

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

Recomendações de Fluxo e de Cargas
para o Projeto de Silos Verticais

Prof. Dr. CARLITO CALIL JUNIOR

São Carlos - 1990

**RECOMENDAÇÕES DE FLUXO E DE CARGAS
PARA O PROJETO DE SILOS VERTICAIS**

PROF. DR. CARLITO CALIL JUNIOR

A GILBERTA, NETO E RUI CESAR

AGRADECIMENTO.

Para a elaboração desta pesquisa, tive a grande honra de ser prestigiado por eminentes professores de universidades nacionais e estrangeiras que me apoiaram, não apenas na área técnica e econômica, mas também, e sobretudo, na amizade e incentivo. A maior riqueza que consegui com este trabalho foi a inesquecível amizade com ilustres professores dos centros europeus com os quais trabalhei, e a conquista do intercâmbio científico com os mesmos.

Mas não é tudo. Não haveria espaço, nem palavras para agradecer a todas as demais pessoas, que direta ou indiretamente, tornaram possível este trabalho. Através do magistério dos notáveis pesquisadores com os quais trabalhei, pedimos vênias para ressaltar, entre tantos, os seguintes mestres e instituições:

Universidade de São Paulo	- Prof. João Cesar Hallmeister
Universidade Politécnica de Barcelona	- Prof. Juan Ravenet
Universidade de Twente -	- Prof. Gerard Haaker
Universidade de Karlsruhe	- Prof. Josef Eibl
Universidade de Newcastle	- Prof. A.W. Roberts
Universidade de Utah	- Prof. A.W. Jenike
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.	

É a todos, indistintamente, minha perene gratidão.

Carlito Calil Junior

PREFACIO

O meu primeiro estudo na área de silos surgiu com o desenvolvimento da dissertação de mestrado "Estudo dos Silos de Madeira a Nível de Fazendas", com a finalidade de fornecer uma alternativa para a construção de tais estruturas nas propriedades agrícolas, utilizando madeira tanto como material estrutural quanto de revestimento (1975 a (1978). Este primeiro estudo foi ampliado; foram construídos e ensaiados dois protótipos para estudos, com financiamento FIPÉC do Banco do Brasil (1978 a 1980).

A revisão da literatura a respeito das cargas para o dimensionamento e os resultados experimentais encontrados nessa primeira fase incentivaram-me a continuar realizando esta linha de pesquisa e a aproveitar a oportunidade de realizar o doutorado na Universidade Politécnica de Barcelona (UPB), Espanha, com a orientação do Prof. Dr. Juan Ravenet (1981 a 1982) no estudo das pressões de materiais pulverulentos em silos.

Nesta segunda fase, a condição de desenvolver novos estudos na Espanha proporcionou uma evolução significativa pelas condições de pesquisas da UPB e pelo amplo tirocinio do orientador no assunto.

De volta ao Brasil, iniciei minhas atividades de orientação a nível de iniciação científica, mestrado e doutorado em duas áreas principais, a madeira, por ser professor contratado para exercer funções docentes nesta matéria, e os silos, pelo próprio conhecimento adquirido nos últimos sete anos de atividades.

A oportunidade de participação no Simpósio de Braunschweig, na Alemanha, em 1981, o relacionamento com pesquisadores internacionais e a oportunidade de apresentar um trabalho no Simpósio de Stratford Upon Avon na Inglaterra (Calil, 1983), em 1983, ampliaram ainda mais as condições de continuar os estudos e as atualizações das pesquisas em andamento no mundo neste assunto.

Durante o período de 1983 a 1987, continuei a orientar e desenvolver estudos e pesquisas na área, mantendo sempre os contactos conseguidos, e adquirindo os artigos internacionais de

mais recente divulgação.

Em 1988, tive a oportunidade de desenvolver atividades de pós-doutorado na Europa, durante 7 meses, trabalhando:

- com o grupo de pesquisa do Prof. Dr. Juan Ravenet, na Universidade Politécnica de Barcelona - Espanha, durante 3 meses, na análise estrutural e problemas decorrentes de deformações e ruína de silos reais. O Prof. Ravenet é gerente-técnico da maior indústria de silos metálicos na Espanha, sendo o responsável pelo projeto e construção de quase 500 instalações na Europa;

- com o grupo de pesquisa "Transport en Opstap", do Prof. Gerard Haaker da Universidade de Twente-Holanda, durante 3 meses, na determinação e análise das propriedades de fluxo dos materiais armazenados e no projeto e instalação de células de pressão em modelos e em silos reais;

- com o grupo de pesquisa "SFB SILOS", do Prof. Josef Eibl, da Universidade de Karlsruhe-Alemanha, durante um mês, no projeto de pesquisa 219 "Silobauwerke und ihre Spezifischen Beanspruchungen". Este grupo consta de 30 pesquisadores trabalhando na análise teórica e experimental das cargas de fluxo em silos, no planejamento e construção de silos e em problemas especiais na operação de silos;

- e realizando entrevistas com o Prof. R. W. Roberts, da Universidade de Newcastle da Austrália, Prof. A. G. Bishara, da Universidade Estadual de Ohio, Columbus-USA, Prof. F. H. H. Valentim, do Laboratório de Warren Spring da Inglaterra, além de outros pesquisadores internacionais nos centros de pesquisa acima mencionados e na Conferência Internacional "Bins-Research and Experience", realizada em Karlsruhe de 10 a 12 de outubro de 1988, onde tive oportunidade de apresentar um artigo (Calil, 1988).

Tais atividades proporcionaram-me condições de apresentar este trabalho e, com a pretensão de ser o primeiro, amplo e atualizado, na área de silos apresentado no Brasil, e que pretenderá fornecer condições para os industriais, engenheiros, pesquisadores e estudantes que trabalham ou que desejam trabalhar na área de armazenamento e manipulação de materiais armazenados, dando-lhes subsídios para o projeto de estruturas de armazenamento.

A ideia também deste trabalho é que o mesmo sirva como o texto

complementar e esclarecedor (explicativo) da Norma Brasileira para o projeto de estruturas de armazenamento, em desenvolvimento pela Comissão CE: 12:02.04, Silos e Secadores, do Comitê Brasileiro da Agricultura, Pecuária e Implementos - CB-12 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), da qual participo como pesquisador.

O aparelho de cisalhamento de Jenike, recém importado da Alemanha, através do projeto PADCT do CNPq, propiciará também maiores condições de continuação da pesquisa no Brasil, com resultados que podem ser comparados aos apresentados a nível mundial, pois é o aparelho utilizado pelos pesquisadores mundiais, e indicado pelos códigos internacionais.

Carlito Calil Junior
Março de 1989

RESUMO

Os principais objetivos desta pesquisa são o estudo das teorias e práticas que envolvem as várias fases de carregamento e fluxo de produtos armazenados, e apresentação de recomendações para o armazenamento destes produtos em silos.

O primeiro aspecto a ser considerado no projeto é a determinação das propriedades relevantes de resistência e fluxo de produtos armazenados. É importante que estas propriedades sejam determinadas para as piores condições possíveis para o fluxo do produto armazenado. A forma de determinar estas propriedades é discutida no capítulo 2.

Após a determinação das propriedades de resistência do produto, torna-se possível projetar silos que assegurem o tipo de fluxo desejado, sem obstruções e perturbações. Os procedimentos necessários para que isto ocorra são descritos no capítulo 3. Os parâmetros analíticos necessários para o projeto de silos são descritos no capítulo 4.

Para propósito do projeto estrutural, o conhecimento das pressões na parede sob condições estáticas (de carregamento) e dinâmicas (de descarga), bem como outras cargas que possam atuar nestas estruturas, e as respectivas orientações do efeito destas cargas nas mesmas, são estabelecidas nos capítulos 4, 5 e 7.

Finalmente, são apresentadas nos capítulos 6, 8 e 9, as recomendações para o projeto de fluxo e das cargas, com a finalidade de fornecer condições para a pesquisa, projeto e construção de estruturas de armazenamento.

ABSTRACT

The main objectives of this publication are to develop the theories and practices governing the various phases of bulk solids during storage and flow and to present design procedures for storage bin.

The first step in the design process is to determine the relevant strength and flow properties of the particular solid. It is important that the properties relevant to the worst conditions for flow of the bulk solid that are likely to be encountered in practice be determined. The measurement of the flow properties is discussed in chapter 2.

Once the strength and flow properties of the material have been determined, it is possible to design a storage bin which will ensure that a favourable flow pattern is achieved on discharge without obstructions to flow occurring. The relevant procedures are described in chapter 3. The analytical parameters for bin design are developed in chapter 4.

For structural design purposes a knowledge of bin wall pressures under static (filling) and dynamic (emptying) conditions, as other loads that can act in these structures, and the respective guidelines of the effect of these loads are established in chapter 4, 5 and 7.

Finally, the guidelines to the flow and loads design, are presented in chapters 6, 8 and 9, with the purpose to give conditions to the research, design and construction of storage structures.

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	1.1
1.1. Deficiências na Base Experimental de Ensaio em Silos	1.2
1.2. Deficiências na Base Teórica	1.3
1.3. Correlações entre Teorias e Experimentos	1.4
2. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS PRODUTOS ARMAZENADOS	2.1
2.1. Generalidades	2.1
2.2. Células de Cisalhamento	2.2
2.3. Escolha das Amostras	2.4
2.4. Determinação do Lugar Geométrico de Deslizamento (YL)	2.4
2.4.1. Amostras para a Determinação do Lugar Geométrico de Deslizamento	2.4
2.4.2. Determinação Simplificada do YL	2.7
2.4.3. Tensão Maior Principal de Consolidação	2.7
2.4.4. Tensão Inconfinada de Deslizamento	2.8
2.4.5. Ângulo de Atrito Interno	2.8
2.4.6. Efetivo Ângulo de Atrito Interno	2.9
2.4.7. Função Fluxo do Material	2.9
2.4.8. Efeitos do Tempo	2.10
2.5. Determinação do Lugar Geométrico de Deslizamento com a Parede (WYL)	2.10
2.5.1. Determinação do Ângulo de Atrito com a Parede	2.10
2.5.2. Mudanças no Ângulo de Atrito com a Parede	2.12
2.5.2.1. Mudanças Manipuláveis	2.12
2.5.2.2. Mudanças não Manipuláveis	2.13
2.6. Densidade	2.13
2.7. Ângulo de Repouso	2.14
2.8. Fatores que Modificam as Propriedades dos Produtos Armazenados	2.14
2.8.1. Distribuição das Dimensões das Partículas	2.14
2.8.2. Umidade	2.14
2.8.3. Aeração	2.15
2.8.4. Coesão das Partículas	2.15
2.8.5. Vibração	2.15

2.8.6. Propriedades Escorrega-Para (Slip-Stick)	2.16
2.8.7. Outros Fatores	2.16
2.8.8. Incertezas e Variabilidade	2.16
2.9. Ensaio Realizados	2.17
3. DETERMINAÇÃO DO FLUXO EM SILOS	3.1
3.1. Filosofia do Projeto de Células	3.1
3.1.1. Obstruções do Fluxo	3.2
3.1.2. Células de Fluxo de Massa	3.3
3.1.3. Células de Fluxo de Funil	3.5
3.1.4. Células de Fluxo Expandido	3.6
3.2. Projeto do Silo para Fluxo de Massa	3.7
3.2.1. Ângulo da Tremonha	3.8
3.2.2. Dimensões da Boca de Descarga	3.10
3.3. Projeto do Silo para Fluxo de Funil	3.13
3.3.1. Ângulo da Tremonha	3.13
3.3.2. Dimensões da Boca de Descarga	3.13
3.3.3. Fluxo Expandido	3.14
3.3.4. Tipos de Fluxo de Funil	3.15
3.3.5. Fluxo Instável e Excêntrico	3.16
4. DETERMINAÇÃO DAS CARGAS EM SILOS	4.1
4.1. Generalidades	4.1
4.2. As Principais Normas Existentes em Silos	4.3
4.2.1. Campo de Aplicação	4.4
4.2.2. Formas e Dimensões das Seções Transversais das Células - Rolo Hidráulico R	4.5
4.2.3. Relação entre as Pressões Horizontais e Verticais	4.12
4.2.4. Propriedades dos Materiais Armazenados	
4.2.5. Fluxo	4.15
4.2.5.1. Tipos de Fluxo	4.15
4.2.5.2. Predição do Tipo de Fluxo	4.18
4.2.6. Pressões a Considerar	4.21
4.2.7. Efeitos da Temperatura	4.57
4.2.8. Explosões em Silos	4.66

4.2.9. Pressões Adicionais Devidas à Insuflação de Ar	4.70
4.2.10. Pressões Adicionais Devidas às Cargas de Impacto	4.75
4.3. Análise Comparativa e Discussões das Normas Existentes	4.78
5. O TRATAMENTO PROBABILÍSTICO DAS CARGAS EM SILOS	5.1
5.1. Variabilidade das Cargas para o Projeto Estrutural	5.1
5.2. Pressões nas Paredes dos Silos	5.2
5.3. Efeitos das Cargas nas Paredes dos Silos	5.4
5.4. Exemplo Específico	5.5
5.4.1. Variabilidade Devida às Propriedades do Produto Armazenado	5.7
5.4.2. Variabilidade no Modelamento da Distribuição da Pressão	5.9
5.4.3. Variabilidade devida à Conversão de Pressão para Efeitos de Carga	5.10
5.4.4. Método Alternativo de Estimativas da Variabilidade	5.11
5.5. Discussões	5.12
5.5.1. Bases Alternativas para Estimar Variabilidade	5.12
5.5.2. Aplicação dos Modelos Probabilísticos	5.14
6. INFORMAÇÕES A SEREM FORNECIDAS AO PROJETISTA E AO USUÁRIO	6.1
6.1. Informações a serem Fornecidas pelo Usuário	6.1
6.1.1. Objetivos	6.1
6.1.2. Responsabilidade do Projetista	6.1
6.1.3. Materiais a serem manipulados	6.1
6.2. Informações a serem Fornecidas pelo Projetista	6.3
6.2.1. Manual de Projeto e Operação	6.3
6.2.2. Projeto para a Integridade do Fluxo	6.3
6.2.3. Projeto para a Integridade da Estrutura	6.4
6.2.4. Acesso, Inspeção, Limpeza e Manutenção	6.4
6.2.4.1. Acesso	6.4
6.2.4.2. Inspeção	6.5
6.2.4.3. Limpeza	6.5
6.2.4.4. manutenção	6.5

6.2.5. Segurança	6.5
7. ORIENTAÇÕES NO PROJETO ESTRUTURAL DE SILOS	7.1
7.1. Silos de Concreto Armado	7.1
7.2. Silos Metálicos	7.8
7.2.1. Silos Cilíndricos	7.8
7.2.2. Silos Quadrados	7.12
7.3. Silos de Madeira	7.17
7.4. Conclusões	7.19
8. RECOMENDAÇÕES PARA O PROJETO DE FLUXO E DE CARGA EM SILOS VERTICAIS	8.1
8.1. Análise das Características do Material a ser Armazenado	8.2
8.2. Tipo de Fluxo	8.2
8.3. Determinação das Propriedades dos Produtos Armazenados	8.2
8.4. Determinação da Forma da Tremonha	8.3
8.5. Dimensão da Abertura de Descarga do Fundo	8.3
8.6. Aditivos de Descarga	8.3
8.7. Controle da Vazão	8.4
8.8. Pressões no Silo	8.4
8.9. Projeto Estrutural	8.5
8.10. Segurança	8.5
8.11. Manual de Projeto e Operação	8.5
8.12. Requisitos Especiais	8.5
8.13. Projetos Usando Computador	8.6
9. PERSPECTIVAS PARA AS NOVAS PESQUISAS	9.1
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	10.1

1. INTRODUÇÃO.

Os silos, células, armazéns a granel e tremonhas, que chamaremos silos por facilidade, são largamente usados na indústria, mineração e agricultura. Eles são entretanto, difíceis de projetar com relação a fluxos contínuos e como estruturas econômicas e seguras, devido aos materiais particulares a serem armazenados terem propriedades diferentes daquelas dos líquidos e dos sólidos. Quando usado na indústria, a produção industrial pode parar por interrupção do fluxo em um silo. Estas são também uma das estruturas que têm um dos mais altos índices de ruínas.

Estas ruínas têm conduzido vários países a desenvolver códigos práticos durante os últimos 25 anos, dos quais podemos ressaltar: a República Federal da Alemanha, USA, URSS, França, Alemanha Ocidental, Checoslováquia e Austrália. Os códigos alemães e norte-americanos, em particular, têm sido largamente usados.

A finalidade de uma especificação de cargas é fornecer condições para o projeto de estruturas de silos seguras e econômicas. Para uma estrutura ser segura e econômica, é importante que as cargas não sejam subestimadas nem especificadas como maiores que as estritamente necessárias. A segurança da estrutura somente pode ser determinada pelo conhecimento de qualquer um dos tipos e modos possíveis de ruínas que podem ocorrer na estrutura.

Incertezas consideráveis ainda existem com relação às pressões que atuam em um silo. Um exame dos códigos e regulamentações de cálculo por todo o mundo indica que grandes diferenças existem entre as recomendações para as cargas em silos. Além disto, estas cargas têm sido progressivamente aumentadas em anos recentes em consequência das rupturas e acidentes ocorridos em silos em todos os lugares.

Os códigos e regulamentações correntes são principalmente baseados em duas fontes: experimentos nos quais as pressões são medidas em silos reais ou modelos de silos, e em modelos teóricos que têm por finalidade fornecer meios de determinação das pressões em silos com base em um número limitado de testes de controle. Naturalmente estes dois grupos são interrelacionados desde que os experimentos são inicialmente interpretados à luz das teorias (por exemplo,

comparação com a fórmula de Janssen) e teorias são comparadas com experimentos para comprovar a validade. Não obstante, a ênfase relativa nestas duas fontes varia de código para código porque ambas as fontes são deficientes em alguns aspectos.

1.1. Deficiências na Base Experimental.

A vantagem de basear as regras dos códigos em observações experimentais é que haverá muitas vezes uma boa relação entre as pressões preditas e aquelas as quais estão sendo observadas. Uma dificuldade imediata aparece devido ao limitado campo de aplicação dos experimentos disponíveis. Em particular, muito poucas observações experimentais são avaliáveis para silos baixos (Calil, 1987).

Muitos resultados importantes têm sido obtidos de experimentos. É largamente aceito que as sobrepressões (ou pressões de fluxo excedendo as pressões de carregamento) devem ser esperadas durante a descarga. Entretanto, grandes diferenças são verificadas entre testes diferenciados em silos similares. Estas são encontradas em diferentes grandezas das pressões observadas e na posição e dimensão das zonas da parede exposta à sobrepressão. Estas diferenças podem ser atribuídas, principalmente, a dois fatores: técnica experimental mal utilizada e a variabilidade das propriedades do material e tipos de fluxo.

O resultado de técnicas experimentais mal utilizadas têm quatro razões principais: primeira, muitos dos experimentos que formam a base das regras de cálculo têm sido conduzidos por modelos de silos. Recente pesquisa (Munchen - Andersen 1986) tem mostrado que os resultados em testes com modelos não podem ser diretamente extrapolados para silos em escala real; segunda, tem sido mostrado recentemente (Askegaard et al, 1971) que muitas das células de pressão usadas para fazer observações durante os ensaios não são suficientemente rígidas, resultando em baixas medidas de pressões. Além disso, cuidado especial é necessário com a instalação da célula para obter dados confiáveis. Muitas das observações que formam a base das regras correntes de códigos podem ter sido feitas com a instalação de células de pressão insatisfatórias; terceira, em muitos experimentos, na determinação de pressões em silos, tem

sido assumido que somente uma variação limitada de controle de medidas é necessária para o sólido armazenado, como: densidade, ângulo de atrito interno e ângulo de atrito com a parede. Não existe certeza de que estes parâmetros são suficientes ou mesmo os melhores parâmetros para as medidas. Recente pesquisa (Hartlen et al, 1984) mostrou que o grão é um material muito complexo e que as características anisotrópicas com relação à orientação de partículas têm uma influência significativa nas pressões nos silos. Conclusões similares podem aparecer de testes com outros materiais armazenados; quarta, muitos experimentadores dedicam pouca atenção ao tipo de fluxo do sólido durante a descarga. Há uma evidência incontestável de que as pressões de fluxo são fortemente influenciadas pelo tipo de fluxo e que as observações feitas em um silo apresentando um tipo de fluxo não podem ser usadas no cálculo de silos com diferentes tipos de fluxo.

Finalmente, as pressões observadas que têm sido encontradas são fortemente afetadas pelas imperfeições geométricas na parede do silo (Askergaard et al, 1971). Isto tem importância vital para a construção dos modelos experimentais, para testes em escala real e para o cálculo do silo e posterior fabricação.

1.2. Deficiências na Base Teórica.

As especificações codificadas existentes para cargas em silos têm sido fortemente influenciadas por muitas teorias que têm sido desenvolvidas. Existem muitas teorias, mas as melhores conhecidas são aquelas de Janssen (1895), Walker (1966), Reimbert (1976), Walters (1973) e Jenike (1968, 1973). Todas estas teorias assumem que a pressão na parede varia somente com a altura no silo. Esta hipótese unidimensional não considera a variação da pressão na parede no plano horizontal. Além disso, todas, exceto a teoria de Reimbert, tratam da condição de contorno de equilíbrio no topo do material armazenado de um modo aproximado, tornando difícil de serem aplicadas com confiança em silos baixos.

Soluções mais rigorosas baseadas na teoria de plasticidade (por exemplo, Deutsch and Clyde, 1977) geralmente não conduzem a simples equações de cálculo, e são difíceis de serem obtidas para outras geometrias, senão aquelas de condições planas e de eixo simétrico.

Tanto as soluções de plasticidade e algumas teorias simples (Walters, 1973); (Jenike, et al, 1973) explicam as grandes pressões observadas no momento da descarga como a "mudança" do estado de tensões ativo para passivo (Jenike e Johanson, 1968), mas ignoram o fato de que o estudo de tensões não é plástico na maior parte de muitos silos, e eles muitas vezes prognosticam grandes pressões improváveis.

Tratamentos teóricos mais recentes, que aplicam relações constitutivas mais realísticas, mas complexas para o sólido em uma análise de elementos finitos (p. e. Hausster e Eibl, 1984), têm superado a primeira destas deficiências, mas novamente eles não consideram as variações das pressões nas paredes no plano horizontal. Todos estes tratamentos assumem comportamento homogêneo e isotrópico para o material armazenado.

Uma outra séria diferença nas teorias de pressões em silos é sua omissão das imperfeições geométricas nas paredes do silo. Esta tem sido um fator significativo na redistribuição das pressões em silos com fluxo de massa (Askegaard et al, 1971). Além disso, os testes bastante conhecidos de Jenike et al (1973) mostram que imperfeições geométricas são a causa principal das pressões de "mudança" em silos de parede vertical.

As únicas teorias que tratam da variação horizontal das pressões na parede são aquelas relacionadas com descarga excêntrica (Jenike, 1967; Wood 1983).

1.3. Correlação entre Teorias e Experimentos.

Algumas deficiências nas teorias e experimentos foram apresentadas acima, entretanto, algumas outras observações devem ser feitas com relação às comparações comumente realizadas entre elas.

Deve ser reconhecido primeiramente que parte da distribuição de pressões durante o fluxo de silos, em escada natural, se desenvolve de uma maneira aleatória caracterizada por duas observações importantes (Harlten et al, 1984). Testes repetitivos não mostram resultados idênticos, e a distribuição de pressões é observada mudando consideravelmente durante o fluxo contínuo. Como

consequência, a apresentação e a interpretação dos resultados experimentais são muito importantes. As curvas de máxima pressão ou envoltória, que são comumente desenhadas, representam a distribuição das pressões máximas que são, em geral, nunca (vistas) no mesmo momento. A razão para esta prática é quase óbvia. É natural que as maiores pressões tenham o conceito de serem as mais prejudiciais, e a quantidade de informações encontradas em um simples teste precisa ser representada de uma maneira simples. Além disso, as várias teorias existentes não dão indicação das variações da pressão. Portanto, em qualquer comparação da teoria com o ensaio, é natural que os pesquisadores adotem simplificadaamente a envoltória de pressões.

Por contraste com essas envoltórias, as curvas mostrando as pressões medidas no mesmo instante (curvas de equilíbrio) mostram pressões que são menores ou iguais à envoltória, mas que podem apresentar grandes gradientes de pressão na parede (Nielsen e Kristiansen, 1979). Um exemplo de uma pressão grande, mas transitória, detectada em um teste de um silo real é mostrada na figura 1.1. Leituras de três células de pressão espaçadas de somente 250mm são mostradas em dois, aparentemente, idênticos testes. Em um teste (figura 1.1.a), os gradientes de pressão são moderados, mas no outro teste (figura 1.1.b) alcançam 50 KPa, aproximadamente o dobro da pressão de Janssen neste ponto. Esta condição se desenvolveu três horas depois da descarga. Começou e perdurou por duas horas. Como veremos mais tarde, as consequências de usar envoltórias de eixo simétrico no lugar de pressões de equilíbrio no projeto estrutural podem ser sérias.

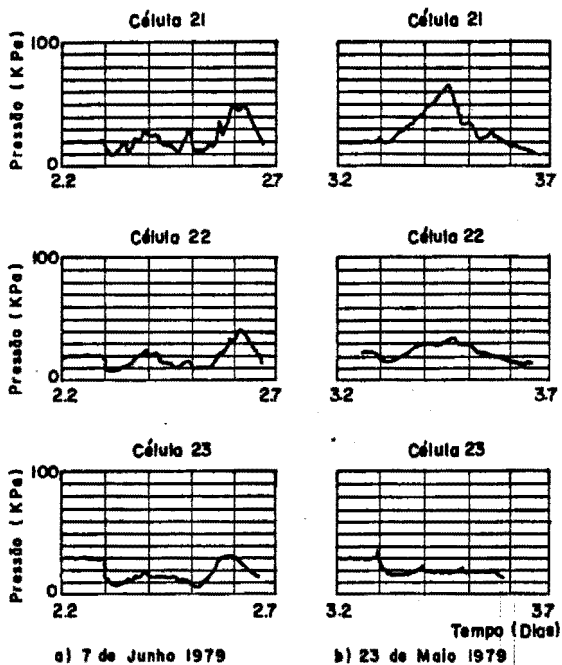


Figura 1.1. Registro de pressões - descarga excêntrica.

2. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ARMAZENADOS.

2.1. Generalidades.

Um sólido em um recipiente é solicitado por pressões que causam consolidação e fornecem resistência ao sólido. As pressões mais importantes ocorrem durante o fluxo do sólido, isto é, durante a deformação contínua do sólido acima do seu limite elástico.

Consideremos o elemento de material armazenado em um silo mostrado na figura 2.1.a. σ_1 e σ_2 são respectivamente a maior e a menor tensão de consolidação e são indicadas pelo semicírculo de Mohr da figura 2.1.b. Se o elemento para esta condição de consolidação é cisalhado sob várias cargas normais, então é obtido o lugar geométrico de deslizamento da figura 2.1.b. O semicírculo de Mohr, através da origem, define a tensão de deslizamento inconfined σ_c , que representa a resistência do material em uma superfície livre. Estendendo o lugar geométrico para interceptar o eixo τ , é definida a coesão aparente C . O ângulo ϕ é o ângulo de atrito cinemático. A coesão C é a tensão de cisalhamento sob tensão normal nula e, mesmo sendo uma propriedade do material armazenado, ela normalmente não é usada na teoria de fluxo em silos.

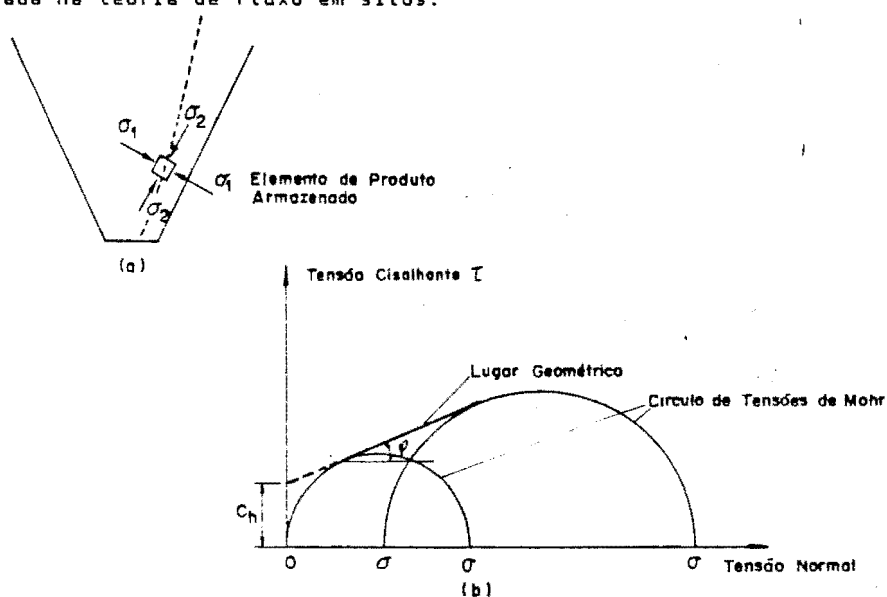


Figura 2.1. Lugar geométrico de deslizamento do produto armazenado.

2.2

Pode ser notado que para materiais de fluxo livre como, por exemplo, areia seca a coesão é zero, e o lugar geométrico é uma linha reta de inclinação ϕ através da origem.

Portanto, a determinação das propriedades dos materiais armazenados depende do conhecimento dos lugares geométricos de deslizamento determinados pela relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal para o material armazenado, avaliando como ele desliza relativamente a si próprio e relativamente ao material da parede de construção do silo. Esta informação é obtida de testes em laboratório usando células especiais de cisalhamento desenvolvidas para armazenamento de sólidos. Através deste aparato, pode ser determinada a tensão sob armazenamento e as condições de fluxo que podem ocorrer em unidades de armazenamento.

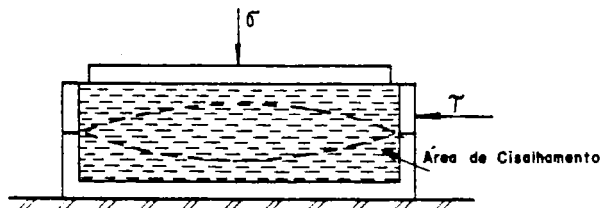
Em testes instantâneos, o sólido é conduzido a uma condição de deformação estável sob uma pressão normal predefinida em um plano de cisalhamento. Isto é conseguido em dois estágios. No primeiro estágio, chamado rotador, o sólido é rotado em uma célula de cisalhamento sob pressão, com a finalidade de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

A determinação do lugar geométrico de deslizamento (YL) e do lugar geométrico de deslizamento da parede (WYL) representa também o caminho para prever a forma da tremonha e as dimensões da boca de descarga que irá fornecer, onde possível, um determinado fluxo do material armazenado e um predeterminado tipo de fluxo. Estes parâmetros também são necessários, para a maioria dos materiais, para calcular as pressões no silo.

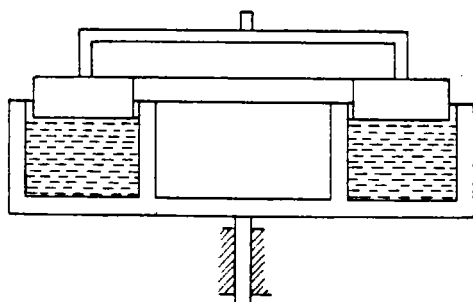
A resistência do sólido ao cisalhamento é medida também para determinar sua capacidade de formar obstruções para o fluxo, como arcos ou condutos.

2.2. Células de Cisalhamento.

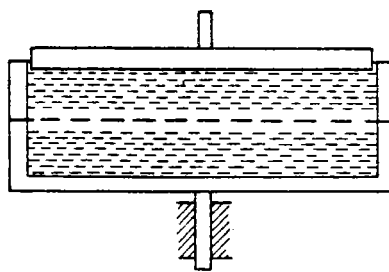
Três tipos de células de cisalhamento são usados para o projeto de silos, a de Jenike, a de Walker e a Peschl. A célula de Jenike tem sido a mais utilizada em todo o mundo para esta determinação, mas todos os três tipos podem ser usados com sucesso para o projeto de silos, e as diferenças entre elas nos resultados obtidos por operadores experientes não aparenta ser estatisticamente significativa. É muito importante, entretanto, que os procedimentos de operação, que tem sido alcançados após muitos anos de experiência e estudos comparativos, sejam incorporados e seguidos. Os diagramas esquemáticos das três células são mostrados na fig. 2.2, enquanto detalhes de procedimento e operação para a célula de Jenike (preparada por Dr. A.W. Jenike para o "Working Party of Mechanics of Particulate Solids da European Federation of Chemical engineering") são dados na referência Jenike, 1980.



(a) Célula de Tensão



(b) Célula Anular



(c) Célula de Rotação

Figura 2.2. Tipos de células de cisalhamento.

2.4

A finalidade principal dos testes é determinar as seguintes propriedades:

- a) Efetivo ângulo de atrito interno ϕ ;
- b) Função Fluxo (FF) (instantânea e com o tempo dependendo da variação das condições de umidade, temperatura, etc...);
- c) Ângulo cinemático de atrito ϕ_v entre o sólido e as amostras de material da parede;
- d) Densidade do material como uma função da consolidação ;
- e) Ângulo estático de atrito interno;
- f) Fator fluxo da tremonha (ff).

2.3. Escolha das Amostras

As amostras a serem usadas para os testes devem representar os extremos relevantes para as propriedades do material para fluxo e pressão em silos. As amostras devem, portanto, cobrir para cada material a ser armazenado no silo:

- a) Umidade máxima e mínima;
- b) Dimensões médias das maiores e menores partículas, se a dimensão das partículas do material armazenado variar significativamente com o tempo;
- c) Uma amostra fresca e uma armazenada para o tempo máximo de armazenamento esperado no silo se são esperadas mudanças apreciáveis no armazenamento;
- d) Extremos de outras condições que são favoráveis a afetar a coesão e as propriedades de fluxo do material a armazenar.

Em todos os casos de dúvida ou dificuldades, deverá haver consultas entre o usuário e o projetista/construtor e a participação de especialistas para resolver estas dificuldades especiais. A importância de uma escolha correta nas amostras não deve ser subenfatizada.

2.4. Determinação do Lugar Geométrico de Deslizamento (YL)

2.4.1. Amostras para a Determinação do Lugar Geométrico de Deslizamento.

Cada uma das células de cisalhamento mencionadas podem ser obtidas em duas dimensões diferentes dependendo da distribuição das

dimensões das partículas do material a ser testado, sendo que a pequena célula é a mais fácil e rápida de ser operada. Cada célula tem uma dimensão máxima de partícula que pode ser usada, por exemplo, 4mm na pequena célula standard de Jenike. Partículas maiores do que esta dimensão podem sempre ser removidas da amostra por peneiramento sem uma mudança significativa nos resultados obtidos, desde que estas partículas não constituam mais que 70% do peso total da amostra a ser testada. Entretanto, esta 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 uma densidade correspondendo a uma tensão de compressão pela repetição de rotações parciais na tampa da célula. Para esta densidade de "equilíbrio", os valores de cisalhamento devem então ser determinados para pelo menos três tensões menores de compressões diferentes daquela estabelecida na densidade de equilíbrio. Pesos sugeridos para materiais de diferentes densidades são dados na referência Jenike 1980.

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

Explicação da Operação Consolidação

Em relação à figura 2.3, o processo de consolidação começa somente com a pressão vertical $\sigma_v = V/A$. σ_v é, neste momento, a tensão maior principal. Para esta condição, o semicírculo está abaixo do YL que se desenvolveu durante a operação de rotações. Isto é mostrado na figura 2.4.a.

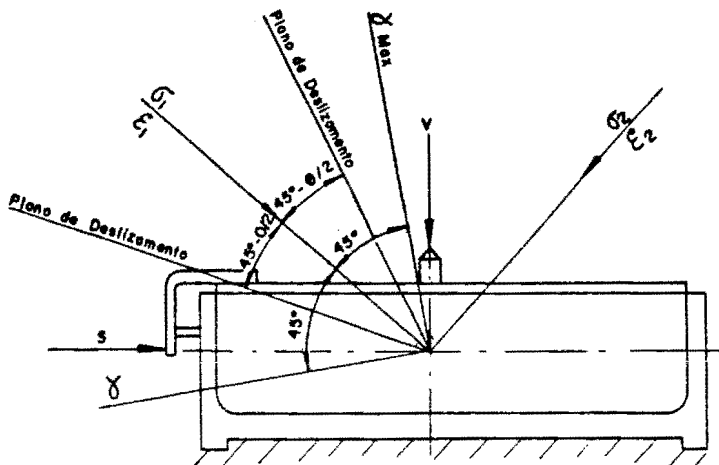


Figura 2.3. Análise das tensões durante o ensaio.

Agora a tensão de cisalhamento $\tau_v = S/R$ é aplicada. Com o aumento de τ_v , a direção da maior tensão σ_1 se desloca da posição vertical até que um estado estável é alcançado, para o qual a direção de σ_1 é mostrada na figura 2.3. Para um estado estável não há mudanças na densidade, o vetor deformação ϵ atua na direção do eixo $\gamma/2$, como mostrado na figura 2.4.b.

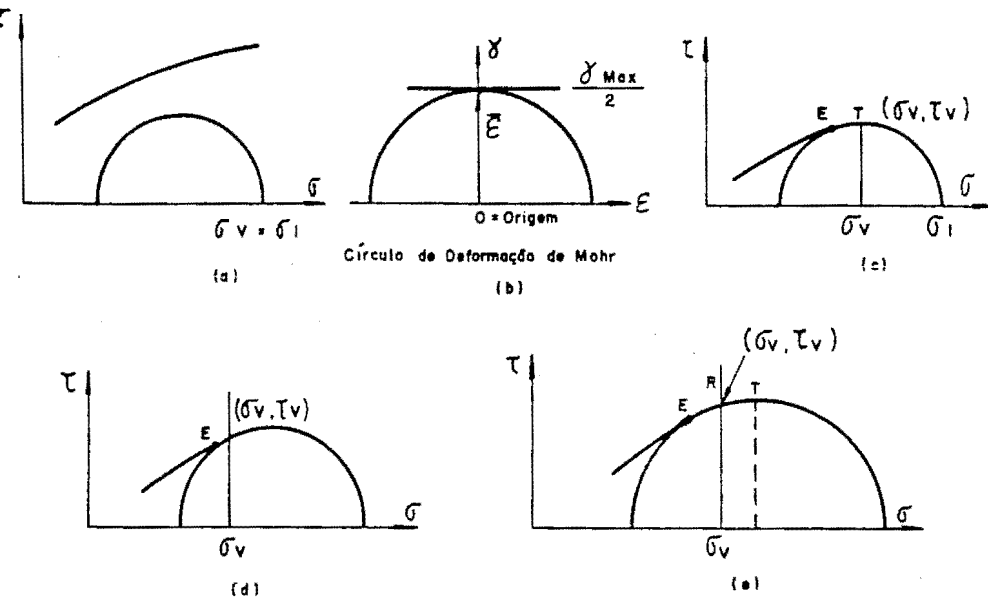


Figura 2.4. Círculo de Mohr.

Para esta condição, a deformação de compressão, normal ao plano do maior cisalhamento (plano σ_{max}), é igual a zero. Se a amostra é perfeitamente restrita na célula, a altura da amostra deve permanecer constante e o plano de maior cisalhamento (ρ_{max}) será forçado a coincidir com o plano de cisalhamento da célula. As deformações principais ϵ_1 e ϵ_2 , que são inclinadas a 45° , com o plano de maior cisalhamento devem ser inclinadas no mesmo ângulo do plano de cisalhamento da célula. Assumindo isotropia, as direções das tensões principais σ_1 e σ_2 também devem ser inclinadas a 45° com o plano de cisalhamento da célula. A pressão vertical σ_v deve então ser inclinada a 45° com as pressões principais. As tensões medidas (σ_v e τ_v) devem determinar o ponto T no topo do semicírculo de Mohr (figura 2.4.c).

Por outro lado, se a amostra não está totalmente restrita, pode-se pensar que um dos planos de deslizamento deve coincidir com o plano de cisalhamento da célula. A maior pressão σ_2 é inclinada de um ângulo de $45^\circ - \phi/2$ com as linhas de deslizamento. Isto localiza a direção da maior pressão σ_1 a $45^\circ + \phi/2$ da pressão vertical σ_v e as tensões de cisalhamento registradas τ_v variarão agora no ponto E (figura 2.4.d), final do YL.

Atualmente, a amostra é parcialmente restrita e os pontos R registrados caem no semicírculo de Mohr entre E e T (figura 2.4.e).

2.4.2. Determinação Simplificada do YL

Se o material parece ser de fluxo livre ou o efeito da variação dos parâmetros, como umidade, temperatura e tempo de consolidação, é rapidamente determinado, então é permissível adotar um procedimento de teste simplificado, embora isto necessite ser confirmado pelo valor da Função Fluxo do Material. Este procedimento simplificado consiste em determinar a tensão de deslizamento somente na carga de consolidação (ponto P, figura 2.5) e uma ou outra carga, e, então, tomando uma linha reta entre estes dois pontos.

2.4.3. Tensão Maior Principal de Consolidação.

Um círculo de Mohr desenhado através do ponto P, o ponto correspondente às condições de consolidação, e tangente ao YL

2.8

intercepta o eixo no ponto σ_M , este sendo o maior dos dois valores de intersecção. A tensão maior principal de consolidação é denominada σ_M (figura 2.5).

2.4.4. Tensão Inconfinada de Deslizamento

Um círculo de Mohr, desenhado através da origem e tangente ao YL, intercepta o eixo σ em σ_c , denominada tensão inconfinada de deslizamento (figura 2.5).

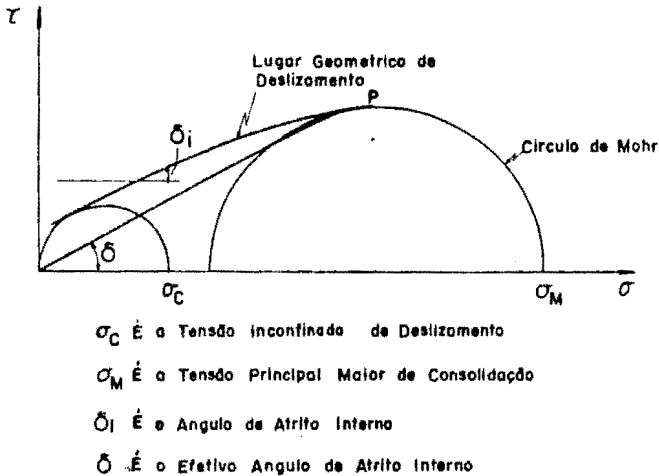


Figura 2.5. Lugar geométrico de deslizamento do produto.

2.4.5. Ângulo de Atrito Interno.

Este é o ângulo em que o YL forma a horizontal. Para um YL convexo para cima ele diminui com o aumento da tensão de compressão. Um método prático para determinar este ângulo é encontrado na referência Jenike, 1980.

2.4.6. Efetivo Ângulo de Atrito Interno

Este é o ângulo com a horizontal de uma linha entre a origem e P (tangente ao YL no semicírculo de Mohr da maior tensão de consolidação). Atualmente, há uma incerteza na variação deste parâmetro, e isto deve ser reconhecido por: tomando um valor (ϕ_u), um valor inferior (ϕ_l) e usando estes valores como indicados nas equações de fluxo e pressão. Note, entretanto, que existem alguns efeitos do tempo. Desde que as tangentes às curvas do YL ao círculo de Mohr tendem a ser incertas, o efetivo ângulo de atrito interno é na prática sempre construído, ou com uma linha entre a origem e o ponto final do YL (Figura 2.5). Se somente um valor (médio) do efetivo ângulo de atrito interno é disponível, os valores do limite superior e inferior são determinados por adicionar e subtrair 5 graus, respectivamente.

2.4.7. Função Fluxo do Material

Esta é a função relação entre a tensão incondfinada de deslizamento σ_c e a tensão maior principal de consolidação σ_M , e é desenhada como uma curva através dos valores destes dois parâmetros em um gráfico $\sigma_c \times \sigma_M$ (figura 2.6).

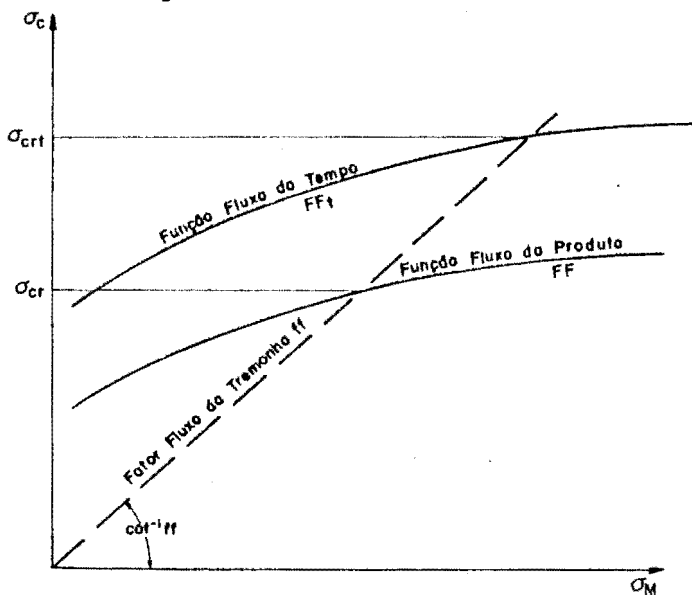


Figura 2.6. Tensões críticas.

2.10

Em alguns casos, a Função Fluxo do Material aproxima-se de uma linha reta e pode, então, ser definida por dois parâmetros (inclinação e intersecção).

2.4.8. Efeitos do Tempo

Muitos materiais adquirem resistência quando estão sob carga, devido ao escape de ar do seu meio, da migração de água, ou movimento de partículas para uma configuração mais densa, como resultado de uma vibração externa devida, por exemplo, à maquinaria, tráfego de rodovias, vento ou contato físico e/ou químico entre superfícies das partículas. Onde é possível a ocorrência de uma consolidação com o tempo, é importante determinar o YL de consolidação com o tempo, além do YL instantâneo. Para o YL, a Função Fluxo Tempo do Material FF e o efetivo ângulo de atrito interno com o tempo ϕ_t , podem ser determinados da mesma maneira como para as condições instantâneas (figura 2.6) e estes devem ser usados como os valores superiores no projeto de fluxo e resistência. A razão de consolidação com o tempo e o período necessário para o material alcançar um razoável estado estável varia com os diferentes materiais, mas normalmente não excede uma semana e pode ser menor.

2.5. Determinação do Lugar Geométrico de Deslizamento com a Parede (ψ_{YL}).

2.5.1. Determinação do Ângulo de Atrito com a Parede

Os ângulos de atrito com a parede são determinados na mesma célula de cisalhamento usada para a determinação do YL, pela remoção da parte do fundo da célula, e instalando um fundo do material da parede a ser testado e então determinado o YL da parede para uma variedade de pressões de consolidação que são esperadas para atuar nas paredes do silo. Já que estas medidas sempre mostram variações consideráveis, devem ser determinados um mínimo de cinco pontos. A tensão máxima a ser usada pode ser calculada pelo método dado no capítulo 4.

O YL da parede é então desenhado no mesmo diagrama do YL e seu ponto de intersecção determinado com o círculo de Mohr de maior consolidação (figura 2.7). O ponto mais alto da intersecção é escolhido. O ângulo da linha reta deste ponto, através da origem, é o ângulo de atrito com a parede ϕ para esta particular tensão de consolidação. Os testes são repetidos para outras tensões de consolidação.

Desde que o YL da parede (WYL) é um importante parâmetro, tanto para o fluxo como para o cálculo das pressões, ele deve ser determinado para todas as condições desfavoráveis (umidade, corrosão, abrasão, revestimento da superfície, etc...) em uma banda de YL, como mostrado na figura 2.7. Então a linha formando a parte superior da banda, isto é, dando o maior ângulo de atrito com a parede (ϕ_u), 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 da banda, isto é, dando o menor ângulo de atrito interno (ϕ_l), para o cálculo das pressões.

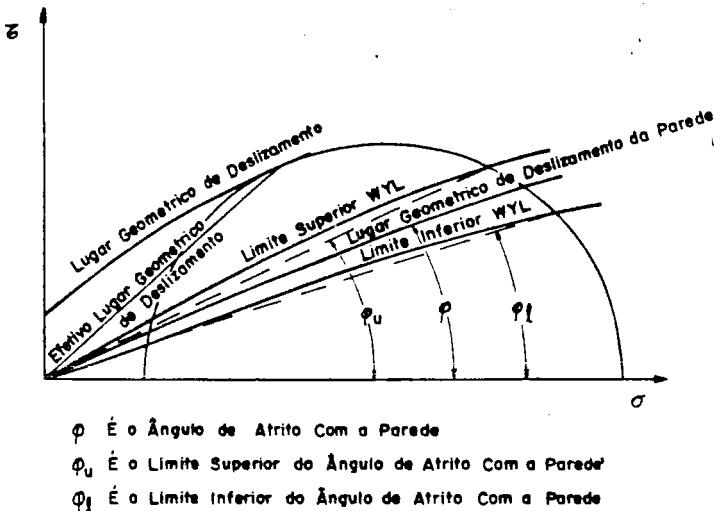


Figura 2.7. Lugar geométrico de deslizamento da parede e ângulo de atrito com a parede.

Para alguns materiais, o ângulo de atrito com a parede aumenta sob carregamento. Se este efeito é apreciável, então um ângulo de atrito com a parede em função do tempo (ϕ_t) deve ser determinado pelo procedimento análogo àquele explicado no item 2.4.8. ϕ_t deve

ser usado no lugar de ϕ nos cálculos de fluxo e resistência. Quando se usa a célula de cisalhamento para determinar o WYL, as partículas grossas de material não devem ser removidas na amostra a ser testada.

Se somente um valor (médio) do ângulo de atrito com a parede é disponível, então os valores superiores e inferiores devem ser encontrados por adicionar e subtrair 5 graus, respectivamente. Entretanto, isto pode não ser suficiente na possível variação no ângulo de atrito com a parede discutida abaixo, particularmente alisando as paredes do silo durante uso prolongado. Deve ser notado também que os valores do ângulo de atrito com a parede, medidos em silos, particularmente durante a descarga, tendem a ser alguma coisa menor, por 10-15%, do que os valores medidos em células de cisalhamento com o mesmo material da parede do silo. Quando em dúvida, entretanto, é aconselhável subtrair 3 graus do valor menor do ângulo de atrito com a parede.

Se o valor de atrito 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 sólido do que do sólido com a parede, a chamada condição "parede rugosa". Neste caso, se $\phi > \delta - 3^\circ$, então, $\sin \delta$ é usado para calcular o atrito com a parede no lugar de $\tan \phi$. A condição de paredes corrugadas é intermediária entre "parede rugosa" e condições de atrito com a parede, dependendo do perfil exato. Como uma 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.

2.5.2. Mudanças no Ângulo de Atrito com a Parede.

2.5.2.1. Mudanças Manipuláveis.

Se o ângulo de atrito com a parede para uma particular combinação do material armazenado e do material da parede da tremonha (ou algumas vezes na seção paralela) encontrado for muito alto, então deve ser considerado o revestimento das paredes com um material de baixo atrito. Estes materiais incluem vários plásticos ou aços inoxidáveis. O revestimento deve ser recomendado por especialistas

com a finalidade de assegurar uma superfície lisa em todos os pontos, isto é, livre de respingos de solda, marcas, cabeças de parafusos protuberantes, distorções geométricas, escorridas de tintas, etc..., e durável, isto é, dura e/ou espessura μ suficiente para resistir à abrasão para a qual ela será solicitada. O revestimento por vidro é também usado largamente, mas isto tem de ser incorporado no projeto original ou na escolha do silo. Enquanto revestir a tremonha pode criar condições de fluxo de massa onde não era obtido, o revestimento da seção paralela deve ser feito com cuidado. Em alguns casos, pode levar à formação de arcos e também aumentará as pressões horizontais e verticais enquanto diminuem as forças no plano da parede. Se as pressões horizontais são críticas, então paredes relativamente mais rugosas são preferidas na seção paralela.

2.5.2.2. Mudanças não Manipuláveis.

O atrito com a parede pode diminuir com um resultado da abrasão ou pelo despreendimento de lubrificantes do particular material armazenado, por exemplo, óleos de cereais. Ele também pode aumentar devido à: corrosão do material da parede, adesão do sólido na parede, migração de umidade, condensação na parede ou cargas eletrostáticas de atrito. Nestes casos, os valores superior e inferior do ângulo de atrito com a parede podem ser devidamente reajustados por um aumento para 50% e/ou uma diminuição para 35%, respectivamente.

2.6. Densidade.

São definidos basicamente três diferentes valores de densidade, chamados, "solta", "compacta" e "aerada", para os quais são usados os seguintes símbolos: γ , γ_u e γ_a , respectivamente. O valor determinado na célula de cisalhamento corresponde à densidade compacta, γ_u .

Os valores superiores (γ_u) e inferior (γ ou γ_a , o último no caso de pós que aeram) para densidade devem ser usados nas várias equações, como indicado. Se somente um valor (γ) é disponível, então γ_a (onde aplicável) deverá ser tomado como $0,75\gamma$ e γ_u como $1,25\gamma$. O valor inferior, isto é, γ ou γ_a , deve ser usado na estimativa da

capacidade de armazenamento do silo.

2.7. Ângulo de Repouso.

Este é o ângulo formado com a horizontal sobre uma superfície livre de uma pilha de material parado, quando ele foi depositado em uma superfície plana.

2.8. Fatores que Modificam as Propriedades dos Materiais Armazenados.

2.8.1. Distribuição das Dimensões das Partículas.

Outros fatores de mesma natureza que a coesão natural de um sólido aumentam com a diminuição das dimensões das partículas. As amostras para determinar o comportamento do fluxo devem ter a menor dimensão das partículas possível, considerando eventuais separações de partículas livres durante transporte e manipulação. As amostras para determinação do atrito com a parede, para a determinação das pressões no silo, devem conter as maiores dimensões das partículas menores do que 250 μ m são geralmente de fluxo livre, embora haja exceções, como por exemplo, grãos fermentados sob condições atmosféricas e umidade adversas, soja em grãos com um alto índice de óleo ou materiais fibrosos ou em flocos. Também o impacto de partículas grossas e pesadas pode causar compactação do sólido na tremonha.

2.8.2. Umidade.

O fluxo de um sólido decresce conforme sua umidade cresce, alcançando um valor mínimo de aproximadamente 80 a 90% de saturação. Acima desta umidade, o sólido adquire propriedades viscosas, e testes de cisalhamento podem ser inaplicáveis. Para testes de fluxo, a amostra deve, entretanto, ser a mais úmida que possa ser encontrada em uso e, durante os testes, a amostra e a célula de cisalhamento devem ser manipuladas rapidamente para minimizar erros devidos à evaporação. Esta inconveniência na manipulação pode ser minimizada mantendo a sala dos testes em uma alta umidade relativa. O atrito na parede para o cálculo das pressões deve ser determinado utilizando o material mais seco e o

mais úmido que possa ser usado.

2.8.3. Aeração.

Materiais pulverulentos podem reter quantidades consideráveis de ar com uma conseqüente diminuição na densidade, coesão, atrito interno e atrito com a parede, aproximando as últimas três propriedades a zero, em casos extremos (fluidificação). No assentamento, este ar escapa gradualmente. Na utilização de propriedades relacionadas com o fluxo e pressões e na escolha das amostras para teste, as propriedades da aeração devem ser levadas em consideração, isto é, pode ser necessário testar amostras aeradas e não aeradas. Um pó altamente aerável pode se comportar quase como um líquido com relação às propriedades de fluxo e de pressão, e esta tendência de fluidificação deve ser verificada onde isto é procedente.

2.8.4. Coesão das Partículas.

Um aumento na coesão das partículas e, portanto, uma diminuição na floabilidade podem ser causados por qualquer um dos vários fatores, como mudanças de temperatura, mudanças na umidade, mudanças químicas, mudanças cristalográficas, etc... Onde tais mudanças são propícias a ocorrerem, então a amostra precisa ser escolhida para o teste, de modo a representar as amostras incluindo os efeitos destas mudanças.

2.8.5. Vibração.

A vibração pode aumentar ou diminuir a densidade e a resistência ao cisalhamento. A direção bem como a grandeza do efeito da vibração depende da distribuição das dimensões das partículas, da coesão, da umidade, da densidade do material, de qualquer condição de tensão estática ou dinâmica e da frequência e amplitude da vibração. Em geral, um sólido que está completamente restrito irá consolidar e ganhar resistência com a vibração, enquanto que um material em fluxo, mas preso devido a uma obstrução de fluxo como um arco ou um tubo, irá dilatar e enfraquecer, seu atrito com a parede será também reduzido se as paredes são vibradas efetivamente ou se a vibração é transmitida para as paredes. Este último efeito é mais pronunciado a certas frequências, e são diferentes para materiais

diferentes e tipos de silos, embora, em geral, uma combinação de baixa frequência e amplitude alta seja mais efetiva. Se, entretanto, o silo é propício a ser solicitado à vibrações a qualquer tempo de maquinaria adjacente, tráfego de rodovias, tremores de terra ou outros fatores, então este efeito da vibração deve ser levado em consideração na escolha e no teste das amostras. Os efeitos da vibração podem ser parcialmente nocivos em materiais muito secos e podem temporariamente transformá-los em um estado quase que fluido.

2.8.6. Propriedades Escorrega-pára (slip-stick)

Alguns pós finos apresentam propriedades de escorrega-pára, isto é, brusco movimento pára-inicia, que aparece durante consolidações ou em testes. O comportamento slip-stick aparece também em partículas de dimensões relativamente uniformes em espécies rugosas. Nestes casos, a força cisalhante não se estabiliza após ruptura, mas oscila. Quando testando estes materiais, a força cisalhante deverá ser aplicada bem devagar pelo valor de pico e, então, a haste será retraída cuidadosamente de modo a não perturbar a célula. O fator fluxo da tremonha deve então ser aumentado por um fator de 1,4 para a caracterização das propriedades. Se slip-stick é encontrado quando em testes de atrito com a parede, então o ângulo da tremonha para fluxo de massa deverá ser aumentado de 5°.

2.8.7. Outros Fatores.

As propriedades de cisalhamento de sólidos podem ser influenciadas pela forma das partículas (que podem mudar por abrasão), por escudação de líquidos (por exemplo óleos de cereais), por cargas eletrostáticas e por revestimento de pós das superfícies das partículas. Algumas vezes é possível tomar um material mais de fluxo livre por mudanças no processo de manufaturamento ou por tratamento de sua superfície.

2.8.8. Incertezas e Variabilidade.

É importante apreciar a não uniformidade estrutural de um sólido, mesmo dos superficialmente uniformes, e a variação resultante nos resultados dos testes, mesmo por operadores práticos. Adicionado às

incertezas estatísticas da amostra, isto implica para cada um dos parâmetros descritos em 2.4 e 2.5, uma variação, em vez de um simples valor. Pelo menos esta será de 8% para as medidas primárias e, com materiais não uniformes, 15% ou mais. Limites superior e inferior dos resultados medidos e os parâmetros derivados dos mesmos devem ser especificados quando possível. Se somente são disponíveis um valor do efetivo ângulo de atrito interno e do ângulo de atrito com a parede, então os valores superior e inferior devem ser caracterizados por adicionar e subtrair 5°, respectivamente.

2.9. Ensaio Realizados

Com a finalidade de avaliar e de se familiarizar com o equipamento de Jenike, o autor realizou vários ensaios na Universidade de Twente-Holanda (Calil, 1989). Para fins indicativos e ilustrativos, são apresentados os resultados dos ensaios com dois materiais: alpiste (fluxo livre) e pó de pedra (pulverulento).

Para o material alpiste (bird seed) foram realizados 3 YL com três pontos para cada YL e 3 WYL com 7 pontos para cada material de parede: aço inoxidável (stainless steel), plástico liso (teflon) e aço rugoso (roughness steel).

Para o material pó de pedra (bentonite) foram realizados 7 YL com três pontos para cada YL e 6 WYL com 7 pontos para cada material de parede: concreto (betonplex), dois plásticos (plexiglas e teflon), eucatex, aço inoxidável (stainless steel) e aço rugoso (roughness steel).

Os parâmetros necessários para a utilização no projeto para fluxo e pressão são:

a) Alpiste

- efetivo ângulo de atrito interno (Φ_{iE}), variou de 30,8° a 31,7°
- densidade (density), variou entre 647,58 a 660,79 kg/m³
- ângulo de atrito com a parede (Φ_{iw}), variou entre:
- teflon -entre 10,0° a 12,0°
- aço inoxidável - entre 8,8° a 8,3°
- aço rugoso- entre 20,9° a 17,6°

b) Pó de pedra

- efetivo ângulo de atrito interno (Φ_i), variou entre 39° a 42°
- densidade (density), variou entre 982 a 1061 kg/m³
- ângulo de atrito com a parede (Φ_{iw}), variou entre:
 - teflon- entre $9,5^\circ$ a $10,8^\circ$
 - eucatex- entre $15,8^\circ$ a $18,8^\circ$
 - aço inoxidável - entre $17,5^\circ$ a $18,5^\circ$
 - plexiglas- entre $17,6^\circ$ a $19,4^\circ$
 - concreto- entre $18,8^\circ$ a $21,5^\circ$
 - aço rugoso- entre $33,1^\circ$ a $38,0^\circ$
- função fluxo do material: analisada através da relação entre a tensão confinada de deslizamento (σ_p) e a tensão maior principal de consolidação.

3. 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.

3.1. Filosofia do Projeto de Células.

3.1.1. Obstruções do Fluxo.

O primeiro objetivo no projeto de células de armazenamento é assegurar que o sólido armazenado fluirá por gravidade sem a ocorrência de obstruções do fluxo. Com referência à figura 3.1, os dois principais tipos de obstruções do fluxo são:

- a1- arco coesivo ou abóbada;
- a2- formação de tubo.

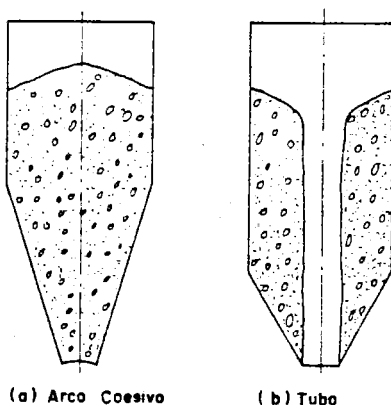


Figura. 3.1.- Tipos de obstruções do fluxo.

Pode ser notado que um arco coesivo é aquele formado como resultado da consolidação e resistência do sólido armazenado. Pode ser distinguido do arco "mecânico" devido ao entrosamento das partículas do sólido e que ocorre quando a média das dimensões das partículas é grande comparada com a abertura da boca da tremonha. Isto é ilustrado na Figura 3.2.

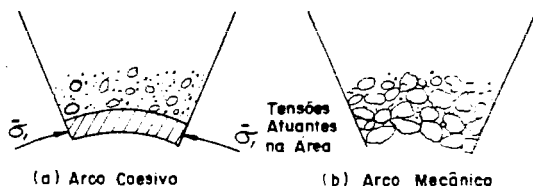


Figura. 3.2.- Tensões atuantes

Para a formação de um arco estável ou tubo, o sólido armazenado adquiriu, dentro do contorno da célula, resistência suficiente para suportá-lo. A resistência é uma função do grau de consolidação - um sólido "fofo" não tem resistência, mas adquire resistência sob compressão. A relação entre resistência versus pressões de consolidação é referida como a função fluxo.

Para uma dada pressão de consolidação, a resistência adquirida variará de um sólido para outro. Com relação à Figura 3.3, é óbvio que o sólido B tem maior resistência e é menos de fluxo livre que o sólido A. Um perfeito sólido de fluxo livre não tem resistência e é apresentado pelo eixo horizontal da Figura 3.3. Sólidos de fluxo livre, como areia seca ou materiais granulares, não têm coesão.

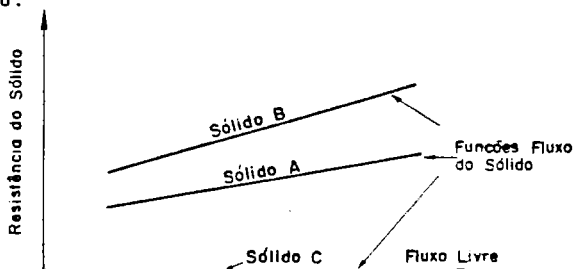


Figura. 3.3. Resistência versus pressão de consolidação

Deve ser notado que, para um dado sólido armazenado, o grau de consolidação e, portanto, sua resistência é dependente da umidade, tempo de armazenamento e, em alguns casos, da temperatura do sólido. Outros fatores, como vibrações mecânicas, podem ter também um efeito significativo.

3.1.2. Células de Fluxo de Massa - Fluxo - Critério de Não Fluxo.

Em recentes anos, o método desenvolvido por Jenike, para o projeto de células de fluxo de massa, tem sido largamente aceito como o procedimento "standard". Enquanto maiores detalhes do método serão dados em capítulos subsequentes, é importante, neste estágio, introduzir o conceito fundamental do critério de fluxo ou não fluxo.

O objetivo no projeto de células de fluxo de massa é determinar o ângulo de inclinação da tremonha α e a dimensão da abertura de descarga B para prevenir a formação de arcos estáveis coesivos. Consideremos o sólido fluindo na célula da Figura 3.4. O sólido estava inconsolidado quando ele foi depositado no topo da célula, mas, como ele flui para baixo, torna-se consolidado sob a maior pressão de consolidação σ_1 que está atuando na célula. Como resultado dessa consolidação, a resistência do sólido aumenta, representada por σ_c . σ_c é a pressão de deslizamento inconfina da como definida na figura 2.5. As formas aproximadas dos gráficos de σ_1 e σ_c são mostradas na Figura 3.4. Como mostrado, a pressão maior de consolidação e a resistência do material σ_c decrescem até zero na seção da tremonha da célula. A tensão σ_1 , adquirida em um arco estável ou abóbada, é assumida ser diretamente proporcional ao vão B do arco. O gráfico de σ_1 é mostrado também na Figura 3.4. Onde σ_1 excede σ_c , o material tem resistência insuficiente para suportar um arco. Portanto, a seção crítica para projeto é a boca de descarga da tremonha; a dimensão da abertura crítica ou mínima é determinada para a condição $\sigma_1 = \sigma_c$

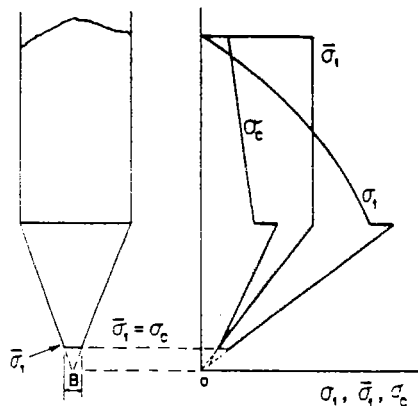


Figura. 3.4.- Análise para a não formação de arcos - células de fluxo de massa.

Para efeitos de projeto, o precedente é trasladado para a forma gráfica da Figura 3.5. Nesta figura, a tensão inconfina de consolidação σ_c , que representa a resistência do sólido, é plotada contra a maior pressão de consolidação α . A curva formada é chamada de Função Fluxo (FF). A linha tracejada, mostrada na Figura 3.5, é chamada de fator fluxo (ff) para o canal; ela representa a condição de tensão no arco. Onde a linha 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. A intersecção da linha ff com a curva FF é o ponto crítico para calcular a dimensão B da abertura da boca de descarga.

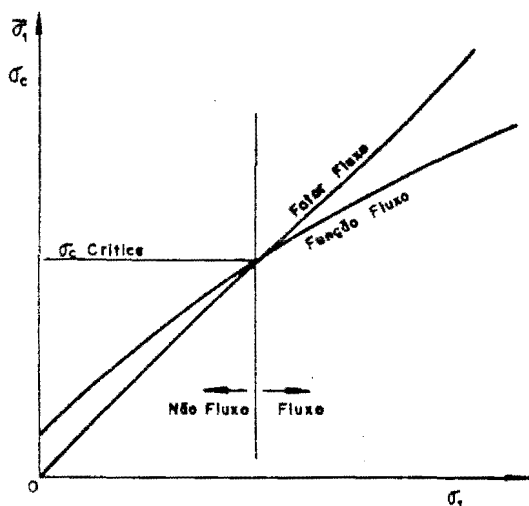


Fig. 3.5.- Função Fluxo FF e fator fluxo da tremonha ff

O conceito de projeto apresentado aqui é usualmente expresso como o critério Fluxo - Não Fluxo. Para ocorrer fluxo por gravidade:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} > ff$$

3.1.3. Células de fluxo de Funil

No caso de células de fluxo de funil, o objetivo é determinar a dimensão da abertura de descarga para prevenir a formação de um tubo estável. A condição de tensão de consolidação na parede de um tubo é uma função da pressão de sobrecarga do material. Esta tensão determina o diâmetro crítico do tubo D_f , que fixa a dimensão mínima da abertura de descarga para a ocorrência do fluxo de funil. Se a dimensão da boca de descarga da célula é menor que D_f , então um tubo estável será formado. No caso de células com fluxo de funil, com uma abertura retangular, a diagonal do retângulo deve ser maior que D_f . A largura do retângulo deve ser grande o suficiente para assegurar a não formação de um arco estável.

3.1.4. Células com Fluxo Expandido.

Algumas células envolvem a combinação do fluxo de funil e fluxo de massa, como ilustrado na Figura 3.6.

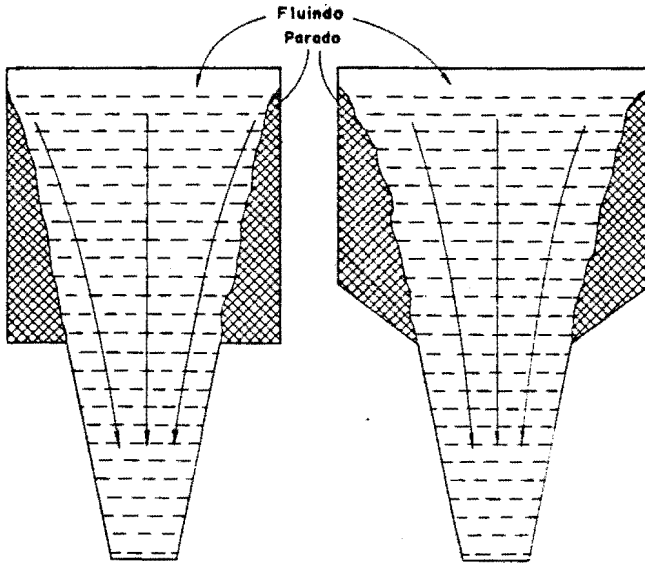


Figura 3.6.- Célula com fluxo expandido.

O diâmetro crítico (D_f) da formação do efeito tubo determina neste caso a dimensão mínima para a fixação da tremonha para fluxo de massa. Para a tremonha, o ângulo α e a dimensão da abertura B são determinados para a condição de que não se formem arcos.

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

- a vazão de descarga é controlada sem indevidas flutuações;
- a segregação nas partículas obtidas deve ser minimizada;
- o tempo de armazenamento no silo não deve ser indevidamente prolongado (com conseqüentes mudanças deterioráveis no material armazenado);
- o local disponível é adequado para a tremonha cujos lados são muito inclinados ou é possível usar equipamentos de descarga nas tremonhas de lados menos inclinados.

O fluxo de funil deve ser escolhido se:

- a) as vantagens acima de fluxo de massa não são de particular importância;
- b) algumas flutuações na vazão de descarga, alguma segregação e tempos de armazenamento prolongados para o material armazenado não são desvantagens;
- c) locais adequados ou altura é limitado ou antieconômico;
- d) o espaço deve ser utilizado ao máximo;
- e) saídas múltiplas são necessárias;
- f) o material é de fluxo livre, particularmente se ele também contém partículas grandes, que podem compactar o material em tremonhas com lados muito inclinados.

O fluxo de funil pode ser usado para materiais de menos fluxo livre, mas a dimensão da boca de saída necessária para descarga por gravidade pode ser então muito grande para arranjos econômicos de descarga, a menos que seja adotado um projeto de fluxo expandido.

Pode ser notado que, dentro da definição geral de fluxo de funil, há uma variedade de tipos de fluxo dependendo da forma do silo (incluindo o número, posições e formas da boca de saída) material e propriedades da parede e sistemas de carregamento e descarga.

As normas internacionais, de uma maneira geral, apresentam basicamente dois gráficos para determinação do tipo de fluxo que irá ocorrer na célula. Estes gráficos fornecem o tipo de fluxo em função do coeficiente de atrito com a parede, a inclinação das paredes da tremonha e o tipo de tremonha (cônicas ou retangulares). O trabalho principal de referência de todas as normas é o trabalho desenvolvido por A.W. Jenike, na Universidade de Utah, nos Estados Unidos da América.

É importante ressaltar do trabalho de Jenike, que existem outros parâmetros importantes além do coeficiente de atrito com a parede e a inclinação das paredes da tremonha para determinação do tipo de fluxo. A seguir, estudaremos esta determinação.

3.2. Projeto do Silo para Fluxo de Massa.

3.2.1. Ângulo da Tremonha (θ).

a) Para tremonhas cônicas, o contorno entre fluxo de massa e fluxo de funil é dado por:

$$\theta_m = 0,5 \cos^{-1} \left(\frac{1 - \sin \phi_{iu}}{2 \sin \phi_{iu}} \right) + \beta \quad (\text{graus}) \quad (3.1)$$

onde: $2\beta = \phi_{vu} + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \phi_{vu}}{\sin \phi_{iu}} \right)$ (graus) (3.2)

θ_m = menor ângulo da tremonha com a horizontal para fluxo de massa, graus

ϕ_{iu} = o valor superior do efetivo ângulo de atrito interno do material armazenado, graus

Se $\phi_{iu} < 25^\circ$ - deve ser tomado como $\phi_{iu} = 25^\circ$ nas equações (3.1) e (3.3)

ϕ_{vu} = o valor superior do ângulo de atrito com a parede, graus

b) Para tremonhas retangulares, a equação de contorno é dada por:

$$\theta_m = 90 - \left(\frac{\exp \left[3.75 \times 1.01 \left(\frac{\phi_{iu} - 30}{10} \right) \right] - \phi_{vu}}{0,75 (\tan \phi_{iu})^{0,2}} \right), \text{ graus} \quad (3.3)$$

Se $\phi_{vu} > \phi_{iu} - 3^\circ$, isto é numa situação de parede rugosa, $\tan^{-1}(\sin \phi_{iu})$ é usada no lugar de ϕ_{vu} nas equações (3.2) e (3.3)

c) Para tremonhas piramidais (figura 3.7), o ângulo θ_v do canto da tremonha deve ser determinado como para tremonhas cônicas. Os ângulos das paredes de união θ_1 e θ_2 são relacionados a θ_v por:

$$\cot^2 \theta_x = \cot^2 \theta_1 + \cot^2 \theta_2$$

d) Para tremonhas em forma de cunha e chisel (figura 3.7), o fluxo de massa irá ocorrer se:

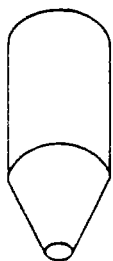
$$\theta \geq 30^\circ + 1,33 \phi_{vu} \quad \text{e} \quad L_h \geq 6B$$

e) Para tremonhas de transição de fluxo de massa, isto é, boca de

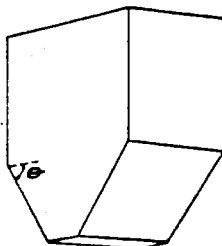
saída retangular e seção paralela circular, a inclinação das bordas deve ser determinada como para tremonhas cônicas e a inclinação dos lados, como para tremonhas retangulares. A relação entre o comprimento e a largura da boca de saída não deve ser menor do que 3.

Obs.: O ângulo de inclinação θ deve ser escolhido pelo menos 3° maior do que o dado pela equação (3.1) ou (3.3) para evitar instabilidades no fluxo. A margem de segurança deve ser aumentada para 5° ou mais, para materiais com características variáveis.

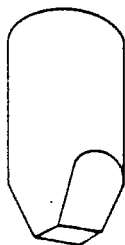
Os sólidos podem se depositar em cantos triangulares, e interferir no fluxo. Os cantos podem ser curvos ou tapados para evitar esta interferência.



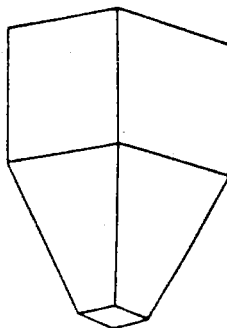
Cônica ou Tremonha
de Eixo Simétrico



Fluxo Plano
Tremonha em Cunha



Fluxo Plano
Tremonha Chisel



Tremonha Pirâmidel

Figura 3.7. Várias formas de tremonhas.

3.10

3.2.2. Dimensões da Boca de Descarga.

A dimensão mínima da boca de descarga para fluxo de massa é dada por:

$$B_m = \frac{H(\theta) \sigma_{cr}}{\gamma_u}, \text{ m} \quad (3.4)$$

σ_{cr} = valor da tensão normal da intersecção da linha do fator de fluxo da tremonha (ff) com a linha da função fluxo (FF), determinadas no capítulo 2.

B_m = diâmetro mínimo da boca de descarga (para tremonha cônica) ou largura da boca de saída (para uma tremonha retangular), m;

γ = limite superior do peso específico ou peso específico compacto, kg/m^3

$H(\theta) = 2,3$ para tremonhas cônicas;

$H(\theta) = 2,1$ para tremonhas quadradas

$H(\theta) =$ para tremonhas retangulares ($L = 3B$)

Para $L < 3B$, $H(\theta)$ deve ser interpolado entre 1,15 e 2,10

Obs.: No sentido de evitar instabilidades no tipo de fluxo, o diâmetro ou largura B da boca de descarga deve ser aumentado de 20% no mínimo.

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

$$ff = \frac{Y (1 + \sin \phi u)}{2 (x - 1) F(\theta) \cos \theta} \quad (3.5)$$

$$Y = \frac{[2 (1 - \cos 2)]^m \alpha^{1-m} \cos \theta + \sin \beta (\sin \alpha)^{1+m}}{(1 - \sin \phi u) (\sin \alpha)^{2+m}} \quad (3.6)$$

$$X = \frac{2^m \sin \phi u}{1 - \sin \phi u} \left[\frac{\sin (\beta + \alpha)}{\cos \theta} + 1 \right] \quad (3.7)$$

$$Z = \beta + 90^\circ - \theta$$

$$F(\theta) = \left(\frac{65}{220 - \theta} \right)^m \left(\frac{200}{290 - \theta} \right)^{1-m} \quad (3.8)$$

$m = 0$ para silos retangulares, onde $L \geq 30$

$m = 1$ para silos de eixo simétrico

Obs.: σ_{or} é dado pela intersecção da linha da Função Fluxo (FF) do material com a linha através da origem com inclinação $1/ff$ (Figura 2.6). Nas equações (3.5), (3.6) e (3.7) é usado o valor superior do efetivo ângulo de atrito interno ϕ_{iu} . Um processo melhor elaborado, para determinar σ_{or} nos casos onde existe uma variação de valores de ϕ , é descrito na referência Jenike, 1980.

O fator fluxo da tremonha (ff) indica a floabilidade na tremonha; quanto menor este valor, melhor a tremonha. Deve ser observado, entretanto, que o valor do fator fluxo da tremonha está em seu valor mínimo quando a inclinação da parede da tremonha está próxima do mínimo para fluxo de massa e aumenta novamente quando ela se inclina mais, e portanto, esta inclinação não deve ser projetada mais inclinada que o necessário.

Há duas situações onde o procedimento acima não pode ser aplicado. Se o fator fluxo da tremonha varia acima da Função do Material e não intersecta a mesma, então a análise não determina a dimensão mínima da boca de descarga, isto é, o material é muito de fluxo livre. Neste caso, a dimensão da boca de descarga é determinada pela vazão das considerações de fluxo, pelas dimensões de equipamento de descarga ou, no caso de grandes partículas, por uma dimensão de boca de descarga, na média, pelo menos 6 vezes a dimensão da maior partícula de tal maneira a evitar arcos. Esta última relação depende muito da forma das partículas, ou seja, é 10 vezes para alguns carvões e somente 3 vezes para partículas lisas com formatos esféricos e deve ser checada em casos individuais. As dimensões que têm sido encontradas como seguras para uma grande variedade de materiais são 8 vezes para abertura circular, 9 vezes para a quadrada ou retangular e 4 vezes para aberturas em forma de canal com relação de comprimento por largura não menor que 6.

Se o fator fluxo da tremonha varia abaixo da Função Fluxo do Material e não a intercepta, então o sólido não fluirá somente por gravidade. O fluxo pode ser possível usando um material da parede bem liso ou condicionando o sólido a ser mais de fluxo livre, isto é, reduzindo sua umidade. As propriedades do material precisam ser retestadas após cada mudança. Se o fluxo ainda não é possível, então se deve usar certos tipos de silos de descarga mecânica.

Se o fator fluxo da tremonha intercepta (corta) a Função Fluxo do Material, mas não intercepta a Função Fluxo Tempo, então vibradores internos devem ser considerados para começar o fluxo após armazenamento há longo tempo, com a finalidade de evitar efeitos desfavoráveis devido à vibração, um fator de segurança de 1,5 vezes deve ser aplicado no fator fluxo da tremonha.

Enquanto na maioria dos casos não há de formação de arcos na seção paralela se o fluxo na tremonha pode ser assegurado, podem acontecer alguns casos, particularmente em silos pequenos, onde existe este perigo. Quando em dúvida, a dimensão mínima da boca de saída para as paredes verticais deve ser determinada usando a equação (3.4) Se esta é menor que o diâmetro do silo ou se o fator fluxo da tremonha não intercepta a Função Fluxo do material, então as paredes na seção paralela deverão ser feitas mais rugosas pela escolha de um material diferente, talvez um corrugado.

Em geral, a seção paralela deverá ter paredes rugosas, com a devida atenção às forças no plano da parede (cap. 4). Deve ser notado também que qualquer intrusão no espaço do silo, perto da boca de descarga, como equipamentos suspensos, dobras na fabricação das placas, parafusos e ou porcas ou soldas mal feitas, podem causar arqueamento no silo, mesmo que corretamente projetado para fluxo de massa, e deverá então ser evitado.

Para alguns materiais, a Função Fluxo do material é convexa para baixo, isto é, o material flui próximo ao fundo e forma arcos na parte mais alta. Nestes casos, ensaios devem ser feitos para trocar o fator fluxo da tremonha, talvez por diminuir a rugosidade das paredes, para evitar uma intersecção dupla das linhas da Função Fluxo do material e do fator fluxo da tremonha.

3.3. Projeto do Silo para Fluxo do Funil

3.3.1. Ângulo da Tremonha.

Já que o fluxo do funil não se desenvolve ao longo das paredes da tremonha, ele não é diretamente influenciado pelo ângulo da tremonha. Entretanto, se é requerida a descarga completa do silo sem equipamentos adicionais, então deve ser usado um ângulo de:

$$\theta = 25^\circ + \phi_{\text{su}}$$

Embora este possa ser menor em materiais de fluxo muito livre, neste caso são necessárias paredes lisas.

3.3.2. Dimensões da Boca de Descarga.

A dimensão mínima da boca de descarga para fluxo de funil deve ser calculada por dois caminhos:

- para evitar a formação do efeito "tubo", isto é, a formação de um tubo estável acima da abertura da boca de descarga (Figura 3.8), com o material restante do silo parado depois que o tubo foi esvaziado;
- para evitar a formação do efeito "arco", como em fluxo de massa. Este segundo cálculo só é necessário para bocas de descarga retangulares.

Para evitar a formação do efeito "tubo" (figura 3.8), a dimensão da boca de descarga deve ser determinada por:

$$B_c = \frac{0,75 \text{ EXP } (0,039 \phi_{\text{su}}) \sigma_c}{\gamma}, \text{ m}$$

Onde σ_c é obtido da Função Fluxo do material, com:

$$\frac{\sigma_m}{K_1} = \frac{P_{\text{Hf}}}{K_1} + \gamma H_b, \text{ Pa}$$

P_{Hf} - pressão horizontal à altura π , Pa.

B_c - o diâmetro mínimo ou largura da boca de descarga para evitar o efeito "tubo", m

- Hh - altura da tremonha, m
Kl - o menor valor da relação entre as pressões horizontais e verticais.

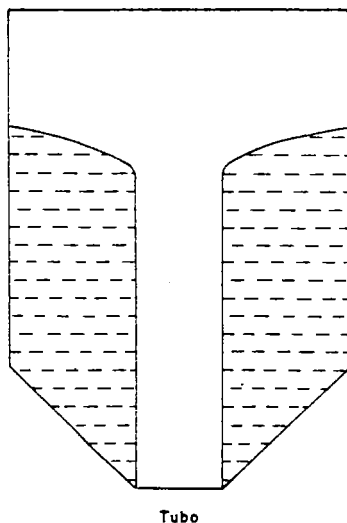


Figura 3.8. Efeito "tubo".

Para evitar a formação de arcos (para bocas de saída retangulares) usar o procedimento mostrado no item 3.1.2, com $ff = 17$.

3.3.3. Fluxo Expandido

Se a abertura da boca de descarga B_c , calculada acima, é muito grande para conexão com extratores ou outro equipamento de descarga, ou fornece valores muito altos da vazão de fluxo na descarga, então pode ser adotada uma tremonha de fluxo de massa para esta abertura, ou seja, um arranjo conhecido como "fluxo expandido" (Figura 3.6). A inclinação da tremonha e a dimensão da boca de descarga são calculadas nas seções 3.1.1 e 3.1.2.

3.3.4. Tipos de Fluxo de Funil

O fluxo de funil pode ter uma grande variedade de formas e estas podem mudar ou variar com o tempo, mesmo para uma simples combinação do material armazenado/silo, mas as duas características importantes são que o funil alcança as paredes e se o funil é central (Figura 3.9) ou excêntrico. A forma de funil mostrada na Figura 3.9a é encontrada para materiais de fluxo livre, se a relação entre a altura e a largura do material no silo é maior do que 1.3 a 1.4, embora esta relação também dependa das propriedades do material armazenado, do ângulo da tremonha e do atrito com a parede. Para relações altura/lado menor que 1, o funil normalmente não toca a parede (Figura 3.9b). Para descarga central e não eixo simétrico na superfície do topo do material, o funil pode ser tomado como um cone com ângulo dado pela equação (3.1), mas com:

$$\phi_{vu} = \tan^{-1} (\sin \phi_w)$$

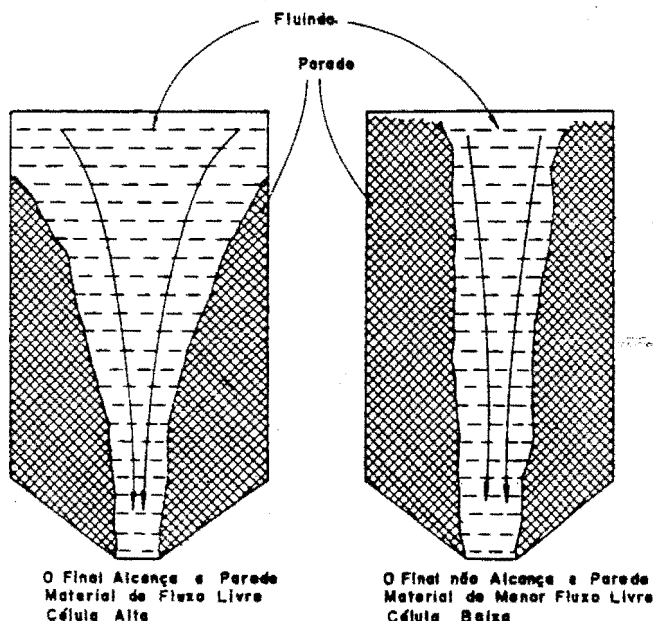


Figura 3.9. Diferentes formas de fluxo de funil.

3.3.5. Fluxo Instável e Excêntrico.

Uma característica importante do fluxo de funil é sua tendência de instabilidade da geometria de fluxo e vazão de descarga, devido às áreas adjacentes ao canal de fluxo estarem sempre em uma situação instável. Por este motivo, o fluxo tende a variar e estas variações podem ser pronunciadas ou mesmo severas, afetando toda a estrutura do silo pela formação repetitiva e colapso de arcos. Similarmente, a área onde o funil toca a parede sempre se move para baixo e para cima durante a descarga. Materiais grossos tendem a causar vibrações cíclicas e regulares, enquanto que partículas finas podem causar colapsos de grande quantidade de material, provocando grandes sobrepressões. Em geral, estes efeitos são maiores com o aumento da vazão de descarga.

O efeito de instabilidade no fluxo pode ser minimizado :

- a) evitando o projeto de fluxo de funil onde é ou algumas vezes pode ser próximo da região de fluxo da mesma;
- b) evitando o projeto de fluxo de massa onde é ou algumas vezes pode ser próximo da região de fluxo do funil;
- c) evitando extratores que não descarreguem o material de toda a boca de descarga do silo;
- d) evitando cantos salientes, transições abruptas, descontinuidades na parede, e quinas;
- e) evitando mudanças nas propriedades de fluxo do material armazenado sem recalcular as novas mudanças, e onde necessário e possível, mudando o projeto do silo (por exemplo, o revestimento das paredes e tremonha);
- f) evitando grandes mudanças do ângulo de atrito da parede com o tempo pela redução da temperatura de um material quente, aquecendo as paredes para prevenir migrações de umidade pelas paredes, e periodicamente regulando o material no limite de seu tempo de armazenamento;
- g) usando paredes rugosas na seção paralela;
- h) diminuindo a relação entre a altura e o diâmetro do silo;
- i) usando sistemas de quebrar arcos periodicamente para quebrar a formação de arcos - estes sistemas podem produzir pressões grandes e irregulares nas paredes, e portanto, deve-se tomar cuidado na utilização dos mesmos.

O fluxo excêntrico é causado por uma variedade de condições, incluindo carregamento excêntrico, segregação durante carregamento, descarga excêntrica ou descarga irregular (por exemplo causada por extratores imprópriamente projetados); elementos internos como vigas e tirantes, e múltiplas bocas de descarga onde sempre a vazão de descarga não é a mesma para todas elas. O fluxo excêntrico é usualmente indesejável e conduz ao atrito desigual nas paredes e pressões desiguais. Ele também promove flutuações no fluxo.

A descarga excêntrica pode ser minimizada por:

- a) carregamento central e simétrico sempre que possível;
- b) evitando segregações, especialmente segregações não simétricas durante carregamento;
- c) evitando descarga excêntrica ou múltipla;
- d) evitando todos os dispositivos estruturais dentro do silo.

4. DETERMINAÇÃO DAS CARGAS EM SILOS.

4.1. Generalidades.

A estimativa das cargas nas paredes dos silos tem sido objeto de pesquisa por muitos anos. Enquanto o ano de 1985 marcou o 90º aniversário do histórico artigo de Janssen (1895) no assunto, a estimativa das cargas nas paredes dos silos ainda continua em área de estudos intensivos. Enquanto existe uma variedade muito grande de aproximações para o problema, uma coisa é certa: as cargas exercidas nas paredes dos silos sob condições de operação são diretamente relacionadas com o tipo de fluxo que aparece no silo carregado e, mais importante, quando em fase de descarga.

De um modo geral, a predição das cargas nas paredes dos silos que apresentam fluxo de funil é mais difícil (Calil, 1988) e incerta do que para silos que apresentam fluxo de massa. Este é especialmente o caso para silos com saídas múltiplas ou excêntricas e ou carregamento excêntrico. Devido à dificuldade de precisão na predição dos tipos de fluxo, há muito para se estudar sobre as formas geométricas dos silos, configurações de carga e descarga, e tipos de tremonhas.

Além do tipo de fluxo que se desenvolve no silo, há muitas outras variáveis que influenciam as cargas nas paredes do silo, incluindo:

- método de carregamento
- vazão de carregamento
- segregação no carregamento
- variações nas propriedades de fluxo do material armazenado
- razão de desaeração
- tendência do material armazenado de sobreconsolidar
- rigidez das paredes do silo
- precisão dimensional da construção e geometria
- temperatura e flutuação de temperatura
- nos silos para cereais, aumento na umidade causando inchamento.

Um exame dos procedimentos mais usados para cargas na parede indica que pouca atenção é dada para a maioria das variáveis acima. Além disso, os procedimentos incorporam limitações

significantes, como por exemplo:

- o material armazenado tem propriedades invariantes
- as estruturas de contenção são perfeitamente rígidas e são livres de imperfeições nas paredes
- os sólidos são carregados sem impacto significativo, desceram rapidamente e não sobreconsolidam prontamente
- os sólidos são homogêneos e se comportam isotropicamente
- os sólidos são considerados como incompressíveis.

Afortunadamente, a maioria das limitações acima, conduzem a estimativas de cargas que são conservativas, levando à não ocorrência dos desvios extremos.

Para entender os conceitos para a estimativa das cargas na parede é necessário considerar que o campo de tensões iniciais, que atua enquanto o silo está sendo carregado de completamente vazio e sem descarga, é completamente diferente do campo de tensões de fluxo que atua quando se realiza alguma descarga, figura 4.1. Esta diferença entre as duas situações de carregamento conduz a sobrepressões consideráveis atuando nas paredes do silo quando a situação de fluxo for alcançada. Precisa também ser notado que quando o campo de tensões de fluxo se desenvolve no silo, ele será mantido até que o silo seja completamente esvaziado.

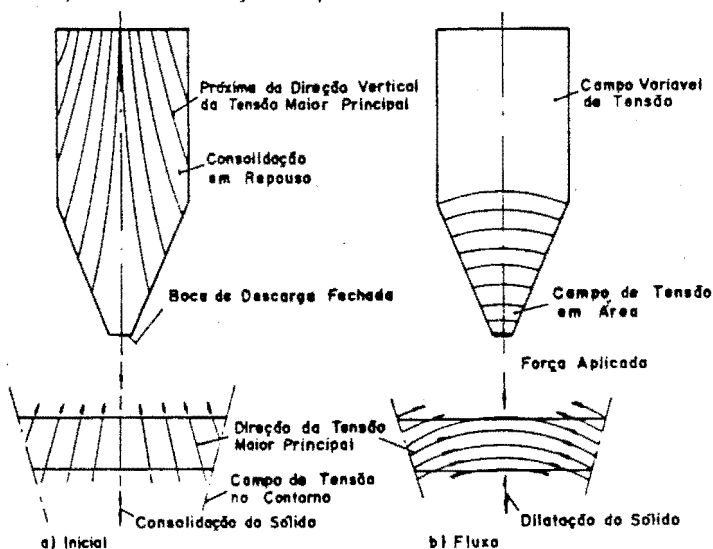


Figura 4.1. Campo de tensões: (a) - inicial (b) - fluxo

Na avaliação das cargas nas paredes de qualquer estrutura de armazenamento, as seguintes informações precisam ser conhecidas:

(a) Parâmetros do material armazenado

- efetivo ângulo de atrito interno, δ_{nom}
- valor nominal do ângulo de atrito com a parede ao longo de todas as seções das paredes do silo, ϕ_w_{nom}
- um valor alto, conservativamente, para a densidade, γ

Devido a incertezas e variações nas propriedades dos materiais armazenados, os seguintes casos de projetos devem ser examinados:

- (i) $\phi_w = \phi_w_{nom} - 5^\circ$
- (ii) $\phi_w = \phi_w_{nom} + 5^\circ$
- (iii) $\delta = \delta_{nom} + 10^\circ$
- (iv) $\delta = \delta_{nom} - 10^\circ$

(b) Parâmetros do silo

- geometria do silo
- altura total do sólido armazenado
- tipo de fluxo (fluxo de massa, fluxo de funil, fluxo expandido).

4.2. As Principais Normas Existentes em Silos

As Normas Internacionais existentes para a estimativa das cargas em silos são basicamente apoiadas em duas teorias: a teoria de Janssen (1895) para as estimativas das cargas iniciais ou de carregamento no silo e a teoria de Jenike (1968, 1977), para a estimativa das cargas de fluxo em silos com fluxo de massa e fluxo de funil.

Com a finalidade de avaliar os procedimentos utilizados pelas mesmas na estimativa das cargas, é apresentado em forma de resumo as mais importantes e recentes normas existentes no mundo, que são: a Francesa SNBATI (1975), a Canadense CFBC (1983), a Americana ACI 313 (1983), a Inglesa BMHB (1985), a Australiana NCSE (1986) a Alemã DIN 1055 (1987) e a Européia FIP/ISO (em execução).

4.2.1. Campo de Aplicação.

4.2.1.1. BMHB (1985) - Britânica.

- válida para qualquer material de construção do silo;
- dimensões das partículas: desde materiais finos coesivos de dimensões de microns até dimensões de 150 mm ou maior;
- dimensões da instalação: desde poucas centenas de quilogramas até dezenas de milhares de toneladas;
- todas as formas geométricas.

4.2.1.2. FIP/ISO (em andamento) - Européia.

- válida para silos de concreto;
- dimensões das partículas:
 - $$\text{máximas: } \frac{d_a \text{ (dimensão máxima das partículas)}}{R \text{ (raio hidráulico)}} \leq 1$$
 - $$\text{mínimas: } \frac{d_a \text{ (diâmetro do arco no material armazenado)}}{R \text{ (raio hidráulico)}} \geq 1$$
- boca de descarga simétrica;
- são excluídos os silos com dispositivos no regime de descarga externa como extratores, tubos de fluxo internos ou outras estruturas que perturbem as descargas livres, rotacionais e simétricas;
- materiais de fluxo livre de pequena coesão;
- carregamento de processo contínuo com envolvimento de pequenas massas e não considerando cargas de impacto;
- as forças transferidas para a parede através de partículas simples devem ser observadas se a dimensão das partículas excede a relação limite $d_b/t < 5$ (t = espessura da parede).

4.2.1.3. CFBC (1983) - Canadense.

- válida para qualquer material de construção do silo;
- válida para armazenamento de materiais agrícolas (cereais e farinhas) e silagem;
- todas as formas geométricas.

4.2.1.4. DIN 1055 (1987) - Alemã.

- válida para qualquer material de construção do silo;
- silos verticais e prismáticos;
- dimensões do silo: $H/D > 0,8$
 $Pvc/\gamma \quad 25m$
- não é válida para materiais fortemente coesivos e materiais granulares que incham.

4.2.1.5. ACI 313 (1983) - Norte Americana.

- válida para silos de concreto armado ou protendido, e alvenaria armada;
- silos verticais com todas as formas geométricas;
- materiais granulares e pulverulentos.

4.2.1.6. SNBATI (1975) - Francesa.

- válida para silos de concreto armado ou protendido;
- válida para materiais granulares e pulverulentos sem coesão;
- válida para valores de esbeltez limite superiores a: $H/R \quad 3,5$
- valor limite do raio hidráulico:
 - . $R \quad 6m$ para descarga normal, estruturalmente anormal com cereal e mecanicamente anormal
 - . $R \quad 12,5m$ para descarga estruturalmente anormal com bocas de descarga de pequenas aberturas e $H/R \leq 6$.

4.2.1.7. NCSE (1986) - Australiana.

- válida para a determinação das cargas para o projeto de estruturas de armazenamento para sólidos (células, silos, armazéns, graneleiros, tremonha);
- não é válida para armazenamento de sólidos muito coesivos;
- não é válida para sólidos com partículas maiores que 200mm;
- não é válida para células para armazenamento de silagem.

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

4.2.2.1. BMHB

$$R = \frac{\text{área interna da seção transversal (A)}}{\text{Perímetro interno (U)}}, \text{ (m)}$$

4.2.2.2. FIP/ISO.

Seção transversal	R
Circular	0,25 d
Quadrado	0,25 a
Retangular	
- com relação ao lado menor a	0,25 a
- com relação ao lado maior b	
b/a ... 1,5	0,30 a
2,0	0,32 a
4,0	0,40 a
> 5,0	0,50 a
Intercélulas	0,25 a
Poligonal	0,27 d

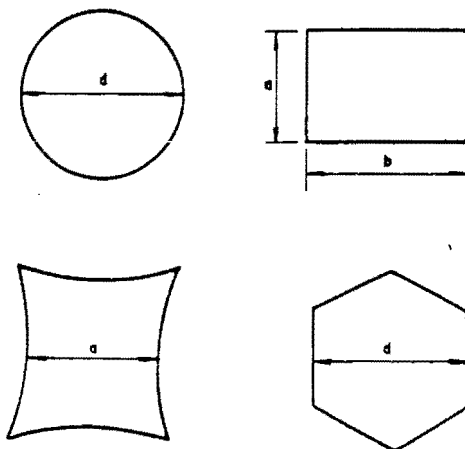


Figura 4.2. Raio hidráulico - R.

4.2.2.3. CFBC.

- para células circulares: $R = d/4$

- para células retangulares: $R = \frac{2 a b - a^2}{4 b}$ (para o lado maior)

$R = a/4$ (para o lado menor)

4.2.2.4. DIN 1055.

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

- para células horizontais: $R = a/2$

- entre células: $R = d/4$

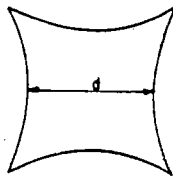
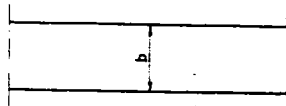


Figura 4.3. Ráio hidráulico - R.

4.2.2.5. ACI 313.

- para células circulares: $R = d/4$

- para células poligonais regulares: $R = de/4$

de = diâmetro do círculo de área equivalente à área interna da célula poligonal

- para células retangulares:

. $R = a/4$ para calcular a pressão no lado menor

. $R = a'/4$ para calcular a pressão no lado maior

a' = comprimento do lado para uma célula quadrada imaginária =

$$2 ab / (a+b)$$

4.2.2.6. SNBATI.

- para células circulares: $R = d/4$
- polígono regular inscrito em uma circunferência de diâmetro d :
 $R = d/4$
- retângulo de lado $2a$ e lado maior $2b$: $R = ab/(a + b)$
- coroa circular de raio externo r e raio interno r' :
 $R = (r - r')/2$

4.2.2.7. NCSE.

Seção transversal	R
Circular	0,25 dc
Quadrada	0,25 dc
Retangular	0,25 dc
- com relação ao lado menor a	0,25 dc
- com relação ao lado maior b	b/a
	1,5 - 0,30 dc
	2,0 - 0,33 dc
	4,0 - 0,40 dc
	5,0 - 0,50 dc
Forma de estrela	0,25 dc
Poligonal	0,27 dc

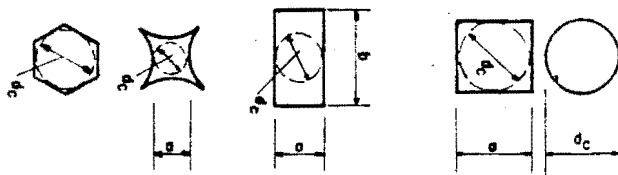


Figura 4.4. Ráio hidráulico - R.

4.2.3. O Valor de K (Relação entre as Pressões Horizontais e Verticais).

4.2.3.1. BMHB.

Define dois valores para K

- Valor inferior: $K_l = 0,25$ para cálculo das pressões verticais
- Valor superior: $K_u = 0,60$ para cálculo das pressões horizontais

Obs.: se a parede é muito rugosa, o valor superior de K_u deve ser tomado igual a 0,75.

4.2.3.2. FIP/ISO.

Explica que o valor de K deve ser medido para condições de deformação uniaxial, carregando até a pressão máxima vertical P_v esperada no silo e descarregando até a pressão zero. Os valores característicos superior e inferior de K, são determinados para a pressão máxima esperada no silo.

4.2.3.3. CFBC.

A norma canadense não fornece fórmulas para a determinação de K. Define que o valor de K deve ser tomado de uma tabela apresentada pela mesma, onde fornece dois valores de K, um para parede rugosa e outro para parede lisa. Fornece estes dois valores para apenas 8 materiais granulares.

4.2.3.4. DIN 1055.

O valor de K é definido, na norma alemã, pela expressão:

$K = 1,2 (1 - \sin \phi)$; coeficiente de empuxo de solos com um fator 1,2. O fator 1,2 foi escolhido para garantir que em pequenas alturas do material armazenado, ou seja, na parte superior do silo, resultem curvas de cargas mais completas.

4.2.3.5. ACI 313.

A norma americana define o seguinte valor de K:

$$K = \frac{1 - \sin \phi_i}{1 + \sin \phi_i}$$

4.2.3.6. SNBATI.

A norma francesa define dois valores para K, dependendo do que ela chama de dois estados de equilíbrio.

O primeiro estado de equilíbrio (o estado 1) está caracterizado por um valor menor de K, ou seja:

$$K_1 = \frac{1 - m \sin \phi_i}{1 + m \sin \phi_i} \cos^2 \phi_w \quad \text{sendo } m = \sqrt{1 - \rho^2}$$

$$\rho = \frac{\tan \phi_w}{\tan \phi_i}$$

Explica que este estado de equilíbrio se produz após um carregamento do silo quando este se efetua em uma etapa única e quando a massa de produto permanece em repouso. Explica que este estado é o que se deve adotar para o estudo das solicitações nos elementos que compõem o fundo do silo.

O segundo estado de equilíbrio está caracterizado por um valor maior de K, ou seja:

a) Silos com descarga normal, definido como estado 2:

$$K_2 = \cos^2 \phi_w$$

b) Silos com descarga anormal, definido como estado 3, deve ser adotado o menor dos seguintes valores para K:

$$K = 1,4 \times K_1 \quad \text{ou} \quad K = K_2$$

Este estado de equilíbrio se produz normalmente ao iniciar-se a descarga do silo, e é o que deve ser adotado para o estudo das solicitações nas paredes laterais.

4.2.3.7. NCSE.

Explica que para a determinação do valor de K nas paredes verticais, deve ser tomado o maior dos seguintes valores:

$K = 0,4$ somente para $\phi < 25^\circ$

$K = (1 - \sin \phi)/(1 + \sin \phi)$

$K = (1 - \sin^2 \phi)/(1 + \sin^2 \phi)$ somente para categorias de paredes rugosas ou corrugadas

Para a determinação das pressões verticais no plano horizontal deve ser adotado o menor valor de K.

4.2.4. Propriedades dos materiais armazenados.

4.2.4.1 Peso Específico (KN/m³).

MATERIAL	NCSE	ACI313	BMHB	SNBATI	DIN1055	CFBC
alumina	10	00	10	00	12	00
	12	00	12	00	12	00
cimento	13	13.5	13	15	16	00
	16	16	16	15	16	00
coque	6.8	6.1	00	00	8	00
	8	6.1	00	00	8	00
farinha	6.5	6.1	7	9	7	00
	7.5	6.1	7.5	9	7	00
milho	7	7.4	7.5	8	8	8
	8	9.9	8.5	8	8	8
trigo	7.5	7.4	8	8.5	9	8.4
	9	9.9	9	8.5	9	8.4
cevada	7	7.4	7.5	8.5	8	6.5
	8.5	9.9	8.5	8.5	8	6.5
acucar	8	10	9	9.2	9.5	00
	10	10	10	9.2	9.5	00
clinker	15	14.1	00	15	18	00
	18	14.1	00	16	18	00
cal	6	8	6	00	6	00
	8	9.6	8	00	6	00
areia	15	16	15	00	16	00
	17	20	17	00	16	00
fosfatos	16	00	00	00	22	00
	19	00	00	00	22	00
carvao	8.5	9.6	00	00	10	00
	11	11.2	00	00	10	00
agregados	16	16	16	00	18	00
	18	20	18	00	18	00
soja	00	8	00	7.5	8	7.8
	00	9.6	00	7.5	8	7.8
calcario	00	00	00	00	13	00
	00	00	00	00	13	00
beterraba	00	00	00	00	7	00
em polpa	00	00	00	00	7	00
batatas	00	00	00	00	8	6.7
	00	00	00	00	8	7.7
carvao-	6	00	00	00	8	00
po	9	00	00	00	8	00
cinzas	8.5	00	8	00	15	00
	11	00	10	00	15	00
escoria	00	00	00	00	12	00
	00	00	00	00	12	00
ferro	19	26.4	00	00	22	00
	22	26.4	00	00	22	00
rapeseed	00	00	00	00	00	6.7
	00	00	00	00	00	6.7
flaxseed	00	00	00	00	00	6
	00	00	00	00	00	6

4.2.4.2 Angulo de Atrito Interno (graus).

MATERIAL	NSCE	ACI313	BMHB	SNBATI	DIN1055	CFBC
alumina	25	00	30	00	27	00
	40	00	38	00	27	00
cimento	40	24	40	28	27	00
	50	30	45	28	27	00
coque	00	40	00	00	30	00
	00	40	00	00	30	00
farinha	23	40	23	20	42	00
	30	40	30	20	42	00
milho	28	23	15	24	30	27
	33	37	25	24	30	27
trigo	28	23	15	26	30	27
	32	37	25	26	30	27
cevada	30	23	23	25	27	27
	33	37	30	25	27	27
acucar	35	35	33	30	30	00
	40	35	40	30	30	00
clinquer	42	33	00	33	36	00
	52	33	00	33	36	00
cal	35	35	35	00	25	00
	45	55	45	00	25	00
areia	35	25	35	00	36	00
	40	40	40	00	36	00
fosfatos	35	00	00	00	27	00
	55	00	00	00	27	00
carvao	40	50	00	00	30	00
	60	65	00	00	30	00
agregados	31	25	36	00	30	00
	31	35	40	00	30	00
soja	00	23	00	27	25	27
	00	23	00	27	25	27
calcario	00	00	00	00	27	00
	00	00	00	00	27	00
beterraba	00	00	00	00	30	00
em polpa	00	00	00	00	30	00
batatas	00	00	00	00	30	00
	00	00	00	00	30	00
carvao-	40	00	00	00	25	00
po	50	00	00	00	25	00
cinzas	30	00	30	00	33	00
	35	00	34	00	33	00
escoria	00	00	00	00	36	00
	00	00	00	00	36	00
ferro	35	40	00	00	30	00
	35	40	00	00	30	00
rapeseed	00	00	00	00	00	27
	00	00	00	00	00	27
flaxseed	00	00	00	00	00	14
	00	00	00	00	00	14

4.2.4.3 Coeficiente de Atrito com a Parede (x 0.01)

MATERIAL	NCSE			ACI313		BMHB		SNBATI			DIN1055			CFBC		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	14	16
alumina	36	47	58	00	00	29	36	00	00	00	50	45	40	00	00	00
	47	58	70	00	00	40	47	00	00	00	50	45	40	00	00	00
cimento	36	47	58	36	30	40	45	46	43	00	50	45	40	00	00	00
	47	58	70	45	30	51	58	46	43	00	50	45	40	00	00	00
coque	00	00	00	80	50	00	00	00	00	00	60	55	50	00	00	00
	00	00	00	80	50	00	00	00	00	00	60	55	50	00	00	00
farinha	32	42	47	30	30	25	34	32	29	00	50	35	25	00	00	00
	42	53	70	30	30	36	47	32	29	00	50	35	25	00	00	00
milho	27	36	47	29	26	25	40	39	33	00	60	40	25	30	40	60
	47	58	62	47	42	45	58	39	33	00	60	40	25	30	40	60
trigo	27	36	47	29	26	25	40	42	37	00	60	40	25	30	40	60
	47	58	62	47	42	45	58	42	37	00	60	40	25	30	40	60
cevada	27	40	47	29	26	09	32	41	35	00	50	35	25	30	40	60
	45	51	62	47	42	36	47	41	35	00	50	35	25	30	40	60
acucar	27	36	47	43	00	42	47	50	43	29	55	50	45	00	00	00
	47	70	84	43	00	51	58	50	43	29	55	50	45	00	00	00
clinquer	00	47	58	60	30	00	00	56	45	00	60	55	45	00	00	00
	00	58	70	60	30	00	00	56	45	00	60	55	45	00	00	00
cal	32	47	58	50	30	36	40	00	00	00	50	40	35	00	00	00
	47	65	84	60	30	53	58	00	00	00	50	40	35	00	00	00
areia	00	27	36	40	35	27	36	00	00	00	60	50	40	00	00	00
	00	40	49	70	50	40	49	00	00	00	60	50	40	00	00	00
fosfatos	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	55	50	40	00	00	00
	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	55	50	40	00	00	00
carvac	27	47	47	45	30	00	00	00	00	00	60	50	45	00	00	00
	47	70	84	50	30	00	00	00	00	00	60	50	45	00	00	00
agregado	32	42	47	40	00	29	36	00	00	00	60	50	40	00	00	00
	42	53	70	45	00	42	49	00	00	00	60	50	40	00	00	00
soja	00	00	00	25	20	00	00	44	38	00	50	40	25	20	35	50
	00	00	00	25	20	00	00	44	38	00	50	40	25	20	35	50
calcarico	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	55	50	40	00	00	00
	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	55	50	40	00	00	00
beterra.	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	55	45	35	00	00	00
	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	55	45	35	00	00	00
batatas	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	50	40	35	00	00	00
	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	50	40	35	00	00	00
carvao-	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	55	50	40	00	00	00
po	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	55	50	40	00	00	00
cinzas	32	47	58	00	00	25	32	00	00	00	70	60	50	00	00	00
	47	70	84	00	00	36	47	00	00	00	70	60	50	00	00	00
escoria	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	70	60	50	00	00	00
	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	70	60	50	00	00	00
ferro	00	00	00	50	36	00	00	00	00	00	60	55	50	00	00	00
	00	00	00	50	36	00	00	00	00	00	60	55	50	00	00	00
rapeseed	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	20	35	40
	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	20	35	40
flaxseed	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	20	35	40
	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	20	35	40

Tipos de superfícies: 1,13,14

2,5

3,4,9,12,16

6,15

7

8,11

10

- aço inox polido, aço liso

- chapas de aço

- concreto não revestido

- paredes lisas

- paredes rugosas

- canaletas horizontais

- concreto pintado

4.2.5. Fluxo.

4.2.5.1. Perfis de Fluxo.

4.2.5.1.1. BMHB.

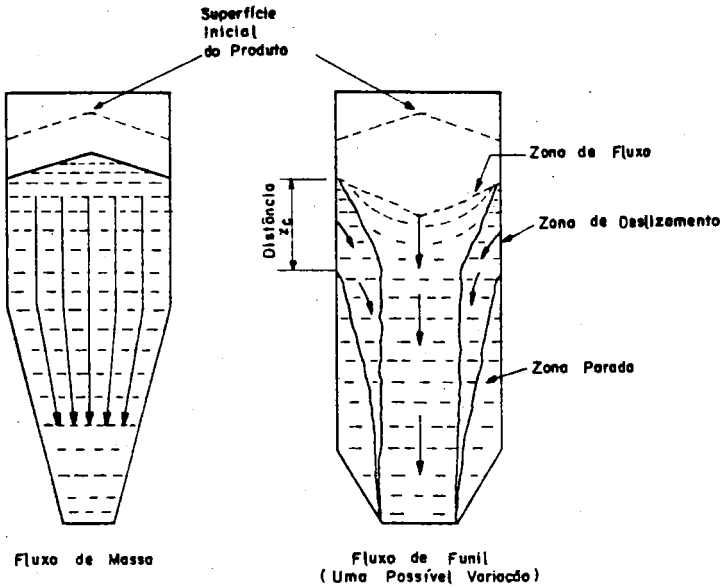


Figura 4.5. Tipos de Fluxo.

4.2.5.1.2. FIP/ISO.

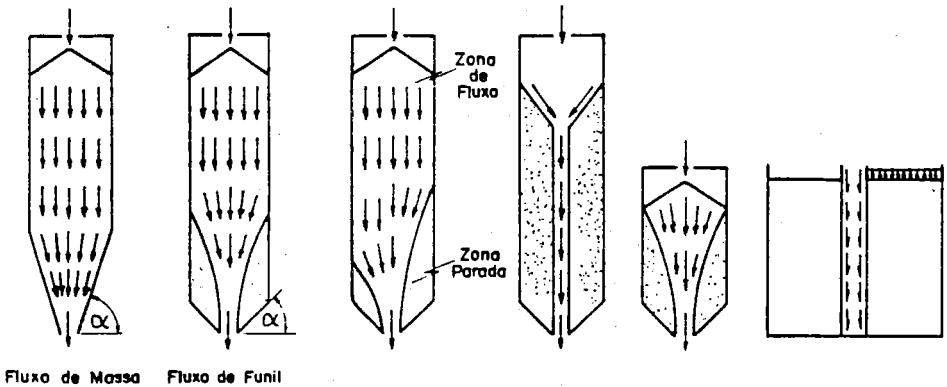


Figura 4.6. Tipos de Fluxo.

4.2.5.1.3. CFBC - não define.

4.2.5.1.4. DIN 1055.

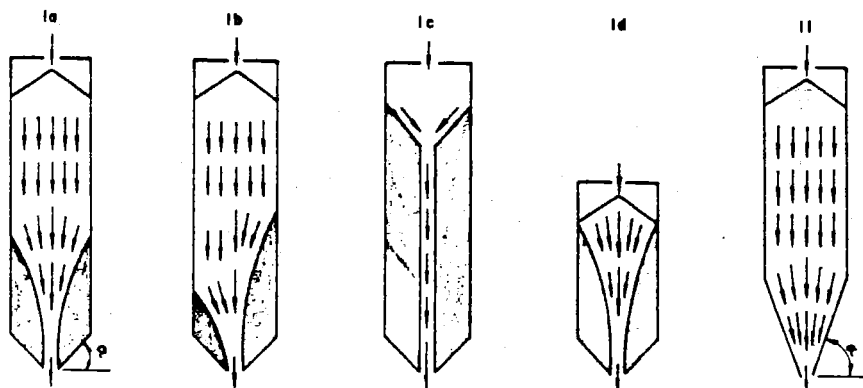


Figura 4.7. Tipos de Fluxo.

4.2.5.1.5. ACI 313.

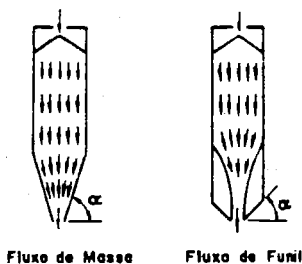


Figura 4.8. Tipos de Fluxo.

4.2.5.1.6. SNBATI - não define.

4.2.5.1.7. NCSE.

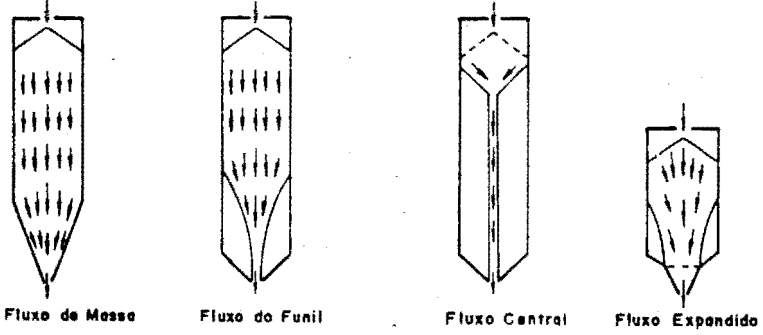


Figura 4.9. Tipos de Fluxo.

4.2.5.2. Predição do Tipo de Fluxo.

4.2.5.2.1. BMH8 - não define graficamente.

4.2.5.2.2. FIP/ISO.

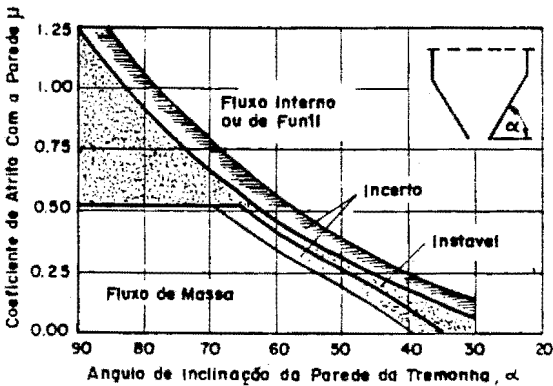
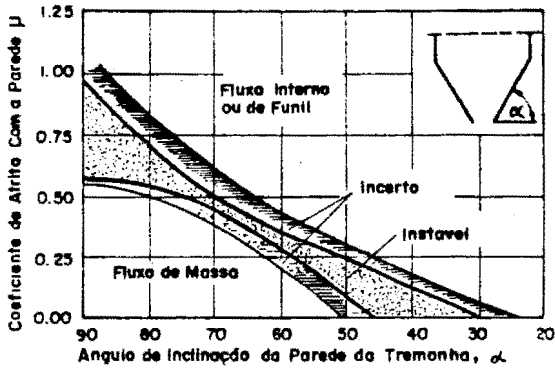


Figura 4.10. Determinação Gráfica do Tipo de Fluxo.

4.2.5.2.3. CFBC - não define.

4.2.5.2.4. DIN 1055.

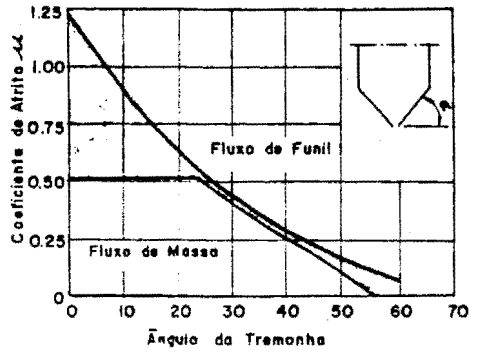
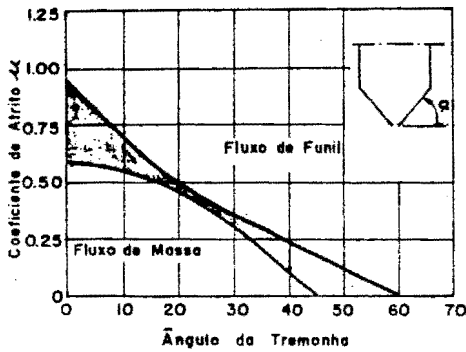
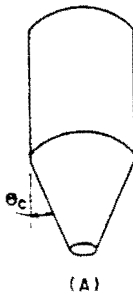
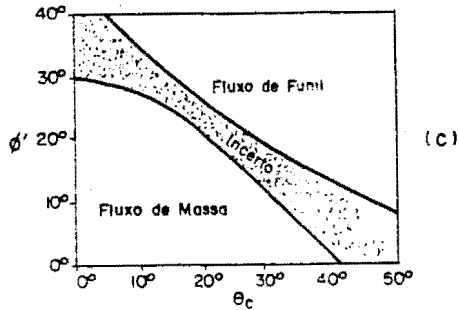


Figura 4.11. Determinação Gráfica do Tipo de Fluxo.

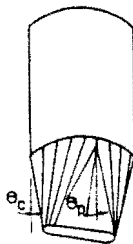
4.2.5.2.4. ACI 313.



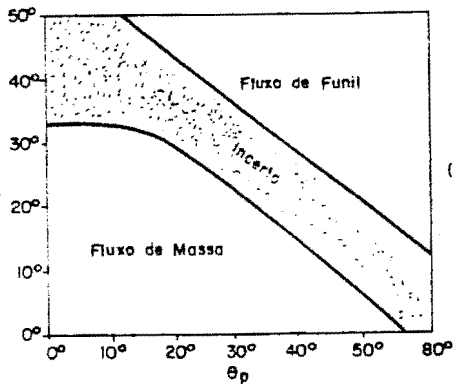
(A)



(C)



(B)



(D)

Figura 4.12. Determinação Gráfica do Tipo de Fluxo.

4.2.5.2.6. SNBATI - não define.

4.2.5.2.7. NCSE.

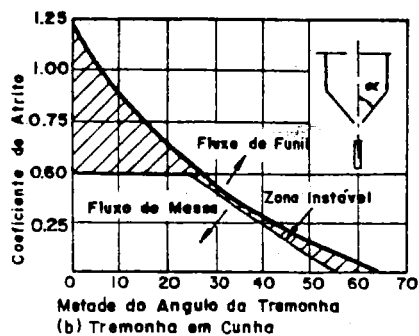
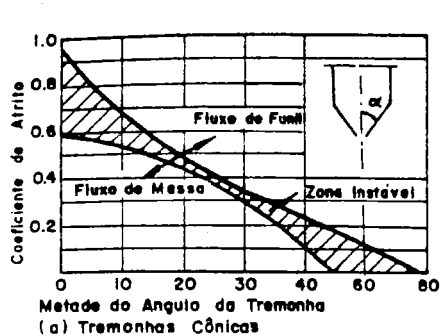


Figura 4.13. Determinação Gráfica do Tipo de Fluxo.

4.2.6. Pressões a Considerar.

4.2.6.1. Pressões de Carregamento

4.2.6.1.1. BMMB.

- células altas

a) Pressões horizontais

$$p_{zf} = \frac{\gamma_u R}{\mu l} \left[1 - \exp \left(- \frac{\mu l K_u}{R} \left(z + \frac{H_s}{2 + m} \right) \right) \right], Pa$$

p_{zf} = pressão horizontal na altura z , Pa

γ_u = peso específico, kgf/m^3 - limite superior

R = raio hidráulico = área/perímetro, m

μl = limite inferior do coeficiente de atrito com a parede

μl = $\text{tg } \phi_l$ se $\phi < \delta_l - 3^\circ$

μl = $\sin \delta_l$ se $\phi \geq \delta_l + 3^\circ$

δ_l = limite inferior do ângulo efetivo de atrito interno, graus

K_u = limite superior da relação de pressões ($K_u = 0,60$)

z = distância do ponto mais baixo do topo da superfície (talude) do material na seção transversal, m

H_s = a distância entre o ponto mais baixo e o mais alto da superfície de topo, m

H_s = $D/2 \times \text{tg } \lambda$ (λ = ângulo de repouso), graus

m = 0 para silos retangulares (comprimento pelo menos três vezes a largura)

m = 1 para silos de eixo simétrico

D = diâmetro ou largura do lado menor da seção paralela, m

Obs.: para silos retangulares com relação comprimento/largura entre 3 e 1, m é interpolado entre os valores acima.

b) Tensões cisalhantes

$$\tau_{zf} = \mu_u p_{zf}, Pa$$

τ_{zf} = tensão de cisalhamento ao longo da parede na seção paralela à profundidade z , Pa

μ_u = limite superior do coeficiente de atrito com a parede

c) Força total nas paredes devida ao atrito

$$U_{zf} = \gamma u A \left(z + \frac{Hs}{2+m} - \frac{\mu l}{\mu u} - \frac{P_{zf}}{\gamma u K_u} \right), N$$

U_{zf} = forças no plano da parede da seção paralela a prof. z , N

A = área da seção transversal, m^2

d) Carga vertical atuando na seção paralela

$$Q_{zf} = \frac{A \times P_{zf}}{K_l}$$

Q_{zf} = carga vertical de carregamento na seção paralela a altura z , N

K_l = limite inferior da relação de pressões ($K_l = 0,25$)

- Células baixas: altura igual ou menor que 1,5 o diâmetro ou lado

a) pressões horizontais

$$P_{zf} = \frac{\gamma u R}{1,22 \mu l^{0,75}} \left[1 - \left(1 + \frac{z}{H_0} \right)^{-2} \right], Pa$$

$$\text{onde: } H_0 = \frac{R}{\mu u K_l} - \frac{Hs}{m+2}, m$$

b) Carga vertical Q_{zf}

$$Q_{zf} = \gamma u z_1 A, N$$

- Se a altura é menor que o diâmetro ou lado, pode ser usada:

$$P_{zf} = K_u \gamma z, Pa$$

e o maior dos dois valores das equações acima deve ser usado.

Neste caso a pressão vertical é tomada como:

$$P_{zfv} = \gamma z \quad \text{onde } z = H \text{ para a parede e } z = 1,5D \text{ no meio}$$

ou

$$P_{zfv} = \gamma z_1 \quad \text{onde } z_1 = \text{distância desde o topo do cone de material ao ponto considerado.}$$

4.2.6.1.2. FIP/ISO

a) Pressões horizontais

$$P_h(z) = \frac{\gamma R}{\mu} \times C_z(z)$$

$$C_z(z) = (1 - e^{-z/z_0})$$

$$z_0 = \frac{R}{K \mu}$$

b) Pressões verticais

$$P_{vf}(z) = \frac{\gamma R}{K \mu} C_z(z)$$

c) Pressões de atrito

$$P_{vf}(z) = \gamma R C_z(z)$$

As forças de atrito da parede P_v podem ser determinadas pela força resultante $P_v(z)$ por unidade de comprimento em uma seção horizontal da parede do silo.

$$P_v(z) = \int_0^z P_{vf}(z) = \gamma R [z - z_0 C_z(z)]$$

4.2.6.1.3.CFBC.

- Células altas ($H > 0,75D$ ou $0,75a$)

a) pressões horizontais

$$P_{hf}(z) = \frac{\gamma R}{\mu} \left[1 - e^{-\frac{K \mu z}{R}} \right]$$

à altura $z = \frac{2,5 R}{\mu K}$ a pressão máxima horizontal é: $\frac{\gamma R}{\mu}$

b) Pressões verticais

$$P_{vf}(z) = \frac{\gamma R}{\mu K} \left[1 - e^{-\frac{K \mu z}{R}} \right]$$

c) Força de atrito nas paredes

$$F_v(z) = \gamma R \left[H - \frac{R}{K \mu} + \frac{R}{K \mu} e^{-\frac{K \mu H}{R}} \right]$$

- Células baixas

a) Pressões horizontais

$$P_{hf}(z) = \gamma H C \quad \text{para carregamento nivelado}$$

$$P_{hf}(z) = 1,33 \times C \times \gamma \times H \quad \text{carregamento com cone;}$$

onde $C = 0,4$ para cereais

$C = 0,5$ para sementes oleosas

$C = 0,3$ para grãos de solo

b) Pressões verticais

$$P_{vf}(z) = \gamma H$$

4.2.6.1.4. DIN 1055.

a) Pressões horizontais

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

b) Pressões verticais

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

c) Pressões de atrito por m^2 de superfície de parede

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

4.2.6.1.5. ACI 313.

a) Pressões horizontais

$$P_{hf}(z) = \frac{\gamma R}{\mu} \left[1 - e^{-\frac{\mu K}{R} z} \right]$$

b) Pressões verticais

$$P_{vf}(z) = \frac{\gamma R}{\mu K} \left[1 - e^{-\frac{\mu K}{R} z} \right]$$

c) Força de atrito por unidade de perimetro

$$F_{vf}(z) = (\gamma z - 0,8 P_{vf}(z))R$$

4.2.6.1.6. SNBATI.

-Células altas

a) Pressões horizontais

$$P_{hf}(z) = 1,15 \left(\frac{\gamma R}{\mu} \right) \left(1 - e^{-\frac{z - z_0 h^*}{z_0}} \right)$$

$h^* = 1/2 R \mu$ - seção circular ou polígono regular

$h^* = a/8 (3 - a/b)$ - seção retangular lado menor $2a$ e maior $2b$

$$z_0 = R/K_1 \mu$$

b) Pressões de atrito na parede

$$P_{wf}(z) = P_{hf}(z) \times \mu$$

c) Pressões verticais

$$\bar{v} = 1,35 \gamma (z_0(1 - e^{-\frac{h - h''}{z_0}}) + h'')$$

- Células baixas

- inicialmente calcula-se a profundidade da transição Z_T pela expressão:

$$Z_T = h'' + \sqrt{(6|h' - h''|z_0)}$$

$$X_T = \sqrt{((6|h' - h''|)/(z_0))}$$

- se $z > Z_T \rightarrow P_{hf}(z) = 1,15 (\gamma R / \mu)(1 - e^{-X_T})$

- se $z < Z_T$ e $h' (= h''$ se admite que $P_{hf}(z)$ varia linearmente desde $P_{hf}(z) = 0$ para $z = h'$ até $P_{hf}(z)$ para $z = Z_T$ (figura 4.14)

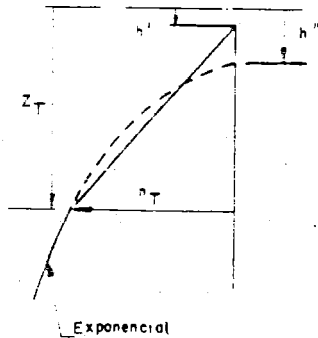


Figura 4.14. Pressões horizontais.

- se $z < Z_T$ e $h' > h''$ se admite que :

$$P_{hf}(z) = 1,15 (\gamma R / \mu)(X_T / 2) - \text{figura 4.15.}$$

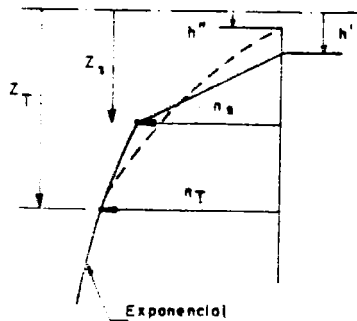


Figura 4.15. Pressões horizontais.

4.2.6.1.7. NCSE.

- Células médias ($1 < hb/db \leq 3$) e altas $hb/db > 3$

a) Pressões laterais

$$P_{nl} = \frac{\rho g R C_z}{\mu}$$

(1)

$$C_z = 1 - \text{EXP}(-z/z_0)$$

$$z_0 = R/\mu K$$

b) Pressões verticais

$$P_{vl} = \frac{\rho g R C_z}{K \mu}$$

c) Pressões de atrito

$$P_{vl} = \mu P_{nl}$$

$$N_{zl} = \rho g R (z - z_0) C_z$$

com C_z calculado no nível em consideração.

- Células baixas

- pressões laterais

A pressão normal é a mesma para células médias e altas exceto que a pressão na parte mais alta do sólido, em contato com a parede precisa ser reduzida a zero. Uma linha reta de transição, pode ser usada de tal modo que à profundidade $z = 0,67 h_s$, a pressão tem o mesmo valor como o dado pela equação (1), conforme é mostrado na figura 4.16.

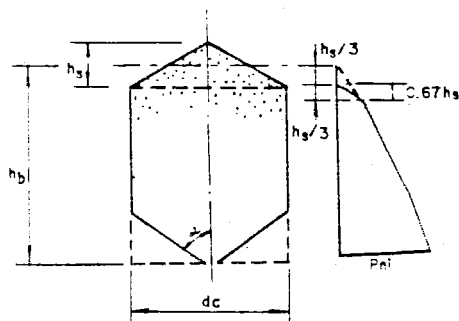


Figura 4.16. Pressões horizontais em células baixas.

- pressões verticais - iguais a de células médias e altas.

- pressões de atrito - iguais a de células médias e altas, com:

$$N_{xz} = \int_0^z \mu p_{nc} dz$$

4.2.6.2. Pressões de Descarregamento Central.

4.2.6.2.1. BMHB.

4.2.6.2.1.1. Para Fluxo de Massa (m - fluxo de massa).

a) Pressões horizontais

$$P_{zdm} = 1,5 P_{zf}, \text{ Pa}$$

b) Tensões cisalhantes

$$\tau_{zdm} = \mu U P_{zdm}, \text{ Pa}$$

c) Força total de atrito nas paredes

$$U_{zdm} = 1,3 U_{zf}, \text{ N}$$

d) Força vertical na seção transversal

$$Q_{zdm} = 1,3 Q_{zf}, \text{ N}$$

e) Pressão concentrada na transição corpo/tremonha

- distância a ser considerada para projeto é 1/4 do diâmetro ou lado acima e abaixo da transição.

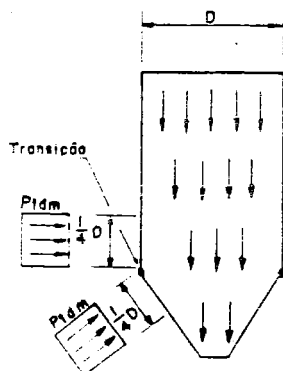


Figura 4.17. Pressão concentrada - fluxo de massa.

$$P_{tdm} = \frac{P_{Hf} (1 + \sin \delta u \cos(2\beta))}{K_u (1 - \sin \delta u \cos(180^\circ - 2\theta + 2\beta))}, \text{ Pa}$$

$$2\beta = \phi + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \phi u}{\sin \delta u} \right), \text{ graus}$$

ϕ = ângulo de atrito com a parede - limite superior

θ = ângulo de inclinação da tremonha com a horizontal

δu = ângulo de atrito interno efetivo - limite superior

4.2.6.2.1.2. Para Fluxo de Funil (c - para funil)

- Cota de transição:

$$z_c = H_T - \frac{D - B}{2} \tan \theta_c, \text{ m}$$

H_T = altura total do silo - H_s

D = diâmetro ou lado do silo, m

B = diâmetro ou lado da boca de descarga da tremonha, m

θ_c = ângulo cônico com a horizontal em fluxo de funil, graus

$$\theta_c = 0,5 \cos^{-1} \left(\frac{1 - \sin \delta u}{2 \sin \delta u} \right) + \beta, \text{ graus}$$

$$2\beta = \tan^{-1} (\sin \delta u) + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \phi u}{\sin \delta u} \right), \text{ graus}$$

a) Pressões horizontais

a1) acima da transição (cota z_c): $P_{zdc} = P_{zdm}$, Pa

a2) abaixo da transição (cota z_c): $P_{zdc} = P_{zf}$, Pa

b) tensões cisalhantes: $\tau_{zdc} = \mu_u P_{zdc}$, Pa

c) Força total de atrito nas paredes: $\underline{U}_{zdc} = \underline{U}_{zdm}$, N

d) Força vertical na seção transversal: não é crítica para projeto, tomar igual a \underline{Q}_{zf} ou seja:

$$\underline{Q}_{zf} = \frac{A P_{zf}}{K_l}$$

e) Pressão concentrada na parede

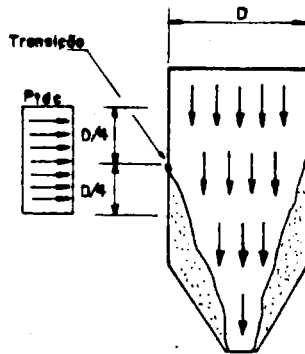


Figura 4.18. Pressão concentrada - fluxo de funil.

$$P_{dc} = \frac{Q_{mf} (1 + \sin \delta l \cos 2\beta_c)}{A [1 - \sin \delta l \cos(180^\circ - 2\theta_c + 2\beta_c)]}, \text{ Pa}$$

$$\text{onde: } 2\beta_c = \phi_c + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \phi_c}{\sin \delta l} \right), \text{ graus e } \phi_c = \tan^{-1}(\sin \delta l)$$

4.2.6.2.2. FIP/ISO

As pressões de descarregamento para células com fluxo de massa e fluxo de funil, devem ser tomadas iguais as pressões de carregamento multiplicadas por um coeficiente de sobrepressão C, fornecido em uma tabela anexa à norma que varia de 1,35 a 1,70:

- alumina, cevada, areia seca, coque, pedra, farinha, açúcar, trigo: 1,35
- cimento, clínquer, carvão, milho, soja: 1,70
- cinzas: 1,5

Para células com fluxo interno, as pressões de descarregamento devem ser tomadas iguais as pressões de carregamento.

Para células com fluxo de massa, deve também ser considerada uma carga adicional constante P_s se estendendo sobre uma distância de 0,20D abaixo e acima da junção do corpo com a tremonha dada por:

$P_s = 2 \times P_{ho}$, onde, P_{ho} é a pressão horizontal na parede, na parte cilíndrica diretamente acima da tremonha.

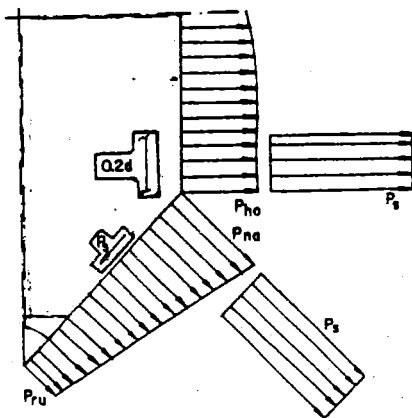


Figura 4.19. Pressão concentrada - fluxo de massa.

4.2.6.2.3. CFBC.

As pressões de descarregamento devem ser tomadas iguais às pressões de carregamento multiplicadas por um coeficiente de sobrepressão C :

- cereais, soja e canola = 1,40
- alpiste e semente de linho = 1,60

4.2.6.2.4. DIN 1055

a) Pressões horizontais: $P_{hd} = P_{hc} C$

- açúcar, calcário, clínquer, cimento, óxido de alumínio, 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
- rações = 1,7

b) Pressões verticais: $P_{vd} < P_{vc}$

c) Pressões de atrito nas paredes: $P_{vd} = P_{vc} \times 1,1$

d) pressões adicionais em silos com fluxo de funil ou

$P_{hd} = P_{hc} C \times \beta$ --- atuando na metade da altura do corpo, diametralmente opostos e numa área de $s^2 = 0,8 A/U$ ou

$$\beta = \beta_h \beta_a \beta_r \beta_d$$

β_h = coeficiente de esbeltez do silo:

$$H/D < 1 \quad \text{---} \rightarrow \quad \beta_h = 1$$

$$1 \leq H/D \leq 4 \quad \text{---} \rightarrow \quad \beta_h = 0,20 H/D + 0,8$$

$$H/D > 4 \quad \text{---} \rightarrow \quad \beta_h = 1,60$$

β_a = coeficiente de excentricidade:

$$a/r < 1/3 \quad \text{---} \rightarrow \quad \beta_a = 1$$

$$a/r \geq 1/3 \quad \text{---} \rightarrow \quad \beta_a = 3 (a/r)$$

a = excentricidade da boca de descarga

β_r = coeficiente de rigidez do silo

$$r/t \leq 70 \quad \text{---} \rightarrow \quad \beta_r = 0,30$$

$$r/t \geq 100 \quad \text{---} \rightarrow \quad \beta_r = 0,05$$

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

β_d :

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

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

- k para silos circulares

$r/t \leq 70 \quad \text{---} \rightarrow \quad k = 1 + \beta(0,5 + 0,02 r/t)$
$r/t \geq 100 \quad \text{---} \rightarrow \quad k = 1 + 3\beta (H/D)$
$70 < r/t < 100 \quad \text{---} \rightarrow \quad \text{interpolação linear}$
- k para silos poligonais --- $k = 1 + 0,8\beta$

e) Pressões adicionais em silos com fluxo de massa

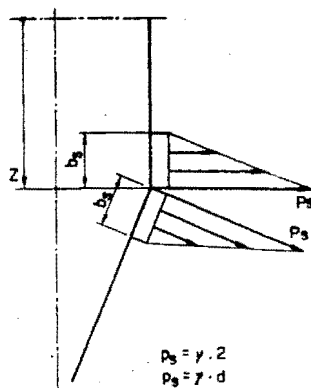
- na transição corpo/tremonha, $0,30D$ acima e abaixo, de valor γz 

Figura 4.20. Pressão adicional - fluxo de massa.

4.2.6.2.5. ACI 313.

As pressões de descarregamento são obtidas pela multiplicação das pressões de carregamento por um coeficiente de sobrepressão C_d variável em função da relação altura/diâmetro do silo. Os valores mínimos necessários são fornecidos em uma tabela, mostrada a seguir:

Coeficiente de sobrepressão - C_d

Topo do material	pós coesivos				
	$H/D \leq 2$	$H/D = 3$	$H/D \geq 4$	$H/D = 4$	$H/D \geq 5$
$H_1 = D \tan \phi$	1,35	1,45	1,50	1,60	1,65
$(H-H_1)/4$	1,45	1,55	1,60	1,70	1,75
$(H-H_1)/4$	1,55	1,65	1,75	1,80	1,90
$(H-H_1)/4$	1,65	1,75	1,85	1,90	2,00
$(H-H_1)/4$	1,65	1,75	1,85	1,90	2,00
Tremonha					
fundo- concreto	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35
fundo-aço	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50

- Obs.: 1) Se $H_1 < H \leq 2H_1$ use o segundo valor de C_d do topo para a altura total do silo H ;
- 2) Os valores de C_d para H/D entre os dados na tabela podem ser determinados por interpolação linear;
- 3) Os valores de C_d para cálculo das pressões sobre o fundo podem ser multiplicados por 0,75 para material não coesivo, exceto para silos de homogeneização no qual é usado descarga pneumática;
- 4) Os valores C_d são os mínimos recomendados. Entretanto menores valores podem ser usados em casos particulares, desde que o engenheiro demonstre que são satisfatórios.

4.2.6.2.6. SNBATI.

As pressões de descarregamento central, caracterizadas por esta norma como silos de descarga normal, considerados no segundo estado de equilíbrio, difere das pressões de carregamento somente pela mudança do valor de K (relação entre as pressões horizontais e verticais) para:

$$K_2 = \cos^2 \phi_v$$

Portanto:

a) Pressões horizontais

$$P_{hd}(z) = 1,15 \left(\frac{\gamma R}{\mu} \right) \left(1 - e^{-\frac{z - h^*}{z_0}} \right)$$

$h^* = 1/2 R \mu \rightarrow$ seção circular ou polígono regular

$h^* = a/8 (3 - a/b) \mu \rightarrow$ seção retangular lado menor $2a$ e maior $2b$

$$z_0 = R/K_2 \mu \quad \text{e} \quad K_2 = \cos^2 \phi_v$$

b) Pressões verticais

$$P_{vd}(z) = 1,35 \gamma \left(z_0 \left(1 - e^{-\frac{h - h^*}{z_0}} \right) + h^* \right)$$

c) Pressões de atrito na parede

$$P_{vd}(z) = P_{hd}(z) \times \mu$$

4.2.6.2.7. NCSE

O método recomendado pela norma australiana é baseado no conceito de multiplicadores de pressão. Estes coeficientes variam com o tipo de fluxo (funil ou massa), a configuração do canal de fluxo (eixo simétrico ou forma de cunha), a relação da célula h_b/d_c e o tipo de carga considerado (pressão, tração na parede).

- Fluxo de Funil

a) Pressões laterais

$$P_{nf} = P_{ni} \times C_f$$

os valores mínimos dos coeficientes C_f , devem ser tomados da tabela abaixo:

Relação h_b/d_c	Profundidade z/d_c	Valores de C_f para:	
		$\alpha = 40^\circ$	$\alpha = 30^\circ$
≥ 2		determinados por gráficos: figura 4.21	
1.5	0	1.7	1.8
	0.5	1.6	1.7
	1.5	1.2	1.2
1.0	0.0	1.4	1.5
	1.0	1.2	1.2
0.8	0-1.0	1.2	1.2

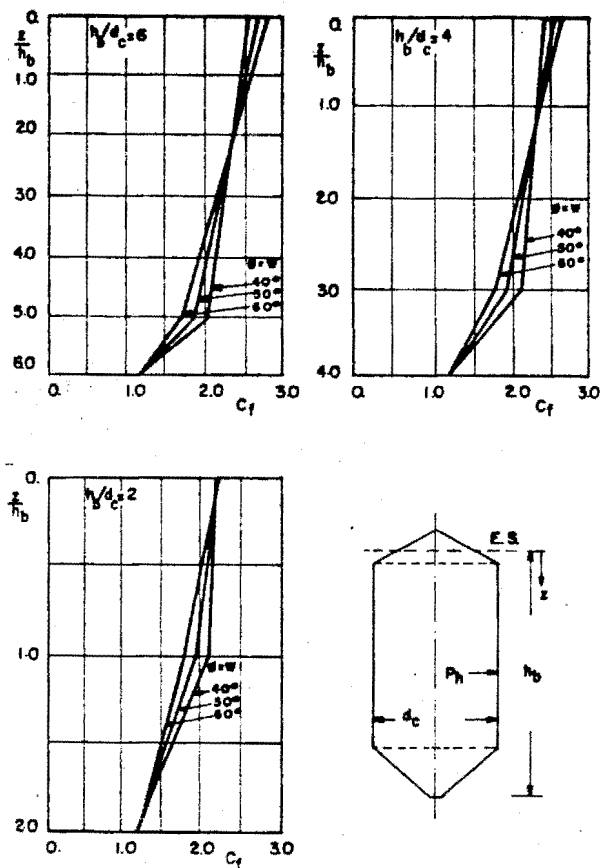


Figura 4.21. Valores dos coeficientes C_f - fluxo de funil.

b) Pressões de atrito

$$P_{vt} = C_v N z c / h c$$

C_v - dado nos gráficos da figura 4.22 - (1.2 e 1.75).

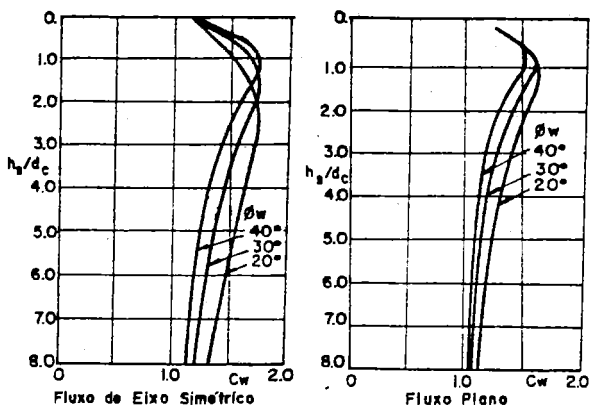


Figura 4.22. Valores do coeficiente C_w .

$$N_{zi} = \rho g R (z - z_0) C_z$$

$N_{zi} - z = h_e$ usando:

ou

$$N_{zi} = \int_0^z \mu P_{nt} dz - (\text{silos baixos})$$

- Fluxo de massa

c) Pressões laterais

$$P_{nl} = P_{nt} \times C_m$$

C_m → gráficos da figura 4.23 para fluxo de eixo simétrico
gráficos da figura 4.24 para fluxo canais planos

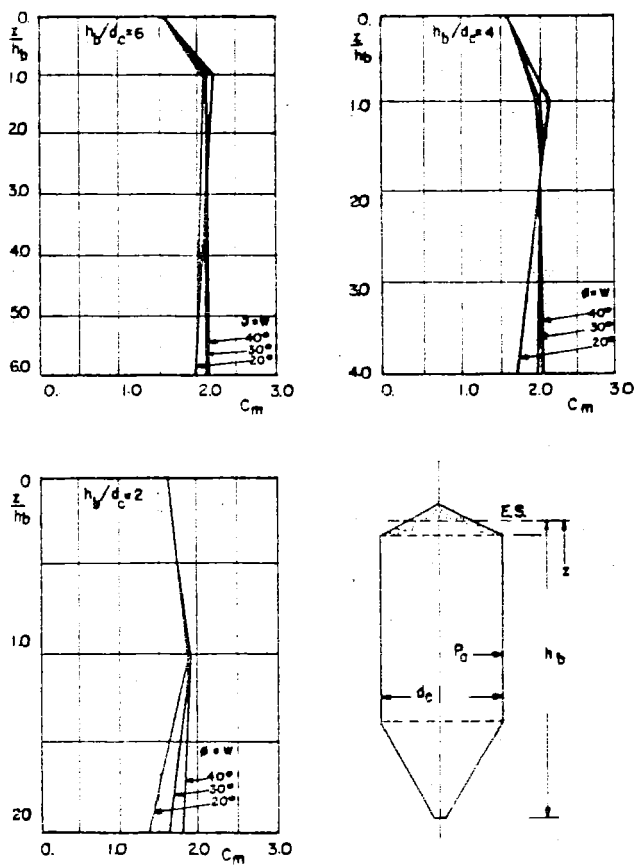


Figura 4.23. Valores dos coeficientes C_m - eixo simétrico.

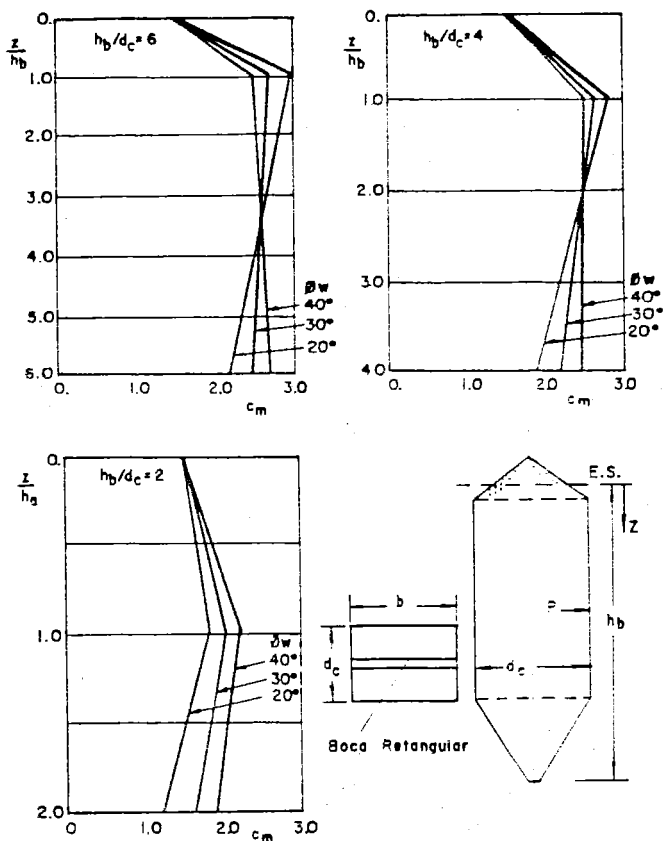


Figura 4.24. Valores dos coeficientes C_m - canais planos.

d) Pressões de atrito iguais ao de fluxo de funil.

4.2.6.3. Pressões de Descarga Excêntrica.

4.2.6.3.1. BMHB.

Quando o fluxo excêntrico é inevitável, a complexidade do fluxo e da distribuição de pressões e a interação da estrutura e o material não fluído, resistindo aos efeitos da variação de pressão, são tais que análises especiais são necessárias (Wood, 1983). No caso de silos retangulares, quadrados ou poligonais podem ser usados os seguintes métodos simplificados:

começando da abertura do fundo, ou, no caso de fluxo expandido, do topo da tremonha do fluxo de massa, a forma de cada funil é construída usando-se a equação (4.1), com $\phi = \phi_0$. O funil interceptará as paredes da seção paralela a diferentes alturas ao redor da circunferência. A seção paralela deve então ser dividida em um número apropriado de segmentos, dependendo das dimensões do silo e tipo de construção e das pressões calculadas para cada par de segmento. Alternativamente, a pressão na parede a cada profundidade vertical pode ser tomada como proporcional ao raio hidráulico do canal de fluxo na posição, de acordo com a equação de Janssen. Como o canal encontra a parede a diferentes alturas ao redor da circunferência, haverá um momento fletor nas paredes dos silos.

$$\theta_m = 0,5 \cos^{-1} \left(\frac{1 - \sin \delta u}{2 \sin \delta u} \right) + \beta \quad (4.1)$$

No caso de fluxo de massa excêntrico, por exemplo, em uma tremonha em forma de cunha com lado vertical, a força concentrada na parede somente atua em um lado, como a pressão na parede da tremonha, novamente gerando um momento fletor.

Se a descarga é tal que, um simples funil não possa ser construído, por exemplo, devido à segregação, à operação excêntrica do sistema de descarregamento ou carregamento, então um especialista precisa ser consultado, para realizar uma análise mais complexa.

4.2.6.3.2. FIP/ISO.

Válida somente para descarga central, ou seja, com boca de descarga simétrica.

4.2.6.3.3. CFBC.

Quando um silo é descarregado por uma abertura perto da parede, o efeito de amortecimento dos grãos não é obtido, e portanto as pressões horizontais aumentam durante a descarga e se estendem para próximo da altura.

O aumento da pressão horizontal que ocorre a profundidades maiores que $1,75R/\mu K$ é igual a:

- 2,0 vezes as pressões de carregamento para cereais, soja e canola
- 2,5 vezes as pressões de carregamento para sementes de linho (flaxseed) e alpistes.

A profundidades (alturas) menores que $1,75R/\mu K$, o aumento nas pressões horizontais durante a descarga excêntrica é proporcional à profundidade.

4.2.6.3.4. DIN 1055.

Para levar em conta a excentricidade na descarga, a norma DIN adota um coeficiente de excentricidade β_a , definido como:

$$a/r < 1/3 \rightarrow \beta_a = 1$$

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

a = excentricidade da boca de descarga

Este coeficiente multiplicado por outros coeficientes que levam em consideração a esbelteza do silo (β_h), a rigidez do silo (β_r) e o material a ser armazenado (β_s), constituem o coeficiente:

$\beta = \beta_a \times \beta_h \times \beta_r \times \beta_s$, que por sua vez deve ser multiplicado pelas pressões de descarga central P_{bd} .

Esta pressão deve ser considerada atuando em áreas diametralmente opostas à parede lateral de valor $0,8 A/U$, a partir da metade da altura do cilindro e manter o crescimento percentual da solicitação resultante, para a altura total do cilindro.

4.2.6.3.5. ACI 313.

A norma Americana sugere o seguinte procedimento para cálculo de silos com descarga excêntrica: se a boca de saída está próxima da parede do silo, aumenta em 25% a pressão estática no fundo do silo. Se a excentricidade da boca de saída "e" do centro do silo é menor que o raio "r", considere que o aumento seja de pelo menos e/r vezes 25% da pressão estática no fundo do silo. Assuma que este aumento de pressão seja constante, do topo da tremonha até uma altura igual a D (ou "a" ou "b") e então reduza linearmente deste ponto até o ponto do topo do silo. Este aumento não precisa ser multiplicado por C_d . Expresso em uma equação:

$$H < z < (H - D)$$

$$Phd(z) = Phd(z) \text{ central} + Pecc$$

$$Pecc = Phf(H) \times 0,25 \times e/r$$

$$Pecc = \frac{\gamma R}{\mu} \left[1 - e^{-\frac{\mu K H}{R}} \right] \times 0,25 \times \frac{e}{r}$$

$$(H - D) \quad (z < 0)$$

$$Phd(z) = Phd(z) + Pecc \times (H - D)z$$

4.2.5.3.6. SNBATI.

A descarga excêntrica (anormal) é definida quando deixa de cumprir-se uma das seguintes condições:

- A descarga se realiza exclusivamente por gravidade sem insuflação de ar;
- Não existe nenhuma estrutura no interior do silo;
- O orifício ou orifícios de descarga estão situados no fundo. A coordenada relativa (ξ) do ponto de descarga mais excêntrico é igual ou menor que 0,4.

Define três tipos de descargas anormais que são: descarga geometricamente anormal, descarga mecanicamente anormal e descarga estruturalmente anormal.

a) Descarga geometricamente anormal

ξ - coordenada relativa do ponto de descarga mais excêntrico

$$0,6 < \xi < 1 \rightarrow Phda(z) = Phdc(z) + 0,10 Phf(z)$$

$$0,6 < \xi < 0,4 \rightarrow Phda(z) = Phdc(z) + 0,10 (5\xi - 2) \times Phf(z)$$

b) Descarga mecanicamente anormal (insuflação de ar).

entre 0 e $(H - hf) \rightarrow Phda(z) = Phdc(z)$ anterior $hf = H/20$

$$1,7 Phf(z)$$

$H - hf$ e $H \rightarrow Phda(z) =$ ou $Phdc(z) + P(\text{pressão de insuflação})$

$$Phdc(z) \text{ anterior}$$

c) Descarga estruturalmente anormal.

Está caracterizada por uma ação $Phf(z)$, tomando para K o menor dos seguintes valores:

$$K = 1,4 K_1 \text{ ou } K = K_2 \text{ sendo: } K_1 = \frac{1 - m \sin \phi}{1 - m \sin \phi} \cos^2 \rho$$

$$\text{com } m = \sqrt{1 - \rho^2}$$

$$\rho = \tan \phi / \tan \phi$$

$$K_2 = \cos^2 \phi$$

4.2.6.3.7. NCSE.

O aumento da pressão na superfície da parede diametralmente oposta à abertura excêntrica, deve na ausência de testes, ser tomada da seguinte maneira:

Excentricidade do canal de fluxo, e/d	Aumento da pressão %
0,0 a 0,1	0
0,2	10
0,3	20
0,4	30
0,5	40

O aumento de pressão deve ser aplicado às pressões calculadas considerando a descarga central, sobre uma altura de parede entre $0,8 (0,5dc + e)$ e $1,6 (0,5dc + e)$ acima da abertura de descarga. A distribuição da pressão adicional acima da circunferência deve ser assumida variar de 0 em $\theta = 90^\circ$ e 270° para o máximo em 180° , usando uma distribuição coseno.

As paredes no lado do canal de fluxo excêntrico são solicitadas à reduções e aumentos de pressão durante o fluxo. As reduções recomendadas de pressões na parede são dadas abaixo:

Excentricidade do canal de fluxo, e/dc	Redução da pressão	Ângulo θ
0,0 a 0,1	0	90 (270)
0,2	15	70 (250)
0,3	30	50 (230)
0,4	45	40 (220)
0,5	60	30 (210)

A porcentagem de redução deve ser aplicada às pressões iniciais calculadas considerando as pressões de carregamento (iniciais) e devem ser assumidas estender sobre uma altura de parede entre $(0,5dc - e)$ e $(2dc - e)$ sobre a altura da tremonha. Na direção circunferencial, a redução de pressão deve ser assumida de zero até os valores tabelados de θ e máximo em $\theta = 0^\circ$, usando uma distribuição coseno.

Mais para o alto no mesmo lado da abertura, ocorrem aumentos de pressão. A mesma pressão aumenta como mostrado acima para o lado diametralmente oposto à abertura e deve ser assumida a estender sobre uma altura de parede entre $(2dc - e)$ e $(4dc - e)$ sobre a abertura da tremonha. Na direção circunferencial pode ser adotada a variação indicada na figura 4.25 para o lado de fluxo.

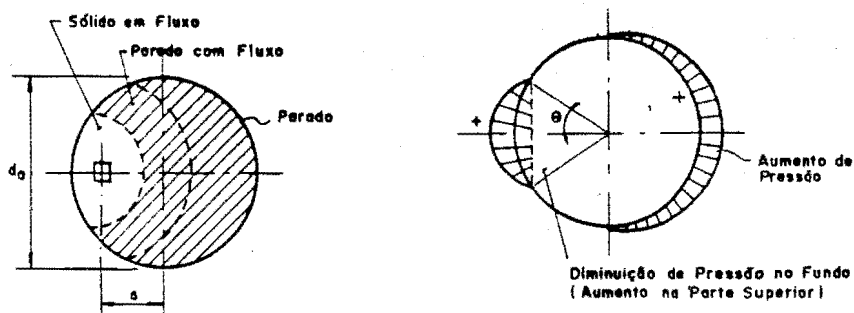


Figura 4.25. Distribuição excêntrica das pressões de fluxo

4.2.6.4. Pressões sobre o Fundo e Tremonha

4.2.6.4.1. BMHB.

- Pressões de carregamento

$$a) P_{xf} = \frac{\cotan \phi}{\cotan \phi + \tan \phi t} \left(\frac{P_{xf}}{0,4} + \gamma u x \frac{R_{hx}}{R} \right), Pa$$

P_{xf} = pressão na parede no fundo da seção paralela em $z = H$, Pa

x = distância vertical na tremonha da transição, m

θ = ângulo da tremonha com a horizontal, graus

P_{xf} = pressão normal de carregamento da parede à cota, Pa

R_{hx} = raio hidráulico da tremonha à cota x , m

$$b) \tau_{xf} = \mu P_{xf}, Pa$$

$$c) Q_{xf} = A_x (P_{xf}/K_l + \gamma u x), N$$

A_x = área da seção transversal da tremonha à distância x , abaixo da transição, m

- Pressões de descarregamento

- Fluxo de massa

$$a) P_{xdm} = \frac{2Y (1 + \sin \delta u \cos 2\beta) \gamma R_{hx}}{(X - 1) \cos \theta}, Pa$$

P_{xdm} = pressão normal de descarga na tremonha à cota x , em fluxo de massa, Pa

R_{hx} = raio hidráulico à cota x , m

$$X = \frac{2^m \sin \delta u}{1 - \sin \delta u} \left[\frac{\sin (\beta + \alpha)}{\cos \theta} + 1 \right]$$

$$Y = \frac{[2 (1 - \cos \alpha)]^m \alpha^{1-m} \cos \theta + \sin \beta (\sin \alpha)^{1+m}}{(1 - \sin \delta u) (\sin \alpha)^{2+m}}$$

$$2\beta = \left(\phi_u + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \phi_u}{\sin \delta u} \right) \right), \text{ graus}$$

b) $\tau_{xdm} = \mu \times P_{xdm}$, Pa (tensões cisalhantes)

c) $Q_{xdm} = R_x P_{xdm}/K_l$ (sobrecarga vertical atuando através do canal da seção transversal)

d) Pressão concentrada normal à parede

$$P_{tdm} = \frac{P_{HT} (1 + \sin \delta u \cos (2\beta))}{K_u (1 - \sin \delta u \cos (180^\circ - 2\theta + 2\beta))}, \text{ Pa}$$

$$2\beta = \phi_u + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \phi_u}{\sin \delta u} \right), \text{ graus}$$

esta pressão é aplicada a uma distância vertical de 1/4 do diâmetro abaixo da transição

- Fluxo de funil

$$a) P_{xdc} = (\cos^2 \theta + K_u \sin^2 \theta + \frac{R_{hx}}{R} (K_u - 1) \tan \beta_c \sin \theta \cos \theta) \frac{P_{HT}}{K_u}, \text{ Pa}$$

$$\beta_c = 90^\circ + \phi_c + \cos^{-1} \left(\frac{\sin \phi_c}{\sin \delta_1} \right), \text{ graus}$$

H_T - altura total de material no silo medido para baixo a partir do ponto mais baixo da superfície do material, m

b) tensões cisalhantes

$$\tau_{xdc} = \frac{1 - K_l}{K_l} P_{HT} \left[\sin \theta \cos \theta - \frac{R_{hx}}{R} \tan \beta (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta) \right], \text{ Pa}$$

c) Sobrecarga vertical

Não é crítico para projeto, mas na boca de saída deverá ser usada a equação:

$$Q_{xdc} = 0,83 \times R_x \times P_{xdc}/K_l$$

4.2.6.4.2. FIP/ISO.

a) Pressões verticais sobre o fundo plano

$$P_{vf}(z) = P_{vd}(z) = 1,35 \frac{\gamma R}{K_u} \left(1 - e^{-\frac{-z \lambda u}{R}} \right)$$

b) Pressões sobre a tremonha ($\alpha \geq 20^\circ$)

$$P_{ho} = 1,5 P_{ho} \times (1/K \cos^2 \theta + \sin^2 \theta)$$

Na transição em silos com fluxo de massa, considerar uma carga adicional P_s atuando a uma distância de $0,2d$ na tremonha (figura 4.16):

$$P_s = 2 P_{ho}$$

P_{ho} = pressão horizontal na parte cilíndrica no ponto de transição

4.2.6.4.3. CFBC.

- Células altas

$$P_{vd}(z) = \frac{\gamma R}{\mu K} \left[1 - e^{-\left(\frac{K \mu z}{R}\right)} \right]$$

- Células baixas

$$P_{vd}(z) = \gamma z$$

4.2.6.4.4. DIN 1055.

- Fundo plano ($\theta < 20^\circ$)

$$P_{vd}(z) = e_b \times P_{vf}(z) \leq \gamma H$$

$e_b = 1,5$ para todos os casos, menos materiais que propiciem formação de abobadas onde $e_b = 1,8$.

- Fundo da tremonha ($\theta \geq 20^\circ$)

a) material dentro da tremonha

$$P_h = 2,4 R \gamma K (\sin^2 \theta) / \sqrt{\mu}$$

$$P_v = P_n / 2$$

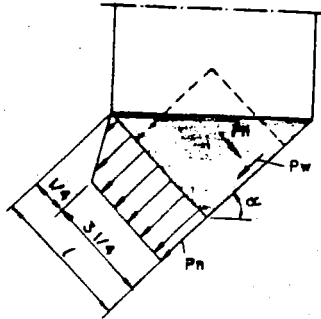


Figura 4.26. Pressões sobre a tremonha.

b) Material sobre a tremonha

$$P_{no} = (P_{ve} \text{ e } b \cos^2 \theta + P_{he} \sin^2 \theta) \left(1 + \frac{\sin 2\alpha}{4\mu} \right)$$

$$P_{nu} = P_{ve} \text{ e } b \cos^2 \theta$$

$$P_v = P_n / 2$$

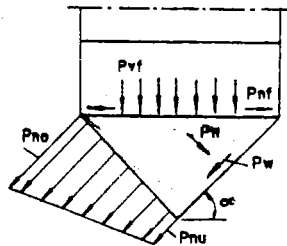


Figura 4.27. Pressões sobre a tremonha.

4.2.6.4.5. ACI 313

- Fundo plano

$$P_v(z) = C_d \frac{\gamma R}{\mu' K} [1 - e^{-\mu' K z/R}]$$

- Fundo inclinado de θ° com a horizontal

$$P_{vo}(z) = C_d P_{hr}(z) \sin^2 \theta + C_d P_{vf}(z) \cos^2 \theta$$

Obs.: Os coeficientes de sobrepressão C_d sobre o fundo e a parede, são fornecidos em uma tabela anexa à norma. Os valores de C_d para a parede estão especificados na seção 2.5.2.5 e o valor de C_d para o fundo é igual a 1,5 para silos com fundo de concreto e 1,75 para silos com fundo metálico, quando utilizando para cálculo das pressões a teoria de Reimbert; e 1,35 para silos com fundo de concreto e 1,50 para silos com fundo metálico, quando utilizando para cálculo das pressões a teoria de Janssen.

4.2.6.4.6. SNBATI.

a) Pressão vertical fundo plano (carregamento e descarregamento)

$$P_{vf}(z) = K_v \gamma (z_0 \bar{y} + h^*)$$

$K_v = 1,35$ onde haja possibilidade de caída de abóbadas

$K_v = 1,25$ outros casos

$$\bar{y} = 1 - e^{-x}$$

$$\bar{x} = h - h^*/z_0$$

$$z_0 = R/K \tan \phi'$$

$h^* = R \mu/2$ + seção circular ou poligonal regular.

$h^* = a/8 (3 - a/b) \mu \rightarrow$ seção retangular, lado menor $2a$ e maior $2b$

b) Pressão sobre tremonhas (carregamento e descarregamento)

$$P'_{vt}(z) = P_{vt}(z) + K_u \gamma V/S$$

$V \rightarrow$ volume de material tremonha

4.2.6.4.7. NCSE.

- Pressões de carregamento ou iniciais

- Pressão vertical fundo plano

$P_{vi} = \rho g R C_z / (K \cdot \mu)$ usando o menor valor para ϕ_w (5° menor)

- Pressão sobre tremonhas (fluxo de massa ou fluxo de funil)

$$P_{nhi} = K_{min} (\rho g z_h + P_{vi})$$

- $\phi_w =$ ângulo de atrito-tremonha

$K_{min} = \tan \alpha / (\tan \alpha + \tan \phi_w)$ - $\alpha =$ a metade do ângulo da tremonha

A pressão normal na parede da tremonha na transição é dada por:

$$P_{nti} = K_{min} P_{vi}$$

$$P_{vhi} = \mu P_{nhi}$$

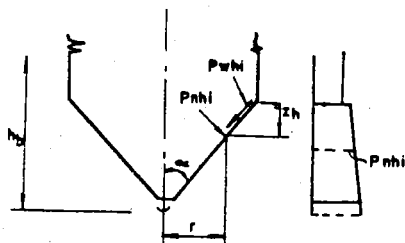


Figura 4.28. Pressões iniciais nas paredes de tremonhas.

- Pressões de descarga (ou de fluxo)
 - fundo plano
 - tomar o menor dos seguintes valores:

$$P_{vf} = C_v P_{v0}$$

ou

$$P_{vf} = \rho g z$$

C_v é dado em uma tabela anexa à norma, em função do tipo de material armazenado, e varia entre 1.2 e 1.7.

- Tremonhas com fluxo de funil

$$P_{nhf} = C_{nf} P_{ni}$$

$$C_{nf} = \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha / K + (4r/d_c) \mu \sin \alpha \cos \alpha$$

e o raio é relacionado a profundidade z_h por:

$$r = 0,5 d_c - z_h \tan \alpha$$

$$P_{vht} = \mu P_{nhf}$$

Para tremonhas piramidais, o diâmetro d_c deve ser tomado igual ao comprimento do menor lado da seção vertical da célula. A distribuição da pressão normal é mostrada esquematicamente na figura 4.29.

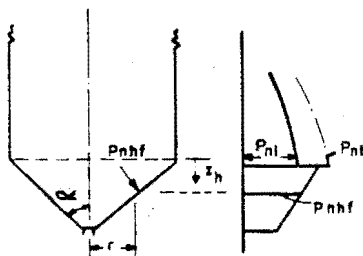


Figura 4.29. Distribuição da pressão normal em tremonhas de fluxo de funil.

Na verificação das tensões meridionais em tremonhas cônicas, pode ser conveniente determinar a força total vertical dentro do sólido no nível do cilindro com o cone de transição. Esta força é igual ao produto da área da seção transversal e a média da pressão vertical P_{xt} no nível da junção da tremonha.

- Tremonhas com fluxo de massa

As pressões normais nas paredes da tremonha com fluxo de massa são distribuídas não uniformemente. O valor máximo da pressão normal, ocorre na junção da tremonha e seu valor é dado por:

$$P_{nt} = C_t P_{nt}$$

C_t pode ser obtido dos gráficos das figuras 4.30 e 4.31 (varia entre 1.5 e 2.0)

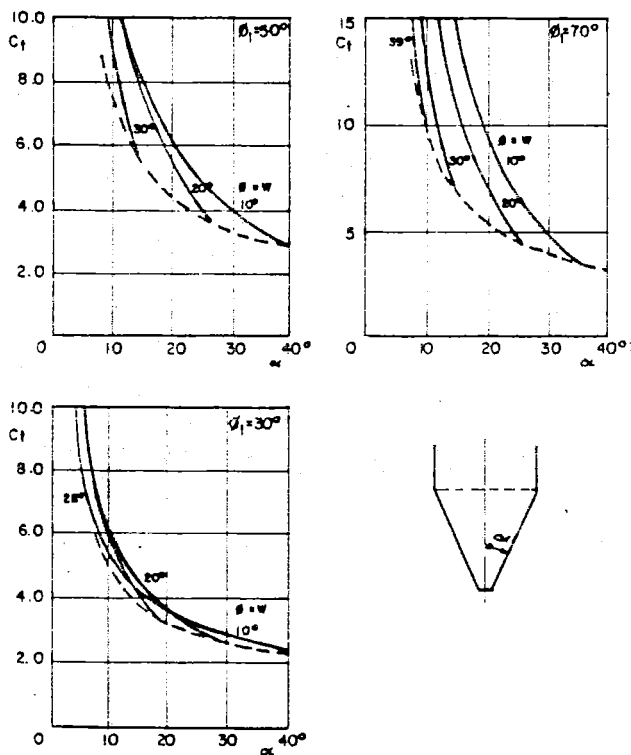


Figura 4.30. Coeficiente C_t para fluxo de eixo simétrico.

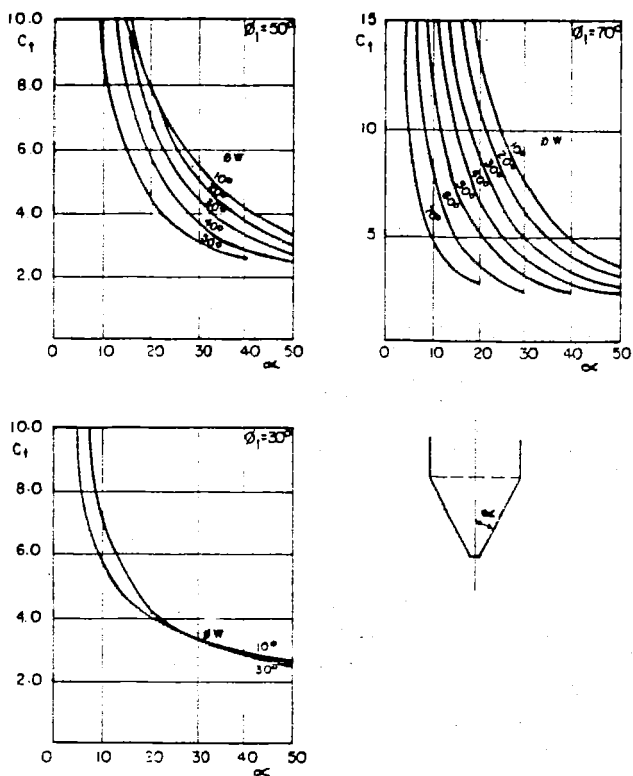


Figura 4.31. Coeficiente C_t para fluxo plano.

A pressão normal em um ponto "S" na figura 4.32 é dada por:

$$P_{nfr} = K_h \rho g d z$$

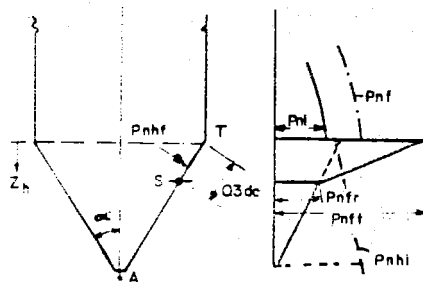


Figura 4.32. Distribuição das pressões na parede em tronchas com fluxo de massa

K_h é determinado nos gráficos das figuras 4.33 e 4.34. A locação do ponto "S" na fig. 4.32 é dada por 0,3 de. Uma distribuição de pressão triangular deve ser assumida entre os pontos "S" e "A" com o valor zero no ponto A.

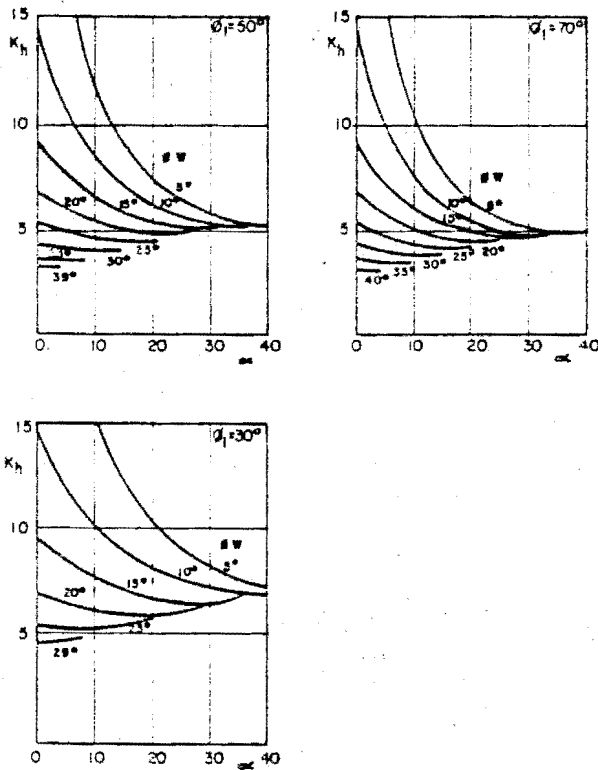


Figura 4.33. Coeficiente K_h para tremonas de eixo simétrico.

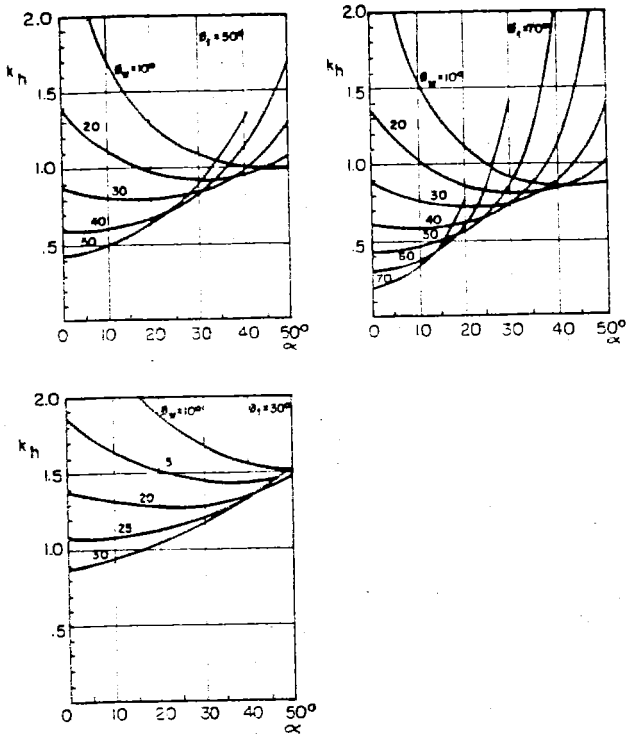


Figura 4.34. Coeficiente K_h para tremonhas em forma de cunha.

Para tremonhas sem sobrecarga (sem cilindro), a pressão P_{nt} se reduz a zero como mostrado na figura 4.35. o valor de P_{nr} continua o mesmo dado pela equação anterior.

O valor da tração de atrito nas paredes da tremonha é dado por:

$$P_{ntf} = \mu P_{nr}$$

A possibilidade de fluxo pulsante deve ser investigada desde que ele possa conduzir a altas pressões nas paredes.

Na verificação das tensões meridionais em tremonhas cônicas, é conveniente usar todo o equilíbrio da tremonha como descrito em tremonhas de fluxo de funil.

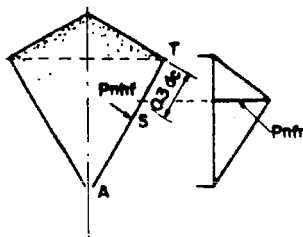


Figura 4.35. Distribuição das pressões na parede em tremonhas de fluxo de massa

Pode ser notado que a pior condição de carregamento para tremonhas metálicas é geralmente quando a pressão normal na junção da tremonha é mínima. Cautela, portanto, deve ser tomada na adoção de altos valores de P_{nrt} no cálculo do anel principal.

4.2.7. Efeitos de Temperatura.

4.2.7.1. BMHB.

As condições de temperatura e mudanças, tanto dentro como fora do silo, pode ter um efeito considerável nas pressões. Quando as paredes do silo se aquecem elas dilatam e portanto a seção transversal irá aumentar. Isto acarretará uma diminuição na altura da massa. Quando as paredes esfriam, a área diminui mas a altura da massa não, em geral aumenta, e portanto o material será comprimido lateralmente, com um conseqüente aumento das pressões na parede, que pode permanecer até que algum material seja descarregado; isto é algumas vezes chamado de racking temperature (deformação de temperatura). Distribuição desigual de temperatura na parede causada por radiação pode ocasionar tensões de flexão nas paredes e pode também contribuir para fluxo e portanto excentricidades de pressões. O esfriamento das paredes pode também contribuir para migração de umidade, e condensação nas paredes, com conseqüente aumento no atrito com as paredes. Mudanças possíveis de temperatura devem ser levadas em consideração no projeto do silo, com isolamento aplicado se houver perigo, particularmente, de pressões excêntricas excessivas.

4.2.7.2. FIP/ISO.

Ainda não definida pela FIP.

4.2.7.3. CFBC.

Não especifica.

4.2.7.4. DIN 1055.

Deve-se levar em consideração nas cargas a influência de temperatura. Pode ser necessário levar em consideração também as temperaturas dos materiais armazenados no estado quente ou que mais tarde se aquecerão.

4.2.7.5. ACI 313.

Os materiais armazenados podem causar tensões térmicas apreciáveis nas paredes dos silos. A carga última pode ser determinada por:

$$U = 1,40 + 1,7L$$

Sendo U a resistência última para resistir à força interna ou momento, L é a força ou momento devido a carga móvel e D é a força ou momento devido às cargas permanentes e térmicas.

Para o projeto de efeitos térmicos é necessário:

- (1) determinar o gradiente de temperatura nas paredes;
- (2) computar o momento adicional devido às diferenças de temperatura.

Um método que tem sido usado para determinar o reforço adicional para resistir as tensões térmicas é o seguinte:

calcular a diferença de temperatura Δt entre o interior das paredes. Em projeto de edificações, alguns níveis de diferença de temperatura são comumente ignorados. Similarmente, para paredes de silos tendo materiais quentes armazenados, uma diferença de $44,5^\circ$ é sempre desprezada. Quando isto é feito, a temperatura de projeto do material quente, que na temperatura atual é T_1 , torna-se:

$$(T_1)_{projeto} = (T_1 - 44,5^\circ\text{C})$$

Tem sido observado que a temperatura de materiais granulares quentes, em silos não é uniforme mas diminui apreciavelmente perto da parede. Isto é função da razão de descarga do silo e dos coeficientes de condutibilidade térmica, com flutuações de temperaturas diárias e sazonais. Sem uma análise rigorosa destas variáveis, aproximações são comumente usadas. No caso de cimento quente, por exemplo, 200 mm de cimento adjacente a face interna do silo é comumente assumido para atuar como um material isolante com a temperatura variando linearmente através da espessura.

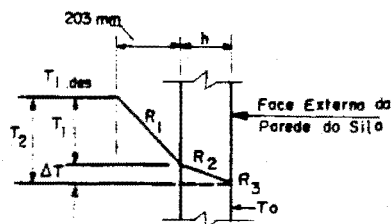
A figura 4.36 mostra a variação de temperatura através de 200mm de cimento e a parede do silo. A diferença de temperatura Δt entre dentro e fora das paredes é:

$$\Delta t = T_2 - T_1 \quad (\text{Figura 4.36})$$

A diminuição de temperatura Δt , dentro da parede, é uma parte da diferença de temperatura total de projeto, correspondendo a relação K_t da resistência térmica da parede sozinha àquela do cimento, parede e ar externo combinados. Valores de Δt podem ser obtidos de:

$$\Delta t = [(T_{1,des})_{pwa} - T_0] K_t$$

K_t é determinado por princípios de transferência de calor. Para cimento é dado na figura 4.37.



$$\Delta T = [T_{1,des} - T_0] \times K_t$$

Figura 4.36. Cálculo de Δt para uma parede de um silo para armazenamento de cimento

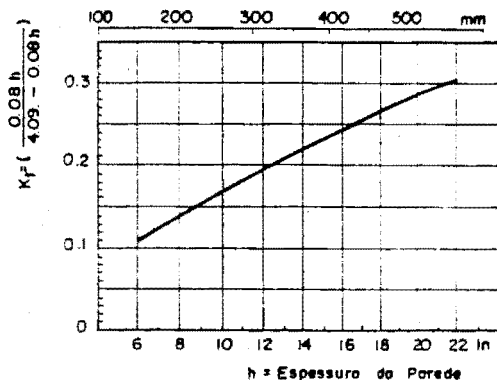


Figura 4.37. Coeficiente K_t .

Assumindo forma e/ou vinculação para prevenir empenamentos, o momento de flexão térmico último por unidade de altura de parede é:

$$M_{x,v} = M_{y,v} = 1,4 E_0 h^2 \alpha \Delta t / (1 - \nu)$$

O fator 2,4 é o fator de carga, K_0 .

O aço adicionado para momentos térmicos deverá ser colocado perto da face fria (usualmente a externa) da parede. Em paredes de armaduras simples, poderá ser adicionado na armadura principal, que deverá estar perto da face interna. Em paredes de armadura dupla, o valor de $A_{s,y}$ deverá ser adicionado às fileiras externas. (Para simplicidade, uma quantidade igual é sempre adicionada nas fileiras internas para evitar dimensões de barras ou espaçamentos diferentes de uma fileira para outra).

Tensões térmicas de tração vertical são usualmente absorvidas pela carga permanente de tensão de compressão, e por isto, não é necessário adicionar armadura vertical para efeitos de temperatura.

4.2.7.6. SNBATI.

Quando a temperatura do produto ensilado é diferente da temperatura exterior, o gradiente térmico na parede Δt dará origem a um momento $M\Delta t$. Se a temperatura no interior do produto ensilado (o do ar em contato com o mesmo) não sobrepassa os 120°C, na falta de métodos mais elaborados, pode-se calcular o valor de $M\Delta t$ pelo seguinte método aproximado:

- Cálculo do gradiente térmico

A densidade do fluxo de calor no interior de uma parede é igual a:

$$K = \frac{t_i - t_e}{h_0/\lambda b} = \frac{\Delta t}{h_0/\lambda b} \quad (\text{Kcal/m}^2\text{h})$$

Entre o ar e a parede este é igual a:

$$K = h_i(T_i - t_i) = (t_e - T_e) \quad (\text{Kcal/m}^2\text{h})$$

Onde resulta que:

$$\Delta t = K h_o / \lambda b \text{ (em } ^\circ\text{C)}$$

Com:

$$K = \frac{T_i - T_e}{1/h_i + h_o/\lambda b + 1/h_o}$$

sendo:

λb = coeficiente de condutividade do concreto da parede, ou seja,
 = $1,4 \text{ Kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$

$1/h_i$ = resistência térmica superficial interna da parede, ou seja,
 = $0,15 \text{ m}^2\text{h } ^\circ\text{C/Kcal}$

$1/h_o$ = resistência térmica superficial externa da parede, ou seja,
 = $0,10 \text{ m}^2\text{h } ^\circ\text{C/Kcal}$

h_o = espessura da parede em metros

substituindo, temos:

$$\Delta t = \frac{h_o}{0,35 + h_o} \Delta t \quad \text{sendo} \quad \Delta t = T_i - T_e$$

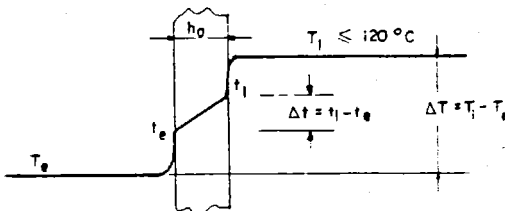


Figura 4.38. Variação de temperatura na parede do silo.

- Momento originado pelo gradiente térmico.

O momento, por unidade de altura ou largura, originado pelo gradiente térmico é igual:

$$M\Delta t = \frac{\alpha \Delta t E_v I}{h_0}$$

$$E_v = 7000 \sqrt{\sigma' 28} \quad (E_v \text{ y } \sigma' 28 \text{ em da N/cm}^2)$$

$$I = 100 h_0^3 / 12 \quad (\text{cm}^4/\text{m para uma largura ou altura de } 1\text{m} = 100\text{cm})$$

h_0 em cm

$$\Delta t = \frac{h_0}{35 + h_0} \quad \Delta t, \text{ em } ^\circ\text{C}$$

α = coef. de distribuição térmica do concreto, ou seja, 10^{-5}
onde:

$$M\Delta t = \frac{10^{-5} \Delta t E_v h_0^2}{12} \quad \text{em N cm por 1m de largura ou altura}$$

Exemplo: para um concreto de $350/\text{kg/m}^3$, tem-se:

$$\sigma' = 270 \text{ da N/cm}^2, \text{ ou seja, } E_v = 115000 \text{ da N/cm}^2$$

E a seção de armadura de tração, por metro de altura e largura, será:

$$A = M\Delta t / z \sigma_a \quad (\text{em cm}^2)$$

O momento $M\Delta t$ pode ser absorvido pelas armaduras cuja quantidade geométrica \bar{w} vem dada com aproximação suficiente, quando se emprega aço CR, pela fórmula:

$$w\% = \Delta t / 200\%, \text{ como } M\Delta t, v = M\Delta t, h = w = \bar{w}v = \bar{w}h$$

As armaduras devem ser colocadas do lado mais frio da parede.

- Cargas devidas às temperaturas diferenciais
- Diminuição de temperatura nas paredes das células

Cargas adicionais laterais podem ser induzidas nas paredes dos silos solicitadas por repetitivos deslocamentos radiais causados por significantes flutuações de temperatura. A grandeza destas cargas dependem da variação de temperatura, o número de mudanças do módulo de elasticidade do material armazenado e da rigidez da parede da célula na direção de tração.

O módulo de elasticidade do material armazenado deve ser determinado por testes em um estado confinado. Na análise de tensões deve ser levado em consideração a possibilidade do efeito produzido por partículas de materiais armazenados caindo em uma fresta, que pode se formar a cada nível de temperatura.

Para propósitos de projetos preliminares, até que novas evidências experimentais sejam conseguidas, o módulo de elasticidade de um material armazenado (E_s) à qualquer altura na célula pode ser estimada como:

$$E_s = K P_v$$

sendo P_v a pressão vertical no material armazenado no nível em questão, e K é uma constante que varia entre 70 para grãos secos a aproximadamente 100 para areia solta seca e acima de 200 para materiais fortemente compactados. O módulo elástico E_s e a pressão vertical precisam estar em unidades consistentes. A pressão normal na parede de uma célula vertical devido às diferenças de temperatura pode ser estimada por:

$$P_n = \frac{\alpha T E_v}{(R/t + E_v/E_s (1 + \nu))}$$

α = coeficiente de expansão térmica na parede

E_v = módulo de elasticidade do material na parede

ν = coeficiente de Poisson para o material armazenado
(típica/ 0,3 - 0,4)

R = raio da célula

t = espessura da parede

A variação da temperatura T pode ser tomada como a diferença entre a máxima temperatura da superfície da parede e a menor temperatura noturna.

Esta pressão deve ser adicionada às pressões de fluxo. Forças adicionais de tração de atrito na parede deverão ser esperadas durante a variação de temperatura nas paredes e este efeito deve ser investigado. Nenhuma recomendação pode ser feita com relação a silos não circulares.

- Efeitos da radiação solar

Os efeitos do gradiente térmico e todo aumento de temperatura devido à radiação solar, ou outras fontes de calor, deverão ser investigados em adição às pressões normais discutidas na seção anterior. Para propósitos de projetos preliminares, é sugerido que a temperatura na superfície da parede exposta ao sol deverá ser tomada como 40°C acima da temperatura ambiente na sombra.

- Temperatura diferencial em colunas de suporte

As forças induzidas nas colunas de suporte por expansão térmica diferencial, causada por exposição ao sol ou outras fontes de aquecimento devem ser investigadas por um método racional de análise estrutural. As forças induzidas dependem da rigidez da célula e sua viga anelar, da rigidez da coluna e da rigidez da fundação. Um limite superior (seguro) estimado da força axial induzida em uma coluna individual que é solicitada a uma variação de temperatura Δt (sobre todas as outras colunas) podem ser feitas assumindo que a célula e a fundação são completamente rígidas.

A força de compressão adicional desenvolvida em uma coluna aquecida é então:

$$N = E_c A_c \alpha \Delta t (n - 3)/n$$

Onde:

A_c = área transversal da seção da coluna

E_c = módulo young do material da coluna

α = coeficiente de expansão térmica por grau

n = número de colunas distribuídas ao longo da circunferência

A força desenvolvida nas outras colunas é:

$$N = E_c A_c \alpha \Delta t (1 + 2x/R)/n$$

onde R é o raio do círculo contendo as colunas e x é a coordenada de cada coluna medida do centro do círculo e na direção da coluna expandida.

O efeito da variação de temperatura em diferentes colunas de suporte pode ser adicionado considerando cada coluna expandida em volta das outras, como uma única coluna a expandir e usando superposição. Em adição, a radiação solar nas paredes da coluna causa expansão das paredes e o efeito disto deverá ser investigado.

- Efeitos do armazenamento de materiais quentes

Quando materiais quentes são armazenados, o gradiente de temperatura induzido nas paredes deverá ser investigado usando um método racional de fluxo térmico e análise estrutural. A grandeza do gradiente térmico através da parede da célula e fundo depende de muitos parâmetros, mas mais particularmente dos coeficientes de condutividade térmica da parede e do produto armazenado, da temperatura média do sólido armazenado na célula, da temperatura média ambiente, da razão de carregamento e da constante de calor específico.

Para propósitos preliminares de projeto, pode ser assumido que a superfície interna da parede da célula alcança uma temperatura de 20°C mais baixa que a temperatura média do produto armazenado.

4.2.8. Explosões em Silos.

4.2.8.1. BMHB.

4.2.8.1.1. Introdução.

Partículas finas de muitos materiais em uso diário como produtos agrícolas (por exemplo: cereais), carvão, cortiça, colorantes (por exemplo: farinhas, amido e açúcar), peles, produtos farmacêuticos, plásticos, borracha, sabões e detergentes, e madeira podem formar nuvens de pós explosivos quando suspensos no ar. Se ocorre a ignição, o calor produzido pela combustão das partículas do pó e, algumas vezes, a reação dos produtos gasosos podem causar um aumento rápido na pressão da estrutura de contenção (por exemplo: silo) que pode resultar em uma explosão da estrutura, e estragos intensivos e lesões podem ocorrer. O perigo de explosões em pós não está confinado à manipulação de materiais em forma pulverulenta. Materiais de grandes partículas comumente apresentam também finas partículas formadas por atrito na massa, entram em suspensão e formam nuvens de pós explosivos durante a manipulação, particularmente durante operações de transferência.

4.2.8.1.2. Prevenção e Proteção.

4.2.8.1.2.1. Propriedades dos materiais

Para assegurar que as precauções necessárias sejam tomadas contra o perigo de explosões de pó é necessário primeiramente saber se os materiais a serem armazenados são propícios a explosões. Pode ser assumido que a maioria dos materiais animais e vegetais e a maioria dos compostos orgânicos sintéticos e carbonáceos são potencialmente sujeitos a perigo de explosões, mas as referências devem ser feitas com a literatura, seguidas da necessidade de testes em amostras dos materiais envolvidos. Pode ser notado que a explosão deve variar com a umidade, dimensões das partículas, etc..., e portanto cuidados devem ser tomados na seleção de amostras para os testes e, inversamente, em assegurar que as propriedades dos materiais que são submetidos aos testes não estejam locadas na direção de grandes explosividades.

É de responsabilidade do usuário informar ao projetista, qualquer

propriedade explosiva dos materiais que vai armazenar no silo, e do projetista checar estas propriedades dos materiais e incorporar suas características no projeto do silo, dependendo das circunstâncias.

Se é o caso em que os materiais podem produzir uma explosão as seguintes precauções são necessárias:

a) Evitar o perigo de explosão

O transporte, particularmente de materiais frios, deverá usar "moderados" métodos como uma correia transportadora, transportadores de massa ou transportadores pneumáticos de fase densa. Distâncias grandes de queda no silo e, o colapso de arcos deverão ser evitados tanto quanto possível. Qualquer condição que possa conduzir a "fluidificação" deverá ser evitada. A saída de ar do silo deve ser adequadamente filtrada e a entrada de ar deverá ser conduzida de um ponto livre de pós. Escapes do equipamento de carga e descarga deverá ser evitada sempre que possível;

b) Exclusão de fontes de ignição

Atenção deve ser dada para evitar fontes de ignição, embora precise ser reconhecido que estes cuidados são indesejáveis por resultarem em uma completa eliminação de todas as potências de fontes de ignição. Particular atenção deve ser dada para:

b1) o isolamento do silo, onde possível, de fontes de correntes superiores de potencial explosão/ignição (por exemplo: moinhos, elevadores) instalando barreiras efetivas. Isto inclui válvulas de ação rápida, sistemas localizados de suspensão de explosão, sistemas de atmosfera inerte e válvulas de fechamento rotacional;

b2) Aterramento do silo e dos equipamentos para minimizar o perigo de descarga eletrostática que possam ocorrer;

b3) a seleção e localização do equipamento elétrico;

b4) a prevenção de aquecimento espontâneo, no qual alguns materiais estão sujeitos quando armazenados em grandes quantidades;

b5) o controle cuidadoso do trabalho com calor, por exemplo, soldadura.

Não se pode, normalmente, confiar que as precauções acima possam sempre prevenir explosões. É entretanto necessário suplementá-las tomando-se medidas de proteção para mitigar os efeitos de explosões.

c) Ventilação

Se houver qualquer risco de explosão, então arranjos de ventilação devem ser adequados para resolver isto. Um silo pode ser projetado para resistir às pressões máximas de explosão, mas isto é economicamente inviável. O princípio de uma ventilação para o efeito de explosão é que, se uma explosão ocorre, uma janela de área suficiente deverá ser aberta rapidamente, permitindo que os pós não queimados e produtos da explosão escapem, limitando a pressão a um nível tal que o silo resista sem ruptura. Há vários métodos para os quais uma janela pode ser dimensionada. Todos relatam a área necessária da janela e a sua pressão de abertura, para a adequada ventilação para a razão de medida da diminuição do pó e o volume e resistência do silo em questão. É necessário que a relação altura/diâmetro do silo não exceda 5, exceto em circunstâncias especiais.

O alívio da explosão deverá fluir para um lugar seguro (ventilação não pode ser aplicada em pós tóxicos). Efetivamente, isto requer que a descarga do ar seja localizada ao ar livre longe de pessoal, construções e plantas. A realização disto é obviamente facilitada colocando-se o silo ao ar livre. Quando isto não é possível, sempre uma alternativa razoável é colocar o silo de tal maneira que a descarga possa ser canalizada para o ar livre. Todos estes aspectos devem ser vigiados.

d) Supressão da explosão

Isto implica em uma rápida injeção de supressante, normalmente água, halon, ou pó de fosfato de alumínio para extinguir a explosão durante seus estágios preliminares. Sistemas eficazes de suspensão são dispendiosos e geralmente só são usados quando a ventilação é impraticável ou inaceitável, como por exemplo quando o pó é tóxico. Sistemas de supressão são limitados ao volume que podem proteger e seu uso não é aplicável a grandes silos.

e) Atmosfera inerte

Inertar é a manutenção contínua, dentro do silo, de uma atmosfera inerte, isto é, uma atmosfera contendo insuficiente oxigênio para suportar a combustão. Isto pode ser feito pela substituição, pelo menos parcialmente, do ar dentro do silo por nitrogênio ou outro gás inerte. Isto é dispendioso, requer monitoração contínua e é apropriado em muito poucos casos.

f) Pressões adicionais de projeto

Quando o silo é projetado com arranjos de ventilação, então a pressão de ventilação precisa ser adicionada em cada caso no projeto das pressões da parede.

4.2.8.2. FIP/ISO.

Ainda não regulamentada.

4.2.8.3. CFBC.

Não especifica.

4.2.8.4. DIN 1055

A norma DIN 1055 não especifica em seu texto valores nem regulamentações sobre explosões em silos. Dispõe de uma outra norma que trata de explosões em geral.

4.8.2.5. ACI 313.

Não especifica.

4.2.8.6. SNBATI

Não especifica valores nem regulamentações sobre explosões em silos.

4.2.8.7. NCSE.

A norma australiana explica que o perigo de explosões em pó deve ser investigado quando o sólido armazenado na célula contém finas

partículas ignítivas. A maioria dos materiais vegetais, animais, carbonáceos e compostos orgânicos sintéticos podem formar nuvens de pós, possíveis de explodir em ignição. Faíscas devidas à eletricidade estática é sempre suficiente para iniciar uma explosão. O potencial da explosão deve ser investigado por experimentos, se necessário.

Uma estimativa das pressões de explosão pode ser obtida pelo método dado na referência (Schofield, 1984)), mas as pressões calculadas por este método, usualmente encontradas, são muito grandes para serem contidas. A menos que medidas confiáveis sejam tomadas para prevenir ou suprimir explosões, a célula deve ser provida com painéis de rompimento à explosão, ou aberturas de escotilhas sensíveis à explosão. Estes dispositivos devem romper a uma pressão não maior que 2,5 KPa. As paredes do recipiente devem ser projetadas para resistir sem ruptura a uma pressão não menor que 100 KPa, na ausência de cálculos mais precisos.

4.2.9. Pressões Adicionais Divididas à Insuflação do Ar.

4.2.9.1. BMHB.

A norma britânica explica que as propriedades do material juhto com a razão e modo de carregamento são propícios a causar alto grau de aeração no silo, mesmo se somente por curto tempo, então isto pode conduzir, no extremo, às condições próximas da pressão hidroestática. Nestes casos a máxima pressão possível deve ser calculada usando a seguinte equação:

$$P_{zf} = P_{zfv} = 0,80 \times \gamma_a \left(z + \frac{H_s}{2 + m} \right), \text{ Pa}$$

que fornece o maior valor a qualquer altura.

P_{zf} = pressão normal na parede à altura z , Pa

P_{zfv} = pressão vertical à altura z , Pa

z = distância do ponto mais baixo do topo da superfície do material na seção paralela, m

γ_a = densidade aerada, kg m^{-3}

H_s = altura do cone de material, m

$m = 0$ para silos retangulares ($L \geq 3D$)

$m = 1$ para silos de eixo simétrico

4.2.9.2. FIP/ISO.

A FIP/ISO relata que as pressões em silos de homogeneização devem ser estimadas usando a pressão hidráulica:

$$P_h = \gamma_1 \times z$$

Onde

γ_1 = densidade aerada, que para pós pode ser estimada por:

$$\gamma_1 = 0,8\gamma$$

As pressões sobre o fundo e de atrito na parede podem ser calculadas assumindo que o silo não é homogeneizado.

4.2.9.3. CFBC.

Não especifica pressões de aeração e homogeneização.

4.2.9.4. DIN 1055.

A norma DIN 1055 divide estas pressões em três itens:

4.2.9.4.1. Insuflação de Ar para Secar Material Granular

A sobrepressão de insuflação P_L pode ser diminuída linearmente até zero a partir do ponto de insuflação até a superfície do material granular. Esta pressão deve ser somada às pressões no silo P_h e P_b .

4.2.9.4.2. Insuflação de Ar Contínua como Auxílio de Descarga para Materiais Pulverulentos.

A sobrepressão de insuflação P_L pode ser linearmente diminuída até zero a partir do ponto de insuflação até a altura:

$$\Delta h = 1,3 P_L / \gamma$$

Esta pressão deve ser comparada com as pressões no silo P_h e P_b . O maior valor deve ser adotado.

4.2.9.4.3. Insuflação de Ar para a Homogeneização do Material Pulverulento.

A mistura de pó com o ar deve ser admitida como a de um líquido com peso específico igual a $0,6 \times \gamma$.

4.2.9.5. ACI 313.

A norma americana relata que as pressões em silos de homogeneização devem ser calculadas usando o maior valor das pressões (a) ou (b) abaixo:

- (a) pressões calculadas normalmente sem considerar a pressão do ar
- (b) pressões calculadas assumindo:

$$P_{des} = q_{des} = q \alpha_{des} = 0,6 \times \gamma \times z$$

A força vertical por unidade de comprimento da parede deve ser calculada sem considerar a pressão do ar.

4.2.9.6. SNBATI.

A norma francesa divide estas pressões adicionais em dois itens:

4.2.9.6.1. Pressões Devidas à Descarga por Insuflação de Ar.

Neste caso devem ser considerados:

- a pressão da fase gasosa não ultrapassa 5% da ação n_z sobre a parede, em todos os níveis entre as profundidades 0 e $H - h_f$;
- a altura h_f (a partir do nível do orifício de descarga) sobre a qual a pressão do ar pode ser superior a $n_z/20$ não ultrapassa $H/20$, o valor desta pressão é P .

As ações nas paredes a serem consideradas são:

- entre as profundidades 0 e $H - h_f$: ações iguais a n_z se a descarga é geometricamente normal e n_a se a descarga é geometricamente anormal;
- entre as profundidades de $H - h_f$ a profundidade H : ações n_a iguais ao mais elevado dos três valores: $1,7 n_a$, $n_z + P$, n_a (n_z somente no caso que a descarga é geometricamente normal).

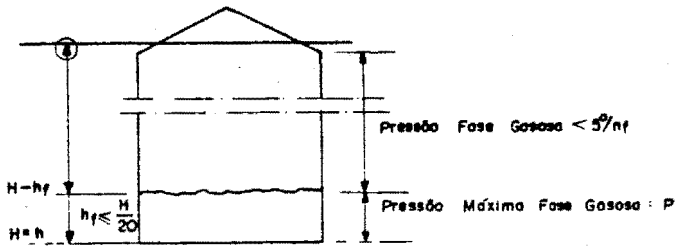


Figura 4.39. Pressão de insuflação de ar.

Obs.: n_1 (ver carregamento) - item 2.5.1.6.
 n_2 (ver descarga central) - item 2.5.2.6.
 n_3 (ver descarga excêntrica) - item 2.5.3.6.

4.2.9.6.2. Pressões em silos de Homogeneização.

Estas pressões são fornecidas dentro do campo de definição admitido para silos de descarga normal, geometricamente anormal e mecanicamente anormal.

Isto implica em calcular todas as pressões da mesma maneira à anterior (4.2.9.6.1) e, além disso, também considerar uma pressão na qual se supõe que o material se comporta como um líquido de peso por unidade de volume γ' .

γ' é o peso aparente por unidade de volume do líquido equivalente, o qual é inferior ao peso por unidade de volume γ do material em repouso. O valor de γ' se fixará em cada caso, tomando em conta a forma de utilização prevista.

4.2.9.7. NCSE.

A norma australiana especifica quatro tipos de cargas devidas a diferenciais de pressão de gases.

4.2.9.7.1. Pressão de Gás Negativa Devido ao Controle de Pó.

A pressão devida à aspiradores de extração de pó deve ser baseada em dados obtidos pelo fabricante do sistema de controle de pó, mas não deve ser tomada como sendo menor que 0,3KPa. Aberturas de segurança devem ser instaladas quando as pressões negativas ao bloqueamento dos filtros coletantes estão propícios a exceder aos valores de projeto.

4.2.9.7.2. Variação de Pressão Adiabática.

Nos silos usados para o armazenamento de grãos e outros generos alimentícios contendo significante quantidade de umidade, o efeito de uma variação de temperatura abaixo da temperatura de condensação deve ser investigado.

4.2.9.7.3. Pressão Interna Devida à Descarga Pneumática.

A pressão máxima induzida por ventiladores (sopradores) usados em descarga pneumática de silos deve ser obtida do fabricante. É indesejável que o silo seja solicitado à pressão máxima desde que o mesmo seja dotado de aberturas de segurança. O pico de pressão atuando em uma área localizada da parede do silo deve ser tomado como 80% da pressão especificada do ventilador (soprador). Esta pressão pode ser reduzida a zero na altura acima da boca de abertura do ventilador, dada por:

$$h' = 1.3 Pa / \rho g$$

onde P_a é a pressão do ventilador. A pressão do ar deve ser combinada com a pressão de armazenamento ou inicial pela seguinte fórmula:

$$P_{nc} = 1,2 P_{ni} + P_a$$

mas não precisa ser combinada com a pressão de fluxo (descarga), exceto onde o silo não é dotado com aberturas de segurança.

4.2.9.7.4. Descarga Rápida de Certos Sólidos.

A descarga rápida de sólidos tendo relativamente baixa permeabilidade a gases, pode induzir a pressões negativas de ar no silo. A parte alta de silos usados para armazenar estes produtos devem ser projetados para pressões negativas iguais a 1,2 vezes a pressão necessária para abrir a abertura de segurança (este valor precisa ser informado pelo fabricante).

4.2.10. Pressões Adicionais Devidas às Cargas de Impacto.

4.2.10.1. BMHB.

A norma britânica especifica que as pressões dinâmicas e as pressões instáveis são causadas principalmente por:

- a) Formação de arco e colapso devidos às condições de contorno nas dimensões da abertura da boca de descarga da tremonha ou inclinação da tremonha;
- b) Efeitos de dispositivos mecânicos de ruptura de arcos;
- c) Fluxo "slip-stick" (escorrega - adere - estabiliza) ou seja, fluxo de trancos de movimento "para e escorrega";
- d) Carregamento de caída livre quando há materiais granulares de grandes dimensões;
- e) Vibração de maquinaria adjacente, tráfico de rodovia, tremores de terra e vibradores.

As pressões adicionais causadas pelos efeitos dinâmicos são difíceis de quantificar. Estas condições devem entretanto ser evitadas o quanto possível, e onde inevitável, deve ser compensada por um aumento de 25% a 50% na estimativa das pressões nas paredes. Se houver qualquer perigo destas cargas dinâmicas também atuarem excentricamente, então um especialista deve ser consultado.

4.2.10.2. FIP/ISO.

A FIP/ISO relata que as cargas de impacto devidas à manipulação imprópria do material e devido à caída de arcos são excluídas da validade da norma.

4.2.10.3. CFBC.

Não especifica cargas de impacto.

4.2.10.4. DIN 1055.

A norma alemã especifica que para silos com fluxo de funil e para materiais que propiciem a formação de abóbadas deve-se adotar um coeficiente de impacto sobre o fundo de $e_b = 1,8$.

4.2.10.5. ACI 313.

A norma americana especifica um valor do coeficiente de impacto em função do tipo de fundo (concreto ou metálico), sendo igual a 1,50 para silos com fundo de concreto e 1,75 para silos com fundo metálico, utilizando para cálculo das pressões a teoria de Reimbert, 1,35 para silos com fundo de concreto e 1,50 para silos com fundo metálico, utilizando para o cálculo das pressões a teoria de Janssen.

4.2.10.6. SNBATI.

A norma francesa explica que para levar em conta a incerteza relativa ao modo de distribuição da pressão sobre o fundo e o risco de sobrepressão resultante da "ruptura de abóbadas", deve-se aplicar um coeficiente de comportamento $K_v = 1,35$.

4.2.10.7. NCSE.

A norma australiana prevê normas de impacto devidas ao carregamento e queda em queda livre de materiais pesados e duros. Especifica que proteção especial deve ser tomada nas paredes da tremonha pelo uso de placas especiais contra desgaste e grades ou barreiras de impacto para procedimentos especiais de operação.

Considerando que há material suficiente na tremonha para amortecer o impacto, as pressões na parede obtidas pela equação de P_{w1} , devem ser multiplicadas pelos fatores dados na seguinte tabela:

Tipo de construção	Relação entre o volume do material carregado e o volume da tremonha			
	< 0,2	0,3	0,4	0,5 - 1,0
concreto	1,10	1,25	1,35	1,40
aço	1,35	1,50	1,65	1,75

Explica também que o coeficiente adotado para a determinação das pressões verticais no fundo da célula (C_v) leva em consideração as flutuações de pressão especialmente onde há uma possibilidade de colapso de arcos dos materiais armazenados.

4.3. Análise Comparativa e Discussões das Normas Existentes.

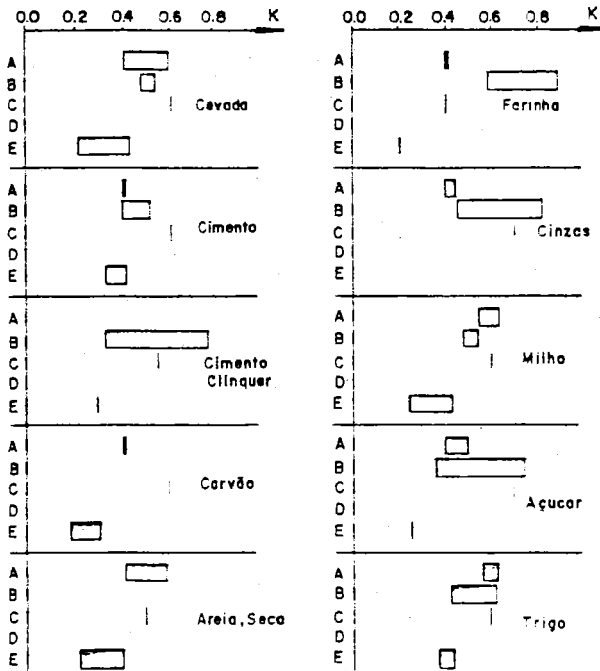
Conforme pode ser observado existem muitas diferenças entre as normas apresentadas, desde os valores dos parâmetros recomendados para as características dos produtos a armazenar até os valores dos coeficientes de sobrepressão a serem aplicados para prever o efeito dinâmico da descarga do produto armazenado.

O único ponto em comum para as diferentes normas é a utilização da equação de Janssen para cálculo das pressões de carregamento. Isto não implica que as normas apresentem as mesmas pressões de carregamento para um particular produto a armazenar, pois a equação de Janssen é função de quatro variáveis, sendo três dependentes do produto a armazenar: densidade (γ), coeficiente de atrito com a parede (μ) e relação entre as pressões horizontais e verticais (K); e uma dependente da geometria do silo: raio hidráulico (R).

As figuras 4.40 a 4.43 apresentam uma comparação entre os vários valores das três variáveis para dez produtos diferentes. São apresentados os parâmetros K, μ , $K\mu$ e γ/μ , muito importantes na utilização da equação de Janssen. Conforme pode ser observado a variação é grande, enfatizando já no carregamento a distribuição estocástica das pressões. A influência do parâmetro $K\mu$ na função $C_z = 1 - e^{-zK\mu/R}$ é mostrada na figura 4.44 em função do raio hidráulico. Conforme pode ser notado, esta influência é mais acentuada na parte alta do silo para o raio hidráulico igual a $d/2$ (silos quadrados ou cilíndricos) do que para silos horizontais ($d/2$).

Na figura 4.45 é apresentada a variação do parâmetro K (das várias normas) em função do ângulo de atrito interno ϕ para um material com ângulo de atrito com a parede igual a 20° . Novamente a variação é grande, ainda não havendo consenso da melhor estimativa de K. Os limites superior e inferior estão entre:

$$1 - \sin^2 \phi / 1 + \sin^2 \phi \quad \text{e} \quad 1 - \sin \phi / 1 + \sin \phi, \quad \text{respectivamente.}$$

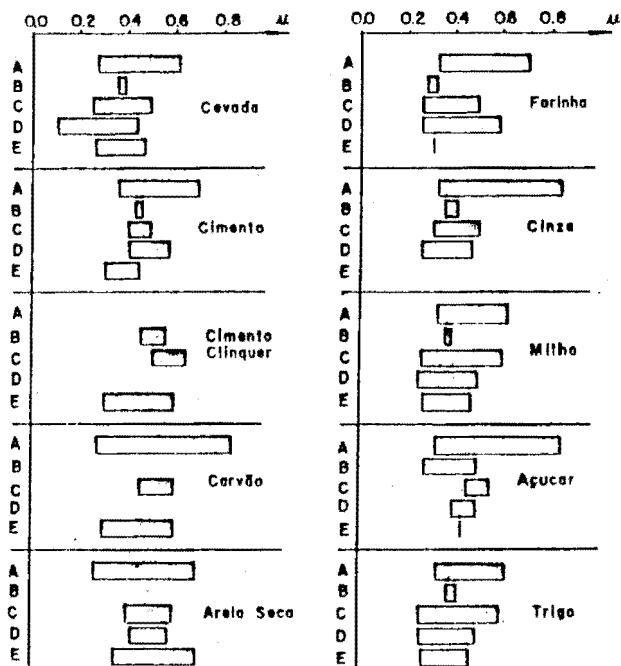


Legenda

A = Austr., B = França, C = Alemanha, D = UK, E = USA

Relação Entre as Pressões Horizontais e Verticais = K

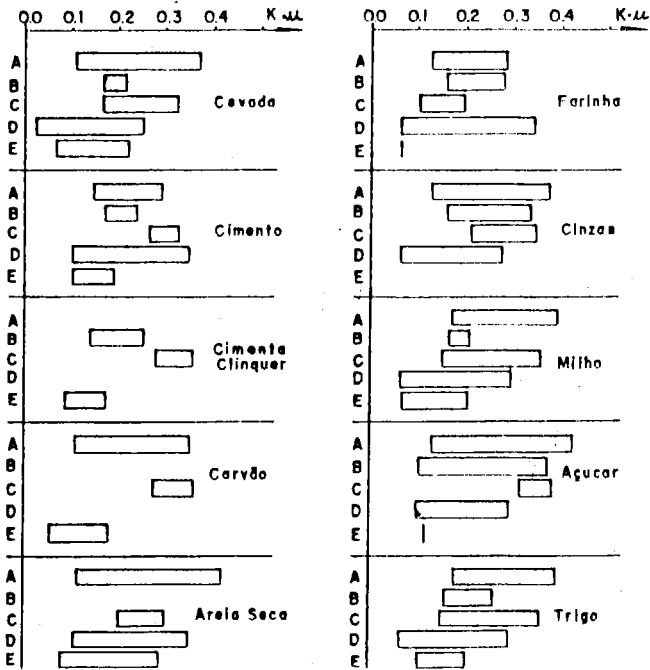
Figura 4.40. Relação entre as pressões horizontais e verticais - K



Legenda

A = Austr., B = França, C = Alemanha, D = UK, E = USA
 Coeficiente de Atrito com a Parede = μ

Figura 4.41. Coeficiente de atrito com a parede - μ

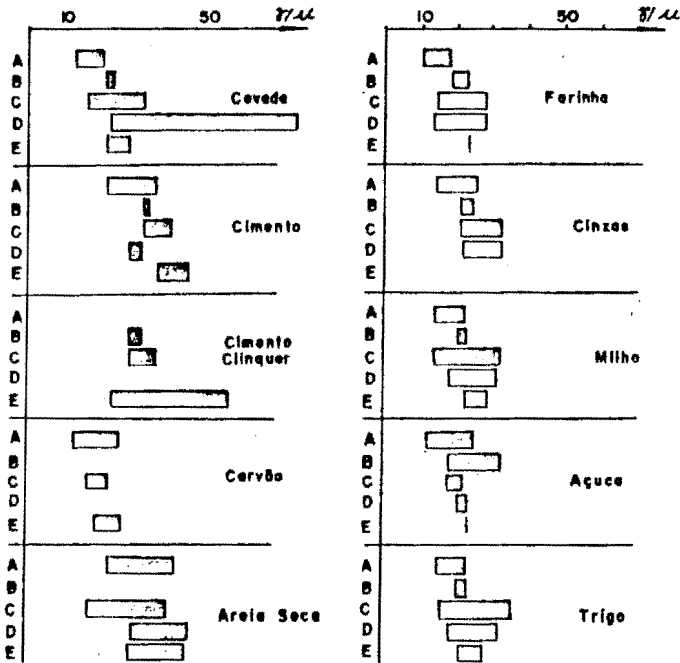


Legenda

A = Austr., B = França, C = Alemanha, D = UK, E = USA

Relação entre as Pressões Horizontais e Verticais = K

Figura 4.42. Fator K_{μ}



Legenda

A = Austr., B = França, C = Alemanha, D = UK, E = USA

Coeficiente de Atrito com a Parede = μ Densidade [KN/m^3] = γ Figura 4.43. Fator γ/μ

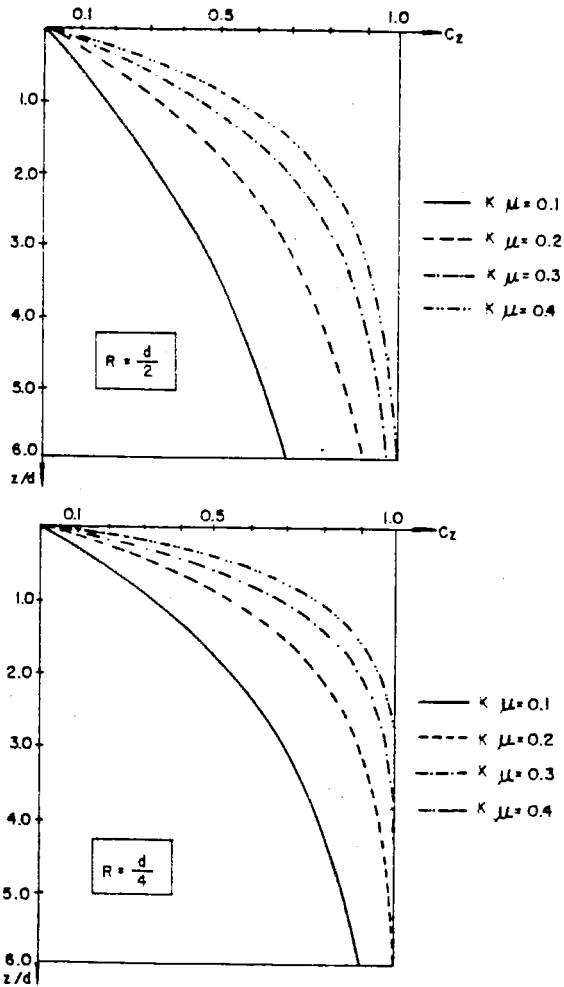


Figura 4.44. Função $C_z = 1 - e^{-zK\mu/R}$.

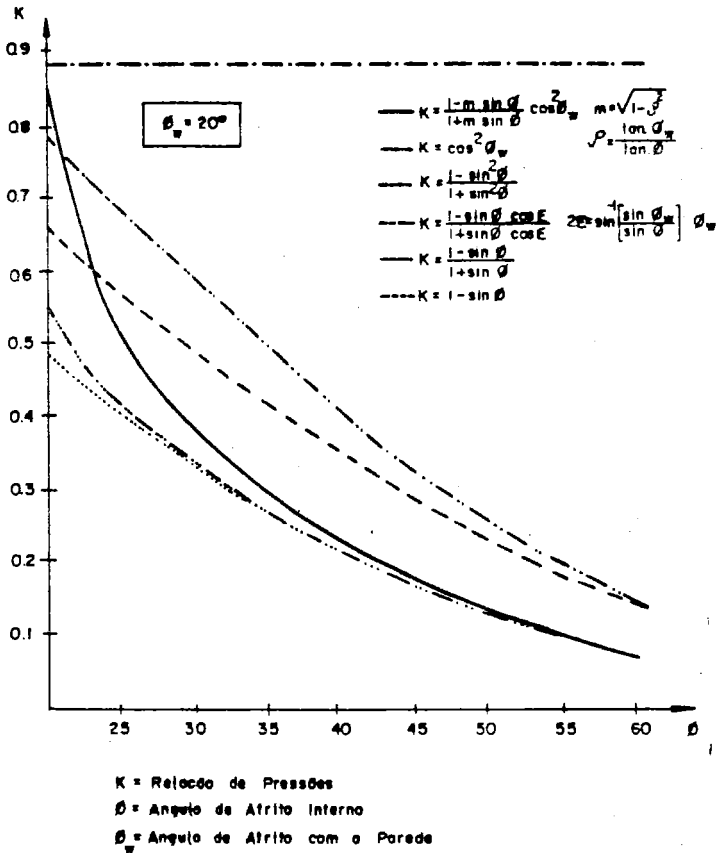


Figura 4.45. Relação entre as pressões horizontais e verticais - K

As variações das pressões durante o processo de descarga do silo ainda são maiores e difíceis de prever com precisão, e cuidados especiais são necessários na aplicação de teorias publicadas e relatório de pesquisa no silo em consideração. A variação das pressões na parede em tempo e espaço é tal que uma análise estatística deve ser utilizada. Os cinco principais procedimentos na predição das cargas que ocorrem durante o fluxo são:

- métodos dos coeficientes de sobrepressão baseados na mudança do estado ativo para o passivo (Walters, 1973);
- teorias e procedimentos baseados no princípio da mínima energia de deformação (Arnold et alii, 1980 e Jenike, 1973);
- método dos multiplicadores de pressão derivados da teoria da mínima energia de deformação (McLean et alii, 1983 e Roberts et alii, 1982);
- procedimentos estatísticos probabilísticos derivados de experimentos;
- testes de laboratório usando modelos em grande escala.

O método de determinação das pressões recomendado pela maioria das normas internacionais é o dos multiplicadores de pressão.

Para ilustrar melhor as diferenças que ainda existem no projeto de silos a nível internacional, é apresentado o seguinte exemplo:

Em 16 de julho de 1986 em Copemhagen, o grupo de trabalho "Silos Design" da Internacionale de la Précontrainte (FIP, 1986) composto de especialistas de todo o mundo, preparou dois diferentes projetos de silos para serem analisados de acordo com as regulamentações dos respectivos países e experiências pessoais. Um dos projetos era o de uma bateria de silos de concreto para armazenamento de milho e o outro um silo de fundo plano de concreto protendido para armazenamento de cimento clinquer.

Os silos tinham as seguintes características:

a) Bateria de silos

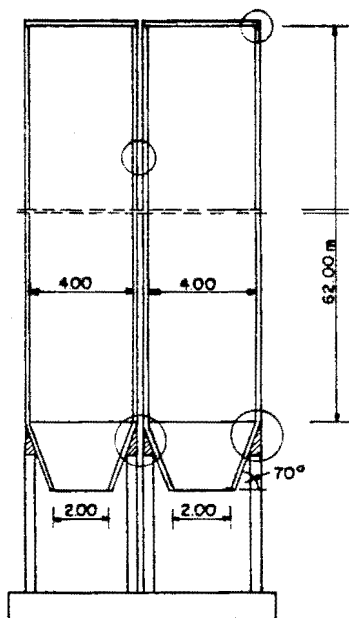
Geometria:	ver figura 4.46.
Material armazenado:	milho
Paredes do silo:	concreto armado
Fundação:	placa de concreto armado
Solo:	rigidez do solo $E_s = 70,0 \text{ MN/m}^3$

A abertura de silos é usada para armazenamento de milho. Nenhuma informação foi dada sobre as propriedades do produto armazenado. Portanto eles deveriam adotar os parâmetros que são comumente usados em seus países.

Como pode ser visto na figura 4.46, não foi estipulado se as células eram ou não monoliticamente conectadas.

Cargas catastróficas como explosões de pós deveriam ser incluídas no projeto somente se isto fosse consideração usual ao especialista.

Se possível dar recomendações do círculo das tensões e do cálculo da estrutura.



Planta

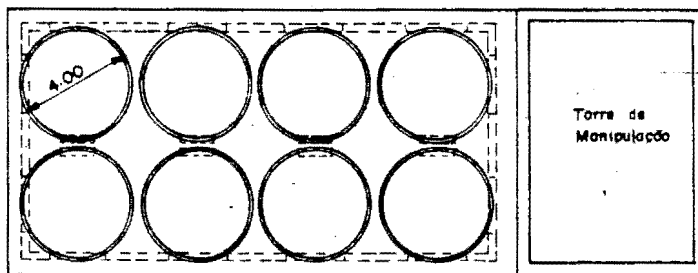


Figura 4.46 - Bateria de silos.

b) Silo de concreto protendido para armazenamento de cimento clínquer

Geometria: ver figura 4.47

Material armazenado: cimento clínquer, temperatura de carregamento de $T = 200^{\circ}\text{C}$

Paredes do silo: concreto protendido

Fundação: placa de concreto armado

Solo: rigidez do solo $E_s = 70 \text{ MN/m}^3$

O silo é carregado e descarregado centralmente, o cimento clínquer é descarregado pela correia transportadora a uma temperatura de 200°C . Estes aspectos, bem como a abrasividade do material armazenado devem ser considerados na construção da parede do silo. Se os assentos diferenciais são incluídos nos cálculos, pode ser assumido que o solo e areia homogênea com uma rigidez de 70 MN/m^3 .

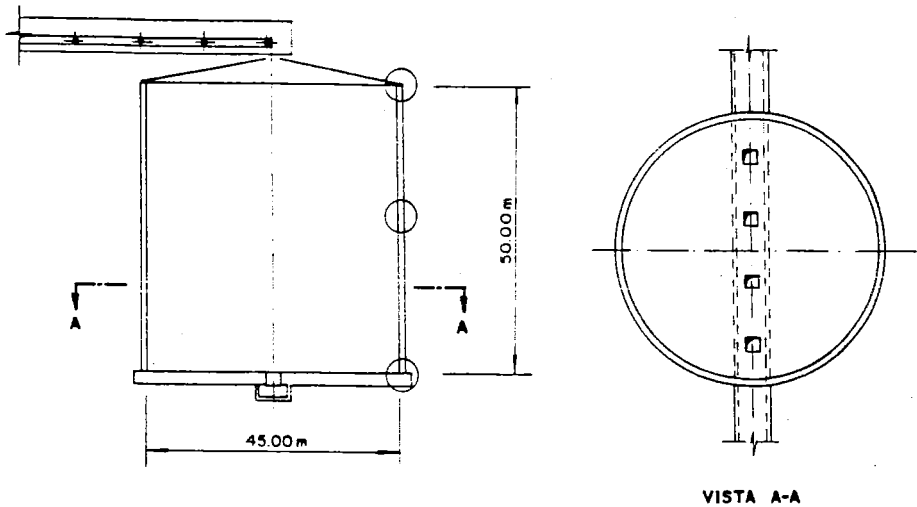


Figura 4.47 - Silo de concreto protendido.

Os resultados obtidos referentes às pressões no silo foram os seguintes:

Os parâmetros característicos para os materiais armazenados escolhidos pelos diferentes calculistas e resultando em grandes pressões horizontais, são dados nas tabelas (a) e (b). O coeficiente de sobrepressão C dá a relação entre as pressões de carregamento/descarga na região de carga máxima.

Tabela (a) - bateria de silos.

Material armazenado: milho

	γ KN/m ³	ϕ°	K	μ	C	Phemax KN/m ²
Suécia	8,0	25	0,55	0,315	1,3	33,0
Espanha	7,8	26	0,39	0,364	2,3	49,0
USA	8,0	28-37	0,25-0,44	0,29-0,47	1,9-2,2	60,7
Alemanha	8,0	-	0,6	0,4	2,0	47+32*
Australia	-	-	-	-	-	-

* o último valor somente na área de conexão da seção cilíndrica com a tremonha.

Tabela (b) - silo de concreto protendido.

Material armazenado: cimento clinquer

	γ KN/m ³	ϕ°	K	μ	C	Phemax KN/m ²
Suécia	17,0	25	0,55	-	1,3	930
Espanha	15,0	30	0,333	0,466	2,5	451
USA	16,0	33	0,295	0,6	1,65	-
Alemanha	18,0	-	0,55	0,6	1,29	338
Australia	16,0	40	0,40	0,57/0,70	1,70	222

As pressões nos silos foram na maioria calculadas usando a equação de Janssen com apropriados coeficientes de sobrepressão. Somente no caso do silo de concreto protendido, em um caso particular, o método de Rankine foi também usado, considerando a relação entre a altura e o diâmetro do silo menor que 1,5.

Nos silos para milho as pressões máximas - excluindo a da "mudança" - foram 33 KN/m^2 e 80 KN/m^2 respectivamente (ver fig. 4.48). O último valor resultante da inclusão de formação e colapso de possíveis arcos de material. Para evitar a formação destes arcos um calculista propôs uma geometria diferente de célula com 4m de diâmetro e 32m de altura. Considerando o fato que com a dada inclinação de 70° da tremonha, o silo provavelmente operará em condições de fluxo de massa, o efeito mudança ou pico de pressão na junção da parte vertical cilíndrica com a tremonha foi considerada somente em um caso, onde a pressão horizontal do projeto na conexão entre a tremonha e o cilindro para a descarga foi aumentada por uma carga adicional triangular de 32 KN/m^2 (ver fig. 4.48).

Para o silo de concreto protendido as pressões máximas foram de 220 KN/m^2 e 930 KN/m^2 respectivamente (ver fig. 4.49). Em apenas uma exceção as pressões variaram entre 450 e 220 KN/m^2 .

Em princípio, todos os calculistas usaram o mesmo método para cálculo das pressões - a teoria de Janssen - sendo as últimas diferenças mencionadas causadas somente pelos parâmetros dos materiais armazenados, especialmente a relação λ entre as pressões horizontais e verticais, e o coeficiente de atrito com a parede μ , que variou entre os seguintes limites:

- milho $\rightarrow K = 0,25 - 0,60 \rightarrow \mu = 0,29 - 0,47$
- cimento-clinquer $\rightarrow K = 0,30 - 0,55 \rightarrow \mu = 0,29 - 0,70$

As diferenças nas pressões horizontais foram também resultado dos diferentes coeficientes de sobrepressão aplicados (ver tabelas (a) e (b)).

A pressão máxima vertical na parede do fundo do silo variou entre 2350 KN/m e 8440 KN/m , devido às hipóteses de cálculo que diferem no valor de K.

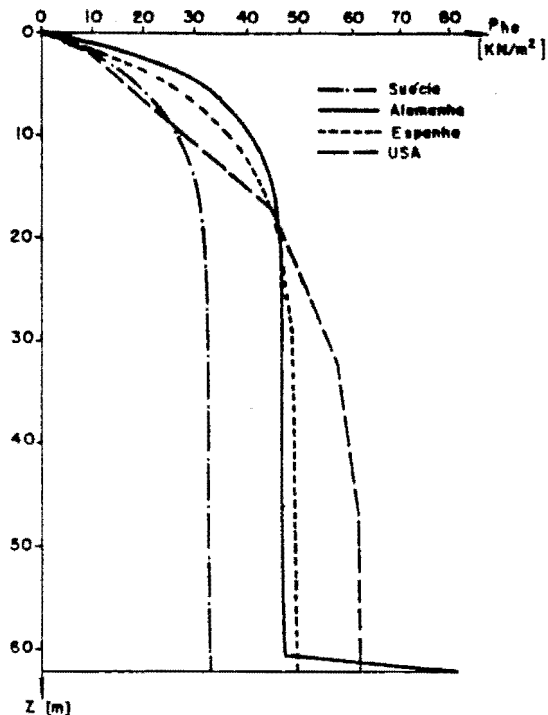


Figura 4.48. Pressões na parede - bateria de silo.

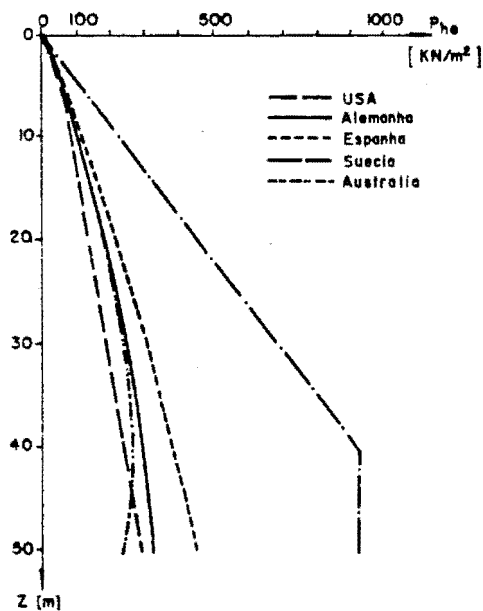


Figura 4.49. Pressões na parede - silo para cimento clínquer.

As conclusões referentes aos projetos analisados foram que os cálculos das pressões são principalmente baseados na teoria de Janssen, incluindo o caso de silos baixos. As maiores diferenças são causadas principalmente pelos diferentes parâmetros adotados para o material armazenado, particularmente pelos diferentes valores da relação entre as pressões horizontais e verticais K , pelos diferentes coeficientes de atrito com a parede μ e pelos mais ou menos empíricos coeficientes de sobrepressão C . Como a maioria destes parâmetros são determinados por meio de métodos probabilísticos e empíricos, e como alguns fenômenos, como por exemplo o chamado "mudança", não estão muito bem entendidos em princípio, obviamente não faz sentido usar fórmulas que são muito complicadas para o projeto de silos.

5. O TRATAMENTO PROBABILÍSTICO DAS CARGAS EM SILOS.

No desenvolvimento da maioria das regras de normalização, muito pouca atenção tem sido dada para o exame estatístico ou probabilístico das pressões em silos. Isto é surpreendente, pois a maioria de outras definições de cargas em estruturas têm sido dominadas pela teoria da probabilidade, desde 1970. As idéias da probabilidade de ocorrência de um vento de 50 anos, ou de uma carga com a probabilidade de ocorrência de 10^{-2} são familiares aos engenheiros estruturais. Considerando a grande discussão sobre a grandeza das pressões máximas em silos, é estranho não serem conduzidos estudos estatísticos da observação da distribuição de pressões. Uma razão pode ser que os pesquisadores experimentais em pressões em silos têm geralmente reportado a envoltória dos máximos valores observados, e com isto não é fácil determinar a associada probabilidade de ocorrência.

5.1. Variabilidade das Cargas para o Projeto Estrutural.

Um aspecto essencial de confiança na análise estrutural é o tratamento das cargas e resistência como distribuições probabilísticas (Figura 5.1). O conceito de índice de segurança é usado como medida da segurança estrutural. Este leva em consideração a variabilidade das cargas e da resistência (Ellingwood et al, 1980). O conceito está sendo usado como base para futuras normas estruturais para assegurar que o uso de novas normas conduzirão a um nível satisfatório de confiança estrutural (Leischester, Pham and Kleeman, 1983).

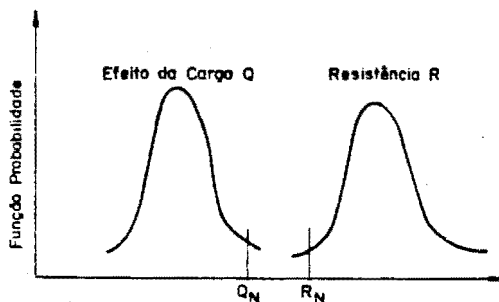


Figura 5.1. Descrição probabilística do efeito da resistência e da carga

5.2. Pressões nas Paredes dos Silos.

As pressões devidas ao material armazenado são variáveis temporariamente e espacialmente. Durante o seu tempo de uso, o silo é solicitado por uma série de ciclos de carga - armazena - descarga que produz distribuição de pressões nas paredes dependentes do tempo (Figura 5.2). Em geral a pressão na parede P é uma função de três conjuntos de parâmetros:

$$P = P(S, G, M) \quad (5.1)$$

Onde S representa as propriedades do material armazenado, G representa as propriedades geométricas e estruturais do silo, e M representa o modo de operação.

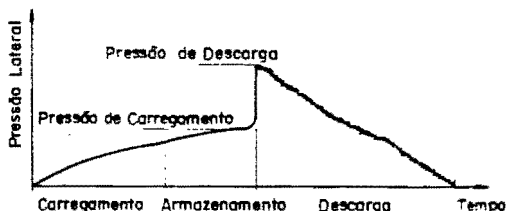


Figura 5.2. Perfil de carga na parede do silo para um ciclo típico

A Tabela 5.1 mostra uma lista de fatores associados com os parâmetros que têm sido apresentados na literatura como tendo efeitos significantes na grandeza e na distribuição das pressões nas paredes. A interação destes três conjuntos de parâmetros produz um certo tipo de tensão no material armazenado durante carga e armazenamento, que afeta a grandeza e a distribuição das pressões na parede. Similarmente, a interação destes três conjuntos de parâmetros produz um certo tipo de fluxo que é diretamente relacionado com o tipo de pressão na parede durante a descarga.

Tabela 5.1. Fatores que afetam a predição de pressão nas paredes

Propriedades dos Materiais Armazenados (S)	Propriedades dos Silos (G)	Modos de Operação (M)
Densidade * Ângulo de atrito interno* Ângulo de atrito com a parede* Forma, dimensão da partícula e distribuição Resistência elástica e cisalhante Coesão Consolidação Umidade Temperatura	- Altura de carga* - Forma da seção transversal* - Geometria da descarga - Obstruções internas - Rigidez na parede - Rugosidade das paredes	- Vazão da carga - Vazão da descarga - Método de promover o fluxo - Método de carregamento - Método de descarregamento - Excentricidade de carregamento - Excentricidade de descarregamento

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

O pressão na parede P_M , como predito pelo modelo analítico é:

$$P_M = P_M (S^*, G^*, M^*) \quad (5.2)$$

onde S^* , G^* , M^* são restritos sub-conjuntos de fatores de S, G, M. Na Tabela 5.1, estes fatores estão assinalados com asterístico (*).

A pressão nominal na parede para projeto é:

$$P_N = P_N (S_{RN}, G_{RN}, M_{RN}) \quad (5.3)$$

onde S_{RN} , G_{RN} e M_{RN} são os valores nominais dos parâmetros usados no projeto. Os modelos analíticos de pressão na parede para P_M e

P_N precisam ser os mesmos. É também interessante notar que P e P_M são variáveis aleatórias, enquanto P_N é um valor específico.

5.3. Efeitos das Cargas nas Paredes do Silo.

Os efeitos das cargas nas paredes do silo Q (isto é: momento fletor, tração, etc...) estão relacionados às pressões nas paredes do silo P_M através da relação:

$$Q = \alpha \times F \times P_M \quad (5.4)$$

onde α é um fator para converter a pressão em efeitos de carga, F é um fator para as incertezas no modelo das cargas e efeitos da carga, e P_M é a pressão na parede do modelo de pressão como definido pela equação (5.2). Todos os termos da equação (5.4) são variáveis aleatórias.

Similarmente, o valor nominal do projeto do efeito de carga na parede do silo Q_N é escrito como:

$$Q_N = \alpha_N \times F_N \times P_N \quad (5.5)$$

onde α_N e F_N são fatores nominais de projeto de α e F .

Das equações (5.4) e (5.5):

$$(Q/Q_N) = (\alpha/\alpha_N) (F/F_N) (P_M/P_N) \quad (5.6)$$

A delineação acima é conveniente para distinguir vários componentes de incertezas nos efeitos das cargas:

- (1) a variabilidade natural de vários fatores que podem ser considerados no modelo de pressão na parede, e refletido no parâmetro (P_M/P_N) ;
- (2) o problema de transformar a variação temporária e espacial real da distribuição de pressões em uma distribuição estática equivalente de pressões é refletido no parâmetro (F/F_N) ;
- (3) o problema da conversão de distribuição de pressões para efeitos de cargas é refletido no parâmetro (α/α_N) . Este parâmetro inclui a idealização do silo para análise estrutural, a teoria estrutural usada no silo e as propriedades estruturais

do silo. Portanto o parâmetro (α/cw) é dependente da estrutura do silo e da distribuição de pressões.

Como uma primeira aproximação, o valor médio \bar{Q} e o coeficiente de variação V_Q do efeito de carga Q , são:

$$(\bar{Q}/Q_w) = (\bar{\alpha}/cw) (F/F_w) (P_M/P_w) \quad (5.7)$$

$$V_Q = (V^2_{\alpha} + V^2_F + V^2_{PM}) \quad (5.8)$$

onde \bar{X} representa o valor médio de X , e V_X o coeficiente de variação de X .

O modelo acima é o modelo probabilístico standart de carga, e tem sido usado na análise de cargas móveis e ventos (Ellingwood et al, 1980).

Os seguintes pontos devem ser observados:

- (a) O modelo acima assume uma relação linear entre a pressão e os efeitos de carga;
- (b) é assumida uma aproximação quase estática para a especificação da carga. A variação da distribuição de pressão temporária e espacial, é substituída por uma pressão estática padrão equivalente àquela dada pelo modelo analítico de pressão;
- (c) O modelo probabilístico do efeito da carga inclui algumas incertezas devidas à análise estrutural. O uso da teoria estrutural implica na adoção da pressão estática padrão equivalente.

As hipóteses acima estão de acordo com o método corrente prático de projeto de silos, mas não são necessariamente o método mais adequado de tratamento de cargas em silos. O modelo seria melhor se o equivalente padrão da pressão estática fosse uma aproximação da "verdadeira" distribuição de pressões. Para silos, o modelo é também dependente do tipo de efeito de carga considerado.

5.4. Exemplo Específico (L. Pham, 1983).

As técnicas usadas para obter a estatística necessária para o modelo acima são melhores ilustradas através de um exemplo

S.6

especifico. Nesta seção serão discutidos os modelos do efeito probabilístico da carga para silos circulares com relação altura/diâmetro maior que três (3) e fundos planos, contendo grãos, com descarga central (Figura 5.3). Somente o efeito da pressão lateral na parede vertical do silo é considerado. De acordo com prática corrente, são adotados modelos teóricos separados para condições de carga e descarga.

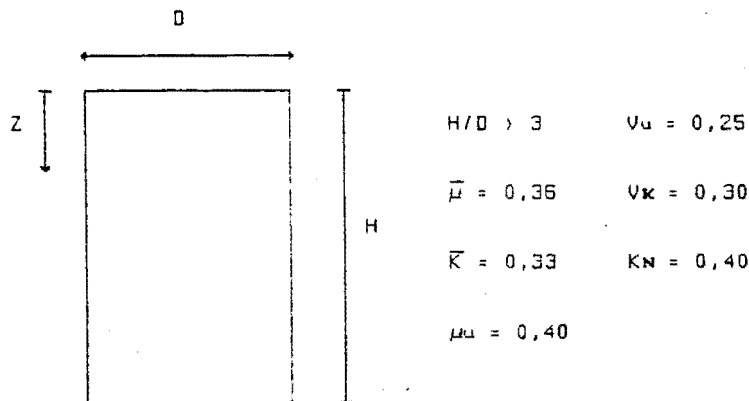


Figura 5.3. Geometria e características do silo usado como exemplo

Um exame dos dados experimentais disponíveis mostra que a forma da equação de Janssen permite um razoável ajuste de dados. Portanto, o modelo de Janssen será usado como modelo analítico para as seguintes considerações.

O modelo analítico para P_M e P_N é a equação de Janssen para as condições de carga e descarga:

$$P_M = (\gamma D/4 \mu) [1 - \text{EXP}(-4 \mu K Z/D)] \quad (5.9)$$

onde γ é a densidade do sólido, D o diâmetro do silo, μ o coeficiente de atrito com a parede, Z é a profundidade do ponto considerado e K o coeficiente de pressão horizontal.

Similarmente:

$$P_N = (\gamma_N D_N/4 \mu_N) [1 - \text{EXP}(-4 \mu_N K_N Z/D_N)] \quad (5.10)$$

onde o índice n significa valor nominal de projeto:

5.4.1. Variabilidade Devida às Propriedades do Produto Armazenado

As propriedades de pequenos grãos dadas pela ACI313-77, são as seguintes:

$$\bar{\gamma} = 860 \text{ kg/m}^3 \quad ; \quad V\gamma = 0,15 \quad (5.11)$$

$$\bar{\mu} = 0,36 \quad ; \quad V\mu = 0,25 \quad (5.12)$$

$$\bar{\delta} = 30^\circ \quad ; \quad V\delta = 0,25 \quad (5.13)$$

Há uma incerteza considerável no valor de K , a maioria dos autores sugerem:

$$K = (1 - \sin \delta) / (1 + \sin \delta) \quad (5.14)$$

onde δ é o efetivo ângulo de atrito interno de grãos. O valor médio de δ é aproximadamente 30° com um coeficiente de variação de 0,25. Estes resultados fornecem para K :

$$\bar{K} = 0,33 \quad ; \quad V_K = 0,30 \quad (5.15)$$

Os valores nominais de projeto para K , μ e γ são assumidos ser:

$$K_N = 0,40 \quad ; \quad \mu_N = 0,40 \quad ; \quad \gamma_N = \gamma \quad (5.16)$$

Se a variação no diâmetro do silo é desprezível, então da equação (5.10), o coeficiente de variação de V_{PM} de P_M , pode ser escrito como:

$$V_{PM}^2 \cong V^2\gamma + V^2\mu + A^2 (V^2_K + V^2\mu) / (e^A - 1)^2 \quad (5.17)$$

$$\text{com } A = 4 \bar{K} \bar{\mu} (Z/D)$$

Os valores estatísticos para o parâmetro (P_M/P_N) são dados na Tabela 5.2 para vários valores de (Z/D) , do qual os seguintes valores médios são obtidos:

$$(P_M/P_N) = 0,98 \quad ; \quad V_{PM} = 0,35 \quad (5.18)$$

Tabela 5.2. Média e coeficiente de variação de P_M/P_N para várias profundidades.

Z/D	Média (P_M/P_N)	Coef. Var. (P_M/P_N) = V_{PM}
1	0,90	0,42
2	0,95	0,37
3	0,99	0,34
4	1,03	0,32
5	1,05	0,31
Média	0,98	0,35

5.4.2. Variabilidade no Modelamento da Distribuição de Pressão

As incertezas no modelamento da distribuição de pressões são refletidas no parâmetro (F/F_N) , que podem ser estimadas pela comparação da "verdadeira" distribuição de pressões dos dados experimentais com os valores da equação de Janssen, isto é:

$$(F/F_N) = (P_{ex}/P_J) \quad (5.19)$$

onde P_{ex} é o valor experimental da pressão na parede devido ao carregamento ou descarga e P_J o valor correspondente dado pela equação de Janssen.

Estatísticas de dados experimentais disponíveis de várias fontes são dadas nas tabelas 5.3 e 5.4, para as condições de carga e descarga, respectivamente, das quais as seguintes estimativas são obtidas:

$$\text{Para a condição de carga: } (\bar{F}/F_N) = 1,08 \quad ; \quad V_F = 0,18 \quad (5.20)$$

$$\text{Para a condição de descarga: } (\bar{F}/F_N) = 1,62 \quad ; \quad V_F = 0,33 \quad (5.21)$$

Tabela 5.3. Estatística da Distribuição de Pressões de carga

Referência	Relação entre pressão experimental e pressão de Janssen			
	Média	Coef. Var.	Valor de pico	Valor na pressão de pico
Pieper - (1964)	0,97	0,25	1,31	1,31
	1,03	0,21	1,28	1,23
	1,02	0,14	1,20	1,20
Reimbert- (1976)	1,09	0,27	1,96	0,89
Nielsen - (1980)	1,24	0,08	1,35	1,30
Platonov- (1959)*	1,21	0,06	1,29	1,27
Mitchell- (1981)	1,01	0,04	1,07	0,99
Média total	1,08	0,15	1,35	1,17
Coef. Var.	0,10	-	0,21	0,14

5.10

Dos resultados das Tabelas 5.3 e 5.4 podemos concluir que o modelo de Janssen é um ajuste muito bom para os dados experimentais, para a condição de carga e não adequado para a condição de descarga.

Tabela 5.4. Estatística da distribuição das pressões de descarga

Referência	Relação entre pressão experimental e pressão de Janssen			
	Média	Coef.Var.	Valor de pico	Valor na pressão de pico
Pieper - (1964)	1,20	0,19	1,64	1,32
	1,03	0,21	1,28	1,23
Kim - (1959)*	1,21	0,29	1,65	1,65
	1,35	0,35	1,92	1,76
	1,38	0,20	1,69	1,69
Reimbert- (1976)	1,62	0,81	6,46	0,89
Nielsen - (1980)	1,85	0,32	2,64	2,54
Platonov- (1959)*	1,80	0,07	1,93	1,93
	1,68	0,13	1,93	1,93
	2,17	0,11	2,33	2,33
Mitchell- (1981)	1,62	0,12	2,39	2,39
Média total	1,62	0,26	2,46	1,84
Coef. Var.	0,20	-	0,59	0,27

Os dados de Platonov e Kim foram obtidos de Turitzin (1963).

5.4.3. Variabilidade Devida a Conversão de Pressão para Efeitos de Carga.

O maior efeito de carga a ser considerado no projeto de silos circulares são a tração anelar e o momento vertical de flexão. A hipótese de uma relação linear entre pressão e efeitos de carga é razoável se a equivalente distribuição de pressão é uma boa aproximação da "verdadeira" distribuição de pressão. Entretanto, não existem estudos sobre o efeito das diferenças no padrão da distribuição de pressões nos efeitos de carga. Na inexistência de dados, o valor do parâmetro (α/\cos) é assumido ser o mesmo daquele usado em modelos de cargas móveis para projetos de edifícios (Ellingwood et al, 1980).

$$(\bar{\alpha}/\alpha_N) = 10 \quad ; \quad V_L = 0,10 \quad (5.22)$$

As equações (5.18), (5.20), (5.21) e (5.22) dão as seguintes estimativas para (Q/Q_N) :

- Para a condição de carga:

$$(\bar{Q}/Q_N) = 1,06 \quad ; \quad V_Q = 0,41 \quad (5.23)$$

- Para a condição de descarga:

$$(\bar{Q}/Q_N) = 1,59 \quad ; \quad V_Q = 0,49 \quad (5.24)$$

A estimativa acima foi feita baseada no modelo analítico de distribuição de pressões de Janssen. Entretanto, estimativas igualmente válidas podem ser feitas usando quaisquer outros modelos (por exemplo, Reimbert).

5.4.4. Método Alternativo de Estimativa da Variabilidade

é possível obter uma estimativa do fator combinado (F/F_N) (P_M/P_N) usando os seguintes passos:

(a) Ajuste uma distribuição de pressões do tipo Janssen para os dados experimentais usando K e μ como parâmetros de ajuste. A estatística dos ajustes é a seguinte:

- Condição de carregamento: $\bar{K}/K_N = 0,98 \quad ; \quad V_K = 0,09$

$$\bar{\mu}/\mu_N = 0,88 \quad ; \quad V_\mu = 0,19$$

- condição de descarga: $\bar{K}/K_N = 1,30 \quad ; \quad V_K = 0,22$

$$\bar{\mu}/\mu_N = 0,50 \quad ; \quad V_\mu = 0,42$$

(b) Inclua a variabilidade "natural" em K e μ devido às propriedades dos materiais armazenados.

(c) Use a equação (5.17) para obter a variabilidade combinada.

5.12

Os cálculos estão sumarizados na Tabela 5.5 para as condições de carga e descarga. As seguintes estimativas são obtidas:

- Para a condição de carga: $(\bar{Q}/Q_M) = 1,07$; $V_a = 0,40$ (5.25)

- Para a condição de descarga: $(\bar{Q}/Q_M) = 1,65$; $V_a = 0,61$ (5.26)

Tabela 5.5. Resumo da Estatística dos efeitos de carga em silos (método alternativo)

Z/D	Carga		Descarga	
	\bar{Q}/Q_M	V_a	\bar{Q}/Q_M	V_a
1	1,01	0,48	1,44	0,71
2	1,05	0,41	1,57	0,65
3	1,07	0,39	1,67	0,60
4	1,09	0,37	1,76	0,57
5	1,11	0,35	1,83	0,54
Média	1,07	0,40	1,65	0,61

A comparação entre os resultados do primeiro método (equações 5.23 e 5.24) mostram que as estimativas são quase idênticas para a condição de carga, mas são levemente diferentes para a condição de descarga.

Os resultados acima mostram que a variabilidade das cargas em silos é muito maior que a variabilidade das cargas locais em construções e é da mesma ordem das cargas de vento.

5.5. Discussões.

5.5.1. Bases Alternativas para Estimar Variabilidade.

As estimativas sobre variabilidade acima citadas são baseadas principalmente em dados experimentais disponíveis. Para casos onde os dados experimentais são inadequados, torna-se necessário basear as estimativas da variabilidade de modelos de projeto simplificados (como o de Janssen), em modelos teóricos de distribuição de pressões mais complexos, porém mais precisos (como o de Jenike). Por exemplo, se a distribuição de pressões instantânea de Jenike (Jenike e Johanson, 1968) é realística, então ela pode ser usada em

conjunto com os dados experimentais para estimar a variabilidade associada com o uso da equivalente distribuição de pressões de Janssen. Para estas aplicações os seguintes pontos devem ser observados:

- (a) A carga de "mudança" do modelo de Jenike (Figura 5.4) considera altos momentos de tração anelar no ponto de transição. Estes efeitos de carga não são adequadamente considerados na equivalente distribuição de carga do tipo Janssen, particularmente se é visado um projeto no regime elástico;
- (b) O problema de (a) pode ser resolvido especificando uma equivalente carga concentrada no anel com a distribuição de carga para o projeto no regime elástico;
- (c) Uma carga distribuída equivalente somente pode ser suficiente para um projeto de cargas últimas considerando que a adequada dutibilidade está presente, isto é, se o critério de ruptura não é sensível com o tipo de distribuição de carga.

Os problemas acima estão correntemente sendo estudados.

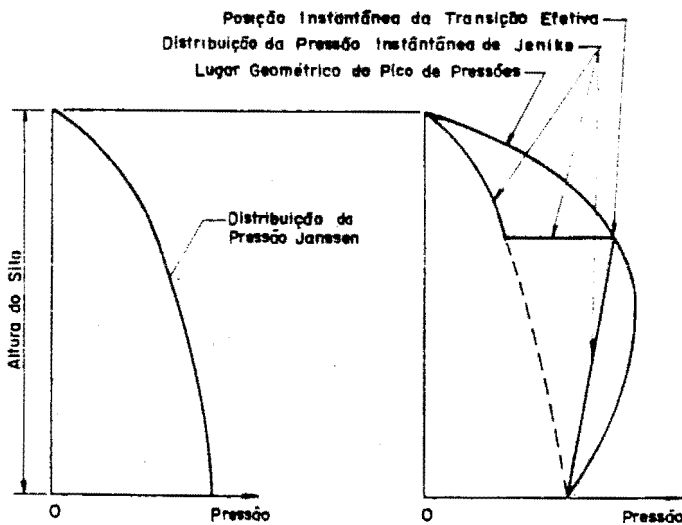


Figura 5.4. Distribuição da pressão típica de Janssen e distribuição da pressão instantânea de Jenike para condições de descarga

5.5.2. Aplicações dos Modelos Probabilísticos

Os modelos probabilísticos acima fornecem um meio no qual dados adicionais e modelos teóricos de carga de silo podem ser incorporados. Os modelos fornecem os dados necessários para o cálculo de índice de segurança como uma medida integral de segurança estrutural.

Por exemplo, os dados da seção 3 podem ser usados para calcular os índices de segurança para silos projetados pela ACI 313-77. Pode ser mostrado que para condição de carregamento o índice de segurança é aproximadamente 3 e para a condição de descarga é aproximadamente 2. Para edifícios construídos com o mesmo critério estrutural (ACI 1977a), o índice de segurança é aproximadamente 3 para cargas móveis e aproximadamente 2 para cargas de vento (Ellingwood et al 1980).

Os modelos são também relevantes para o problema de normalização de cargas em silos. Várias formas de normalização têm sido estudadas e comparadas usando os modelos acima. Fatores de cargas apropriados podem ser racionalmente derivados para qualquer nível desejado de confiança. Este procedimento removerá muitas das arbitrariedades correntes.

Para estes objetivos serem alcançados é necessário ter:

- (1) dados sobre as propriedades dos sólidos armazenados;
- (2) uma compilação sistemática dos dados experimentais avaliáveis;
- (3) mais estudos sobre problemas de converter pressões em efeitos de carga incluindo o efeito dos métodos de cálculo.

6. INFORMAÇÕES A SEREM FORNECIDAS AO PROJETISTA E AO USUÁRIO - OBJETIVOS E REQUISITOS.

Muitos dos acidentes ocorridos em silos também são devidos à falta de definição das responsabilidades e das restrições na utilização das unidades armazenadoras. Por exemplo, é muito comum projetar um silo para produtos granulares e, posteriormente, o usuário armazenar produtos pulverulentos no mesmo. A adoção destas informações e responsabilidades devem ser escritas em um documento. Sugere-se para este item a adoção da norma britânica (BMHB), pois é a que melhor apresenta estas informações.

6.1. Informações a Serem Fornecidas pelo Usuário.

6.1.1. Objetivos.

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:

- (a) - armazenamento com descarga infrequente;
- (b) - armazenamento com descarga frequente e contínua;
- (c) - descarga para transporte (rodovia ou ferrovia);
- (d) - descarga para processo ou empacotamento;
- (e) - importância da descarga ser controlada e/ou com possíveis paradas.

6.1.2. Responsabilidade do Projetista.

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

6.1.3. Materiais a Serem Manipulados.

O usuário deve indicar a natureza de todos os materiais a serem

armazenados no silo e deve, para cada material, fixar as umidades mínima e máxima, a distribuição das dimensões das partículas mais grossas e mais finas, e as densidades mais alta e mais baixa do material armazenado bem como a indicação de sua friabilidade. 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 consequências em qualquer mudança no uso, incluindo nos objetivos originais os subsequentes entendimentos com o projetista.

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

- (a) Área e altura disponível para a construção do silo;
- (b) Quantidade máxima de produto a ser armazenada;
- (c) Condições de carregamento e descarga indicando:
 - máxima razão de carregamento;
 - máxima e mínima vazões de descarga;
 - se é para a descarga ser contínua e intermitente e o grau de controle necessário;
 - os limites de segregação permissíveis;
 - o tipo de equipamento de descarga a ser conectado com o silo;
 - os perigos associados ao material armazenado, como por exemplo, toxicidade e propriedades explosivas;
 - propriedades corrosivas do material no estado seco e úmido;
 - tendência de formação de revestimento de superfície devida, por exemplo, à tração eletrostática ou fusão;
 - temperatura máxima e mínima do material 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 material em questão.

6.2. Informações a Serem Fornecidas pelo Projetista.

6.2.1. Manual de Projeto e Operação.

O projetista do silo deverá fornecer ao usuário um manual contendo toda a informação necessária para operação eficiente e segura, e manutenção do silo. Este documento poderá ser menos detalhado para silos com pequenas dimensões (< 100m³ de capacidade).

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

6.2.2. 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 operação e manutenção a serem observadas, com a finalidade de evitar dificuldades no fluxo. Isto 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 ângulos efetivos de atrito interno e de atrito com a parede;
- limites na distribuição das dimensões das partículas;
- limites na 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 deixar resíduos do material no silo;
- características de segurança;
- características especiais para o fluxo de produtos destinados à

alimentação humana.

6.2.3. Projeto para a Integridade da Estrutura

Para 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, cargas dinâmicas, aditivos de descaga, etc...;
- qualquer compensação para a pressão de explosão;
- quaisquer limites nas modificações estruturais, tanto para o carregamento como para a descarga dos materiais;
- fatores de segurança utilizados, incluindo corrosão e abrasão se aplicáveis.

6.2.4. Acesso, Inspeção, Limpeza e Manutenção.

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

6.2.4.1. Acesso.

Deve ser especificado no Manual de Projeto e Operação (MPO) que todos os silos devem ter, pelo menos uma vez por ano, uma inspeção externa e interna.

Para este 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 deve-se ter atenção particular com relação à possibilidade de colapso de arcos ou abóbadas de material. 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 outros pontos seguros ou para passarelas seguras e protetoras.

6.2.4.2. Inspeção.

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

6.2.4.3. Limpeza.

Se o material 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 suficiente para prevenir cargas estruturais. A rotina para a limpeza deve ser especificada para o usuário, pelo projetista.

6.2.4.4. Manutenção.

É usual para uma boa manutenção, que ela não seja realizada pelo mesmo pessoal que opera o equipamento. Deve haver um sistema formal para controlar a transferência do equipamento da operação para a manutenção, isto é, permitir que o sistema funcione. Uma causa comum de explosões é o uso de soldas ou ferramentas de corte em lugares onde existem pós explosivos. Para prevenir isto deve ser adotado um sistema formal que assegure que o lugar seja limpo ou seu conteúdo tornado não inflamável, antes que este trabalho seja executado.

6.2.5. Segurança.

O projetista deverá indicar as precauções de segurança a serem observadas, de acordo com os seguintes cuidados:

- explosões;
- escape de pós tóxicos ou nocivos;
- transbordamento;

- acidentes com o pessoal de operação e manutenção;
- coagulação do material seguida por movimento destrutivo ou colapso.

7. ORIENTAÇÕES NO PROJETO ESTRUTURAL DE SILOS.

Na determinação das pressões no silo, atenção especial deve ser dada às condições estruturais de cálculo e o modo associado de ruptura de estrutura do silo.

O aumento das pressões em pequenas partes da estrutura tem sido sempre tratado como se elas se estendessem em toda a volta do silo, no mesmo nível, o que é uma hipótese não conservadora e certamente conduz a interpretações erradas das tensões induzidas na estrutura.

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

7.1 Silos de Concreto Armado.

Os silos de concreto armado são, em geral, relativamente espessos ($R/t \sim 25-60$). Como resultado, as paredes são solicitadas por grandes momentos originados por restrições de apoios e variações locais de carga. Uma segunda consequência disto, é que as paredes respondem ao material armazenado de uma maneira rígida. As pressões na parede são, então, similares àquelas exercidas nas paredes de reservatórios rígidos.

O concreto tem pouca resistência à tração e, portanto, ações de tração na parede do silo devem ser resistidas pela armadura, e podem ser esperadas grandes fissuras se isto não ocorrer. Estas fissuras podem não ter consequências catastróficas (figuras 7.1 e 7.2), pois a estrutura de casca é muito redundante, e as fissuras somente reduzem a rigidez de um mecanismo paralelo. As fissuras também podem ser produzidas por recalques diferenciais da fundação, mudanças bruscas de temperatura ao longo do ano e retrações dependendo do processo construtivo.

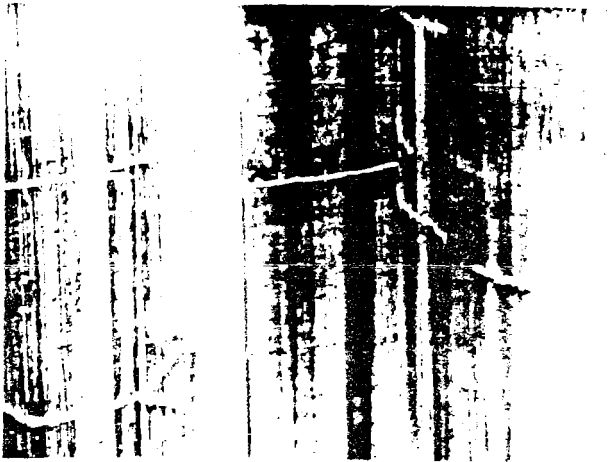


Figura 7.1. Fissuras em silos de concreto.

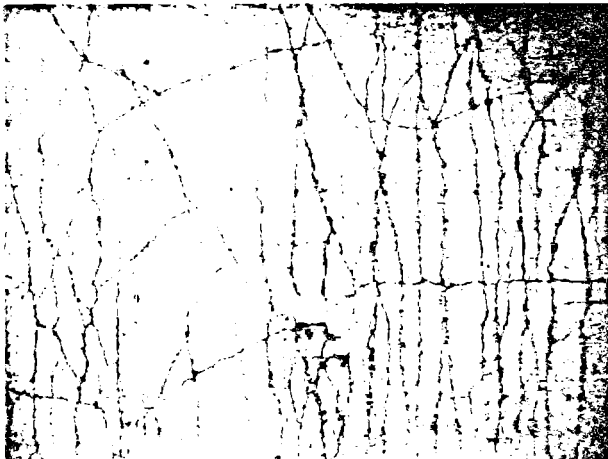


Figura 7.2. Fissuras em silos de concreto.

Além disso, uma ruptura progressiva pode ser produzida por repetidas pressões altas do variável processo de fluxo, e fissuras são indesejáveis em silos usados para armazenar produtos que deterioram com a umidade, ou produtos que podem ter uma influência corrosiva na armadura.

No ano de 1980 se realizou na Suécia um estudo de todos os silos de concreto armado do país (Ravenet, 1983). Os resultados mostraram que 60% apresentavam importantes fissuras e 10% tinham problemas de entrada de água.

As tensões de compressão atuantes em silos de concreto armado são geralmente pequenas e facilmente resistidas pelo concreto. O tipo de ruptura das paredes de silos de concreto armado é usualmente por escoamento do aço (normalmente de modo dúctil, dando bastantes avisos de ruptura) ou por perda de vínculos, resultando em ruptura perto dos cantos ou ao longo de parte da circunferência (não dúctil, resultando em colapso catastrófico), figuras 7.3 e 7.4.



Figura 7.3. Colapso de silo de concreto.

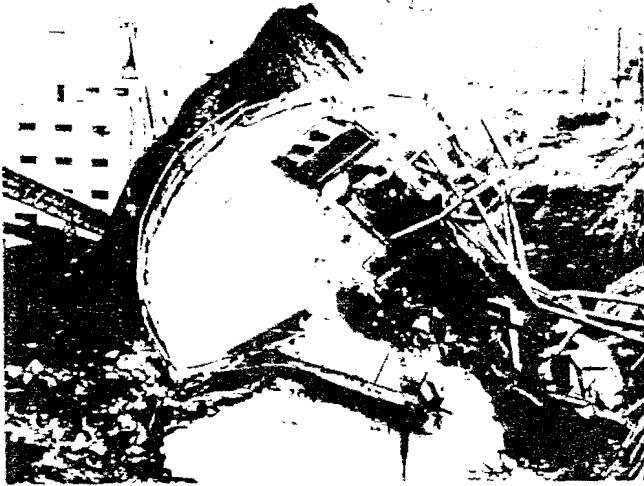


Figura 7.4. Colapso de silo de concreto.

Devido às fissuras mudarem a rigidez relativa dos diferentes caminhos das cargas na estrutura de concreto, os silos de concreto geralmente respondem de um modo que corresponde às hipóteses de projeto. Portanto, o projeto tradicional é feito calculando a armadura circunferencial para resistir às tensões de membrana ou anelares, supondo cada seção da altura do silo como um anel. As tensões de membrana de compressão oriundas das forças de atrito são facilmente resistidas pela compressão no concreto. Recentes modificações deste procedimento de projeto para permitir descarga excêntrica (Safarian, 1985) recomendam que a armadura seja disposta em duas camadas, para resistir os momentos fletores circunferenciais. Seções horizontais da parede do silo são solicitadas por compressão, e são menos suscetíveis à fissuras de flexão. Esta pode ser uma razão da pouca atenção que é dada aos momentos fletores verticais ou resistência à flexão. Como consequência, a estrutura tende a desenvolver pequenas trincas

horizontais, e transmite sua carga para a ação de anel, como foi previsto no cálculo.

Estes momentos podem ser calculados da seguinte maneira (Safarian, 1985):

Consideremos que o diâmetro do fluxo de conduto seja D_1 (figura 7.5). O silo tem, ao longo da circunferência, uma pressão P_2 maior que a pressão P_1 no interior do conduto de descarga.

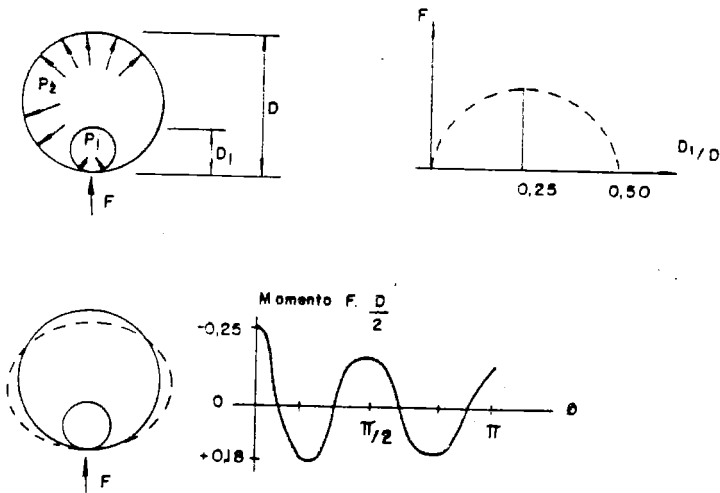


FIGURA 7.5. Pressões em silos com descarga excêntrica.

O valor máximo da pressão P_1 , considerando um valor do coeficiente de sobrepressão igual a 2 (já que a massa está em movimento) vale:

$$P_1 = 2 \cdot \gamma \cdot D_1 / 4 \cdot \tan(\phi_v) \quad (1)$$

O valor da pressão referente ao resto da massa que se encontra em repouso vale :

$$P_2 = \gamma \cdot D / 4 \cdot \tan(\phi_v) \quad (2)$$

Sendo: P_1 = pressão dinâmica no conduto de diâmetro D_1 em Kg/m².

P_2 = pressão estática no silo de diâmetro D em Kg/m².

γ = densidade em Kg/m³.

ϕ_w = ângulo de atrito entre o produto armazenado e a parede em graus.

$$P_1 - P_2 = 2 \cdot \gamma \cdot D_1 / 4 \cdot \tan(\phi_w) - \gamma \cdot D / 4 \cdot \tan(\phi_w) = \\ = (\gamma \cdot D / 4 \cdot \tan(\phi_w)) \cdot (2 \cdot D_1 / D - 1)$$

O valor da força F é:

$$F = (P_1 - P_2) \cdot D_1 = \gamma \cdot D^2 / 4 \cdot \tan(\phi_w) \cdot (2 \cdot D_1^2 / D - D_1 / D)$$

F é máxima para $D_1 / D = 0.25$

$F = 0$ para $D_1 / D = 0.5$

$$F_{max} = - 0.125 \gamma \cdot D^2 / 4 \cdot \tan(\phi_w)$$

Se supomos que o valor da força F se concentra em um ponto, o momento vale:

$$M = F \cdot D / 2$$

O momento máximo valerá:

$$M_{max} = - 0.125 \cdot \gamma \cdot D^3 / 8 \cdot \tan(\phi_w)$$

Em geral, o momento máximo vale:

$$M_{max} = - 0.125 \cdot F \cdot D$$

O momento mínimo:

$$M_{min} = + 0.090 \cdot F \cdot D$$

Devem-se, portanto, colocar armaduras complementares que nos permitam resistir estes momentos e que se somarão às armaduras previstas para suportar os esforços de tração pura.

Nas figuras 7.6 e 7.7 , podemos ver duas instalações em concreto armado moldado em loco e pré-moldado.



Figura 7.6. Silo de concreto armado - moldado em loco.

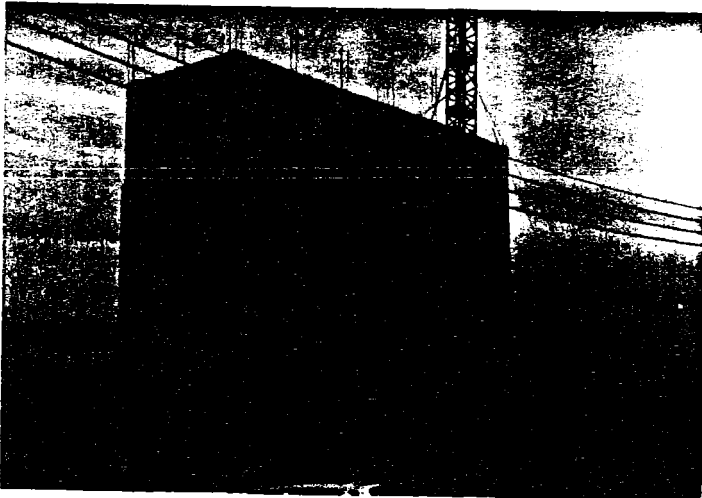


Figura 7.7. Silo de concreto armado - pré-moldado.

Os tipos de ruptura e procedimentos de cálculo têm conduzido as regras para o cálculo das pressões na parede em silos de concreto, com ênfase:

a) à máxima pressão normal uniforme e à envoltória destas pressões;

b) às pressões em silos altos, maioria dos silos de concreto e, em parte, devido a diferença mais significativa, neste caso, entre a máxima pressão normal e as pressões de carregamento;

c) momentos fletores circunferenciais induzidos por pressões que variam ao longo da circunferência;

Os trabalhos de pesquisa nas últimas duas décadas sobre pressões em silos têm seguido amplamente esta ênfase.

7.2. Silos Metálicos.

7.2.1. Silos Cilíndricos.

É menos fácil fazer recomendações sobre silos metálicos do que sobre silos de concreto devido à variabilidade de parâmetros já mencionada. Entretanto, a mesma estratégia de cálculo para silos de concreto mencionada não pode ser aplicada devido à consideração preponderante ser geralmente ruptura por flambagem (Rotter, 1985).

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

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

antes que ocorra um colapso estrutural.

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

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

A resistência de uma casca cilíndrica em flambagem sob compressão axial é aumentada substancialmente quando a casca é pressurizada internamente: quanto maior a pressão, maior se torna a resistência. O calculista, que desejar utilizar esta vantagem na resistência precisa estimar a menor pressão interna que pode existir com a compressão axial na parede. Embora este fato seja reconhecido na Norma Alemã (DIN 1055), ele tem recebido muito pouca atenção dos teóricos e experimentadores em pressões em silos, que têm principalmente tentado definir as pressões máximas na parede.

A segunda causa de compressão axial que conduz à ruptura por flambagem em silos metálicos cilíndricos é das pressões que

variam ao longo da circunferência em certa altura, figura 7.8 A distribuição de pressões desse tipo é normalmente associada pelo calculista por descarga excêntrica (Jenike, 1967), mas pode também ser devida à variação ao acaso das pressões durante a descarga, e são especificadas na Norma Alemã (DIN 1055). Não é suficiente calcular o silo para ter resistência adequada à tração circunferencial para suportar a maior pressão esperada simultaneamente em todos os pontos: isto assume o tipo de carregamento errado e implica na indução de compressões axiais.

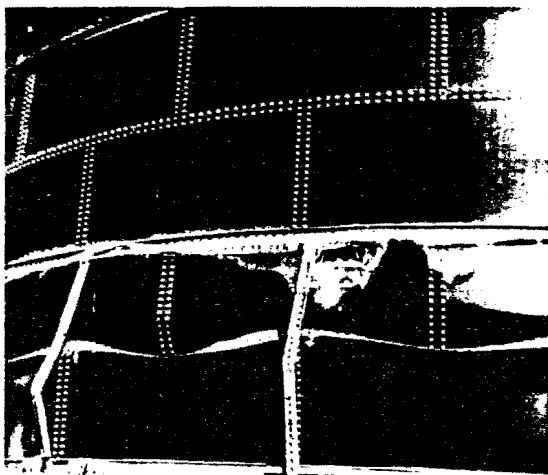


Figura 7.8. Flambagem em silos metálicos cilíndricos.

Jenike (1967) faz um estudo onde determina o raio crítico de um silo metálico de chapa lisa em função da espessura da parede com a suposição da solicitação de descarga excêntrica. O valor encontrado para o raio crítico é:

$$R_{\text{critico}} = (32.4 / (1 - \nu^2)) (\sigma/w) (t/R)^2 \tan(\alpha)$$

Sendo:

R_{critico} = raio crítico do silo.

σ = coeficiente de trabalho do aço na parede do silo.

w = densidade do produto armazenado.

t = espessura da parede do silo.

R = raio do silo.

ν = coeficiente de poisson

ϕ_v = ângulo de atrito do produto armazenado com a parede.

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

Este modelo é supersimplificado, mas serve para ilustrar porque grandes tensões de compressão aparecem perto da base do silo por concentrações locais de pressão (figura 7.9). As tensões axiais são totalmente sensíveis à forma da pressão localizada: se ela é retangular ou na forma de uma saliência circular, induzem à deformações locais para fora da circunferência. Estas deformações pré-flambagem podem reduzir a resistência à flambagem da parede de maneira similar às imperfeições geométricas.

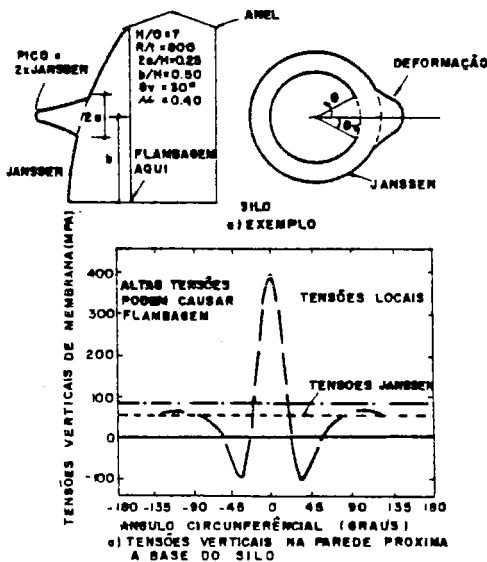


Figura 7.9. Concentrações locais de pressão.

Outra importante característica de silos metálicos deve ser notado. Silos metálicos cilíndricos são frequentemente estruturas baixas com relação altura/diâmetro entre 0.5 e 2.0. Para estas estruturas a relação entre as pressões horizontais e verticais (K), no produto armazenado é de fundamental importância. O uso de $K = 0.4$ para todos os materiais armazenados (Jenike et al, 1973) pode ser justificado para células altas onde K tem pequeno efeito, mas em silos baixos é necessária maior precisão. Além disso, a variação de pressões perto do primeiro contacto do sólido armazenado com a parede, afeta significativamente o cálculo, mas não é bem tratado na maioria das pressões em silos. Também tem sido mostrado (Rotter, 1983) que carregamento excêntrico de silos baixos é muitas vezes o controlador do caso de carga, mas poucos dados experimentais são avaliáveis no resultado das pressões nas paredes (Calil, 1987).

Os modos de ruptura acima mencionados indicam que as recomendações para o cálculo das pressões na parede em silos metálicos devem enfatizar:

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

Quando estes pontos são comparados com os pontos correspondentes relativos aos silos de concreto, fica claro que são necessárias regras completamente diferentes para estes dois tipos de estruturas. Os trabalhos de pesquisa nas últimas duas décadas em pressão nas paredes dos silos tem, infelizmente, dado pouca atenção para a maioria destes pontos.

7.2.2 Silos Quadrados.

Os silos metálicos quadrados (Ravenet, 1978) são normalmente do tipo multicelular (figura 7.10), de tal modo que existe uma

interação entre as células e todo o conjunto incluindo a fundação, devendo ser estudados como um elemento que se vê submetido a cargas locais que produzem deslocamentos elásticos, afetando o resto da estrutura.

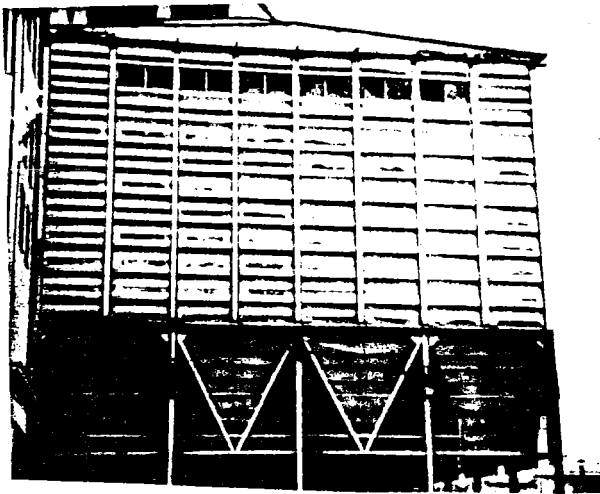


Figura 7.10. Silos metálicos quadrados multicelulares.

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, e 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 produzem deslocamentos infinitesimais que a inércia da estrutura absorverá.

Estas instalações se construíam inicialmente com tubos de descarga estático para evitar sobrepressões de descarga. Na figura 7.11 pode-se ver uma célula avariada em fase de reparação com tubo de descarga estático perfurado e situado junto a parede.



Figura 7.11. Silo com tubo de descarga estático.

A colocação de tirantes interiores para reduzir o vão da parede (figura 7.12), é válida para o armazenamento de produtos granulares, mas pode ser muito perigoso para o armazenamento de produtos pulverulentos coesivos, tal como pode-se ver na figura 7.13.



Figura 7.12. Silos com tirantes internos.



Figura 7.13. Silo com tirantes internos deformados.

Silos construídos com espessuras de parede insuficientes e destinados ao armazenamento de produtos granulares podem apresentar deformações ao longo da parede, figura 7.14. Se são armazenados produtos pulverulentos coesivos, a deformação da parede é pontual e devida à queda 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), figuras 7.15 e 7.16.

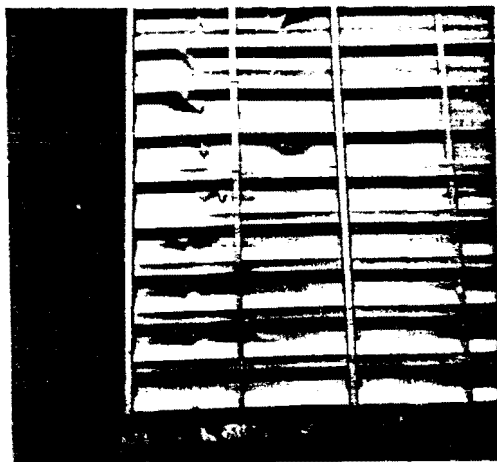


Figura 7.14. Deformações em silos metálicos.



Figura 7.15. Deformações em silos metálicos.

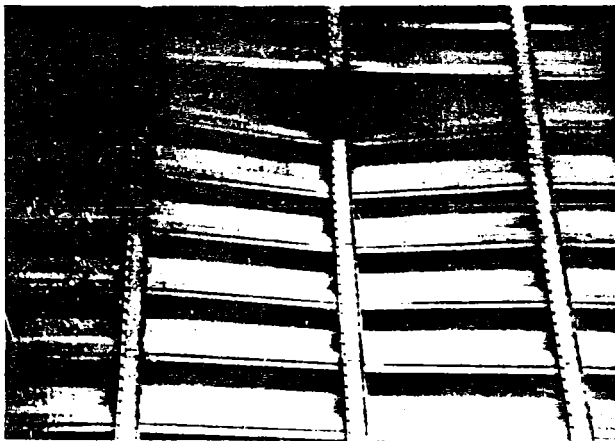


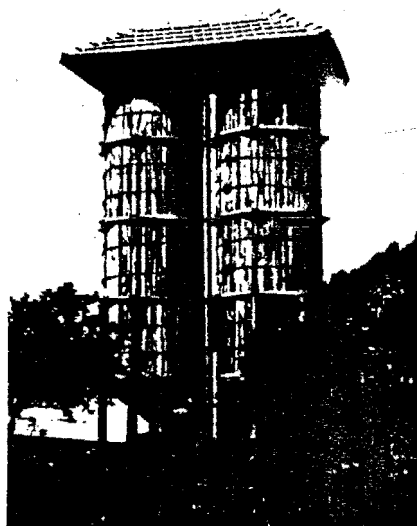
Figura 7.16. Deformações em silos metálicos.

7.3. Silos de Madeira.

Os silos de madeira são geralmente estruturas de armazenamento de pequena capacidade (se comparados com silos de concreto e metálicos), normalmente construídos em fazendas com a finalidade da solução para o armazenamento da produção do pequeno agricultor.

Considerando as atividades docentes e de pesquisa do autor na área de madeiras e de estruturas de madeira, foram até o momento desenvolvidos dois trabalhos a nível de mestrado em silos de madeira (Calil, 1978 e Vaz, 1987).

As soluções estruturais dos trabalhos apresentados foram bastante diferentes entre si, sendo o primeiro (Calil, 1978) de geometria cilíndrica, paredes formadas de tabuas verticais, encaixe macho e fêmea, usadas como elemento de vedação e responsável pela resistência à compressão das cargas de atrito na parede; e anéis de madeira como elementos de resistência à tração e rigidez transversal para os efeitos de vento e ovalizações decorrentes de problemas na excentricidade no fluxo de descarga, figura 7.17.



SILOS DE MADEIRA

Figura 7.17. Silos de madeira maçisa.

O segundo trabalho (Vaz, 1987) foi realizado com chapas de madeira compensada, geometria hexagonal, sendo as paredes calculadas a partir de um esquema estrutural especialmente desenvolvido para silos poligonais, onde, as chapas compensadas, consideradas como material plano e ortotrópico, ficaram submetidas simultaneamente à esforços de flexão (ação de placa) e de tração (ação de chapa) - figura 7.18.

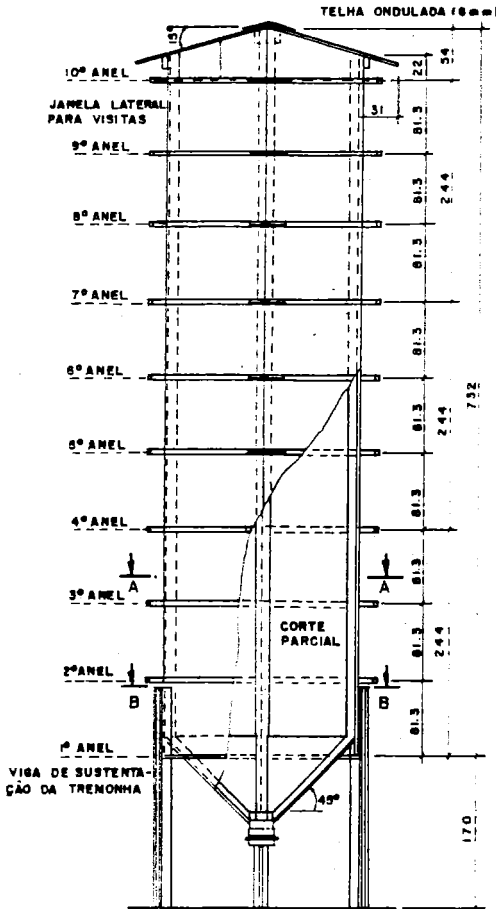


Figura 7.18. Silos de madeira compensada.

Ambos os silos estudados foram do tipo vertical elevado e com tremonhas de descarga.

7.4. Conclusões.

Pelo exposto é muito importante definir inicialmente o tipo de instalação, cilíndrica ou quadrada, metálica ou de concreto, já que desta escolha depende o cálculo a realizar levando em conta os momentos fletores, efeitos de ovalização, flambagem, etc...

é muito importante definir também a relação altura-lado do silo e as características mais gerais do produto a armazenar para poder estabelecer hipóteses de cálculo corretas que permitam executar uma construção segura e econômica de acordo com as recomendações existentes.

8. RECOMENDAÇÕES PARA O PROJETO DE FLUXO E DAS CARGAS EM SILOS VERTICAIS.

Da análise teórica e experimental realizada, pode-se notar que as cargas em silos devidas ao produto armazenado são variáveis espacialmente e temporariamente e, portanto, não podem ser calculadas com certeza absoluta. Todas as teorias existentes em silos falham nesta consideração, pois todos os parâmetros relevantes e mesmo aqueles que podem ser considerados com certeza absoluta são sujeitos à variações.

Ensaio em silos reais mostram que as cargas de armazenamento podem ser distribuídas assimetricamente e que as cargas de fluxo são sujeitas a grandes flutuações. Nenhum desses fenômenos tem sido adequadamente considerado nas teorias de cargas em silos.

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

Como pode ser observado do estudo realizado, a prática de alguns códigos é recente, pois a maioria deles é de publicação recente e de primeira edição (BMHB-1985, AUSTRÁLIA-1986, FIP/ISO-em execução). Existem também, na maioria deles, muitas restrições em seu uso, como por exemplo serem válidos somente para silos de concreto (ACI e SNBATI), somente para silos altos (DIN 1055 e SNBATI), somente para materiais sem coesão, etc...

A proposta para o projeto de fluxo e das cargas em silos verticais é baseada nas normas internacionais, tentando aproveitar o melhor de cada norma, resguardando as experiências práticas na utilização das mesmas dentro das responsabilidades de cada item do projeto. Para tal, são propostas as seguintes recomendações:

8.1. Análise das Características do Material a ser Armazenado.

A primeira decisão a tomar é se o material é obviamente de fluxo livre ou não. Um sólido particular deve ser designado como de fluxo livre e em uso prévio em armazenamento em silo e descarga por gravidade (sem aditivos de descarga) se nunca mostrou quaisquer problemas de fluxo ou se não mais que 3% do peso das partículas tem um diâmetro menor que 250 μm . Observe-se, entretanto, que umidade ou outros líquidos acima de um certo limite, incluindo condensação de umidade, mudanças na superfície devidas à mudanças de temperatura, química, biológica ou cristalográfica (ver capítulo 2), ou paradas do movimento das partículas ou impacto, podem causar coesão em um sólido normal de fluxo livre.

8.2. Tipo de Fluxo.

A segunda decisão é se é desejado fluxo de massa ou fluxo de funil. Vantagens e desvantagens dos dois tipos de fluxo são encontradas no capítulo 3. É importante tomar uma decisão clara, já que o fluxo na região de contorno entre massa e funil é muitas vezes instável e deve ser evitado. Além disso, as pressões para fluxo de massa e de funil são diferentes.

8.3. Determinação das Propriedades dos Materiais Armazenados.

Para um material de fluxo livre, é somente necessário obter o ângulo de atrito com a parede, ou, para alguns materiais, dentro de uma limitada variação de umidade e outras propriedades e, somente aproximadamente, de tabelas fornecidas pelas normas, ou, o que é preferível em todos os casos, de testes no material em estudo. Para materiais que não são de fluxo livre, os aparelhos de cisalhamento são usualmente necessários como descritos no capítulo 2; observe-se particularmente a importância de tomar amostras representativas do material. Se já são disponíveis resultados de ensaios para materiais com mesmas características, então estes 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 tanto o fator do tempo de armazenamento como qualquer outra conhecida mudança no armazenamento devem sempre ser especificados.

8.4. Determinação da Forma da Tremonha.

O fluxo de massa requer sempre uma tremonha. O ângulo de inclinação das paredes da tremonha deve ser determinado como descrito no capítulo 3. Para fluxo de funil não é necessário uma tremonha para materiais de fluxo livre, embora a mesma seja necessária para completa descarga por gravidade. Silos de fundo plano podem ser esvaziados por meio de elementos mecânicos de descarga como, por exemplo, roscas sem fim. Se o silo já existe ou está fora do projeto padrão, então ocorre que a inclinação da tremonha e sua superfície fornecem um tipo de fluxo que não é nem de massa e nem de funil. Nestes casos, para evitar comportamentos instáveis de fluxo, será necessário:

- a) fazer as paredes da tremonha mais rugosas; ou
- b) fazê-las mais lisas; ou
- c) usar vibração ou outros métodos que têm o efeito de reduzir o atrito da parede da tremonha.

8.5. Dimensão da Abertura de Descarga do Fundo.

Para materiais de fluxo livre, a dimensão da boca de descarga é determinada pela razão de descarga desejada ou pelas considerações de interface com o equipamento de descarga, evitando também o entramento das partículas. Para fluxo de massa e fluxo de funil, com materiais que não são de fluxo livre, a dimensão mínima da abertura de descarga para fluxo estável é determinada com descrita no capítulo 3. Se, em último caso, a abertura de descarga necessária é muito grande, isto é, produzindo uma vazão muito grande ou não conectando satisfatoriamente com os equipamentos de descarga, e o espaço adicional é disponível, então o fluxo expandido deve ser considerado.

8.6. Aditivos de Descarga.

Se a dimensão da abertura de descarga necessária para garantir fluxo de massa ou fluxo de funil for muito grande para conectar com equipamentos de descarga ou der vazão muito grande de descarga, então uma pequena abertura com aditivos de descarga deve ser considerada. Estes podem também ser utilizados para promover o fluxo

em silos existentes ou silos padrão, onde de outro modo ter-se-iam problemas de fluxo. Entretanto, seu possível efeito nas pressões na parede deve ser sempre levado em consideração.

8.7. Controle da vazão.

Se é desejada a descarga livre, as vazões de fluxo podem ser obtidas do capítulo 3. Para outros materiais que não são de fluxo livre, restrições na vazão de descarga abaixo daquelas obtidas com a mínima abertura de descarga, como indicadas acima, não são possíveis sem criar problemas de fluxo, a menos que seja utilizado um aditivo de descarga. Se são usados equipamentos de descarga, é importante assegurar que eles não criem problemas no fluxo. Atenção especial deve também ser dada a quaisquer características do efeito "inundação" do material (ver capítulo 3).

8.8. 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 note a importância de evitar as regiões de contorno) e escolher o valor máximo em cada caso.

Para o cálculo das pressões em silos baixos, sugere-se a adoção da norma australiana, pois a norma alemã não é válida para silos baixos, e a norma australiana é a que tem a maior experiência e um grupo de pesquisa específico em silos baixos (normalmente silos metálicos de relação altura/lado ou diâmetro < 1.0).

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 deverão ser consideradas. Se houver qualquer perigo de explosão e o silo tiver janelas de saída de ar para explosão, então esta pressão do ar considerada deve ser adicionada nas pressões das paredes a ser calculadas.

8.9. 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.

8.10. Segurança.

É essencial que todo o capítulo 6 seja lido cuidadosamente e que o usuário forneça, e o projetista tenha certeza do obtido, de todas as informações sobre os perigos em toxidez, explosão, etc..., dos materiais a serem armazenados.

8.11. Manual de Projeto e Operação.

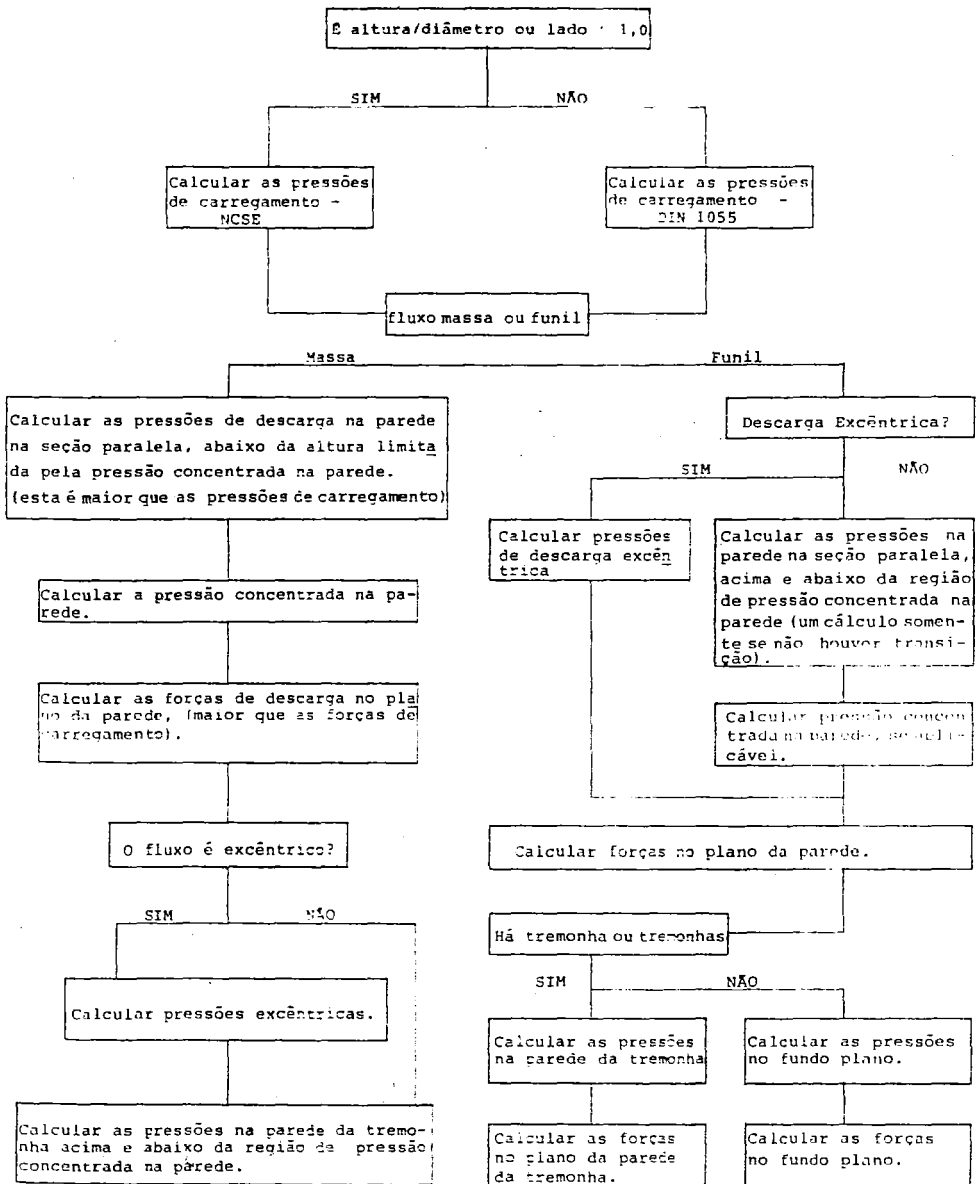
É importante que o Manual de Projeto e Operação (MPO) seja fornecido para o usuário (ver capítulo 6). O silo é um perigo em potencial e muitas vezes uma parte vital do esquema de processamento (no sentido que quando o fluxo para o processamento pode parar) e deve ser operado com cuidado e atenção, com os limites de projeto não sendo excedidos sem uma reavaliação do mesmo.

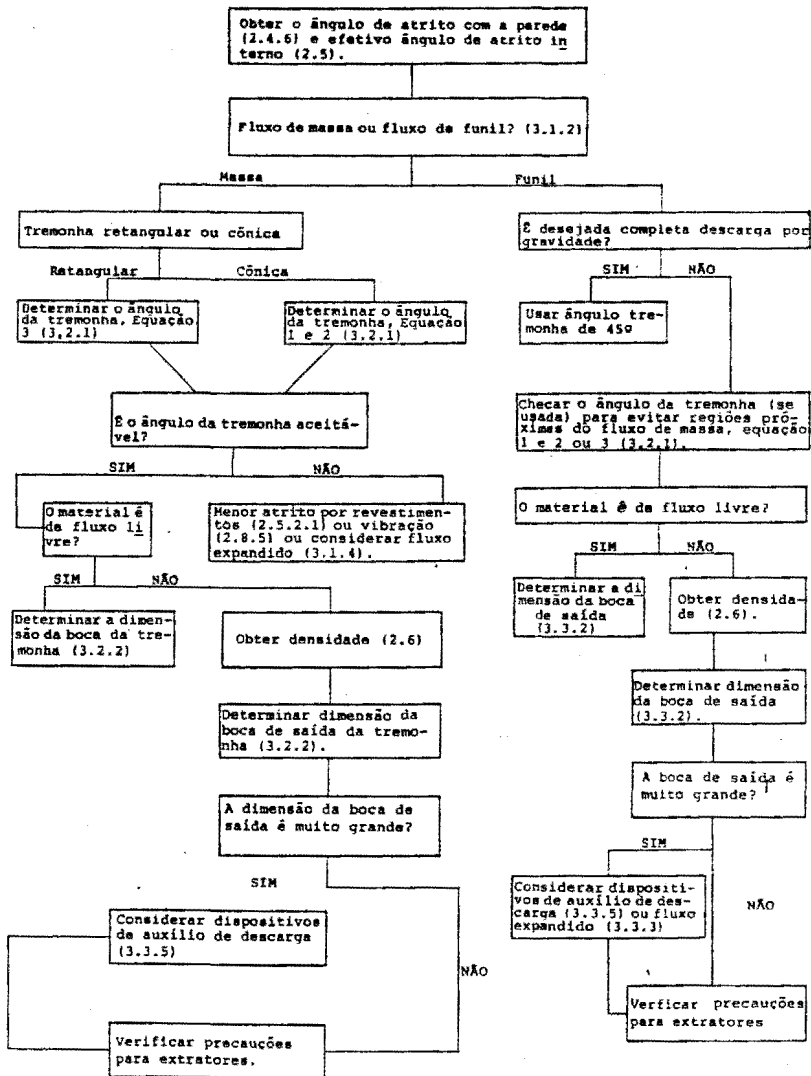
8.12. Requisitos Especiais.

Estes requisitos devem ser considerados em um estágio anterior, incluindo limites na segregação, formação de arcos e outros fatores mencionados no capítulo 2.

8.13. Projetos Usando Computador.

Para o procedimento do uso de computadores para o projeto de fluxo e das cargas em silos são apresentados os diagramas 8.13.1. e 8.13.2.





9. PERSPECTIVAS PARA AS NOVAS PESQUISAS.

Para um avanço tecnocientífico na área de silos, as novas pesquisas devem enfatizar os seguintes aspectos:

- A base fundamental das regras das especificações precisa ser de observações experimentais. As teorias existentes de pressões em silos têm sido conduzidas a adotar hipóteses que desviam a atenção dos aspectos vitais das cargas em silos.
- Os ensaios que formam a base precisam ser cuidadosamente conduzidos com células de pressões rígidas, pouco espaçadas e continuamente monitoradas. Um programa compreensivo de testes de controle de material precisa acompanhar cada teste para explorar tanto as medidas tradicionais das propriedades como itens adicionais como o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, e o efeito da orientação das partículas nas propriedades. É importante evitar formas imperfeitas do silo experimental e observar o tipo de fluxo do sólido armazenado.
- Observações experimentais específicas são também necessárias : da mínima pressão normal no cilindro, da máxima força vertical desenvolvida na parede durante o fluxo e da mínima pressão atuando na transição em fluxo de massa durante o fluxo.
- As observações experimentais devem ser sujeitas a tratamentos estatísticos, determinando a probabilidade de ocorrência de qualquer pressão, e estabelecendo a forma e grandeza de pontos locais de elevada pressão. Os gradientes de pressão devem ser reconhecidos como altamente significativos.
- As regras de normalização devem ter um fundamento estatístico próprio comparável com aquelas correntemente encontradas para a maioria de outras definições de carregamento de estruturas. As cargas normalizadas não precisam ter a mesma forma das cargas medidas, mas precisam produzir um efeito comparável na estrutura, seguindo a análise estrutural.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1977a). Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-77). Revised 1983.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1977b). Recommended Practice for Design and Construction of Concrete Bins, Silos and Bunkers for Storing Granular Materials (ACI 313-77). Revised 1983.
- ARNOLD, P.C., McLEAN, A.G. and ROBERTS, A.W. (1978). Bulk Solids: Storage, Flow and Handling. TUNRA.
- ASKEGAARD, V., BERGHOLDT, M. and NIELSEN, J. (1971). Problems in Connection with Pressure Cell Measurements in Silos (in English). Bygningstatiske Meddelelser, Vol. 42, N° 2, pp 33-74.
- BMHB (1985). British Materials Handling Board. Draft Code of Practice for the Design of Silos, Bins, Bunkers and Hoppers. Inglaterra. 101p.
- CALIL, C.J.(1978). Silos de Madeira. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos - USP. Orientador: Prof. João Cesar Hellmeister. São Carlos, SP. 106 p.
- CALIL, C.J.(1982). Sobrepresiones en las Paredes de los Silos para Almacenamiento de Productos Pulverulentos Cohesivos. Tese de Doutoramento. Escola Técnica Superior de Engenheiros Industriais de Barcelona. Universidade Politècnica de Barcelona. Orientador: Prof. Juan Ravenet. Barcelona, Espanha. 318 p.
- CALIL, C.J.(1983). Physical Properties Determination of Granular and Powder Materials. Proc., 2nd International Conference on Design of Silos for Strength and Flow. Stratford-Upon-Avon, Inglaterra. 11p.
- CALIL, C.J.(1985). Cargas para o Dimensionamento de Silos. Proc., XXIII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural. Colloquia 85. Buenos Aires. Argentina. 10p.

CALIL, C.J.(1987). Estudo Teórico e Experimental das Pressões em Silos Verticais Cilíndricos de Pequena Relação Altura/Diâmetro. Proc., Colloquia 87. Porto Alegre, RS -Vol 3 - p 229 a 243.

CALIL, C.J.(1988). Experimental Study of Impact Loads in Silos with Funnel Flow. Proc., Silos - Forschung und Praxis - Tagung 88. Karlsruhe, Alemanha. p 179 - 189.

CALIL, C.J.(1989). Recomendações de Cargas para o Dimensionamento de Silos. Relatório de pesquisa de pós-doutorado. São Carlos, SP. 106 p.

CFBC (1983). Canadian Farm Building Code. Associate Committee on the National Building Code. National Research Council of Canada. Ottawa. 25 p.

DEUTSCH, G.P. and CLYDE, D.H. (1967). Flow and Pressure of Granular Materials in Silos. J. of Engg Mech. Divn, ASCE, V. 93, EMB, Dec. pp 103-25.

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

ELLINGWOOD, B., GALAMBOS, T.V., MacGREGOR, J.G., and CORNELL, C.A. Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58. US National Bureau of Standard Special Publication 577.

ENSTAD, G.(1975). On the Theory of Arching in Mass Flow Hoppers. Chem. Eng. Science. p 1273 a 1283.

FIP/ISO (1988). Recommendation for Concrete Silo Design. Federación Internationale de la Precontrainte. Norma Europeia. Em execução.

HARTLEN, J., NIELSEN, J., LJUNGGREN, L., MARTENSSON, G. and WIGRAM, S. (1984). The Wall Pressure in Large Grain Silos. Swedish Council for Building Research, Report 32, Stockholm.

HAUSSLER, U. and EIBL, J. (1984). Numerical Investigations on Discharging Silos. Jnl of Enng Mech, ASCE, Vol. 110, EM6, June, pp 957-71.

JANSSEN, H.A. (1895). Versuche uber Getreidedruck in Silozellen. Zeischrift des vereines Deutscher Ingenieure, V. 29, 35, pp 1045-9.

JENIKE, A.W.(1964). Storage and Flow of Solids. Bulletin 123. Utah Engineering Experiment Station. University of Utah. Salt Lake City. Utah. Estados Unidos. 197 p.

JENIKE, A.W (1967). Denting of Circular Bins with Eccentric Drawpoints. J. of the Struct. Div., ASCE, V.93, ST1, Feb., pp 647-55.

JENIKE, A.W., and JOHANSON, J.R. (1968). Bin Loads. Journal. of the Structural Division, ASCE, V. 95, N°.ST4, April.

JENIKE, A.W., JOHANSON, J.R. and CARSON, J.W. (1973). Bin Loads in 3 parts. Jnl of Enng for Industry, ASCE, V. 95, 1, pp 1-5, 6-12, 13-20, Feb.

JENIKE, A.W.(1980). Effect of Solids Flow Properties and Hopper Configuration on Silo Loads. American Society of Mechanical Engineers. San Francisco. Estados Unidos.

LEICESTER, R.H., PHAM, L., and KLEEMAN, P.W. (1983). Conversion to Limit States Design Codes. Proc., Metal Structures Conference, Brisbane, May.

MITCHELL, G.C., (1981). Full Scale Load Tests on Grain Silo. MPW Technical Quarterly N°.1, MacDonal Wagner and Priddle Pty Ltd, July.

MUNCHEN-ANDERSEN, J. (1986), The Boundary Layer in Rough Silos. Proc., Second Int. Conf. Bulk Matls Stor., Handl. Transpnt, I.E. Aust., Wollongong.

NCSE (1987). Guidelines for the Assessment of Loads on Bulk Solids Containers. National Committee on Structural Engineering. The Institution of Engineers Australia. Australia. 59p.

NIELSEN, J. and KRISTIANSEN, N.O. (1979). Pressure Measurements on a Silo in Karpalund (in Danish). Nordic Group of Silo Research, Rep. N° 5, Tech. Univ. Demark, Dept. Struct. Engg.

NIELSEN, J., and KRISTIANSEN, N.O. (1980). Related Measurements of Pressure Conditions in Full-scale Barley Silo and in Model Silo. Proc., International Conference on Design of Silos for Strength and Flow, University of Lancaster, September.

PHAM, L. (1985). Variability of Bin Loads due to Bulk Solids for Structural Design, Civil Eng. Trans. I.E. Aust., V. CE27, N°. 1, Feb.

PHAM, L. (1986). Reliability of mass Flow Prediction. Proc., Second Internat. Conf. Bulk Matls Stor. Handl. Transpnt, Wollongong, NSW.

PHAM, L., NIELSEN, J. and MUNCH-ANDERSEN, J. (1986). Statistical Characteristics of Silo Pressure Measurements. Proc., Second Internat. Conf. Bulk Matls. Stor. Handl. and Transpnt, Wollongong.

PIEPER, K., MITTMANN, G., WENZEL, F. (1964). Messungen des horizontalen Getreidedruckes in einer 65 m hohen Silozelle. Beton und Stahlbetonbau, Heft 11, November.

PUGSLEY, Sir A. (1966). The Safety of Structures, Arnold, London.

RAVENET, J. (1977). Silos: Teoria, Investigacion, Construcción. Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona. Espanha. 381 p.

RAVENET, J. (1978). Silos: Deformaciones, Fallas, Explosiones, Prevencion de Accidentes. Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona. Espanha. 364p.

RAVENET, J. (1983). Silos: Flujo de Vaciado de Sólidos, Formación de Bóvedas, Efectos. Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona. Espanha. 353 p.

- REIMBERT, M.L. and REIMBERT, A.M. (1976). Silos: Theory and Practice, Trans tech Publications.
- ROBERTS, A.W. (1987). Storage, Flow and Handling of Bulk Solids. Department of Mechanical Engineering. The University of Newcastle, N.S.W., Australia.
- ROTTER, J.M. (1983). Structural Effects of Eccentric Loading Shallow Bins, Proc., 2nd Internat. Conf. on Design of Silos for Strength and Flow, Stratford-upon-Avon, pp 446-63.
- ROTTER, J.M. (1985), (ed.) Design of Steel Bins for the Storage of Bulk Solids, School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney.
- SAFARIAN, S.S. (1985). Design and Construction of Silos and Bunkers. Van Nostrand Reinhold, New York.
- SCHOFIELD, C. (1984). Guide to Dust Explosion Prevention and Protection. Part 1, Venting. Institution of Chemical Engineers.
- SNBATI (1975). Reglas para Proyecto y Calculo de Silos de Hormigón. Sindicato Nacional del Hormigon Armado y Técnicas Industrializadas. França. 47 p.
- STOFFERS, H. (1983). Pressure Measurements in a Silo for the Storage of Soya Meal. Proc., Second Internat. Conf. Design of Silos for Strength and Flow, Stratford-upon-Avon, pp 192-206.
- THE BEST OF BULK SOLIDS HANDLING - 1981 - 1985 (1986). Silos, Hoppers, Bins and Bunkers for Storing Bulk Solids Materials. Trans. Tech. Publications. Vol. A/86 - 461 p.
- TURITZIN, A.M. (1963). Dynamic Pressure of Granular Material in Deep Bins. Journal of the Structural Division, ASCE, V. 80, N°.ST2, April.
- VAZ, J. (1987). Silos Verticais de Madeira Compensada. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. Orientador: Prof. Carlito Calil Junior. São Carlos, SP. 346 p.

WALKER, D.M. (1966). An Approximate Theory for Pressures and Arching in Hoppers. Chem. Engg. Sci., V. 21, pp 975-997.

WALTERS, J.K.(1973). A Theoretical Analysis of Stresses in Silos with Vertical Walls. Chem Engg Sci., V. 28, pp 13-21.

WALTERS, J.K.(1973). A Theoretical Analysis of Stresses in Axially Symmetric Hopper and Bunkers. Chemical Engineering Science, V. 28, 13p.

WOOD, J.G.M.(1983). The Analysis of Silo Structures Subject to Eccentric Discharge. Proc., 2nd Internat. Conf. on Design of Silos for Strength and Flow, Stratford-upon-Avon, pp 132-144.