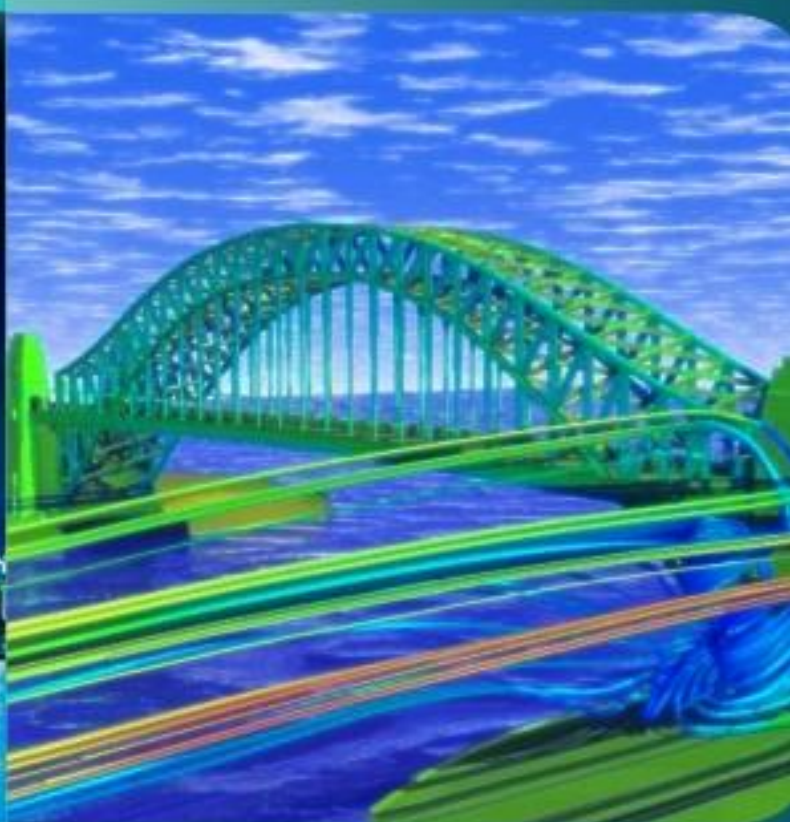




2010

**Método dos
Elementos
Finitos Aplicados à
Engenharia de
Estruturas**



**Prof^a. Mildred B. Hecke
Universidade Federal do Paraná
Versão 1.0.0.0**



**RESERVATÓRIOS
CILINDRICOS E SILOS
METÁLICOS**

RESERVATÓRIOS CILÍNDRICOS E SILOS METÁLICOS

INTRODUÇÃO

Reservatórios cilíndricos são estruturas normalmente utilizadas para o armazenamento de água, de resíduos industriais, de resíduos da indústria petroquímica, de óleos, de grãos e etc. Em especial, seu estudo é importante no dimensionamento de silos agrícolas ou graneleiros. Esses devem apresentar condições necessárias para o armazenamento e a preservação de produtos agrícolas, especialmente as sementes como a soja, o trigo, o milho, a aveia e etc. Os primeiros estudos de silos remontam aos anos 1800 e seus critérios de dimensionamento e materiais utilizados foram evoluindo com o tempo.

Hoje, as condições de projeto devem levar em conta não só a etapa de armazenamento (por exemplo, a disposição e aeração dos grãos), mas também as etapas de carregamento e descarregamento (por exemplo, o fluxo e disposição dos grãos no carregamento e no descarregamento, sua velocidade e etc.).

Os reservatórios cilíndricos utilizados no armazenamento de grãos em geral são formados por chapas de aço de espessura “t”, soldadas entre si e geometricamente definidas pelo seu diâmetro (D) e sua altura (h). O corpo do reservatório poderá ser liso ou corrugado. O corpo do reservatório é soldado ao fundo, podendo esse fundo se apresentar de forma plana ou cônica (tremonha), sendo que o cone pode ter uma forma concêntrica ou excêntrica.

É pelo fundo que o produto guardado é descarregado pela ação da gravidade ou através de equipamentos apropriados. Quanto ao tampo, esse pode ser ou inteiramente soldado ou apenas fixado em determinados pontos do topo do reservatório.





Figura 1 – Reservatório de fundo plano e cônico.

O Brasil ainda não possui uma norma específica para a construção de silos, mas, no entanto, as seguintes normas internacionais que podem ser consideradas para seu dimensionamento: AS 3774 (1996), DIN 1055-6 (2005), EUROCODE 1- Part 4 (2002) e ISSO – 11697 (1995).

Reservatório Cilíndrico de Fundo Plano

O primeiro exemplo a ser apresentado é um reservatório cilíndrico de fundo plano, conforme mostra o esquema da figura 2. Diferentemente dos reservatórios que contêm líquidos, a pressão horizontal nas paredes não aumenta linearmente com a profundidade do silo devido à presença do atrito dos grãos com as paredes do silo. Essa constatação deve-se a Roberts em 1884. A pressão de atrito é distribuída na superfície interna das paredes e equilibra parte do peso do produto, resultando em esforços de compressão na parede do silo. Deve-se a Janssen (1895) a teoria para o cálculo das pressões a partir do equilíbrio de forças infinitesimais que atuam em uma camada elementar da massa de grãos. Sua teoria é utilizada pelas principais normas internacionais para o cálculo das pressões de carregamento, quando o silo se encontra com o produto ensilado em repouso. Mas, ainda na década de 30, descobriu-se que as pressões durante o fluxo diferem das pressões no repouso, e vários estudos experimentais foram feitos com o intuito de mensurar em que proporção as pressões na carga e na descarga excediam as pressões iniciais. Ou seja, duas situações de carga devem ser estudadas: a que considera o material em repouso e a que considera o estado de carregamento ou descarregamento, que conterão as chamadas de pressões ativas. A figura 3 mostra pressões obtidas experimentalmente por Petrov e Kovtun (1959) para um silo de paredes de concreto com milho, onde p_h são as pressões horizontais que são normais e P_V pressões de atrito que são paralelas às paredes.

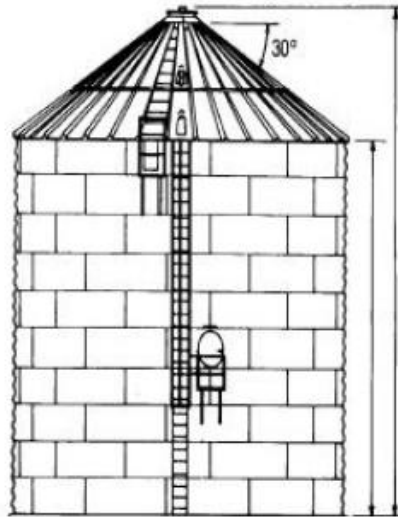


Figura 2 – Esquema mostrando reservatório cilíndrico de fundo plano.

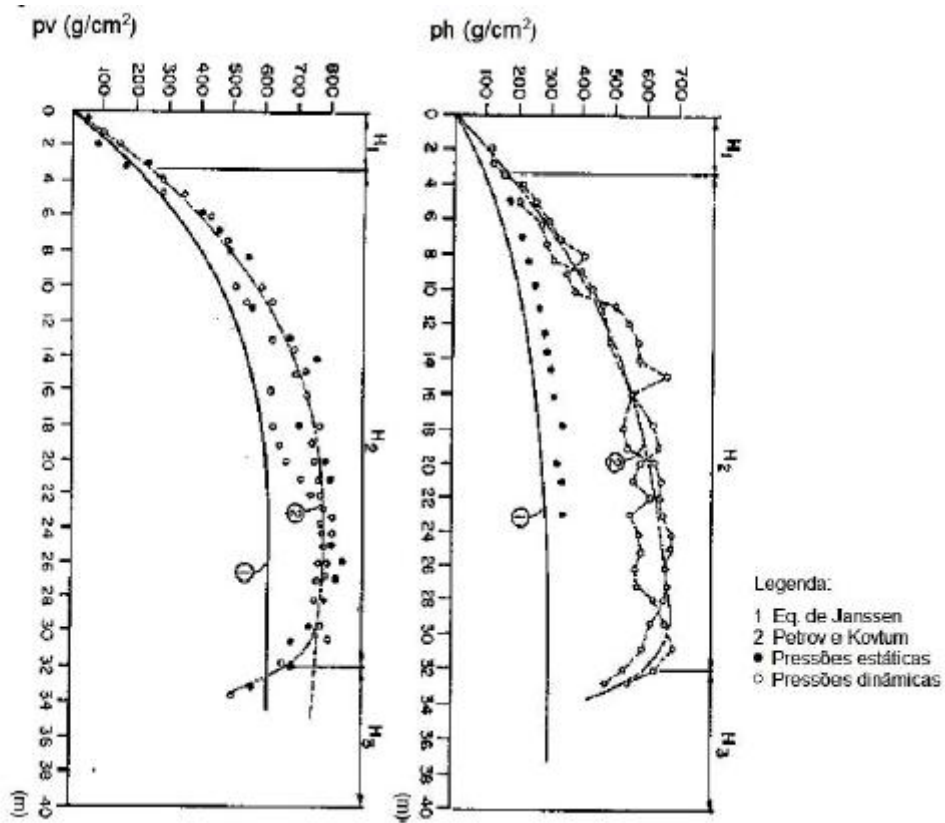


Figura 3 – Pressões verticais e horizontais registradas em ensaios por Petrov e Kovtun (1959). Fonte: Gallego (2006).

PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E DOS MATERIAIS

Utilizando-se a hipótese de que o material está em repouso, além do peso próprio do reservatório, é importante a consideração das cargas referentes à pressão lateral e na placa de fundo devido aos grãos ensilados e da força de atrito. Igualmente importantes são as ações do vento que não serão consideradas neste exemplo.

Características físicas, geométricas e de carregamento do reservatório	
Módulo de Elasticidade ou de Young	205 GPa = 2,05E9 N/m ²
Coefficiente de Poisson	0,3
Peso específico	80 kN/m ³ = 8E4 N/m ³
Altura “h”	11m
Diâmetro “D”	3m
Espessura “t”	0,002m
Carregamento utilizado	Peso e pressão dos grãos (pressão uniforme normal à parede $p_h = 10$ kPa, $p_w = 0$) Peso próprio da parede que constitui o corpo do reservatório Peso da estrutura de cobertura = 0,160kN/m
Condição de contorno	Engastado na base

Fonte: Madrona (2008)

Tabela 1 – Tabela contendo as características físicas, geométricas e de carregamento do reservatório na primeira fase.

A

1. INÍCIO DA ANÁLISE

1.1. *Introduz o título do problema a ser resolvido:*

- ✓ No ANSYS Utility Menu clicar em “File” e acessar a opção “Change Title...”;
- ✓ Na nova janela que aparecer, digitar novo título: “**Reservatório Cilíndrico com Pressão Uniforme nas Paredes**”;
- ✓ Clicar em OK.

1.2. *Altera o nome dos arquivos:*

- ✓ No ANSYS Utility Menu clicar em file e acessar a opção “Change Jobname...”;
 - Na nova janela que aparecer, digitar novo nome do arquivo: “**cilindrico**”;
- ✓ Clicar em OK.

1.3. *Escolhe o tipo de análise que se pretende executar, visando filtrar comandos a serem apresentados na telas de entrada:*

- ✓ No ANSYS Main Menu clicar em “Preferences”;
- ✓ Na nova janela que aparecer, em “Discipline for filtering GUI Topics”, selecionar a opção “Structural”;
- ✓ Clicar em OK.

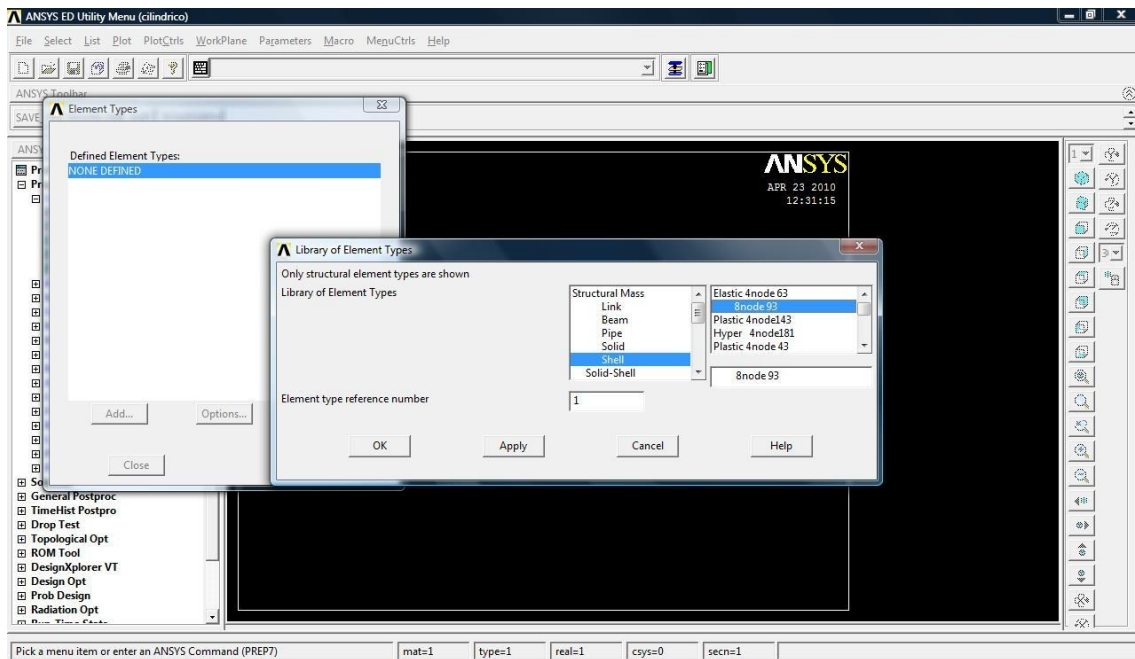
2. ENTRA NA FASE DE PRÉ-PROCESSAMENTO

- ✓ No ANSYS Main Menu, clicar em “Preprocessor”.

B

2.1. *Escolhe o tipo de elemento finito que será usado:*

- ✓ Dentro do “Preprocessor”, selecionar “Element Type”;
- ✓ Dentro do “Element Type”, selecionar “Add/Edit/Delete”;
- ✓ Na nova janela que abrir, clicar em “Add...” para selecionar um novo elemento.
- ✓ Outra janela se abrirá, então no “Library of Element Types” selecionar o elemento “**Structural Shell**”, “**Elastic 8node93**” e clicar em “OK”;

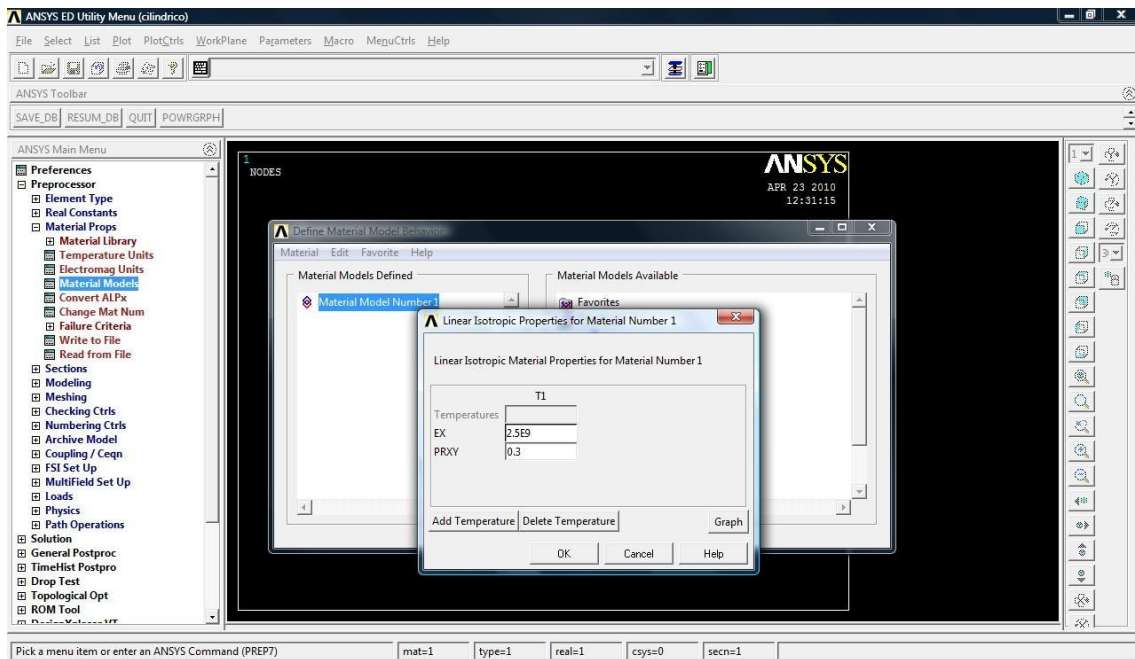


- ✓ Fechar a janela do “Element Types”;

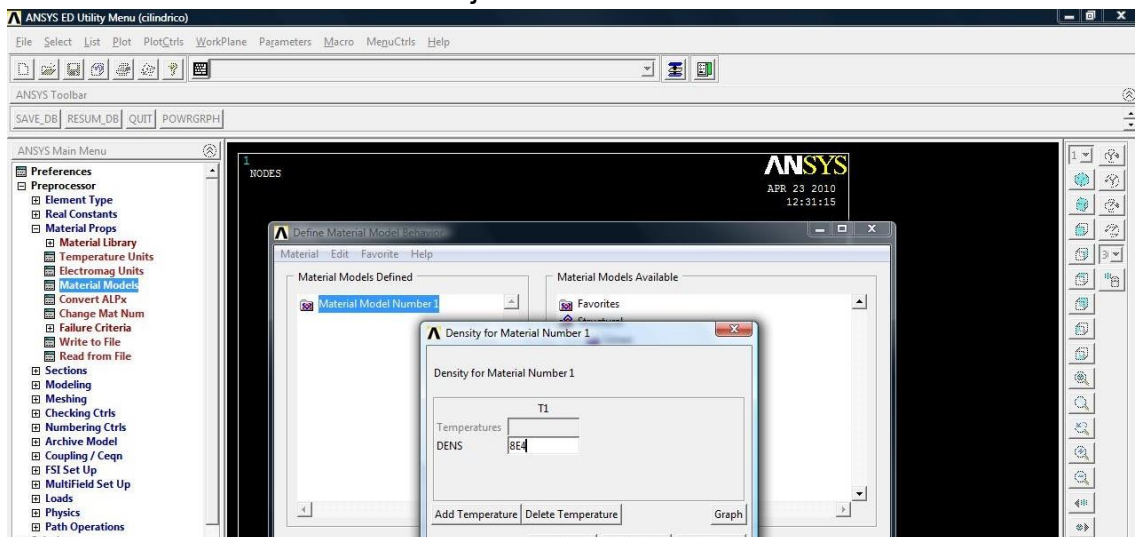
C

2.2. **Define as propriedades do material:**

- ✓ Dentro do “Preprocessor”, selecionar “Material Props”, “Material Models”;
- ✓ Na nova janela que abrir, para o “Material Model Number 1”, no quadro “Material Models Available” selecionar: “Structural>Linear>Elastic>Isotropic”;
- ✓ Dar um duplo clique em “Isotropic”;
- ✓ A janela “Linear Isotropic Material Properties for Material Number 1” irá abrir. Inserir na lacuna “EX” o valor referente ao Módulo de Elasticidade do material e na lacuna PRXY o valor do Coeficiente de Poisson e clicar em “OK”:
 - EX = **2.05E9**;
 - PRXY = **0.3**;



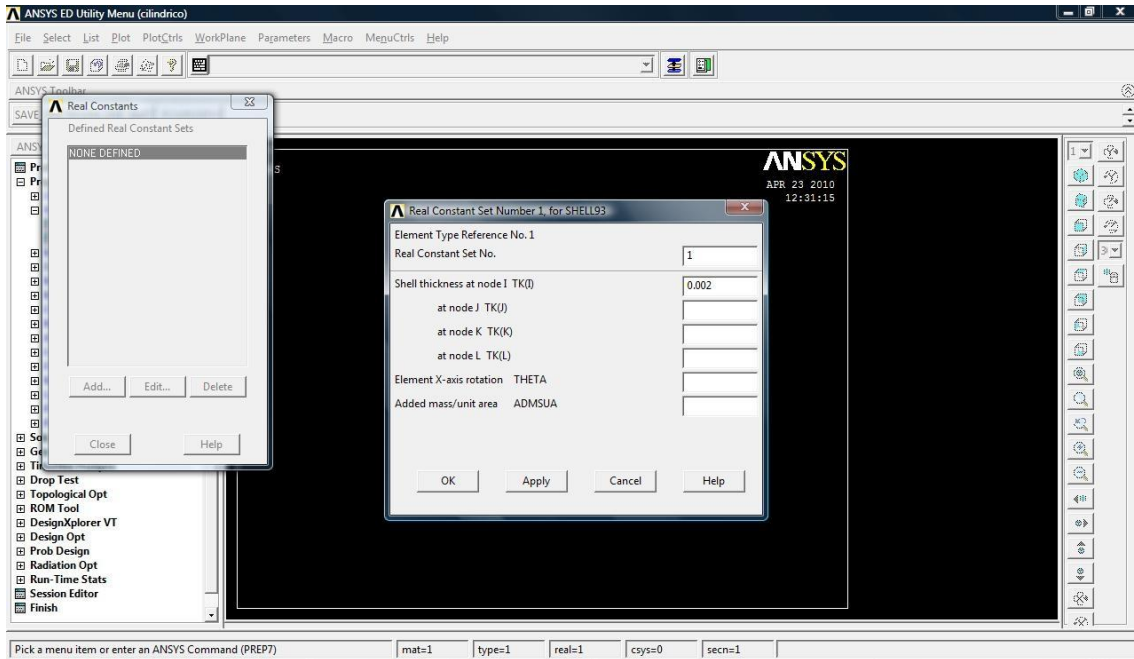
- ✓ No quadro “Material Models Available” selecionar: “Structural>Density”;
- ✓ Dar um duplo clique em “Density” e inserir;
 - DENS = 8E4;
- ✓ Clicar em “OK” e fechar a janela.



2.3. Define Constantes Geométricas:

- ✓ Dentro do “Preprocessor”, selecionar “Real Constants”;
- ✓ Dentro do “Real Constants”, selecionar “Add/Edit/Delete”;
- ✓ Na nova janela que abrir, clicar em “Add...” para adicionar novas constantes geométricas;
- ✓ Uma nova janela se abrirá então selecionar o tipo de elemento em “Choose element type” e clicar em OK;
- ✓ A janela “Real Constants Set Number 1, for “SHELL 93” irá aparecer. Deve-se inserir:
 - Real Constant Set No. = 1
 - Shell Thickness = 0.002

✓ Clicar em “OK”.

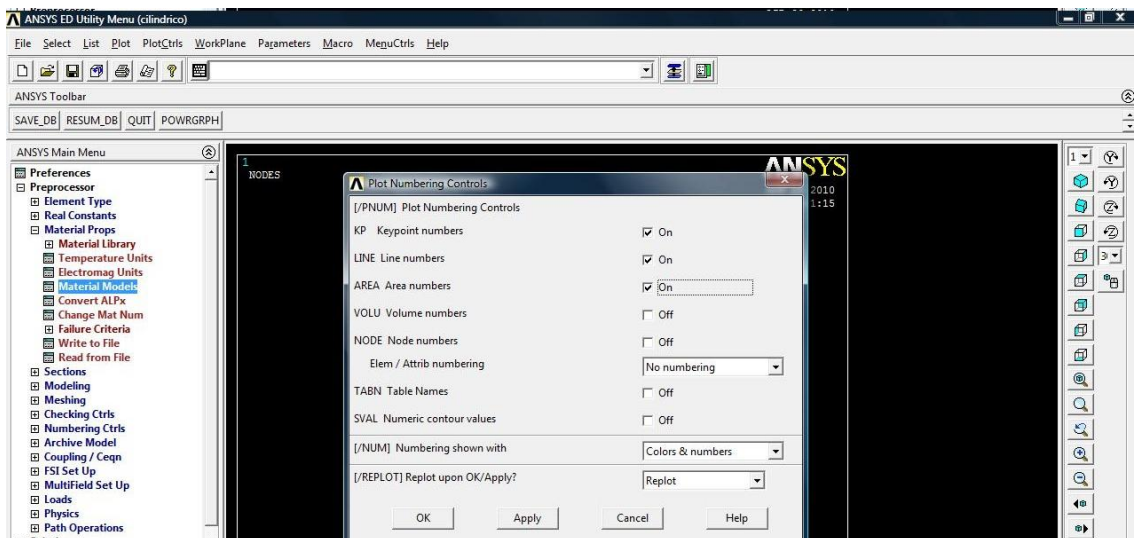


D

2.4. Cria o modelo geométrico:

2.4.1. Numera área, lines e keypoints:

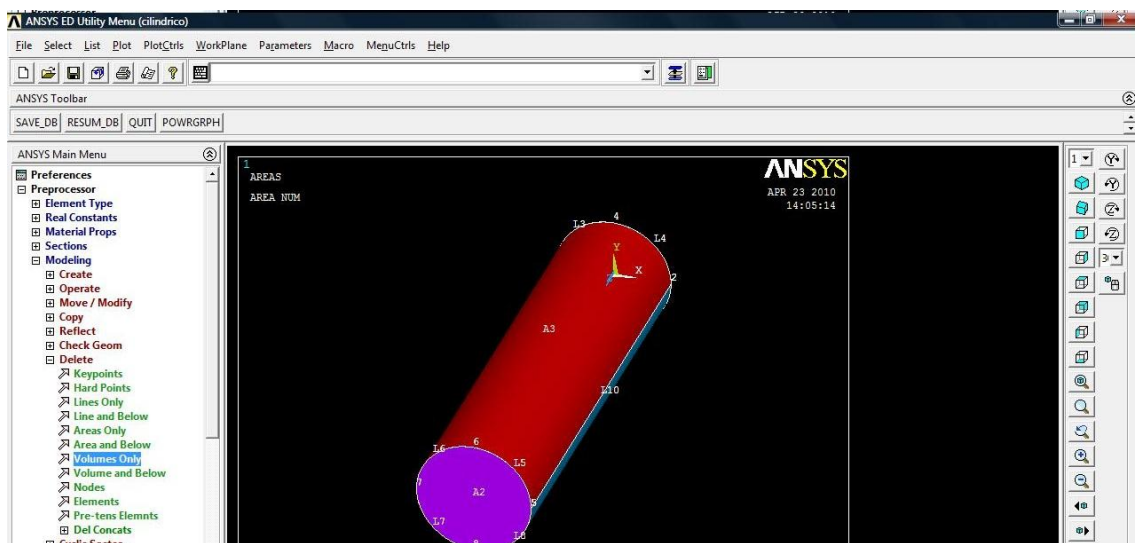
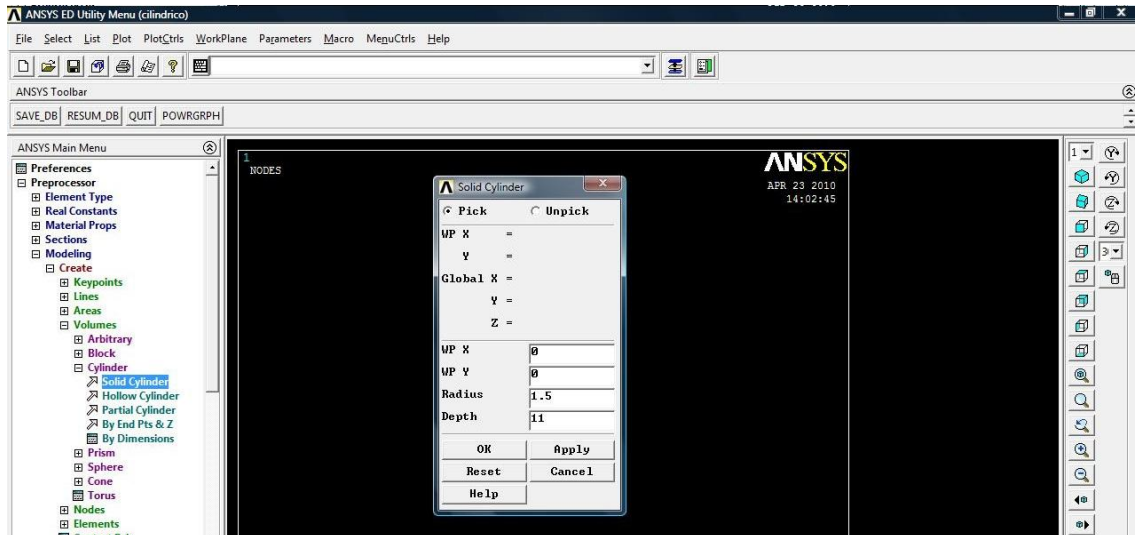
- ✓ No ANSYS Utility Menu clicar em “PlotCtrls” e acessar a opção “Numbering”;
- ✓ Na nova janela que aparecer, seleccionar:
 - Keypoints **ON**
 - Lines **ON**
 - AREA **ON**
- ✓ Clicar em “OK”.



2.4.2. Cria o modelo geométrico:

- ✓ Dentro do “Preprocessor” seleccionar “Modeling”, “Create”, “Volumes”, “Cylinder”, “Solid Cylinder”;

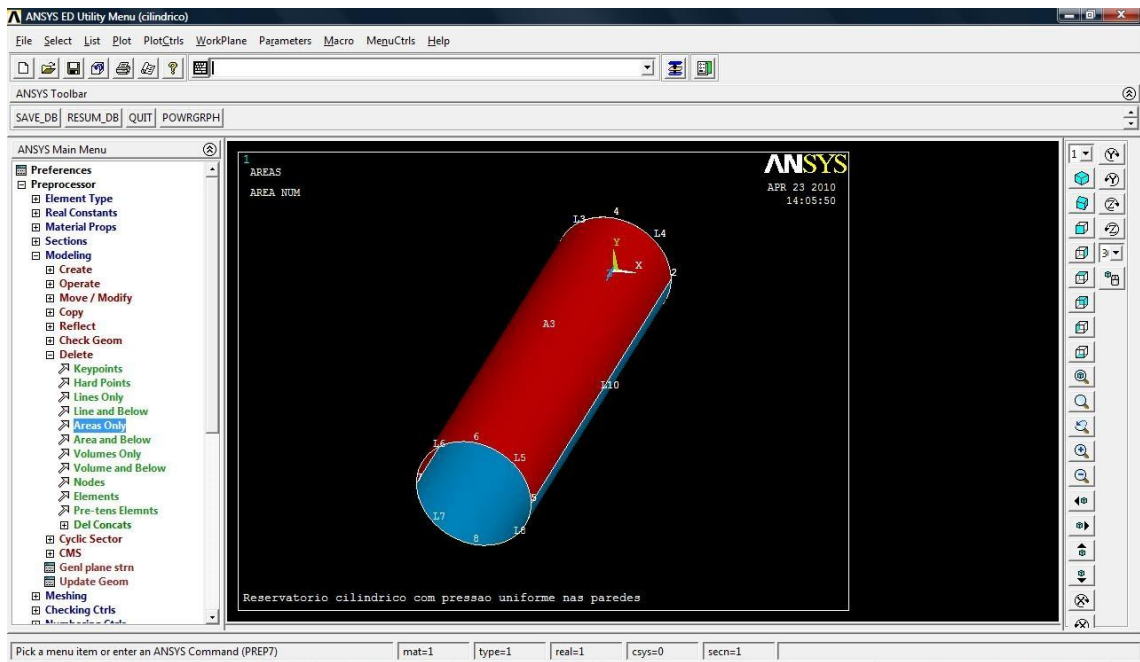
- ✓ Na nova janela que abrir, inserir:
 - WPX = 0;
 - WPY = 0;
 - Radius = 1.5;
 - Depth = 11;
- ✓ Clicar em “OK”;



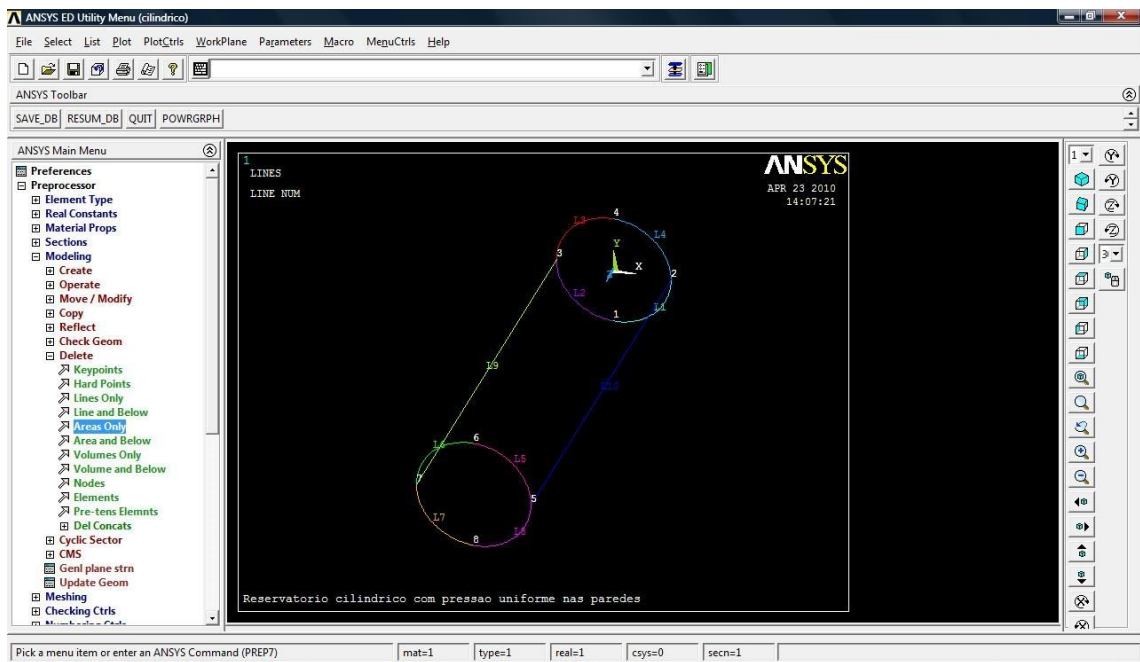
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Delete”, “Volumes Only”;
- ✓ Apontar o volume 1, anteriormente criado;
- ✓ Clicar em “OK”;

OBS: Apenas o volume será deletado. As áreas, lines e keypoints continuarão existindo.

- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Delete”, “Areas Only”;
- ✓ Apontar a área 2;
- ✓ Clicar em “OK”;



✓ No “Ansys Utility Menu”, clicar em “plot”, “lines” para plotar as linhas;



2.4.3. *Salva análise no arquivo cilindrico.db:*

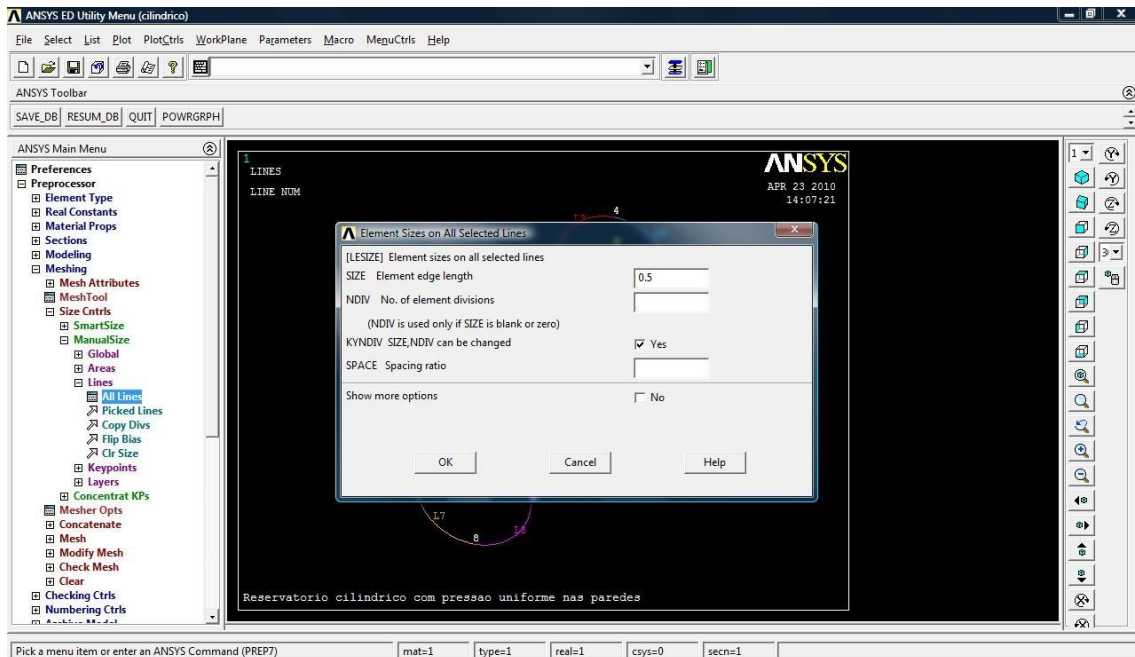
✓ No “ANSYS Toolbar”, clicar em “SAVE_DB”.

2.4.4. Define tamanho dos elementos da malha:

✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Meshing”, “Size Ctrl”, “Manual Size”, “Lines”, “All Lines”;

✓ Na nova janela inserir:

- SIZE Element edge length 0.30
- ✓ Clicar em “OK”.



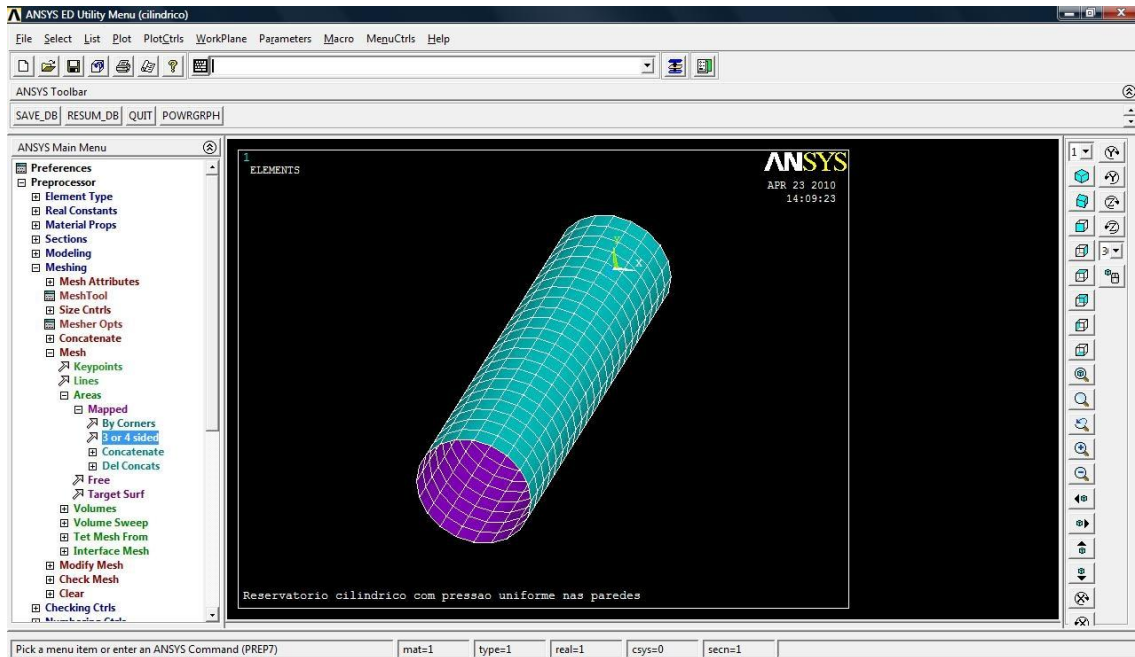
2.4.5. Concatena linhas:

- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Meshing”, “Concatenate”, “Lines”;
- ✓ Apontar as lines **5** e **6** e clicar em “APLLY”;
- ✓ Apontar as lines **7** e **8** e clicar em “APLLY”;
- ✓ Apontar as lines **1** e **2** e clicar em “APLLY”;
- ✓ Apontar as lines **4** e **3** e clicar em “OK”;

E

2.5. **Gera a malha de elementos finitos:**

- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Meshing”, “Mesh”, “Areas”, “Mapped”, “3 or 4 Sides”;
- ✓ Apontar areas **3** e **4**;
- ✓ Clicar em “OK”

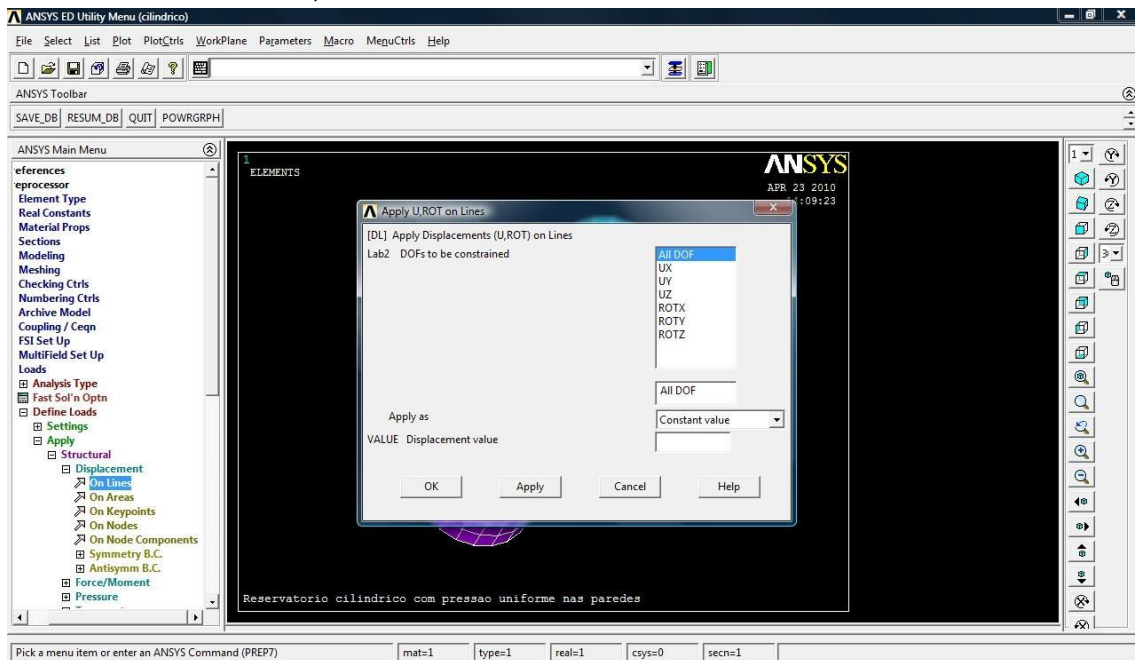


F

2.6. Aplicar as condições de contorno na modelagem sólida:

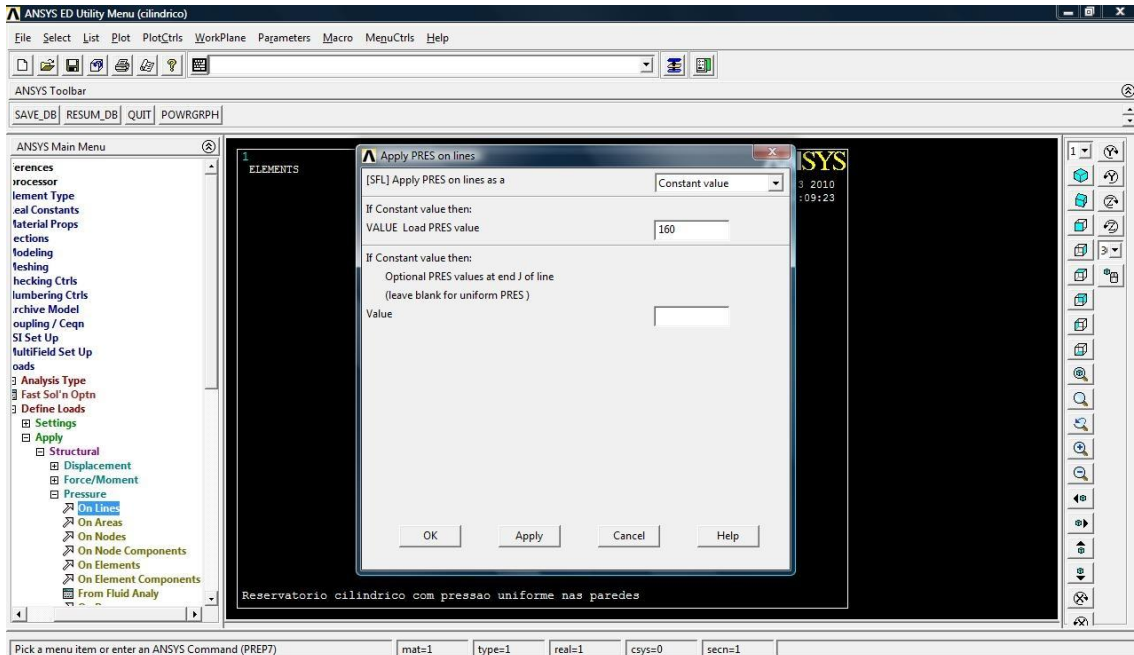
2.6.1. Fornece condição de contorno:

- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Loads”, “Define Loads”, “Apply”, “Structural”, “Displacement”, “On Lines”;
- ✓ Apontar as lines **1, 2, 3 e 4** e clicar em “OK”;
- ✓ Outra janela irá aparecer então selecionar no campo “DOFs to be constrained” a opção “**ALL DOF**”;
- ✓ Clicar em “OK”;

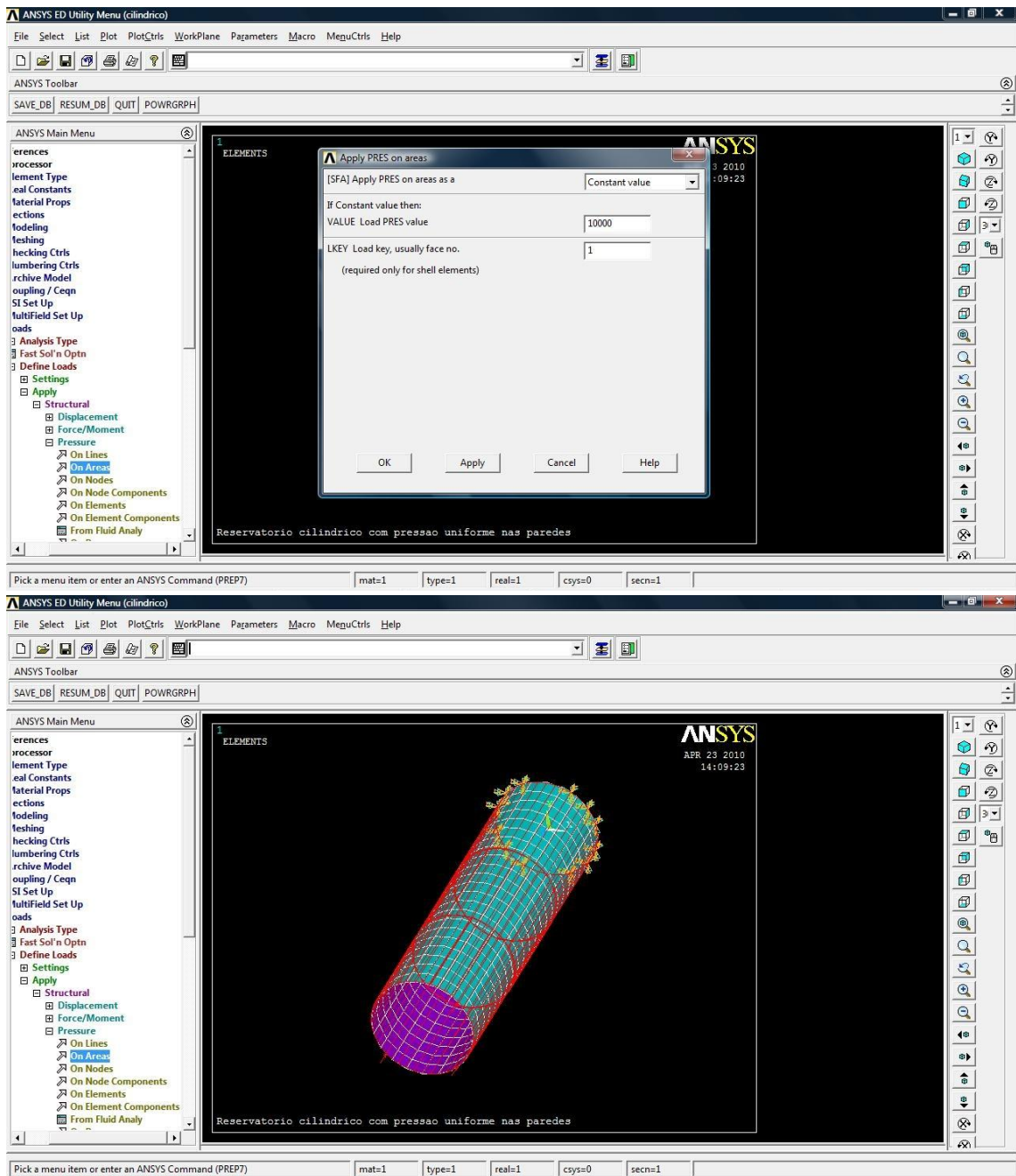


2.6.2. Aplicar as cargas:

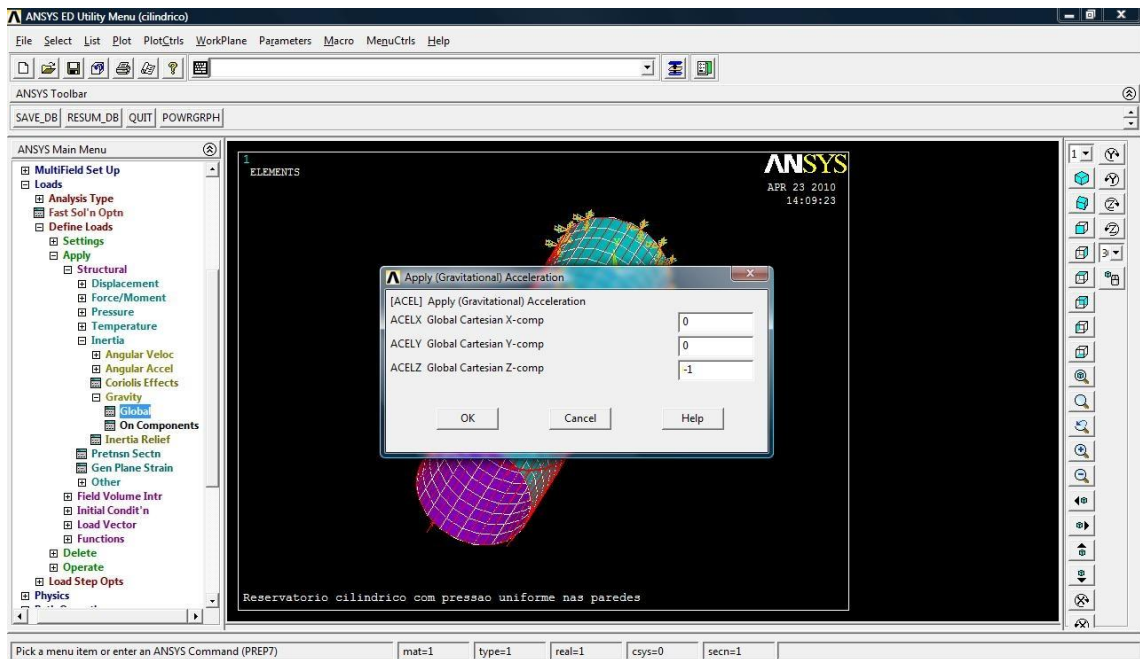
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Loads”, “Define Loads”, “Apply”, “Structural”, “Pressure”, “On Lines.”;
- ✓ Apontar a linha **5, 6, 7 e 8** e clicar em “OK”;
- ✓ Na nova janela inserir o valor da carga a ser distribuída na linha:
 - VALUE **160**;
- ✓ Clicar em “OK”;



- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Loads”, “Define Loads”, “Apply”, “Structural”, “Pressure”, “On Areas.”;
- ✓ Apontar a linha **3 e 4** e clicar em “OK”;
- ✓ Na nova janela inserir o valor da carga a ser distribuída na linha:
 - VALUEI **10000**;
 - LKEY **1**;
- ✓ Clicar em “OK”;



- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Loads”, “Define Loads”, “Apply”, “Structural”, “Inertia”, “Gravity”, “Global”;
- ✓ Na nova janela inserir:
 - ACELZ -1;
- ✓ Clicar em “OK”;



H

3. SOLUÇÃO

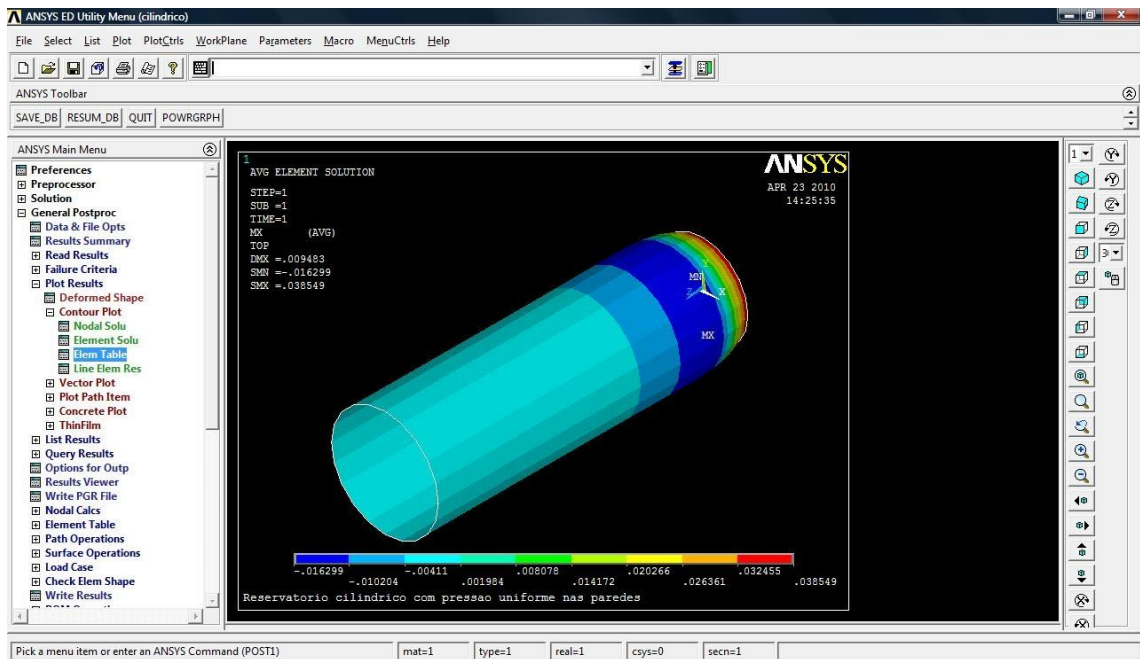
- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “Solution” clicar em “Solve”, “Current LS”;
- ✓ Clicar em “OK”.
- ✓ Na janela “Information: Solution is done” clicar em “CLOSE”.
- ✓ No ANSYS Toolbar clicar em “SAVE_DB” para salvar os dados mais a solução no arquivo.

I

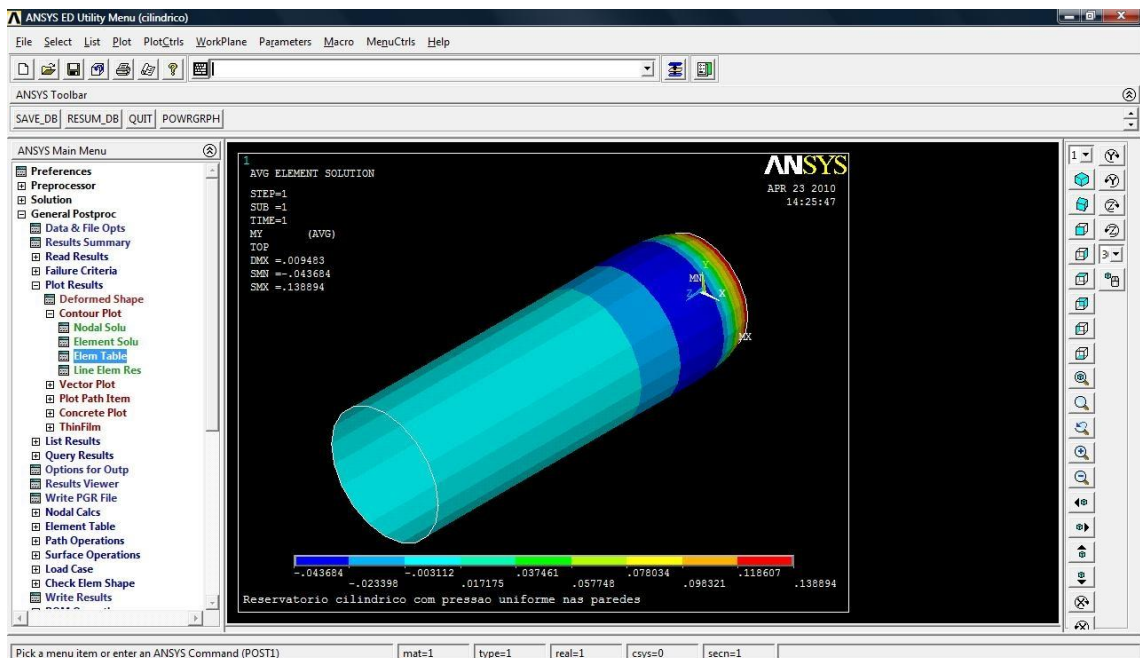
4. PÓS PROCESSAMENTO

4.1. Gera, lista e plota os resultados:

- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “General Postproc” clicar em “Plot Results”, “Deformed Shape” para visualizar a configuração deformada da estrutura;
- ✓ Na janela “Plot Deformed Shape”, selecionar a opção “Def+undeformed” e clicar em “OK”;



- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “General Postproc” clicar em “Plot Results”, “Contour Plot”, “Element Table”;
- ✓ Na nova janela selecionar:
 - Itable **MY**
 - Avglab **Yes - average**
- ✓ Clicar em “OK”;



5. SALVANDO ARQUIVOS E SAINDO DO PROGRAMA:

- ✓ No ANSYS Tollbar, clicar em “SAVE_DB” para salvar no Data Base;
- ✓ Ainda no ANSYS Toolbar, clicar em “QUIT”;
- ✓ Na nova janela, selecionar a opção “Save everything” e clicar em “OK”.

Material em repouso – Modelo simulando o comportamento do material armazenado como elementos sólidos

Em geral, o produto armazenado possui um comportamento bastante complexo porque durante o armazenamento, ele está sujeito a altas tensões e baixas deformações de modo que se comporta aproximadamente como um sólido. Por outro lado, durante o fluxo, atuam baixas tensões e altas deformações, com o produto se comportando aproximadamente como um fluido. A definição de um modelo de comportamento entre tensões e deformações apresentadas pelo produto é complexa e deve considerar algumas características Madrona(2008), como:

- Deformação permanente: o produto não recupera sua configuração depois de cessada a aplicação de carregamentos;
- Dependência do processo de carga-descarga: não existe uma relação única entre tensões e deformações, ou seja, dado um valor da deformação em um dado instante, só é possível determinar o estado de tensão correspondente conhecendo-se a evolução do processo carga-descarga;
- Dependência da taxa de aplicação da carga: o produto pode adquirir resistência com o aumento da taxa de aplicação da carga;
- Não linearidade elástica: relação não linear entre tensões e deformações;
- Comportamento plástico: o produto plastifica a partir de um dado estado de tensão, ou seja, com baixos incrementos de tensão o produto se deforma excessivamente;
- Assimetria de comportamento tração-compressão: as forças de coesão interna conferem baixa resistência à tração nos produtos granulares que muitas vezes pode ser considerada desprezível;

A tabela 2 contém algumas informações obtidas na literatura sobre alguns materiais que são normalmente armazenados (Gallego, 2006).

Características físicas de alguns materiais comumente armazenados (grãos)		
Propriedade	Farelo de milho	Soja
Módulo de Elasticidade ou de Young	1647 kN/m ²	1542 kN/m ²
Coefficiente de Poisson	0,3	0,32
Ângulo de atrito interno	37,6 °	34,8 °
Coesão	0,5 kPa	0,2 kPa
Coefficiente de atrito entre os grãos e paredes lisas	0,25	0,23
Coefficiente de atrito entre os grãos e paredes corrugadas	0,46	0,40
Peso específico	6,45 kN/m ³	7,13 kN/m ³
Ângulo de dilatância	10	14

Fonte: Madrona (2008)

Tabela 2 – Tabela contendo as características físicas dos grãos.

O grupo de investigação espanhol dirigido pelo professor Ayuga, utilizando o programa ANSYS, apresenta seu primeiro trabalho em Guaita (1995) onde as pressões estáticas foram determinadas a partir de um modelo bidimensional considerando leis de comportamento do material elásticas e elastoplásticas. Esse último com o critério de plastificação de Drucker- Prager. Em Ayuga et al. (2001b) é apresentado um novo modelo numérico para simular o descarregamento do produto forçando o grão a se movimentar para baixo (Figura 5), em direção à boca de saída do silo, com um pequeno deslocamento, simulando a descarga do silo.

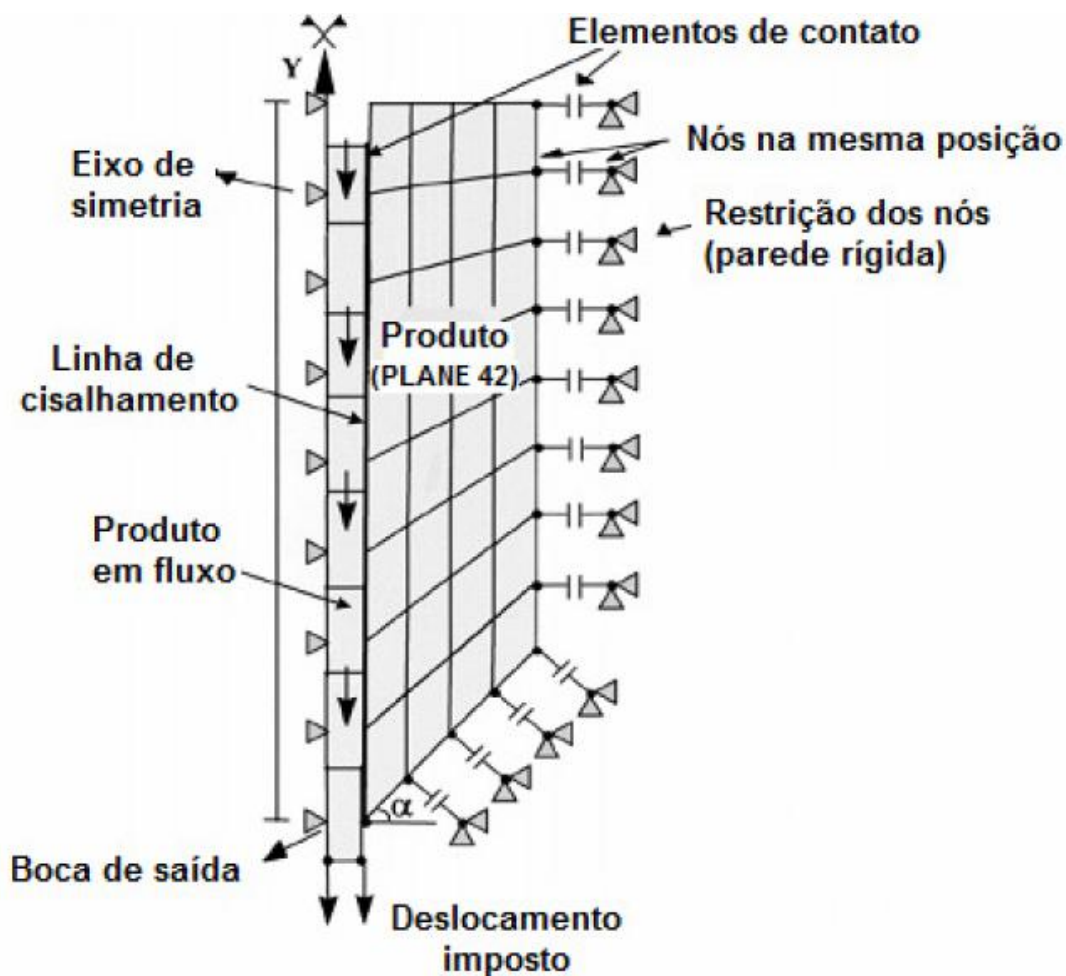


Figura 5 – Modelo de silo plano.

A simulação do descarregamento do silo é uma das linhas de estudo que se destaca atualmente, assim como trabalhos experimentais para a validação dos resultados numéricos. Ayuga et al. (2006), compararam os resultados numéricos das pressões estáticas obtidas com o MEF, com os valores propostos pelo EUROCODE (2002) e com resultados experimentais de um silo em escala real (Figura 6). As dimensões do silo real utilizado foram: $h_c=5m$; $D=2m$, $h_t=1,54m$, paredes de aço liso com 2 mm de espessura e três tipos de saída: centrada, parcialmente excêntrica e totalmente excêntrica. O produto analisado foi o trigo.

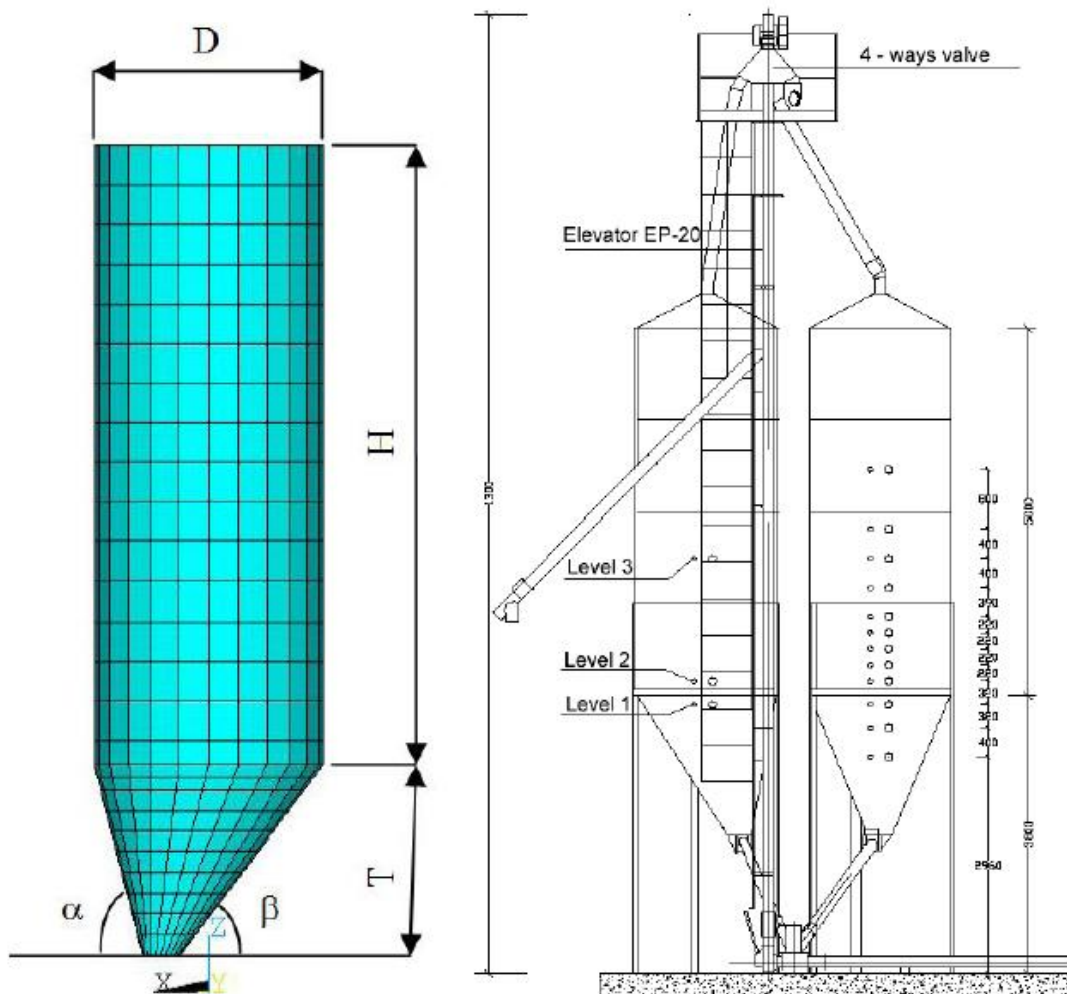


Figura 6 – Modelo numérico e modelo real. Fonte: Ayuga et AL. (2006).

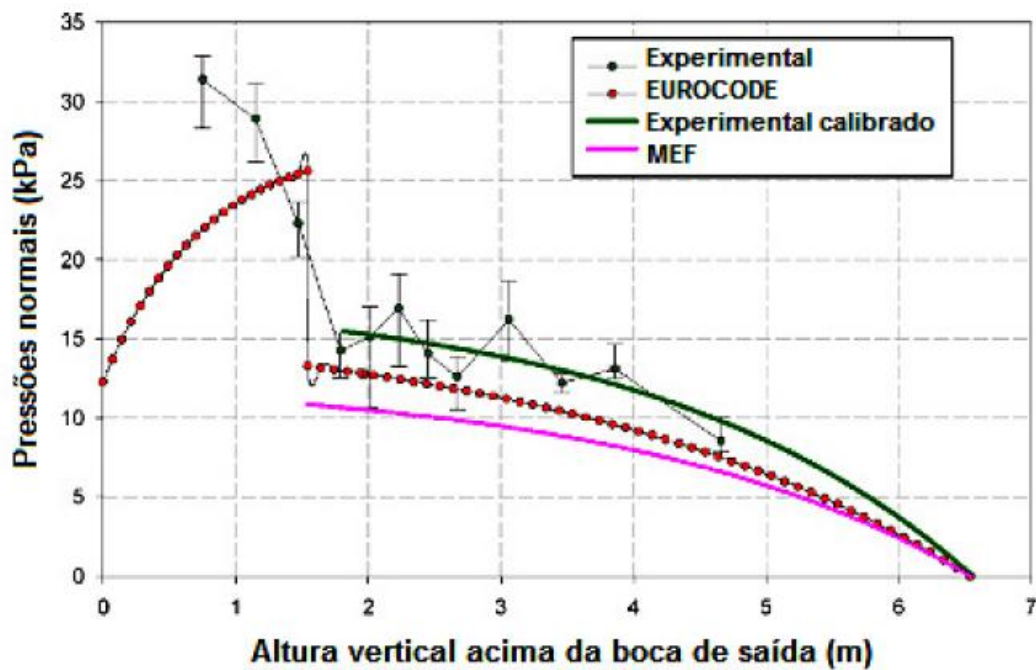


Figura 6 – Resultados experimentais. Fonte: Ayuga et al. (2006).

Os resultados de Ayuga et al. (2006), mostram que as pressões laterais no corpo do silo, obtidas experimentalmente são muito próximas das pressões obtidas pela teoria de de Janssen.

A utilização do MEF para predição das pressões devido ao produto armazenado nas paredes dos silos sofreu grande avanço nas últimas décadas e permite que o problema fosse modelado de forma mais realista.

Bibliografia

1. ANDRADE Jr., L. J. de, *Structural Analysis of the Steel Plates on Silos and Tanks*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.
2. MADRONA, F. S. *Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica*. 178 f. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.
3. FREITAS, E. G.A. *Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano*. São Carlos, 2001. 175p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2001.
4. GALLEGO. *Numerical Simulation of Loads Exerted by Stored Materials in Silo with non-Elastic Material Models*. Polytechnic University of Madrid.. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Department of Construction and Rural Roads. PhD Thesis. 2006.
5. AYUGA, F.; GUAITA M.; AGUADO P. Static and dynamic silo loads using finite element models. *J. Agric. Eng. Res.*, v. 78, n. 3, p. 299-308, 2001a.
6. . AYUGA, F; GUAITA M.; AGUADO P; COUTO A. Discharge and the Eccentricity of the Hopper Influence on the Silo Wall Pressures. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, v. 127, n. 10, p. 1067-1074, 2001b.
7. . AYUGA, F. Los empujes del material almacenado en silos. *Informes de La construcción*, v. 46, n. 436, p. 27-34, 1995.
8. AYUGA, F; AGUADO P; GALLEGO E; RAMÍREZ A. 2006. Experimental tests to validate numerical models in silos design. ASABE Paper No. 064002. St. Joseph, Mich.: ASABE.
9. HEZEL, C.R. *Avaliação das pressões em silos verticais conforme diferentes normas internacionais*. Cascavel, Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola UNIOESTE, 2001.