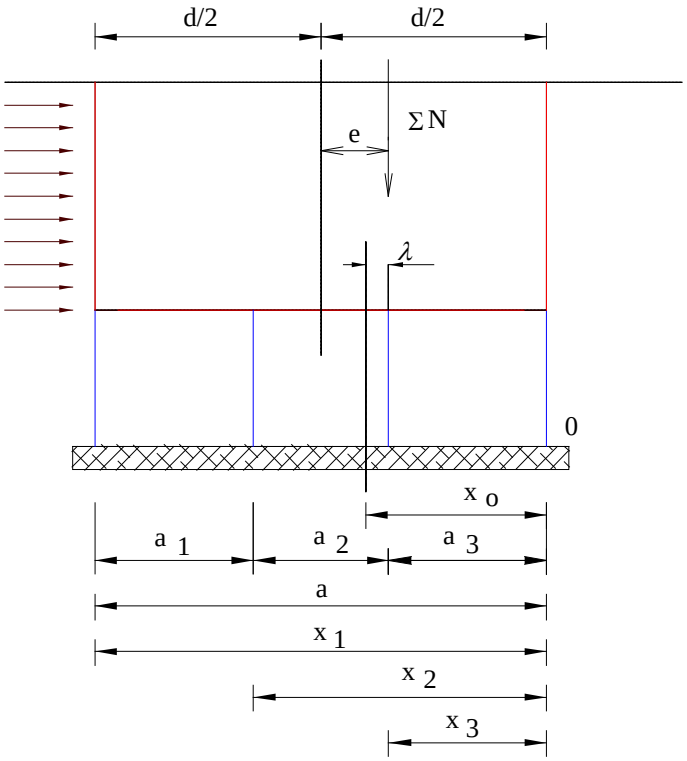


FIGURA 48 - Excentricidade da carga vertical devido à ação do vento

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:

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

7.3.4. Momento Fletor nas Colunas sob Ação do Vento

A pressão do vento provoca momentos fletores nas coluna 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.

7.3.4.1. 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

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

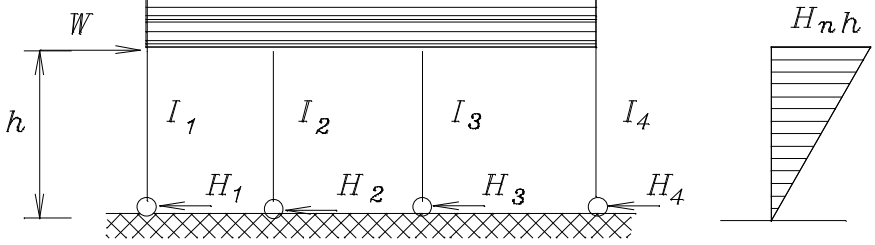


FIGURA 49 - Colunas de sustentação articuladas para silos multicelulares

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:

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

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

7.3.4.2. Colunas de Sustentação Engastadas

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

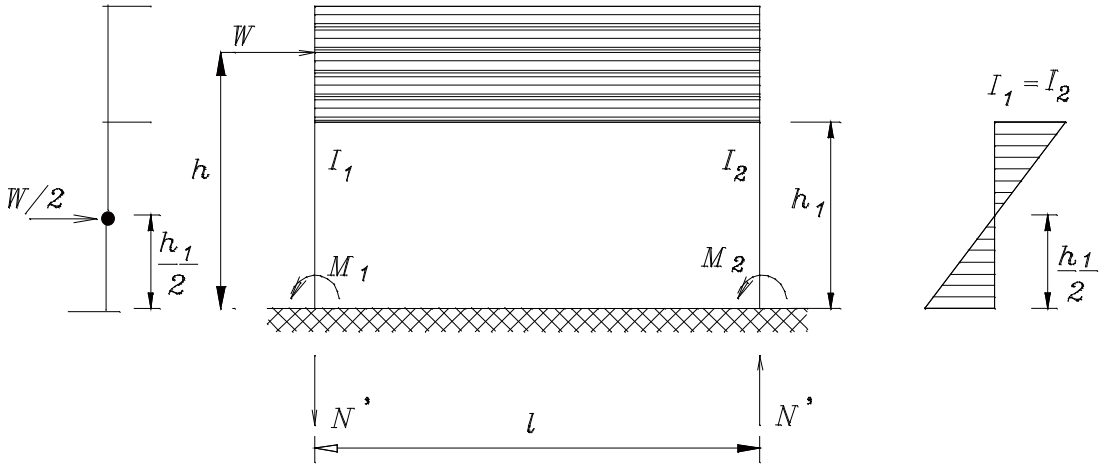


FIGURA 50 - Coluna de sustentação engastada

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

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

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

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.

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

7.3.5. Aplicação do Método simplificado Para Cálculo de Colunas de Sustentação de Silos Prismáticos (GRAY,1973)

A aplicação desse método é baseada nas seguintes suposições:

- a rigidez de um elemento submetido ao momento fletor é diretamente proporcional a 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.

7.3.5.1 Uma Linha de Colunas

Este é o caso mais simples que 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).

7.3.5.2 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 $Fh_1/2$ no topo.

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

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

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

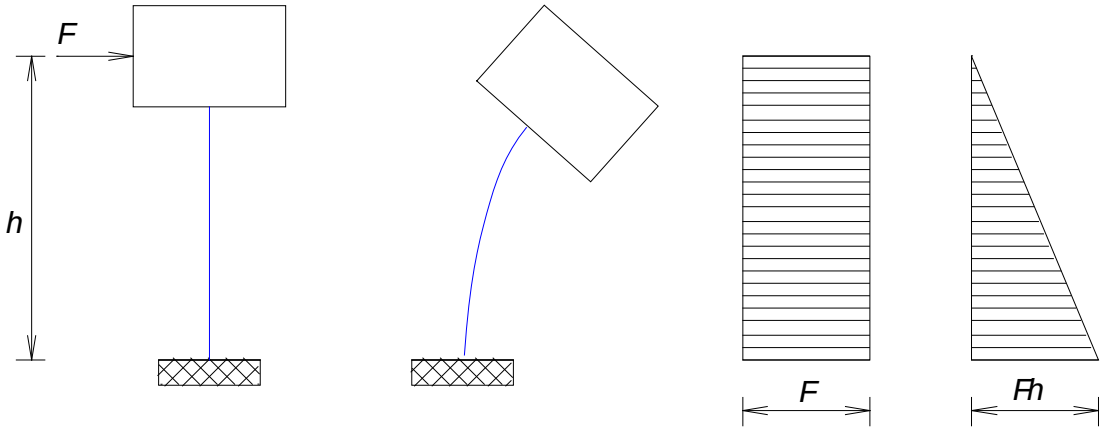


FIGURA 51 - Caso mais simples de colunas de sustentação em linha.

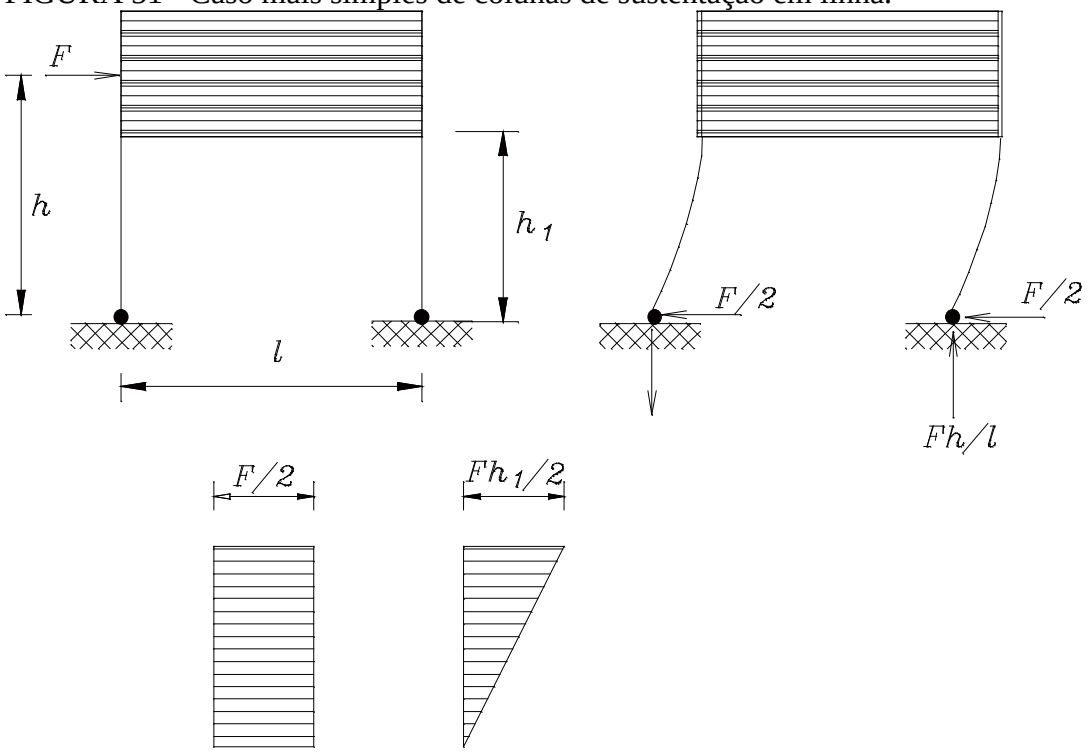


FIGURA 52 - Duas linhas de colunas de sustentação articuladas.

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 ±V;
- momento fletor devido ao vento.

O 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 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.

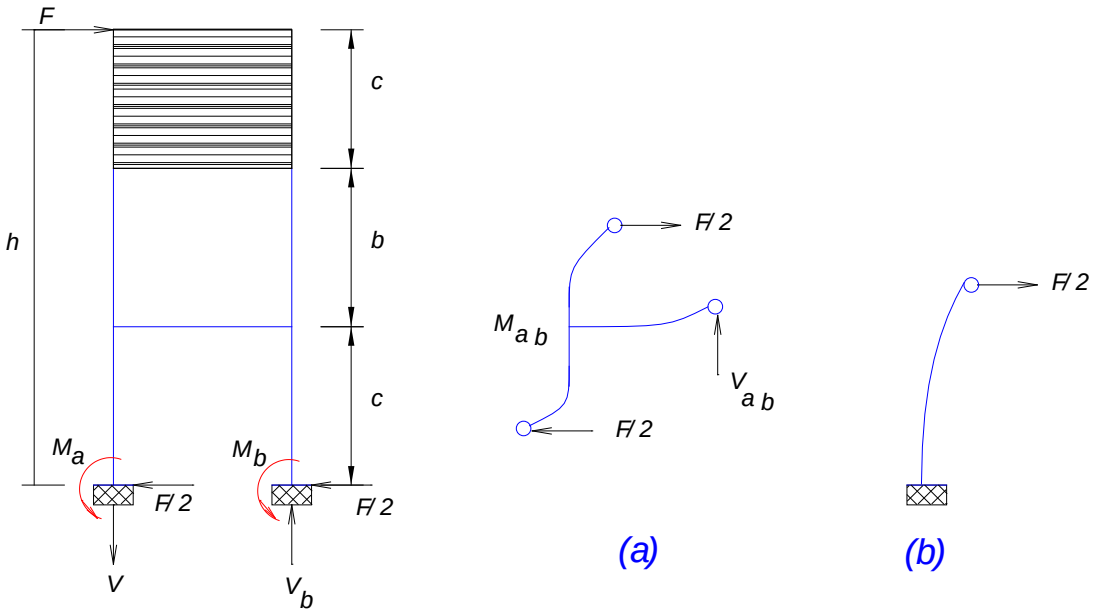


FIGURA 53 - Colunas de sustentação engastadas com elementos horizontais com os respectivos pontos de inflexão.

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:

$$M_{a\,b} = \frac{F}{2} \times \frac{b}{2}$$

$$M_{a\,b} = \frac{F}{2} \times \frac{a}{2}$$

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

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

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:

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

7.3.5.3 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 ouras 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.

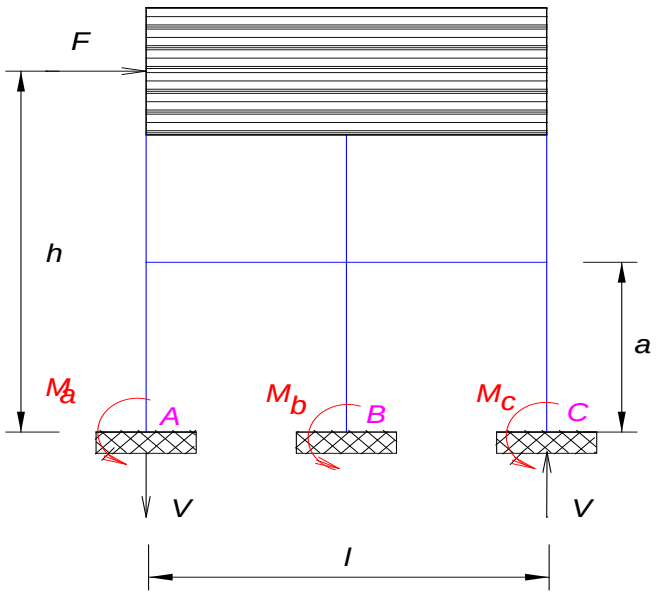


FIGURA 54 - Pórtico com três linhas de colunas

8 - PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ESTRUTURAIS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DE SILOS METÁLICOS.

8.1 - Propriedades dos aços

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

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

A resistência das peças em “aço estrutural” dependem do limite de escoamento. O termo “limite de escoamento” é genérico e indica que o aço tem uma tensão de escoamento definida por um limite específico, ou tem uma tensão de escoamento convencional.

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

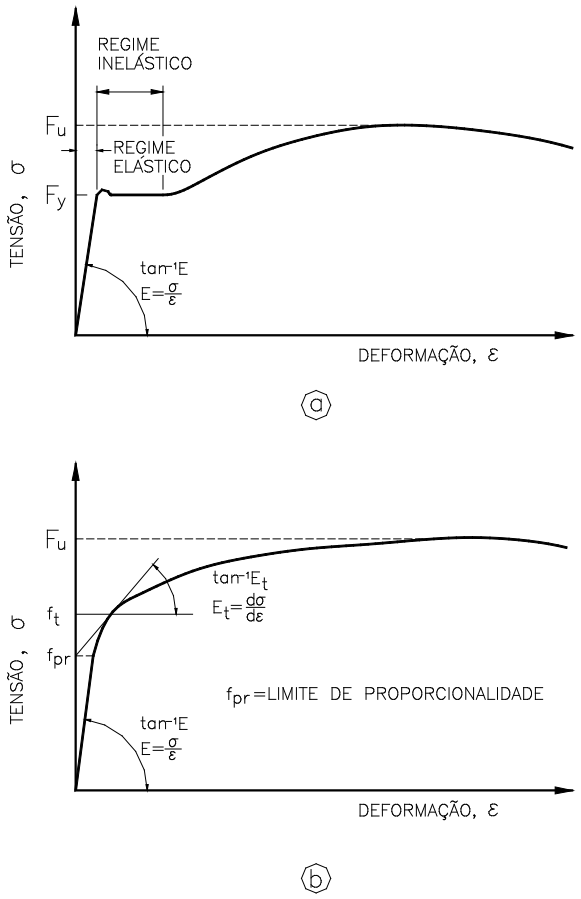


FIGURA 2.48 - Diagramas típicos tensão-deformação para aços estruturais

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

Para aços sem patamar de escoamento, o limite de escoamento é determinado através de um valor “n” convencionado internacionalmente. “Quando o desvio da proporcionalidade é expressa em termos de um aumento da deformação, tem-se o chamado “limite de desvio (offset) n”, isto é, o limite “n”, neste caso, é calculado por meio de um aumento de n% na deformação, após a fase elástica. Geralmente o valor “n” é especificado para 0.2% (para os metais e ligas metálicas em geral), o que significa uma deformação plástica de 0.002, por unidade de comprimento depois que ultrapassa o limite de proporcionalidade (FIG. 2.49)” (SOUZA, 1982).

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

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

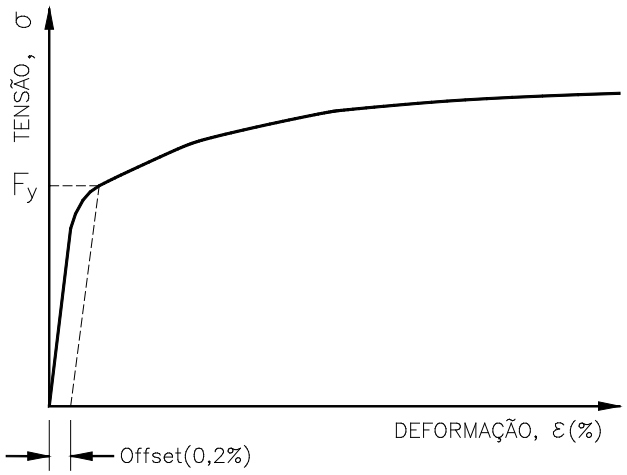


FIGURA 2.49 - Limite de escoamento para aço sem patamar de escoamento

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

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

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

8.2 - Aços para Silos

A escolha do tipo de aço a ser utilizado dependerá das propriedades mecânicas requeridas, do tipo de aplicação e da norma a ser utilizada.

Aços para Silos				
Tipos	**Propriedades Mecânicas**		**Aplicações**	**Produto**
	Lim. de Esc. (MPa)	**Lim. de Res. (MPa)**		
SAE 1008	**172**	**309**	**colunas, stiffeners**	**chapas e bobinas a quente ou a frio**
SAE 1010	**183**	**330**	**colunas ou stiffeners**	**chapas e bobinas a quente ou a frio**
ASTM A36	**250**	**400 a 550**	**construção**	**chapas, barras**

			soldada e aparafusada; propósitos estruturais em geral	**e perfis**
ASTM A570 Grau C	**232**	**366**	**perfis formados a frio; construção soldada ou parafusada**	**chapas ou bobinas a quente**
ABNT CF-24	**240**	**370**	**chapas finas para uso estrutural**	**bobinas a frio ou a quente**
ABNT CF-26	**260**	**420**	**chapas finas para uso estrutural**	**bobinas a frio ou a quente**
ZAR 345	**345**	**430**	**corpo e tremonhas**	**chapas ou bobinas**
SAC - 50	**≥ 343**	**≥ 461**	**corpo de silos e estrutural**	**chapas ou bobinas a quente**
NBR LNE - 38	**≥ 375**	**≥ 440**	**corpo e tremonhas**	**chapas e bobinas a quente**

TABELA 2.10 - Aços para Silos

Quanto a espessuras de chapas as normas Brasileiras disponíveis são: a “Norma para Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios NBR 8800/86” e a “Norma para Cálculo de Estruturas de Aço constituída por Perfis Leves NB-143/67”. A primeira, limita a espessura mínima das chapas em 3 milímetros, e a segunda limita a espessura no intervalo entre 1 a 6 milímetros.

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

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

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

8.3. - Parafusos Estruturais

8.3.1 - Parafusos comuns

São parafusos feitos com aço a baixo carbono e por não possuírem nenhum tratamento especial, são mais econômicos e largamente utilizados em ligações

estruturais. Para proteção contra a corrosão, estes parafusos podem ser zincados ou bicromatizados.

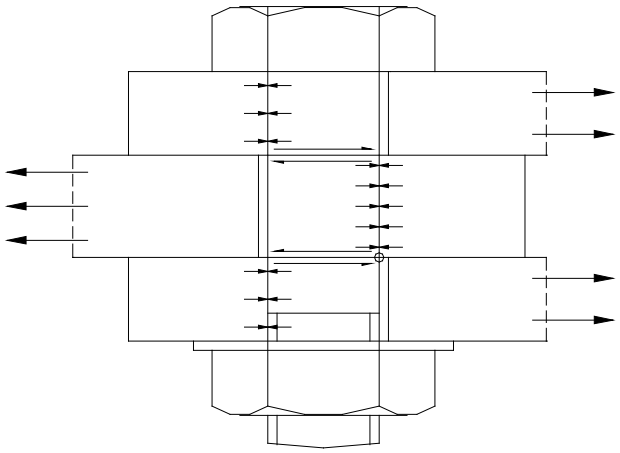


FIGURA 2.50 - Parafuso comum

Estes parafusos transferem os esforços de cisalhamento diretamente por contato entre o parafuso e as superfícies internas dos furos das chapas (FIG. 2.50). São normalmente utilizados em estruturas sujeitas a cargas estáticas. Nesta categoria estão os parafusos ASTM A307 (OWENS & CHEAL, 1989).

8.3.2 - Parafusos de alta resistência

São parafusos feitos com aço a médio carbono, com aço liga, ou que passaram por tratamento térmico. Portanto, sua resistência à tração pode ser várias vezes maior do aquela dos parafusos comuns.

Estes parafusos são apertados contra as partes a serem unidas até adquirir uma alta tensão de tração. As partes unidas desta maneira, são impedidas de se deslocarem quando solicitadas por tração devido a alta pressão de atrito desenvolvida pelo aperto (FIG. 2.51). Nesta categoria estão os parafusos ASTM A325 e ASTM A490 (OWENS & CHEAL, 1989).

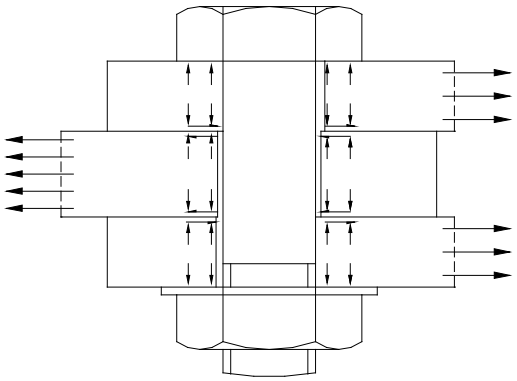


FIGURA 2.51 - Parafusos de alta resistência

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

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

8.3.3. Nomenclatura internacional

Atualmente os parafusos, porcas e arruelas tendem a ser fabricados obedecendo normas internacionais (ISO - International Organization for Standardization), embora as normas nacionais sejam usadas como complementação de documentos.

Pela ISO as propriedades mecânicas dos parafusos são definidas pelo código "X.Y". O "X" equivale a 1/100 da resistência última à tração do parafuso em MPa, e o "Y" equivale a 10 vezes a relação entre a resistência ao escoamento e a resistência última, ou seja, $10.\left(f_y / f_u\right)$.

Nem todas as designações fornecem valores exatos, mas em ordem de grandeza dão razoáveis aproximações. Na tabela a seguir são fornecidos alguns exemplos desta nomenclatura:

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

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

8.4 - Soldas

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

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

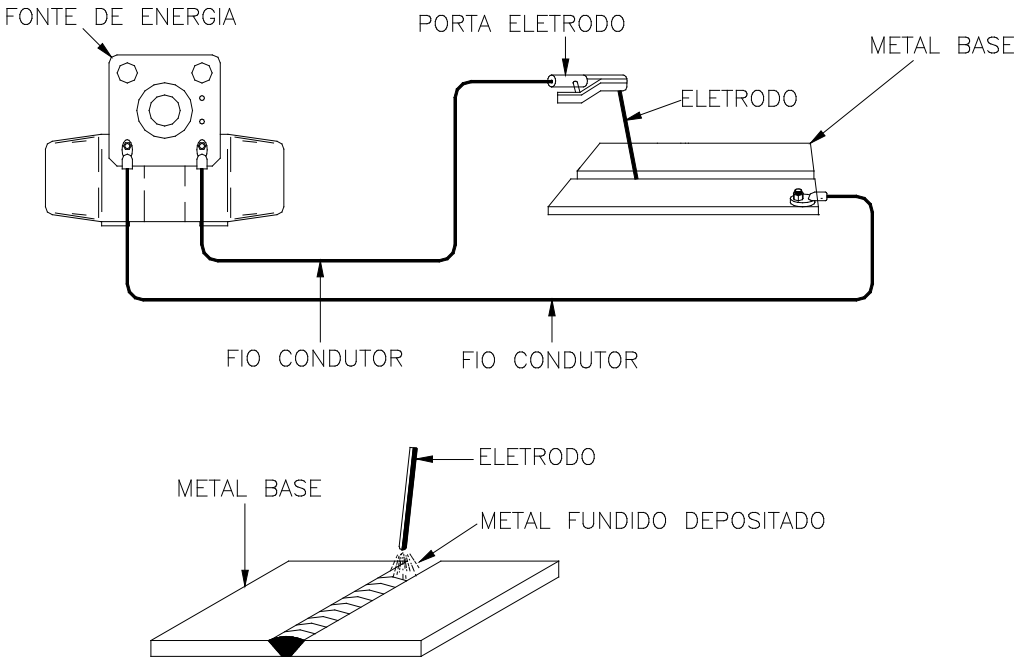


FIGURA 2.52 - Soldagem com eletrodo revestido

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

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

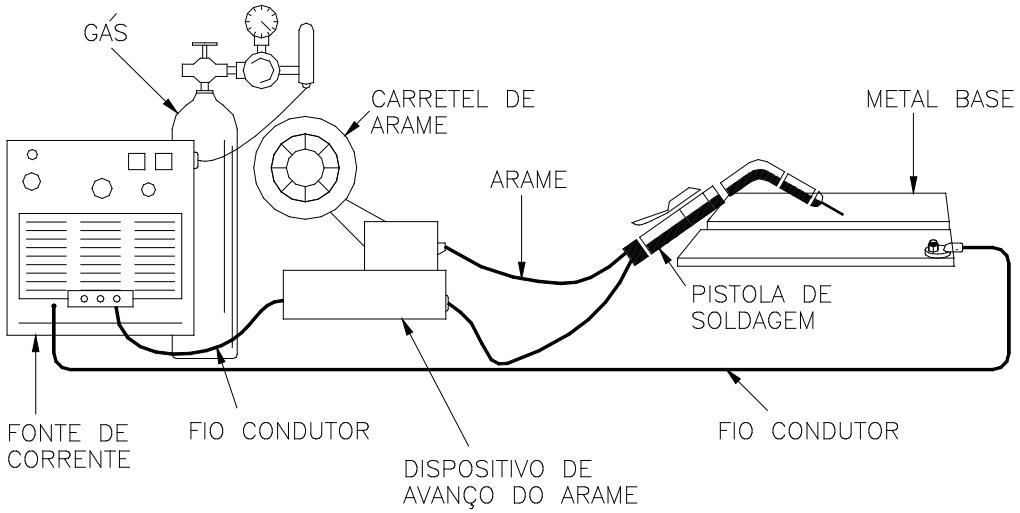


FIGURA 2.53 - Processo de soldagem MIG/MAG

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

O processo de soldagem a Arco com Proteção Gasosa (GMAW) se subdivide nos processos MIG (Metal Inert Gas) e MAG (Metal Active Gas).

Estes processos utilizam um eletrodo consumível na forma de arame bobinado, alimentado continuamente para a zona de trabalho (FIG. 2.53). A proteção do eletrodo é obtida através de um tipo de gás inerte (MIG) ou por uma mistura de vários gases ativos (MAG). Dependendo da técnica de soldagem pode-se soldar materiais base com espessuras acima de 0.13 milímetros.

A identificação dos arames para o processo MIG/MAG também é feito por códigos. O código utilizado é "ER - $n^{o}_{_}$ S-X", onde "ER" indica ser eletrodo em fio ou vareta, "$n^{o}_{_}$" é o valor da resistência mínima à tração do metal depositado (este número é dado em múltiplos de 1000 psi, o qual deve ser multiplicado por 6.9 para obter o valor em MPa), "S" indica eletrodo sólido, e "X" relaciona o tipo de composição química. A Tabela 2.12 fornece alguns tipos de arames de aço utilizando-se este código.

Arames de Aço para Soldagem TIG / MIG / MAG						
Especificação	Composição	TIG	MIG / MAG			Observações
		Argônio	Ar - O_2	Ar - CO_2	CO_2	
ER - 70S-2	C 0.050 Mn 1.00 Si 0.500 Ti 0.100 Zr 0.070 Al 0.100	⊗	⊗	⊗	⊗	Utilizados para soldagem de aços com superfície enferrujada ou suja. Usado para solda fora de posição, com transferência por curto-circuito devido a facilidade de

						operação.
ER - 70S-6	C 0.100 Si 0.900 Mn 1.00	⊗		⊗	⊗	Para solda de aços ao Carbono comuns, vasos de pressão com resistência a tração máxima de 620 N/mm^2 e chapas navais. Estruturas em geral com aços ao Carbono.

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

As vantagens do processo de soldagem MIG/MAG pode ser relacionado em seguida:

- a soldagem pode ser feita em todas as posições (comparado com o arco submerso);
- é o único processo com eletrodo consumível que pode ser utilizado em todos os metais e ligas;
- possui eletrodo com alimentação contínua, o que elimina as paradas para a troca de eletrodo (comparado com o eletrodo revestido);
- as taxas de deposição são bastantes elevadas (comparado com o eletrodo revestido);
- as velocidades de soldagem são mais elevadas (comparadas com o eletrodo revestido e TIG);
- as soldas de grande extensão podem ser feitas, pois o eletrodo é contínuo;
- a limpeza após a solda é mínimo;
- o custo total da soldagem é muito inferior ao do eletrodo revestido;
- é de fácil aprendizado do processo.

Por outro lado, como desvantagens pode-se citar:

- o equipamento é mais complexo, mais caro e menos portátil (comparado com o eletrodo revestido);
- o acesso é difícil em locais restritos, devido ao bocal da tocha;
- não pode ser usado onde existam correntes de ar;
- os níveis de radiação e calor são maiores do que em outros processos.

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

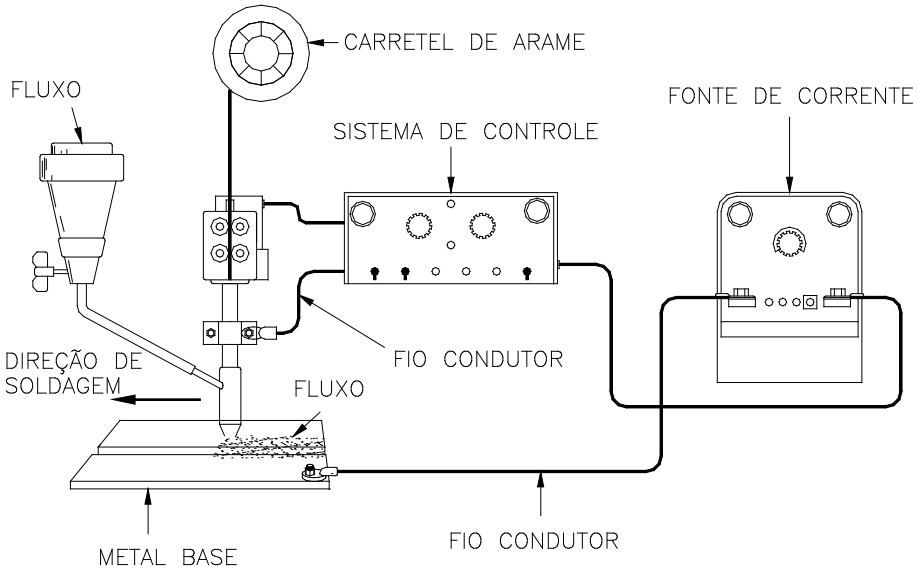


FIGURA 2.54 - Soldagem a arco submerso

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

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

Como vantagens deste processo, pode-se citar:

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

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

Arames de Aço para Arco Submerso		
Especificação	Composição	Observações
E A2	C 0.10 Si 0.10 Mn 1.10 Mo 0.50	Para solda de aços de baixa liga de alta resistência até 550 N/mm^2 de resistência a tração, aços para caldeiras e vasos de pressão, adequado para temperaturas de serviço até 500 ^oC. Usar fluxos básicos.
E A3	C 0.11 Si 0.10	Arame de aço Mn-Mo para solda de aços de alta

	Mn 1.90 Mo 0.50	resistência (até 620 N/mm^2), bem como aços para vasos de pressão, caldeiras e tubulações. Temperatura de serviço até 500 ^oC. Combinação com fluxos básicos.

TABELA 2.13 - Arames de Aço para Arco Submerso

No processo de Soldagem a Arco com Eletrodo de Tungstênio e Proteção Gasosa (GTAW) ou também denominado de TIG (Tungsten inert-gas), o calor é fornecido pelo arco protegido por um gás inerte, formado entre a peça e um eletrodo não consumível de tungstênio (FIG.2.55). Os gases de proteção mais usuais são: argônio, hélio ou mistura desses gases. A proteção gasosa evita a oxidação atmosférica do eletrodo de tungstênio e resfria o mesmo, promovendo um arco estável, além de proteger o arame e o banho fundido de solda.

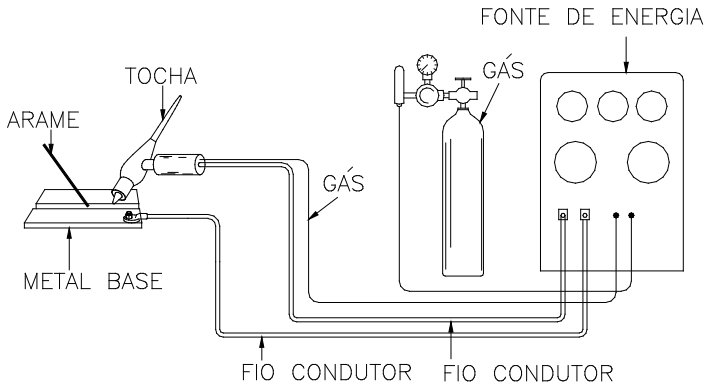


FIGURA 2.55 - Soldagem TIG

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

O processo TIG é indicado para soldagem de chapas finas, utilizando vários tipos de arames consumiveis.

As vantagens desse processo podem ser:

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

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

9 - RECOMENDAÇÕES PARA O PROJETO DE SILOS METÁLICOS VERTICAIS.

9.1 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 250µm. 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).

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

Produto	Densidade	Atrito interno	Coeficiente de atrito com a parede		
	kN/m^3	(°)	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
clinquer	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

9.2 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.

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 pode 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
- faze-las mais lisas; ou
- usar vibração, ou outros métodos que possuam o efeito de reduzir o atrito na parede da tremonha.

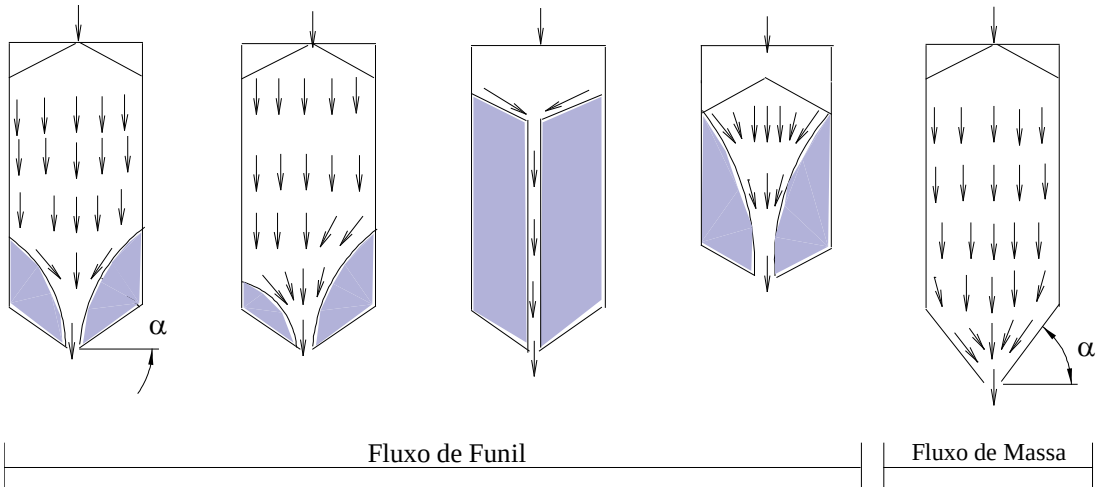


FIGURA 22 - Tipos de fluxo

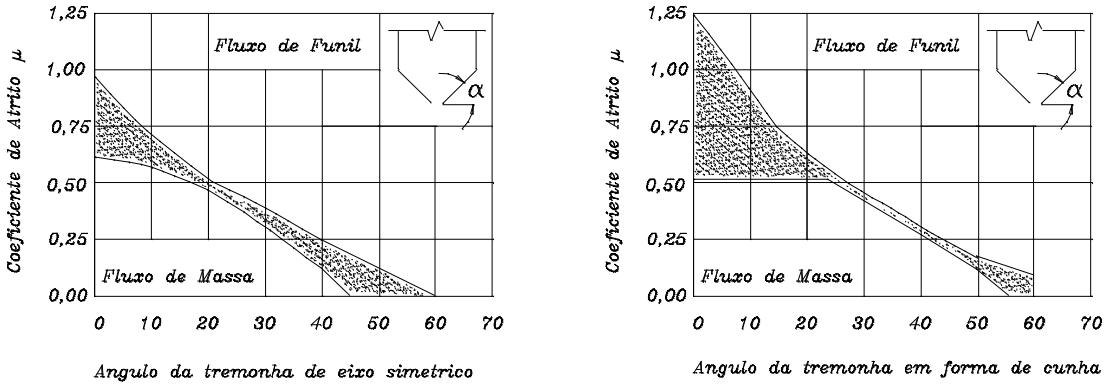


FIGURA 23 - Determinação gráfica do tipo de fluxo (DIN 1055, 1987)

9.3. Pressões no silo.

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 esta norma foi completamente reformulada de sua antiga versão de 1964, em vista de experiências práticas na utilização da mesma, baseadas em acidentes em 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 observar a importância de evitar as regimes de contorno) e escolher o valor máximo em cada caso.

Considerações especiais devem ser feitas para pressão de ar ou vácuo, por exemplo, em sistemas pneumáticos de transporte. Particular atenção deve também ser dada para os possíveis efeitos de cargas instáveis e dinâmicas, e para condições de carregamento e descarga excêntricos. Se houver saídas múltiplas, as pressões excêntricas dever,o ser consideradas. Se houver qualquer perigo de explosão e o silo tiver janelas de saída de ar para explosão, ent,o esta pressão do ar considerada deve ser adicionada nas pressões das paredes a ser calculadas.

9.4. Projeto Estrutural.

Silos metálicos e de concreto devem ser analisados separadamente devido aos aspectos críticos de carregamento do silo diferirem marcadamente. Outros materiais estruturais devem ser classificados como sendo silos flexíveis de parede fina ou silos rígidos de parede espessa. Deve-se analisar e entender o efeito do carregamento na estrutura, não apenas na distribuição das tensões induzidas, mas também o critério apropriado de ruptura e modos correspondentes de colapso.

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.

Os silos metálicos quadrados são normalmente do tipo multicelular, de tal modo que existe uma interação entre as células e todo o conjunto, incluindo a fundação, devendo serem estudados como um elemento que se vê submetido a cargas locais que produzem deslocamentos elásticos, afetando outras partes da estrutura.

Nas fundações ocorrem recalques diferenciais que afetam o resto da estrutura mediante esforços de tração e momento nos nós dos engastamentos.

O silo metálico quadrado se constrói com paredes relativamente delgadas, em relação a espessura, corrugadas para aumentar sua resistência à flexão, e nós de ligações rígidos que absorvem os momentos de engastamento. As pressões laterais de carregamento e sobrepressões de descarga, quer sejam uniformes ou excêntricas, são absorvidas pelas paredes à flexão, produzindo momentos nos engastamentos que são variáveis em função da variação das pressões e que produzirão deslocamentos infinitesimais que a inércia da estrutura absorverá.

Estas instalações se construíam inicialmente com tubos de descarga estático para evitar sobrepressões de descarga, mas problemas estruturais por entupimento destes tubos abandonaram esta prática.

A colocação de tirantes interiores para reduzir o vão da parede é válida para o armazenamento de produtos granulares, mas pode ser muito perigoso para o armazenamento de produtos pulverulentos coesivos.

Silos construídos com espessuras de parede insuficientes e destinados ao armazenamento de produtos granulares podem apresentar deformações ao longo da parede. Se são armazenados produtos pulverulentos coesivos, a deformação da parede é pontual e devida à caída de abóbadas . As caídas de abóbadas em silos com altura superior à 15 metros podem originar deformações na parte baixa, para fora, e deformações por depressões na parte alta do silo, para dentro (Calil,1982).

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.

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

- as máximas forças acumulavas 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 infortunadamente, demonstrado pouca atenção à maioria desses pontos.

9.5. Informações a Serem Fornecidas ao Projetista e ao Usuário

9.5.1. 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.

9.5.2 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 infreqüente;
- 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.

9.5.2.1 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 umidade 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 objetivos 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: toxidade 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.

9.5.2.2 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.

9.5.3 Informações a Serem Fornecidas pelo Projetista

9.5.3.1 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 m^3 de capacidade).

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

9.5.3.2 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.

9.5.3.3 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 descarga 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.

9.5.3.4 Acesso, Inspeção, Limpeza e Manutenção

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

9.5.3.4.1 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.

9.5.3.4.2 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.

9.5.3.4.3 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.

9.5.3.4.4 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.

9.5.3.4.5 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.

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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUE. Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos and bunkers for storing granular materials. (ACI 313-77). 1977. Revised 1983.

AUSTRALIAN STANDARD. AS 3775 - Loads on bulk solids containers, Sydney, 1990

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6152: Determinação das propriedades mecânicas a tração de materiais metálicos. Rio de Janeiro; ABNT 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.NBR 8800: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios. (método dos estados limites). Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

AYALA, A.J. Trazado y calculo de caldeira. Bilbao: Urno, S.A. de Ediciones, 1975, 379p

ARAUJO, E.C. Silos metálicos cilindricos: Recomendações mínimas de projetos. XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 1995.

AYUGA, F. Los empujes del material almacenado en silos. Informes de la Construcción, vol. 46, n. 436, pg 27-34, 1995.

AMON, R. et al. Steel design for engineers end achitects. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982. 412 p.

AALAMI, B., WILLIAMS, D.G. Thin plate design for transverse loading. London: Beccles and Colchester, 1975, 194p.

BMHB - British Materials Handling Board. Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers. Inglaterra, 1985. 101p.

BARES, R. Tablas para el calculo de placas e vigas pared. Barcelona, Gustavo Gili, 1972.

BLAKE, A. Threaded fasteners. Editora: Marcel Dekker, Inc. New York, USA, 1986, 202p.

BLODGETT, O.W. Design of welded structures. Ohio: The James F. Lincolw Arc Welding . Foundation, 1966, 874p.

BRESLER,B., et al. Diseno de estructuras de acero. México: Editorial Limusa, 1988. 926p.

BENINK, E.J. Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes. Tese (Doutorado) - Universiteit Twent, The Netherlands, 1989, 162p.

BARATA, F.E. Propriedades da mecânica dos solos. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos Editora S.A, 1984, 152p.

BORN, J. Hipped-plated structures, London: Crosby Lockwood & Son Ltd, 1962, 250p.

CALIL JR., C. Recomendações de fluxo e de ações para o projeto de silos verticais. São Carlos, 1990. 186p. Tese (Livre Docência)

CALIL JR., C. Estudo teórico e experimental das pressões em silos verticais cilíndricos de pequena relação altura/diâmetro. In: COLLOQUIA 1987, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1987. v.3, p.229-243.

DIN 1055. Lastannahmen für Bauten, Blatt 6, Lasten in Silozellen. Alemanha, 1987. 12p.

FIP/ISO. Recommendation for concrete silo design.
Federatión Internationale de la precontrainte. Norma Européia. (em execução).

JENIKE, A.W. Denting of circular bins with eccentric drawpoints. J. of the Struct. Div., ASCE, v.93, ST1, Feb., 1967. p.647-655.

JENIKE, A.W., JOHANSON J.R. and CARSON, J.W. Bin loads in 3 parts. Jnl of Engg for Industry, ASCE, v.95, 1, Feb., 1973. p.1-5, 6-12, 13-20,

NCSE. Guidelines for the assessment of loads on bulk solids containers. Austrália: National Committee on Structural Engineering. The Institution of Engineers Australia, 1987. 59p.

SNBATI. Reglas para proyeto y calculo de silos de hormigón. França: Sindicato Nacional del Hormigón Armado y Técnicas Industrializadas, 1975. 47p.

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

MILANI, Adhemar Pitelli. **Determinação das propriedades de produtos armazanados para projetos de pressões e fluxo em silos.** São Carlos, 1992. 272p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

JENIKE, A. W. **Storage and flow of solids.** Bolletin of the University of Utah. Sat Lake city. Utah. Estados Unidos, 1964, 197p.

ASSOCIAÇÃO BRASLEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6125. Forças devidas a o vento em edificações. 1988.

CALIL Jr., Carlito. **Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos**. São Carlos - SP. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulom 1984, 184p. (Apostila).

_____, **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos vertivais.** São Carlos-SP. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1984, 200p. (Apostila).

BMBH (1985). British metarials handling board. **Draf cade of practice for the design of silos, bins, bankers and hoppers. Inglaterra, 101p.**

TROITSKY, M. S. On the structural analysis of retangular stell bins. Journal Powder Tecnology, n.4 v.4 1980. pp 19-25.

TROITSKY, M. S. Tubular steel strucutures. Cap. 7 Analysis and design of bins and bunkers. 1988. pp7.1-7.72

GRAY, W. S. Concrete water, towers, banks, silos and other elevated structures. 5 ed. Cemente Association. 1973. 372p.

LUSAS. Theory manual. FEA LIMITED. 1992.

RAVENET, J. Silos. Barcelona. 1992. 380p.

RAVENET, J. Teoria, investigacion e construcion. Editores Associados. 1983

ROTTER, J. M. Design of steel bins for the storage of bulk solids. University od Sidney. 1985. 57p.

WATERS, J. K. A theoritical analysis of stres in axially symmetric hopper and bunkers. Chemical Enginnering Science. 1973. pp779-789.

CALIL JR., C. Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. São Carlos, USP, 1990, 198p.

CALIL JR, C. Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, SP, 1984, 184p.

CARSON, J.W., JENKYN, R.T. Load development and structural considerations in silo design. proceedings n. 96, p. 237-254, august, 1993.

CLINCH, J.A. Minimun considerations in design of bins for bulk solid. Coletânea de artigos publicados pela Universidade de Sydney, Austrália, 1985, p. 198-204.

CAPUTO, H.P. Mecânica dos solos. V.1 - Rio de Janeiro: Livros técnicos e ceintíficos, 1978, 241p.

CAPUTO, H.P. Mecânica dos solos. V.2 - Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1978, 456p.

CARY, H.B. Modern welding tecnology. New Jersey: Prentice - Hall, 1979, 736P.

CHIA, C. Nonlinear analysis plates. New York: McGraw-Hill, 1980, 422p.

DUKE, D., HILL, J.L. Load transfer in skip welded stiffened panels. Compters & structures, v. 21, n. 5, p. 973-985 - 1989.

DEUTSCHE NORM, Latannhinen für. Bauten, blatt 6, Lasten in Silozellen, DIN 1055-87, Alemanha, 1987, 12p.

DIAS, A.T. Curso de Cálculo Infinitesinal. Tomo II. Ouro Preto: Fundação Forceix, 1962, 841p.

DRAPINSKI, J. Elementos de soldagem. São Paulo. McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1979, 280p.

DRESCHER, A. Analytical methods in bin-load analysis. Amesterdan: Elsevier science Publishers B.V., 1991, 255p.

DARKOV, A. KOZNETSOV, V. Curso de mecânica das estruturas. Porto: Livraria. Lopes da Silva-Editora, 1982, 680p.

EUROCODE 1: Basis of design and actions on structures, 1992.

EUROCODE 1: Basis of design and actions on structures, Part 4: Action on Silos and Tanks, 1993.

FEODOSIEV, V. I. Resistencia de materiales. Moscu: Editorial Mir, 1988, 583p.

FILHO, J.F.- Uma introdução ao estudo dos silos. São Carlos, 1985, 427p. Dissertação(Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

GORENC, B.E. Design of supports for steel bins. Coletânea de artigos publicados pela Universidade de Sydney, Austrália, 185, p. 184-188.

GAYLORD,E.H., GAYLORD, C.N. Design of steel bins for storage of bulk solids. New Jersey: Pretince-Hall, Inc. 1984, 359p.

HARKER, R.J. Elastic methods of desing analysis. New York: Elservier Science Publishing. Co. Inc., 1986, 441p.

HARARI, I. Finite element analysis of stiffened plates. Computers & Structures, V.21, n.5 p.973-985, 1985.

HARTOG, J.P.D. Advanced strength of materials. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1952, 379p.

HIBBELER, R.C. Estática. V.1. Rio de Janeiro: Editora Campus Ltda. 1986, 475p.

HOULSTON, R. Finite strip analysis of plates and stiffened panels subjected to air-blast loads. Computers & Structures, V. 32, n.3/4, p. 647-659, 1989.

ISHKAWA, R.K. Silos pré-fabricados. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1976.

IMMENGA, R. Silos in acier. Acier-stahl-steel, n.4, p. 156-161, 1973.

ISNARD, V. et al. Formulario del Ingeniero. Bilbao: Artes Gráficos Grijelmo, S.A 1971, 708p.

JAEGER, L.G. Elementary theory of elastic plates. London: Pergamon press Ltd., 1964, 108p.

JENIKE, A.W. Storage and flow of solid. Bulletin of the University of Utah, n. 123, Utah, 1980, 197p.

KAUPS, T., LIEB, J.M. A pratical guide for the design of quality bulk storage bins and silos. Coletânea de artigos publicados pela Universidade de Sydney, Austrália, 1985., p. 205-220.

KALMANOK, A.S. Manual para cálculo de placas. Montevideo: Editora Inter Ciencia, 1961, 285p.

KORN, G.A. KORN, T. M. Mathematical handbook for scientists and engineers. New York: MacGraw-Hill Book Company, 1968, 1130p.

KAREEM, A. Wind tunnel modeling. Coletânea de artigos publicados pela Universidade de Sydney, Austrália, 1985, p.40-48.

KOKAL, V.E., GORDON, I. Effetive width for siffener. Modern steel construction, October, p. 10, 1995.

LAFITE, J. Hermetc silos of welded steel. Acier-Stahl-Steel, v. 3, 1979, p. 99-102.

LOTHERS, J.E. Diseno de estructuras metalicas. Madrid: Editorial Prentice Hall International, 1973, 560p.

LAERMANN, K. Experimentelle Plattenuntersuchungen. Dusseldorf: Wern-Verlag, 1972, 223p.

MILANI, A. P. (1993): Determinação das propriedades de produtos armazenados para projeto de pressões e fluxo em silos. São Carlos, Escola de São Carlos da Universidade de São Paulo, 272p. (Tese de doutorado)

MURRAY, N.W. Design aspets of thin-walled steel silos. Coletânea de artigos publicados pela Universidade de Sydney. Austrália, 1985. p.158-163.

MERIAN, J.L. Estática. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1985. 326p.

MOLITERNO, A. Elementos para projeto em perfis leves de aço. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1989, 209p.

MEHTA, K.C. Wind loads. Coletânea de artigos publicados pela Universidade de Sydney, Austrália, 1985., p.34-39.

NEFF, D., HUSS, C. Horizontally stiffened membrane hoppers analyzed by vertical work versus finite element. Part.1, V.3. n.4, november, 1983.

NEFF, D., HUSS, C. Horizontally stiffened angular hopper analyzed by beam action versus finite element. V.4, n.2, june, 1984.

OWENS, G. W., CHEAL, B. D. Structural Steelwork Connections. London, 1989, 330p.

PISKUNOV, N. Cálculo diferencial e integral. Moscu: Mir, 1973. V.2, 517p.

ROTTER, J. M. The structural desing of light gauge silo hoppers. Research Report N. R571, 45p. Universidade de Sydney,, Austrália, may 1988.

RAVENET, J. Silos. Barcelona: IMGESA, 1992, 508P.

REIMBERT, A., REIMBERT, M. Silos, Teoria y Practica. Tucumán: Editorial Américalee, 1979, 463p.

RAVENET, J. Silos. Barcelona: Editores técnicos associados, S.A. 1977, 381p.

ROBERTS, A.W. Storage, flow and handling of bulk solids. The University of Newcastle, february, 1987.

REKACH, V.G. Problemas de la teoria de la elasticidad. Moscu: Editoral Mir. 1978, 388p.

ROBERTS, A.W. 100 Years of Janssen. Bulk Solids Handling, V.15, n.3 July/September, 1995, p.369-383.

SILVA, E. M. et al. Fundamentos de ensaios mecânicos de metais. Belo Horizonte: UFMG, 1980, 443p.

STRUCTURAL WELDING CODE-STEEL. ANSI / AWS D1.1-86. Miami, 1986.

SOUZA, S.A. DE. Ensaios mecânicos de materiais metálicos. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 1982. 286p.

SHAMES, I. H. Introdução à mecânica dos sólidos. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, Inc. 1983, 556p.

SAFARIAN, S.S.- Design and construction of silos and bunkers. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1985, 468p.

SOARES, E.V. Armazéns e silos. Preservação de grãos alimentícios. Rio de Janeiro, 1964, 194p.

TRAHAIR, N.S. Characteristics of structural form. Coletânea de artigos publicados pela Universidade Sydney., Austrália, 1985, p.55-57.

TRAHAIR, N.S. Criteria of failure. Coletânea de artigos publicados pela Universidade de Sydney, Austrália, 1985., p. 113-121.

TRAHAIR, N.S. et al - Structural design steel bins for bulk solids. Australian Institute of steel construction, Sydney, 1983.

TRAHAIR, N.S. The behavior and design of steel structures. London: Chapman and Hall, 1977, 320p.

TROITSKY, M.S. Tubular steel structures; theory and design. Montreal, 1982. 369 p.

TROYTSKY, M.S. Design considerations for rectangular steel bins. Canadian structural engineering conference, 1980, 43p.

TROITSKY, M.S. Orthotropic bridges theory and design. Ohio: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1968, 256p.

TROITSKY, M.S. Stiffened plates: bending, stability and vibrations. Amsterdam: Elsevier. Scientific Publishing Company, 1976, 410p.

TIMOSHENKO, S. P. Theory of plates and shells. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc. 1940, 492p.

TIMOSHENKO, S. P. Resistência dos Materiais, VII. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1966, 518p.

VAZ, J. Silos verticais de madeira compensada. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1987-346p.

VOLTERRA, E., GAINES, J.H. Advanced strength of materials. Englewood Cliffs. Prentece-Hall, 1971, 522p.

WOHLBIER, R.H. Silos, hoppers bins & for storing bulk materials. The best of bulk solids handling, 1981-1985. V.A/86. Calusthal-Zellerfeld: Trans tech publications, 1986, 470p.

WALKER, D.M. An approximate theory for pressures and arching in hoppers. Chemical Engineering Science, V.21, p.975-996, 1966.

WESTBROOK, R. Structural engineering desing in pratice. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1988, 262p.

WALKER, D.M., BLANCHARD, M.H. Pressures in experimental coal hoppers. Chemical Enginerring Science, V.22, p.1713-1745, 1967.

YU, W.W. Cold-formed steel design. New York: John Wiley & Sons. Inc., 1991, 631p.

YANG, H.Y. Finite strip method with x-spline functions. Computers & Structures, V.18, n.1, p. 127-132, 1984.

GLOSSÁRIO

- ângulo de atrito com a parede: tangente do coeficiente de atrito com a parede.
- ângulo de atrito interno com o tempo (###$_t$): inclinação do TYL do ponto tangente com o circulo de Mohr de tensões passando através da orígem.
- ângulo do efetivo lugar geométrico de deslizamento (###): 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.
- circulo de Mohr de tensões: representação gráfica do estado de tensões nos eixos de tensão normal e cisalhamento,isto é, plano ### x ###
- 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 equilateral com relação ao eixo vertical.
- fator fluxo (ff): relação entre a tensão máxima de consolidação $###_m$ em um produto fluindo em um canal e a tensão máxima principal $###_1$ 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 ($###_c$): 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 (###$_m$): 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 (###$_1$): tensão normal máxima principal representada pelo círculo de Mohr de tensões. É o valor máximo do ponto de interseção do circulo de Mohr com o eixo normal de tensões.
- tensão principal: tensão normal atuando no plano onde não existe tensão de cisalhamento.