

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA**

PAULO CEZAR MARTINS FILHO

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM FERMENTADOR PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

BAURU - SP

2010

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA**

PAULO CEZAR MARTINS FILHO

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM FERMENTADOR PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Edson A Capello Sousa

BAURU - SP

2010

Martins Filho, Paulo Cezar.

Análise estrutural de um fermentador pelo método dos elementos finitos / Paulo Cezar Martins Filho, 2010.

xvii, 107 f. il.

Orientador: Edson Antônio Capello Sousa

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2010

1. Método dos elementos finitos. 2. Fermentador. 3. Produção de etanol. 4. Pressão hidrostática. 5. Ação do vento. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE PAULO CEZAR MARTINS FILHO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 26 dias do mês de abril do ano de 2010, às 14:00 horas, no(a) ANFITEATRO DO STI, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDSON ANTONIO CAPELLO SOUSA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. PAULO CEZAR RAZUK do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. MARCIO ANTONIO BAZANI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de PAULO CEZAR MARTINS FILHO, intitulado "ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM FERMENTADOR PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS". Após a exposição, o discente foi argüido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDSON ANTONIO CAPELLO SOUSA

Prof. Dr. PAULO CEZAR RAZUK

Prof. Dr. MARCIO ANTONIO BAZANI

À minha esposa Liliane,
que acreditou e fez
eu seguir adiante.

AGRADECIMENTOS

A Deus, aos meus pais, Paulo Cezar Martins e Silvia Henrique de Carvalho Martins por tudo que fizeram por mim e que sempre acreditaram na educação como garantia do futuro, não podendo esquecer os meus irmãos Pedro e Joana.

Em especial à minha esposa Liliane Torsani Úbeda, pela paciência e força para seguir nesta batalha.

Ao Prof. Dr. Edson A. Capello Sousa, pela ajuda e orientação do trabalho.

A todos os funcionários da Seção de Pós-graduação, especialmente a Célia Cristina, por sua gentileza e pelo atendimento atencioso de sempre e a CAPES pelo apoio financeiro.

Agradeço aos colaboradores da Ortalc Engenharia e Consultoria, Grupo Equipav e Açúcar Guarani em especial meu amigo Flávio Augusto Berni dos Santos e ao Danilo Carlos Ramon Victorasso.

Durante a elaboração da dissertação, tive ajuda de colegas e profissionais Edson Koiti Saito, Fernando A. T. Schiavon, Rubens Eliseu Nicula de Castro, Vanderson Luis Zangerolamo e Thiago Arthur de Oliveira Prandini que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

“Meu interesse está no futuro,
pois é lá que vou passar
o resto da minha vida”

Charles Kettering

RESUMO

Objetivou-se analisar estruturalmente um fermentador de 32 [m] de altura com colunas metálicas de sustentação, submetido ao carregamento de vento estático segundo o procedimento descrito pela norma NBR 6123 (1988), pressão hidrostática e pressão interna dos gases. Duas situações distintas foram consideradas para um melhor entendimento da análise: a primeira, sendo o fermentador vazio submetido aos esforços de vento; a segunda, o fermentador em operação submetido ao carregamento hidrostático e a pressão interna dos gases. Para se obter as tensões nos itens que compõem o fermentador (teto, costado, viga de transição, colunas e fundo cônico) e reações nas bases, foi utilizado o Método dos Elementos Finitos ou MEF. Para isso, foi elaborado um modelo geométrico bem próximo ao real, com os detalhes de chapas internas e externas. Determinou-se a espessura das chapas do costado pela norma NBR 7821 (1983) e verificou-se tensões, e possíveis pontos de falha já ocorridos no setor sucroalcooleiro. Apresenta-se também três problemas analisados pelo MEF que confrontados com os resultados analíticos, permitiu a constatação da validade dos resultados obtidos numericamente e ganho de confiança no uso da ferramenta. O MEF é uma ferramenta auxiliar em casos em que não é possível a utilização de cálculos tradicionais (analíticos).

Palavras-chave: Método dos elementos finitos. Fermentador. Produção de etanol. Pressão hidrostática. Ação do vento.

ABSTRACT

The objective was to structurally analyze a 32 meter height Fermenter, with columns, submitted to static wind load according to the procedure described by the NBR 6123 (1988) norm, hydrostatic pressure and internal pressure of the gases. Two different situations have been considered for a better analyze comprehension: the first one with the empty Fermenter submitted to wind efforts; the second with the operating fermenter submitted to the hydrostatic load and the internal pressure of the gases. In order to obtain the stresses on the items that make up the fermenter (heads, shell, beam transition, columns and conic bottom) and bases reactions the Finite Element Method or FEM has been used. For this we have developed a geometric model very close to reality, with the details of internal and external plates. It was determined by the thickness of the side shell plating by the NBR 7821 (1983) and there were tensions, and possible points of failure that have already occurred in the alcohol sector. It was also presented three issues addressed by comparing FEM with analytical results, which allowed the verification of the validity of the results obtained numerically and gain of confidence in using the tool. The MEF is an auxiliary tool in cases where it is not possible to use traditional calculations (analytical).

Keywords: Finite element method. Fermenter. Production of ethanol. Hydrostatic pressure. Wind action.

SUMÁRIO

RESUMO.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	XII
LISTA DE TABELAS.....	XV
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XVI
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 UTILIZAÇÕES DE NORMAS.....	2
1.2 NECESSIDADE DE NOVAS NORMAS.....	2
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1 BREVE HISTÓRICO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	4
2.1.1 TÓPICOS DO MÉTODO DE ANÁLISE POR MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	5
2.1.2 ANÁLISE ESTÁTICA.....	7
2.1.3 ELEMENTOS 2D.....	8
2.2 BREVE HISTÓRICO DA PRODUÇÃO DE ETANOL.....	11
2.2.1 PROCESSOS FERMENTATIVOS.....	12
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	15
3.2 PARTES PARA ANÁLISE.....	17
3.3 CARREGAMENTOS NO FERMENTADOR.....	18
3.4 ESTRUTURA E PERIFÉRICOS.....	18

3.5 PARÂMETROS PARA ANÁLISE DO FERMENTADOR	19
3.5.1 GEOMETRIA E CARREGAMENTO.....	19
3.5.2 RESTRIÇÕES.....	22
3.5.3 MALHA.....	22
4 SOLUÇÃO DAS PARTES	24
4.1 TETO.....	24
4.1.1 ESPESSURA DO TETO	24
4.1.2 CARREGAMENTOS DO TETO	25
4.2 COSTADO	27
4.2.1 ESPESSURA DO COSTADO	28
4.2.2 CARREGAMENTOS NO COSTADO	31
4.3 VIGA DE TRANSIÇÃO.....	41
4.4 COLUNAS.....	43
4.4.1 ESPESSURA DAS COLUNAS.....	44
4.5 FUNDO CÔNICO	45
4.5.1 ESPESSURA DO FUNDO CÔNICO.....	48
4.5.2 CARREGAMENTO NO FUNDO CÔNICO	48
4.6 APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO.....	49
5 RESULTADOS.....	51
5.1 RESULTADOS DO TETO	51
5.2 RESULTADOS DO COSTADO.....	52
5.3 RESULTADOS DA VIGA DE TRANSIÇÃO.....	54
5.4 RESULTADOS DAS COLUNAS	55
5.5 RESULTADOS DO FUNDO CÔNICO	63
5.6 RESULTADOS DO FERMENTADOR.....	64

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	69
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
8 APÊNDICE	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos de primeira e segunda ordem.	10
Figura 2 - Corte AA – detalhe do fermentador.....	16
Figura 3 - Instalação dos fermentadores, bombas e trocadores.	17
Figura 4 - Construção do modelo no Autocad v.2008.	20
Figura 5 - Modelo importado pelo DesigModeler, a partir do formato SAT.	21
Figura 6 - Geometria do fermentador no ANSYS.....	21
Figura 7 - Detalhe da restrição do tipo engaste nas bases das colunas.	22
Figura 8 - SHELL181 elemento tipo casca.....	23
Figura 9 - Teto do fermentador e acessórios.....	25
Figura 10 - Detalhe do teto e o peso próprio sendo considerado.....	26
Figura 11 - Detalhe do teto, peso próprio sendo considerado e a pressão interna dos gases.....	27
Figura 12 - Instalação dos fermentadores.....	27
Figura 13 - Pontos de aplicação do vento.	33
Figura 14 - Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s) , NBR 6123.	34
Figura 15 - Esquema da direção do vento, NBR 6123.	36
Figura 16 - Aplicação da pressão do vento.	38
Figura 17 - Modelo simplificado da pressão do vento.	39
Figura 18 - Detalhe do costado, peso próprio sendo considerado e a pressão do vento.	39
Figura 19 - Vista em planta do costado com aplicação da pressão do vento.....	40
Figura 20 - Detalhe do costado, peso próprio, peso do fluido armazenado e pressão interna dos gases.	40
Figura 21 - Detalhe do sistema de apoio do tanque no topo das colunas, ANDRADE Paulo (2010).	42
Figura 22 - Seção transversal da “viga anel”, BADIALE (1997).	42
Figura 23 - Fermentador sem o costado.	43
Figura 24 - Detalhe da viga tipo caixão.	43
Figura 25 - Corte BB – Arranjo das colunas no fermentador.....	44
Figura 26 - Perfil CS 650 x 330, NBR 5884.....	45

Figura 27 - Fundo cônico com reforço tipo “grelha circular/radial metálica”, BADIALE (1997).....	46
Figura 28 - Alguns tipos de tampos, TELLES (1996).	47
Figura 29 - Detalhe do fundo cônico, peso próprio, peso do fluido armazenado e pressão interna dos gases.	48
Figura 30 - Panorama de tensões no teto, PP + VT.....	51
Figura 31 - Panorama de tensões no teto, PP + OP.....	52
Figura 32 - Panorama de tensões no costado, PP + VT.....	53
Figura 33 - Panorama de tensões no costado, PP + OP.....	53
Figura 34 - Panorama de tensões na viga de transição, PP + VT.....	54
Figura 35 - Panorama de tensões na viga de transição, PP + OP.....	55
Figura 36 - Panorama de tensões nas colunas, PP + VT.....	56
Figura 37 - Panorama de tensões nas colunas, PP + OP.....	60
Figura 38 - Panorama de tensões no fundo cônico, PP + VT.....	63
Figura 39 - Panorama de tensões no fundo cônico, PP + OP.....	64
Figura 40 - Panorama de tensões no fermentador, PP + VT.....	65
Figura 41 - Panorama das deformações no fermentador, PP + VT.....	66
Figura 42 - Panorama dos deslocamentos máximos no fermentador, PP + VT.....	66
Figura 43 - Panorama de tensões no fermentador, PP + OP.....	67
Figura 44 - Panorama das deformações no fermentador, PP + OP.....	68
Figura 45 - Panorama dos deslocamentos máximos no fermentador, PP + OP.....	68
Figura 46 - Coeficiente de arrasto para um cilindro liso e esfera lisa como uma função do número de Reynolds.....	76
Figura 47 - Detalhe da aplicação da pressão de 41,59 [Pa] e o engaste fixo da base.	79
Figura 48 - Detalhe da malha, Apêndice A.....	79
Figura 49 - Detalhe da aplicação da pressão de 4,67 [MPa] e a geometria axisimétrica.	83
Figura 50 - Detalhe da malha, Apêndice B.....	84
Figura 51 - Panorama de tensões, sob carregamento de pressão.....	84
Figura 52 - Panorama das deformações normais.	85
Figura 53 - Panorama das tensões de cisalhamento.	85
Figura 54 - Detalhe da aplicação da pressão hidrostática e a restrição no eixo z.	88

Figura 55 - Detalhe da malha, Apêndice C.	88
Figura 56 - Panorama de tensões circunferenciais no eixo Y, sob carregamento hidrostático.	89
Figura 57 - Panorama de tensões máximas, sob carregamento hidrostático.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limitação de pressão do código “ASME Section VIII, Division I” e do fermentador	2
Tabela 2 – Cana-de-açúcar, usinas e áreas adicionais para atender aos cenários propostos, EPE (2010).	3
Tabela 3 - Áreas de aplicação do método dos elementos finitos, RAO (1989).	6
Tabela 4 - Espessura nominal mínima para chapas do costado, NBR 7821.	30
Tabela 5 - Espessura para cada anel do fermentador.	31
Tabela 6 - Fator S_2 , NBR 6123.....	32
Tabela 7 - Resultados da pressão dinâmica do vento.....	35
Tabela 8 - Tabela simplificada de distribuição das pressões externas em edificações cilíndricas de seção circular válida para $Re > 420000$, NBR 6123.	36
Tabela 9 - Pressão do vento no fermentador.	37
Tabela 10 -Tabela simplificada da pressão do vento no fermentador.	38
Tabela 11 – Lista de materiais do fermentador	57
Tabela 12 - Resultados obtidos das reações, PP + VT.....	58
Tabela 13 – Tabela simplificada das reações no eixo Z, PP + VT.	59
Tabela 14 - Resultados obtidos das reações, PP + OP.	60
Tabela 15 – Tabela simplificada das reações no eixo Z, PP + OP.....	62
Tabela 16 - Condições da atmosfera-padrão americana no nível do mar, FOX (1934).....	77
Tabela 17 - Resultados extraídos da vinculação do modelo no ANSYS.	80

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas

A	Área (geral)
B	Brix
C	Sobre-espessura pela corrosão
C_D	Coeficiente de arrasto
D	Diâmetro externo
E	Módulo de elasticidade
F	Força (geral)
F_D	Força de Arrasto
H	Altura do cilindro
M	Momento fletor (geral)
P	Pressão nominal externa
Re	Número de Reynolds
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo, e de sua altura sobre o terreno
S_3	Fator baseado em conceitos probabilísticos
T	Temperatura (geral)
V	Velocidade (geral)
V_K	Velocidade característica
V_o	Velocidade básica do vento
W	Peso de um corpo

Letras romanas minúsculas

a	Aceleração (geral)
c_{pe}	Coeficiente de pressão externa

c_{pi}	Coeficiente de pressão interna
d	Diâmetro interno
f_y	Tensão de escoamento do aço
f_u	Tensão última do aço na tração
h	Distância entre a linha do centro da junta inferior do anel considerado à cantoneira de reforço da borda superior do costado
p	Pressão (geral)
q	Pressão dinâmica do vento
r	Raio interno (geral)
t	Espessura do casco
z	Cota acima do terreno

Letras gregas

ρ	Densidade
μ	Viscosidade
σ	Tensão (geral)
τ	Tensão de cisalhamento
ν	Coeficiente de Poisson
ϵ	Deformação normal
β	Ângulo central entre a direção do vento e o raio que passa pelo ponto em consideração na periferia de um cilindro circular
Δ_h	Altura do fluido
Δ_p	Pressão efetiva em um ponto na superfície de uma edificação

1 INTRODUÇÃO

Constatou-se pouca informação literária no cálculo de reservatórios metálicos suportados por colunas com esforços de vento.

Devido à necessidade de maior produção de etanol nas atuais plantas de processo, verificou-se um grande aumento nos volumes dos reservatórios metálicos, proporcionando altura e diâmetro maiores em comparação com os utilizados há 20 anos. BADIALE (1997) já havia citado que as usinas têm o retrógrado caráter “coronelista” e que ainda não podem ser chamadas de indústrias ficando o “encarregado” (colaborador da usina) como responsável pela montagem, modificando as condições determinadas nos seus projetos iniciais, desde então, mais de dez anos se passaram e não houve mudança.

A falta de incentivo para as usinas e de diálogo com as universidades, dificulta o surgimento de novos estudos e utilização de novas tecnologias.

O fermentador é um tanque vertical, cilíndrico cônico, construindo em aço carbono ou aço inox, utilizado no processo de fermentação alcoólica, que possui uma complexa geometria dificultando assim, sua análise estrutural. Neste trabalho, objetivou-se então a apresentação de um novo modelo geométrico, obtenção das tensões máximas e reações nas bases pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Para a determinação das cargas atuantes de vento e espessura dos componentes foram utilizadas as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

1.1 UTILIZAÇÕES DE NORMAS

O fermentador possui uma pressão manométrica interna de projeto de 49 [kPa] e o código “ASME Section VIII, Division 1” limita a pressão manométrica interna, máxima de 20685 [kPa] e mínima de 103 [kPa], ou pressão externa máxima de 103 [kPa], conforme tabela 1, e a norma NBR 7821 (1983), abrange apenas tanques sujeitos a uma pressão próxima da atmosférica. De acordo com o parágrafo U.1 do código “ASME Section VIII, Division I” o valor mínimo da pressão interna de projeto é de 98,0665 [kPa] ou 1,0 [bar], mesmo para os vasos que operam com pressão nula ou muito baixa.

Tabela 1 – Limitação de pressão do código “ASME Section VIII, Division I” e do fermentador

	Pressão máxima interna [kPag]	Pressão mínima interna [kPag]	Pressão externa máxima [kPag]
ASME Sec. VIII Division I	20685	103	103
Fermentador	49	0	0

A não utilização como vaso de pressão justifica-se pela dificuldade na fabricação dos tampos toricônicos de grandes diâmetros que substituiriam o teto e o fundo cônico.

1.2 NECESSIDADE DE NOVAS NORMAS

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) realizou um estudo de cenários de exportação brasileira de etanol para os EUA, conforme tabela 2, tendo em vista a decisão da “Environmental Protection Agency – EPA” de 04/02/2010, que definiu o etanol de cana-de-açúcar como biocombustível avançado (capaz de reduzir 61% das emissões de GEEs), baseada nos dispositivos estabelecidos pela “Energy Independence and Security Act of 2007 – EISA”.

Tabela 2 – Cana-de-açúcar, usinas e áreas adicionais para atender aos cenários propostos, EPE (2010).

	Etanol adicional* (bilhões de litros)	Cana-de-açúcar adicional (milhões de tc)	Cana-de-açúcar total (milhões de tc)	Usinas necessárias adicionais em 2014	Hectares adicionais (milhões)
Cenário I	13,731	170	1039	146	1,93
Cenário II	7,107	88	957	76	1,00
Cenário III	3,321	41	910	35	0,47

* Diferenças entre os volumes de etanol a serem exportado para os EUA em cada cenário e os previstos no PDE, EPE (2010).

Segundo a EPE (2010), no cenário I, haveria a necessidade de 146 usinas adicionais em 2014 e 1,93 milhões de hectares de plantio de cana-de-açúcar. No cenário II, seriam necessárias 76 usinas adicionais e 1,0 milhão de hectares, enquanto que, no cenário III, seriam 35 usinas adicionais e 0,47 milhão de hectares, justificando-se assim uma maior atenção na elaboração de normas voltadas para o setor sucroalcooleiro.

Outros equipamentos utilizados no setor sucroalcooleiro como: decantador, flotador, tanque de flash, tachos de cozimento, silo de açúcar e evaporadores poderiam ser enquadrados nos novos estudos a serem realizados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 BREVE HISTÓRICO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A análise por elementos finitos é uma técnica de análise de engenharia, utilizada para simular o comportamento de estruturas complexas para as quais não existe solução exata. Embora tenha historicamente iniciado em análises estruturais, a técnica é hoje aplicada a uma vasta gama de áreas de engenharia incluindo escoamento de fluidos, transferência de calor e eletromagnetismo.

O conceito básico de elementos finitos é bastante simples: se um problema é muito complexo para ser resolvido, crie subconjuntos menores e de mais fácil manuseio para os quais possam achar as soluções. Então, assumindo que o comportamento do todo complexo pode ser aproximado pela soma dos comportamentos de suas partes, monte todos os resultados individuais de forma a obter uma solução para o problema inteiro.

O processo cria um modelo matemático que subdivide o modelo complexo e normalmente bastante grande em pequenos pedaços de forma regular chamado elementos. O comportamento dos elementos e suas interações uns com os outros é observada e analisada num número finito de pontos de conexão, localizados nos vértices e nas arestas dos elementos. Estes pontos especiais são chamados nós. A rede de elementos e nós é chamada de malha.

O processo dos elementos finitos usa as propriedades geométricas e de material dos elementos bem como os efeitos dos carregamentos e restrições conhecidos para calcular a resposta característica nos nós. Nas análises estruturais esta resposta é o deslocamento nodal. Os valores secundários, que na análise estrutural são as tensões e deformações, são todos calculados a partir dos resultados primários.

Conforme relatado por Chandrupatla, CHANDRUPATLA (1991), as idéias básicas do método dos elementos finitos se originaram a partir dos avanços na análise estrutural de aeronaves. Em 1941, Hrenikoff apresentou uma solução de

problemas de elasticidade utilizando o método “framework”. O artigo de Courant, que utilizava interpolação polinomial em sub-regiões triangulares em problemas de torção, surgiu em 1943. Turner derivou matrizes de rigidez para barras, vigas e outros elementos e apresentou seus resultados em 1956.

Segundo HUEBNER (1982) “em engenharia este método foi usado pela primeira vez em 1960 por Clough num estudo sobre problemas de elasticidade plana”. Originalmente o método foi implementado no estudo de tensões em aeronaves. A partir do trabalho de Clough no início dos anos 60, o método de elementos finitos foi usado extensivamente para análise de tensões lineares, deflexão e vibração em diversas áreas da engenharia, já que na época começava a se reconhecer a eficácia do método. Um livro escrito por Argyris em 1955 sobre teoremas de energia e métodos matriciais estabeleceu os fundamentos para desenvolvimentos futuros em estudos de elementos finitos. O primeiro livro de elementos finitos, de Zienkiewicz e Chung foi publicado em 1967. No final da década de 60 e no início dos anos 70, a análise por elementos finitos foi aplicada a problemas não lineares e grandes deformações. O livro de Oden em não linearidades é de 1972.

Os anos 70 ficaram para os desenvolvimentos matemáticos. O desenvolvimento de novos elementos e estudos de convergência se inclui nesta categoria.

Hoje, a evolução dos "mainframes" e a disponibilidade de poderosos microcomputadores trouxeram o método ao alcance de todos, inclusive estudantes e engenheiros de pequenas indústrias.

2.1.1 Tópicos do método de análise por método de elementos finitos

Para SÁNCHEZ (2001) o método dos elementos finitos considera a região (contínuo) de solução do problema formada por pequenos elementos interligados entre si. A região em estudo é modelada ou aproximada por um conjunto de elementos discretos pré-definidos. Uma vez que estes elementos podem ser colocados juntos em um número incontável de diferentes configurações, pode-se

modelar formas geométricas bastante complexas. Além disso, possibilita que o projetista tenha bastante flexibilidade na aplicação de cargas e condições de contorno, o que torna este método o mais amplamente utilizado para análises estruturais.

O método dos elementos finitos pode ser aplicado numa grande faixa de problemas de engenharia que envolve valores de contorno. Em um problema de valor de contorno, uma solução é procurada na região do corpo (domínio), enquanto nos contornos desta região os valores das variáveis dependentes (ou suas derivadas) são conhecidos.

Segundo RAO (1989) e OWEN (1980) os problemas que podem ser resolvidos pelo método dos elementos finitos podem ser classificados conforme descrito na tabela 3.

- a) problemas de equilíbrio (exemplo, análise estática estrutural);
- b) problemas de autovalor (exemplo, análise dinâmica estrutural);
- c) problemas de propagação (exemplo, análise transiente no tempo).

Tabela 3 - Áreas de aplicação do método dos elementos finitos, RAO (1989).

Área de estudo	Problemas de equilíbrio	Problemas de autovalores	Problemas de propagação
Engenharia civil estrutural.	Análise estática de estruturas civis.	Freqüências naturais e modos de vibrar de estruturas. Estabilidade de estruturas.	Propagação de ondas de tensão. Resposta de estruturas a cargas aperiódicas.
Estruturas aeronáuticas.	Análise estática de estruturas de aviões, foguetes, mísseis e espaçonaves.	Freqüências naturais e estabilidade de estruturas aeronáuticas	Resposta de estruturas de aviões a cargas aleatórias. Resposta dinâmica de aviões e espaçonaves a cargas aperiódicas
Condução de calor	Estado de distribuição de temperatura em sólidos e fluidos	-----	Transientes de fluxo de calor em bocais de foguetes, motores de combustão interna, turbinas e estruturas de edifícios.
Geomecânica	Análise de escavações, muros de arrimo, túneis, problemas de interação de estruturas de solos e rochas. Análise de tensões em solos, pilares e fundações de máquina.	Freqüências naturais e modos de vibrar de sistemas de reservatórios e problemas de interação solo-estrutura	Transientes de problemas de interação solo estrutura. Transientes em solos e rochas. Ondas de propagação de tensão em solos e rochas.

Tabela 3 - Áreas de aplicação do método dos elementos finitos, RAO (1989). (continuação)

Área de estudo	Problemas de equilíbrio	Problemas de autovalores	Problemas de propagação
Engenharia hidráulica e de recursos hídricos.	Análises de potencial de fluxos, fluxos de superfícies livres, fluxos viscosos, problemas aerodinâmicos transônicos. Análise de estruturas hidráulicas	Períodos naturais e modos de vibrar de lagos e portos. Movimento de líquidos em reservatórios rígidos e flexíveis.	Análises de problemas de propagação de ondas e fluxos instáveis de fluidos. Transientes em meios porosos. Dinâmica de gases rarefeitos. Fluxos magnetohidrodinâmicos.
Engenharia nuclear	Análise de níveis de pressão nuclear e estruturas de contenção. Estado de distribuição de temperatura em componentes de reatores.	Freqüências naturais e estabilidade de estruturas de concentração. Distribuição de fluxo de nêutrons.	Resposta de estruturas de contenção a cargas dinâmicas. Transientes de distribuição de temperatura e análise viscoelástica e térmica de estruturas de reatores.
Engenharia biomédica	Análises de tensão de ossos e dentes. Capacidade de carga em implantes e sistemas protéticos. Mecanismo das válvulas do coração.	-----	Análise de impactos em articulações. Dinâmica de estruturas anatômicas.
Projeto mecânico	Problemas de concentração de tensões em dutos, pistões, materiais compósitos, acoplamentos e engrenagens.	Freqüências naturais e estabilidade de acoplamentos, engrenagens e máquinas ferramentas.	Problemas de quebras e fraturas sob cargas dinâmicas.

2.1.2 Análise estática

2.1.2.1 Conceitos

Uma simulação de tensão executa um tipo particular de análise por elementos finitos chamada estática. A análise linear estática é a mais básica e amplamente utilizada. Ela resolve problemas de deformação elástica, tensões, deformações e forças de reação que resultam quando carregamentos e restrições são aplicados em um objeto. As seguintes considerações são inerentes numa análise linear estática:

- a) comportamento linear;

Uma estrutura exibe comportamento linear se as respostas calculadas (tensão, deslocamento etc.) estão linearmente relacionadas com os carregamentos aplicados. Além disso, quando os carregamentos são removidos, a estrutura retorna para a sua posição original não deformada.

b) carregamento estático;

Carregamentos estáticos não se movem, não variam com o tempo e se presume que sejam aplicados lentamente para não produzir efeitos dinâmicos. Na realidade, a maioria das condições de carregamento são dinâmicas em sua natureza, pois variam com o tempo. Porém, se esta variação é lenta, os carregamentos não irão produzir um comportamento dinâmico significativo.

c) materiais elásticos lineares;

A consideração de materiais elásticos lineares é que a tensão é diretamente proporcional à deformação e que os carregamentos não levam o material além do seu limite de escoamento, isto é, o material permanece elástico. Além disso, considera-se que os materiais sejam constantes, homogêneos e isotrópicos:

- a) as propriedades dos materiais constantes independem da temperatura;
- b) as propriedades dos materiais homogêneos são constantes ao longo de todo o volume;
- c) as propriedades dos materiais isotrópicos são idênticas em todas as direções;
- d) pequenas deformações.

As deformações de qualquer parte da estrutura, resultante dos carregamentos e restrições aplicados, são consideradas pequenas comparadas com as dimensões globais do modelo. Por exemplo, a deflexão de uma placa deve ser substancialmente menor que a sua espessura e as deflexões de vigas são assumidas substancialmente menores que a menor dimensão da secção transversal da viga.

2.1.3 Elementos 2D

Os elementos 2D são utilizados principalmente nas seguintes situações:

- a) análise plana: modelos em que os carregamentos e deformações estão restritos a um único plano;
- b) casca: modelos em que, apesar de termos um estado de tensões e deformações tridimensional, as pequenas espessuras não possibilitam a utilização de elementos sólidos. Ao contrário dos elementos utilizados nas análises planas, os elementos de casca devem ter rigidez a flexão;
- c) axissimetria: modelo envolvendo sólidos de revolução com carregamento axissimétricos (pressão interna, forças centrífugas, etc.). Nestes casos todas as seções radiais terão o mesmo comportamento e análise pode ser reduzida a uma análise plana.

Os elementos 2D são, geometricamente, mais simples que os elementos sólidos. Requerem, no entanto, informação sobre a espessura de cada elemento.

2.1.3.1 Principais tipos

Os elementos planos mais comuns são os quadrangulares e os triangulares. Com o desenvolvimento de rotinas para a geração automática de malha com elementos quadrangulares, os elementos triangulares estão cada vez menos usados.

Os elementos em sua forma mais simples são de primeira ordem apresentados na figura 1. Isto significa que possuem nós somente nos seus vértices. Mantendo a mesma forma, pode-se ter nós adicionais sobre as arestas dos elementos permitindo que as arestas se deformem não linearmente. Com isto, a precisão do cálculo aumenta sem que se aumente o número de elementos.

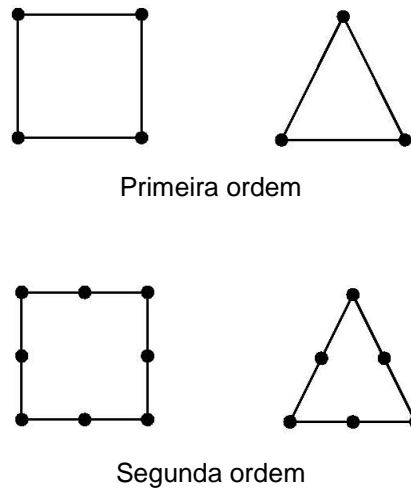


Figura 1 - Elementos de primeira e segunda ordem.

2.1.3.2 Propriedades

Para os elementos 2D, é necessário informar, além das propriedades do material utilizado, a sua espessura. Alguns elementos permitem a utilização de espessura variável.

2.1.3.3 Vinculações

Nos elementos de casca os nós possuem seis graus de liberdade. Além das três translações e três rotações.

2.1.3.4 Simetria

As condições necessárias para que as condições de simetria sejam aplicáveis: simetria geométrica, carregamentos e vinculações também simétricos.

2.1.3.5 Axissimetria

Como exemplo, foi considerado um tanque tipo esfera submetido a pressão interna. Neste caso, existe uma simetria em relação ao eixo do modelo, ou seja, todas as secções radiais do tanque terão o mesmo comportamento e o problema pode ser reduzido a uma análise plana desta secção. Este recurso, quando aplicável, reduz consideravelmente o tamanho do modelo e deve utilizar elementos desenvolvidos especialmente para este fim.

2.2 BREVE HISTÓRICO DA PRODUÇÃO DE ETANOL

Segundo TOSETTO (2002). “No Brasil, produz-se álcool desde o início do século, mas devido à crise do petróleo no início da década de 70, o governo investiu na produção de etanol, implantando o Proálcool (Programa Nacional de Álcool), em 1975. Com isso, o Brasil tornou-se o primeiro país do mundo a desenvolver um programa alternativo de combustível em substituição à gasolina”.

Segundo SIQUEIRA (1993), além das razões pelas quais o programa foi criado, destacam-se os seguintes fatores:

- a) trata-se de combustível menos poluente;
- b) utiliza tecnologia 100% nacional;
- c) emprega mão-de-obra direta e com fixação do homem no meio rural.

A partir do lançamento do programa houve, segundo BERTELLI (1992), um crescimento progressivo na produção de álcool, de 500 milhões de litros em 1975, até 12,7 bilhões de litros na safra de 1991/1992. O álcool carburante, em espécies anidro e hidratado, participa aproximadamente com 12% do consumo de derivados de petróleo.

ANGELIS (1986) já alertava que mesmo com a diminuição do preço do petróleo, ocorrido após o plano Proálcool e sua estabilização, os países que não são auto-suficientes em petróleo, para prover-se de energia no momento e no futuro necessitam desenvolver diretrizes que conduzam ao aperfeiçoamento de todas as possibilidades de alternativas de aproveitamento de energia.

Nos EUA existe uma associação de 16 estados na produção de álcool etílico por via fermentativa, utilizando o milho como matéria prima. Segundo PHILIPPIDIS, G. P. & HATZIS (1997) a produção de etanol através da fermentação alcoólica de substrato açucarado está despertando o interesse dos EUA, podendo-se converter em poucos anos num vital programa para a sustentação da próspera economia americana, reduzindo-se significativamente a importação de petróleo e garantindo, para um futuro bem próximo, a continuação do uso de um combustível alternativo e principalmente renovável, tornando-se já um tema de segurança nacional.

2.2.1 Processos fermentativos

Atualmente existem três tipos básicos de processos fermentativos para a obtenção de etanol, são eles: batelada, batelada alimentada (Melle-Boinot) e contínua.

2.2.1.1 Processo batelada

No passado foi muito utilizado na produção de etanol, mas segundo MAIORELLA et al (1981), este processo é lento, pois se gasta muito tempo para o preparo do reator. O reator tem que ser, a cada batelada, limpo e preparado, o mosto e o inóculo carregado ao sistema.

Podem ser utilizados dois sistemas: o primeiro chamado de sistema de cortes que consiste em realizar a primeira fermentação, então o volume de mosto é dividido em dois reatores, completando ambos com mosto deixando fermentar, e assim sucessivamente. O segundo é o sistema de cultura pura ou pé-de-cuba: para cada fermentação, utiliza-se de uma cultura pura, adiciona-se o mosto até completar o volume do reator.

2.2.1.2 Processo batelada alimentada

Neste processo não se pode ultrapassar um valor limite de substrato, fazendo a alimentação do substrato ao mosto parceladamente, por pulsos ou contínua. Neste caso há o reaproveitamento do inoculo que é separado do vinho por centrifugação.

Este processo é uma variante do processo batelada. É também conhecido como “Melle-Boinot”. ALMEIDA (1960), descreve as seguintes vantagens do processo:

- economia de açúcar devido à menor reprodução celular elevando o rendimento em etanol;
- eliminação de contaminantes pela centrifugação do vinho (separação de células de levedura);
- fermentação mais pura devido ao tratamento de leite de levedura (tratamento ácido), e eliminação da necessidade de cultura pura no preparo do pé-de-cuba, prática exigida no processo clássico, diminuindo, portanto a complexidade das operações da planta.

2.2.1.3 Processo contínuo

Neste processo há a retirada contínua do produto a uma vazão igual à da alimentação, permitindo um fluxo contínuo, diminuindo assim, o efeito inibitório do etanol e do substrato, não sofrendo interrupções, que quando bem operado atinge maior produtividade e rendimento.

Segundo RODRIGUES et al. (1992) este processo tem apresentado uma maior produtividade, com um aumento que pode atingir 100% em relação à batelada alimentada. Os novos projetos que estão sendo desenvolvidos consideram a cinética do processo e utilizam ferramentas matemáticas e computacionais. Com isto obtêm-se processos que reduzem gastos em mão-de-obra, aumentam a produtividade, reduzem o tempo não produtivo (carga, descarga, limpeza), trabalham

em condições ótimas de operação no estado estacionário e reduzem a utilização de insumos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O fermentador é constituído por um corpo cilíndrico de 15.279 [mm] de diâmetro interno e altura 19.520 [mm], para recuperação dos gases da fermentação o tampo superior ou teto é fechado, com semi-ângulo no vértice de 75° e fundo cônico com 45°. Este conjunto se apóia a oito colunas tipo perfil soldado da série CS 650x330 com altura de 10.200 [mm] e 14.629 [mm] de centro a centro e ficando como responsável pela transição das cargas uma viga tipo caixão, conforme figura 2. O conjunto inteiro é formado por chapas, perfis laminados e soldados totalizando uma altura de 31.845 [mm], para facilitar a análise foi considerado o aço estrutural com limite de escoamento de 250 [MPa] para perfis e chapas utilizados no modelo.

No processo de fermentação é considerado como volume útil 95% do volume total do fermentador devido à espuma, COPERSUCAR (1987), sendo que seu volume total é de 3766 [m³] e útil de 3577 [m³]. O fluido armazenado é o mosto.

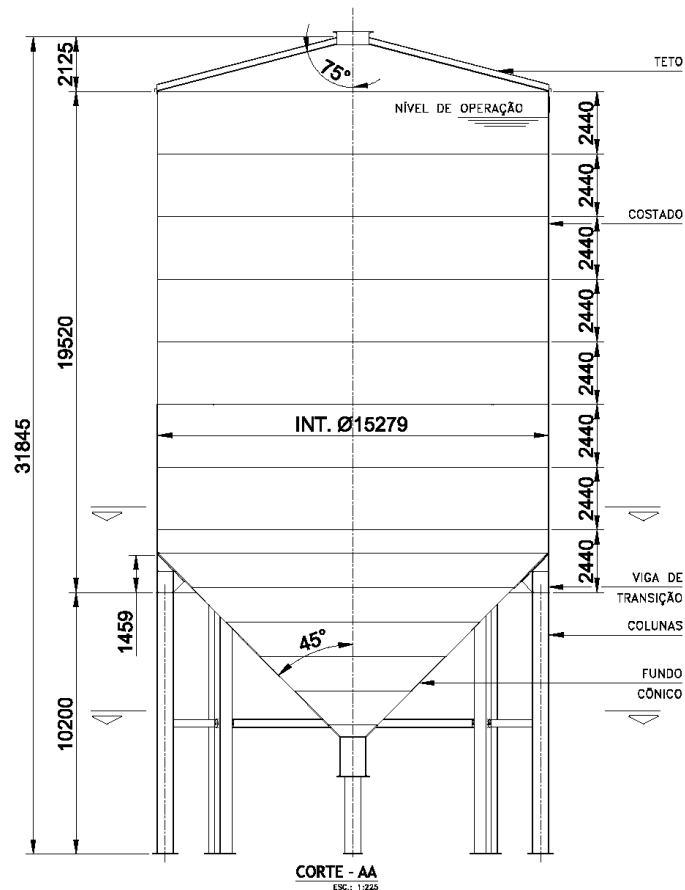


Figura 2 - Corte AA – detalhe do fermentador.

A relação entre altura e diâmetro cilíndrico não deverá ser menor que 1, sendo uma maior relação permite uma agitação mais intensa do vinho proporcionando um aproveitamento da energia cinética, COPERSUCAR (1987).

O fermentador é fechado, visando à recuperação do dióxido de carbono durante o processo de fermentação, que eleva a pressão interna até $3,9 \times 10^4$ [Pa]. No piso abaixo do fermentador estão localizadas as bombas, que são responsáveis pela recirculação do mosto por trocadores de calor para resfriamento e, posteriormente, descarregamento do fluido, como apresentado na figura 3:



Figura 3 - Instalação dos fermentadores, bombas e trocadores.

Na sua maioria o processo de fermentação batelada é composto de oito fermentadores com capacidade igual, devido ao tempo de ciclo de 12 horas e otimização de instalação.

O conjunto é montado em campo aberto sem construções vizinhas, exposto a ventos, sendo que na maioria das vezes são fabricados “in loco” e o serviço de corte dobra e solda de chapas e perfis é realizada em campo.

3.2 PARTES PARA ANÁLISE

O fermentador foi dividido em basicamente em 5 itens para melhor entendimento das partes, conforme figura 2.

- a) teto;
- b) costado;
- c) viga de transição;
- d) colunas;
- e) fundo cônico.

3.3 CARREGAMENTOS NO FERMENTADOR

Neste trabalho foram consideradas as seguintes ações para a modelagem do fermentador:

- a) peso próprio (PP);
- b) pressão hidrostática devido ao fluido armazenado (OP);
- c) pressão interna dos gases (OP);
- d) ação do vento (VT).

As seguintes ações poderiam ainda ser consideradas: peso próprio das passarelas apoiadas no corpo cilíndrico do fermentador, tubulações apoiadas nas colunas e teto, cargas durante a circulação do mosto, ação devido ao recalque diferencial da fundação, impacto de veículos e pressão externa.

Foram desconsiderados quaisquer recalques diferenciais na fundação que possam causar distorções no fermentador.

3.4 ESTRUTURA E PERIFÉRICOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP/Bauru e foram utilizados os seguintes equipamentos para a simulação pelo MEF:

- a) hardware;
 - a) processador Intel® Core™2 CPU T5500 @ 1.66GHz;
 - b) 2,00 GB de Memória RAM;
 - c) placa de vídeo com acelerador gráfico NVIDIA GeForce Go 7300 / 256 MB de memória.
- b) software.
 - a) Microsoft Windows XP Professional Service Pack (Build 2600);

- b) CAE (computer aided engineering) - ANSYS Workbench 11.0;
- c) CAD (computer aided design) - AutoCAD 2008.

Foi utilizado o ANSYS 11.0 Workbench para análise de cada uma das partes, mas outros softwares de análise por elementos finitos podem ser utilizados, pois na maioria apresentam módulos de importação de modelos CAD.

3.5 PARÂMETROS PARA ANÁLISE DO FERMENTADOR

Os parâmetros adotados para análise foram:

- a) tipo de análise: estrutural estática “Linear Static Structural Analysis”;
- b) tipo de elemento: casca “Shell”;
- c) propriedades do material: Aço estrutural “Structural steel”;
 - a) densidade – $\rho = 7850 \text{ [kg/m}^3\text{]}$;
 - b) módulo de elasticidade – $E = 200 \text{ [GPa]}$;
 - c) coeficiente de Poisson – $\nu = 0,3$;
 - d) tensão de escoamento do aço – $f_y = 250 \text{ [MPa]}$;
 - e) tensão última do aço na tração – $f_u = 460 \text{ [MPa]}$;
- d) propriedades geométricas:
 - a) formato do vaso: cilíndrico;
 - b) diâmetro interno – $d = 15279 \text{ [mm]}$;
 - c) espessura do casco – variável;
 - d) altura – $H = 31.845 \text{ [mm]}$;

3.5.1 Geometria e carregamento

Modelou-se o fermentador apenas como superfície “casca”, utilizando o Autocad 2008 para construção do modelo e exportando em extensão SAT, conforme figura 4. O arquivo gerado em SAT poderá ser utilizado em outros programas não limitando a utilização no ANSYS.

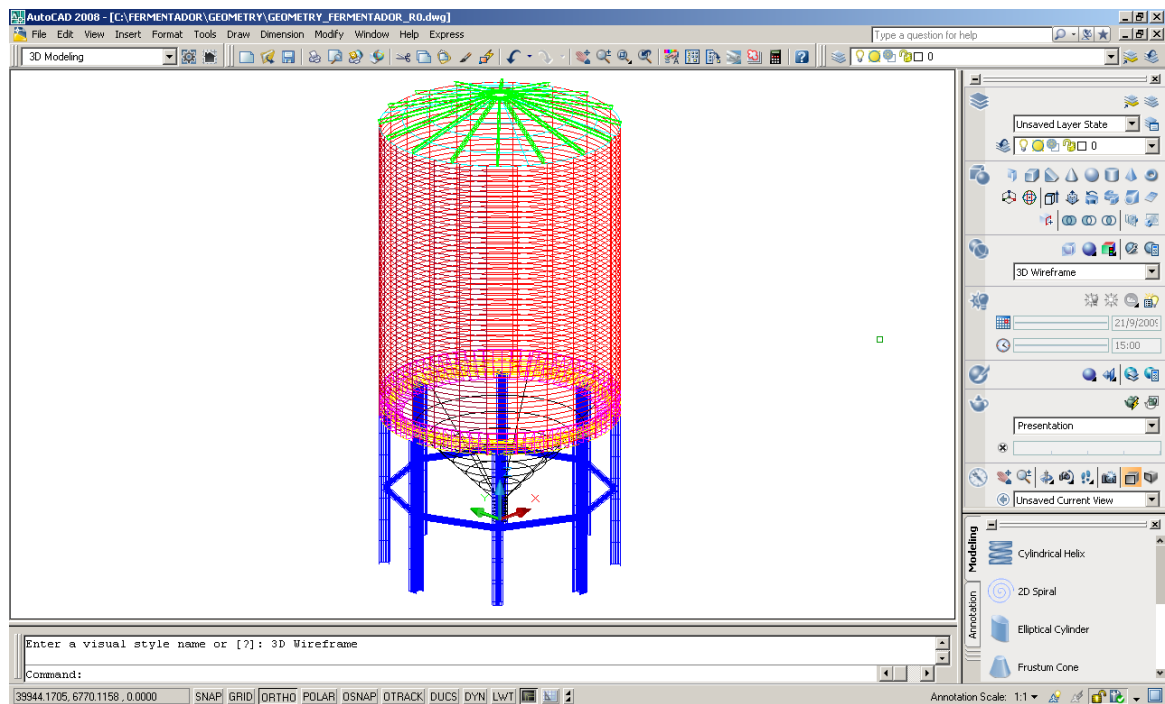


Figura 4 - Construção do modelo no Autocad v.2008.

Foi utilizado o aplicativo “DesignModeler” do pacote ANSYS 11.0 Workbench para criação do modelo geométrico importando o arquivo SAT.

No “DesigModeler” foi utilizada a ferramenta “Form New Part” na qual forma uma parte de multi-corpo de uma seleção de “corpos”, selecionando todos os 376 “corpos”, apresentados na figura 5. Se agrupando corpos em uma parte de multi-corpo que habilita o uso de Topologia Compartilhada entre os corpos. A ferramenta só é disponível se são selecionados corpos e todos esses corpos já não pertencem à mesma parte.

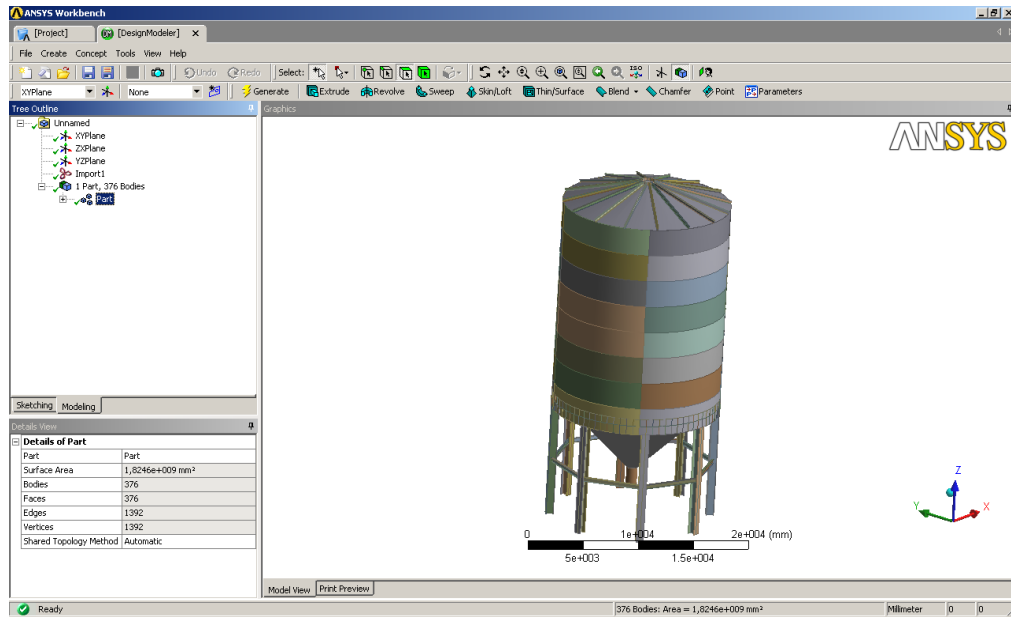


Figura 5 - Modelo importado pelo DesignModeler, a partir do formato SAT.

Utilizando o “DesignModeler” as condições de contato são geradas automaticamente, ou seja, onde os corpos se encontram são formados automaticamente podendo transferir as cargas estruturais conectando vários “corpos”.

Após a criação do modelo geométrico foi alternado para o modo “Simulation” e criado as duas análises estáticas: PP + VT e PP + OP, como indicado na figura 6.

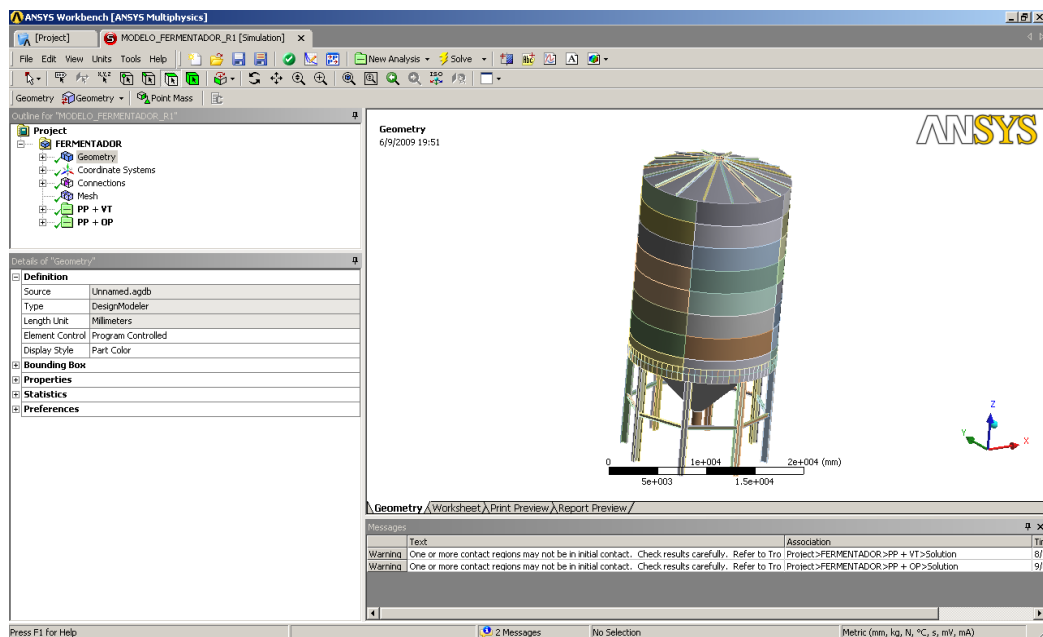


Figura 6 - Geometria do fermentador no ANSYS.

3.5.2 Restrições

Como mostra a figura 7, nas duas análises estáticas foi utilizada a restrição do tipo engaste nas bases de todas as colunas.

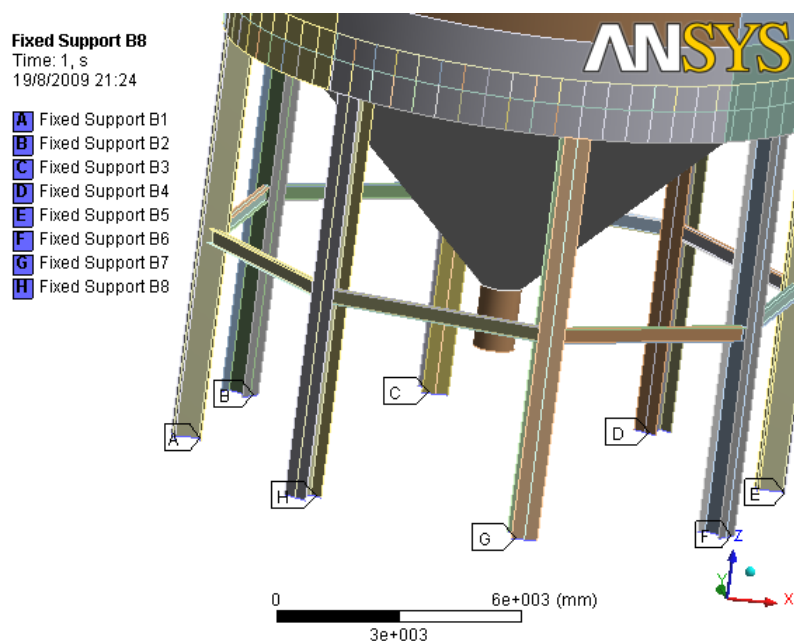


Figura 7 - Detalhe da restrição do tipo engaste nas bases das colunas.

3.5.3 Malha

Utilizou-se o elemento SHELL181, apresentado na figura 8. É satisfatório utilizar este tipo de elemento para estruturas com espessura finas tipo casca. O elemento está definido por 4 nós com seis graus de liberdade por nó: translação nos nós x, y e na direção z, e rotações em torno dos eixos x, y e z. O elemento SHELL181 é bem apropriado para aplicações de linearidade, grandes rotações e ou tensões não-lineares e também responde por efeitos de pressões distribuídas. Este elemento é associado somente com materiais elastoplásticos.

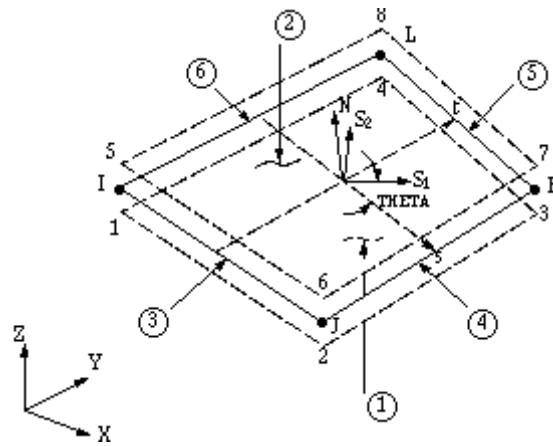


Figura 8 - SHELL181 elemento tipo casca.

Na geração da malha foi definido apenas o tamanho do elemento em 500 [mm] os números de nós e quantidades de elementos foram gerados automaticamente, sendo assim, 15231 nós e 15844 elementos.

4 SOLUÇÃO DAS PARTES

Segundo CALIL et al. (2007), a ação do vento em silos, especialmente quando vazios, tem sido responsável por inúmeros acidentes, e os silos metálicos são os que mais têm sofrido com a ação do vento, sendo assim, os silos devem ser projetados contra o arrancamento da cobertura superior. Para garantir a estabilidade global, devem ser verificadas as forças de arrancamento nos chumbadores do silo bem como o dimensionamento da placa de base corretamente para os efeitos de alavanca.

Pela semelhança na forma geométrica dos silos foram utilizadas duas situações para análise:

a) Situação 01 - PP + VT;

O fermentador vazio submetido aos esforços de vento;

- a) PP - o peso próprio de todas as partes;

- b) VT - ação do vento;

b) Situação 02 - PP + OP.

O fermentador em operação submetido ao carregamento hidrostático e a pressão interna dos gases;

- a) PP - o peso próprio de todas as partes;

- b) OP - pressão devida ao fluido armazenado

- pressão interna dos gases;

4.1 TETO

4.1.1 Espessura do teto

A NBR 7821 (1983) deixa clara a utilização da espessura nominal de 4,7 [mm] para tetos autoportantes, sendo que, deve ser projetado para suportar sua carga morta mais uma carga viva uniforme não inferior a 60 [kgf/m²] de área

projetada. Cita também, que uma espessura maior pode ser necessária para tanques de tetos autoportantes e a chapa do teto deve ser unida à cantoneira superior do tanque.

Na grande maioria os tetos são formados de chapas no mínimo de 6,3 [mm] de espessura a fim de se evitar flambagem e com reforços de perfis laminados pelo excesso de tubulações que são apoiados ao final de cada obra.

Usualmente são constituídos dos seguintes acessórios, conforme figura 9.



Figura 9 - Teto do fermentador e acessórios.

4.1.2 Carregamentos do teto

a) PP + VT;

- O peso próprio do teto é gerado pelo ANSYS, conforme figura 10.

- Ações do vento.

O cálculo dos esforços de vento no teto não foi considerado, pois a norma brasileira NBR 6123 (1988) não apresenta valores para os coeficientes de pressão externos para o teto, os valores apresentados por CALIL (2007) são para cobertura cônica lisa com 27° não podendo ser utilizados neste trabalho.

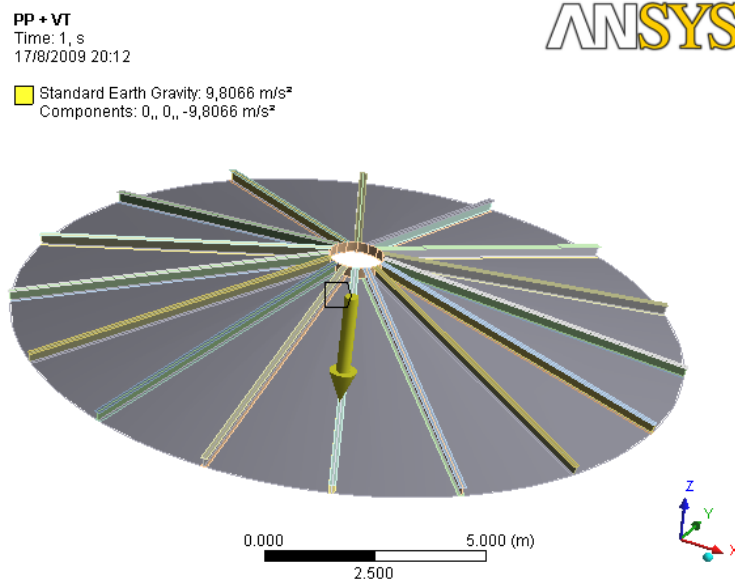


Figura 10 - Detalhe do teto e o peso próprio sendo considerado.

b) PP + OP.

- Carregamento devido à pressão interna dos gases, conforme figura 11.

No processo fermentativo os açúcares são transformados em etanol segundo a reação simplificada:



Durante a reação há liberação de gás carbônico, para a recuperação do etanol evaporado, é feita a lavagem dos gases de saída em uma torre de recheio por absorção deste em água, que é retornada ao processo, sendo está a principal finalidade do fermentador ser fechado, ficando como responsável uma tubulação de saída interligando todos os fermentadores até a torre de lavagem do gás. A pressão interna manométrica de trabalho é considerada de $3,9 \times 10^3$ [Pa], COPERSUCAR (1987), mas em alguns casos foram observadas pressões manométricas acima de $3,9 \times 10^4$ [Pa], então o fermentador será dimensionado com uma pressão interna de projeto de $4,9 \times 10^4$ [Pa] ou 0,5 [bar].

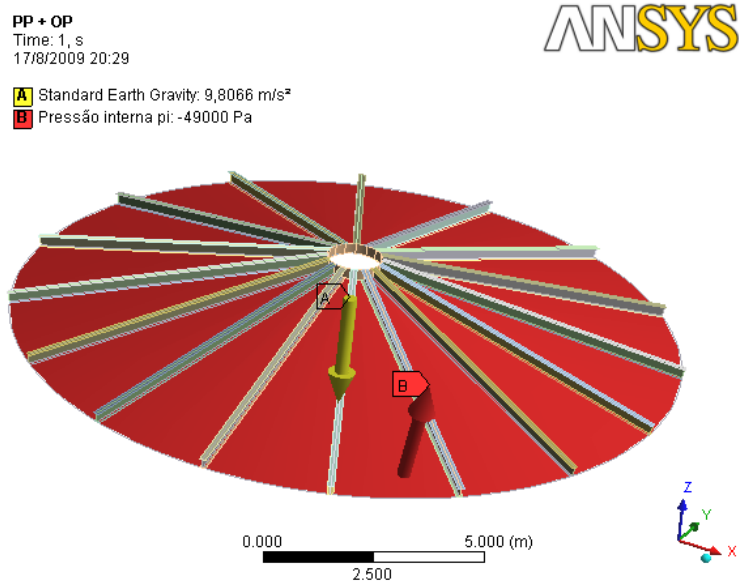


Figura 11 - Detalhe do teto, peso próprio sendo considerado e a pressão interna dos gases.

4.2 COSTADO

O costado compreende o corpo cilíndrico do fermentador que é formado basicamente de chapas calandradas em aço carbono conforme figura 12.



Figura 12 - Instalação dos fermentadores.

4.2.1 Espessura do costado

O fluido produzido após o processo de fermentação é chamado de vinho fermentado ou vinho inteiro com teor médio de álcool entre 7° a 10°GL (% em volume), onde é misturado o mosto, ou seja, uma solução de açúcar com uma concentração de sólidos de 19-22° Brix com o leite de levedura tratado ou pé-de-cuba. O leite de levedura tratado que é formado basicamente de água e adição de ácido sulfúrico (caso ocorra infecção bacteriana) com a levedura recuperada do processo de centrifugação do vinho inteiro. A proporção da mistura mosto e leite de levedura tratado é de 2:1, sendo que o tempo de fermentação varia entre 4 a 10 horas.

Para cálculo da densidade do fluido foi considerado o mosto com 22° de Brix e temperatura de 32 [°C], utilizando a equação 1 de Lyle (1957) em REIN (2007) para uma solução pura de sacarose em [kg/m³] e temperaturas menores de 100 [°C].

$$\rho = 1000 \cdot \left[1 + \frac{B \cdot (B + 200)}{54000} \right] \cdot \left[1 - 0.036 \cdot \frac{T - 20}{160 - T} \right] \quad (1)$$

Sendo B=22° e T=32° da equação 1 a densidade do mosto é 1086,77 [kg/m³].

O processo de fermentação é exotérmico, à necessidade que este calor produzido seja removido por meio de trocadores de calor a placas, mantendo-se a uma temperatura de 32 [°C], circulando água contracorrente. Para o esvaziamento e recirculação do vinho os fermentadores possuem bombas de recirculação que dependendo da velocidade de descarregamento e pressão podem causar formação de vácuo, ou seja, pressão externa nas paredes, sendo considerada de 980 [Pa], COPERSCUCAR (1987). Não há estudo do tipo de fluxo no descarregamento e circulação do mosto durante o resfriamento, podendo causar carregamento assimétricos.

Para cálculo das espessuras do costado foi utilizado a NBR 7821 (1983),

a) a espessura das chapas de cada um dos anéis do costado deve ser, em qualquer caso, o maior dos três valores seguintes:

1) espessura calculada pela fórmula apresentada na alínea “b”, em função da massa específica do líquido a ser estocado, acrescida da sobre-

espessura para corrosão, definida para cada anel, nos casos em que essa sobreespessura for indicada;

2) espessura calculada pela mesma fórmula da alínea “b” considerando-se a densidade do produto igual a um $[t/m^3]$, sem o acréscimo da sobreespessura para corrosão; (espessura encontrada foi menor que o item anterior pois a densidade do líquido é $1,08677 [t/m^3]$);

3) espessura mínima dada na alínea “c”, em função do diâmetro do tanque;

b) a fórmula para o cálculo da espessura de cada anel do costado é a seguinte:

$$t = 0.040 \cdot d \cdot (h - 0.3 \cdot \rho) \quad (2)$$

Onde:

t = espessura mínima, em [mm]

d = diâmetro interno do tanque quando as chapas tiverem a face interna comum, em metros, ou seja, $15,279 [m]$

h = distância entre a linha do centro da junta inferior do anel considerado à cantoneira de reforço da borda superior do costado, ou à parte inferior de qualquer ladrão que limite o enchimento do tanque, em metros [m]

ρ = densidade do líquido a ser estocado, em $[t/m^3]$, ou seja, $1,09 [t/m^3]$

Segundo a NBR 7821, a equação 2 deriva-se da expressão teórica da tensão de membrana circunferencial em um cilindro submetida à pressão interna, considerando-se a tensão máxima atuando $300 [mm]$ acima da linha do centro da junta horizontal inferior do anel considerado. O coeficiente numérico da fórmula resulta da consideração de uma tensão máxima admissível de $14,80 [kgf/mm^2]$ ($145,14 [MPa]$).

c) a espessura nominal das chapas do costado, não deve ser inferior aos valores apresentados na tabela 4; entende-se como espessura nominal a espessura da chapa do tanque logo após a montagem; as espessuras indicadas na tabela 4 são baseadas em requisitos de montagem.

Tabela 4 - Espessura nominal mínima para chapas do costado, NBR 7821.

Diâmetro nominal do tanque d (m)	Espessura nominal mínima t_m (mm)
$d < 5$	4,5
$15 \leq d < 35$	6,3
$35 \leq d < 60$	8,0
$60 < d$	9,0

Será considerado a sobre-espessura de corrosão 0,4 [mm] pela variedade de líquidos presentes e condições de serviço.

a) propriedades geométricas:

- a) diâmetro interno - $d = 15,279$ [m];
- b) altura - $h = 2,440$ [m] (cada anel);
- c) sobre-espessura pela corrosão – $C = 0,4$ [mm];

b) fluido: mosto.

- a) Densidade – $\rho = 1,090$ [t/m³];

Foi elaborado a tabela 5, calculando-se as espessuras para cada anel utilizando a equação 2, sendo acrescida a sobre-espessura e levando em consideração a espessura nominal mínima de 6,3 [mm]

$$t = 0.040 \cdot d \cdot (h - 0.3 \rho) + C \quad (3)$$

Onde:

t = em [mm]

d = em [m]

h = em [m]

ρ = em [t/m³]

C = em [mm]

Tabela 5 - Espessura para cada anel do fermentador.

Anel	distância h (m)	Espessura mínima calculada t (mm)	Espessura padrão t (mm)
1	2,44	6,3	6,3
2	4,88	6,3	6,3
3	7,32	6,3	6,3
4	9,76	6,3	6,3
5	12,2	7,66	8,0
6	14,64	9,15	9,5
7	17,08	10,64	12,7
8	19,52	12,13	12,7

4.2.2 Carregamentos no costado

a) PP + VT.

- O peso próprio do costado é gerado pelo ANSYS.

- Ações do vento

Devido ao aumento das dimensões dos fermentadores executados nas plantas industriais, a força do vento é analisada com o tanque vazio, a fim de obter as reações nas bases das colunas e deformações nas chapas do costado devido à pressão do vento.

4.2.2.1 Pressão dinâmica do vento

Foram utilizadas para os cálculos de esforços de vento as recomendações da norma NBR 6123 (1988).

Da equação 4 foi obtida a velocidade característica (V_k) em [m/s]:

$$V_k = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot V_o \quad (4)$$

Fator topográfico S_1 , leva em consideração as características do terreno como elevações que podem alterar a velocidade do vento, considerado neste trabalho um terreno plano ou fracamente acidentado: $S_1 = 1,0$;

Fator S_2 , Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno. Este fator leva em consideração à rugosidade do terreno a variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e as dimensões da edificação:

- a) classe B; Utilizada para edificação ou parte para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 e 50 [m];
- b) categoria II; Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas.

Sendo z igual altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado, foram adotados cinco pontos a partir do terreno como mostra a figura 13, como não há área de chapas em contato com o vento no ponto 1, então os valores encontrados na tabela 6 para S_2 : 0,98; 1,02; 1,04; 1,08.

Tabela 6 - Fator S_2 , NBR 6123.

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,26	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30

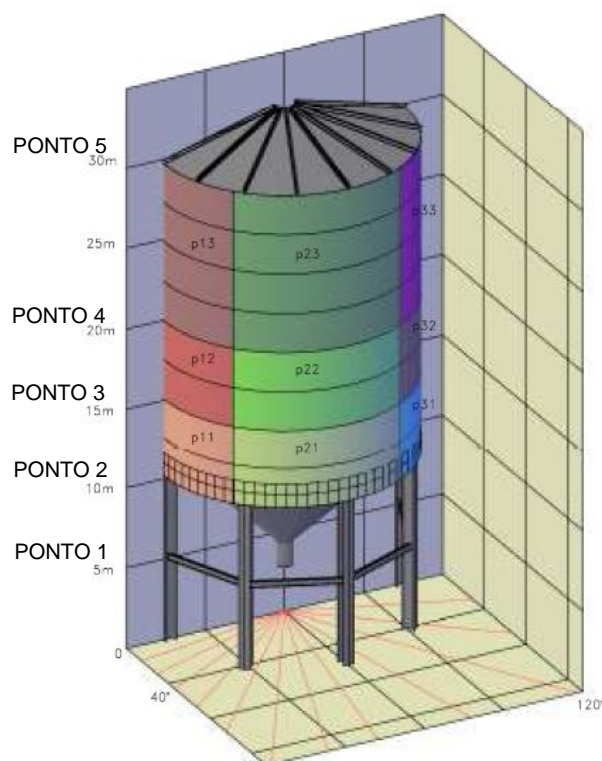


Figura 13 - Pontos de aplicação do vento.

Fator estatístico S_3 , sendo este fator que leva em consideração conceitos estatísticos, grau de segurança e vida útil da edificação:

- a) grupo 3; edificações e instalações industriais com baixo fator de 3 ocupações (depósitos, silos, construções rurais, etc.). $S_3 = 0,95$.

A NBR 6123 conceitua a velocidade básica do vento V_0 como sendo a velocidade de uma rajada 3 [s], excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 [m] acima do terreno, em campo aberto e plano, determinada em [m/s], conforme figura 14.

Para determinar a velocidade básica do vento V_0 se faz necessário definir um ponto de localização. Desta forma o estado escolhido é o de São Paulo, onde a velocidade básica do vento V_0 é de 45 [m/s].

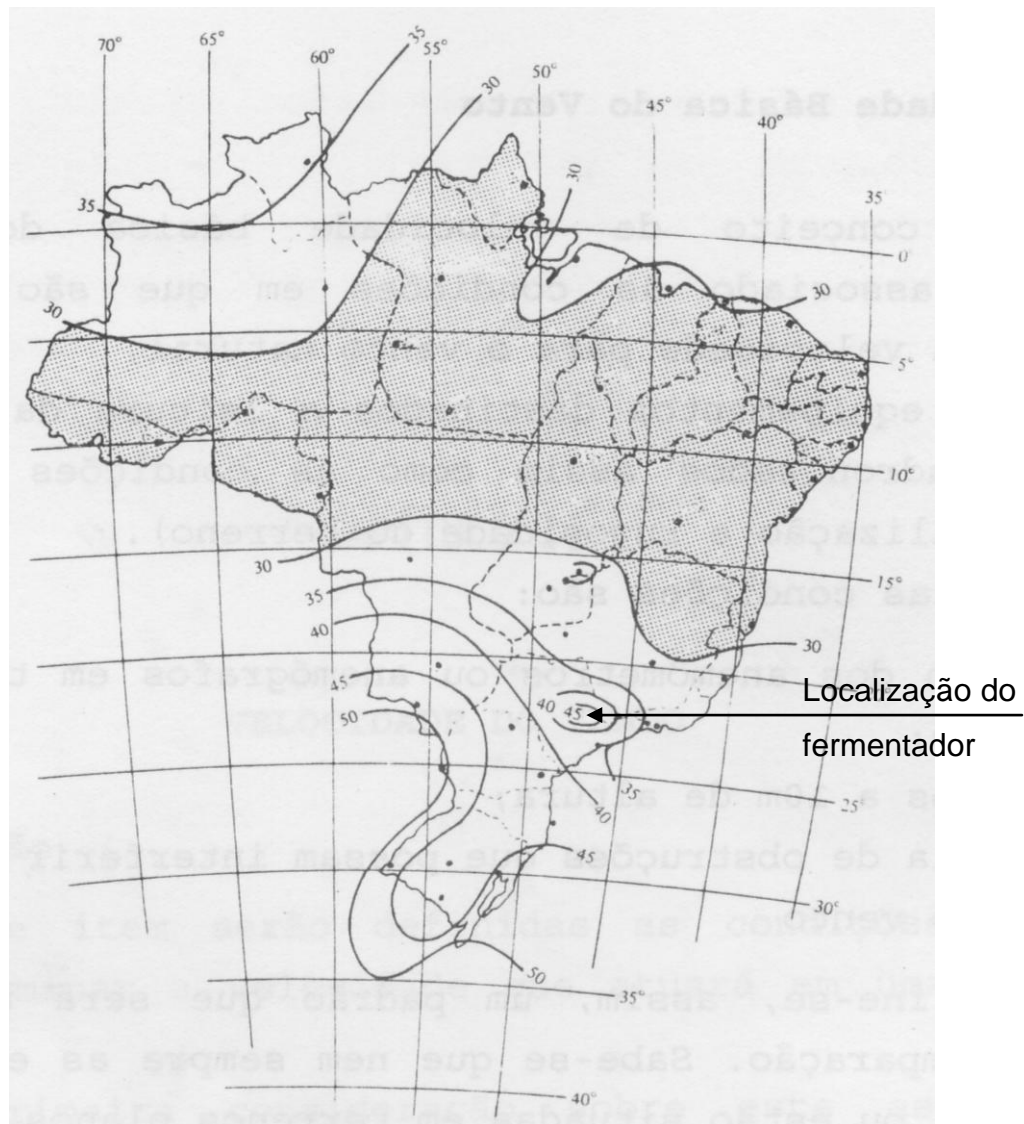


Figura 14 - Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s) , NBR 6123.

Da equação 4 foram obtidos os valores da velocidade características e em seguida a pressão dinâmica do vento conforme equação 5 retirada da norma NBR 6123.

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (5)$$

Onde:

q = em $[N/m^2]$

V_k = em $[m/s]$

Sendo a pressão q em condições de pressão 1 [atm] e temperatura 15 [°C], apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Resultados da pressão dinâmica do vento.

z (m)	V ₀ (m/s)	S ₁	S ₂	S ₃	V _k (m/s)	q (N/m ²)
≤ 5	45,00	1,00	0,92	0,95	39,33	948,22
10	45,00	1,00	0,98	0,95	41,90	1075,93
15	45,00	1,00	1,02	0,95	43,61	1165,56
20	45,00	1,00	1,04	0,95	44,46	1211,71
30	45,00	1,00	1,08	0,95	46,17	1306,71

4.2.2.2 Coeficientes de pressão e de forma externos

Os coeficientes de pressão externa c_{pe} da tabela 8 devem ser utilizados para cilindros de eixos verticais sendo que o vento incida perpendicularmente ao eixo e o fluxo fique acima da região crítica, ou seja, número de Reynolds $Re > 420000$, determinado pela equação 6 retirada da norma NBR 6123:

$$Re = 70000 \cdot V_k \cdot d \quad (6)$$

Onde:

V_k = em [m/s]

d = em [m]

Tabela 8 - Tabela simplificada de distribuição das pressões externas em edificações cilíndricas de seção circular válida para $Re > 420000$, NBR 6123.

β	Superfície lisa
	$h/d \leq 2,5$
	C_{pe}
0°	+1,0
10°	+0,9
20°	+0,7
30°	+0,35
40°	0
50°	-0,5
60°	-1,05
70°	-1,25
80°	-1,3
90°	-1,2
100°	-0,85
120°	-0,4
140°	-0,25
160°	-0,25
180°	-0,25

A direção do vento e o ângulo de inclinação β em sentido horário, foi considerado conforme figura 15.

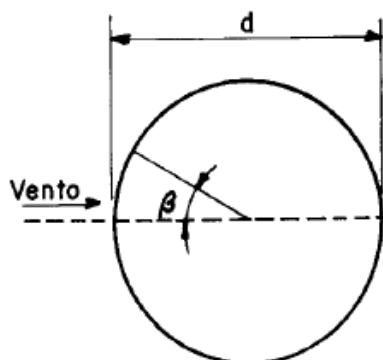


Figura 15 - Esquema da direção do vento, NBR 6123.

Como o fermentador é impermeável ao ar, a pressão no seu interior será invariável no tempo e independente da velocidade da corrente de ar externa, portanto o coeficiente de pressão interna c_{pi} será igual a zero.

Valores positivos dos coeficientes de pressão externa ou interna correspondem a sobrepessões, e valores negativos correspondem a sucções.

4.2.2.3 Pressão causada pelo vento

A norma NBR 6123 considera que a força do vento depende da diferença de pressão nas faces opostas (externa e interna) da parte da edificação em estudo e adota:

$$\Delta p = (C_{pe} - C_{pi}) \cdot q \quad (7)$$

Para determinação da pressão do vento foi utilizada a equação 7 e elaborada a tabela 9 para diferentes alturas e coeficientes de pressão externa, como também representada na figura 16.

Tabela 9 - Pressão do vento no fermentador.

β	C_{pe}	z (m)			
		10	15	20	30
		q (N/m ²)			
		1075,93	1165,56	1211,71	1306,71
Δp (N/m ²)					
0°	+1,0	1075,93	1165,56	1211,71	1306,71
10°	+0,9	968,34	1049,00	1090,54	1176,04
20°	+0,7	753,15	815,89	848,20	914,70
30°	+0,35	376,58	407,94	424,10	457,35
40°	0	0	0	0	0
50°	-0,5	-537,97	-582,78	-605,86	-653,36
60°	-1,05	-1129,73	-1223,83	-1272,30	1372,05
70°	-1,25	-1344,92	-1456,94	-1514,64	1633,39
80°	-1,3	-1398,71	-1515,22	-1575,23	1698,73
90°	-1,2	-1291,12	-1398,67	-1454,05	1568,06
100°	-0,85	-914,54	-990,72	-1029,96	1110,71
120°	-0,4	-430,37	-466,22	-484,68	-522,69
140°	-0,25	-268,98	-291,39	-302,93	-326,68
160°	-0,25	-268,98	-291,39	-302,93	-326,68
180°	-0,25	-268,98	-291,39	-302,93	-326,68

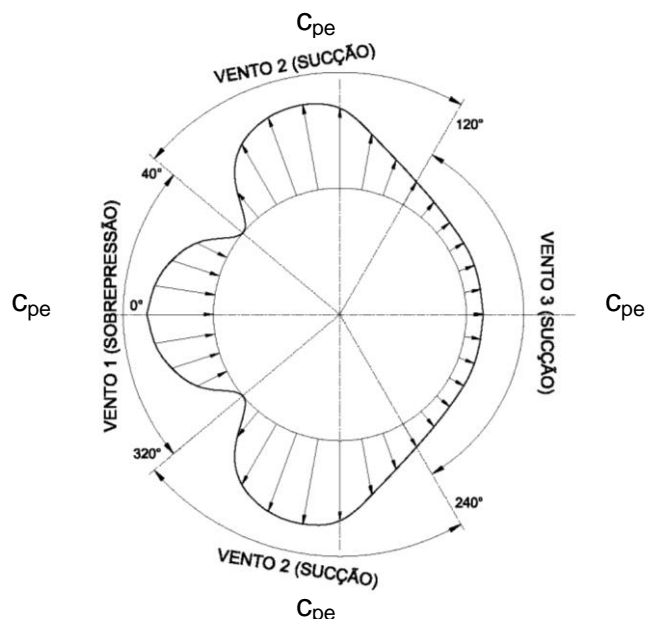


Figura 16 - Aplicação da pressão do vento.

Para a pressão do vento no fermentador foi simplificado a aplicação das pressões somente no costado, ficando excluído o fundo cônico e o teto, devido à falta do coeficiente de pressão e de forma externo (c_{pe}), conforme tabela 10.

A aplicação da pressão na superfície cilíndrica foi demonstrada na figura 13, para facilitar a aplicação das cargas no costado devido à pressão do vento, foi desmembrado os ventos em: vento 1 (sobrepessão), vento 2 (sucção) e vento 3 (sucção) e os maiores valores de pressão nos intervalos entre $0^\circ - 40^\circ$, $40^\circ - 120^\circ$ e $120^\circ - 180^\circ$, conforme figura 17 e valores da tabela 9 em destaque.

Tabela 10 -Tabela simplificada da pressão do vento no fermentador.

	z (m)	β	Δp	(N/m ²)
Vento 1 (sobrepessão)	10-15	$320^\circ-40^\circ$	p11	1165,56
Vento 1 (sobrepessão)	15-20	$320^\circ-40^\circ$	p12	1211,71
Vento 1 (sobrepessão)	20-30	$320^\circ-40^\circ$	p13	1306,71
Vento 2 (sucção)	10-15	$40^\circ-120^\circ$	p21	-1515,22
Vento 2 (sucção)	15-20	$40^\circ-120^\circ$	p22	-1575,23
Vento 2 (sucção)	20-30	$40^\circ-120^\circ$	p23	-1698,73
Vento 3 (sucção)	10-15	$120^\circ-240^\circ$	p31	-291,39
Vento 3 (sucção)	15-20	$120^\circ-240^\circ$	p32	-302,93
Vento 3 (sucção)	20-30	$120^\circ-240^\circ$	p33	-326,68
Vento 2 (sucção)	10-15	$240^\circ-320^\circ$	p21	-1515,22
Vento 2 (sucção)	15-20	$240^\circ-320^\circ$	p22	-1575,23
Vento 2 (sucção)	20-30	$240^\circ-320^\circ$	p23	-1698,73

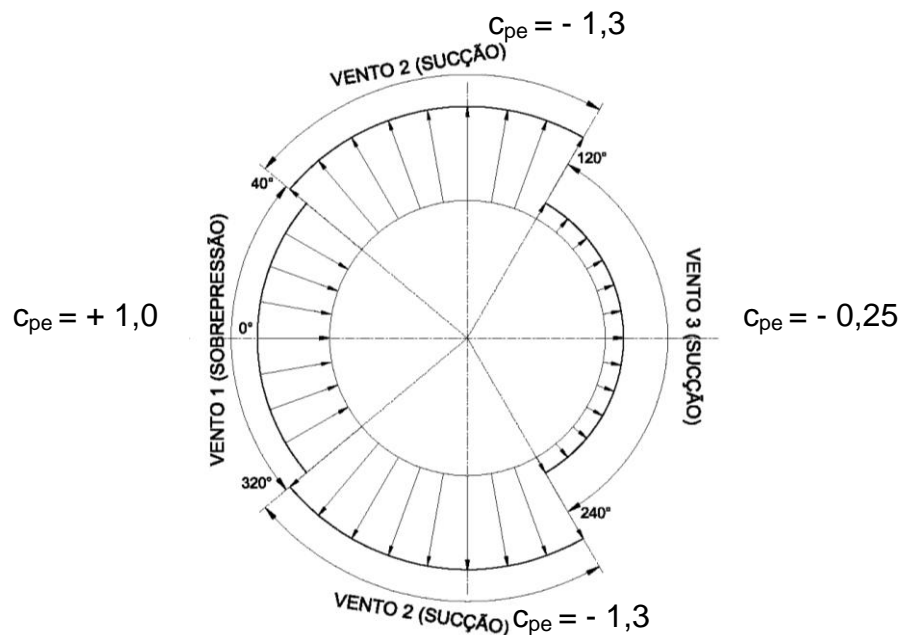


Figura 17 - Modelo simplificado da pressão do vento.

Nas figuras 18 e 19 foi apresentada a aplicação do vento segundo a tabela 10 no ANSYS.

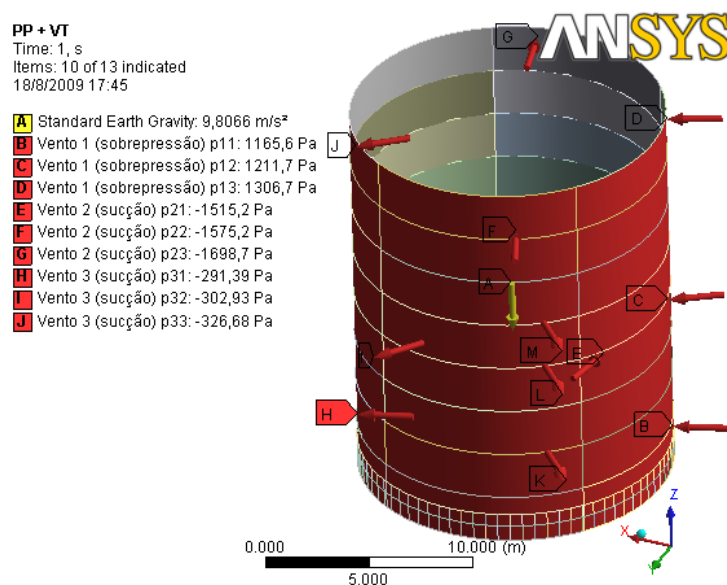


Figura 18 - Detalhe do costado, peso próprio sendo considerado e a pressão do vento.

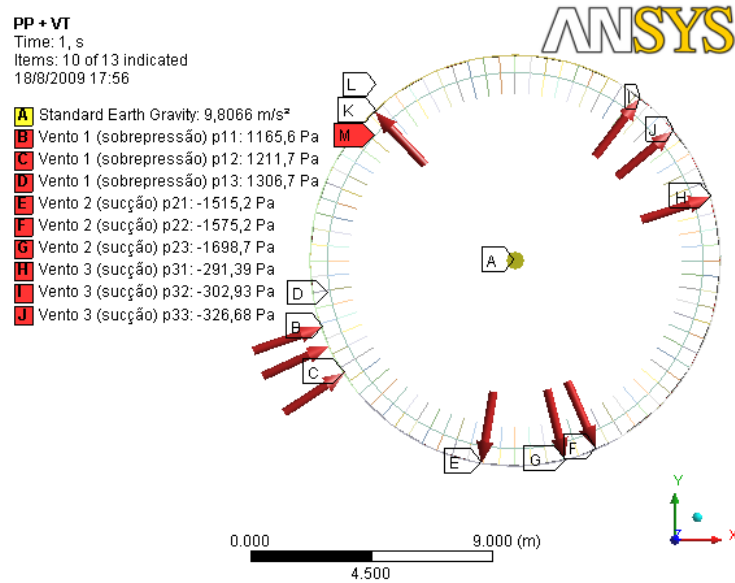


Figura 19 - Vista em planta do costado com aplicação da pressão do vento.

a) PP + OP.

- Carregamento devido à pressão do fluido armazenado.

- A pressão que acontece devido ao peso do fluido é gerada automaticamente pelo ANSYS, foi utilizado o comando “Hydrostatic Pressure” com densidade do fluido de $\rho = 1090 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ conforme demonstrado na figura 20.

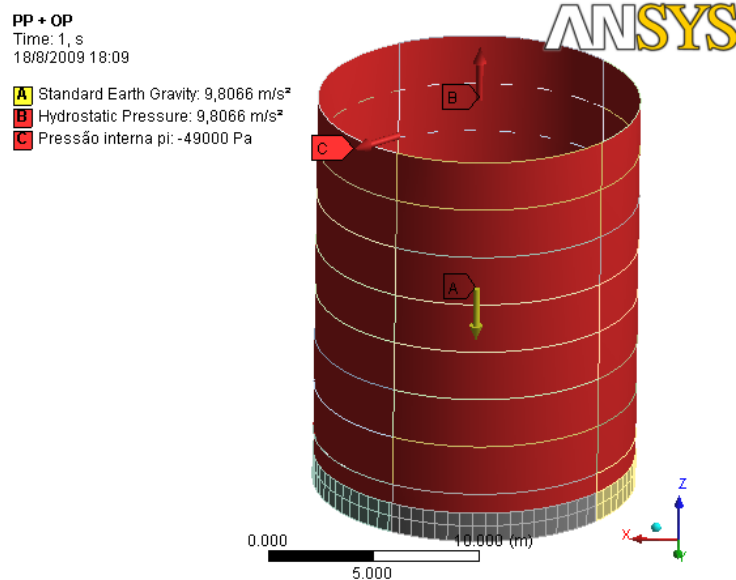


Figura 20 - Detalhe do costado, peso próprio, peso do fluido armazenado e pressão interna dos gases.

4.3 VIGA DE TRANSIÇÃO

Segundo BADIALE (1997) no dimensionamento do corpo e fundo do fermentador, encontrou-se alguma dificuldade no cálculo dos esforços que aparecem na união entre o corpo cilíndrico e o fundo cônico visto que as teorias passam a ser bastante complicadas na sua aplicação prática. Nesta união é que se encontra o ponto crítico do dimensionamento com tensões bastante elevadas.

BADIALE (1997) apresenta um modelo de viga circular (“viga anel”), tipo caixão, conforme figura 22, na região onde ocorria a união cilindro-cone, apoiando sobre esta a viga o corpo cilíndrico, e sustentando sob esta viga o fundo cônico, dimensionando a mesma para suportar os esforços de compressão, flexão e torção causados pelas reações do cilindro e do cone devidas a ação da carga de coluna de caldo nos mesmos.

ANDRADE Paulo (2010) descreve um colapso de um tanque de aço para armazenamento de caulim que aconteceu em 1981, constituído por uma parte superior cilíndrica com diâmetro de 10,5 [m] e altura de 3,4 [m]. Por uma parte inferior, um cone invertido com o mesmo diâmetro de 10,5 [m] ligado ao cilindro, com altura de 9,09 [m]. Este conjunto se apóia em oito colunas por intermédio de um anel com seção em duplo “U”, soldado ao tanque no trecho da intersecção entre o cone e o cilindro, conforme figura 21. Do acidente mencionado uma das lições foi:

- a) O apoio do anel sobre a coluna, que representa aparentemente apenas um pequeno detalhe, foi mal concebido dando grande excentricidade às cargas aplicadas. Há, portanto, a focalizar-se sempre a necessidade de estudos mais aprofundados para o detalhamento de ligações e de transferências de cargas; em termos de peso esta conexão representa menos do que 1% do peso de todo o conjunto, mas tem uma grande responsabilidade, o que reforça a tese de que, "pequenas causas podem gerar grandes problemas estruturais".

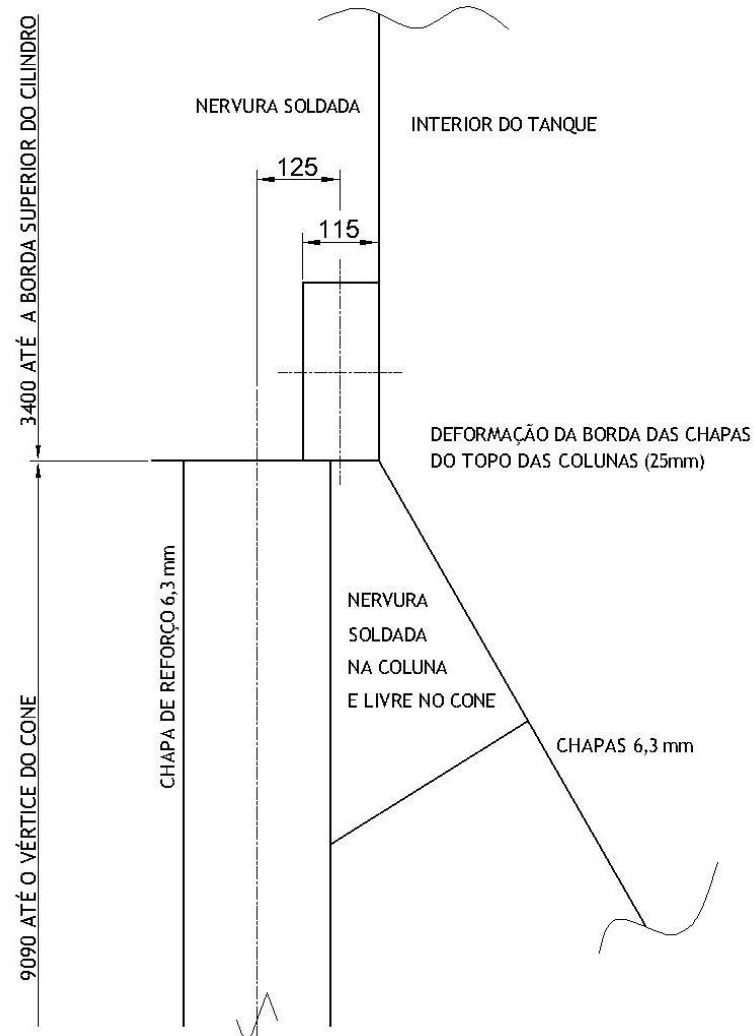


Figura 21 - Detalhe do sistema de apoio do tanque no topo das colunas, ANDRADE Paulo (2010).

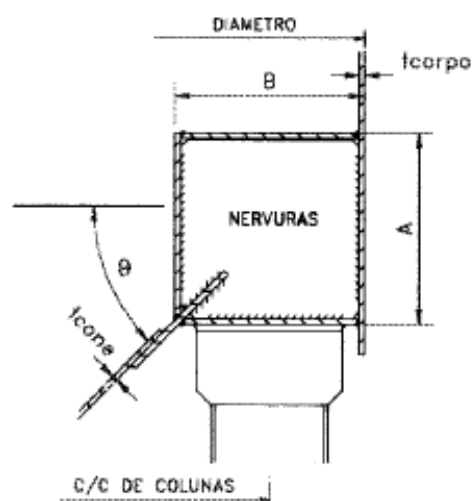


Figura 22 - Seção transversal da "viga anel", BADIALE (1997).

Devido à dificuldade de execução da viga anel proposta por BADIALE (1997) e o problema mencionado por ANDRADE Paulo (2010) apresentou-se na figura 23 e 24 um novo detalhe de viga caixão.

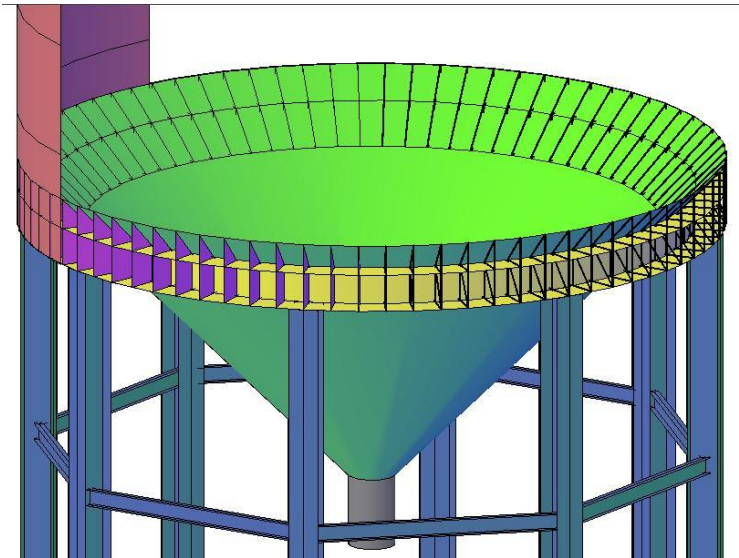


Figura 23 - Fermentador sem o costado.

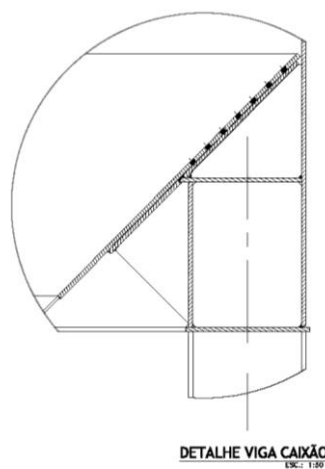


Figura 24 - Detalhe da viga tipo caixão.

4.4 COLUNAS

Na figura 25 é mostrada a orientação das colunas no fermentador. A sustentação é realizada por colunas devido à necessidade da elevação do fundo

cônico, facilitando a locação dos trocadores de calor e bombas de recirculação em baixo do fundo, sendo assim, economizando com tubulações e acessórios.

CALIL (1997) cita que o vento pode afetar a estabilidade dos silos vazios, particularmente quando são altos, estreitos e multicelulares.

As colunas de sustentação do fermentador foram consideradas engastadas devido às cargas horizontais elevadas provocadas pelos ventos.

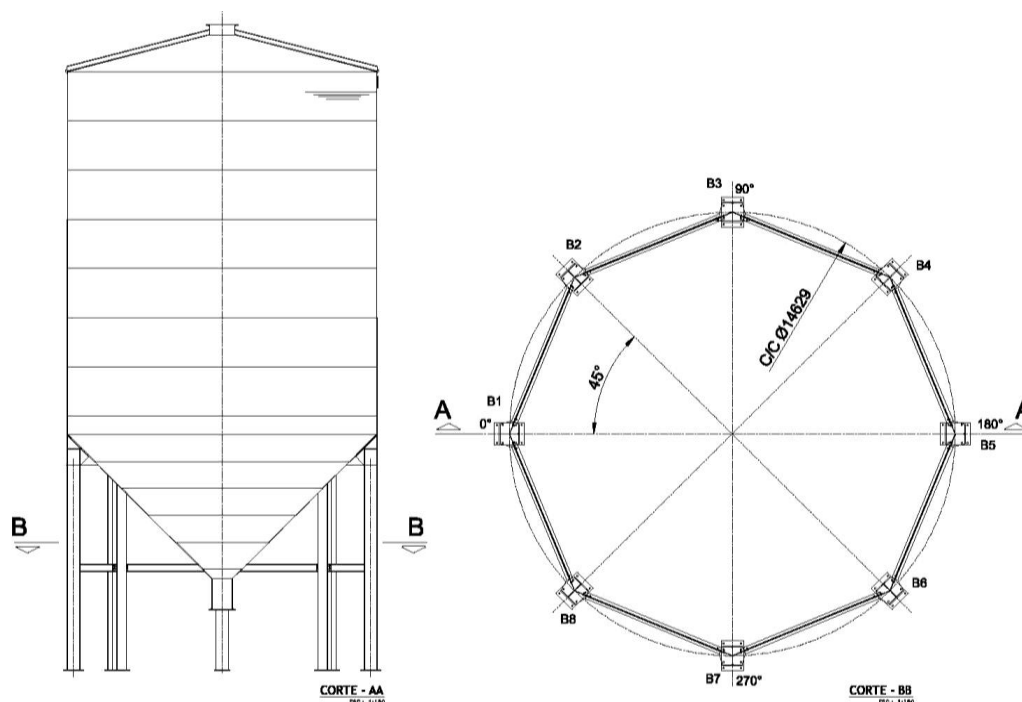


Figura 25 - Corte BB – Arranjo das colunas no fermentador.

Para o dimensionamento da fundação, placa de base e chumbadores são necessárias as reações em cada base do fermentador, o que seria uma tarefa demorada calcular analiticamente o momento fletor, a força normal e o esforço cortante em cada eixo de coordenadas, considerando todas as condições de cargas já apresentadas anteriormente.

4.4.1 Espessura das colunas

Foi utilizado o perfil H soldado série CS 650 x 330 e inserido a espessura correspondente nas faces da coluna, conforme figura 26.

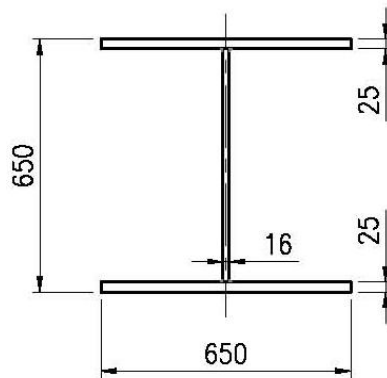


Figura 26 - Perfil CS 650 x 330, NBR 5884

4.5 FUNDO CÔNICO

A necessidade de utilização do fundo cônico do fermentador deve-se principalmente ao fato da recirculação do vinho, lavagem e esgotamento. Devido às condições de processo ocorrem acúmulo de fermento e impurezas sólidas sendo estes necessários ser retirados evitando infecções no processo de fermentação, por isso, a lavagem do fermentador com soda cáustica ou flegmaça com temperatura elevada entre 60 [°C] e 70 [°C].

Para BADIALE (1997) após ter-se calculado alguns modelos de fundos cônicos em programas de análise de estrutura por elementos finitos, notou-se que com ângulos de inclinação com a horizontal maior ou igual a 45°, utilizando o modelo estrutural da viga circular, os mesmos poderiam ser dimensionados com relativa segurança pela teoria das estruturas de casca de revolução com comportamento de membrana. Muitas vezes para não se correr o risco de trabalhar fora das recomendações do código ASME, os fundos cônicos com ângulo de inclinação com a horizontal menor que 60°, eram muitas vezes projetados como placa reforçada por uma grelha/radial metálica, de acordo com a figura 27, por ser modelo estrutural conhecido, mas não se considerava a resistência da estrutura cônica como casca de revolução, levando, em alguns casos às espessuras super dimensionadas do fundo.

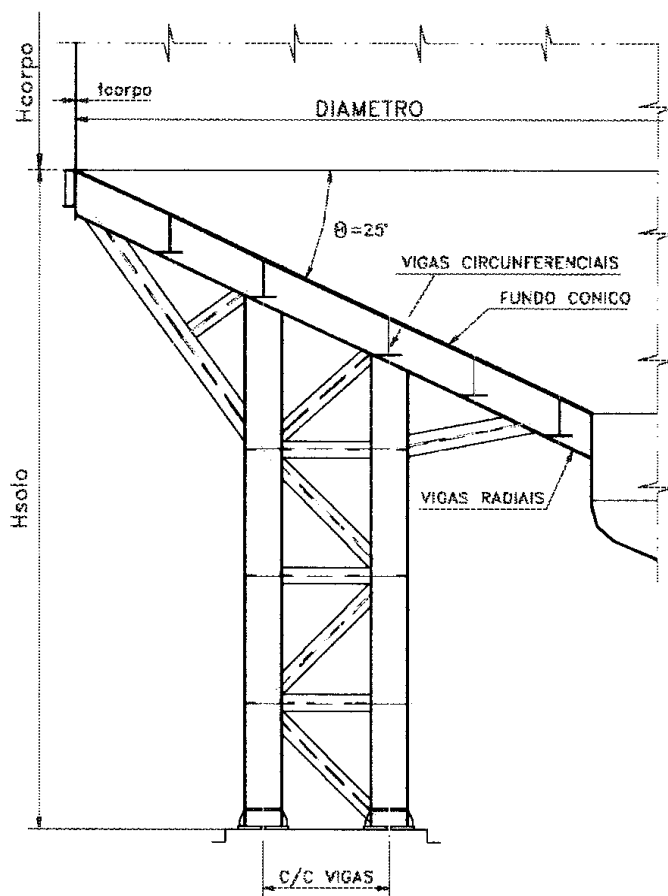


Figura 27 - Fundo cônico com reforço tipo “grelha circular/radial metálica”, BADIALE (1997).

Para o cálculo do fundo cônico utilizando o fermentador como vaso de pressão apresenta-se algumas recomendações. Sendo assim denominam-se tampos “heads” as peças de fechamento dos cascos cilíndricos dos vasos de pressão. Os tampos podem ter vários formatos, como mostra a figura 28.

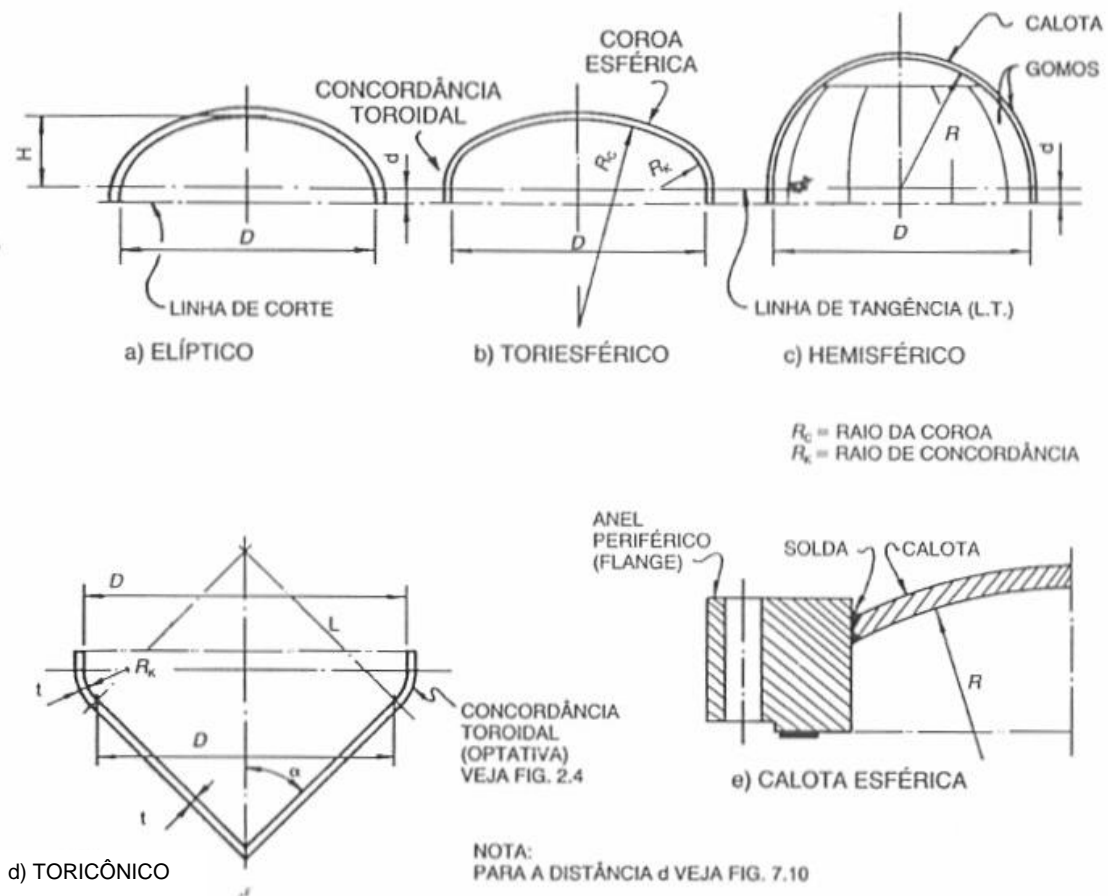


Figura 28 - Alguns tipos de tampos, TELLES (1996).

TELLES (1996) alerta sobre a utilização de tampos cônicos que embora fáceis de construir, são poucos usados por serem bem menos resistentes. O seu emprego limita-se praticamente ao tampo inferior de vasos em que seja necessário o esvaziamento rápido completo, ou que trabalhem com fluidos difíceis de escoar (fluidos viscosos ou com sólidos em suspensão, por exemplo). Nos tampos cônicos existe algumas vezes uma concordância toroidal na ligação com o cilindro. Para tampos cônicos com o semi-ângulo no vértice maior do que 30° , o código ASME, Seção VIII, Divisão 1 exige a concordância toroidal, que pode ser dispensada somente quando for feito um estudo especial de análise de tensões (parágrafo 1-5, da Divisão 1).

No caso do fermentador não existe concordância toroidal, segundo TELLES (1996) pode ser exigido um reforço na região de ligação cone-cilindro.

4.5.1 Espessura do fundo cônico

Foi utilizada a espessura de 12,7 [mm] igual a do oitavo anel para verificação das tensões.

4.5.2 Carregamento no fundo cônico

a) PP + VT;

- O peso próprio do fundo cônico é gerado pelo ANSYS.

- Ações do vento

Devido à falta do coeficiente de pressão e de forma externo (c_{pe}) para o fundo cônico e a elevação acima do terreno entre 5 [m] e 10 [m] não foi considerada a força do vento na superfície cônica.

b) PP + OP.

Foram aplicadas as pressões do fluido armazenado e a pressão interna dos gases no fundo cônico, de acordo com a figura 29.

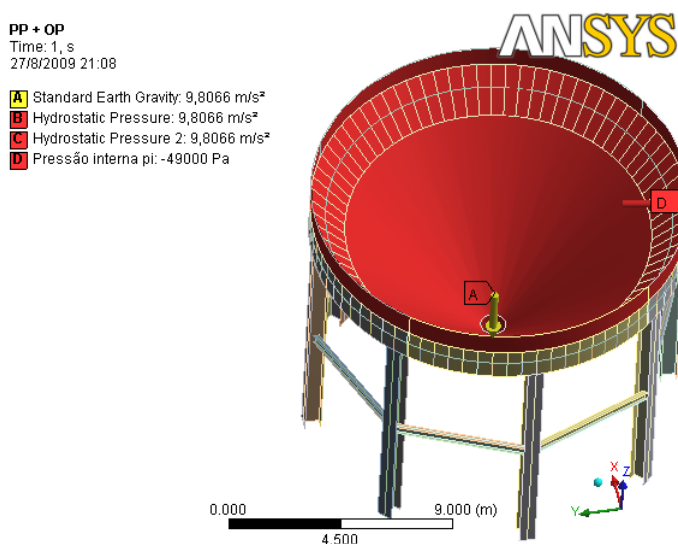


Figura 29 - Detalhe do fundo cônico, peso próprio, peso do fluido armazenado e pressão interna dos gases.

4.6 APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO

No Ansys foram aplicados os carregamentos descritos nas situações 01 e 02.

- a) Situação 01 – PP + VT;
- - a) efeito da gravidade – aceleração – $a = -9,8066 \text{ [m/s}^2\text{]}$ (“Standard Earth Gravity”) (direção Z);
- - b) pressão - Vento 1 (sobrepessão) – $p_{11} = 1165,56 \text{ [Pa]}$ (10m-15m@320°-40°);
- - c) pressão - Vento 1 (sobrepessão) – $p_{12} = 1211,71 \text{ [Pa]}$ (15m-20m@320°-40°);
- - d) pressão - Vento 1 (sobrepessão) – $p_{13} = 1306,71 \text{ [Pa]}$ (20m-30m@320°-40°);
- - e) pressão - Vento 2 (sucção) – $p_{21} = -1515,22 \text{ [Pa]}$ (10m-15m@40°-120°);
- - f) pressão - Vento 2 (sucção) – $p_{22} = -1575,23 \text{ [Pa]}$ (15m-20m@40°-120°);
- - g) pressão - Vento 2 (sucção) – $p_{23} = -1698,73 \text{ [Pa]}$ (20m-30m@40°-120°);
- - h) pressão - Vento 3 (sucção) – $p_{31} = -291,39 \text{ [Pa]}$ (10m-15m@120°-240°);
- - i) pressão - Vento 3 (sucção) – $p_{32} = -302,93 \text{ [Pa]}$ (15m-20m@120°-240°);
- - j) pressão - Vento 3 (sucção) – $p_{33} = -326,68 \text{ [Pa]}$ (20m-30m@120°-240°);
- - k) pressão - Vento 2 (sucção) – $p_{41} = -1515,22 \text{ [Pa]}$ (10m-15m@240°-320°);
- - l) pressão - Vento 2 (sucção) – $p_{42} = -1575,23 \text{ [Pa]}$ (15m-20m@240°-320°);
- - m) pressão - Vento 2 (sucção) – $p_{43} = -1698,73 \text{ [Pa]}$ (20m-30m@240°-320°);
- b) Situação 02 – PP + OP.
- - a) efeito da gravidade – aceleração – $a = -9,8066 \text{ [m/s}^2\text{]}$ (“Standard Earth Gravity”) (direção Z);

- - b) pressão hidrostática – aceleração – $a = -9,8066 \text{ [m/s}^2\text{]}$ (“Hydrostatic Pressure Acceleration”) (direção Z);
- - c) densidade – $\rho = 1090 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ (0;0;26,7455)m;
- - d) pressão interna – $p_i = 49000 \text{ [Pa]}$ (“Pressure”);

5 RESULTADOS

Para a visualização dos panoramas de tensões e resultados nas bases das colunas foi utilizado o comando “solution”, já definido como padrão quando utilizado “new analysis”, a fim de definir o tipo de resultado e formato para a visualização dos itens: teto, costado, viga de transição, colunas e fundo cônico. Após a solução disponível pode-se atualizar os resultados e animar a resposta da estrutura.

5.1 RESULTADOS DO TETO

Foram plotados os itens independentes para uma melhor observação dos resultados. As imagens foram obtidas na mesma posição.

Nas figuras 30 e 31 são apresentados os panoramas de tensões das situações 01 e 02, respectivamente no teto do fermentador.

a) situação 01 – PP + VT;

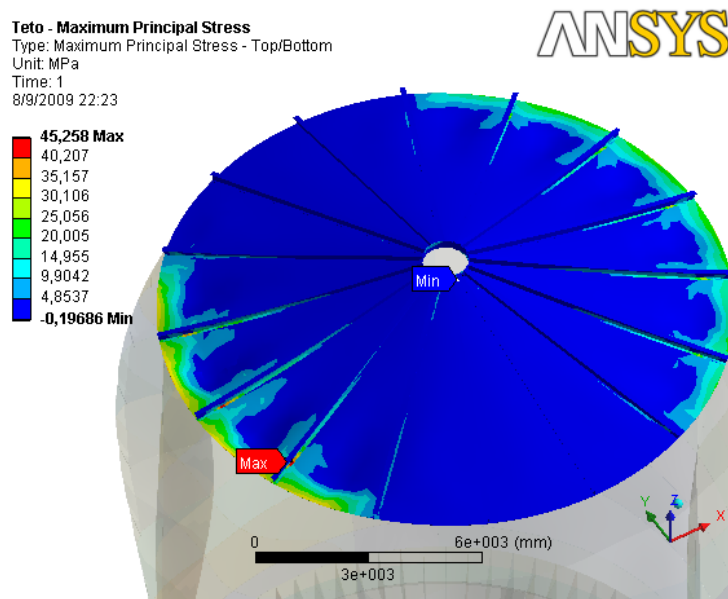


Figura 30 - Panorama de tensões no teto, PP + VT

Observando-se a figura 30 vê-se que o vento aplicado da NBR 6123 (1988) a tensão máxima no teto não ultrapassa o limite de escoamento do aço utilizado.

b) situação 02 – PP + OP.

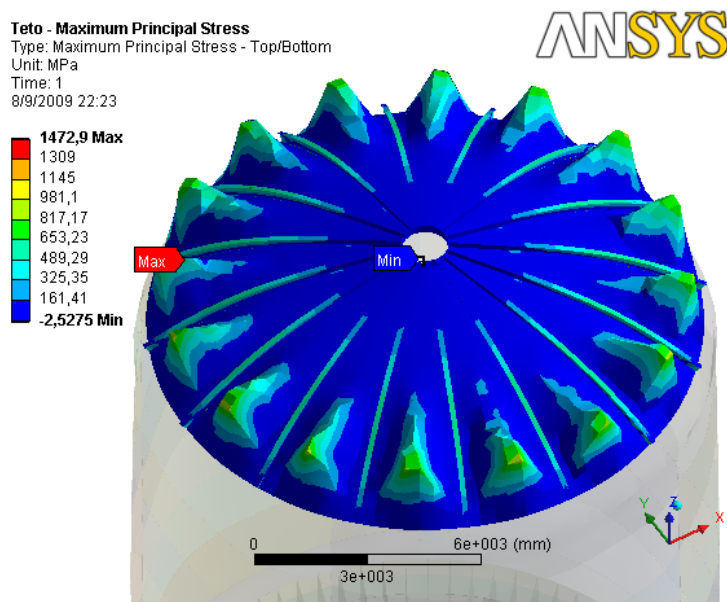


Figura 31 - Panorama de tensões no teto, PP + OP

Na situação 02, como observado na figura 31, os valores obtidos ultrapassam a tensão última do aço estrutural como consequência da pressão interna aplicada de $4,9 \times 10^4$ [Pa] ou 0,5 [bar].

5.2 RESULTADOS DO COSTADO

Nas figuras 32 e 33 são apresentados os panoramas de tensões das situações 01 e 02, respectivamente no costado do fermentador.

a) situação 01 – PP + VT;

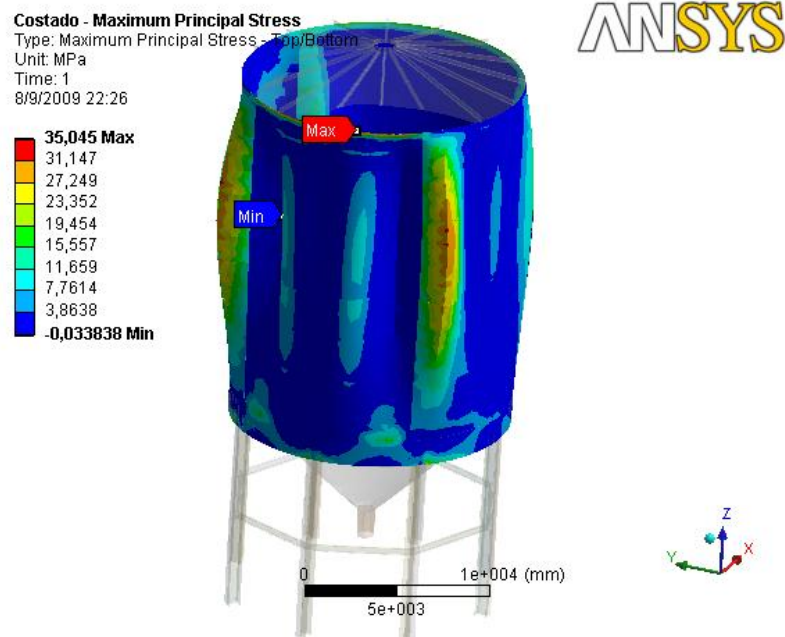


Figura 32 - Panorama de tensões no costado, PP + VT

Na figura 32, observa-se a tensão máxima na união entre o costado e o teto do fermentador, não ultrapassando 35,045 [MPa] ficando abaixo da tensão de escoamento do aço.

b) situação 02 – PP + OP.

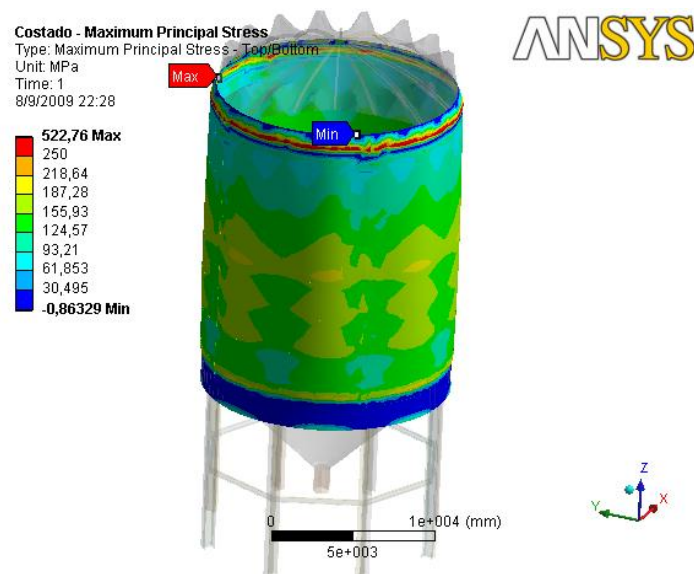


Figura 33 - Panorama de tensões no costado, PP + OP

Foi observado no primeiro anel ou virola a tensão máxima de 522,76 [MPa], conforme figura 33, ultrapassando a tensão última do aço.

5.3 RESULTADOS DA VIGA DE TRANSIÇÃO

Nas figuras 34 e 35 são apresentados os panoramas de tensões das situações 01 e 02, respectivamente na viga de transição do fermentador.

a) situação 01 – PP + VT;

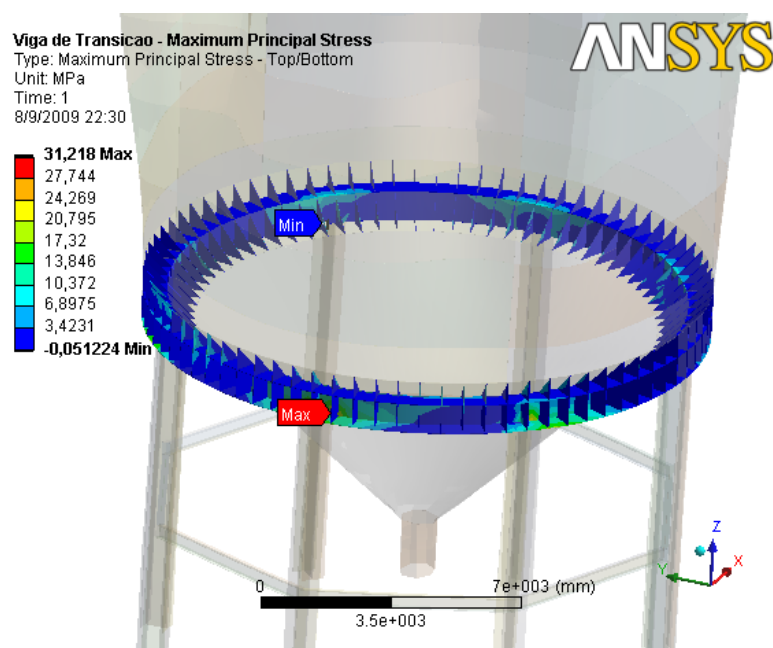


Figura 34 - Panorama de tensões na viga de transição, PP + VT

Observando a figura 34, a tensão máxima ocorre na ligação entre colunas e viga de transição, embora este efeito não chegue ocasionar uma tensão elevada.

b) situação 02 – PP + OP.

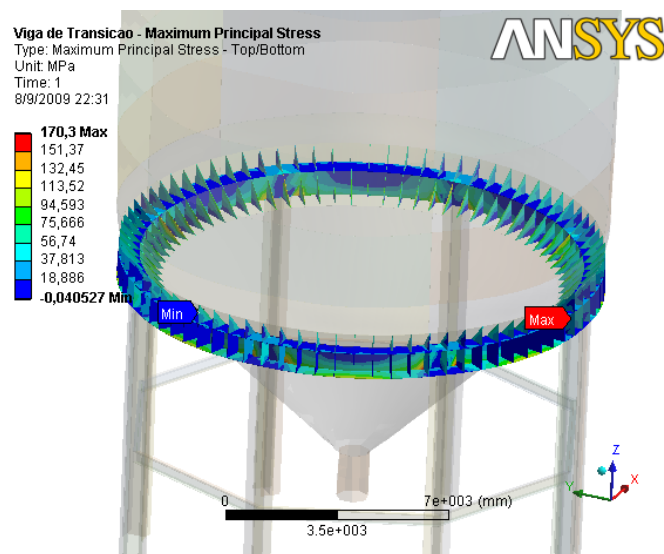


Figura 35 - Panorama de tensões na viga de transição, PP + OP

Pela figura 35, a tensão máxima ocorre nas chapas internas da viga de transição na ligação entre colunas, considerado uma região crítica de 170,3 [MPa].

5.4 RESULTADOS DAS COLUNAS

Nas figuras 36 e 37 são apresentados os panoramas de tensões das situações 01 e 02, respectivamente nas colunas do fermentador.

a) situação 01 – PP + VT;

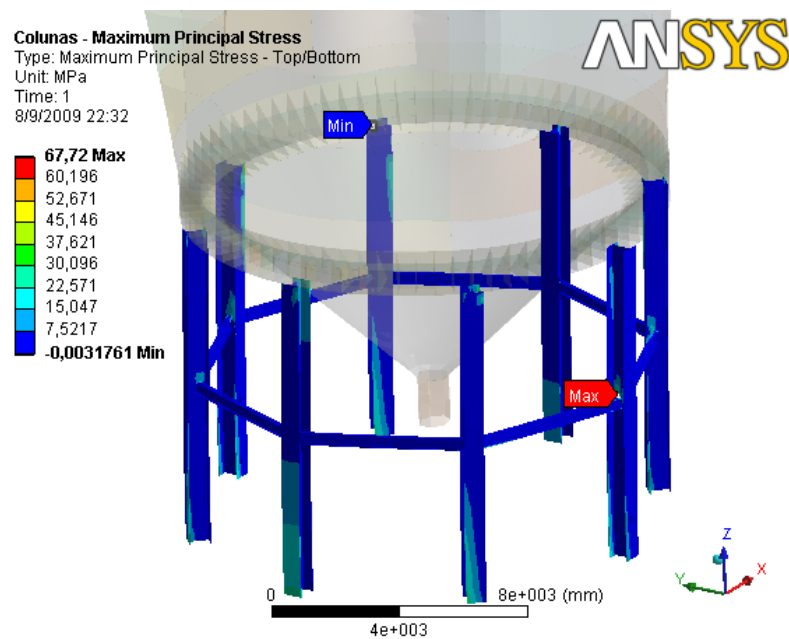


Figura 36 - Panorama de tensões nas colunas, PP + VT

Devido a ação do vento na ligação entre as colunas de travamento e colunas de sustentação foi encontrado o valor de tensão de 67,72 [MPa]

Foi elaborado a tabela 11 analiticamente para comparação dos resultados.

Tabela 11 – Lista de materiais do fermentador

	Perfil	Comprimento [m] ou área [m ²]	Peso total [kgf]	
Teto	Chapas 6,3 [mm]	187,46 [m ²]	9344	
	Perfil W 250 x 32,7	117,00 [m]	3826	
Costado	Chapas 6,3 [mm]	117,12 [m ²]	5792	
	Chapas 6,3 [mm]	117,12 [m ²]	5792	
	Chapas 6,3 [mm]	117,12 [m ²]	5792	
	Chapas 6,3 [mm]	117,12 [m ²]	5792	
	Chapas 8 [mm]	117,12 [m ²]	7355	
	Chapas 9,5 [mm]	117,12 [m ²]	8734	
	Chapas 12,7 [mm]	117,12 [m ²]	11676	
	Chapas 12,7 [mm]	117,12 [m ²]	11676	
	Viga de transição	Chapas 12,7 [mm]	29,85 [m ²]	2976
		Chapas 12,7 [mm]	29,85 [m ²]	2976
Chapas 12,7 [mm]		35,39 [m ²]	3528	
80 x Chapas 12,7 [mm]		0,52 [m ²]	4147	
80 x Chapas 12,7 [mm]		0,32 [m ²]	2552	
80 x Chapas 12,7 [mm]		0,21 [m ²]	1675	
Colunas	Perfil CS 650 x 330	81,60 [m]	26928	
	Perfil W 360 x 72	47,00 [m]	3384	
Fundo cônico	Chapas 12,7 [mm]	258,00 [m ²]	25721	
		Peso total	149669	

Foram obtidos para as duas situações respectivamente os valores das forças de reação e dos momentos nas bases nas tabelas 12 e 14.

Observa-se na reação da base B1 (vide tabela 12) valores negativos, indicando tração devido a ação do vento mesmo com o peso próprio considerado.

Foi elaborada a tabela 13 simplificada com os valores em destaque (vermelho) das reações no eixo z da situação 01 (tabela 12). A somatória das reações das bases do fermentador foi de 1.477.464 [N] (tabela 13) ou 150,05 [tonf] e comparando-se com o peso próprio do fermentador encontrado analiticamente de 149,669 [tonf] conforme tabela 11 o resultado não ultrapassa 1%.

Tabela 12 - Resultados obtidos das reações, PP + VT.

Object Name	Force Reaction B1	Moment Reaction B1	Force Reaction B2	Moment Reaction B2
State	Solved			
Definition				
Type	Force Reaction	Moment Reaction	Force Reaction	Moment Reaction
Location Method	Boundary Condition			
Boundary Condition	Fixed Support B1		Fixed Support B2	
Orientation	Global Coordinate System			
Maximum Value Over Time				
X Axis	-41669 N	312,08 N·m	-26341 N	-74488 N·m
Y Axis	-78,08 N	-2,634e+005 N·m	12763 N	-1,7515e+005 N·m
Z Axis	-28946 N	7,8203e-002 N·m	1,4906e+005 N	-286,67 N·m
Total	50737 N	2,634e+005 N·m	1,5191e+005 N	1,9033e+005 N·m
Minimum Value Over Time				
X Axis	-41669 N	312,08 N·m	-26341 N	-74488 N·m
Y Axis	-78,08 N	-2,634e+005 N·m	12763 N	-1,7515e+005 N·m
Z Axis	-28946 N	7,8203e-002 N·m	1,4906e+005 N	-286,67 N·m
Total	50737 N	2,634e+005 N·m	1,5191e+005 N	1,9033e+005 N·m

Object Name	Force Reaction B3	Moment Reaction B3	Force Reaction B4	Moment Reaction B4
State	Solved			
Definition				
Type	Force Reaction	Moment Reaction	Force Reaction	Moment Reaction
Location Method	Boundary Condition			
Boundary Condition	Fixed Support B3		Fixed Support B4	
Orientation	Global Coordinate System			
Maximum Value Over Time				
X Axis	-13855 N	14458 N·m	-26230 N	78099 N·m
Y Axis	-3423,9 N	-1,0179e+005 N·m	-14383 N	-1,7268e+005 N·m
Z Axis	2,4675e+005 N	-672,4 N·m	2,1693e+005 N	-256,56 N·m
Total	2,4717e+005 N	1,0281e+005 N·m	2,1898e+005 N	1,8952e+005 N·m
Minimum Value Over Time				
X Axis	-13855 N	14458 N·m	-26230 N	78099 N·m
Y Axis	-3423,9 N	-1,0179e+005 N·m	-14383 N	-1,7268e+005 N·m
Z Axis	2,4675e+005 N	-672,4 N·m	2,1693e+005 N	-256,56 N·m
Total	2,4717e+005 N	1,0281e+005 N·m	2,1898e+005 N	1,8952e+005 N·m

Tabela 12 - Resultados obtidos das reações, PP + VT. (continuação)

Object Name	<i>Force Reaction B5</i>	<i>Moment Reaction B5</i>	<i>Force Reaction B6</i>	<i>Moment Reaction B6</i>
State	Solved			
Definition				
Type	Force Reaction	Moment Reaction	Force Reaction	Moment Reaction
Location Method	Boundary Condition			
Boundary Condition	Fixed Support B5		Fixed Support B6	
Orientation	Global Coordinate System			
Maximum Value Over Time				
X Axis	-37177 N	-219,6 N·m	-26482 N	-78259 N·m
Y Axis	-7,9591 N	-2,3737e+005 N·m	14377 N	-1,7338e+005 N·m
Z Axis	2,8111e+005 N	33,779 N·m	2,172e+005 N	399,95 N·m
Total	2,8356e+005 N	2,3737e+005 N·m	2,1928e+005 N	1,9022e+005 N·m
Minimum Value Over Time				
X Axis	-37177 N	-219,6 N·m	-26482 N	-78259 N·m
Y Axis	-7,9591 N	-2,3737e+005 N·m	14377 N	-1,7338e+005 N·m
Z Axis	2,8111e+005 N	33,779 N·m	2,172e+005 N	399,95 N·m
Total	2,8356e+005 N	2,3737e+005 N·m	2,1928e+005 N	1,9022e+005 N·m

Object Name	<i>Force Reaction B7</i>	<i>Moment Reaction B7</i>	<i>Force Reaction B8</i>	<i>Moment Reaction B8</i>
State	Solved			
Definition				
Type	Force Reaction	Moment Reaction	Force Reaction	Moment Reaction
Location Method	Boundary Condition			
Boundary Condition	Fixed Support B7		Fixed Support B8	
Orientation	Global Coordinate System			
Maximum Value Over Time				
X Axis	-13124 N	-13868 N·m	-26886 N	73450 N·m
Y Axis	3232,7 N	-98592 N·m	-12480 N	-1,7648e+005 N·m
Z Axis	2,4696e+005 N	493,43 N·m	1,484e+005 N	173,61 N·m
Total	2,4733e+005 N	99564 N·m	1,5133e+005 N	1,9116e+005 N·m
Minimum Value Over Time				
X Axis	-13124 N	-13868 N·m	-26886 N	73450 N·m
Y Axis	3232,7 N	-98592 N·m	-12480 N	-1,7648e+005 N·m
Z Axis	2,4696e+005 N	493,43 N·m	1,484e+005 N	173,61 N·m
Total	2,4733e+005 N	99564 N·m	1,5133e+005 N	1,9116e+005 N·m

Tabela 13 – Tabela simplificada das reações no eixo Z, PP + VT.

Eixo	Bases								Soma
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	
Z	-28946 N	149060 N	246750 N	216930 N	281110 N	217200 N	246960 N	148400 N	1477464 N

b) situação 02 – PP + OP.

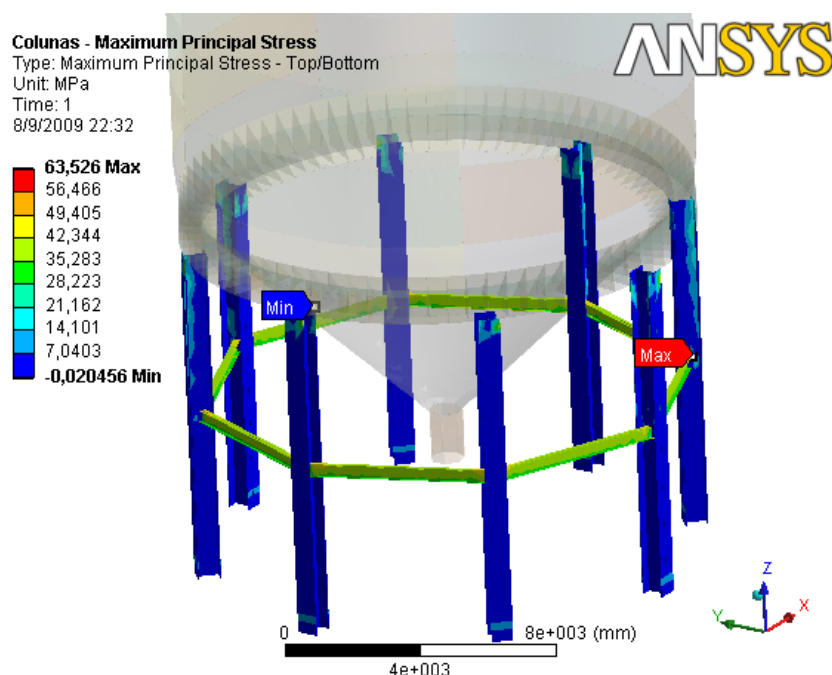


Figura 37 - Panorama de tensões nas colunas, PP + OP

Tabela 14 - Resultados obtidos das reações, PP + OP.

Object Name	<i>Force Reaction B1</i>	<i>Moment Reaction B1</i>	<i>Force Reaction B2</i>	<i>Moment Reaction B2</i>
State	Solved			
Definition				
Type	Force Reaction	Moment Reaction	Force Reaction	Moment Reaction
Location Method	Boundary Condition			
Boundary Condition	Fixed Support B1		Fixed Support B2	
Orientation	Global Coordinate System			
Maximum Value Over Time				
X Axis	-4054,9 N	1669,7 N·m	-2392,6 N	56786 N·m
Y Axis	-256,05 N	87375 N·m	3754, N	61445 N·m
Z Axis	5,2186e+006 N	4,347 N·m	5,2072e+006 N	199,52 N·m
Total	5,2186e+006 N	87391 N·m	5,2072e+006 N	83667 N·m
Minimum Value Over Time				
X Axis	-4054,9 N	1669,7 N·m	-2392,6 N	56786 N·m
Y Axis	-256,05 N	87375 N·m	3754, N	61445 N·m
Z Axis	5,2186e+006 N	4,347 N·m	5,2072e+006 N	199,52 N·m
Total	5,2186e+006 N	87391 N·m	5,2072e+006 N	83667 N·m

Tabela 14 - Resultados obtidos das reações, PP + OP. (continuação)

Object Name	<i>Force Reaction B3</i>	<i>Moment Reaction B3</i>	<i>Force Reaction B4</i>	<i>Moment Reaction B4</i>
State	Solved			
Definition				
Type	Force Reaction	Moment Reaction	Force Reaction	Moment Reaction
Location Method	Boundary Condition			
Boundary Condition	Fixed Support B3		Fixed Support B4	
Orientation	Global Coordinate System			
Maximum Value Over Time				
X Axis	1165,2 N	70889 N·m	6437, N	44928 N·m
Y Axis	6533,5 N	4514,6 N·m	5525,8 N	-41878 N·m
Z Axis	5,2149e+006 N	202,02 N·m	5,2208e+006 N	251,31 N·m
Total	5,2149e+006 N	71033 N·m	5,2208e+006 N	61419 N·m
Minimum Value Over Time				
X Axis	1165,2 N	70889 N·m	6437, N	44928 N·m
Y Axis	6533,5 N	4514,6 N·m	5525,8 N	-41878 N·m
Z Axis	5,2149e+006 N	202,02 N·m	5,2208e+006 N	251,31 N·m
Total	5,2149e+006 N	71033 N·m	5,2208e+006 N	61419 N·m

Object Name	<i>Force Reaction B5</i>	<i>Moment Reaction B5</i>	<i>Force Reaction B6</i>	<i>Moment Reaction B6</i>
State	Solved			
Definition				
Type	Force Reaction	Moment Reaction	Force Reaction	Moment Reaction
Location Method	Boundary Condition			
Boundary Condition	Fixed Support B5		Fixed Support B6	
Orientation	Global Coordinate System			
Maximum Value Over Time				
X Axis	7841,7 N	-1570,5 N·m	6387,6 N	-48480 N·m
Y Axis	-318,52 N	-62888 N·m	-5211,7 N	-40298 N·m
Z Axis	5,2498e+006 N	142,64 N·m	5,2063e+006 N	31,769 N·m
Total	5,2498e+006 N	62908 N·m	5,2063e+006 N	63041 N·m
Minimum Value Over Time				
X Axis	7841,7 N	-1570,5 N·m	6387,6 N	-48480 N·m
Y Axis	-318,52 N	-62888 N·m	-5211,7 N	-40298 N·m
Z Axis	5,2498e+006 N	142,64 N·m	5,2063e+006 N	31,769 N·m
Total	5,2498e+006 N	62908 N·m	5,2063e+006 N	63041 N·m

Tabela 14 - Resultados obtidos das reações, PP + OP. (continuação)

Object Name	Force Reaction B7	Moment Reaction B7	Force Reaction B8	Moment Reaction B8
State	Solved			
Definition				
Type	Force Reaction	Moment Reaction	Force Reaction	Moment Reaction
Location Method	Boundary Condition			
Boundary Condition	Fixed Support B7		Fixed Support B8	
Orientation	Global Coordinate System			
Maximum Value Over Time				
X Axis	824,73 N	-73772 N·m	-2444,6 N	-55593 N·m
Y Axis	-6198,4 N	7311,9 N·m	-3798,8 N	64048 N·m
Z Axis	5,2112e+006 N	15,399 N·m	5,2224e+006 N	17,025 N·m
Total	5,2112e+006 N	74133 N·m	5,2224e+006 N	84810 N·m
Minimum Value Over Time				
X Axis	824,73 N	-73772 N·m	-2444,6 N	-55593 N·m
Y Axis	-6198,4 N	7311,9 N·m	-3798,8 N	64048 N·m
Z Axis	5,2112e+006 N	15,399 N·m	5,2224e+006 N	17,025 N·m
Total	5,2112e+006 N	74133 N·m	5,2224e+006 N	84810 N·m

Multiplicando-se o volume total do fermentador de 3766 [m³] pelo produto armazenado de densidade de 1,09 [ton/m³] somado ao peso próprio de 149,669 [tonf] conforme tabela 11 o peso próprio do fermentador incluindo o volume é 4.254,609 [tonf].

Foi elaborado a tabela 15 com os valores em destaque (vermelho) das reações no eixo z da situação 02 (tabela 14), o valor da somatória das reações foi de $4,17512 \times 10^7$ [N] (tabela 15) ou 4.257,437 [tonf] com o analítico a diferença não é superior a 1%.

Tabela 15 – Tabela simplificada das reações no eixo Z, PP + OP.

Eixo	Bases								Soma
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	
Z	5,22e+6 N	5,21e+6 N	5,21e+6 N	5,22e+6 N	5,25e+6 N	5,21e+6 N	5,21e+6 N	5,22e+6 N	4,17e+7 N

5.5 RESULTADOS DO FUNDO CÔNICO

Nas figuras 38 e 39 são apresentados os panoramas de tensões das situações 01 e 02, respectivamente do fundo cônico do fermentador.

a) situação 01 – PP + VT;

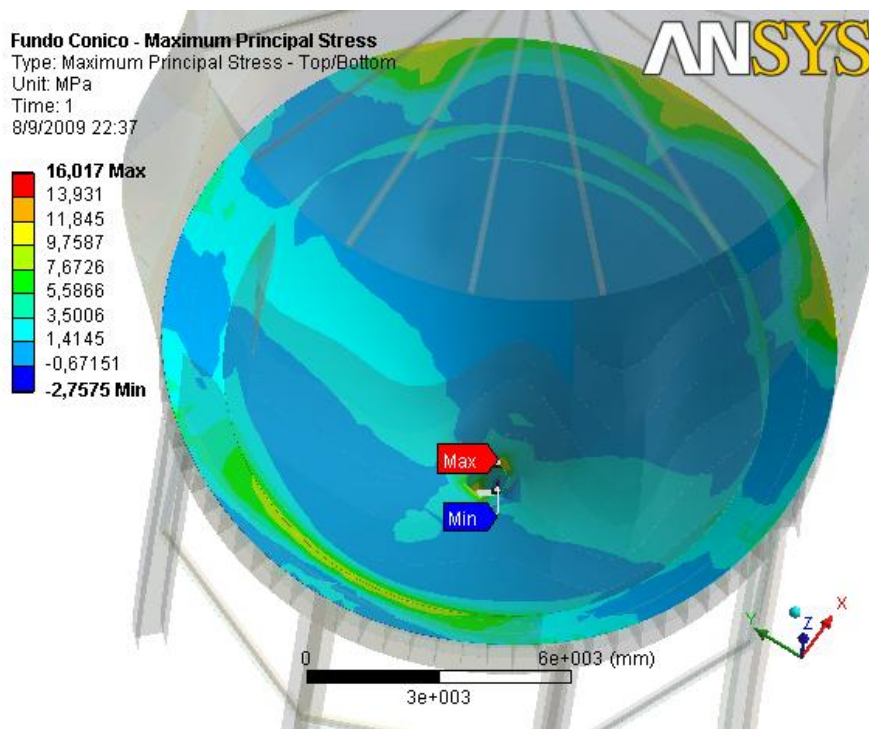


Figura 38 - Panorama de tensões no fundo cônico, PP + VT

Na situação 01 (figura 38) os valores apresentados de tensão máxima de 16,017 [MPa] não são significativos.

b) situação 02 – PP + OP.

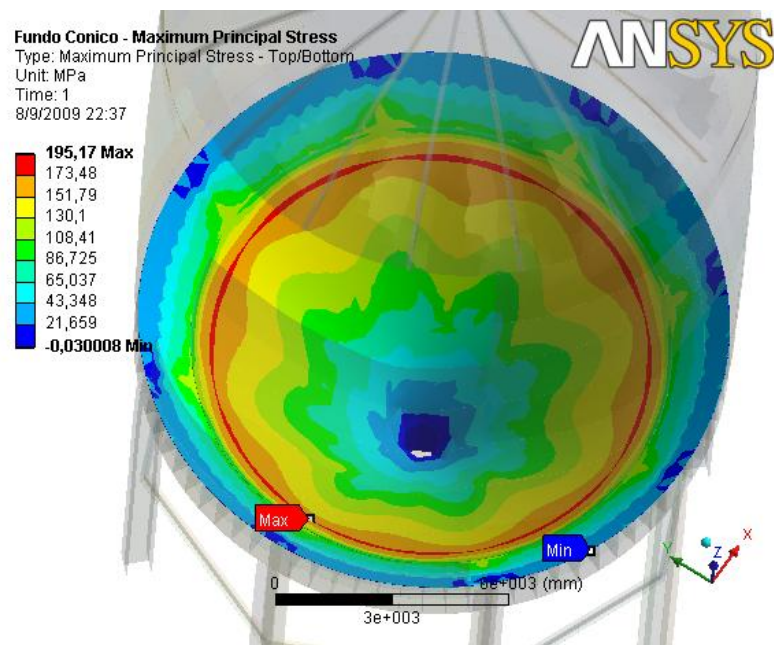


Figura 39 - Panorama de tensões no fundo cônico, PP + OP

Pela figura 39 foi observado o valor de tensão de 195,17 [MPa] nas chapas do fundo cônico para a viga de transição próximo ao limite de escoamento do aço.

5.6 RESULTADOS DO FERMENTADOR

Nas figuras 40, 41 e 42 são apresentados os panoramas de tensões, deformações e deslocamentos da situação 01, respectivamente do conjunto completo do fermentador.

a) situação 01 – PP + VT;

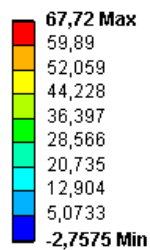
Maximum Principal Stress

Type: Maximum Principal Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 1

12/9/2009 23:17



ANSYS

Figura 40 - Panorama de tensões no fermentador, PP + VT

Na ligação das colunas de travamento e sustentação foram observados as maiores tensões da situação 01 (PP + VT) chegando há 67,72 [MPa], conforme figura 40, devido a ação do vento.

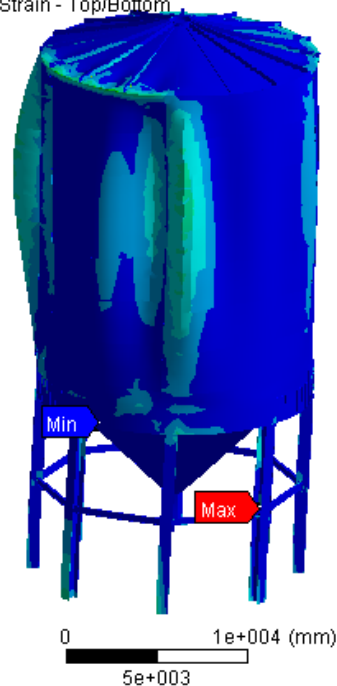
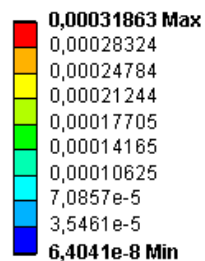
Maximum Principal Elastic Strain

Type: Maximum Principal Elastic Strain - Top/Bottom

Unit: mm/mm

Time: 1

12/9/2009 23:21



ANSYS

Figura 41 - Panorama das deformações no fermentador, PP + VT

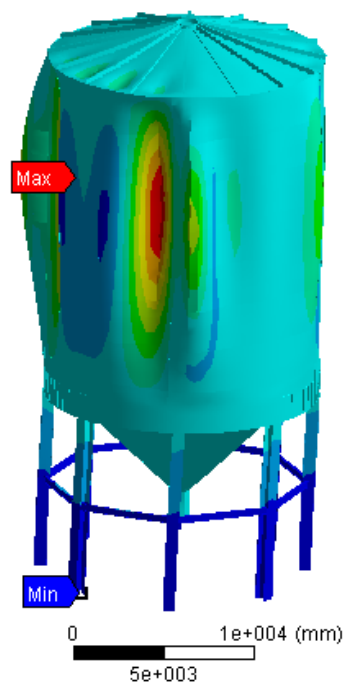
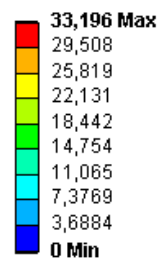
Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1

12/9/2009 23:22



ANSYS

Figura 42 - Panorama dos deslocamentos máximos no fermentador, PP + VT

Os deslocamentos máximos foram apresentados de 33,196 [mm] no costado do fermentador.

Nas figuras 43, 44 e 45 são apresentados os panoramas de tensões, deformações e deslocamentos da situação 02, respectivamente do conjunto completo do fermentador.

b) situação 02 – PP + OP.

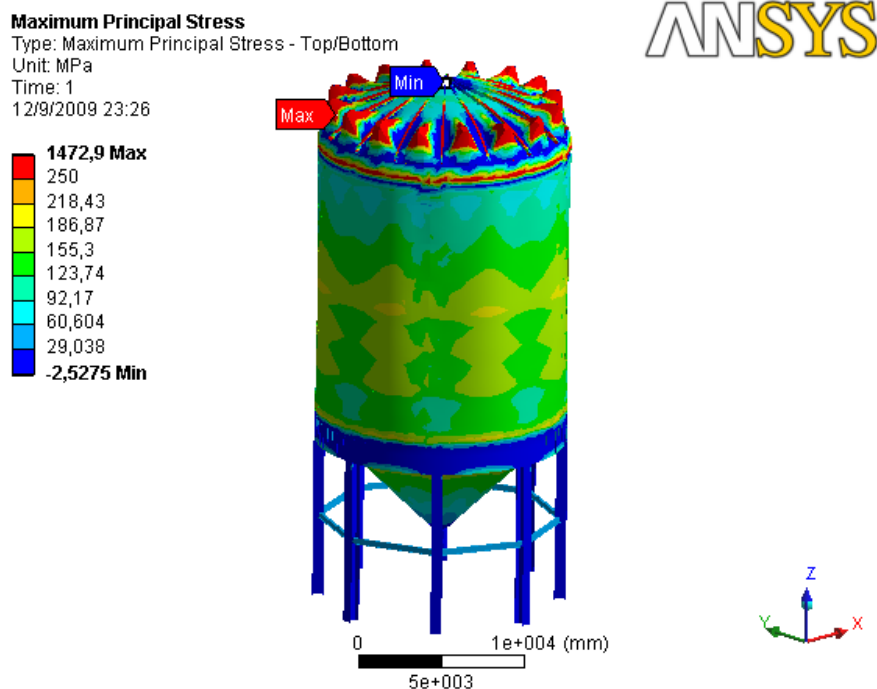


Figura 43 - Panorama de tensões no fermentador, PP + OP

Na situação 02 (PP + OP) da figura 43, os valores em vermelho estão acima do limite de escoamento do aço (250 [MPa]) ocorridos no primeiro anel (virola) do costado e teto com valor de tensão máxima no teto de 1472,9 [MPa].

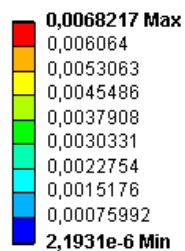
Maximum Principal Elastic Strain

Type: Maximum Principal Elastic Strain - Top/Bottom

Unit: mm/mm

Time: 1

12/9/2009 23:27



ANSYS

Figura 44 - Panorama das deformações no fermentador, PP + OP

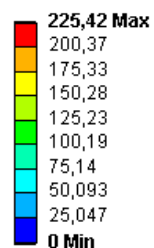
Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1

12/9/2009 23:28



ANSYS

Figura 45 - Panorama dos deslocamentos máximos no fermentador, PP + OP

Pela figura 45 o deslocamento máximo é de 225,42 [mm] ocorrido no teto do fermentador.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Conclui-se que o objetivo do trabalho, de conhecer os pontos de tensões e esforços nas bases das colunas do fermentador utilizando o programa ANSYS Workbench, foi atingido conforme resultados demonstrados no capítulo anterior.

Foram utilizadas duas situações para análise, a primeira sendo o peso próprio do fermentador vazio com a ação do vento (situação 01 (PP + VT)) seguindo as recomendações da NBR 6123 (1988). Os resultados das reações demonstram as situações de tração e compressão nas bases. A compressão na base B5 chega a valores de 50% superiores se o mesmo fosse modelado sem o vento. Conforme observado na tabela 12, existe tração na base B1 mesmo com o peso próprio do fermentador.

Na segunda situação (situação 02 (PP + OP)) o fermentador com peso próprio e operação, os valores obtidos ultrapassam a tensão última do aço estrutural utilizado nas partes analisadas como: teto, costado, viga de transição e colunas. A pressão interna manométrica aplicada de $4,9 \times 10^4$ [Pa] ou 0,5 [bar] foi fator impactante para causar tensões elevadas no costado e teto, também foi observado na junção entre o primeiro anel e teto, ponto de concentrações de tensões.

É vantajoso a utilização do MEF utilizado, ficando evidente a facilidade de obtenção dos valores nas reações em todos os eixos e tensões.

Na fase final, observou-se a grande importância do modelo geométrico criado, no qual se devem observar as coincidências das arestas e pontos no modelo, sendo assim, se as faces ficarem “soltas” há um grande acúmulo de tensões.

Depois de observado a importância da pressão interna, pretende-se em trabalhos futuros analisar estas pressões internas em campo, e comparar o mesmo modelo geométrico analisado como vaso de pressão pela ASME com o MEF, evitando a ruptura do primeiro anel, como já observado.

Pretende-se também propor um novo tipo de modelo geométrico analisando a dinâmica dos fluidos para um melhor aproveitamento da energia cinética.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, Vince; ASKENAZI, Abraham. **Building Better Products with finite element analysis**.

ALMEIDA, J. R. **Processo de recuperação de Levedura ou processo Melle-Boinott**. In: Semana da Fermentação Alcoólica. Anais, 1960.

ALVES Filho, Avelino, 1957. **Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2007.

ANDRADE Junior, L. J. (2002). **A ação do vento em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro**. São Carlos, 2002. 151p. **Tese** (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ANDRADE Paulo, A. (2010). **O colapso de um tanque de aço para armazenamento de caulim**. Disponível em: <<http://www.pauloandrade.com.br/consult03.html>>. Acesso em: 20 fev. 2010

ANGELIS, D. F. **Fermentação etanólica: microbiologia**. Buckman Laboratórios Ltda & Departamento de Bioquímica – UNESP, 1986

ANSYS 11.0, **Documentation for ANSYS Workbench**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5884**: Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico - Requisitos gerais, Agosto de 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao Vento em Edificações, Junho de 1988

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7821**: Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados, Abril de 1983

ASME **Boiler and Pressure Vessel Code**, Section VIII, Division 1 e Division 2

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM A-36**: Standard Specification for Carbon Structural Steel. United States of America: ASTM International, 2001.

BADIALE, Renato Celini. **Reservatórios metálicos elevados para aplicação na área de processos da indústria sucroalcooleira**. São Carlos, 1997.

BERTELLI, L. G. **Dezesseis anos de Proálcool**. Stab. Açúcar, Álcool e Subprodutos v.11, 1992.

CALIL Júnior, Carlito; ARAÚJO, Ernani Carlos de; NASCIMENTO, José Wallace do. **Silos metálicos multicelulares**. São Carlos, 1997.

CALIL Júnior, Carlito; CHEUNG, Andrés Batista. **Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto, exemplos de cálculo**. São Carlos: EESC, 2007.

CENTRO DE TECNOLOGIA COPERSUCAR. **Fermentação**. Apostila, 1987

CHANDRUPATLA, Titupathi R., BELEGUNDU, Ashoh D., **Introduction To Finite Elements In Engineering**, New Jersey, Printice-Hall Inc., 1991.

CORREARD, Gilvan César de Castro. **Projeto de uma roda para comporta vagão usando elementos finitos**. **Dissertação** (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

COSTA, A.R., **Análise da estampagem de chapas metálicas utilizando elementos finitos** - 2003. 189f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

DEREK, Hull. **“Introduction to dislocations”**.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Nota técnica cenários para exportação de etanol para os EUA** - 2010. Disponível em: <
http://www.epe.gov.br/Petroleo/Documents/Estudos_29/Cen%C3%A1rios%20para%20Exporta%C3%A7%C3%A3o%20de%20Etanol%20para%20os%20EUA.pdf.
Acesso em: 23 mai. 2010

ESTEVEZ, Paulo Junior. **Silos metálicos de chapa corrugada**. São Carlos, 1989.

FERNANDES, Antonio Carlos. **Cálculos na agroindústria de cana-de-açúcar**. 2.ed. Piracicaba: STAB – Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 2003.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; J, Philip. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 1934.

GERE, James M. **Mecânica dos Materiais**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HUEBNER, K.; THORNTON, E. **The finite element method for engineers**. 2ed. New York: John Wiley & Sons.

HUTTON, D.V.H. **Fundamentals of Finite Element Analysis**. The McGraw–Hill Companies, 2004.

JOIA Filho, Paulo. **Reconstrução e geração de malhas em estruturas biomecânicas tridimensionais para análise por elementos finitos** – 2008.118f. **Dissertação** (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru.

KATZ, Friedel Hartmann Casimir. **Structural Analysis with Finite Elements**, 2003.

MAIORELLA, B. L.; BLANCH, H. W.; WILKE, C. R. **Alcohol production and recovery**. In: FLECHTER, A., *Advances in biochemical engineering*. Heidelberg: Springer Verlag, 1981.

MANFRIM, I.M.S. **Um estudo dos silos para açúcar: propriedades físicas do material armazenado, recomendações construtivas, normativas e análise estrutural** -1994. **Dissertação** (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MANGINI, M. (2006). **Método dos elementos finitos generalizados para análise de estruturas em casca de revolução**. **Dissertação** (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MOAVENI, Saeed. **Finite element analysis**. Theory and application with ANSYS, Prentice-Hall do Brasil.

OROZCO, J.C.G. **Contribuição ao estudo de painéis reforçados**: comparação entre o método da chapa ortotrópica e o método dos elementos finitos - 2009.194p. **Dissertação** (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

OWEN, D.; HINTON, E. **Finite elements in plasticity: theory and practice**. Swansea, UK, Pineridge Press Ltda, 1980.

PAYNE, John Howard (Comp.), 1906. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana**. Tradução Florenal Zarpelon. São Paulo: Nobel: STAB: 1989.

PHILIPPIDIS, G. P. & HATZIS, C. **Biochemical engineering analysis of critical process factors in the biomass-to-ethanol technology**. Biotechnology Progress, New York, 1997.

RAO, S. **The finite element method in engineering**. Oxford, Pergamon Press, 1989.

REIN, P. **Cane Sugar Engineering**. Berlin, Germany, 2007.

RODRIGUES, M. I.; ANDRIETTA, S. R.; MAUGERI FILHO, F. **Simulação da produtividade e rendimento em fermentação alcoólica contínua, para reatores em fermentação alcoólica contínua, para reatores operando em condições ideais e não ideais de mistura**. Stab. Açúcar, Álcool e Sub-produtos, 1992.

SÁNCHEZ, Aparicio C. A.(2001). **Estudo de impacto usando elementos finitos e análise não linear**. São Carlos. 126p. **Dissertação** (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SIQUEIRA, A. M. **Proposta de otimização para destilarias autônomas**. Stab. Açúcar, Álcool e Sub-produtos, 1993.

TELLES, Pedro C. da Silva. **Vasos de Pressão**. LTC – Livro Técnicos e Científicos Editora – 2. ed. ,1996.

TOSETTO, Gisele Mantei. **Influência da matéria-prima no comportamento cinético de levedura na produção de etanol**. Campinas, 2002.

UIC, University of Illinois at Chicago. **4.181 SHELL181 Finite Strain Shell**. Disponível em: <http://uic.edu/depts/accc/software/ansys/html/elem_55/chapter4/ES4-181.htm>. Acesso em: 09 set. 2009

_____. **Construções em aço – projeto** – EESC – USP. **Apostila**, 2008.

_____. **Edifícios industriais em aço com ponte rolante – exemplo e cálculo**. EESC-USP, **Apostila**, 1994.

8 APÊNDICE

Apresentam-se três exemplos práticos comparando-se o modelo analítico com o modelo de elementos finitos para comprovação do método utilizado. Nestes exemplos respectivamente, esforços na base devido à pressão externa (Apêndice A), tensão nas paredes devido à pressão interna (Apêndice B) e tensão nas paredes devido à pressão hidrostática (Apêndice C) fica evidente a comprovação estrutural do método utilizado.

8.1 APÊNDICE A – CHAMINÉ CILÍNDRICA

8.1.1 Introdução

Neste exemplo comparou-se o momento fletor na base da chaminé obtido analiticamente através da força do vento com o MEF.

A existência de um movimento entre um fluido viscoso e um corpo sólido que o recorre resultara em uma força F , que depende de vários fatores como: forma e tamanho do corpo, velocidade do fluido, densidade, viscosidade, etc. Com isso, foi recorrido a métodos experimentais para determinar a força resultante dos corpos. Assim decompondo a força F paralelamente à direção do movimento foi encontrado a força F_D denominada força de arrasto, conforme figura 47.

8.1.2 Material e método

Para o estudo dos resultados, utilizou-se a equação 8 obtida para uma esfera, podendo ser utilizada para escoamento incompressível sobre qualquer corpo,

dependendo do número de Reynolds e forma do corpo. Sendo assim o coeficiente de arrasto C_D é definido pela equação 8:

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A} \quad (8)$$

Devido a não consideração da compressibilidade, a força de arrasto será a somatória do arrasto de atrito e do arrasto de pressão, sendo assim o coeficiente de arrasto é uma função do número de Reynolds.

Para determinar-se o número de Reynolds, onde é caracterizado o regime do escoamento utilizamos a equação 9:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot d}{\mu} \quad (9)$$

Apresenta-se a variação do coeficiente de arrasto C_D sobre um cilindro liso e uma esfera lisa com o número de Reynolds Re , conforme figura 46.

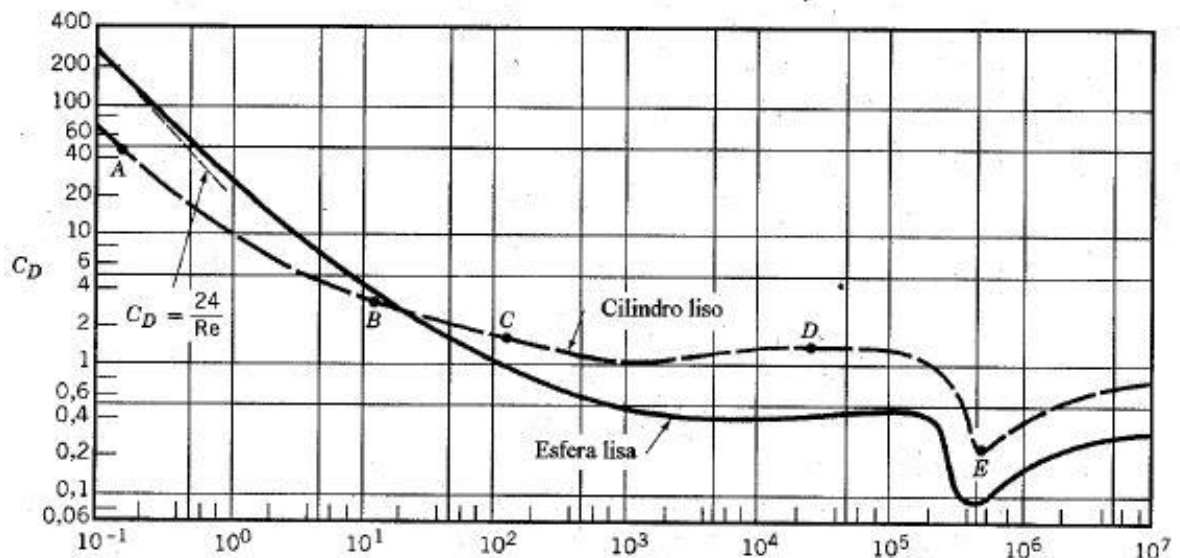


Figura 46 - Coeficiente de arrasto para um cilindro liso e esfera lisa como uma função do número de Reynolds.

O método utilizado considerou o escoamento uniforme e desconsiderou os efeitos de extremidade e adotou as condições do ar na condição padrão americana, conforme tabela 16.

Tabela 16 - Condições da atmosfera-padrão americana no nível do mar, FOX (1934).

Propriedade	Símbolo	SI
Temperatura	T	15 [°C]
Pressão	p	101,3 [KPa] (abs)
Massa específica	ρ	1,225 [kg/m ³]
Viscosidade	μ	1,789 × 10 ⁻⁵ [kg/m.s]

Em seguida a área A é a área total da superfície em contato com o ar, equação 10:

$$A = D \cdot H \quad (10)$$

Sendo a força F_D uniforme em todo o comprimento, a força resultante atuará na altura média da chaminé, assim o momento resultante na base da chaminé considerando a vinculação como engastada, equação 11:

$$M = F_D \cdot \frac{H}{2} \quad (11)$$

A pressão nominal aplicada à face externa da chaminé poderá ser expressa pela equação 12:

$$P = \frac{F_D}{A} \quad (12)$$

Neste exemplo foi desconsiderado o peso próprio da chaminé.

8.1.2.1 Modelo analítico

- a) formato do vaso: cilíndrico;

b) características gerais:

- a) velocidade do ar: $V = 50$ [Km/h];

- b) temperatura: $T = 15$ [°C];

- c) pressão: $p = 101,3$ [KPa];

c) propriedades geométricas:

- a) diâmetro externo - $D = 1.000$ [mm];

- b) altura - $H = 25.000$ [mm];

d) solução:

- a) número de Reynolds utilizando a equação 9: $Re = 9,55 \times 10^5$;

- b) da figura 46, o coeficiente de arrasto $C_D = 0,35$;

- c) a área do cilindro em contato com o ar da equação 10: $A = 25$ [m²];

- d) força de arrasto F_D da equação 8: $F_D = 1039,71$ [N];

- e) a pressão externa na face da chaminé da equação 12: $P = 41,59$ [Pa];

- f) portanto o momento fletor resultante na base da chaminé da equação 11:

$M = 12996$ [N.m];

8.1.2.2 Modelo por elementos finitos

Utilizou-se o “software” ANSYS 11.0 Workbench, tipo de análise 3-D.

Modelo de análise: estrutural estática; foi adicionado o aço estrutural “structural steel” somente para modelagem, como o objetivo é a verificação das reações do vínculo foi desconsiderado quaisquer esforços obtidos no modelo.

Modelagem: foi utilizado o Autocad 2008 e importado em extensão SAT.

Carregamento: foi aplicada a pressão de 41,59 [Pa] na área de contato do ar, ou seja, na face externa da chaminé (metade de toda área da face externa da chaminé), vide figura 47.

Geração da malha: elemento tipo casca, quadrilaterais, número de nós 3239, número de elementos 3220 e o tamanho do elemento foram definidos em 160 [mm], conforme figura 48.

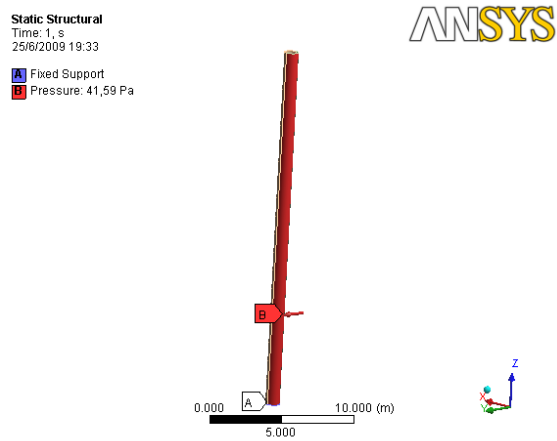


Figura 47 - Detalhe da aplicação da pressão de 41,59 [Pa] e o engaste fixo da base.

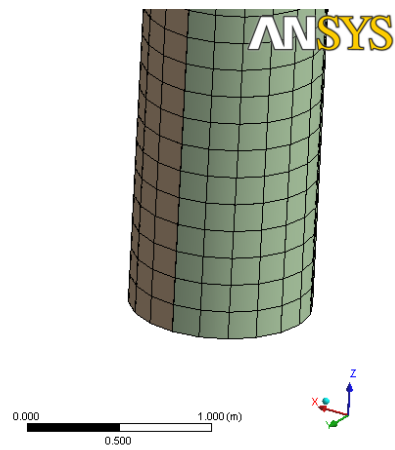


Figura 48 - Detalhe da malha, Apêndice A

8.1.2.3 Resultados

Através do comando “solution” foi obtido os seguintes resultados da tabela 17.

Tabela 17 - Resultados extraídos da vinculação do modelo no ANSYS.

Object Name	Moment Reaction	Force Reaction
State	Solved	
Definition		
Type	Moment Reaction	Force Reaction
Location Method	Boundary Condition	
Boundary Condition	Fixed Support	
Options		
Result Selection	All	
Display	All Time Points	
Maximum Value Over Time		
X Axis	2,132e-007 N·m	-1039,8 N
Y Axis	-12997 N·m	-1,0852e-008 N
Z Axis	-4,6473e-008 N·m	6,653e-010 N
Total	12997 N·m	1039,8 N
Minimum Value Over Time		
X Axis	2,132e-007 N·m	-1039,8 N
Y Axis	-12997 N·m	-1,0852e-008 N
Z Axis	-4,6473e-008 N·m	6,653e-010 N
Total	12997 N·m	1039,8 N

O resultado do momento fletor encontrado em torno do eixo Y (tabela 17) é de -12997 [N.m] não ultrapassando 1% do resultado analítico. Mostra-se também o tipo de restrição aplicada na base da chaminé do tipo engaste.

8.1.3 Conclusões

Os resultados obtidos no ANSYS para obtenção do momento fletor na base de uma chaminé para uma solução conhecida como observado na tabela 17, não ultrapassaram 1% do valor calculado analiticamente.

8.2 APÊNDICE B – VASOS DE PRESSÃO ESFÉRICO

8.2.1 Introdução

Vasos de pressão tipo esfera seria o modelo mais econômico chegando a menor espessura de costado comparado com pressão e volume contido, devido ao grande diâmetro dificulta o transporte e a fabricação, em raros casos podendo ser transportados inteiros, encarecendo o custo de fabricação. Os tampos utilizados na maioria dos vasos de pressão atuais são toriesféricos que são muito mais fáceis de fabricar que os hemisféricos, sendo que às vezes podem ter a metade da espessura de um casco cilíndrico de mesmo diâmetro. Quando a relação da espessura do casco t pelo raio r for maior que 10, o vaso será considerado de parede fina, sendo assim inclusos em uma categoria geral como estruturas de cascas.

8.2.2 Material e método

O método apresentado é válido para cascas finas, portanto foi adotado a seguinte fórmula para calcular as tensões de tração no casco esférico, equação 13:

$$\sigma = \frac{p \cdot r}{2 \cdot t} \quad (13)$$

Quando o vaso for pressurizado a sua parede interna estará sujeita a tensões de tração uniformes σ em todas as direções devido a sua simetria. São denominadas tensões de membrana as tensões que agem tangencialmente à superfície da casca.

Foram obtidas as tensões de cisalhamento máximas sendo que, as rotações foram consideradas fora dos planos x e y , entretanto, todas as tensões de cisalhamento nos planos são iguais a zero. Fazendo-se rotações de 45° sobre os eixos x e y foram obtidos às tensões de cisalhamento máxima $\sigma/2$, equação 14:

$$\tau = \frac{\sigma}{2} = \frac{p \cdot r}{4 \cdot t} \quad (14)$$

Levando em consideração que o vaso analisado é de parede fina, as tensões internas de cisalhamento fora do plano σ_3 na direção z é bem menor comparado com as tensões σ_1 e σ_2 , sendo assim o estado de tensão na superfície interna foi considerado igual ao estado de tensão na superfície externa, denominado tensão biaxial.

As conexões de entrada e saída dos fluidos, colunas de sustentação e quaisquer elementos fixados na casca podem provocar força, causando concentração de tensões e não foram analisados por este trabalho. Foi analisado somente o vaso submetido à pressão interna superando a pressão externa e desconsiderado: peso-próprio, força de vento, peso do conteúdo interno, resistência de solda e quaisquer forças externas.

8.2.2.1 Modelo analítico

- a) formato do vaso: esférico;
- b) propriedades geométricas:
 - a) diâmetro interno - $d = 450,4$ [mm];
 - b) espessura do casco - $t = 6,35$ [mm];
- c) fluido: ar comprimido;
- d) propriedades do material: aço estrutural;
 - a) tensão de tração admissível - $\sigma_{adm} = 96,53$ [MPa];
 - b) tensão de cisalhamento admissível - $\tau_{adm} = 41,37$ [MPa];
 - c) deformação normal máxima na superfície externa - $\epsilon = 0,0003$ [mm/mm];
 - d) módulo de elasticidade - $E = 200$ [GPa];
 - e) coeficiente de Poisson - $\nu = 0,28$;
- e) solução:
 - a) pressão máxima admissível p_1 utilizando a tensão de tração substituindo na equação 13: $p_1 = 5,44$ [MPa];
 - b) pressão máxima admissível p_2 utilizando a tensão de cisalhamento substituindo na equação 14: $p_2 = 4,67$ [MPa];

- c) pressão máxima admissível p_3 utilizando a deformação normal a partir da lei de Hooke para a tensão biaxial: $p_3 = 4,70$ [MPa];
 - d) portanto a pressão máxima admissível será $p_{adm} = 4,67$ [MPa];
- utilizando a máxima pressão admissível e substituindo na equação 13 as tensões de tração na casca são: $\sigma = 82,81$ [MPa];

8.2.2.2 Modelo por elementos finitos

Utilizou-se o software ANSYS 11.0 Workbench, elementos axisimétricos 2-D.

Modelo de análise: estrutural estática, com os mesmos parâmetros do modelo do aço estrutural citados no item anterior.

Modelagem: foi utilizado o Autocad 2008 e importado em extensão SAT.

Carregamento: foi aplicada a pressão de 4,67 [MPa] na linha interna correspondente a superfície interna da casca, conforme figura 49

Geração da malha: elementos quadrilaterais, número de nós 8281, número de elementos 2518 e o tamanho do elemento foram definidos em 1 [mm], vide figura 50

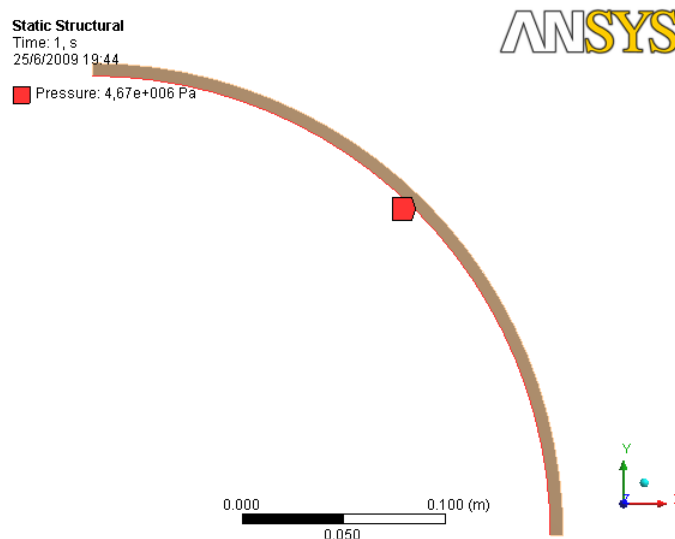


Figura 49 - Detalhe da aplicação da pressão de 4,67 [MPa] e a geometria axisimétrica.

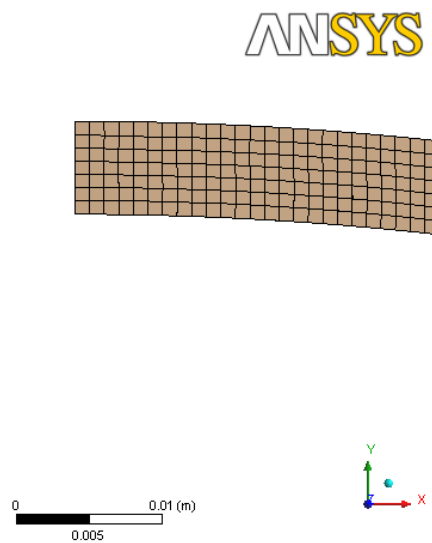


Figura 50 - Detalhe da malha, Apêndice B.

8.2.2.3 Resultados

Através do comando “solution” foram obtidos os seguintes resultados, figuras 51, 52 e 53

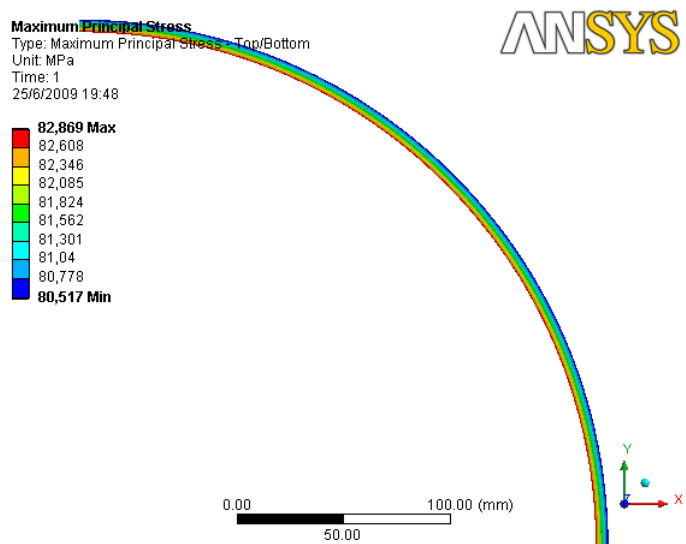


Figura 51 - Panorama de tensões, sob carregamento de pressão.

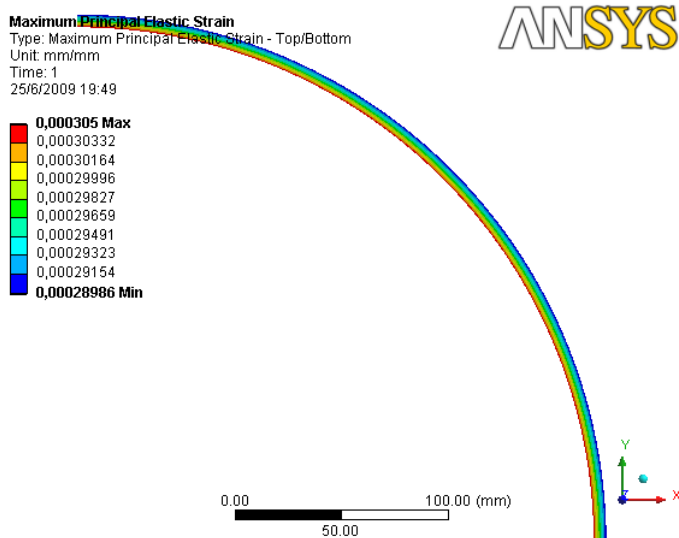


Figura 52 - Panorama das deformações normais.

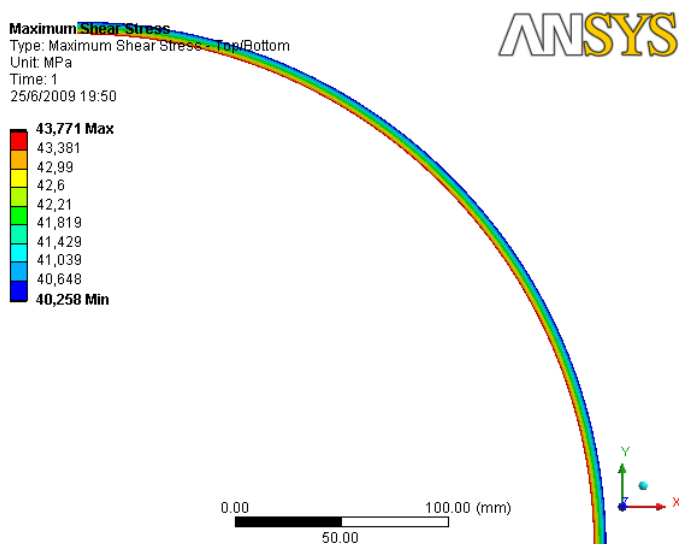


Figura 53 - Panorama das tensões de cisalhamento.

8.2.3 Conclusões

Os resultados obtidos no ANSYS para obtenção da intensidade de tensões de uma geometria de elementos axisimétricos de solução conhecida como observado na figura 51 foi obtido menos de 1% de valores superiores ao valor calculado analiticamente.

8.3 APÊNDICE C – RESERVATÓRIO CILÍNDRICO

8.3.1 Introdução

Comparou-se a tensão circunferencial calculada analiticamente com o MEF devido ao peso da água de um reservatório cilíndrico.

Vasos cilíndricos são usados normalmente como reservatórios para armazenamento de líquidos. Foi utilizado a mesma relação do Apêndice B, $r/t > 10$ considerando o vaso de paredes finas.

O vaso estará sujeito as tensões normais σ_1 no sentido circunferencial ou tangencial e σ_2 no sentido longitudinal ou axial, ambas exercem tração sobre o material.

8.3.2 Material e método

Devido à pressão interna será desenvolvida a tensão circunferencial σ_1 conforme equação 15.

$$\sigma_l = \frac{p \cdot r}{t} \quad (15)$$

A pressão circunferencial é obtida pela pressão da água, usa-se a lei de Pascal, equação 16.

$$p = \gamma \cdot z \quad (16)$$

Como o reservatório é aberto a água não exerce esforço no sentido longitudinal, sendo somente o peso do reservatório suportado pelas paredes σ_2 conforme equação 17.

$$\sigma_2 = \frac{W}{A} \quad (17)$$

Foi analisado o vaso submetido à pressão interna superando a pressão externa e desconsiderado a força de vento e efeito da solda.

8.3.2.1 Modelo analítico

- a) formato do vaso: cilíndrico ;
- b) propriedades geométricas:
 - a) diâmetro interno - $d = 1219,2$ [mm];
 - b) espessura do casco - $t = 12,7$ [mm];
 - c) altura - $H = 914,4$ [mm];
- c) fluido: água;
 - a) densidade – $\gamma = 1000$ [kg/m³];
 - b) Propriedades do material: aço estrutural (structural steel);
 - c) densidade – $\gamma = 7850$ [kg/m³];
 - d) módulo de elasticidade - $E = 200$ [GPa] ;
 - e) coeficiente de Poisson - $\nu = 0,3$;
- d) solução:
 - a) pressão no ponto localizado a uma profundidade de $914,4$ [mm], substituindo na equação 16: $p = 8,96 \times 10^3$ [Pa];
 - b) portanto, a tensão circunferencial aplicando a equação 15: $\sigma_1 = 4,3 \times 10^5$ [Pa];

8.3.2.2 Modelo por elementos finitos

Utilizou-se o software ANSYS 11.0 Workbench, tipo de análise 3-D.

Modelo de análise: estrutural estática foi adicionado o aço estrutural “structural steel”.

Modelagem: foi utilizado o Autocad 2008 e importado em extensão SAT.

Carregamento: foi aplicada a pressão hidrostática com aceleração de $9,8066 \text{ [m/s}^2\text{]}$, conforme figura 54.

Geração da malha: elemento tipo casca, quadrilaterais, número de nós 5852, número de elementos 5698 e o tamanho do elemento foi definido em 25 [mm], fig. 55

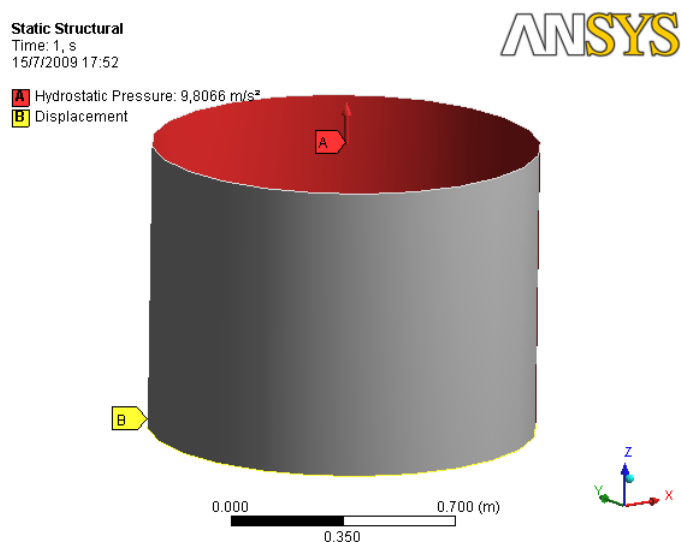


Figura 54 - Detalhe da aplicação da pressão hidrostática e a restrição no eixo z.

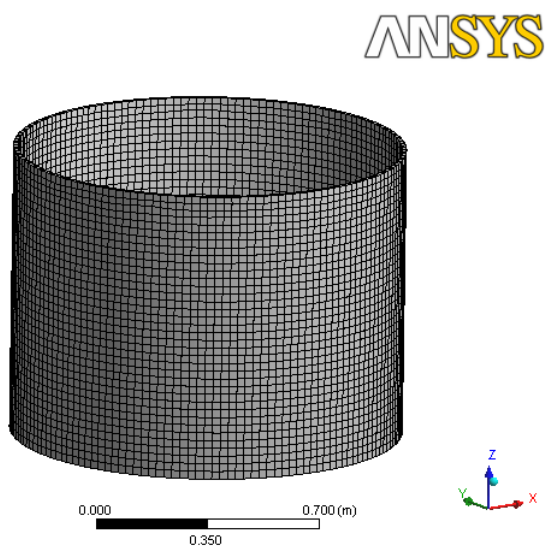


Figura 55 - Detalhe da malha, Apêndice C.

8.3.2.3 Resultados

Através do comando “solution” foram obtidos os seguintes resultados, figuras 56 e 57.

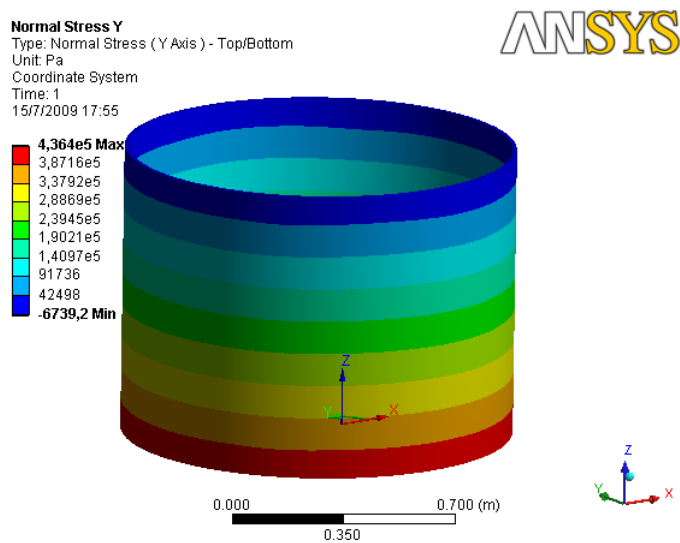


Figura 56 - Panorama de tensões circunferenciais no eixo Y, sob carregamento hidrostático.

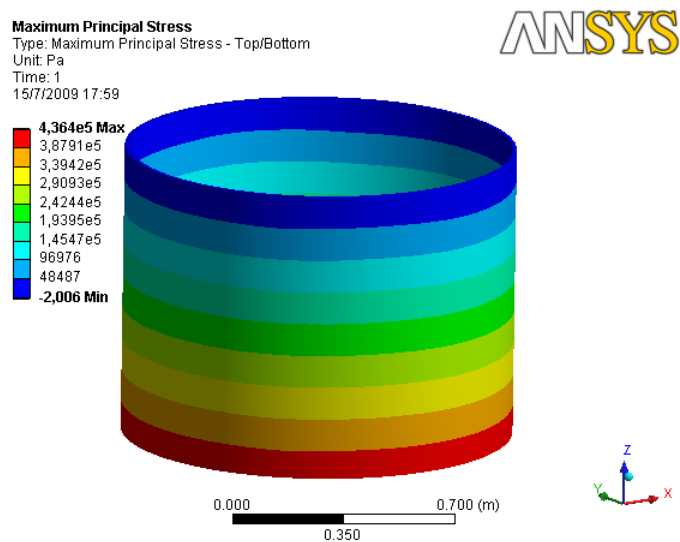


Figura 57 - Panorama de tensões máximas, sob carregamento hidrostático.

8.3.3 Conclusões

Os resultados obtidos no ANSYS para obtenção das tensões circunferenciais foram idênticas aos valores das tensões máximas, sendo que o valor obtido não superou a 1,5% do valor calculado analiticamente como observado nas figuras 56 e 57.