

## **Modelagem Hierárquica em Elementos Finitos de Silos de Concreto para Armazenamento de Soja**

**Bruno Toledo de Vasconcelos<sup>1</sup>, André Candido de Vasconcelos<sup>2</sup>, Kaique Chammas Uzan<sup>3</sup>, Fábio Selleio Prado<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Mauá de Tecnologia / Escola de Engenharia Mauá / Engenharia Civil /  
fabio.prado@maua.br

### **Resumo**

Muitos dos silos existentes no mundo não apresentam condições ideais de operação devido ao insuficiente conhecimento das pressões, do fluxo e do grande número de variáveis que afetam o comportamento dos produtos armazenados. Isso explica, também, a quantidade expressiva de acidentes e colapsos nessas estruturas. Este trabalho tem por finalidade a comparação de esforços obtidos pela utilização de softwares com hierarquias distintas, buscando a validação de um procedimento simplificado somente para a análise da distribuição das pressões que grãos de soja armazenados possam causar nas paredes da estrutura de silos baixos com descarga excêntrica, verificando a aderência dos resultados numéricos obtidos junto à norma europeia EN-1991-4-2006. Para tal, foram realizadas duas análises: na primeira, foi utilizado o software SAP2000 e, na segunda, foram utilizados os softwares Rocky e Ansys, que trabalham em conjunto para a obtenção das tensões atuantes na parede do silo. No primeiro, as pressões foram calculadas manualmente e depois inseridas no programa de forma estática equivalente. No segundo estudo foram fornecidas as características dos grãos e, a interação entre os dois softwares proporcionou diretrizes para as análises dinâmica e estática da estrutura de forma mais refinada. Finalmente, constatou-se a viabilidade para a utilização da norma europeia em conjunto de um software menos sofisticado para o dimensionamento de silos baixos em concreto com descarga excêntrica, analisando a segurança da estrutura, com a ressalva de que a utilização de um programa mais poderoso poderia levar a prever fenômenos não conhecidos e à um dimensionamento menos conservador.

Palavras-chave: Silos; Pressões; Soja; Estrutura; Software.

### **1. Introdução**

O Brasil vem apresentando um aumento contínuo na produção e estoque de grãos. Porém, a partir dos anos 2000, a capacidade estática de armazenamento não conseguiu mais acompanhar o aumento da produção, deixando assim, um déficit de armazenamento no estoque brasileiro.

Em geral, os silos utilizados para armazenagem em fazendas apresentam baixa relação entre a altura e o seu diâmetro ou lado, e fundo plano. Isto se justifica pelo grande aumento da capacidade do silo com o aumento do seu diâmetro e também porque a manipulação de silos baixos é mais fácil e de menor custo (CALIL JÚNIOR, 1987 *apud* FREITAS, 2001).

Por esse motivo, é importante estudar o comportamento estrutural dos silos que possuem baixa relação altura/diâmetro, produzidos em concreto, já que este é um sistema muito utilizado para o armazenamento destes insumos, devido à sua enorme versatilidade, pois pode ser moldado in loco, pré-moldado, armado convencionalmente ou protendido.

Entretanto, a análise estrutural não é simples de ser realizada, pois apresentam diferentes tipos de carregamentos sobre a estrutura (vento, descarregamento e carregamento dos grãos), diversas formas de descarregamento do silo (o que gera combinações de esforços diferentes) e muitos tipos de materiais de armazenamento com as mais variadas propriedades físicas, como: granulometria, peso específico, ângulo de atrito interno, ângulo de atrito efetivo e ângulo de atrito com a parede (FREITAS, 2001), além dos grãos possuírem forma granular ou pulverulenta, fato que altera significativamente os critérios de cálculo.

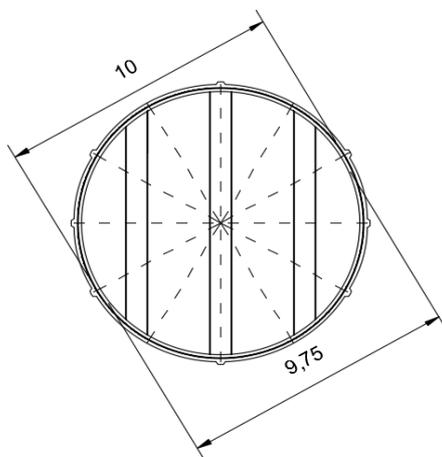
Sendo assim, a análise computacional torna-se necessária para avaliar de diversas formas como os esforços são distribuídos nesse tipo de estrutura.

### ***1.1. Metodologia***

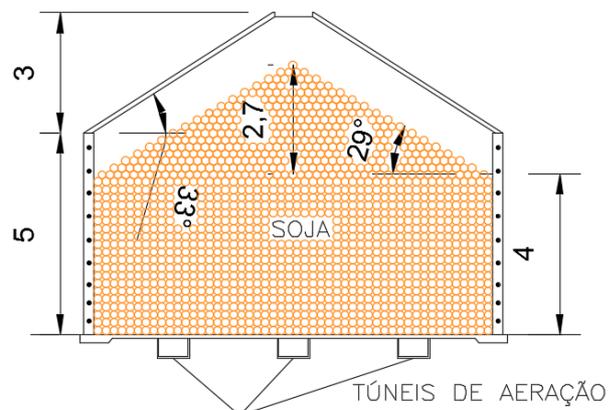
Buscando realizar as comparações desejadas, foi utilizado como base de estudos iniciais o projeto existente de um silo, realizando adaptações neste para adequar as necessidades da análise e limitações computacionais. Essa estrutura foi desenhada separadamente com as ferramentas próprias dos softwares que foram utilizados nas análises. Na análise com o Ansys Mechanical a estrutura foi desenhada com a ferramenta Space Claim do próprio software, sendo necessária para que fosse possível desassociar as partes do silo, buscando atribuir diferentes características no procedimento com o Rocky (programa que simula o movimento dos grãos). Já no SAP2000, o desenho foi produzido com uma ferramenta simples de criação de um cilindro, definindo a malha dentro do próprio programa.

### ***1.2. Caracterização do Estudo de Caso***

Buscando a análise da distribuição das pressões para esse tipo de estrutura, iniciou-se o estudo de caso com um projeto existente de um silo de grandes proporções com diâmetro e altura de parede respectivamente iguais a 90m e 45m. Devido à falta de recursos computacionais para solução de um modelo estrutural desse porte procedeu-se o estudo com um modelo reduzido, mantendo a relação  $h/d_c$ , de acordo com a Figura 1 e os dados a seguir.



**Figura 1 – Corte em planta da seção transversal do silo**



**Figura 2 – Corte esquemático do silo**

### 1.3. Análise - SAP2000

#### 1.3.1. Determinação das pressões na parede vertical do silo

Procedendo com a utilização da norma EN-1991-4-2006 para o cálculo das pressões, é necessário primeiramente classificar o silo estudado dentro das classes de rugosidade e classes de ações, de acordo com as diretrizes da norma europeia.

Conforme informado anteriormente, a estrutura é considerada um silo baixo, por possuir uma relação altura/diâmetro igual a 0,50. Além disso, considerando que o silo será preenchido até uma altura de 4 metros de contato dos grãos com a parede, mais o tronco de cone, calcula-se a capacidade de armazenamento pela equação (1):

$$V_g = \frac{\pi d_c^2 h_{g1}}{4} + \frac{1}{3} \frac{\pi d_c^2 h_{g2}}{4} \quad (1)$$

Assim, sabido o valor da massa específica da soja,  $\rho_n = 1359,2 \text{ kgf/m}^3$  e o volume calculado pela equação (1), obtém-se a capacidade de armazenamento pela equação (2) a seguir:

$$P_g = V_g \rho_n \quad (2)$$

Com os dados informados no caso de estudo, obtém-se uma capacidade de armazenamento de aproximadamente 500 toneladas, enquadrando o silo em uma classe de ações do tipo 2. Além disso, a parede vertical da estrutura é de concreto, se enquadrando em uma classe de rugosidade D3 de acordo com a EN-1991-4-2006.

Assim, por possuir classe de ações do tipo 2, seria permitido uma análise simplificada. Porém buscando analisar as mais diversas possibilidades para o canal de fluxo, realizou-

se o procedimento detalhado, calculando os valores de pressões para 3 valores de  $r_c$  recomendados pela norma europeia.

Portanto, de acordo com a norma europeia EN-1991-4-2006 deve-se proceder os cálculos das pressões para os 3 canais de fluxo estimados anteriormente, e analisar o caso mais crítico para o dimensionamento.

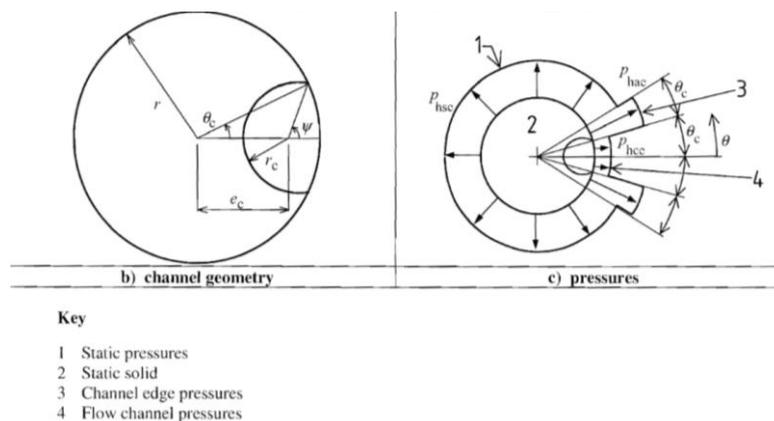
### 1.3.2. Determinação das tensões principais na parede vertical do silo

No programa SAP2000, o silo foi modelado com as dimensões já informadas no estudo de caso. Para a análise, elaborou-se um modelo utilizando elementos finitos de casca, onde optou-se por dividi-la em elementos quadrilaterais de 4 nós (elementos utilizados pelo software SAP2000), com 25 cm de largura e 25 cm de altura, gerando a malha do modelo, de acordo com a Figura 3. Além disso, foram informados ao software a resistência do concreto utilizado ( $f_{ck}=40\text{MPa}$ ) e o seu respectivo módulo de elasticidade ( $E_c=30,1\text{GPa}$ ).

Como uma simplificação das condições de contorno do silo, foi simulado que este está engastado em sua base.

Para o cálculo das pressões, procede-se conforme a Norma Europeia (EN-1991-4-2006), visto que o Brasil ainda não possui uma norma para o cálculo de pressões, além do fato de ser a norma mais conservadora.

Após calculadas as pressões, elas foram adicionadas ao SAP2000, e logo observou-se que o carregamento não é totalmente constante em todo o entorno. Segundo a EN-1991-4-2006, existe um alívio de tensões na seção de saída dos grãos, além de um acréscimo de tensões nas seções adjacentes à saída, conforme a Figura 3, variando também pela altura.



**Figura 3 – Geometria do canal e distribuição de pressões**

### 1.4. Análise - ROCKY/ANSYS

O Rocky e o Ansys trabalham em conjunto, porém, a discretização dessas duas malhas são diferentes. O Rocky trabalha com uma malha de elementos triangulares de 3 nós com 6 graus de liberdade por nó, como opção do tipo SHELL181 (único elemento com o qual o software Rocky trabalha) e a utiliza para exportar as pressões na parede para o Ansys. Já no Ansys, foi utilizada uma malha de elementos finitos de casca quadrilaterais de 4 nós

com 6 graus de liberdade em cada nó, também do tipo SHELL181 (elemento escolhido e utilizado no software Ansys), porém, em ambos os softwares, o tamanho dos elementos foi definido com 0,25 m. A diferença no formato dos elementos pouco influencia nos resultados exportados, pois as forças são calculadas integrando as pressões por passos de tempo nas devidas áreas e depois são divididas pela mesma área, quando exportadas.

#### 1.4.1. Determinação das pressões na parede vertical do silo

Enquanto no modelo do SAP2000 as pressões foram calculadas pela norma EN-1991-4-2006 e inseridas manualmente em cada elemento, neste modelo as pressões são calculadas automaticamente através da simulação das partículas, e por isso, pretende-se obter um valor mais próximo do valor real.

Para avaliar os efeitos de descarregamento, antes é preciso encher o silo até o topo da altura da parede, e para isso foi calculada uma vazão de 110.000 ton/h para um tempo de 10 segundos de enchimento. O silo foi preenchido através da entrada acima da cúpula, de acordo com a Figura 4.



**Figura 4 – Enchimento do silo através da cúpula**

#### 1.4.2. Determinação das tensões principais na parede vertical do silo

Em uma análise inicial, as tensões foram avaliadas a cada 4 segundos de descarregamento. Esta serviu para avaliar em qual tempo ocorre a máxima pressão, para então diminuir o passo de tempo buscando o instante mais próximo que ocorre as tensões máximas.

O modelo do Ansys foi considerado como engastado na sua base, mesmo sabendo que em uma situação real o engastamento perfeito não ocorre, assim poderiam ser calculadas molas de rotação e translação para simular uma ligação semi-rígida com o maciço, porém devido às inúmeras possibilidades de solo e tendo em vista que o objetivo principal nesse estudo não é o dimensionamento, o modelo considerado engastado é suficiente para efeito de comparações.

## 2. Resultados

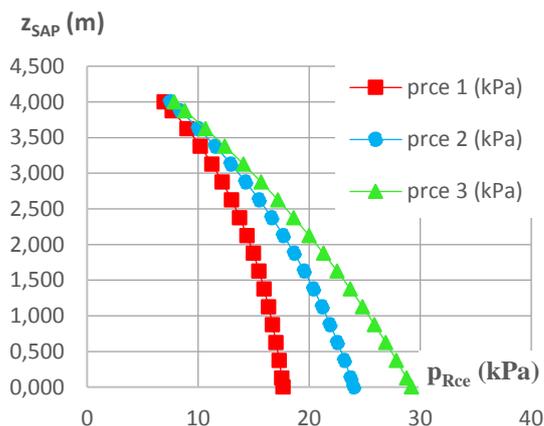
Com elementos retangulares de 0,25m de altura cada, as pressões foram determinadas partindo da coordenada 3,875 m ( $4,00\text{ m} - 0,25/2\text{ m}$ ), que representa o centro geométrico do primeiro elemento a receber pressão visto de cima para baixo, determinando os

respectivos valores caminhando em um passo de 0,25 m até alcançar o centro do elemento mais baixo na parede vertical do silo com  $z_{SAP} = 0,125$  m.

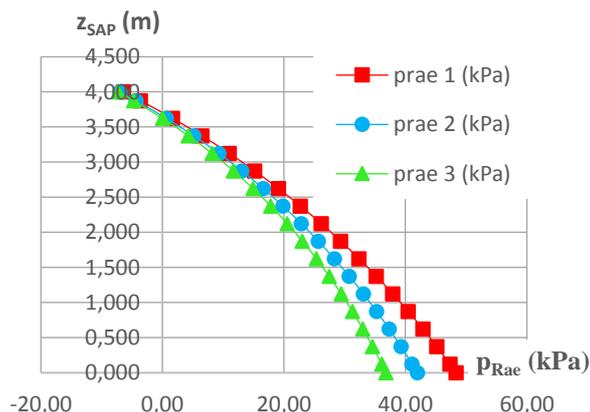
### 2.1 Pressões na Parede Vertical

O Rocky, utilizado na segunda análise para obter os valores das pressões, aqui calculadas através das diretrizes da norma europeia, fornece os valores em módulo das pressões quando estas são exportadas para o Ansys, portanto, para efeito de comparações, foi calculado o módulo entre as pressões horizontais ( $p_h$ ) e tangenciais ( $p_w$ ) para os 3 canais de fluxo.

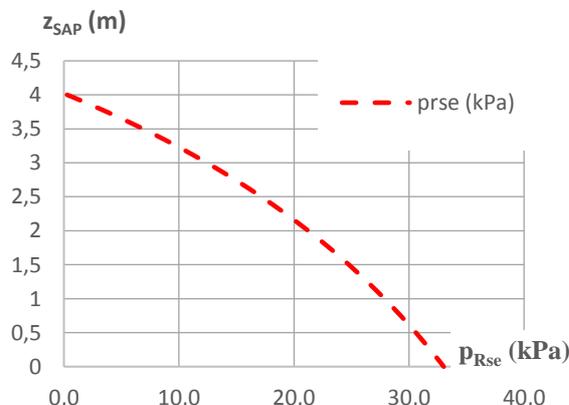
As Figuras 5, 6 e 7 apresentam os valores das pressões comentadas e calculadas para os três canais de fluxo propostos pelas diretrizes de cálculo da norma EN-1991-4-2006, aonde  $p_{rce}$  é relativo às pressões na saída do canal de fluxo,  $p_{rae}$  às pressões nas zonas adjacentes à saída do canal e  $p_{rse}$  indica as pressões que ocorrem distantes da saída do canal de fluxo.



**Figura 5 - Comparação das pressões na saída dos 3 canais de fluxo propostos pela norma EN-1991-4-2006**



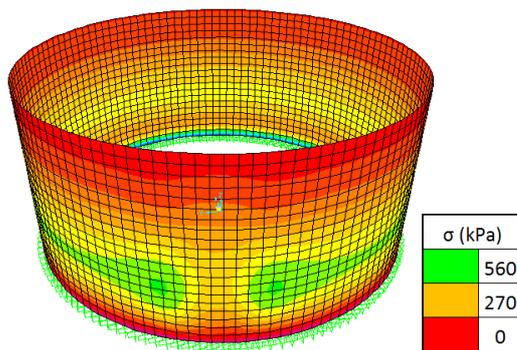
**Figura 6 - Comparação das pressões adjacentes dos 3 canais de fluxo propostos pela norma EN-1991-4-2006**



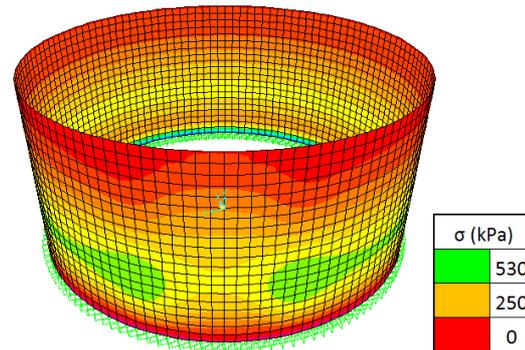
**Figura 7 - Pressões constantes propostas pela norma EN-1991-4-2006**

## 2.2 Tensões Principais na Parede Vertical – SAP2000

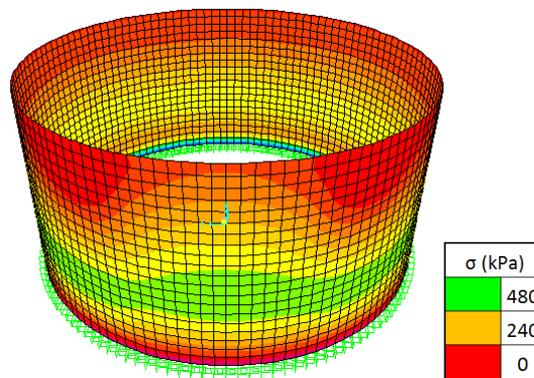
Conforme já citado, foram calculadas as pressões para 3 canais de fluxo diferentes, conforme solicitado pela norma, sendo estas inseridas no modelo elaborado no SAP2000, obtendo assim três distribuições de tensões diferentes na parede da estrutura, inclusive com formas diferentes, de acordo com as Figuras 8 a 10:



**Figura 8 - Tensões máximas principais na saída do fluxo - Caso 1**



**Figura 9 - Tensões máximas principais na saída do fluxo - Caso 2**



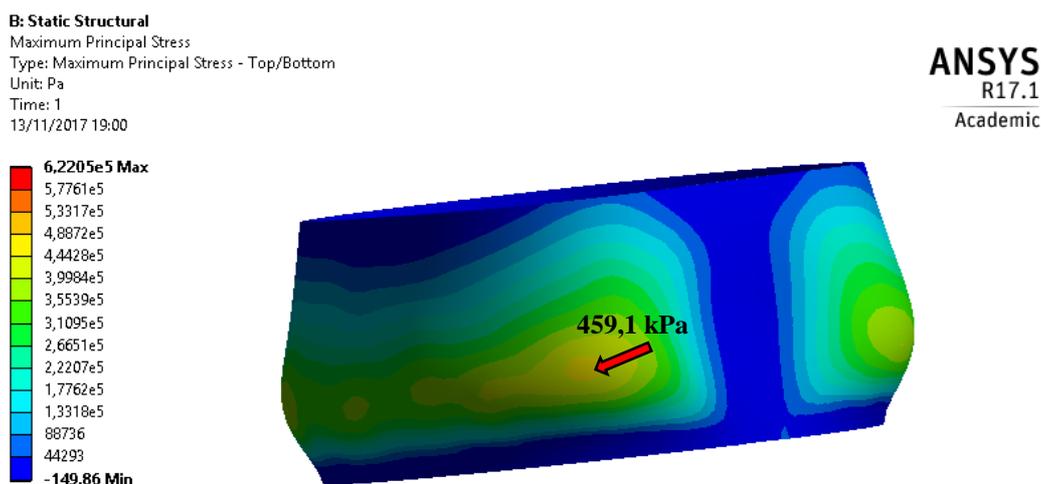
**Figura 10 - Tensões máximas principais na saída do fluxo - Caso 3**

## 2.3 Tensões Principais na Parede Vertical – ROCKY/ANSYS

Na análise com o Rocky/Ansys as pressões e tensões podem ser avaliadas para cada passo de tempo. Sendo assim, fica difícil obter os valores ideais para a comparação com os resultados obtidos pela norma EN-1991-4-2006. Portanto, para obter tais valores realizou-se o estudo primeiramente com as tensões, obtendo os resultados máximos para espaços de tempo variando a cada 4 segundos. Com isso, pode-se identificar que a máxima tensão principal ocorre em um tempo próximo de 18 segundos.

A partir disso, é interessante avaliar as tensões em passos de tempo menores para se obter uma análise mais refinada próximo ao instante 18 segundos. Assim, adotou-se um passo

de tempo de 1 segundo, avaliando os resultados até a obtenção do pico de tensão que deve estar próximo do instante 18s. Com isso, notou-se que o instante de 17s (7 segundos de descarregamento) foi o tempo onde se obteve a máxima tensão principal na estrutura. Após este instante, as tensões passam a diminuir. A Figura 11 mostra como as tensões obtidas seguem o padrão de distribuição de pressões ao longo da parede propostas pela norma europeia EN-1991-4-2006.

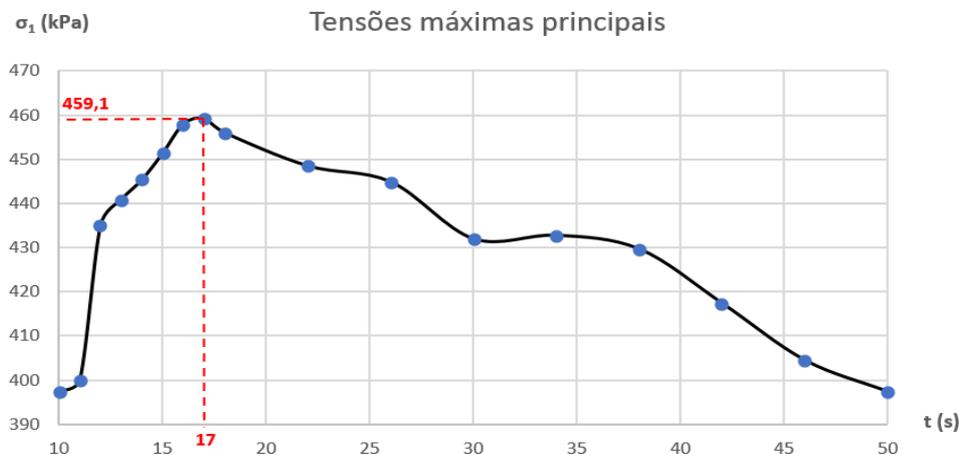


**Figura 11 - Gráfico com o pico de tensão máxima na parede no tempo 17s**

A Tabela 1 junto com a Figura 12, mostram como as tensões variam ao longo do tempo, agora com mais instantes sendo analisados próximo do instante de 18s, para se obter quando ocorre de fato o pico de tensão.

**Tabela 1 - Variação das tensões ao longo do tempo mais discretizado**

Tempo (s)	Tensão Principal Máxima (kPa)
10	397,3
11	400
12	435
13	440,8
14	445,3
15	451,3
16	457,9
<b>17</b>	<b>459,1</b>
18	455,9
22	448,4
26	444,8
30	431,9



**Figura 12 - Gráfico com a variação da tensão principal máxima ao longo do tempo**

Portanto obteve-se uma tensão principal máxima de 459,1 kPa no tempo de 17 segundos (5 segundos após o início do descarregamento).

#### 2.4 Comparação entre as análises

Primeiramente, pode-se comparar as pressões e tensões geradas para os 3 canais de fluxo propostos pela norma europeia EN-1991-4-2006.

Nota-se que as pressões resultantes na saída do canal de fluxo são maiores no caso 3 e menores no caso 1, tendo os valores do caso 2 como intermediários entre estes, de acordo com a Figura 5.

Em contrapartida, ao analisar a Figura 6 percebe-se uma inversão, pois as pressões que acontecem na zona adjacente para o caso 1 são maiores do que as do caso 3, pelo mesmo motivo.

Ao compararmos as tensões principais máximas percebe-se valores muito próximos quando se olha para o caso 3 do estudo analítico com o SAP2000 e o resultado proveniente da simulação com o Rocky/Ansys. Já para os casos 1 e 2 do estudo analítico, nota-se que as tensões principais máximas foram maiores, de acordo com a Tabela 2.

**Tabela 2 – Comparação de resultados obtidos entre as análises**

		SAP2000	ROCKY + ANSYS	$\Delta$
$\sigma_1$ (kPa)	CASO 1	555,4		21%
	CASO 2	530,9	459,1	16%
	CASO 3	474,4		3%
$p_R$ (kPa)	CASO 1	47,3		-4%
	CASO 2	41,1	49,2	-16%
	CASO 3	36,1		-27%

## 2.4 Conclusões

As pressões foram obtidas de formas diferentes para as duas análises. Na primeira, através do cálculo manual, foram realizadas 3 alternativas para a geometria do canal de fluxo propostas pela norma europeia EN-1991-4-2006, contando com a possibilidade de variação das características do canal, que deve se alterar não só com as características dos grãos, mas também com as características ambientais e instantâneas. Com isso obtiveram-se valores em módulo diferentes para as pressões horizontais e tangenciais em cada caso, inclusive com distribuições um pouco diferentes, dependendo da geometria estimada para cada canal de fluxo.

Porém, ao realizar uma comparação com as pressões obtidas diretamente pela interação dos grãos com a estrutura pelo programa Rocky, constata-se que os resultados obtidos pela norma europeia são satisfatórios e, de fato, buscam atender aos requisitos de projeto, ao se comparar com a análise refinada.

Ainda assim, com o estudo realizado pela interação Rocky/ Ansys obtiveram-se resultados satisfatórios no que diz respeito à distribuição das pressões e à análise dinâmica estudada de forma simplificada por diversos estudos ao longo do tempo.

Com a interação automática entre os grãos e a estrutura, provocando as variações de carregamento propostas, pode-se confirmar que o comportamento das partículas durante o descarregamento é próximo ao esperado proposto pela norma e, mais do que isso, pode-se afirmar ainda a importância em refinar uma análise desse tipo, onde muitas vezes as pressões que os grãos exercem na estrutura foram tratadas como líquidos, provocando muitas catástrofes no passado, se estendendo muitas vezes até os dias de hoje.

Sendo assim, constata-se a viabilidade para a utilização da norma europeia em conjunto de um software menos sofisticado para o dimensionamento de silos baixos em concreto com descarga excêntrica, analisando a segurança da estrutura, com a ressalva de que a utilização de um programa mais poderoso poderia levar a prever fenômenos não conhecidos e à um dimensionamento menos conservador.

## Referências

- CALIL JUNIOR, C.; NASCIMENTO, J. W. B.; ARAÚJO, E. C. Silos Metálicos Multicelulares. São Carlos: Eesc, 1997. 178 p.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARTIZATION. EN 1991-4: Eurocode 1 – actions on structures – part 4: silos and tanks. Brussels, 2006.
- FREITAS, E. G. A. Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano. 2001. 175 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>>. Acesso em: 23 mar. 2017.