

Cultivar Máquinas

Setembro 06 - Ano VI Nº 56 - ISSN 1676-0158

COLHEDORAS**Maior eficiência
na colheita**

Direto e preciso

Conheça as características e a evolução das semeadoras-adubadoras disponíveis no mercado para a aplicação em plantio direto

**ARMAZENAGEM**

Confiabilidade em
silos verticais

**PASSO-A-PASSO**

Como regular
a embreagem

Confiabilidade estrutural

Em silos verticais a possibilidade de falha está diretamente ligada à variabilidade dos produtos ensilados. Desse modo, a escolha da estrutura de armazenagem deve considerar sempre uma probabilidade de ruína compatível com a aplicação e o número de operações esperadas durante a vida útil

Os silos verticais são de grande importância mundial para o armazenamento de produtos agrícolas e industriais. São estruturas que apresentam um alto índice de ruínas principalmente devido ao desconhecimento das ações que o solicitam. As principais ações que atuam sobre o silo são causadas pelo produto armazenado, sendo afetadas por operações como: carregamento (enchimento), armazenamento (estocagem) e descarga (esvaziamento), que ocorrem ao longo de toda a vida útil da estrutura. No que diz respeito à segurança das estruturas, a variabilidade das ações e da resistência são fatores determinantes para projetos estruturais seguros e econômicos.

Uma constatação evidente é o desco-

nhecimento do índice de segurança dessas estruturas, pois a variabilidade das pressões é desconhecida para os diversos produtos armazenados e condições de operações utilizadas na armazenagem brasileira.

TAXA DE FALHAS

Embora cada projeto tenha suas peculiaridades, existem certas fases que são comuns a todos eles, como:

- Vida útil esperada;
- Ações;
- Exigências de desempenho.

Em todas as estruturas projetadas é esperada uma vida útil dentro da finalidade e das condições nas quais foram empregadas. A curva *bahtub*, mostrada na Figura 1, é usada para descrever a taxa de falhas para muitos componentes da engenharia. Essa curva é resultado de três tipos de falhas: (1) qualidade, (2) sobrecargas e (3) desgaste.

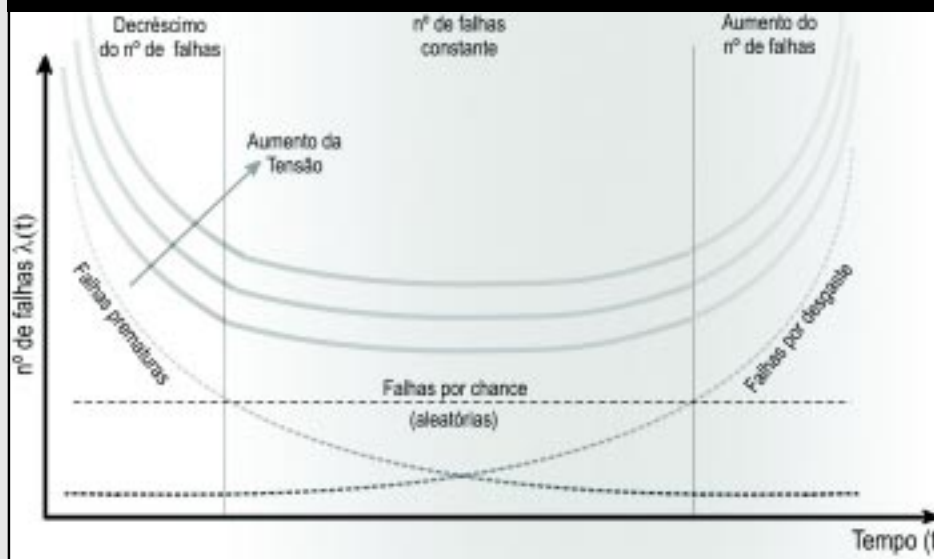
No período

inicial têm-se as chamadas falhas prematuras, onde o sistema estrutural apresenta um elevado número de falhas devido aos erros geralmente de execução. Essas falhas são decorrentes de componentes de componentes que foram colocados em operação, mas que estão fora das especificações. Assim, essa região tem como ponto central a qualidade do produto, ou seja, a gestão da qualidade é que atua sobre a intensidade da taxa de falhas.

No período intermediário a taxa de

“Em princípio, a probabilidade de falhas deve ser considerada para todos os riscos possíveis, incluindo a presença de cargas externas, baixa qualidade dos materiais e também de erros grosseiros”

Figura 1 – Curva típica da taxa de falhas em função do tempo ("Bathtub")



falhas tem um comportamento que é praticamente constante, assumindo um valor mínimo. Nesse período as falhas ocorrem de uma maneira totalmente aleatória (falhas por chance), como consequência de sobrecargas eventuais que o sistema sofre. O valor da taxa de falhas depende aqui da distância relativa entre os níveis de solicitação e de resistência do sistema. Isso está relacionado com o grau de segurança admitido no projeto do sistema. Essa região corresponde ao período de vida útil da es-

trutura, onde a taxa de falhas é denominada de taxa média de falhas, T_m .

Já, para o período final, as falhas são observadas por problemas de manutenção e degradação da estrutura, devido aos fatores climáticos e à mudança de utilização, entre outros.

CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Um dos principais objetivos do projeto de engenharia é a garantia de desempenho do sistema e de bom funcionamento com estão implícitos os riscos e as incertezas, conduzindo a um problema com caráter probabilístico e não apenas determinístico.

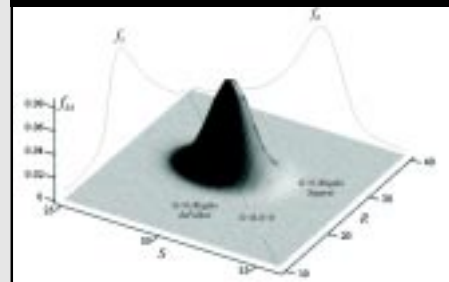
Em princípio, a probabilidade de falha deve ser considerada para todos os riscos possíveis, incluindo a presença de cargas externas, baixa qualidade dos materiais e também de erros grosseiros.

Os carregamentos em silos, devido aos produtos armazenados, são afetados pela natureza aleatória das variáveis envolvidas e têm sido estudados com bastante frequência na literatura internacional. Uma característica importante na análise de confiabilidade é o tratamento das ações e das resistências como distribuições de probabilidades.

Esse conceito está sendo utilizado nas novas normas de ações e de dimensionamento e conduz a níveis satisfatórios de segurança. É importante lembrar que as pressões variam no espaço e no tempo e que os silos são uma das estruturas que apresentam o maior número de ruínas no mundo.

A BS 4778:1991 define que a confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar satisfatoriamente a função requerida, sob condições de operação estabele-

Figura 2 – Região para a determinação da probabilidade de falha



cidas, por um período de tempo determinado.

Para problemas onde o tempo é invariável no processo, isto é, se $R(t) = R$ e $S(t) = S$, e ambas R e S são variáveis aleatórias, o problema da estimativa da segurança é reduzida à clássica teoria da confiabilidade estrutural.

A probabilidade de falha pode ser expressa (Figura 2) como a convolução dada pela expressão para o caso da comparação R (resistência) e S (solicitação), quando estas são consideradas variáveis aleatórias independentes e invariáveis com o tempo.

$$Pf = P(R - S \leq 0) = \iint_{\Omega} f_{RS}(r,s) dr ds$$

Onde:

f_{RS} é a distribuição densidade conjunta bivariada de R e S . Entretanto, se as variáveis são independentes, $f_{RS} = f_R \cdot f_S$.

A confiabilidade também pode ser expressa através do índice de confiabilidade β , obtido para cada conjunto de distribuição, e é relacionada com a probabilidade de falha Pf .

A identificação das incertezas no processo é um importante fator para a determinação da confiabilidade estrutural. A identificação das incertezas em sistemas complexos não é uma tarefa fácil.

RISCOS PRESENTES

Os riscos estão presentes em todas as atividades da vida humana. Assim, para a adoção de índices de segurança compati-

RISCOS POSSÍVEIS

Nos silos em geral, esses riscos estão geralmente associados a diversos fatores, como:

- Propriedades intrínsecas do produto armazenado;
- Geometria;
- Operações (com o produto);
- Causas naturais (vento, terremotos etc.).

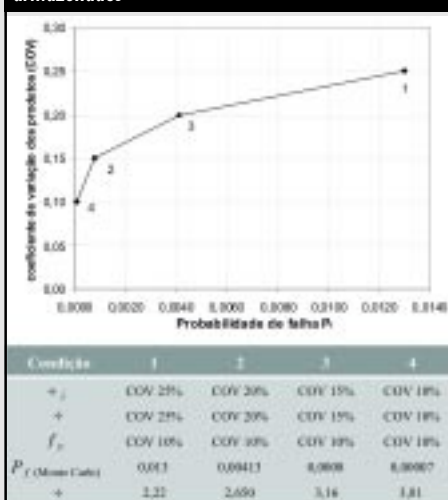
Tabela 1 – Taxa de mortes em várias atividades da sociedade, (MACGREGOR, 1976)

Atividade	Taxa de morte de pessoas por ano	
	Participantes	Toda população
Corrida de motocicletas	5.10^{-5}	
Escolada em montanha	5.10^{-5}	
Mineração	7.10^{-5}	
Natação	1.10^{-5}	2.10^{-5}
Viagem automobilística		$3.9.10^{-5}$
Viagem aérea	1.10^{-5}	
Fogo em edificações		2.10^{-5}
Envenenamento		$1.1.10^{-5}$
Raio		5.10^{-5}
Vacinação e inoculações		1.10^{-5}
Colapsos estruturais		
Durante a construção	3.10^{-5}	
Todas outras		2.10^{-5}

Tabela 2 – Índices de confiabilidade (β) recomendados pela Eurocode 1 PrEN 1990:2001, segundo as classes de risco

Classes de risco	Valor mínimo de β	
	Carregamento característico sobre uma faixa	Período de referência de 1 ano
Classe 1	$\beta = 4,2$	$\beta = 4,2$
Classe 2	$\beta = 3,8$	$\beta = 3,8$
Classe 3	$\beta = 3,4$	$\beta = 3,4$

Figura 3 – Probabilidade de falha em função da variabilidade da propriedade dos produtos armazenados



veis com os riscos inerentes da estrutura, recorre-se a uma análise comparativa de diversas áreas da sociedade, conforme apresentado na Tabela 1.

Os riscos podem ser classificados pela sua consequência e pelo seu nível de importância, segundo a JCSS (2000):

Classe 1 (pequenas consequências): Risco econômico e de vida são pequenos (estruturas agrícolas, silos de fazendas e mastros);

Classe 2 (consequências moderadas): Risco de vida médio e econômico consideráveis (escritórios, residências, apartamentos e silos industriais);

Classe 3 (grandes consequências): Ris-

co de vida e econômico consideráveis (pontes, teatros, hospitais, edifícios altos).

A Tabela 2 mostra que quanto mais alto é o valor do índice de confiabilidade β menor é a probabilidade de falha da estrutura e seu valor está associado à classe de risco à qual a estrutura estará submetida em projeto.

ESTUDO DE CASO

Para exemplificar e ilustrar a importância da estimativa de confiabilidade no dimensionamento de silos, foram realizadas simulações para um silo exemplo. Essas simulações têm distribuições gaussianas para as ações e resistências, calculando-se somente a confiabilidade devido ao modo de ruptura por tração das chapas laterais corrugadas com a ação das pressões horizontais. Foram adotados, para o mesmo tipo de produto, diferentes parâmetros para mostrar a influência na probabilidade de falha devido à variabilidade nas características do produto.

Foi utilizado um silo baixo de fundo plano de relação $H/D < 1,5$, e adotadas algumas sugestões para o cálculo de pressões horizontais. O dimensionamento foi elaborado segundo as recomendações de combinações para pressões com coeficientes de sobrepressões.

Pode-se visualizar na Figura 3 que a probabilidade de falha diminui à medida que o coeficiente de variação diminui, porém, na forma logarítmica. Neste trabalho o coeficiente de variação foi modificado por intervalos igualmente espaçados para os dois parâmetros - ângulo de atrito interno (ϕ) e peso específico (γ) do produto. Já para a simula-

ção da variabilidade de resistência, o coeficiente de variação da tensão de escoamento do aço foi mantida constante. Esse procedimento foi utilizado para demonstrar a importância no conhecimento da variabilidade nas propriedades físicas dos produtos armazenados.

As simulações mostraram que a probabilidade de ruína está diretamente ligada à variabilidade dos produtos ensilados, como mostrado na Figura 3. Nessas condições fica clara a necessidade de realização de ensaios para a caracterização das propriedades físicas dos produtos armazenados para a estimativa do COV para os principais parâmetros.

É possível visualizar que, para o exemplo estudado, os índices de confiabilidade ficaram abaixo dos recomendados pelo EUROCODE 1 PrEN 1990:2001, conforme mostrado na Tabela 2, que para este caso seria de no mínimo de $\beta = 4,2$ ($P_f = 1,3 \cdot 10^{-6}$), pois a análise foi feita com um período de um ano.

Uma observação importante diz respeito escolha de silos que possuam probabilidade de ruína compatível com sua aplicação, conforme o número de operações esperadas em sua vida útil, como por exemplo: industriais, semi-industriais e agrícolas (fazendas). Assim, a probabilidade de falha pode ser diferenciada conforme a frequência de operações esperadas em sua vida útil de operação. ■

**Andrés B. Cheung e
Carlito Calil Jr,
USP
Giovano Palma,
FAG**

Fabiano Dallmeyer



É importante a escolha de silos que possuam probabilidade de ruína compatível com sua aplicação, conforme o número de operações em sua vida útil