

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

OTIMIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO TETO CÔNICO DE UM TANQUE  
ATMOSFÉRICO

por

Fábio Zorzo

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, maio de 2012

OTIMIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO TETO CÔNICO DE UM TANQUE  
ATMOSFÉRICO

por

Fábio Zorzo  
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de:

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Aprovada por:

Prof. Dr. Adriane Prisco Petry, UFRGS/PROMEC

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes, UFRGS/PROMEC

Prof. Dr. Luciano Jorge de Andrade Junior, UDC

Prof. Dr. Zacarias Chamberlain Praiva, UPF

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 30 de maio de 2012

*A minha esposa Ivani e a minha filha Júlia.*

*Aos meus pais Gentil e Ivoni.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por tudo.

Ao Professor Walter Jesus Paucar Casas pela competência, dedicação e amizade.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Ao PROMEC/UFRGS por colocar à minha disposição sua estrutura.

A minha esposa Ivani pelo carinho, confiança, incentivo e ajuda em todos os momentos.

Aos meus pais Gentil e Ivoni pelo exemplo e incentivo.

As minhas irmãs Sandra e Janice pelo incentivo.

Ao amigo André Alaniz Cesário por ter me cedido um pouco dos seus conhecimentos sobre elementos finitos.

Ao André Zolko Gasko/CESUP pelo suporte com o software Ansys CFX.

Aos professores membros da Comissão de Avaliação.

À CAPES pelo apoio financeiro.

## RESUMO

O projeto do teto cônico de um tanque atmosférico depende da análise de duas condições de carregamento independentes. Para a condição 1 tem-se a carga de peso próprio mais a carga de equipamentos, passarela e outros. Para a condição 2 tem-se a carga de peso próprio mais a carga de vento. A carga de vento muda à medida que se muda o ângulo de inclinação do teto e, essa relação de carga/inclinação, é diferente para cada relação  $h/D$  (altura/diâmetro) do tanque. Portanto, a espessura do teto para uma dada inclinação deste é desconhecida e, conseqüentemente, o seu peso também. Surge então a necessidade de utilizar uma ferramenta para encontrar o melhor ângulo que minimize o peso do teto. O tanque em estudo é um tanque com altura do costado  $h$  de 12 m e diâmetro  $D$  de 12 m, sendo, portanto, um tanque com relação  $h/D = 1$ . Todas as etapas foram integralmente desenvolvidas dentro da plataforma do programa Ansys Workbench. Para a simulação da condição 2, como primeiro passo são obtidas as pressões exercidas pelo vento sobre o teto do tanque através do programa Ansys CFX; no passo seguinte, através da interação fluido-estrutura, essas pressões são utilizadas como condição de contorno pelo programa Ansys Mechanical. Para a simulação da condição 1 é utilizada uma pressão externa para baixo de 1 kPa mais a carga do peso próprio. Os resultados da simulação estrutural são os deslocamentos nos nós do teto e a tensão de von Mises para as duas condições de carga. O processo de otimização é realizado pela ferramenta *Goal Driven Optimization* do programa Ansys Workbench com o objetivo de minimizar o peso do teto. As variáveis de projeto são a espessura e o ângulo de inclinação do teto. Como restrições na estrutura do teto, os deslocamentos são limitados a 1 mm e as tensões são limitadas a 145 MPa para as duas condições de carregamento. Os resultados encontrados mostram que, para esse tanque, o ângulo de inclinação ótimo é 29,48°.

Palavras-chave: Teto cônico; carga de vento; elementos finitos; otimização.

## ABSTRACT

The design of the conical roof of an atmospheric tank depends on two independent loading conditions. For the first condition we have a roof dead load plus the load of equipments, walkway and others. For the second condition we have a roof dead load plus the wind load. The wind load on roof changes as the angle of slope of the roof changes and this relationship is different for each  $h/D$  (height/diameter) ratio of the tank. If the load is unknown, then the thickness of the roof is unknown too and hence its weight is unknown. Then comes the need to use a tool to find the best angle of slope that minimizes the weight of the roof. The study is carried out in a tank with cylindrical body height  $h$  of 12 m and diameter  $D$  of 12 m, therefore a tank with ratio  $h/D = 1$ . All steps were fully developed within the Ansys Workbench platform. As a first step pressures of the wind over the roof of the tank are obtained through the Ansys CFX. Through the fluid-structure interaction these pressures are used as boundary conditions by Ansys Mechanical for the simulation of the second condition. To simulate the first condition it is used a external downward pressure of 1 kPa plus the roof dead load. The structural simulation results are displacements in the roof nodes and von Mises stresses for the two conditions analyzed. The optimization process is performed by the tool *Goal Driven Optimization* of Ansys Workbench Program and the goal is to minimize the weight of the roof. The design variables are the thickness and the angle of slope of the roof. As constraint displacements obtained in the two load conditions are limited to 1 mm and stresses are limited to 145 MPa. For the studied tank, the optimum angle of inclination of the roof is 29,48°.

Keywords: Conical roof; wind load; finite element; optimization.

# ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>xiii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Generalidades	1
1.2 Justificativa	3
1.3 Objetivos da pesquisa	3
1.4 Metodologia e organização do trabalho	4
<b>2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>11</b>
3.1 Tanques atmosféricos de teto cônico	11
3.2 Teoria de placas e cascas	12
3.2.1 Teoria de placas	13
3.2.2 Teoria de cascas	13
3.3 Método dos elementos finitos (MEF)	15
3.3.1 Elemento utilizado no trabalho	15
3.4 Engenharia do vento	16
3.4.1 Pressão dinâmica	17
3.4.2 Coeficiente de pressão	18
3.4.3 Velocidade característica	18
3.5 Interação fluido-estrutura	22
3.6 Mecânica dos fluidos	23
3.6.1 Método de turbulência <i>k-epsilon</i>	23
3.6.2 Número de Reynolds	24
3.7 Otimização	25
3.7.1 Tipos de otimização	27
3.7.2 Variáveis de projeto	27
3.7.3 Função objetivo	28
3.7.4 Restrições	29
3.7.5 Goal Driven Optimization (GDO)	29

<b>4. MODELAGEM DO SISTEMA FLUIDO-ESTRUTURA</b>	<b>31</b>
4.1 Determinação do tanque alvo do estudo	31
4.2 Análise CFD	33
4.2.1 Análise de convergência para a malha do fluido	35
4.2.2 Comparação qualitativa com experimento em túnel de vento	41
4.3 Análise estrutural	44
4.3.1 Análise de convergência para a malha do tanque	45
4.3.2 Condições de contorno	47
<b>5. OTIMIZAÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DO TETO</b>	<b>49</b>
5.1 Melhor ângulo de acordo com a ABNT NBR 7821	52
5.2 Desenvolvimento da otimização no Ansys Workbench	53
5.2.1 Opção padrão	53
5.2.2 Opção melhorada	56
<b>6. ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	<b>60</b>
6.1 Gráficos para a condição 1	60
6.2 Gráficos para a condição 2	65
6.3 Análise de sensibilidade	70
6.4 Resultados do ponto ótimo	71
<b>7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	<b>74</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE A - Etapas da simulação</b>	<b>80</b>
A-1 Workbench	80
A-2 Design Modeler	82
A-3 Mesh	83
A-4 CFX Pré	84
A-5 CFX Solver	88
A-6 Ansys Mechanical	89
A-7 Goal Driven Optimization	90



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Tanque de armazenamento com teto cônico	1
Figura 1.2 Tanque de armazenamento com teto cônico	2
Figura 2.1 Coeficientes de pressão para um ângulo de inclinação do teto $\beta$ de $45^\circ$ e relação $h/D$ de 1,16 e $Re$ de $1 \times 10^5$	6
Figura 2.2 Peso do teto em função do diâmetro $D$	8
Figura 3.1 Elemento de casca Shell 181	15
Figura 3.2 Gráfico das isopletas da velocidade básica do vento (m/s)	19
Figura 3.3 Exemplos de estruturas de treliça obtidas por Michell em 1904	26
Figura 3.4 Otimização de forma de um furo, a) projeto inicial, b) projeto final	28
Figura 4.1 Dimensões do teto	31
Figura 4.2 Volume de controle	34
Figura 4.3 Coeficientes de pressão obtidos com a malha definida na Tabela 4.3	36
Figura 4.4 Coeficientes de pressão obtidos com a malha definida na Tabela 4.4	37
Figura 4.5 Coeficientes de pressão obtidos com a malha definida na Tabela 4.5	37
Figura 4.6 Coeficientes de pressão obtidos com a malha definida na Tabela 4.6	38
Figura 4.7 Coeficientes de pressão obtidos com a malha definida na Tabela 4.7	39
Figura 4.8 Coeficientes de pressão obtidos com a malha definida na Tabela 4.8	40
Figura 4.9 Coeficientes de pressão obtidos com a malha definida na Tabela 4.9	40
Figura 4.10 Coeficientes de pressão obtidos no experimento em túnel de vento	42
Figura 4.11 Coeficientes de pressão obtidos pela metodologia deste trabalho	42
Figura 4.12 Detalhe central da Figura 4.11	43
Figura 4.13 Deslocamento dos nós da malha do teto com tamanho de elemento de 200 mm	45
Figura 4.14 Deslocamento dos nós da malha do teto com tamanho de elemento de 150 mm	46
Figura 4.15 Deslocamento dos nós da malha do teto com tamanho de elemento de 100 mm	46
Figura 4.16 Deslocamento do teto $u_2$ considerando o teto engastado	48
Figura 4.17 Deslocamento do costado considerando o fundo do tanque engastado	48
Figura 5.1 Variação do volume em função do ângulo de inclinação $\beta$ do teto	52
Figura 6.1 Relação deslocamento $u_1$ x espessura $t$	61

Figura 6.2 Relação tensão $\sigma_1$ x espessura $t$	62
Figura 6.3 Relação deslocamento $u_1$ x inclinação $\beta$	63
Figura 6.4 Relação tensão $\sigma_1$ x inclinação $\beta$	63
Figura 6.5 Relação deslocamento $u_1$ x espessura $t$ x inclinação $\beta$	64
Figura 6.6 Relação tensão $\sigma_1$ x espessura $t$ x inclinação $\beta$	64
Figura 6.7 Relação deslocamento $u_2$ x espessura $t$	65
Figura 6.8 Relação tensão $\sigma_2$ x espessura $t$	66
Figura 6.9 Relação deslocamento $u_2$ x inclinação $\beta$	67
Figura 6.10 Relação tensão $\sigma_2$ x inclinação $\beta$	68
Figura 6.11 Relação deslocamento $u_2$ x espessura $t$ x inclinação $\beta$	69
Figura 6.12 Relação tensão $\sigma_2$ x espessura $t$ x inclinação	69
Figura 6.13 Análise de sensibilidade	70
Figura 6.14 Coeficientes de pressão para o ponto ótimo	71
Figura 6.15 Detalhe central da Figura 6.14	71
Figura 6.16 Deslocamento $u_1$ para o ponto ótimo	72
Figura 6.17 Deslocamento $u_2$ para o ponto ótimo	72
Figura 6.18 Tensão $\sigma_1$ para o ponto ótimo	73
Figura 6.19 Tensão $\sigma_2$ para o ponto ótimo	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Parâmetros meteorológicos	21
Tabela 3.2 Valores mínimos do fator estatístico $S_3$	21
Tabela 4.1 Dimensões do tanque	32
Tabela 4.2 Constantes utilizadas na simulação CFD	35
Tabela 4.3 Tamanho dos elementos da malha nas superfícies do volume de controle	36
Tabela 4.4 Tamanho dos elementos da malha nas superfícies do volume de controle para o refinamento do costado	36
Tabela 4.5 Tamanho dos elementos da malha nas superfícies do volume de controle para o refinamento do costado	37
Tabela 4.6 Tamanho dos elementos da malha nas superfícies do volume de controle para o refinamento do teto	38
Tabela 4.7 Tamanho dos elementos da malha nas superfícies do volume de controle para o refinamento do teto	38
Tabela 4.8 Tamanho dos elementos da malha nas superfícies do volume de controle para o refinamento da região curva	39
Tabela 4.9 Tamanho dos elementos da malha nas superfícies do volume de controle para o refinamento da região curva	40
Tabela 4.10 Propriedades do material do tanque	44
Tabela 5.1 Configuração do DOE e da <i>response surface</i>	53
Tabela 5.2 Número de <i>design points</i>	54
Tabela 5.3 <i>Design points</i> gerados	54
Tabela 5.4 Resultados da otimização para os três métodos considerados	55
Tabela 5.5 Configuração do DOE e da <i>response surface</i>	56
Tabela 5.6 <i>Design points</i> gerados	56
Tabela 5.7 Resultados da otimização para os três métodos considerados	58

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

### Abreviaturas

<i>ABIR</i>	Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes e Bebidas não Alcoólicas
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>API</i>	American Petroleum Institute
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics
<i>DOE</i>	Design of Experiments
<i>GDO</i>	Goal Driven Optimization
<i>IBRAVIN</i>	Instituto Brasileiro do Vinho
<i>MEF</i>	Método dos Elementos Finitos
<i>MOGA</i>	Multi-Objective Genetic Algorithm
<i>NBR</i>	Norma Brasileira Registrada
<i>NLPQL</i>	Non-linear Programming by Quadratic Lagrangian

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Latinas

$A$	Área
$b$	Parâmetro meteorológico
$C_p$	Coefficiente de pressão
$D$	Diâmetro externo do tanque
$D_{fabr}$	Diâmetro do disco para a fabricação do teto
$E$	Módulo de elasticidade longitudinal
$e_{mín}$	Espessura mínima para o costado do tanque
$\{F_f\}$	Vetor de força no fluido
$F_r$	Fator de rajada
$\{F_s\}$	Vetor de força na estrutura
$h$	Altura do costado do tanque
$[K_f]$	Matriz de rigidez do fluido
$[K_s]$	Matriz de rigidez da estrutura
$[M_f]$	Matriz de massa do fluido
$[M_s]$	Matriz de massa da estrutura
$P$	$p_e - p_k$
$\{P\}$	Vetor de pressão nodal
$p_k$	Pressão em um ponto a barlavento não afetado pelo objeto
$p_e$	Pressão em um ponto do objeto analisado
$p$	Expoente da lei potencial de variação de $S_2$
$q$	Pressão dinâmica
$s$	Comprimento maior do cone
$S_1$	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 estatístico
$t$	Espessura
$t_{mín}$	Espessura mínima do teto
$u_1$	Deslocamento dos nós da malha do teto para a condição 1

$u_2$	Deslocamento dos nós da malha do teto para a condição 2
$\{U\}$	Vetor de deslocamento nodal
$V$	Volume
$V_e$	Velocidade em um ponto do objeto analisado
$V_k$	Velocidade em um ponto a barlavento não afetado pelo objeto
$V_0$	Velocidade básica do vento
$z$	Altura da estrutura sobre o terreno
$X,Y,Z$	Coordenada cartesiana do sistema global
$x,y,z$	Coordenada cartesiana do sistema local

### **Símbolos gregos**

$\beta$	Ângulo de inclinação do teto com a horizontal
$\gamma$	Densidade do líquido armazenado
$\rho$	Densidade do ar
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\rho$	Densidade do ar

### **Demais símbolos**

.	Primeira derivada em relação ao tempo
..	Segunda derivada em relação ao tempo

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Generalidades

Os tanques estão presentes nos mais diversos setores, mas é na indústria que esses se destacam pelo seu necessário uso no armazenamento dos mais variados produtos tais como vinho, água, cerveja, suco, amônia e gasolina. Devido a isso é indiscutível a sua importância e tornam-se relevantes os estudos de otimização destes e de suas partes componentes. A construção de um tanque de armazenamento normalmente é regulamentada pela norma Americana API 650 e, aqui no Brasil, utiliza-se também a norma ABNT NBR 7821. Os tanques da Figura 1.1 possuem teto cônico e são utilizados para armazenar óleo vegetal. Possuem capacidade de armazenar 2 100 000 litros. Na Figura 1.2 os três tanques mais ao fundo possuem teto cônico com vigas soldadas neste para aumentar a resistência. São utilizados para armazenar vinho e cada um deles tem capacidade de armazenar 1 500 000 litros.



Figura 1.1 Tanque de armazenamento com teto cônico

Fonte: [Camera, 2012]



Figura 1.2 Tanque de armazenamento com teto cônico

Fonte: [Vinícola Casa Rodrigues, 2012]

Um levantamento realizado pelo Ibravin (Instituto Brasileiro do Vinho) mostra que, no ano passado, as vendas de vinhos produzidos no Rio Grande do Sul aumentaram 7%. O volume é o terceiro maior da última década: foram 249,6 milhões de litros de vinhos finos e de mesa comercializados ante os 233,4 milhões em 2010. [Engarrafador Moderno, 2012]. De acordo com a Abir (Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes e Bebidas Não Alcoólicas), entre 2006 e 2010, a venda de sucos teve acréscimo de 53% e a venda de energéticos teve um crescimento de 325%. Isso se deve principalmente ao aumento do poder de compra da população. [Economia&Negócios, 2012]. O crescimento na venda de gasolina em 2010 foi de 18% em relação a 2009. Este ano, até novembro, o crescimento da demanda por esse derivado foi de 23,2% em relação ao ano anterior. [Petrobrás, 2011].

O parágrafo anterior demonstra o aumento das vendas de bebidas e de gasolina nos últimos anos o que significa também um aumento na demanda por tanques. Demonstra também um aumento claro no poder de compra das pessoas e, por isso, acredita-se que esse



consumo deve pelo menos se manter em níveis estáveis, ou então, até continuar aumentando. Por isso estudos em tanques visando a otimização destes e de suas partes componentes tornam-se importantes, tanto do ponto de vista econômico quanto do ponto de vista da confiabilidade e segurança na estrutura.

## 1.2 Justificativa

Na ABNT NBR 7821, 1983, define-se que o ângulo de inclinação do teto deve estar compreendido entre  $10^\circ$  e  $37^\circ$ . No entanto não são feitas considerações a respeito do ângulo de inclinação ótimo. Portela e Godoy, 2005, estudaram tanques cujo ângulo de inclinação do teto é  $10,7^\circ$ . Os tanques de aço inox para armazenar vinho de algumas empresas da serra gaúcha possuem em geral ângulo de inclinação do teto entre  $16,7^\circ$  e  $20^\circ$ . MacDonald et al., 1986, desenvolveram um estudo com tanques e silos com ângulo de inclinação de  $25^\circ$ . Sabransky e Melbourne, 1987, desenvolveram um estudo em estruturas de silos com inclinação do teto de  $15^\circ$ ,  $27^\circ$  e  $45^\circ$ . Scalabrin, 2008, apresenta o exemplo de um silo com ângulo de inclinação do teto de  $30^\circ$ . Verifica-se então que existe uma gama muito grande de ângulos de inclinação utilizados e, por isso, define-se como objetivo do trabalho encontrar o ângulo de inclinação ótimo que minimize o peso do teto.

## 1.3 Objetivos da pesquisa

O objetivo da pesquisa é encontrar o ângulo ótimo que minimize o peso de um teto cônico autoportante de um tanque atmosférico para uma relação  $h/D = 1$ .

Objetivos específicos:

- Determinar o tanque alvo do estudo;
- Determinar os coeficientes de pressão do vento;
- Comparação qualitativa com ensaio em túnel de vento;
- Simulação estrutural do teto do tanque;
- Encontrar o ângulo ótimo que minimize o peso do teto;

## 1.4 Metodologia e organização do trabalho

O trabalho é desenvolvido utilizando as ferramentas disponíveis na plataforma do Ansys Workbench. Através do programa Ansys CFX é obtida a pressão exercida pelo vento no teto do tanque em estudo. Através da interação fluido-estrutura esta pressão é utilizada como carga no programa Ansys Mechanical e, acrescentando as demais cargas à estrutura, encontra-se os deslocamentos dos nós da malha do teto e as tensões de von Mises do teto. Através da ferramenta *Goal Driven Optimization* é desenvolvido o processo de otimização. Nesta os deslocamentos do teto são limitados a 1 mm e as tensões de von Mises a 145 MPa. O objetivo é definido como sendo minimizar o peso do teto. As variáveis de projeto são a espessura e o ângulo de inclinação do teto.

O ângulo de inclinação ótimo pode variar em função da relação  $h/D$  e também em função das condições de contorno. Por isso a principal contribuição do trabalho é a utilização dessa metodologia citada no parágrafo anterior, através da qual se pode encontrar o ângulo de inclinação ótimo para cada situação.

O trabalho encontra-se organizado em oito capítulos.

No Capítulo 1 justifica-se o trabalho, determinam-se os objetivos a serem alcançados e a metodologia adotada;

No Capítulo 2 disponibiliza-se a pesquisa bibliográfica, envolvendo diferentes desdobramentos de estudos, técnicas e aplicações correlatas às empregadas neste trabalho;

No Capítulo 3 disponibiliza-se a fundamentação teórica, onde existem diversos subcapítulos e são abordados itens relacionados à teoria que serve de embasamento para o trabalho;

No Capítulo 4 determina-se o tanque alvo do estudo, os coeficientes de pressão do vento e desenvolve-se a simulação estrutural do tanque;

No Capítulo 5 desenvolve-se a otimização;

No Capítulo 6 apresentam-se os resultados;

No Capítulo 7 apresentam-se as conclusões gerais obtidas, bem como as perspectivas para o desenvolvimento de trabalhos futuros na área;

No Capítulo 8 listam-se as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

## 2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo se apresenta uma revisão da literatura relacionada ao tema do trabalho. A pesquisa bibliográfica se desenvolve destacando diversos aspectos relativos à metodologia de estudos realizados em tanques, em especial para pesquisas relacionadas ao efeito das cargas de vento nestes.

MacDonald et al., 1986, desenvolveu um trabalho onde estão determinados os coeficientes de pressão no costado e no teto cônico de um silo ou tanque, sendo que as paredes foram consideradas lisas, ou seja, sem rugosidade externa. Os estudos foram realizados em túnel de vento e foram testadas nove configurações definidas pela combinação de três razões  $h/D$  (0,5; 1 e 2) e três configurações de teto (sem teto, com teto plano e com teto cônico com ângulo de inclinação de  $25^\circ$ ). A base foi modelada de forma a representar uma rugosidade de 0,2 m. Uma das conclusões a que chegou o estudo é que todas as pressões no teto são de sucção. As maiores pressões de sucção ocorrem no centro do teto. Outra região de elevadas pressões de sucção ocorre na entrada do teto na região a barlavento do teto.

Sabransky e Melbourne, 1987, desenvolveram um estudo em silos com teto cônico realizado em túnel de vento onde foi determinada a distribuição das pressões no costado e no teto. Foram testadas cinco configurações diferentes: três com relação  $h/D = 1,16$  e ângulos de inclinação do teto  $\beta$  de  $15^\circ$ ,  $27^\circ$  e  $45^\circ$ ; e outras duas com ângulo de inclinação do teto  $\beta = 27^\circ$  e relações  $h/D$  de 0,78 e 0,55. O número de Reynolds  $Re$  utilizado no trabalho está entre  $1 \times 10^5$  e  $3 \times 10^5$ . Neste trabalho Sabransky e Melbourne, 1987, destacam a importância da distribuição das pressões no teto para produzir um projeto mais econômico e também para determinar o momento de tombamento do tanque. Os resultados mostraram que tetos cônicos com um ângulo de inclinação menor que  $35^\circ$  possuem apenas pressões de sucção. Para o ângulo de inclinação de  $15^\circ$  ( $Re = 1 \times 10^5$  e  $h/D = 1,16$ ) as maiores pressões de sucção ocorrem na entrada do teto na região a barlavento. Já para as mesmas condições, mas com ângulo de inclinação de  $27^\circ$  as maiores pressões de sucção ocorrem tanto na entrada do teto na região a barlavento quanto no centro do teto. Ângulos de inclinação maiores que  $35^\circ$  apresentaram sobrepressão na região a barlavento conforme pode ser visto na Figura 2.1.

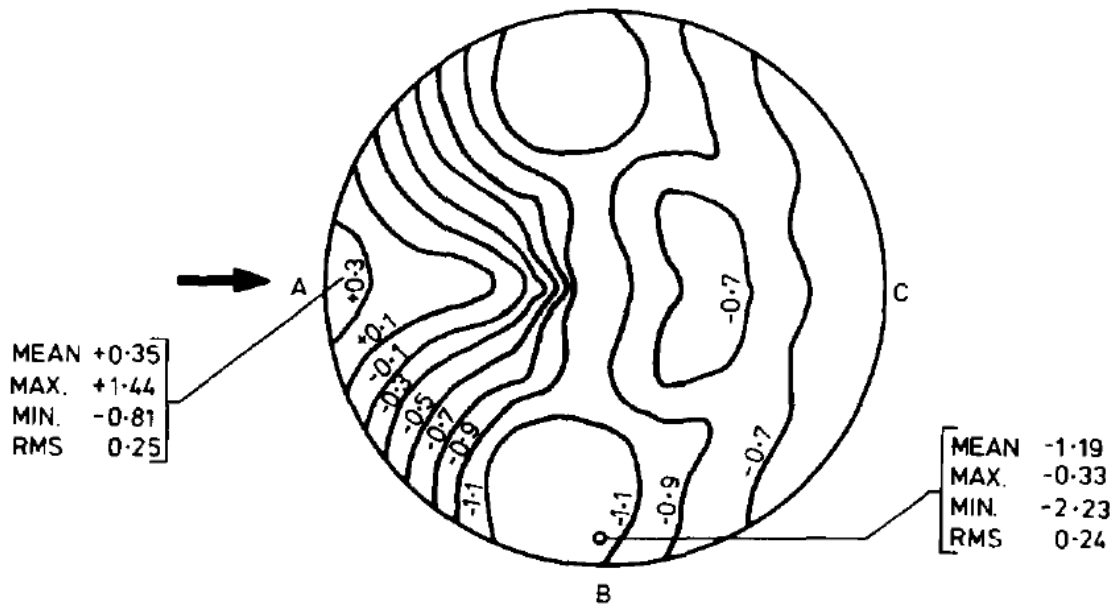


Figura 2.1 Coeficientes de pressão para um ângulo de inclinação do teto  $\beta$  de  $45^\circ$  e relação  $h/D$  de 1,16 e  $Re$  de  $1 \times 10^5$

Fonte: [Sabransky e Melbourne, 1987]

Andrade Junior, 1998, desenvolveu um trabalho com o objetivo de apresentar conceitos a respeito do comportamento e dos fenômenos de perda de estabilidade do equilíbrio de reservatórios e silos metálicos. Apresenta-se um resumo das teorias envolvidas, um ensaio numérico de modelos cilíndricos, um exemplo de silo de grãos, e uma compilação das normas e artigos mais atuais e abrangentes do problema de perda de estabilidade em estruturas cilíndricas. Por fim, são estabelecidas as configurações estruturais que apresentam maiores riscos para a flambagem. Uma das conclusões é de que para as estruturas de silos e reservatórios de relação  $h/D = 1$  a flambagem pode ocorrer quando a estrutura está vazia e submetida a ação do vento no modo de flambagem assimétrico, ou seja, quando a solicitação que predomina é a pressão externa do vento. Este modo de flambagem pode ocorrer na forma de ovalização da seção transversal da estrutura.

Andrade Junior, 2004, fez um trabalho em que compara os efeitos do enrijecimento externo e interno com colunas, no comportamento aerodinâmico de silos cilíndricos com teto cônico. Os estudos foram realizados em túnel de vento, em dois tipos de modelos reduzidos: um com superfície lisa (enrijecimento interno) e outro com superfície nervurada (enrijecimento externo), ambos em duas relações geométricas de  $h/D$  de 0,5 e 1,0 e inclinação da cobertura cônica de  $27^\circ$ . Com base nos ensaios, foram obtidos os coeficientes de pressão

externa e os coeficientes de arrasto nos cilindros, bem como os coeficientes de arrasto e sustentação na cobertura. Concluiu-se que os silos cilíndricos têm um desempenho otimizado à ação do vento com o posicionamento externo das colunas.

Portela e Godoy, 2005, estudaram tanques com teto cônico suportado por vigas e colunas submetidos a carga de vento. As pressões foram obtidas através de experimentos em túnel de vento e foram obtidas para geometrias de tanques para as quais não se tinha informações anteriores. A relação ( $h/D$ ) para o tanque estudado é de 0,43 e a inclinação do teto é de  $10,7^\circ$ . A velocidade do vento usada na simulação em túnel de vento representa uma velocidade de 64,8 m/s a 10 m de altura em uma situação real. No teto ocorrem apenas pressões de sucção. A sucção máxima ocorre na entrada do teto na região a barlavento. Após obterem as pressões no túnel de vento foi realizada a análise de estabilidade utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) através do programa ABAQUS. Para tanto foram utilizadas as pressões obtidas pela carga de vento mais o peso próprio da estrutura. Eles concluíram que a flambagem ocorre na forma de flexão da casca cilíndrica e que o modo de flambagem é localizado na região de barlavento.

Outra conclusão de Portela e Godoy, 2005, é de que para tetos cônicos o aumento do ângulo de inclinação do teto é responsável por aumentar as pressões na parte central do teto. Outra conclusão é de que um tanque com telhado cônico tem uma carga de flambagem maior que um tanque similar sem telhado. No entanto a redução da carga de flambagem devido à influência de imperfeições geométricas é maior em tanques com teto cônico do que em um tanque sem teto. Porém, mesmo com a redução devido as imperfeições, ainda assim, a carga de flambagem de um tanque com teto cônico é maior do que se não tivesse teto. A carga de flambagem de um tanque com teto é aproximadamente duas vezes maior do que o mesmo tanque sem teto.

Zdravkov, 2006, desenvolveu um trabalho com o objetivo de determinar qual é o teto fixo adequado em função do diâmetro do tanque. Para isso o autor fez uma série de cálculos para diferentes tetos fixos para o mesmo tanque e nas mesmas condições. São três tipos de teto fixo testados: teto cônico autoportante, teto cônico suportado e teto em domo autoportante. Para cada diâmetro e para cada tipo de teto são testadas diferentes alturas de teto e escolhida aquela que representa o menor peso para o teto. Os resultados são apresentados na Figura 2.2. Até o diâmetro de aproximadamente 13,5 m praticamente não existe diferença entre os três modelos. A partir daí o teto cônico autoportante passa a ter um peso maior que o

teto cônico suportado e que o teto no formato de domos. Outros fatores também interferem no momento da escolha: custos de fabricação, produto armazenado, tradição no projeto e outros.

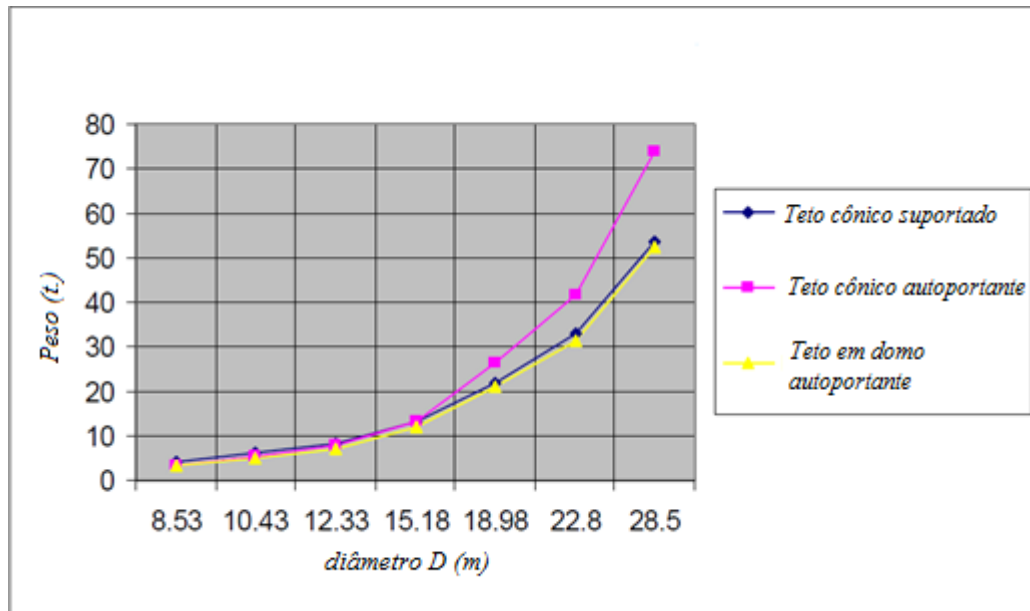


Figura 2.2 Peso do teto em função do diâmetro  $D$

Fonte: [adaptada de Zdravkov, 2006]

Manfrim, 2006, desenvolveu um trabalho com o objetivo de obter numericamente os valores das distribuições de pressões devidas à ação do vento nas paredes e nos telhados de edifícios industriais. A distribuição de pressões nas paredes e nos telhados é determinada através da simulação numérica, utilizando-se o programa Ansys 9.0, considerando-se a interação fluido-estrutura. Para a simulação numérica, a geometria do edifício foi modelada tridimensionalmente, não possuindo nenhuma abertura e o fluido é o ar no qual a edificação está inserida. A inclinação do telhado foi considerada igual a  $15^\circ$ . Os resultados numéricos obtidos na simulação através do Ansys foram comparados com a norma ABNT NBR 6123, 1988, sendo considerados coerentes do ponto de vista aerodinâmico.

Carrera, 2007, realizou um estudo com o objetivo de obter numericamente os valores das distribuições de pressões devidas a ação do vento e seus respectivos coeficientes de pressões externos em torres de seção circular. As distribuições de pressões nas torres são determinadas através da simulação numérica, utilizando-se o programa Ansys 9.0, considerando-se a interação fluido-estrutura. Para a simulação numérica, a geometria da torre

foi modelada tridimensionalmente, considerando como fluido o ar no qual a edificação está inserida. As distribuições de pressão foram determinadas para relações  $h/D$  igual ou menores que 10. Posteriormente, foram comparados os resultados numéricos obtidos na simulação através do Ansys com os valores apresentados pela norma ABNT NBR 6123, 1988, a fim de verificar a viabilidade da utilização da simulação numérica na obtenção das distribuições de pressão em outras estruturas. Foram realizadas dois tipos de análises: bidimensional e tridimensional. Para a análise bidimensional os coeficientes de pressão obtidos mostraram-se coerentes com os valores normativos. Já na análise tridimensional os coeficientes não apresentaram a mesma coerência com os valores da norma.

Schultz et al., 2008, desenvolveram um trabalho com o objetivo de comparar os ensaios em túnel de vento com o programa CFX do Ansys e com isso validar este último. Para os testes foi utilizado o modelo de uma asa. São desenvolvidas no trabalho ambas as análises, ou seja, o ensaio no túnel de vento e a simulação CFX. Isso torna o trabalho interessante, pois permite que os dois métodos sejam executados seguindo exatamente os mesmos parâmetros, uma vez que, em geral, nos trabalhos, nem todas as variáveis são descritas. Refinamento da malha, determinação do volume de controle, escolha do modelo de turbulência, determinação das condições de contorno são alguns dos aspectos abordados no trabalho para a simulação CFX. O trabalho conclui que o CFX obteve respostas aceitáveis para o estudo tendo, por exemplo, uma força de *lift* gerada nas simulações numéricas, 12% menor que as encontradas no ensaio em túnel de vento.

Scalabrin, 2008, apresenta em seu trabalho as formas mais comuns de acidentes em silos buscando explicar as causas do colapso. O objetivo é analisar a teoria e as recomendações de duas das principais normas para a determinação das pressões devidas aos grãos armazenados no interior do silo. Foram desenvolvidas planilhas de cálculo para auxiliar no dimensionamento do silo. Foram apresentados formas de análise de silos, quando vazios, submetidos à carga de vento. São analisados silos vazios pelo método dos elementos finitos, levando em consideração a rigidez da chapa lateral. Concluiu-se que as normas analisadas para o cálculo das pressões devidas aos grãos armazenados apresentam grande variabilidade de resultados, principalmente referente às cargas oriundas do descarregamento dos silos, o que indica que se trata de uma área ainda a ser mais bem estudada.

Jaca, 2008, desenvolveu um estudo com o objetivo de analisar a flambagem em estruturas de casca, em especial em tanques cilíndricos de aço. Em particular analisa-se a

problemática de colapso de tanques em etapa construtiva ocorridos na Patagônia Argentina conseguindo-se identificar as condições que favoreceram o processo de falha. O trabalho consiste na implementação da teoria de limites inferiores na análise de flambagem. A formulação está baseada no modelo de energia reduzida da casca, adaptada a um programa de elementos finitos, semianalítico, no qual é possível avaliar separadamente as contribuições de energia de membrana e de flexão. Os resultados mostram que as cargas críticas obtidas com a metodologia de rigidez reduzida apresentam limites inferiores às encontradas pela análise não linear da casca, considerando imperfeições, e também possuem limites inferiores as obtidas por ensaios.

Mandloi et al., 2009, desenvolveram um estudo para otimizar o orifício de admissão de um cilindro de motor. O objetivo é maximizar a área de fluxo efetivo otimizando assim o consumo específico de combustível. A geometria foi criada no Catia v5 R18. O resto do processo é todo desenvolvido dentro da plataforma do Workbench. A geometria foi lida no Design Modeler, uma malha formada totalmente por tetrahedros é criada no CFD Mesh e a simulação de CFD em estado permanente é desenvolvida no FLUENT. Como modelo de turbulência foi utilizado o método *k-epsilon*. O processo de otimização é desenvolvido pela ferramenta *Goal Driven Optimization*. Foram utilizados os três métodos de otimização disponíveis pelo Ansys Workbench: *Screening*, MOGA e NLPQL. Os resultados encontrados pelos três métodos são bem parecidos e foram considerados satisfatórios.

Cóstola e Alucci, 2011, desenvolveram um trabalho com o objetivo de avaliar a viabilidade do uso de dinâmica dos fluídos computacional (CFD) para a obtenção de  $C_p$ , assim como avaliar a importância de alguns dos aspectos da configuração das simulações nos resultados obtidos. Refinamento da malha, modelagem da turbulência, domínio usado e condições de contorno e convergência são alguns dos aspectos analisados. Para desenvolver o trabalho foi utilizado o programa CFX. Também são discutidos a relação entre os valores de  $C_p$  médio presentes na literatura e valores de  $C_p$  local obtidos nas simulações. Um edifício isolado de cinco pavimentos foi utilizado nas simulações. Uma das conclusões obtidas é de que o uso de CFD para definição de  $C_p$  é viável e constitui uma importante alternativa aos túneis de vento. Também se conclui que diferentes configurações das simulações levam a desvios consideráveis do  $C_p$ , tanto em termos absolutos (até  $\pm 0,5$ ) quanto em termos relativos (até 50%).



### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Será definida nesse capítulo toda a teoria a respeito de itens considerados importantes para o desenvolvimento do trabalho. É apresentada aqui a teoria sobre: tanques atmosféricos de teto cônico, placas e cascas, MEF, engenharia do vento, interação fluido-estrutura, mecânica dos fluidos, e otimização.

#### 3.1 Tanques atmosféricos de teto cônico

Tanque atmosférico é aquele em que o produto armazenado não produz gases. Desta maneira a única pressão produzida pelo produto armazenado é a pressão da coluna de líquido. As normas normalmente usadas para o projeto de tanques são a API 650 e a ABNT NBR 7821. Para o presente trabalho utilizou-se a ABNT NBR 7821, 1983, que é a única norma brasileira para o projeto de tanques. Importante salientar que não existem normas específicas para todos os tipos de líquidos, ou seja, não existe uma norma específica que calcule, por exemplo, a espessura do costado para um tanque de vinho. Por isso, muito embora a ABNT NBR 7821, 1983, tenha sido desenvolvida para o projeto de tanques destinado ao armazenamento de petróleo e seus derivados, ela é utilizada para o presente trabalho.

Os tanques podem ser utilizados para o armazenamento de água, vinho, cerveja, suco, petróleo, etc. Podem ser classificados quanto ao tipo de apoio:

- Tanques com pernas;
- Tanques com o fundo apoiado diretamente sobre base;

Também podem ser classificados quanto ao tipo de teto em:

- Tanques sem teto;
- Tanques de teto fixo;
- Tanques de teto flutuante;

Os tanques de teto fixo podem ser ainda classificados em:

- Teto cônico autoportante;
- Teto cônico suportado;
- Teto em domo autoportante;
- Teto em domo suportado;

Para o presente trabalho o tanque possui fundo plano apoiado diretamente sobre a base e teto fixo cônico autoportante.

As partes componentes do tanque são descritas a seguir:

- Teto cônico autoportante – É um teto que possui a forma de um cone e que não possui nenhum tipo de viga auxiliando na sustentação deste. De acordo com a ABNT NBR 7821, 1983, o cálculo da espessura do teto pode ser feito pela equação (3.1).

$$t_{\text{mín.}} = \frac{D}{5,64 \text{sen}(\beta)} \quad (3.1)$$

sendo:

$t_{\text{mín.}}$ : espessura mínima do teto, em mm.

$D$ : diâmetro do tanque, em m.

$\beta$ : ângulo do cone do teto com a horizontal, em graus.

- Costado - O costado do tanque é um corpo cilíndrico formado por um ou mais anéis que são unidos uns aos outros e também ao teto e fundo através de solda. A espessura do costado pode ser calculada pela equação (3.2) da ABNT NBR 7821, 1983.

$$e_{\text{mín.}} = 0,04D(h - 0,3)\gamma \quad (3.2)$$

onde,

$e_{\text{mín.}}$ : espessura mínima do costado, em mm.

$h$ : altura do costado, em m.

$\gamma$ : densidade do líquido a ser estocado, em  $\text{kg/dm}^3$ .

- Fundo – Unido ao costado através de solda. O fundo é formado por um disco circular com diâmetro maior que o costado.

### 3.2 Teoria de placas e cascas

É feita uma rápida abordagem sobre a teoria de placas e cascas com o objetivo de entender um pouco sobre estes dois elementos estruturais e, deste modo, auxiliar na escolha do elemento finito utilizado neste trabalho.

### 3.2.1 Teoria de placas

Placa é um elemento estrutural em que se caracteriza uma dimensão denominada espessura, muito menor que as outras duas dimensões. Esse elemento estrutural está submetido a ações que provocam flexão transversal. Sua principal função é transmitir cargas agindo transversalmente a mesma, como em lajes de edifícios e de pontes.

De acordo com Timoshenko, 1959, no estudo de placas finas submetidas a cargas transversais apenas com pequenos deslocamentos são consideradas as seguintes hipóteses:

- Não há deformação no plano médio da placa. Este plano se mantém neutro durante a flexão;
- As retas normais à superfície média da placa não deformada mantêm-se retas e normais à superfície média durante a deformação;
- Não são contabilizadas as deformações por cisalhamento da placa.

Essas hipóteses correspondem à teoria clássica de Kirchhoff para placas finas.

Eric Reissner e R. D. Mindlin desenvolveram teorias de placa considerando a influência das deformações de esforço cortante. A teoria de Reissner foi desenvolvida a partir de hipóteses mecânicas e a de Mindlin, a partir de hipóteses cinemáticas. Contudo, em termos práticos, estas teorias diferem entre si apenas nas relações momento fletor – deslocamento e pela consideração da espessura inextensível na teoria de Mindlin, tornando-a mais adaptável ao desenvolvimento de elementos finitos. [Soriano, 2002].

A teoria de Kirchhoff é adequada às placas finas, e as de Reissner e de Mindlin, às placas finas e semi-espessas. Outros fatores, contudo, também estão em jogo, como, por exemplo: comportamento estático ou dinâmico, placa de um único material ou em camadas de materiais distintos (placa sanduíche ou laminada). A consideração das deformações de esforço cortante é acentuadamente mais importante em comportamento dinâmico e/ou em placa sanduíche. [Soriano, 2002].

### 3.2.2 Teoria de cascas

Casca é um elemento estrutural em que se caracteriza uma dimensão denominada espessura, muito menor do que as outras duas dimensões. A geometria da casca pode ser definida pela sua superfície média e pela espessura em cada ponto. Diferenciam-se das placas pois nestas a superfície média é plana enquanto nas cascas é uma superfície curva. As cascas

já eram usadas na antiguidade para cobrir grandes vãos. Hoje as cascas são usadas nos mais diversos setores. Este elemento estrutural está submetido a efeitos de flexão e de membrana.

As principais suposições da teoria de placas finas também formam a base para a teoria de cascas finas. No entanto, existe uma diferença importante entre placas e cascas sob a ação de forças externas. O equilíbrio estático de um elemento de placas sob a ação de uma carga transversal é possível apenas pela ação de flexão e momento binário, usualmente acompanhado por forças de cisalhamento, enquanto uma casca, em geral, é capaz de transmitir uma força de superfície através de tensão de membrana. As tensões de membrana agem paralelamente a um plano tangencial em um ponto da superfície média e são distribuídas uniformemente sobre a espessura da casca. Esta propriedade das cascas faz delas uma estrutura muito mais rígida e econômica que uma placa submetida às mesmas condições. [Timoshenko, 1959].

A análise de cascas oferece mais dificuldades do que os outros modelos estruturais contínuos, devido à geometria curva e ao grande número de parâmetros envolvidos. Em modelo matemático de casca, semelhantemente às placas, é usual considerar nula a componente de tensão normal transversal. As resoluções analíticas clássicas apresentam limitações de ordem prática, principalmente nos casos de carregamento e condição de contorno irregulares o que dificulta a integração das equações diferenciais de equilíbrio. Essa dificuldade é contornada com a utilização do método de elementos finitos em sistemas de análise com eficientes pré e pós-processadores. [Soriano, 2002]. Na análise estrutural de cascas desenvolvida pelo método dos elementos finitos se determina o campo dos deslocamentos admissíveis, assim como as tensões estaticamente admissíveis.

Teoria geral de casca fina foi apresentada por H. Aron em 1874 e por A. E. Love em 1888, mas sua aplicação na resolução de problemas de engenharia só foi feita no início do século posterior (Timoshenko, 1983). Semelhantemente às placas, as teorias de casca diferem entre si basicamente quanto à idealização das deformações de esforço cortante, podendo ser classificadas em teorias de cascas finas ou clássicas, teorias com as hipóteses de Reissner\_Mindlin, denominadas teorias de primeira ordem, teorias de ordem superior e teorias de camadas discretas. Nas teorias clássicas, desprezam-se as deformações de esforço cortante, considerando que um segmento de reta normal à superfície média da casca permaneça retilíneo e normal a esta superfície após a deformação da mesma. Com as hipóteses de Reissner\_Mindlin, aquele segmento permanece retilíneo, mas não mais normal a superfície média. Nas teorias de ordem superior, adotam-se leis polinomiais não lineares para

definir o encurvamento daquele segmento após a deformação, em modelo matemático mais próximo do sistema físico do que nas teorias anteriores. Nas teorias de camadas discretas, adequadas às cascas laminadas, se adota campos de deslocamentos lineares por segmentos ao longo da espessura, impondo adequadas condições de contato nas interfaces entre lâminas. Todos os modelos em casca guardam aproximações em relação ao modelo tridimensional da teoria da elasticidade, mas têm a vantagem de operar com um menor número de grandezas do que este último modelo e permitir, com facilidade, o cálculo de resultante de tensões. [Soriano, 2002].

### 3.3 Método dos elementos finitos (MEF)

#### 3.3.1 Elemento utilizado no trabalho

Na simulação estrutural desse trabalho é utilizado o elemento de casca Shell 181. Este é adequado para analisar estruturas de casca fina a moderadamente espessa. É um elemento de 4 nós ( $i, j, k, l$ ) com 6 graus de liberdade em cada nó: translações nas direções  $x, y, z$  e rotações em relação os eixos  $x, y$  e  $z$ . Se a opção de membrana for usada o elemento tem apenas três graus de liberdade que são as translações em  $x, y$  e  $z$ . A Figura 3.1 mostra o elemento descrito.

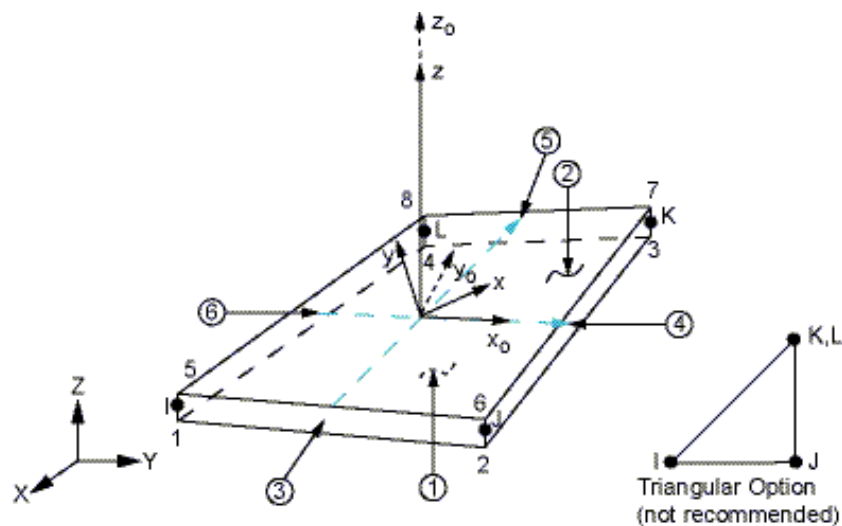


Figura 3.1 Elemento de casca Shell 181

Fonte: [Ansys, 2009]

Shell 181 é adequado para aplicações lineares, grandes rotações e grandes deformações não lineares. Em análises não lineares são consideradas as mudanças na espessura da casca. No domínio do elemento, pode-se trabalhar com integração completa ou com integração reduzida. Através da teoria de Mindlin-Reissner é calculada a distribuição da tensão de cisalhamento sobre a espessura. Já o elemento Shell 63 utiliza a teoria de Kirchhoff-Love que não calcula a tensão de cisalhamento. Por isso o resultado de deslocamentos com o elemento Shell 63 pode apresentar um valor subestimado.

A formulação do elemento é baseada na deformação logarítmica e na medida de tensão verdadeira. A cinemática dos elementos permite deformações de membrana finitas. No entanto, a mudança de curvatura é assumida ser pequena em um incremento de tempo. Para definir a espessura e outras informações podem-se usar constantes reais ou definição de seção. A opção de usar constantes reais é disponível apenas para cascas de uma única camada. Se um elemento Shell 181 referencia ambos, conjunto de dados de constantes reais e um tipo de seção de casca válida, então, dados de constantes reais é ignorado.

A espessura de casca pode ser definida em cada um de seus nós. A espessura é assumida variar suavemente na área do elemento. Se o elemento tem espessura constante apenas o nó  $I$  precisa ser definido. Se a espessura varia, então cada nó precisa ter sua espessura definida.

Hipóteses e restrições do elemento Shell 181:

- Não é recomendado utilizar a forma triangular para esse elemento, a não ser que seja como um elemento de complemento. Evitar a forma triangular principalmente em áreas com gradientes de tensão altos;
- Não são permitidos elementos de área zero;
- Não são permitidos elementos de espessura zero em qualquer extremidade.

### **3.4 Engenharia do vento**

São definidos aqui alguns parâmetros comumente usados para verificação ou cálculo da influência do vento em edifícios, torres metálicas, silos, tanques, etc. Esses parâmetros são a pressão dinâmica, o coeficiente de pressão e a velocidade característica.

### 3.4.1 Pressão dinâmica

A pressão dinâmica é importante uma vez que é usada para o cálculo das forças do vento atuando em determinada estrutura. Segue abaixo a dedução para a equação da pressão dinâmica  $q$ . Considera-se inicialmente a equação de Bernoulli,

$$p_k + \frac{1}{2} \rho V_k^2 = p_e + \frac{1}{2} \rho V_e^2 \quad (3.3)$$

onde,

$p_e$ : pressão em um ponto do objeto analisado, N/m<sup>2</sup>,

$V_e$ : velocidade em um ponto do objeto analisado, m/s,

$p_k$ : pressão em um ponto a barlavento não afetado pelo objeto, N/m<sup>2</sup>,

$V_k$ : velocidade em um ponto a barlavento não afetado pelo objeto, m/s,

$\rho$ : densidade do ar, kg/m<sup>3</sup>,

Considerando que o ponto  $e$  é um ponto de estagnação, ou seja, ponto onde a velocidade é nula, tem-se:

$$p_k + \frac{1}{2} \rho V_k^2 = p_e \quad (3.4)$$

A pressão dinâmica é justamente a diferença entre a pressão em um ponto de estagnação  $p_e$  e um ponto a barlavento com fluxo não afetado pelo objeto, ou seja,

$$p_e - p_k = \frac{1}{2} \rho V_k^2 = q \quad (3.5)$$

Considerando condições normais de temperatura e pressão (15°C e 1 atm) tem-se a densidade do ar  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$  e com isso tem-se

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (3.6)$$

A equação (3.6) é justamente a equação utilizada pela ABNT NBR 6123, 1988, para a pressão dinâmica  $q$ , dada em N/m<sup>2</sup>.

### 3.4.2 Coeficiente de pressão

Normalmente a ação do vento em uma dada estrutura é representada através dos coeficientes de pressão. De acordo com Scruton, 1981, o coeficiente de pressão para um ponto na superfície é dado por:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho V_k^2} \quad (3.7)$$

Sendo  $P$  a diferença entre a pressão em um ponto na superfície e um ponto a barlavento em que o fluxo do vento não é influenciado pelo objeto tem-se

$$C_p = \frac{P_e - P_k}{\frac{1}{2}\rho V_k^2} \quad (3.8)$$

O termo  $P$  pode ser positivo ou negativo. Quando é positivo significa que tem-se sobrepressão e negativo significa que se tem sucção. O maior valor assumido por  $C_p$  positivo é 1. Isso ocorre em um ponto de estagnação onde a velocidade é nula. Já a sucção pode exceder a 1, não tendo um limite especificado.

### 3.4.3 Velocidade característica

A velocidade característica é usada para o cálculo da pressão dinâmica  $q$ . Para o presente trabalho a velocidade característica é usada como uma condição de contorno, representando a entrada de fluido no volume de controle.

De acordo com a ABNT NBR 6123, 1988, a velocidade característica do vento pode ser calculada pela equação (3.9).

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (3.9)$$

onde,

$V_0$ : velocidade básica do vento, m/s,



$S_1$ : fator topográfico, adimensional,

$S_2$ : fator que considera rugosidade do terreno, variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e dimensões da edificação, adimensional,

$S_3$ : fator estatístico, adimensional,

A velocidade básica do vento é a velocidade de uma rajada de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano. É considerado também que o vento básico pode soprar de qualquer direção horizontal. [ABNT NBR 6123, 1988]. A velocidade básica do vento no Brasil é obtido do gráfico das isopletas conforme Figura 3.2.

O fator  $S_1$  pode ser assim definido:

- Terreno plano ou fracamente acidentado –  $S_1= 1,0$ ;
- Taludes e morros – Para esse caso existe uma série de considerações que não serão aqui abordadas;
- Vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção:  $S_1=0,9$ .

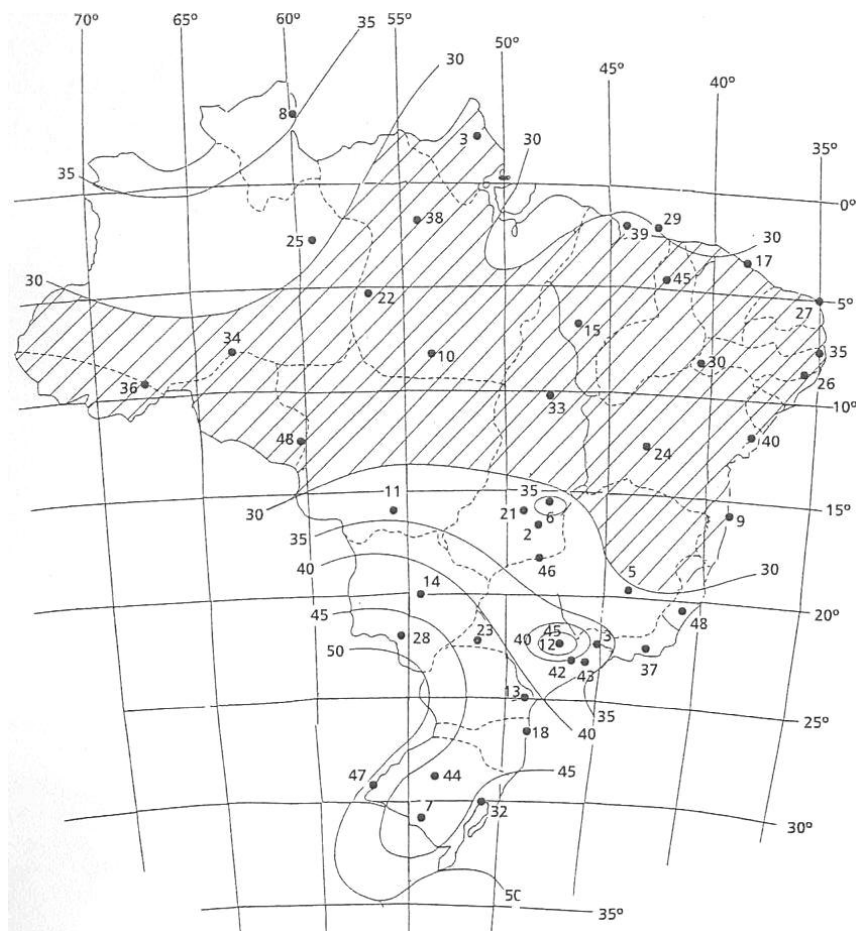


Figura 3.2 Gráfico das isopletas da velocidade básica do vento (m/s)

Fonte: [ABNT NBR 6123, 1988]

O fator  $S_2$  é obtido através da equação (3.10).

$$S_2 = b F_r (z/10)^p \quad (3.10)$$

onde,

$b$ : parâmetro meteorológico,

$F_r$ : fator de rajada,

$z$ : altura da estrutura sobre o terreno, m,

$p$ : expoente da lei potencial de variação de  $S_2$ .

Esses fatores podem ser obtidos na Tabela 3.1. Nessa tabela alguns parâmetros devem ser definidos. O primeiro deles se refere a rugosidade, a qual, de acordo com a ABNT NBR 6123, 1988, está dividida em 5 categorias:

Categoria I – Superfícies lisas de grandes dimensões;

Categoria II - A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1 m;

Categoria III – A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3 m.

Categoria IV – A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10 m. Esta categoria inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser considerados na categoria V.

Categoria V – A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25 m.

Outro parâmetro a ser definido se refere as dimensões da edificação. Neste caso a divisão se faz através de três classes:

Classe A - Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.

Classe B - Toda a edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.

Classe C – Toda edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

O fator de rajada é sempre o correspondente à categoria II.

Tabela 3.1 Parâmetros meteorológicos

Categoria	Zg (m)	Parâmetros	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		Fr	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,940	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: [ABNT NBR 6123, 1988]

O fator estatístico  $S_3$  é baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido para a vida útil da edificação. A definição da velocidade básica considera um período de recorrência médio de 50 anos e a probabilidade de que a velocidade  $V_0$  seja excedida neste período é de 63%. Estes valores são considerados adequados para o grupo 2 (edificações normais destinadas a moradias, hotéis, escritórios, etc.). Os valores mínimos de  $S_3$  estão indicados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Valores mínimos do fator estatístico  $S_3$ 

Grupo	Descrição	$S_3$
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a	0,83

Fonte: [ABNT NBR 6123, 1988]

### 3.5 Interação fluido-estrutura

Um problema fluido-estrutura surge quando existe contato de algum tipo de fluido com uma estrutura. Isso ocorre no estudo de aeronaves, pontes, tanques, silos, tubos que servem de passagem de algum tipo de fluido, vasos de pressão e outros. Para uma análise mais confiável é preciso que os efeitos causados tanto pelo fluido quanto pela estrutura sejam tratados de maneira acoplada.

A interação fluido-estrutura do Ansys permite acoplar resultados físicos obtidos no Ansys CFX com uma análise estrutural estática do Ansys Mechanical. Os dois sistemas compartilham uma geometria única, e a solução do fluxo de fluido fornece dados que são tratados como carga importada no setup da análise estrutural estática. As duas análises são acopladas no momento em que os resultados de uma análise são utilizados como cargas em outra análise.

Os deslocamentos na superfície da estrutura (tanque) não são utilizados para que seja feita uma nova análise CFD. Isso porque os deslocamentos da estrutura são pequenos e considera-se que não influenciam na análise CFD. Para o caso em que os deslocamentos da estrutura influem na análise CFD existe outra opção que é a de que os dados sejam transferidos da análise CFD para a análise estrutural e vice-versa. Este último processo é realizado de forma iterativa.

A interação fluido-estrutura em uma interface de malha gera uma pressão que exerce uma força aplicada a estrutura. Dessa maneira a matriz de elementos finitos pode ser descrita conforme as equações (3.11) e (3.12).

$$[M_s]\{\ddot{U}\} + [K_s]\{U\} = \{F_s\} + [R]\{P\} \quad (3.11)$$

$$[M_f]\{\ddot{P}\} + [K_f]\{P\} = \{F_f\} - \rho_o [R]^T \{\ddot{U}\} \quad (3.12)$$

$[R]$  é a matriz de acoplamento que representa a área de superfície efetiva associada com cada nó da interface fluido-estrutura. As demais simbologias estão descritas na lista de símbolos. A matriz de acoplamento  $[R]$  também leva em conta a direção do vetor normal definido por cada par de faces de elementos do fluido e da estrutura que são coincidentes formando a superfície de interface. A direção positiva do vetor normal é definida como sendo para fora da malha do fluido e para dentro da estrutura. Tanto a carga de fluido quanto a

estrutural que são produzidas na interface fluido-estrutura são funções dos graus de liberdade nodais incógnitos. Combinando equações (3.11) e (3.12) resulta na equação (3.13):

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ \rho_o R^T & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & -R \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ F_f \end{Bmatrix} \quad (3.13)$$

A equação (3.13) implica que os nós na interface fluido-estrutura tenham tanto graus de liberdade de deslocamento quanto de pressão.

## 3.6 Mecânica dos fluidos

### 3.6.1 Método de turbulência *k-epsilon*

Se os efeitos de inércia são grandes o suficiente em relação aos efeitos viscosos, o escoamento pode ser turbulento. O programa Ansys CFX oferece diversas opções para a modelagem de turbulência. Entre elas está o método *k-epsilon*. Este modelo é um dos mais simples, juntamente com os modelos *Zero Equation* e *k-w*. O modelo *k-epsilon* é o modelo padrão do Ansys. De acordo com Hafez, Elsamni e Zacaria, 2011, robustez, economia e razoável acurácia para a maior parte dos fluxos turbulentos explicam a popularidade de tal modelo em aplicações de fluxo na indústria e em simulações de transferência de calor.

Para o cálculo da turbulência é preciso encontrar a viscosidade efetiva que é dada pela equação (3.14).

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (3.14)$$

onde,

$\mu_e$ : viscosidade dinâmica efetiva.

$\mu$ : viscosidade dinâmica (laminar).

$\mu_t$ : viscosidade dinâmica turbulenta.

No método *k-epsilon* (*k-ε*) a viscosidade turbulenta é calculada como uma função da energia cinética turbulenta *k*, dada em  $m^2/s^2$  e da razão de dissipação da energia cinética turbulenta  $\epsilon$ , dada em  $m^2/s^3$ , conforme pode ser visto na equação (3.15).

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.15)$$

onde,

$C_\mu$ : constante de turbulência.

O método  $k$ - $\varepsilon$  resolve as equações diferenciais parciais para a energia cinética turbulenta através da equação (3.16), e para a razão de dissipação da energia cinética turbulenta através da equação (3.17).

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t_e} + \frac{\partial(\rho V_x k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z k)}{\partial z} \quad (3.16)$$

onde,

$X, Y, Z$ : coordenada cartesiana do sistema global.

$V_x, V_y, V_z$ : componentes do vetor velocidade em  $X, Y$  e  $Z$ , respectivamente.

$t_e$ : tempo.

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t_e} + \frac{\partial(\rho V_x \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y \varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z \varepsilon)}{\partial z} \quad (3.17)$$

### 3.6.2 Número de Reynolds

O número de Reynolds (Re) é um parâmetro adimensional. É o número de Reynolds que indica se um escoamento é laminar ou turbulento. De acordo com Streeter e Wylie, 1982, escoamento laminar é aquele em que o fluido se move em camadas ou lâminas, uma camada escorregando sobre a adjacente, havendo somente troca de quantidade de movimento molecular. Qualquer tendência para instabilidade e turbulência é amortecida por forças viscosas de cisalhamento que dificultam o movimento relativo entre camadas adjacentes do fluido. Já no escoamento turbulento, as partículas rapidamente se misturam devido as flutuações aleatórias das velocidades.

O número de Reynolds pode ser calculado pela equação (3.18). Os termos do numerador estão relacionados com as forças de inércia e no denominador com as forças viscosas. A transição do regime laminar para o regime turbulento depende do sistema que está sendo estudado. No entanto, normalmente se considera que para um número de Reynolds de

até 2000 o regime pode ser considerado laminar. Entre 2000 e 4000 o regime é considerado de transição. Acima de 4000 o regime é considerado turbulento.

$$\text{Re} = \frac{\rho V_k D}{\mu} \quad (3.18)$$

O número de Reynolds fornece um meio para se usar resultados experimentais com um fluido na previsão de resultados num caso semelhante com outro fluido. [Streeter e Wylie, 1982].

### 3.7 Otimização

A otimização consiste em realizar uma busca sistemática da solução ótima dentro de várias configurações possíveis, através de um algoritmo numérico de otimização, tornando assim o resultado independente do analista. [Silva, 2003]. A otimização estrutural refere-se a encontrar o ótimo em um determinado componente ou estrutura.

Na otimização preocupa-se em obter o melhor resultado de uma dada operação satisfazendo certas restrições. Seres humanos são acompanhados e influenciados pelo que os cerca, quase instintivamente realizam todas as funções de uma maneira que economiza energia ou minimiza o desconforto e a dor. A motivação é explorar os recursos disponíveis e limitados de uma maneira que maximize as saídas ou lucro. As primeiras invenções da alavanca ou os mecanismos de roldanas são claras manifestações do desejo do homem em maximizar a eficiência mecânica. [Haftka, 1992].

Os primeiros problemas de otimização estrutural foram resolvidos por Maxwell em 1872 e posteriormente por Michell em 1904. Consistiam essencialmente em calcular o campo de tensões mecânicas principais, usando teoria da elasticidade, de uma força aplicada num ponto de um domínio infinito que está sujeito a restrições de deslocamento em outros pontos. Obtidas as linhas de isotensão principais, a idéia básica então, era propor nesse domínio uma estrutura formada por barras (treliça), em que cada barra (elemento de treliça) estivesse alinhada com as direções principais de tensão calculadas no domínio. Ou seja, a estrutura ótima (em que o material fosse melhor aproveitado) seria aquela em que os elementos estariam sujeitos apenas a tração e compressão e não a momentos fletores. Embora simples esse tipo de critério de projeto fornece o mesmo resultado que o critério de máxima rigidez com mínimo volume de material e atualmente já é provado que a configuração ótima para

esse critério é uma estrutura de treliças. Ou seja, mesmo partindo-se de um meio contínuo a estrutura com melhor aproveitamento de material, segundo o critério máxima rigidez e menor peso, é uma estrutura de barras de treliça. [Silva, 2003]. Na Figura 3.3 são apresentados exemplos de estruturas de treliças obtidos por Michell. Nessa figura apenas uma parte das linhas de isotensão estão apresentadas para facilitar a visualização.

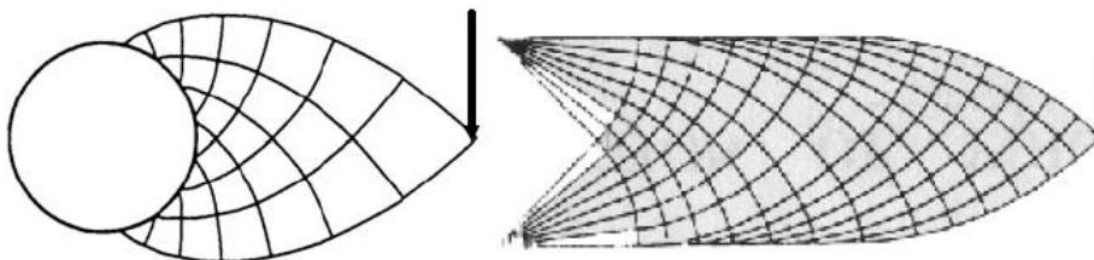


Figura 3.3 Exemplos de estruturas de treliça obtidas por Michell em 1904

Fonte: [Silva, 2003]

Após os resultados de Michell em 1904, não houve praticamente evolução na otimização estrutural até a década de 60. Durante esse período eram apenas estudados problemas acadêmicos em estruturas simples (vigas, treliças) sem aplicação prática (mas que não seguiam a linha dos resultados de Michell). Na década de 60 com o surgimento dos computadores e do MEF, problemas práticos de otimização estrutural passam a ser estudados usando otimização paramétrica, ou seja, alterando-se apenas as dimensões (ou as razões de dimensão da estrutura). Assim, por exemplo, é desenvolvido o método Simplex para a solução de problemas de programação linear. Na década de 70 são implementados vários algoritmos de otimização para problemas não-lineares de otimização bastante usados atualmente. Na verdade a formulação teórica de alguns algoritmos já havia sido desenvolvida anteriormente, no entanto somente com o desenvolvimento das linguagens de programação, eles foram implementados. É implementado também o método de otimização de forma, além de métodos probabilísticos como os algoritmos genéticos. Na década de 80 aparecem os primeiros programas comerciais de otimização estrutural e alguns programas de elementos finitos passam a incluir módulos de otimização. É iniciado o desenvolvimento na área acadêmica do método de otimização topológica (MOT). Na década de 90, o MOT é implementado em programas comerciais tendo grande repercussão na indústria automotiva e aeronáutica nos Estados Unidos, Japão e Europa. [Silva, 2003].



A otimização estrutural com minimização de peso ocupa grande espaço na indústria aeronáutica e automotiva. Na indústria aeronáutica, a medida que consigo diminuir o peso da estrutura consigo levar uma carga maior, seja de pessoas ou materiais. Com isso consigo maximizar o ganho obtido por viagens. No setor de transporte de cargas o peso da estrutura também é muito importante. A lei de trânsito estabelece um peso máximo com o qual um dado veículo de carga pode rodar pelas estradas. Por isso minimizando o peso da estrutura transporta-se uma carga maior, diminuindo os custos com novas viagens. Esta cada vez mais difundido o uso de aços de alta resistência, através dos quais se consegue diminuir a espessura da estrutura e conseqüentemente o seu peso.

### **3.7.1 Tipos de otimização**

A otimização estrutural pode ser dividida em três grandes campos a saber:

- Otimização paramétrica – Nesse tipo de otimização a forma geral da estrutura não é modificada, mas apenas as suas dimensões. O projetista define uma ou mais dimensões ou relação de dimensões como parâmetros. Por exemplo, no caso de uma treliça, o parâmetro é a área da seção transversal das barras. A malha de elementos finitos não é alterada no decorrer do processo de otimização;
- Otimização de forma – Nesse tipo de otimização busca-se determinar o contorno ótimo para o componente em análise. Nesse tipo de análise a malha de elementos finitos é modificada no decorrer do processo de otimização.
- Otimização topológica – Na otimização topológica tem-se uma forma e um dimensional definidos. Busca-se definir qual é a topologia ótima. Neste caso podem ser encontradas regiões onde não se tem necessidade de material, criando-se então furos. Podem ser também acrescentados ou retirados reforços.

### **3.7.2 Variáveis de projeto**

As variáveis de projeto são os parâmetros que podem ser modificados no processo de otimização. Elas podem ser, por exemplo, a seção transversal das barras de uma treliça ou a distribuição do momento de inércia de uma viga ao longo do seu comprimento. As variáveis de projeto podem ser do tipo contínuas ou discretas. As variáveis contínuas podem assumir qualquer valor dentro de uma determinada faixa. Já as variáveis discretas podem assumir apenas valores isolados. Como exemplo de variáveis discretas pode ser considerado o

diâmetro das barras circulares de uma treliça. Como exemplo de variável contínua pode ser considerado o presente caso em que o ângulo de inclinação do teto pode assumir qualquer valor dentro de uma determinada faixa.

A escolha das variáveis de projeto pode ser crítica para o sucesso da otimização. Esta é importante para ter certeza que a escolha das variáveis de projeto é consistente com o modelo da análise. Considere, por exemplo, a discretização de uma estrutura por elementos finitos onde se aplica o procedimento de otimização ao modelo. Se a distribuição de variáveis de projeto tem uma correspondência de um para um com o modelo de elementos finitos pode-se encontrar um sério problema de acurácia. Isto pode ser demonstrado através do exemplo da Figura 3.4, onde o objetivo era otimizar a forma do furo de modo a diminuir a concentração de tensão. As coordenadas dos nós do modelo de elementos finitos foram usados como variáveis de projeto. Neste caso o modelo de elementos finitos foi adequado para análise inicial da forma circular do furo, mas não para a forma ótima obtida. Em geral, a distribuição das variáveis de projeto deve ser bem menor que a distribuição de elementos finitos. [Haftka, 1992].

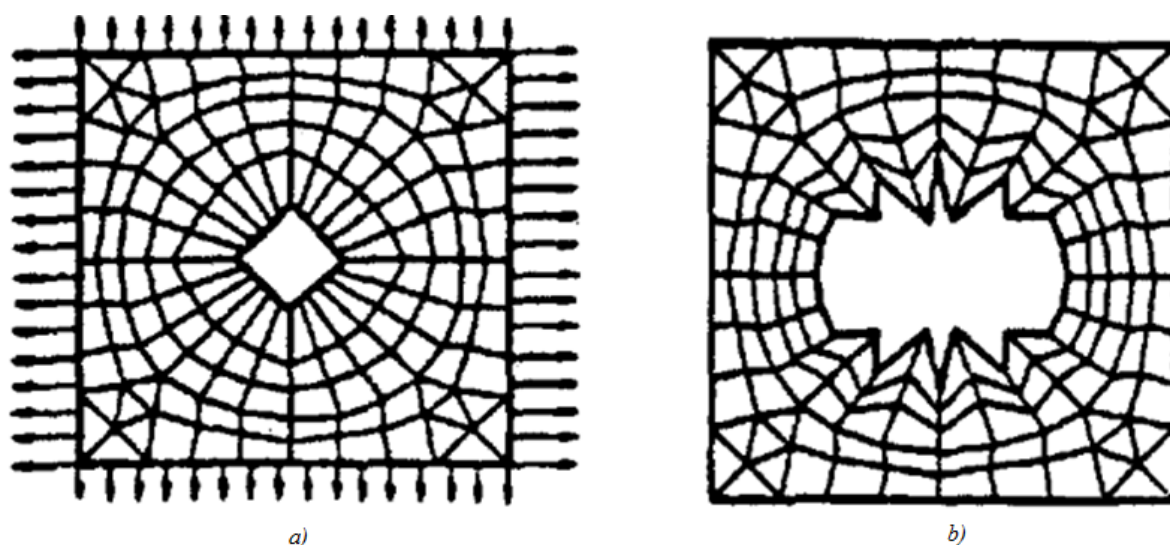


Figura 3.4 Otimização de forma de um furo, a) projeto inicial, b) projeto final

Fonte: [Haftka, 1992]

### 3.7.3 Função objetivo

A função objetivo é função das variáveis de projeto e deverá ser maximizada ou minimizada de modo que se encontre a combinação tal das variáveis de projeto que forneçam

o ótimo. Quando se tem mais de um objetivo esta é chamada de multiobjetivo. Em otimização estrutural podemos ter objetivos tais como peso, tensões, custo entre outros.

O sucesso da otimização vai depender também da formulação da função objetivo. Assim, é importante se perder um tempo para encontrar uma expressão matemática (deslocamento, frequência de ressonância, rigidez, etc.) adequada que quantifique corretamente a eficiência do projeto. Isso muitas vezes não é fácil, por exemplo, como quantificar a dirigibilidade de um automóvel? A dirigibilidade em si é um conceito relativo que varia de pessoa pra pessoa (um piloto de fórmula um tem uma expectativa diferente de quem está aprendendo a dirigir, por exemplo), assim o problema de otimizar o projeto de um automóvel para melhorar a sua dirigibilidade torna-se complexo pela dificuldade de se quantificar a dirigibilidade. [Silva, 2003].

#### **3.7.4 Restrições**

Em um processo de otimização as restrições são definidas como limites que podem ser impostos a todas as grandezas do projeto. Por exemplo, no presente trabalho, a variável de projeto espessura está limitada entre os valores de 2 mm e 12,5 mm.

As restrições podem ser classificadas em laterais, de igualdade e de desigualdade. Exemplo de restrição lateral:  $2 \leq t \leq 12,5$ . Exemplo de restrição de igualdade:  $t = 10$ . Exemplo de restrição de desigualdade:  $t \geq 10$ . Outro tipo de restrição são as restrições de comportamento, onde a restrição é imposta na resposta da estrutura. Um exemplo de restrição de comportamento é uma viga que tem o seu deslocamento máximo limitado a um determinado valor  $y$ . As restrições podem ser ainda classificadas em restrições locais e restrições globais. As restrições locais referem-se, por exemplo, a restrições de tensão e deslocamento em um ponto. Já as restrições globais referem-se, por exemplo, a volume total, frequência natural, etc.

#### **3.7.5 Goal Driven Optimization (GDO)**

GDO é a ferramenta de otimização do Ansys Workbench. Através dela é determinada a amostra de pontos a serem simulados, plotado diversos gráficos e realizado o processo de otimização através de alguns algoritmos de procura. Através do GDO é possível, por exemplo, determinar em um projeto de engenharia estrutural qual é a melhor geometria ou o melhor material que minimiza a massa, maximiza a frequência natural, maximiza a carga de

flambagem, minimiza o custo, com restrições de deslocamento máximo ou máximas tensões de von Misses.

Ela é dividida em três módulos principais: *design of experiments*, *response surface e optimization*. Esses três itens são apresentados a seguir:

- *Design of experiments* (DOE) – É uma técnica usada para determinar o número de pontos da amostra e a sua localização. Estes pontos serão usados para gerar a *response surface*. É um método determinístico. Existem diversas opções e estas se diferenciam pelo número de pontos escolhidos e pela distribuição desses pontos em uma amostra. A escolha das opções influencia diretamente na qualidade dos gráficos obtidos. Uma dessas opções é a *custom*, onde o usuário define a quantidade de pontos e quais são esses pontos;
- *Response surface* – Nesta etapa são plotados os gráficos que relacionam os parâmetros de entrada com os parâmetros de saída, é feita a análise de sensibilidade, entre outros. Para isso são utilizados os pontos simulados no *Design of Experiments*. Nesta etapa também existem diversos métodos que se diferenciam pela maneira como são plotadas as curvas e influenciam diretamente na qualidade destas;
- *Optimization* – Nessa etapa é definido o objetivo e as restrições. Existem três métodos de otimização que serão descritos a seguir: *Screening*, MOGA e NLPQL.

A ferramenta *optimization* possui três métodos:

- *Screening* – Gera uma amostra baseada no algoritmo de Hammersley modificado. É um método não iterativo onde é gerado um número quase randômico;
- NLPQL (*Non-linear Programming by Quadratic Lagrangian*) – É um algoritmo de otimização matemática desenvolvido por Klaus Schittkowski. A função objetivo e as restrições são funções continuamente diferenciáveis. Pode ser usado apenas quando tenho um objetivo. Apresenta uma acurácia melhor que os outros três métodos pois trabalha com informação de gradiente e procura de linha (*line search*).
- MOGA (*Multi-Objective Genetic Algorithm*) – É um método iterativo e apenas problemas contínuos podem ser resolvidos. É um híbrido variante do popular NSGA II (*Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II*) baseado no conceito de elitismo.

## 4. MODELAGEM DO SISTEMA FLUIDO-ESTRUTURA

Inicialmente foi determinado o tanque alvo do estudo. Desenvolveu-se então a análise denominada de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), onde foram obtidas as pressões do vento que atuam sobre o teto do tanque. Segue-se com a simulação estrutural na qual se obtém os deslocamentos dos nós da malha e as tensões de von Mises do teto do tanque. Esses deslocamentos e tensões serão utilizados no capítulo 5 na otimização.

### 4.1 Determinação do tanque alvo do estudo

O objetivo é determinar as partes componentes principais do tanque e fazer algumas considerações dimensionais a respeito. O tanque alvo do estudo é atmosférico utilizado para o armazenamento de líquidos. Para o presente caso o tanque é considerado vazio, uma vez que essa é a pior condição quando se tem cargas de vento. As partes componentes do tanque são unidas através de solda e estão assim definidas:

- Teto - O teto é constituído em sua maior parte pela região cônica, por uma borda curva com um raio médio de 44 mm e por uma parte reta com um comprimento de 30 mm, conforme pode ser visto na Figura 4.1. As medidas de 44 mm e 30 mm foram definidas de modo a satisfazer a ABNT NBR 7821, 1983.

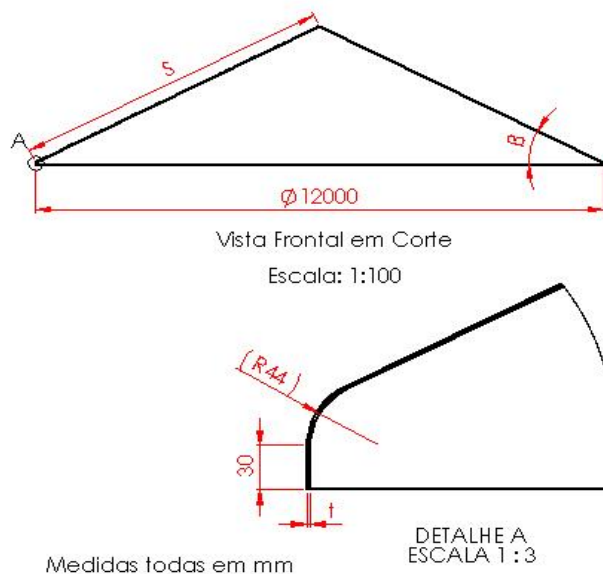


Figura 4.1 Dimensões do teto

- Costado – Na prática a espessura dos anéis inferiores costuma ser maior que a dos anéis superiores, já que a carga hidrostática é maior nos anéis inferiores. Para facilitar a simulação o costado foi modelado com espessura única, já que o objetivo não é avaliar este, mas sim o teto. O costado foi modelado com espessura de 20 mm (espessura bem acima do necessário para esse tanque) para que o deslocamento em qualquer local do costado seja mínimo e possa ser desprezado. Ou seja, a flexibilidade do costado é considerada, só que de maneira reduzida. Com isso podemos considerar que o deslocamento obtido para os nós da malha do teto é real, simplificando o problema.
- Fundo - Apoiado diretamente sobre base plana. Para o caso em estudo o fundo foi modelado como um disco plano em que o diâmetro deste é igual ao diâmetro externo do costado. O fundo e o costado constituem nesse estudo um único corpo e, portanto, a espessura do fundo foi especificada em 20 mm, igual ao do costado.

O diâmetro  $D$  do tanque foi especificado através de considerações feitas a equação (3.1) da ABNT NBR 7821, 1983. Inicialmente foi isolado o diâmetro  $D$  resultando na equação (4.1).

$$D = 5,64 t_{\min.} \operatorname{sen} \beta \quad (4.1)$$

O objetivo é desenvolver o estudo para o pior caso, ou seja, o maior diâmetro. Para que isso ocorra substitui-se a espessura  $t_{\min.}$  pela espessura máxima determinada pela ABNT NBR 7821, 1983, que é 12,5 mm e o ângulo de inclinação  $\beta$  pelo ângulo mínimo determinado pela ABNT NBR 7821, 1983, que é de  $10^\circ$ . Feitas as substituições encontra-se um diâmetro  $D$  igual a 12240 mm, o qual foi arredondado para 12000 mm, conforme pode ser visto na Figura 4.1. A relação  $h/D$  foi definida como sendo igual a 1 e, com isso,  $h = 12000$  mm.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo das dimensões do tanque utilizadas nesse trabalho.

Tabela 4.1 Dimensões do tanque

diâmetro do tanque $D$ (mm)	12000
altura do costado $h$ (mm)	12000
ângulo de inclinação do teto $\beta$ ( $^\circ$ )	$10 < \beta < 37$

## 4.2 Análise CFD

O objetivo é encontrar os coeficientes de pressão gerados no teto pelo contato do vento com a estrutura do tanque através da interação fluido-estrutura. De acordo com Cóstola e Alucci, 2011, mesmo considerando o tempo de pré e pós-processamento, o custo e o tempo envolvidos em tais simulações são consideravelmente inferiores aos necessários à realização de experimentos em túnel de vento. Também existe o fator de que nem sempre existe disponibilidade de se desenvolver experimentos em túnel de vento.

A simulação é desenvolvida em regime permanente. O fluido é considerado incompressível e isotérmico. O escoamento é considerado turbulento uma vez que a velocidade é relativamente alta e a viscosidade é relativamente baixa causando flutuações.

Um dos fatores que influi no resultado das simulações se refere ao tamanho dos elementos da malha. De um modo geral, quanto mais fina a malha, mais precisos são os resultados. Porém o tempo computacional também aumenta com o refinamento, aumentando assim os custos da simulação. O refinamento é desenvolvido no item 4.2.1. A malha deve ser refinada até que os resultados se alterem dentro de um valor considerado aceitável.

Simulações de CFD são realizadas por meio de solução numérica das equações de conservação de massa e quantidade de movimento em cada célula da malha. As equações e suas respectivas simplificações podem ser vistas em Maliska, 1995, Patankar, 1980 e Ansys, 2009. A solução iterativa é processada até que os resultados sejam condizentes com o princípio de conservação em todas as células. Isso é indicado pelo resíduo de cálculo, isto é, a diferença entre a massa e a quantidade de movimento que entram e que deixam cada célula. O resíduo de todas as células é combinado em um único cálculo (RMS – *Root Mean Square*), que indica o nível de convergência da simulação. Quando o valor RMS definido pelo usuário é atingido o CFX-Solver para a simulação obtendo como resultado o último valor encontrado. Esse valor RMS depende do modelo estudado e dos requisitos para esse modelo. No entanto o Ansys CFX indica que  $10^{-4}$  é um valor de convergência baixo,  $10^{-5}$  é um valor de convergência bom e  $10^{-6}$  é um valor de convergência alto. Para este trabalho foi utilizado um valor de convergência de  $10^{-5}$ .

O programa Ansys CFX oferece diversas opções para a modelagem da turbulência. Para esse trabalho foi utilizado o modelo de turbulência *k-epsilon*. Este modelo foi utilizado por ser o mais usado tanto na indústria como academicamente e por ter sido validado para

algumas aplicações de engenharia por Cóstola e Alucci, 2011, Manfrim, 2006 e Carrera, 2007.

É importante que se tenha um volume de controle grande o suficiente para não influir nos resultados. No entanto um volume de controle grande demais pode também aumentar o tempo computacional necessário para a simulação, aumentando assim os custos dessa. O volume de controle foi definido conforme a Figura 4.2. Conforme pode ser visto a largura do volume de controle corresponde a 10 vezes o diâmetro  $D$  do tanque e a altura do volume de controle corresponde a 10 vezes a altura do costado  $h$  do tanque. O comprimento do volume de controle corresponde a 20 vezes o diâmetro  $D$  do tanque.

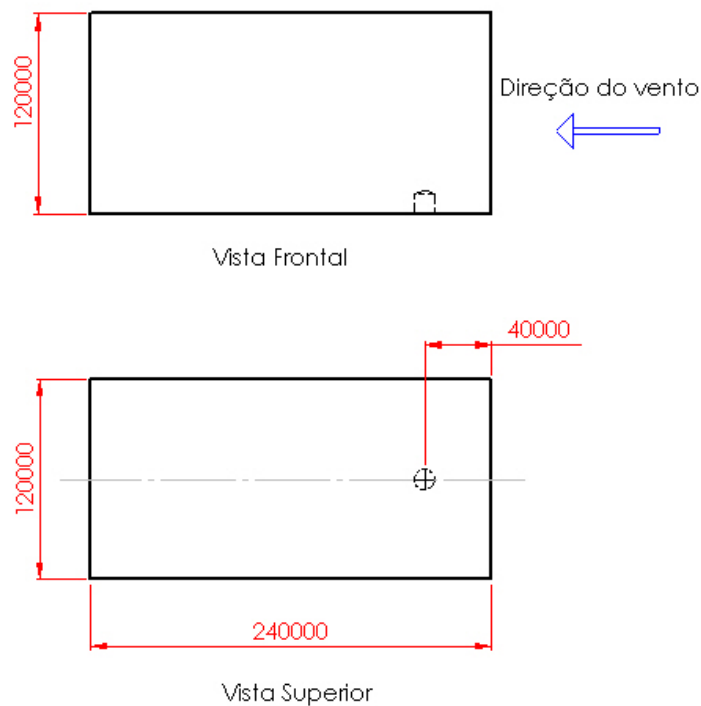


Figura 4.2 Volume de controle

As condições de contorno estão definidas no Apêndice A e podem ser visualizadas na Figura A-4.8. Aqui é apresentado apenas um resumo das condições de contorno:

- Entrada – Determinada com uma velocidade uniforme de 38,9 m/s. A turbulência foi definida como sendo de intensidade média correspondente a 5%;
- Saída – Definida através da média da pressão estática em toda a região da saída;
- Simetria – É definida nas laterais e na parte superior do volume de controle e significa que nessa região não existem condições de parede;



- Tanque – Foi definido como sendo uma parede sem deslizamento e com rugosidade definida pela opção “*Smooth Wall*”;
- Piso – Definido como sendo uma parede sem deslizamento com rugosidade de 0,2 m, conforme definido também por MacDonald et al., 1986;

Outro item a ser determinado é a velocidade característica  $V_k$ . Através da Figura 3.2 define-se  $V_o = 45$  m/s correspondente a uma isopleta que passa pela serra gaúcha. Também define-se:

-  $S_1 = 1$  (terreno plano ou fracamente acidentado)

-  $S_2$  - Para definição de  $S_2$  utiliza-se a Tabela 3.1. Considerando categoria IV e classe A, tem-se:  $b=0,86$ ;  $p=0,12$   $Fr=1$ . Considerando  $z$  como sendo a altura do costado somado a altura do teto para um ângulo de inclinação de  $37^\circ$  tem-se  $z = 16,52$  m. Utilizando então a equação (3.10) tem-se  $S_2 = 0,91$ .

-  $S_3$  - Utilizando a Tabela 3.2 tem-se  $S_3 = 0,95$ .

Utilizando a equação (3.9) tem-se  $V_k = 38,9$  m/s.

Na Tabela 4.2 estão definidas algumas constantes utilizadas na simulação CFD.

Tabela 4.2 Constantes utilizadas na simulação CFD

Fluído	ar a 25°C e 1 atm
Densidade do ar a 25°C ( $\text{kg/m}^3$ )	1,185
Viscosidade dinâmica ( $\text{kg/ms}$ )	1,831E-5
Velocidade do vento (m/s)	38,9

#### 4.2.1 Análise de convergência para a malha do fluido

A análise de convergência foi desenvolvida para o tanque descrito no item 4.1. O ângulo de inclinação  $\beta$  foi especificado como sendo  $10^\circ$ . Inicialmente a malha foi definida conforme a Tabela 4.3, onde foram determinados os tamanhos de elemento para a malha de algumas superfícies do volume de controle que correspondem a região de contato entre o fluido e o tanque. Essas superfícies recebem o nome da região do tanque com a qual estão em contato, ou seja, a região do volume de controle em contato com o costado do tanque recebe o nome de costado e assim por diante. Na malha das superfícies externas do volume de controle não foram realizadas análises de convergência sendo utilizada a malha gerada automaticamente pelo Ansys CFX-Mesh. Os coeficientes de pressão obtidos com a malha da Tabela 4.3 são apresentados na Figura 4.3.

Tabela 4.3 Tamanho dos elementos da malha nas superfícies do volume de controle

Superfície	Tamanho do elemento (mm)
Costado	1000
Teto	1000
Curva	30

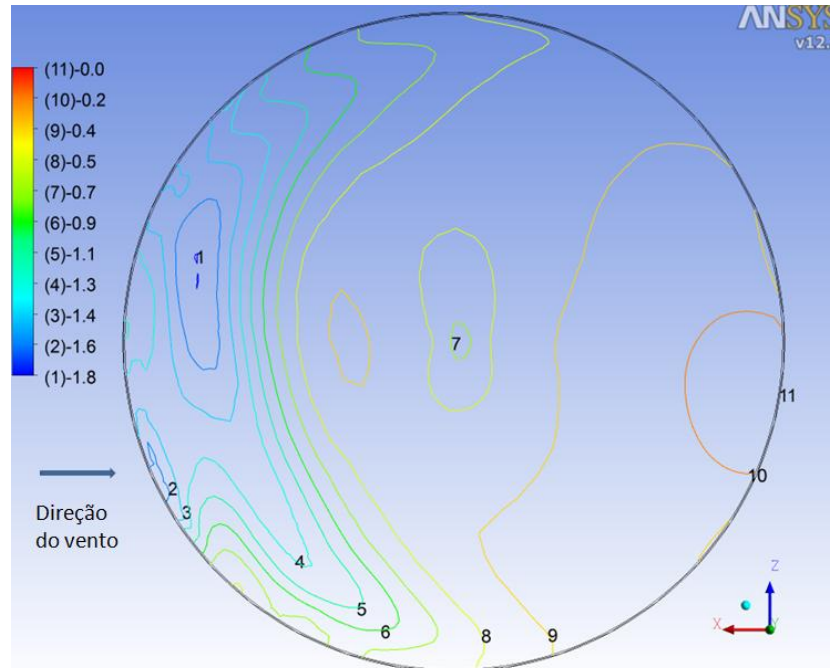


Figura 4.3 Coeficientes de pressão obtidos com a malha definida na Tabela 4.3

Na Tabela 4.4 e na Tabela 4.5 são apresentados os tamanhos dos elementos para o refinamento da malha na região do costado e na Figura 4.4 e Figura 4.5 são apresentados os coeficientes de pressão encontrados.

Tabela 4.4 Tamanho dos elementos da malha nas superfícies do volume de controle para o refinamento do costado

Superfície	Tamanho do elemento (mm)
Costado	600
Teto	1000
Curva	30

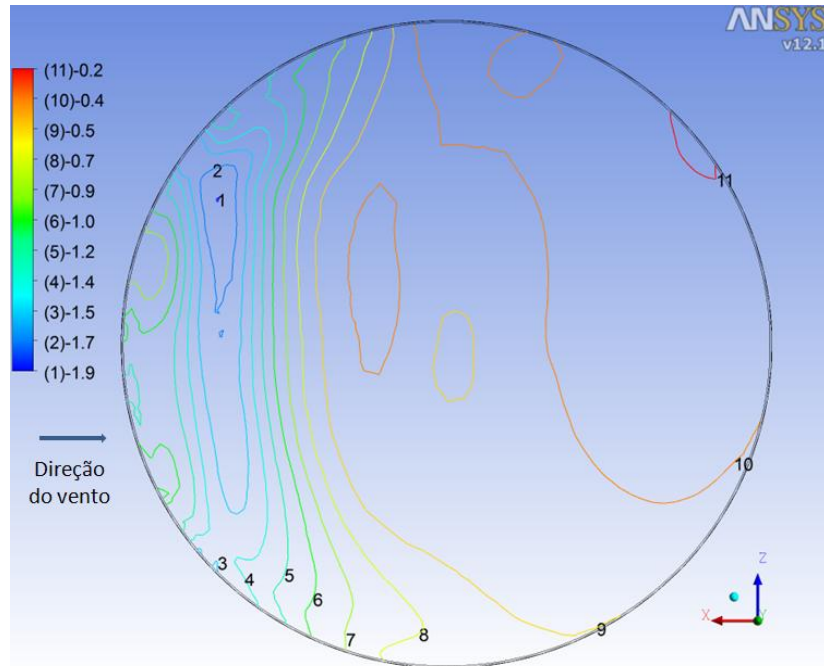


Figura 4.4 Coeficientes de pressão obtidos com a malha definida na Tabela 4.4

Tabela 4.5 Tamanho dos elementos da malha nas superfícies do volume de controle para o refinamento do costado

Superfície	Tamanho do elemento (mm)
Costado	300
Teto	1000
Curva	30

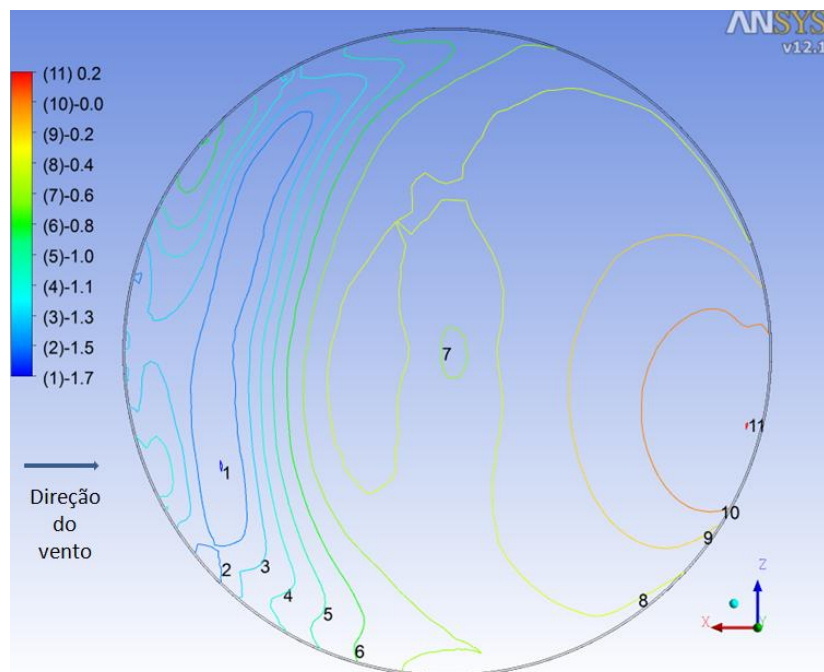


Figura 4.5 Coeficientes de pressão obtidos com a malha definida na Tabela 4.5

Conforme observado nas Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5 não existem alterações significativas nos coeficientes encontrados em função da mudança do tamanho do elemento da malha do costado. Ou seja, o tamanho de elemento definido para o costado na Tabela 4.3 é um valor que pode ser considerado bom e não existe necessidade de refinar a malha do costado.

Na Tabela 4.6 e na Tabela 4.7 são apresentados os tamanhos dos elementos para o refinamento da malha na região do teto e na Figura 4.6 e Figura 4.7 são apresentados os coeficientes de pressão encontrados.

Tabela 4.6 Tamanho dos elementos da malha nas superfícies do volume de controle para o refinamento do teto

Superfície	Tamanho do elemento (mm)
Costado	1000
Teto	600
Curva	30

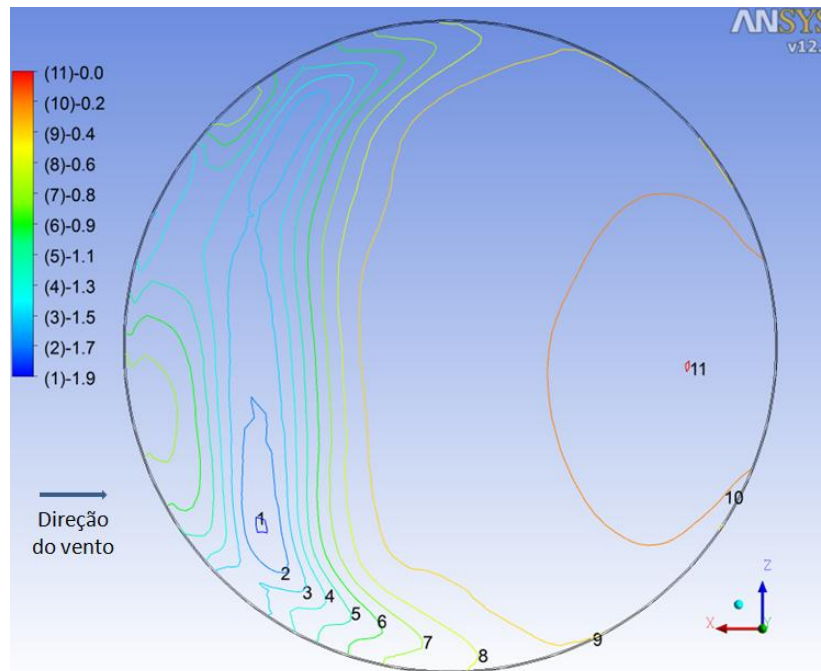


Figura 4.6 Coeficientes de pressão obtidos com a malha definida na Tabela 4.6

Tabela 4.7 Tamanho dos elementos da malha nas superfícies do volume de controle para o refinamento do teto

Superfície	Tamanho do elemento (mm)
Costado	1000
Teto	300
Curva	30

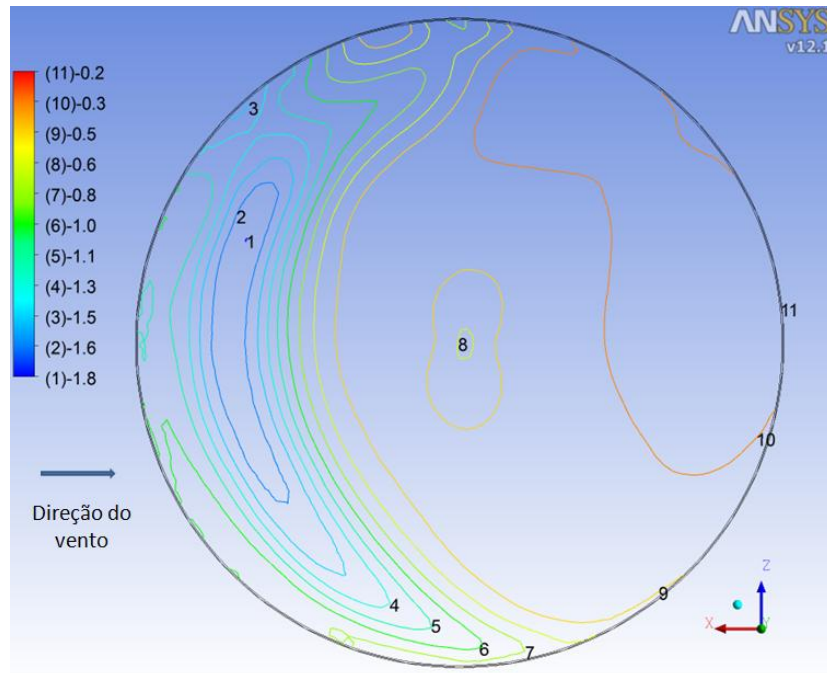


Figura 4.7 Coeficientes de pressão obtidos com a malha definida na Tabela 4.7

Conforme observado nas Figura 4.3, Figura 4.6 e Figura 4.7 não existem alterações significativas nos coeficientes encontrados em função da mudança do tamanho de elemento da malha do teto. Ou seja, o tamanho de elemento definido para o teto na Tabela 4.3 é um valor que pode ser considerado bom e não existe necessidade de refinar a malha do teto.

Na Tabela 4.8 e na Tabela 4.9 são apresentados os tamanhos dos elementos para o refinamento da malha na região curva e na Figura 4.8 e Figura 4.9 são apresentados os coeficientes de pressão encontrados.

Tabela 4.8 Tamanho dos elementos da malha nas superfícies do volume de controle para o refinamento da região curva

Superfície	Tamanho do elemento (mm)
Costado	1000
Teto	1000
Curva	15

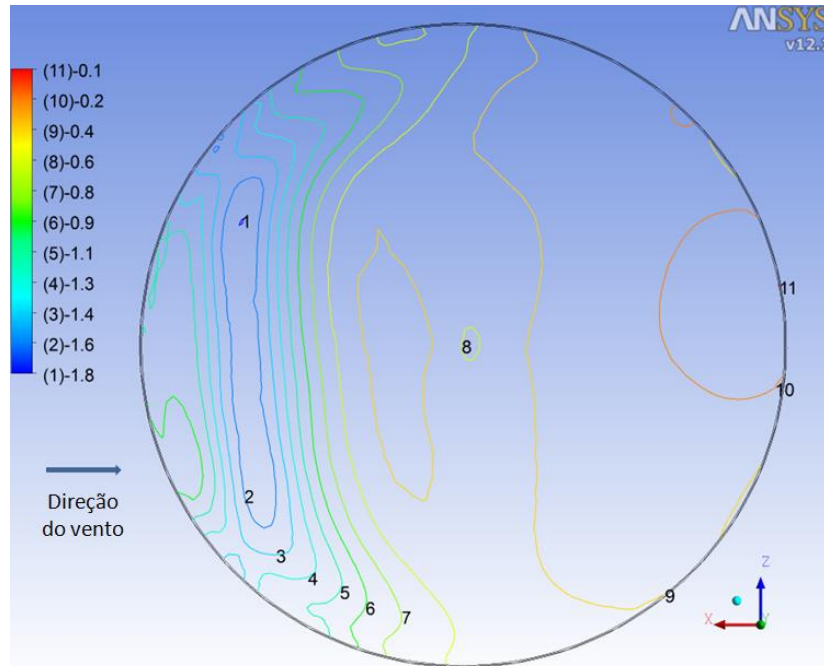


Figura 4.8 Coeficientes de pressão obtidos com a malha definida na Tabela 4.8

Tabela 4.9 Tamanho dos elementos da malha nas superfícies do volume de controle para o refinamento da região curva

Superfície	Tamanho do elemento (mm)
Costado	1000
Teto	1000
Curva	2

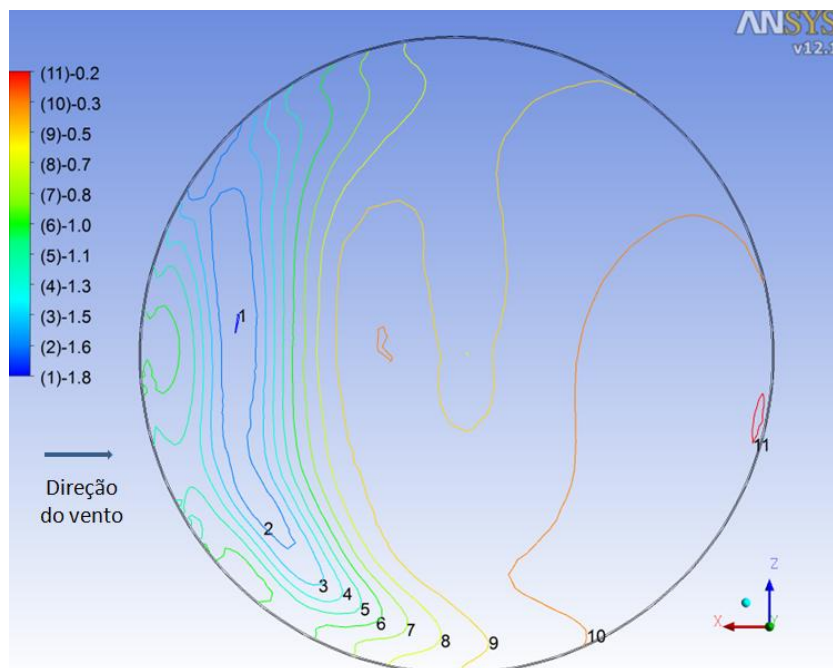


Figura 4.9 Coeficientes de pressão obtidos com a malha definida na Tabela 4.9

Conforme observado nas Figura 4.3, Figura 4.8 e Figura 4.9 não existem alterações significativas nos coeficientes de pressão encontrados em função da mudança do tamanho de elemento da malha da região curva. Ou seja, o tamanho de elemento definido para a região curva na Tabela 4.3 é um valor que pode ser considerado bom e não existe necessidade de refinar a malha para a região curva.

#### **4.2.2 Comparação qualitativa com experimento em túnel de vento**

O estudo realizado por Andrade Junior, 2002, foi desenvolvido para silos metálicos cilíndricos de chapa corrugada. Para o caso de tanques a chapa é lisa. Mesmo assim esse trabalho foi escolhido pois a disponibilidade de trabalhos com coeficientes de pressão na literatura para o teto cônico de tanques é escassa e, em geral, com dados do experimento incompletos, dificultando a obtenção dos resultados.

São utilizados os dados do experimento em túnel de vento conforme descrito abaixo. O modelo corresponde a uma relação  $h/D = 1$  e sem a presença de elementos externos. Os demais dados referentes a simulação, inclusive os parâmetros da malha, são os mesmos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

$$D = 21500 \text{ mm}$$

$$h = 21500 \text{ mm}$$

$$\beta = 26,2^\circ$$

$$V_k = 35,2 \text{ m/s}$$

Na Figura 4.10 são apresentados os resultados dos coeficientes de pressão obtidos nos experimentos em túnel de vento. Na Figura 4.11 são apresentados os coeficientes de pressão para o mesmo, mas utilizando a metodologia deste trabalho.



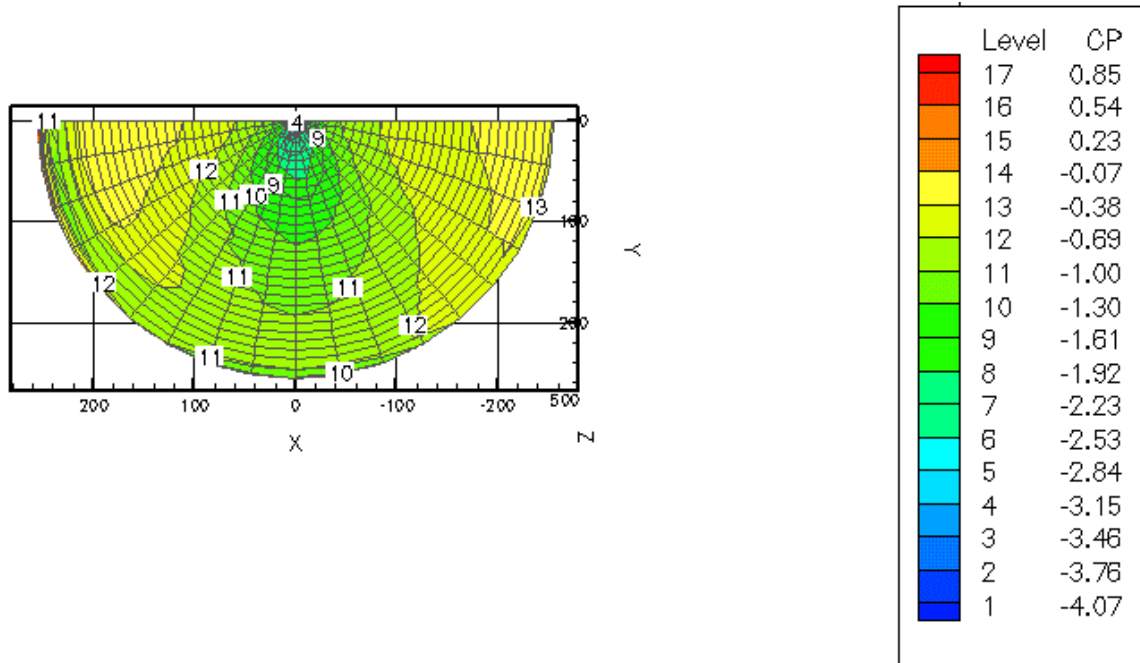


Figura 4.10 Coeficientes de pressão obtidos no experimento em túnel de vento

Fonte: [Andrade Junior, 2002]

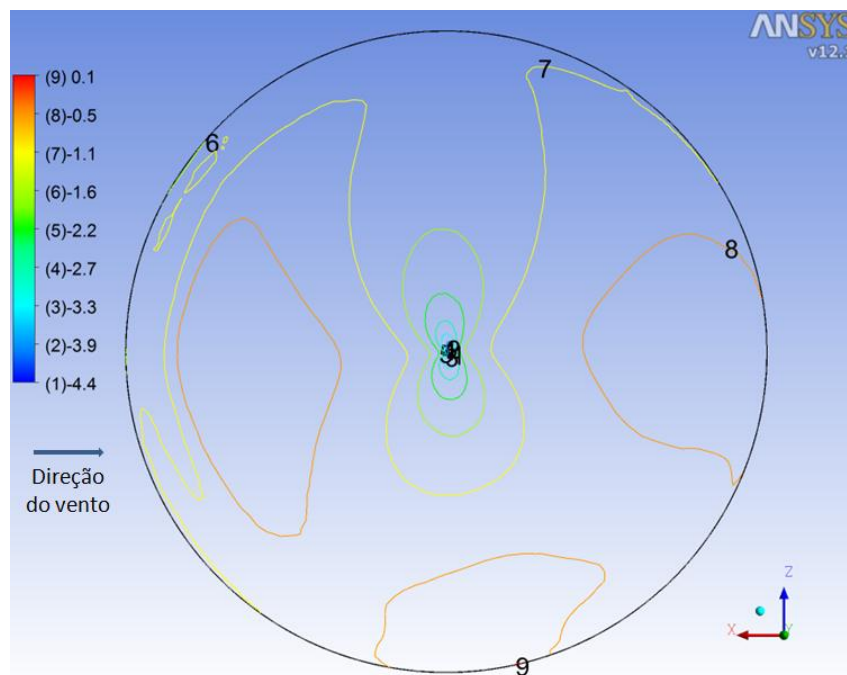


Figura 4.11 Coeficientes de pressão obtidos pela metodologia deste trabalho



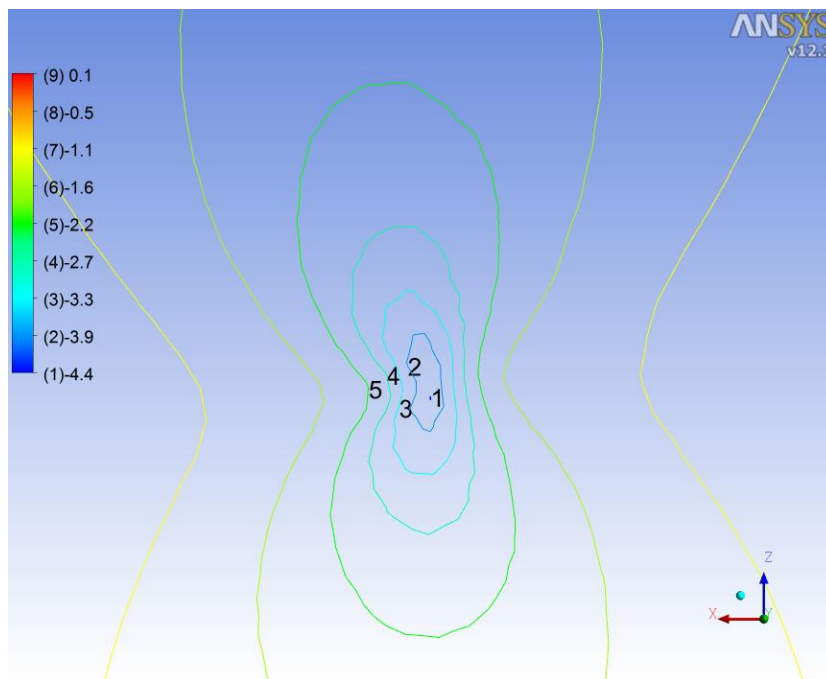


Figura 4.12 Detalhe central da Figura 4.11

Algumas observações podem ser feitas da comparação entre as Figura 4.10 e Figura 4.11:

- As pressões que ocorrem no teto, para as duas figuras, são todas de sucção.
- As maiores pressões de sucção ocorrem no centro do teto. Para a Figura 4.10 a maior pressão de sucção tem o valor de -3,15 e para a Figura 4.11 a maior pressão de sucção tem o valor de -4,4;
- Verifica-se que para as duas figuras as pressões de sucção diminuem a medida que se avança do centro para a periferia na região a sotavento, chegando a um valor bem inferior na periferia;
- Para as duas figuras percebe-se que as pressões de sucção diminuem a medida que se avança do centro para a periferia a barlavento. Isso ocorre até próximo a periferia, onde, em uma dada região, a pressão de sucção passa a aumentar a medida que se avança para a periferia.

Pelo apresentado anteriormente observa-se que as diferenças ocorrem apenas na magnitude das pressões. Apesar dessa diferença os resultados foram considerados bons, pois existem alguns fatores, conforme listados abaixo, que contribuem para que essa diferença ocorra:

- A simulação foi desenvolvida para o tamanho real do tanque (protótipo), com  $R_e=51,8*10^6$ . Já o experimento em túnel de vento foi realizado no modelo, com  $R_e=6,14*10^5$ ;
- Os resultados para a Figura 4.10 foram obtidos sem a curva de raio médio de 44 mm. Já para a Figura 4.11 esta foi considerada;
- A chapa considerada nos resultados da Figura 4.10 é corrugada, o que modifica os valores do coeficiente de pressão e, para a Figura 4.11, a chapa é lisa.
- Os obstáculos construídos no experimento em túnel de vento não foram reproduzidos na simulação o que leva a condições de escoamento do fluido diferentes.
- No experimento em túnel de vento foi considerada a camada limite atmosférica e para a simulação foi considerado escoamento uniforme.

### 4.3 Análise estrutural

O objetivo da análise estrutural é obter os deslocamentos dos nós da malha do teto e as tensões de von Mises do teto na região cônica. As cargas são aplicadas sobre a superfície superior do teto, na região correspondente ao cone. Sobre a curva de raio médio 44 mm e sobre a região reta de 30 mm não é aplicada carga. A região da solda no encontro do teto com o costado não é analisada, assim como não é analisada a região reta de 30 mm e a região curva de raio médio 44 mm. O tanque é considerado engastado no fundo e vazio.

O material do tanque é um aço estrutural da biblioteca do Ansys Workbench e as propriedades estão descritas na Tabela 4.10. O elemento usado é o Shell 181.

Tabela 4.10 Propriedades do material do tanque

Módulo de Young	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Tensão de escoamento	250 MPa
Tensão de ruptura a tração	460 MPa

A análise estrutural foi executada para duas condições que podem ocorrer durante a vida útil de um tanque:

- Na condição 1 é aplicada uma pressão externa para baixo de 1 kPa mais o peso próprio do teto;

- Na condição 2 é utilizada uma carga de vento obtida através do programa Ansys CFX mais o peso próprio do teto.

Define-se aqui  $u_1$  como sendo o deslocamento referente ao carregamento da condição 1 e  $u_2$  como sendo o deslocamento referente ao carregamento da condição 2. Define-se também  $\sigma_1$  como sendo a tensão de von Mises referente ao carregamento da condição 1 e  $\sigma_2$  como sendo a tensão de von Mises referente ao carregamento da condição 2.

### 4.3.1 Análise de convergência para a malha do tanque

A análise de convergência foi feita para o tanque descrito no item 4.1. O ângulo de inclinação foi definido como sendo  $10^\circ$ . Para a análise de convergência foi analisado apenas o refinamento da malha do teto que é a região de interesse para a análise estrutural. A condição analisada foi a condição 2 e a malha escolhida foi então extrapolada também para a condição 1. Inicialmente a malha foi definida com tamanho de elemento de 200 mm e os resultados são apresentados na Figura 4.13. Posteriormente foi feito o refinamento e a malha foi definida então com tamanho de elemento de 150 mm e 100 mm e os resultados são apresentados na Figura 4.14 e Figura 4.15. Para o refinamento foram analisados os resultados referentes ao deslocamento dos nós da malha do teto e as tensões de von Mises. É apresentado aqui apenas os resultados referentes ao deslocamento dos nós da malha do teto.

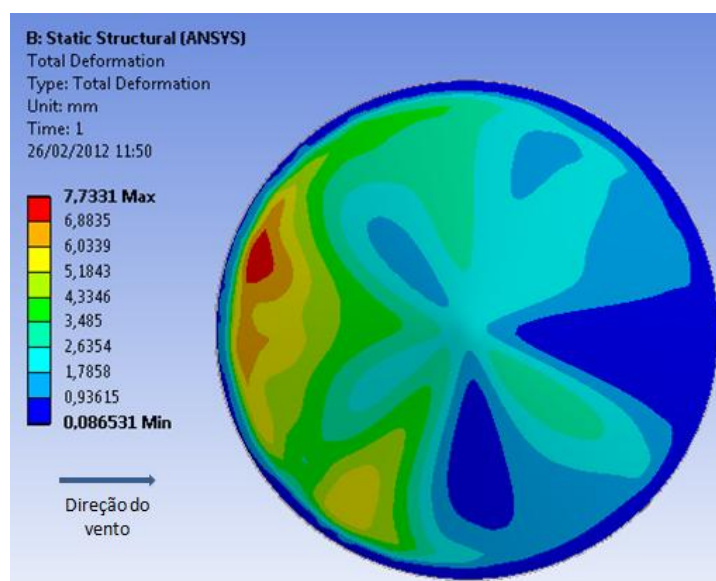


Figura 4.13 Deslocamento dos nós da malha do teto com tamanho de elemento de 200 mm

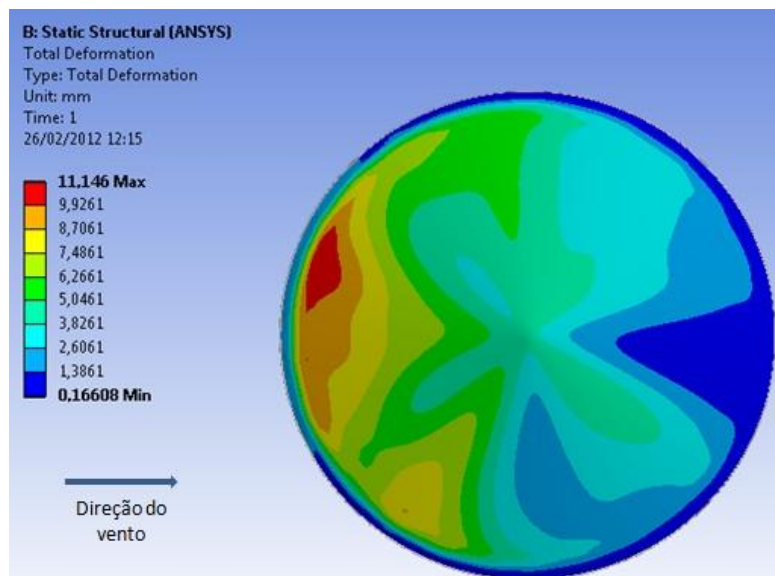


Figura 4.14 Deslocamento dos nós da malha do teto com tamanho de elemento de 150 mm

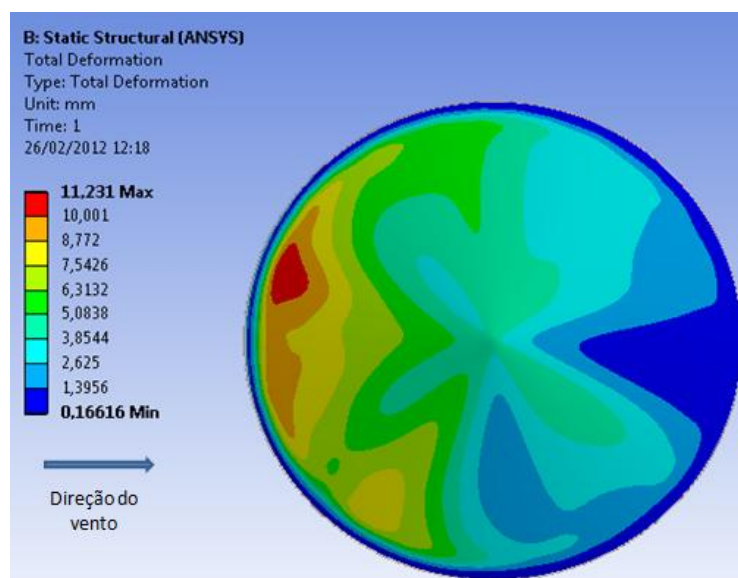


Figura 4.15 Deslocamento dos nós da malha do teto com tamanho de elemento de 100 mm

Conforme pode ser observado na Figura 4.13 e na Figura 4.14 quando alteramos o tamanho do elemento de 200 mm para 150 mm os resultados se modificam bastante, sendo que o deslocamento máximo passa de 7,73 mm para 11,15 mm. No entanto, quando alteramos o tamanho do elemento de 150 mm para 100 mm a mudança é muito menor. O deslocamento máximo passa de 11,15 mm para 11,23 mm. Por isso concluí-se que a malha do teto com tamanho de elemento de 100 mm é adequada para representar o deslocamento dos nós da malha do teto. O resultado para as tensões de von Mises é o mesmo. Portanto, neste trabalho, é utilizada uma malha com tamanho de elemento de 100 mm.

Importante destacar que existem duas malhas diferentes. Uma é a malha que representa o fluido definida de acordo com o item 4.2.1, através da qual se obtém as pressões do vento no tanque. Outra é a malha definida neste item que é a malha da estrutura do tanque, através da qual são obtidos os deslocamentos dos nós e as tensões de von Mises após a aplicação das cargas. Por isso são realizadas duas análises de convergência no trabalho. Na região externa do tanque essas duas malhas coexistem e, através da interação fluido-estrutura, as pressões encontradas pelo Ansys CFX são utilizadas como carga pelo Ansys Mechanical.

### **4.3.2 Condições de contorno**

Para a análise de convergência do item 4.3.1 o tanque é considerado engastado em todo o seu fundo. Com isso são evitados deslocamentos de corpo rígido do tanque, o que interferiria nos resultados. A flexibilidade do costado é diminuída para que os deslocamentos do costado possam ser desprezados e assim os deslocamentos obtidos para alguns pontos do teto possam ser considerados verdadeiros. Dessa maneira o costado é modelado com 20 mm de espessura (espessura acima da necessária) fazendo com que se tenha uma maior rigidez deste. Importante destacar que a flexibilidade do costado é considerada, mas de maneira reduzida.

Outra suposição seria engastar o teto em sua superfície inferior (ao final da parte reta, na região que possui contato com o costado). No entanto essa situação também não retrata a realidade uma vez que é atribuído ao teto uma região de deslocamento zero, o que não condiz com a realidade. Ou seja, na prática existe a flexibilidade representada pelo costado, que é a região de ligação entre a base (rígida) e o teto. A Figura 4.16 apresenta os deslocamentos do teto para o tanque apresentado no item 4.1 com a aplicação da carga da condição 2 e considerando o teto engastado, ou seja, com uma região de deslocamento zero. Comparando a Figura 4.16 com a Figura 4.15 (engastamento no fundo do tanque) percebe-se que os deslocamentos para a situação em que o engastamento é feito no teto são bem menores se comparados com a situação em que o fundo do tanque é engastado, comprovando o efeito da excessiva rigidez produzida pelo engaste feito diretamente no teto.

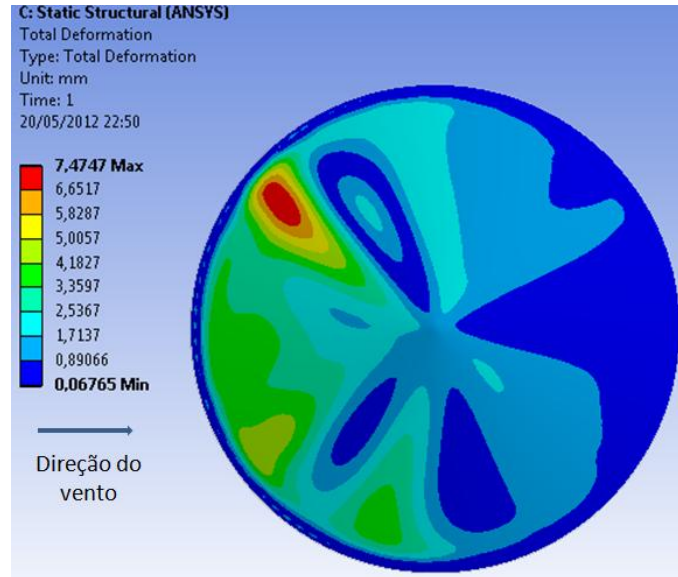


Figura 4.16 Deslocamento do teto  $u_2$  considerando o teto engastado

A Figura 4.17 apresenta os deslocamentos do costado para o caso em que o tanque é engastado no fundo. Como pode ser visto, os deslocamentos do costado são da mesma ordem de grandeza daqueles do teto.

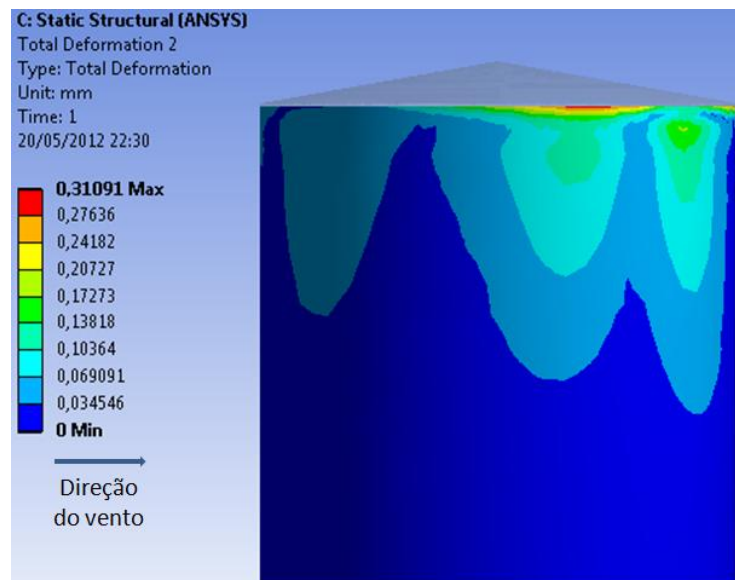


Figura 4.17 Deslocamento do costado considerando o fundo do tanque engastado

## 5. OTIMIZAÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DO TETO

A função objetivo é o peso. Sendo este o resultado da multiplicação do volume pelo peso específico do aço  $e$ , sendo o peso específico do aço constante, podemos considerar diretamente que a função objetivo é o volume do teto. Segue abaixo a dedução para o cálculo do volume do teto cônico.

$$\cos(\beta) = \frac{D}{2s} \quad (5.1)$$

sendo:

$s$ : comprimento maior do cone, conforme pode ser visto na Figura 4.1.

Isolando  $s$  na equação (5.1) tem-se:

$$s = \frac{D}{2\cos(\beta)} \quad (5.2)$$

O diâmetro do disco para a fabricação do teto (sem considerar a borda) é calculado conforme equação (5.3):

$$D_{fabr} = 2s \quad (5.3)$$

onde:

$D_{fabr}$ : diâmetro do disco para a fabricação do teto

Substituindo a equação (5.2) na equação (5.3) tem-se:

$$D_{fabr} = \frac{D}{\cos(\beta)} \quad (5.4)$$

A Equação (5.5) fornece o volume do disco.

$$V = At \quad (5.5)$$

Sendo:

$V$ : volume do disco

$A$ : área do disco

$t$ : espessura do disco

A área do disco  $A$  pode ser calculada pela Equação (5.6)

$$A = \frac{\pi}{4} (D_{fabr})^2 \quad (5.6)$$

Substituindo a equação (5.6) na equação (5.5) tem-se:

$$V = \frac{\pi}{4} t (D_{fabr})^2 \quad (5.7)$$

Substituindo a equação (5.4) na equação (5.7) tem-se:

$$V = \frac{\pi}{4} t \left( \frac{D}{\cos(\beta)} \right)^2 \quad (5.8)$$

Rearranjando a equação (5.8) tem-se:

$$V = \left( \frac{\pi}{4} t D^2 \right) / (\cos(\beta))^2 \quad (5.9)$$

Substituindo o valor do diâmetro que é de 12 m para esse trabalho na equação (5.9) tem-se:

$$V = \left( \frac{\pi}{4} t 12^2 \right) / (\cos(\beta))^2 \quad (5.10)$$

Simplificando a equação (5.10) tem-se:

$$V = (113,1t) / (\cos(\beta))^2 \quad (5.11)$$



Dividindo-se a equação (5.11) por 1000 tem-se o volume em  $m^3$ , conforme equação (5.12).

$$V = (0,1131t)/(\cos(\beta))^2 \quad (5.12)$$

A Equação (5.12) é definida no Ansys Workbench como um parâmetro de saída. O objetivo é especificado como sendo minimizar o volume determinado pela Equação (5.12). Uma das variáveis de projeto é o ângulo de inclinação  $\beta$ . Este é limitado entre  $10^\circ$  e  $37^\circ$  conforme solicita a ABNT NBR 7821, 1983. Outra variável de projeto é a espessura  $t$ . Esta é limitada entre 2 mm e 12,5 mm. O valor de 2 mm foi escolhido por questões de fabricação e padronização e o valor de 12,5 mm foi escolhido por ser uma exigência da ABNT NBR 7821, 1983.

O deslocamento de alguns pontos do teto obtido da análise estrutural, conforme já citado, é representado por  $u_1$  para a condição 1 e  $u_2$  para a condição 2. Esse deslocamento é limitado a 1 mm, garantindo assim que se tenha apenas pequenos deslocamentos. O costado do tanque foi modelado com uma espessura de 20 mm. Com isso os deslocamentos no costado são pequenos e podem ser desprezados. As tensões de von Mises são representadas por  $\sigma_1$  para a condição 1 e  $\sigma_2$  para a condição 2. A ABNT NBR 7821, 1983, considera uma tensão máxima de trabalho admissível de  $14,80 \text{ kgf/mm}^2$  para a dedução da equação (3.2). Fazendo a transformação de unidades temos uma tensão máxima de trabalho admissível de 145 MPa. Por isso, decidiu-se utilizar como limite das tensões  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  o valor de 145 MPa.

Portanto a função para minimizar o volume do teto é assim definida:

$$\text{Min } V = (0,1131t)/(\cos(\beta))^2$$

$$\beta, t$$

sujeito a

$$2\text{mm} \leq t \leq 12,5\text{mm}$$

$$10^\circ \leq \beta \leq 37^\circ$$

$$u_1 \leq 1\text{mm}$$

$$u_2 \leq 1\text{mm}$$

$$\sigma_1 \leq 145\text{MPa}$$

$$\sigma_2 \leq 145\text{MPa}$$

A otimização foi desenvolvida utilizando a ferramenta *Goal Driven Optimization* do programa Ansys Workbench. Dessa maneira todas as etapas são integralmente desenvolvidas dentro da mesma plataforma, em um mesmo arquivo, o que garante agilidade e maior facilidade na solução do problema.

### 5.1 Melhor ângulo de acordo com a ABNT NBR 7821

A ABNT NBR 7821, 1983, define o cálculo para a espessura do teto conforme equação (3.1). Substituindo esta na equação (5.12) tem-se o volume de acordo com a espessura calculada pela ABNT NBR 7821, 1983, como pode ser visto na equação (5.13).

$$V = (0,1131 \left( \frac{D}{5,64 \operatorname{sen}(\beta)} \right)) / (\cos(\beta))^2 \quad (5.13)$$

Substituindo o valor do diâmetro  $D$  por 12m e rearranjando a equação (5.13) tem-se:

$$V = 0,24064 / (\operatorname{sen}(\beta) (\cos(\beta))^2) \quad (5.14)$$

Através da equação (5.14) desenvolve-se a curva da Figura 5.1.

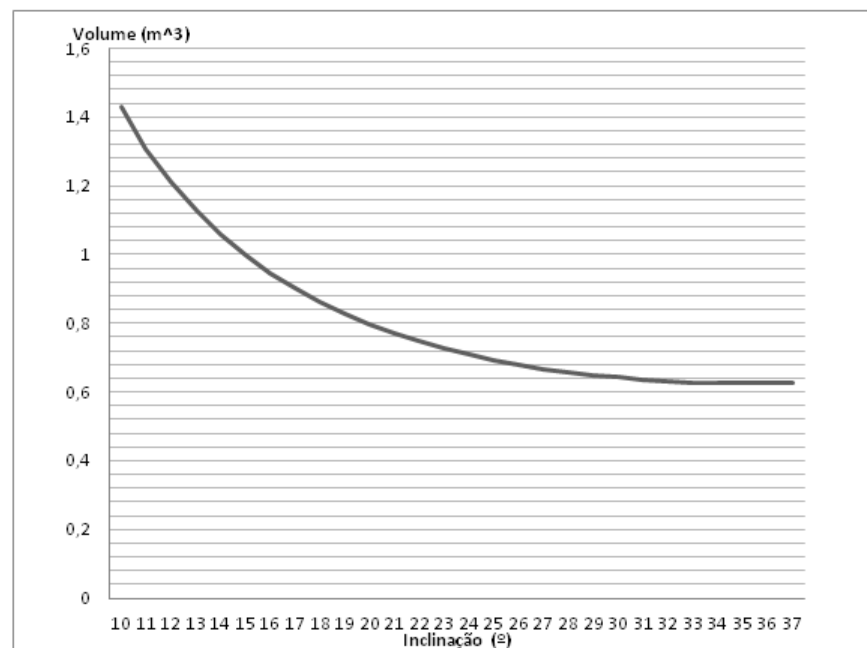


Figura 5.1 Variação do volume em função do ângulo de inclinação  $\beta$  do teto

Através da Figura 5.1 percebe-se que a medida que a inclinação aumenta o volume diminui. No entanto isso ocorre com mais intensidade até aproximadamente  $29^\circ$ . O volume atinge seu valor de mínimo de  $0,6252 \text{ m}^3$  no ângulo de inclinação  $\beta$  de  $35^\circ$  e, a partir daí, começa a aumentar novamente. Isso ocorre porque a medida que o ângulo de inclinação aumenta a superfície necessária para desenvolver o cone também aumenta. No entanto a espessura diminui. Porém, a partir de  $35^\circ$  o aumento de superfície devido ao aumento de inclinação prevalece em relação a diminuição da espessura no cálculo do volume.

## 5.2 Desenvolvimento da otimização no Ansys Workbench

O objetivo deste item é realizar o processo de otimização utilizando a ferramenta *Goal Driven Optimization*, conforme já descrito no item 3.5.5. A primeira etapa correspondente ao DOE é a fase mais demorada. Isso ocorre porque nessa fase deve ser executada a simulação CFD e as simulações estruturais correspondentes às duas condições de carga para os pontos determinados na amostra. Para cada ponto leva-se em média 1,5 horas. A etapa da *response surface* é quase que automática e a fase do *optimization* também é muito rápida. Essas duas últimas fases juntas não costumam levar mais que 0,5 horas.

O processo de otimização será realizado com o DOE configurado de duas maneiras diferentes. Uma é a opção padrão apresentada no item 5.2.1 e a outra é uma opção melhorada, sendo apresentada no item 5.2.2. No Ansys Workbench existem diversas opções em cada uma das etapas do processo de otimização e que podem ser combinadas para obter um melhor resultado. Essa escolha depende de cada problema em particular. Algumas apresentam uma melhor resposta, mas muitas vezes são também mais demoradas.

### 5.2.1 Opção padrão

Nesta primeira opção o DOE e a *response surface* estão configurados conforme a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Configuração do DOE e da *response surface*

<i>Design of experiments type</i>	<i>Central composite design (CCD)</i>
<i>Design type</i>	<i>Auto Defined</i>
<i>Response surface type</i>	<i>Standard response surface – Full 2-nd Order Polynomials</i>

O número de *design points* quando se utiliza CCD é dado pela Tabela 5.2

Tabela 5.2 Número de *design points*

Número de variáveis	Número de <i>design</i>
1	5
2	9
3	15
4	25
5	27
6	45

Como o trabalho possui duas variáveis de projeto, tem-se nove *design points*, conforme pode ser visto na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 *Design points* gerados

Inclinação (°)	Espessura (mm)
10	2
10	7,25
10	12,5
23,5	2
23,5	7,25
23,5	12,5
37	2
37	7,25
37	12,5

Para o processo de otimização são utilizados os três métodos disponíveis no programa Ansys: *Screening*, MOGA e NLPQL, conforme pode ser visto na sequência.

- *Screening*

menor volume: 0,6108 m<sup>3</sup>

$u_1$ : 0,97 mm

$u_2$ : 0,68 mm

$\sigma_1$ : 44,1 MPa

$\sigma_2$ : 49,3 MPa

$t$ : 4,01 mm

$\beta$ : 30,49°

amostras: 10 000

tempo de simulação: 175 s

- NLPQL

menor volume: 0,6057 m<sup>3</sup>

$u_1$ : 1,00 mm

$u_2$ : 0,67 mm

$\sigma_1$ : 43,9 MPa

$\sigma_2$ : 48,8 MPa

$t$ : 4,04 mm

$\beta$ : 29,71°

Número máximo de iterações: 20

tempo de simulação: 4 s

- MOGA

menor volume: 0,6089 m<sup>3</sup>

$u_1$ : 1,00 mm

$u_2$ : 0,68 mm

$\sigma_1$ : 44,0 MPa

$\sigma_2$ : 49,1 MPa

$t$ : 4,02 mm

$\beta$ : 30,22°

amostras: 10 000

tempo de simulação: 185 s

Transferindo os resultados anteriores para a Tabela 5.4 verifica-se que o ângulo de inclinação  $\beta$  que fornece o menor volume é 29,71°, tendo sido encontrado através do método NLPQL.

Tabela 5.4 Resultados da otimização para os três métodos considerados

	Volume (m <sup>3</sup> )	Espessura (mm)	Inclinação (°)
<i>Screening</i>	0,6108	4,01	30,49
NLPQL	0,6057	4,04	29,71
MOGA	0,6089	4,02	30,22

Retornou-se para o Ansys, onde foi simulado o ponto com espessura  $t$  de 4,04 mm e ângulo de inclinação  $\beta$  de 29,71° e, com isso, tem-se:

$u_1$ : 1,06 mm

$u_2$ : 0,84 mm

$\sigma_1$ : 34,93 MPa

$\sigma_2$ : 33,26 MPa

Como pode ser observado existe uma discrepância nos valores encontrados no ponto simulado (reais) e nos valores encontrados na otimização. Para  $u_1$  o valor encontrado na otimização era de 1,00 mm e o valor simulado é de 1,06 mm. Para  $u_2$  o valor encontrado na otimização era de 0,67 e o valor simulado é de 0,84 mm. Para  $\sigma_1$  o valor encontrado na otimização era de 43,9MPa e o valor simulado é de 34,93 MPa. Para  $\sigma_2$  o valor encontrado na otimização era de 48,8 MPa e o valor simulado é de 33,26 MPa.

### 5.2.2 Opção melhorada

Essa opção é muito parecida com a do item 5.2.1. No entanto ela gera os mesmos pontos da opção anterior e mais oito pontos, totalizando um total de dezessete pontos.

O DOE e a *response surface* estão configurados conforme a Tabela 5.5.

Tabela 5.5 Configuração do DOE e da *response surface*

<i>Design of experiments type</i>	<i>Central composite design (CCD)</i>
<i>Design type</i>	<i>Face Centered</i>
<i>Template type</i>	<i>Enhanced</i>
<i>Response surface type</i>	<i>Standard response surface – Full 2-nd Order Polynomials</i>

Na Tabela 5.6 estão definidos os *design points* gerados.

Tabela 5.6 *Design points* gerados

Inclinação (°)	Espessura (mm)
10	2
10	7,25
10	12,5
16,75	4,62
16,75	7,25
16,75	9,875
23,5	2
23,5	4,62
23,5	7,25
23,5	9,875

Inclinação (°)	Espessura (mm)
23,5	12,5
30,25	4,62
30,25	7,25
30,25	9,875
37	2
37	7,25
37	12,5

Da mesma maneira que na opção anterior são utilizados os três métodos disponíveis no programa Ansys: *Screening*, MOGA e NLPQL, conforme pode ser visto na sequência.

- *Screening*

menor volume: 0,6073 m<sup>3</sup>

$u_1$ : 0,97 mm

$u_2$ : 0,75 mm

$\sigma_1$ : 45,6 MPa

$\sigma_2$ : 49,5 MPa

$t$ : 4,02 mm

$\beta$ : 30,09°

amostras: 10 000

tempo de simulação: 200 s

- NLPQL

menor volume: 0,6014 m<sup>3</sup>

$u_1$ : 1,00 mm

$u_2$ : 0,83 mm

$\sigma_1$ : 44,5 MPa

$\sigma_2$ : 48,3 MPa

$t$ : 4,03 mm

$\beta$ : 29,48°

Número máximo de iterações: 20

tempo de simulação: 4 s

- MOGA

menor volume: 0,6074 m<sup>3</sup>

$u_1$ : 0,99 mm

$u_2$ : 0,78 mm

$\sigma_1$ : 44,9 MPa

$\sigma_2$ : 48,8 MPa

$t$ : 4,04 mm

$\beta$ : 29,85°

amostras: 10 000

tempo de simulação: 232 s

Transferindo os resultados anteriores para a Tabela 5.7 verifica-se que o ângulo de inclinação  $\beta$  que fornece o menor volume é 29,48°, tendo sido encontrado através do método NLPQL.

Tabela 5.7 Resultados da otimização para os três métodos considerados

	Volume (m <sup>3</sup> )	Espessura (mm)	Inclinação (°)
<i>Screening</i>	0,6073	4,02	30,09
NLPQL	0,6014	4,03	29,48
MOGA	0,6074	4,04	29,85

Retornou-se para o Ansys, onde foi simulado o ponto com espessura  $t$  de 4,03 mm e ângulo de inclinação  $\beta$  de 29,48° e, com isso, tem-se:

$u_1$ : 1,07 mm

$u_2$ : 0,88 mm

$\sigma_1$ : 36,8 MPa

$\sigma_2$ : 46,6 MPa

Novamente existe uma diferença, no entanto ela é menor. Para  $u_1$  o valor encontrado na otimização era de 1,00 m e o valor simulado é de 1,07 mm. Para  $u_2$  o valor encontrado na otimização era de 0,83 mm e o valor simulado é de 0,88 mm. Para  $\sigma_1$  o valor encontrado na otimização era de 44,5 MPa e o valor simulado é de 36,8 MPa. Para  $\sigma_2$  o valor encontrado na otimização era de 48,3 MPa e o valor simulado é de 46,6 MPa. Pode-se perceber que as diferenças entre os valores encontrados pela simulação e os valores encontrados na otimização diminuíram na opção melhorada.



Outro aspecto importante a ser observado é que a restrição de 1 mm é inicialmente respeitada pelo processo de otimização. No entanto, como esta não é exata, verifica-se (após a simulação do ponto ótimo no Ansys CFX e Ansys Mechanical) que este valor é na verdade extrapolado. Uma opção pode ser melhorar ainda mais a qualidade dos gráficos utilizando, por exemplo, mais pontos. Outra opção seria trabalhar com uma restrição um pouco menor no processo de otimização, evitando assim que o ponto escolhido ultrapasse 1 mm.

## 6. ANÁLISE DE RESULTADOS

O Ansys Workbench possibilita obter alguns resultados intermediários antes do resultado final da otimização. Estes resultados são demonstrados através de gráficos que permitem entender melhor o problema estudado e muitas vezes auxiliam no processo de tomada de decisão. Nos itens 6.1 e 6.2 são apresentados esses resultados. No item 6.3 é apresentada a análise de sensibilidade e no item 6.4 são apresentados resultados relativos ao ponto ótimo.

### 6.1 Gráficos para a condição 1

A condição 1 conforme já descrito anteriormente corresponde a carga de peso próprio mais a carga de equipamentos, passarela e outros. Para representar essa carga de equipamentos, passarela e outros foi utilizada uma pressão externa para baixo de 1 kPa.

A resposta para a variação do deslocamento  $u_1$  em função da variação da espessura  $t$  é apresentada na Figura 6.1. À medida que aumenta a espessura o deslocamento diminui. Importante salientar que esse gráfico foi traçado para um ângulo de inclinação  $\beta$  de  $23,5^\circ$  e que a concavidade da curva não muda com a mudança do ângulo, mas apenas a intensidade dos deslocamentos.

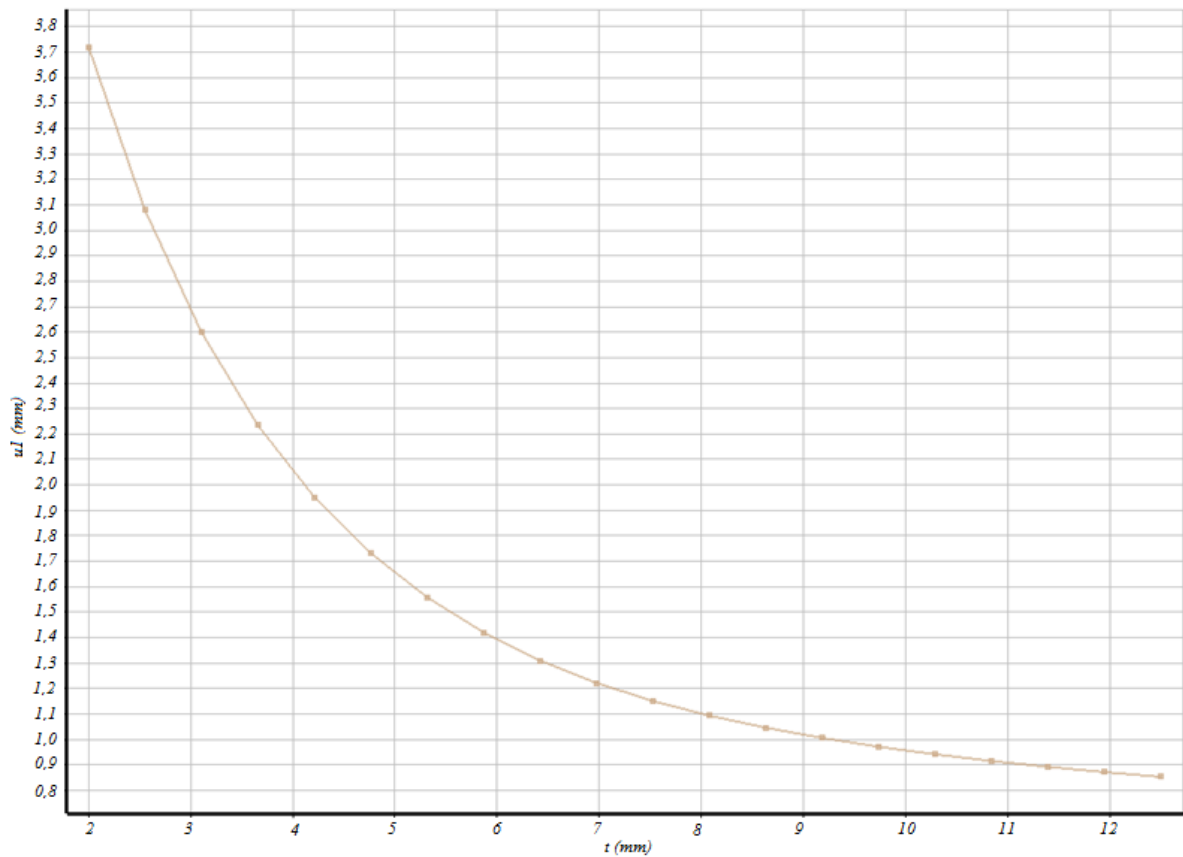


Figura 6.1 Relação deslocamento  $u_1$  x espessura  $t$

A resposta para a variação da tensão  $\sigma_1$  em função da variação da espessura  $t$  é apresentada na Figura 6.2. À medida que aumenta a espessura a tensão diminui. Importante salientar que esse gráfico foi traçado para um ângulo de inclinação  $\beta$  de  $23,5^\circ$  e que a concavidade da curva não muda com a mudança do ângulo, mas apenas a intensidade das tensões.

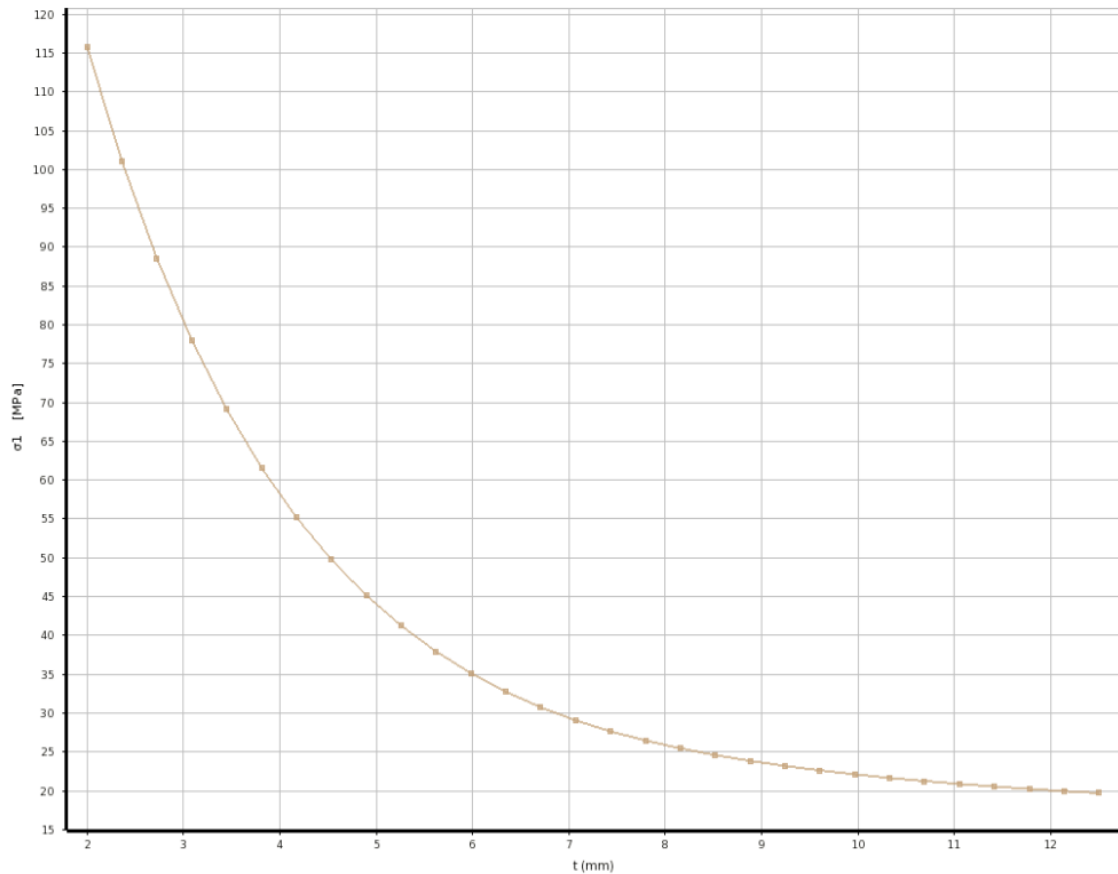


Figura 6.2 Relação tensão  $\sigma_1$  x espessura  $t$

A resposta para a variação do deslocamento  $u_1$  em função da variação da inclinação  $\beta$  é apresentada na Figura 6.3. À medida que a inclinação aumenta o deslocamento diminui. Importante salientar que esse gráfico foi traçado para espessura  $t$  de 7,25 mm e que a concavidade da curva não muda com a mudança da espessura, mas apenas a intensidade dos deslocamentos.

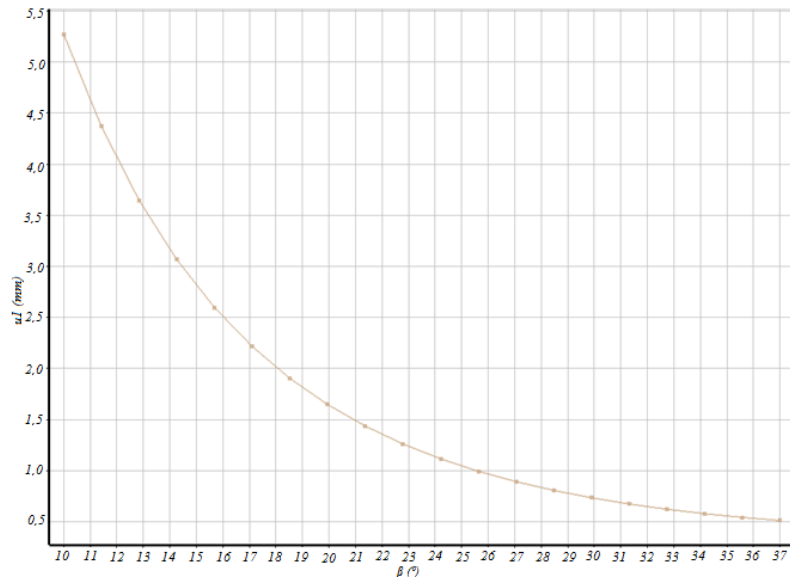


Figura 6.3 Relação deslocamento  $u_1$  x inclinação  $\beta$

A resposta para a variação da tensão  $\sigma_1$  em função da variação da inclinação  $\beta$  é apresentada na Figura 6.4. À medida que a inclinação aumenta a tensão diminui. Importante salientar que esse gráfico foi traçado para espessura  $t$  de 7,25 mm e que a concavidade da curva não muda com a mudança da espessura, mas apenas a intensidade das tensões.

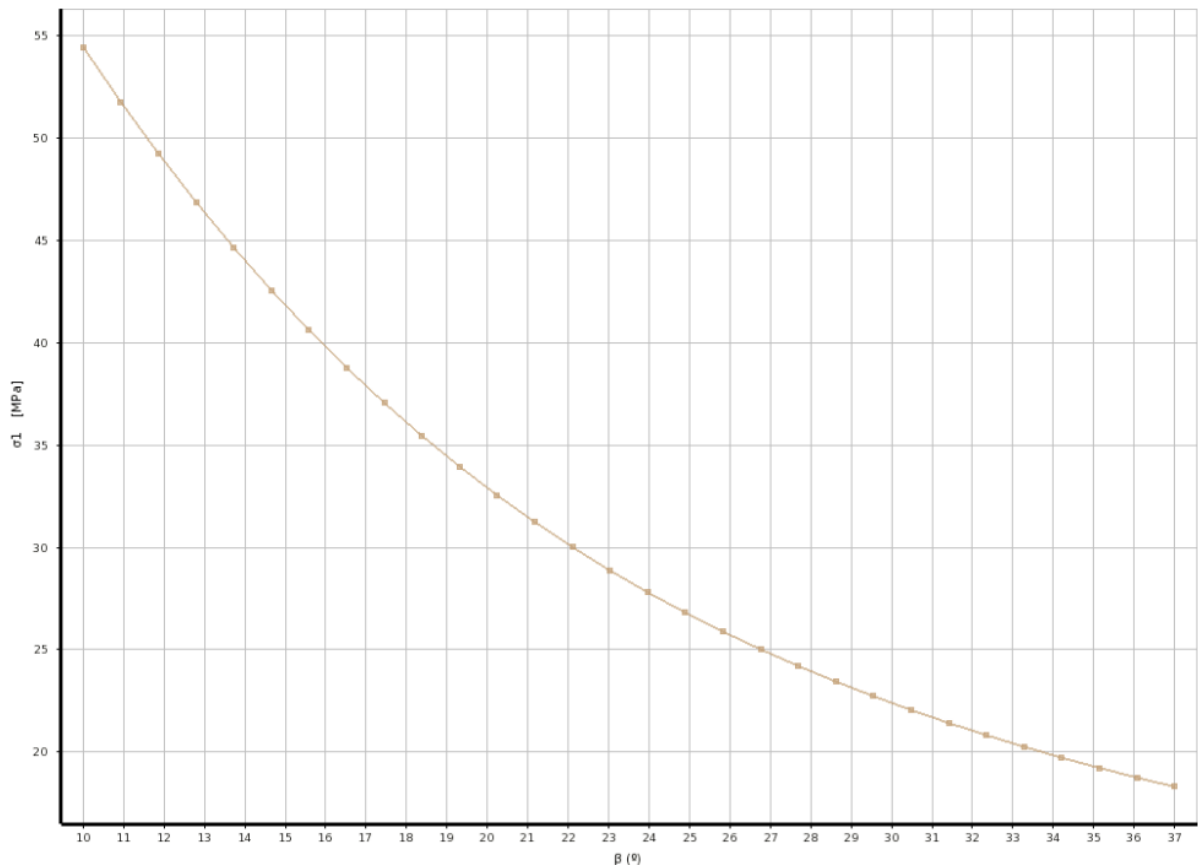


Figura 6.4 Relação tensão  $\sigma_1$  x inclinação  $\beta$

Na Figura 6.5 é apresentado um gráfico 3D da variação do deslocamento  $u_1$  em função da variação da espessura  $t$  e do ângulo de inclinação do teto  $\beta$ .

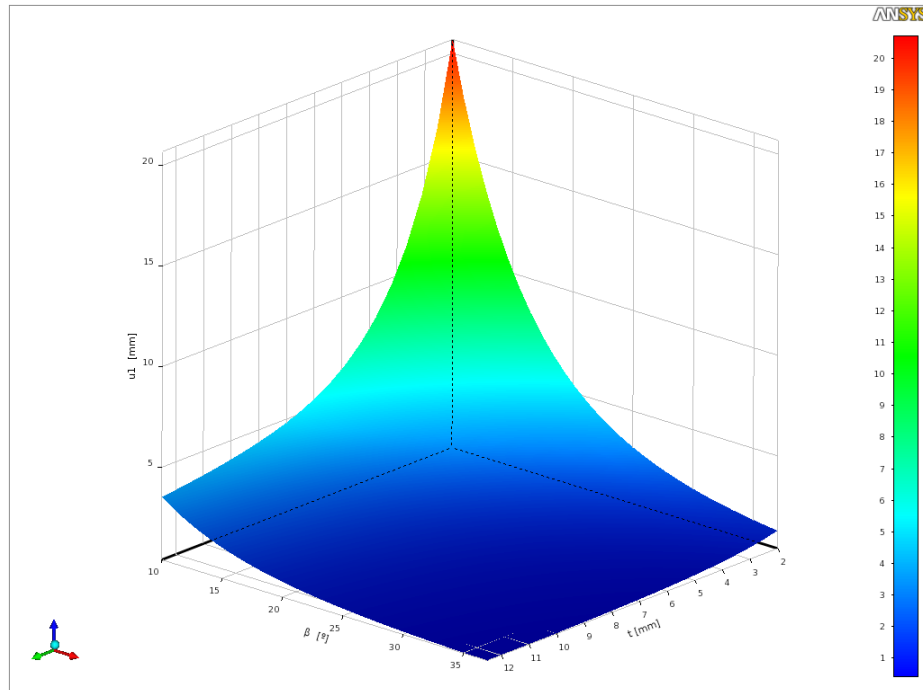


Figura 6.5 Relação deslocamento  $u_1$  x espessura  $t$  x inclinação  $\beta$

Na Figura 6.6 é apresentado um gráfico 3D da variação da tensão  $\sigma_1$  em função da variação da espessura  $t$  e do ângulo de inclinação do teto  $\beta$ .

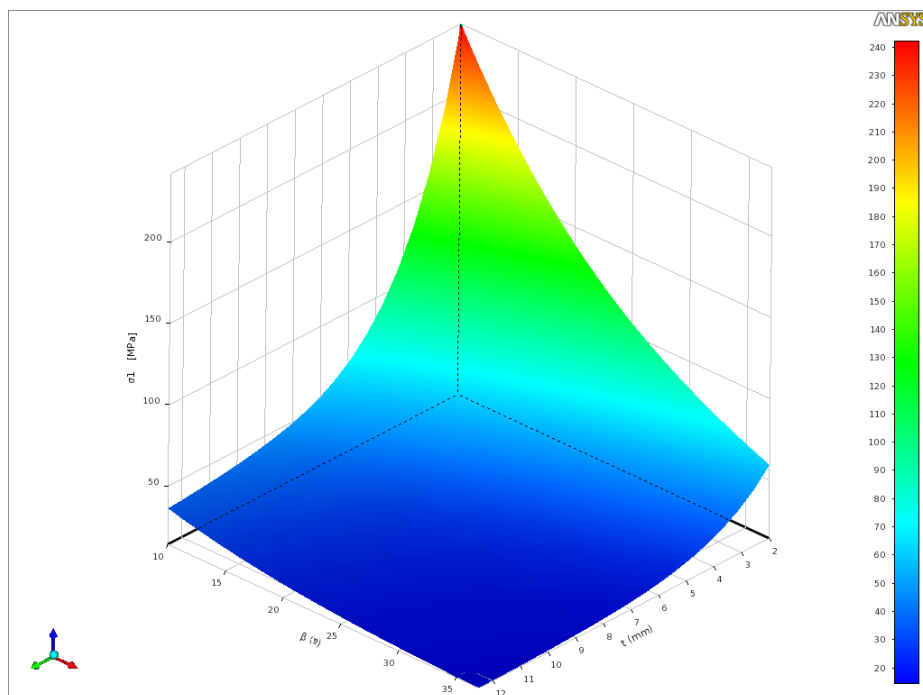


Figura 6.6 Relação tensão  $\sigma_1$  x espessura  $t$  x inclinação  $\beta$

## 6.2 Gráficos para a condição 2

A condição 2 conforme já descrito anteriormente corresponde a carga de peso próprio mais a carga de vento. A carga de vento foi determinada através do programa Ansys CFX.

A resposta para a variação do deslocamento  $u_2$  em função da variação da espessura  $t$  é apresentada na Figura 6.7. Entre 2 mm e 10 mm a medida que a espessura aumenta o deslocamento diminui. A partir de 10 mm a medida que a espessura aumenta o deslocamento também aumenta. Importante salientar que esse gráfico foi traçado para um ângulo de inclinação  $\beta$  de  $23,5^\circ$  e que a concavidade da curva muda com a alteração do ângulo de inclinação, assim como a intensidade dos deslocamentos.

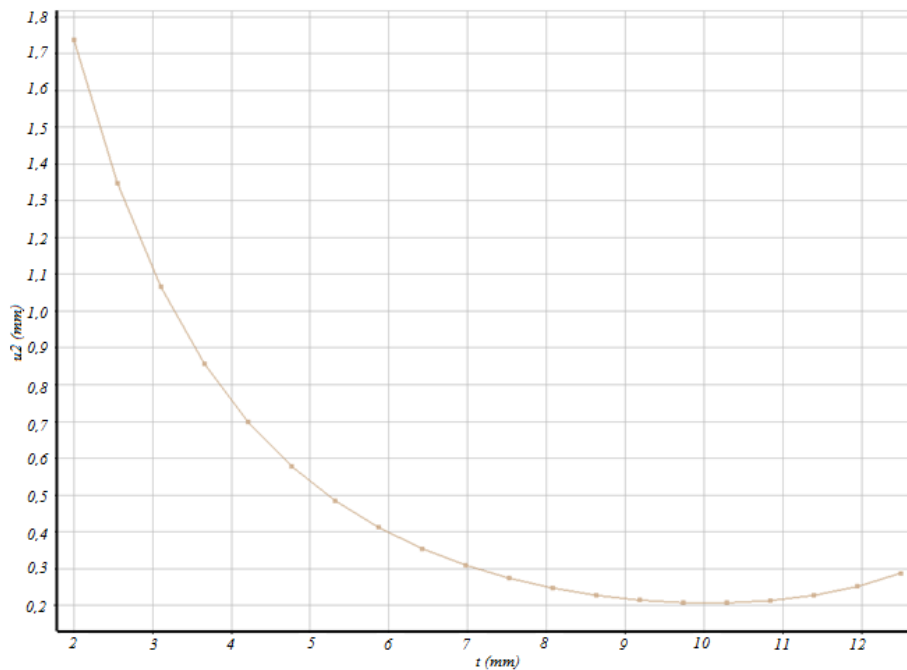


Figura 6.7 Relação deslocamento  $u_2$  x espessura  $t$

A resposta para a variação da tensão  $\sigma_2$  em função da variação da espessura  $t$  é apresentada na Figura 6.8. À medida que a espessura aumenta a tensão diminui. Importante salientar que esse gráfico foi traçado para um ângulo de inclinação  $\beta$  de  $23,5^\circ$  e que a concavidade da curva muda com a alteração do ângulo de inclinação, assim como a intensidade das tensões.

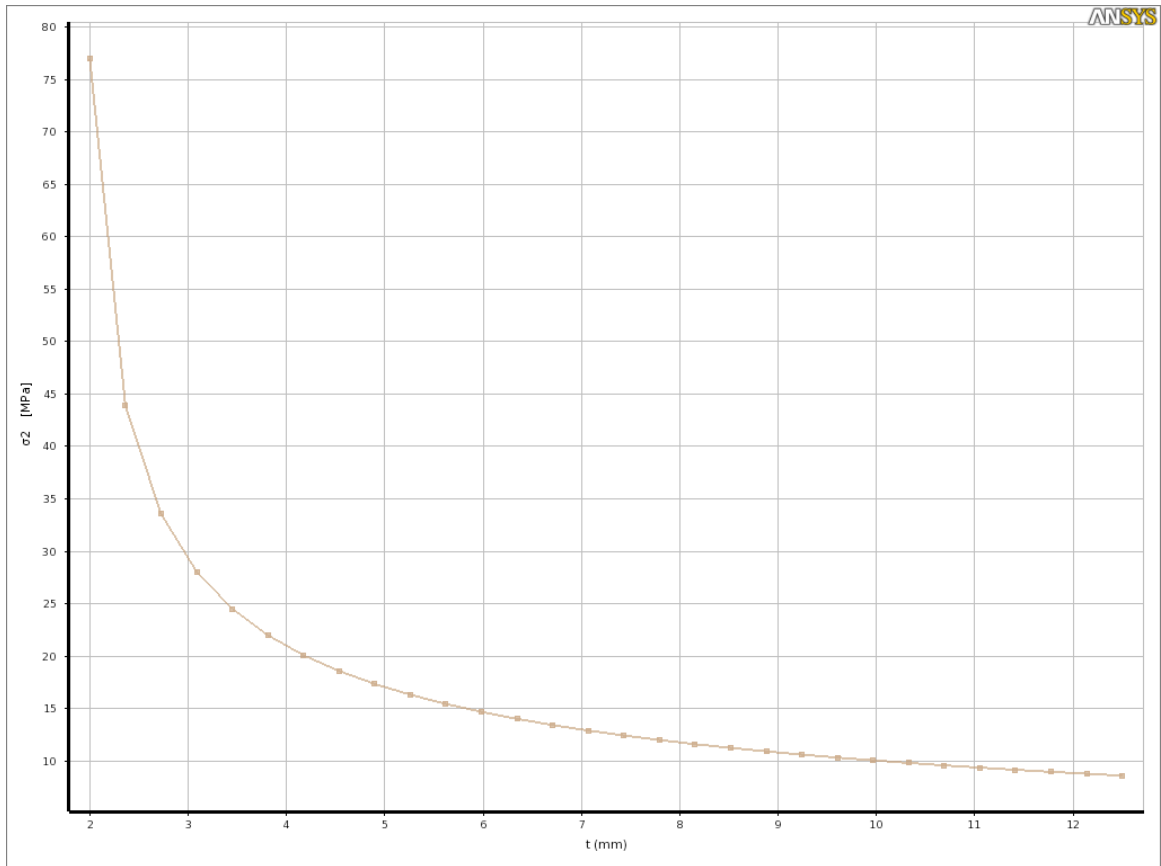


Figura 6.8 Relação tensão  $\sigma_2$  x espessura  $t$

A resposta para a variação do deslocamento  $u_2$  em função da variação da inclinação  $\beta$  é apresentada na Figura 6.9. Entre  $10^\circ$  e  $30^\circ$  a medida que o ângulo de inclinação  $\beta$  aumenta o deslocamento  $u_2$  diminui. A partir de  $30^\circ$  à medida que o ângulo de inclinação aumenta o deslocamento  $u_2$  também aumenta. Importante salientar que esse gráfico foi traçado para a espessura  $t$  de 7,25 mm e que a concavidade da curva muda com a alteração da espessura, assim como a intensidade dos deslocamentos.



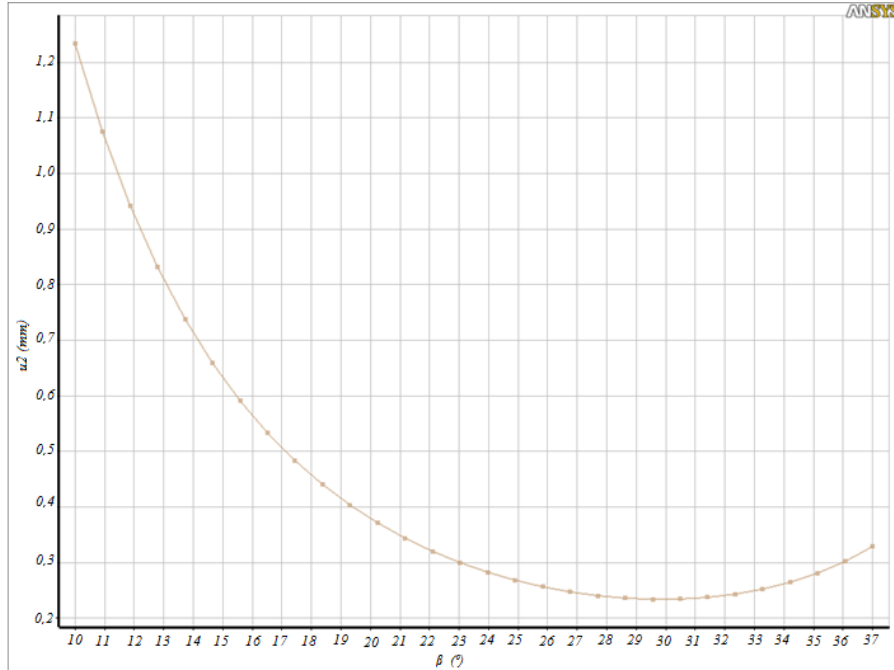


Figura 6.9 Relação deslocamento  $u_2$  x inclinação  $\beta$

A resposta para a variação da tensão  $\sigma_2$  em função da variação da inclinação  $\beta$  é apresentada na Figura 6.10. Entre  $10^\circ$  e  $23^\circ$  à medida que o ângulo de inclinação  $\beta$  aumenta a tensão  $\sigma_2$  diminui. A partir de  $23^\circ$  à medida que o ângulo de inclinação aumenta a tensão  $\sigma_2$  também aumenta. Importante salientar que esse gráfico foi traçado para a espessura  $t$  de 7,25 mm e que a concavidade da curva muda com a alteração da espessura, assim como a intensidade das tensões.

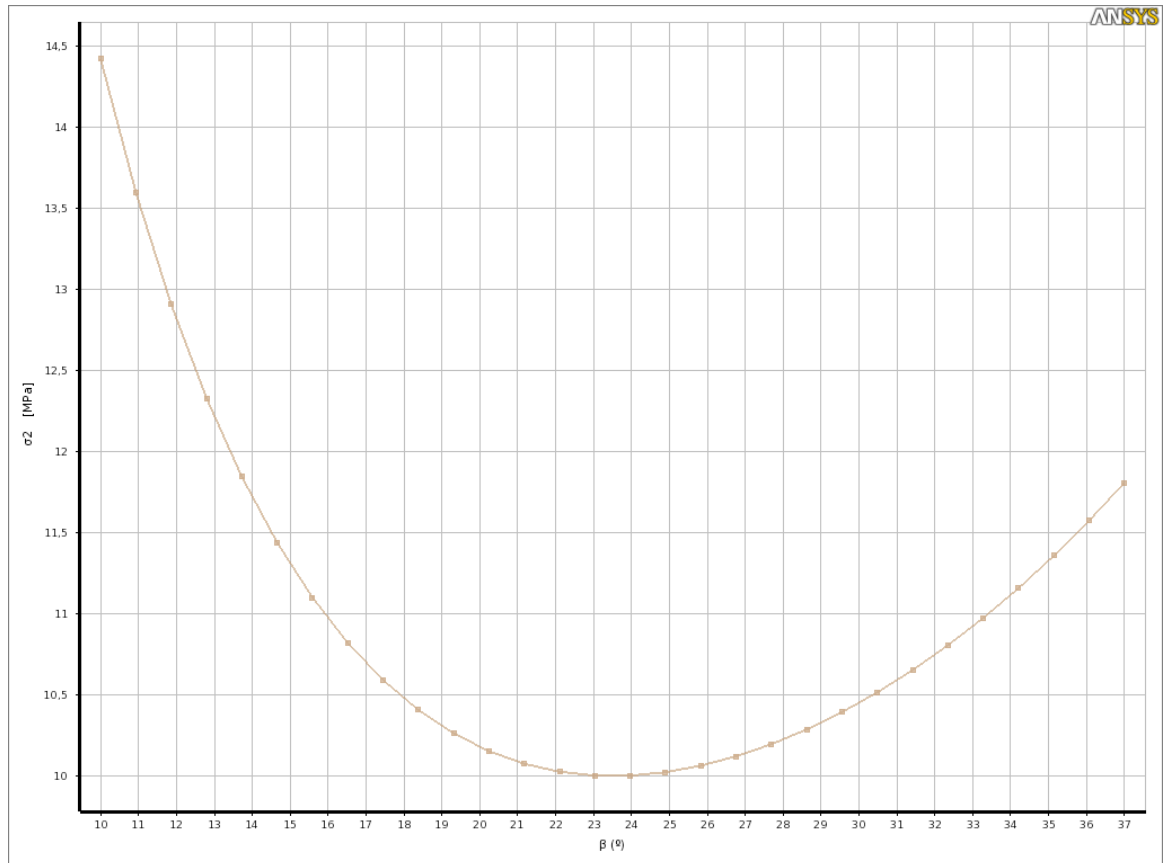


Figura 6.10 Relação tensão  $\sigma_2$  x inclinação  $\beta$

Na Figura 6.11 é apresentado um gráfico 3D da variação do deslocamento  $u_2$  em função da variação da espessura  $t$  e da inclinação do teto  $\beta$ .

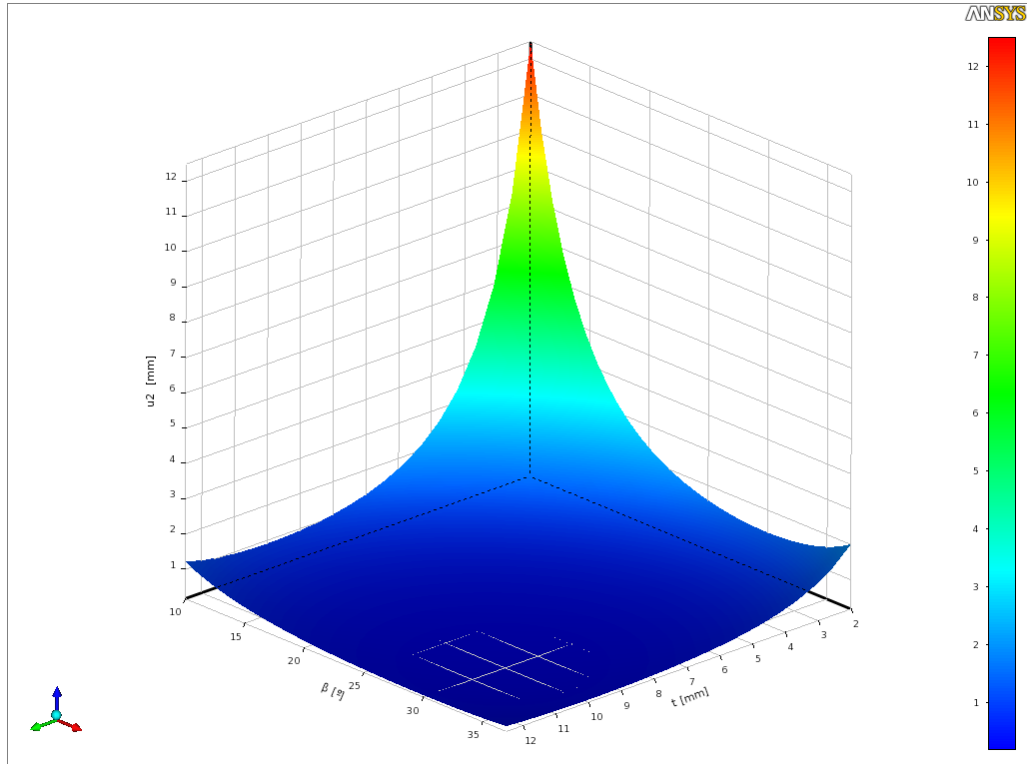


Figura 6.11 Relação deslocamento  $u_2$  x espessura  $t$  x inclinação  $\beta$

Na Figura 6.12 é apresentado um gráfico 3D da variação da tensão  $\sigma_2$  em função da variação da espessura  $t$  e da inclinação do teto  $\beta$ .

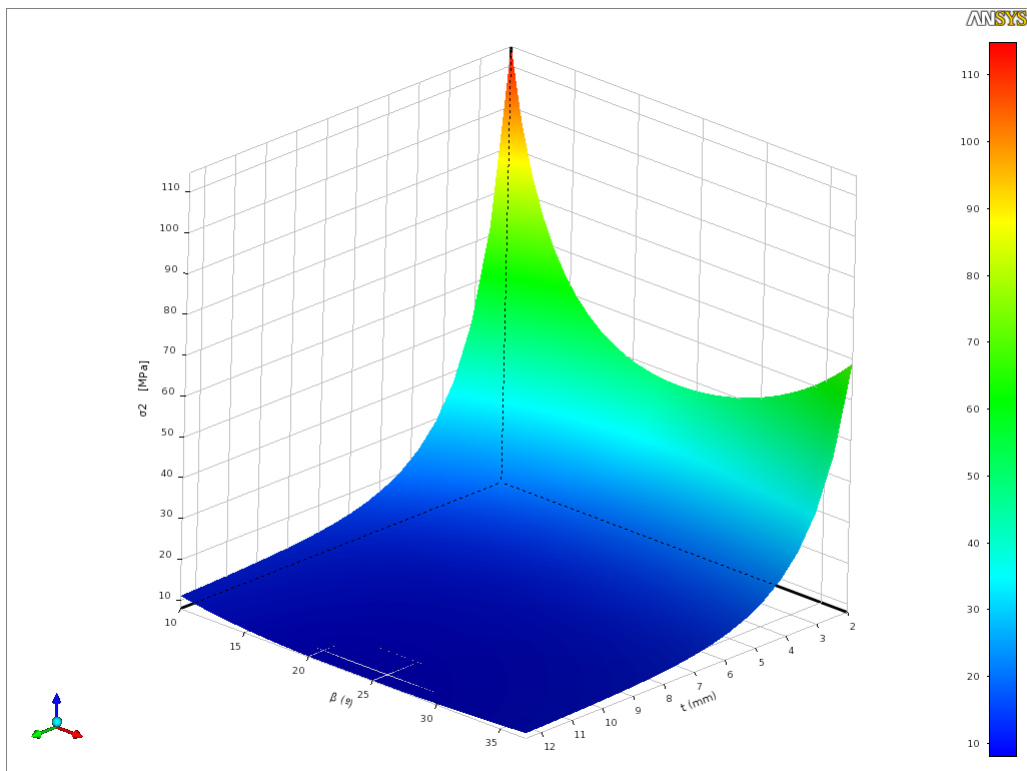


Figura 6.12 Relação tensão  $\sigma_2$  x espessura  $t$  x inclinação

### 6.3 Análise de sensibilidade

Na análise de sensibilidade apresenta-se a influência das variáveis de projeto em alguns parâmetros de saída. Na Figura 6.13 apresenta-se a análise de sensibilidade para o presente trabalho, onde se pode verificar de uma maneira simples a influência da espessura  $t$  e da inclinação  $\beta$  tanto nos deslocamentos  $u_1$  e  $u_2$  quanto nas tensões  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  e na função objetivo que é o volume.

Podemos verificar da análise de sensibilidade que a mudança na espessura é muito mais relevante para alterar o volume que uma mudança na inclinação. Mas isso não é tão simples quanto parece. Por exemplo, um aumento na inclinação pode promover uma diminuição na espessura. Com isso promove-se um aumento no volume pelo aumento da inclinação, mas ao mesmo tempo a espessura diminui provocando uma diminuição no volume. Por isso a necessidade da utilização de uma ferramenta de otimização que através de um algoritmo defina qual é o menor volume e, conseqüentemente, o ângulo de inclinação  $\beta$  correspondente.

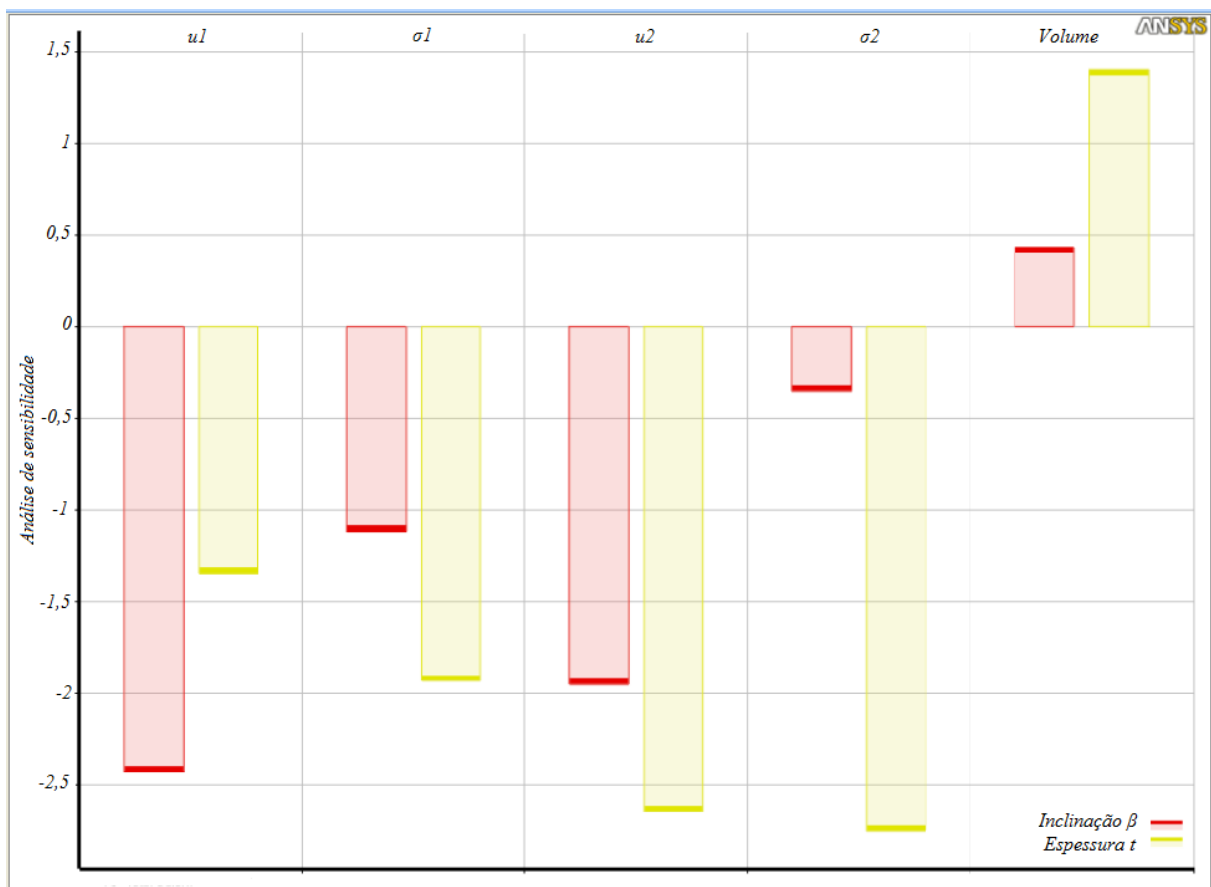


Figura 6.13 Análise de sensibilidade

## 6.4 Resultados do ponto ótimo

São apresentados diversos resultados relativos ao ponto ótimo encontrado pela opção melhorada. Refere-se aqui ao ponto com inclinação  $\beta$  de  $29,48^\circ$  e espessura  $t$  de 4,03 mm. O tanque foi considerado engastado no fundo. Na Figura 6.14 são apresentados os coeficientes de pressão para o ponto ótimo.

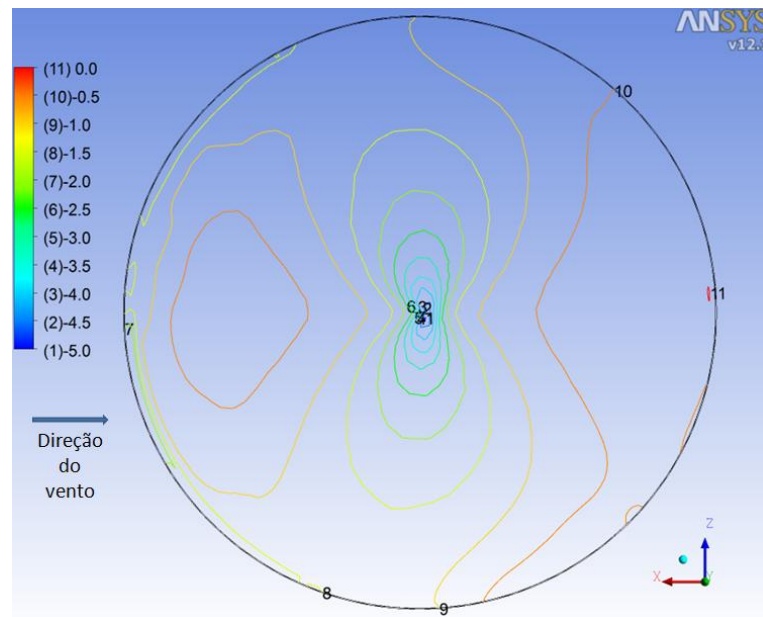


Figura 6.14 Coeficientes de pressão para o ponto ótimo

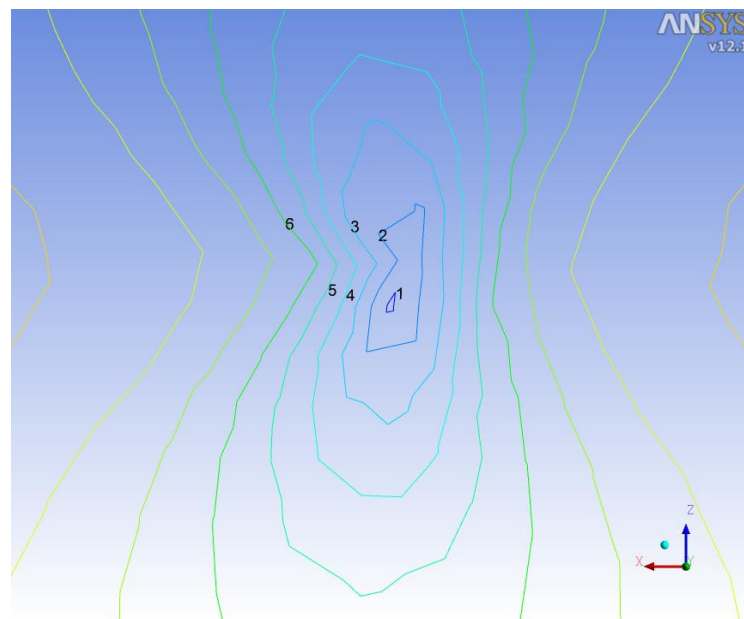


Figura 6.15 Detalhe central da Figura 6.14

Na Figura 6.16 é apresentado o deslocamento  $u_1$  para o ponto ótimo.

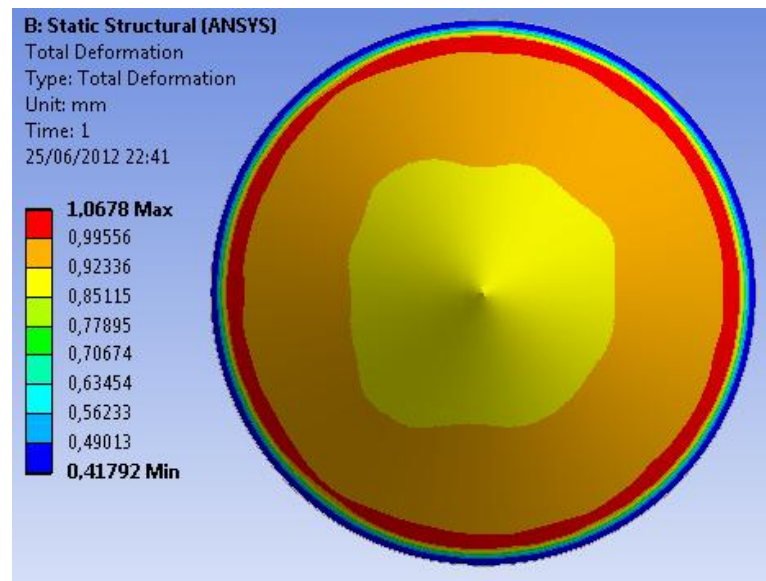


Figura 6.16 Deslocamento  $u_1$  para o ponto ótimo

Na Figura 6.17 é apresentado o deslocamento  $u_2$  para o ponto ótimo.

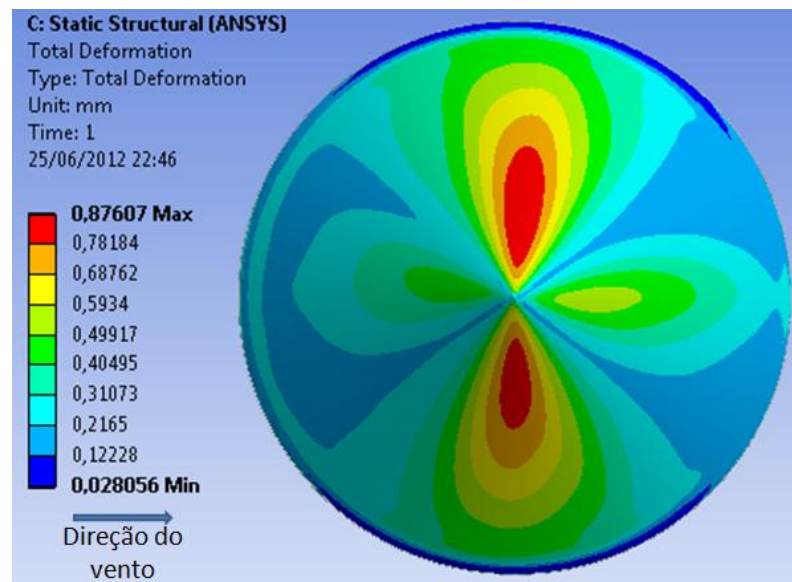


Figura 6.17 Deslocamento  $u_2$  para o ponto ótimo

Na Figura 6.18 é apresentada a tensão  $\sigma_1$  para o ponto ótimo. As maiores tensões estão localizadas na periferia do teto, pois é a região que sustenta todo o peso do teto mais a pressão de 1 kPa.

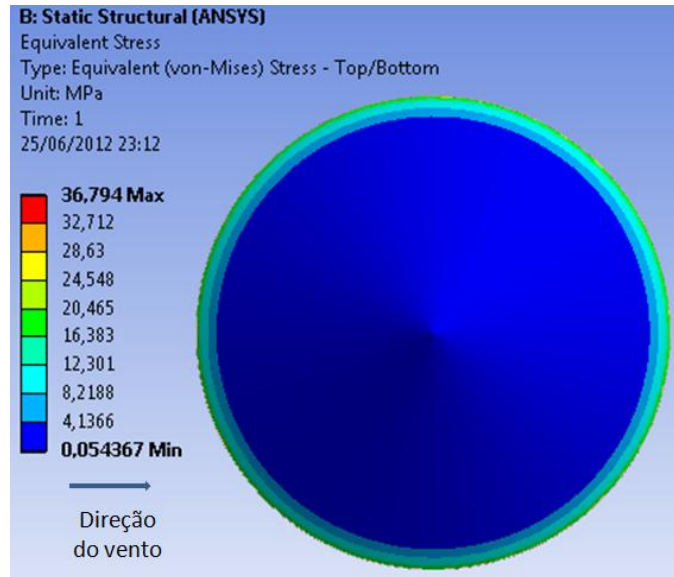


Figura 6.18 Tensão  $\sigma_1$  para o ponto ótimo

Na Figura 6.19 é apresentada a tensão  $\sigma_2$  para o ponto ótimo. As maiores tensões estão concentradas no centro do teto, devido às elevadas pressões de sucção que ocorrem nessa região.

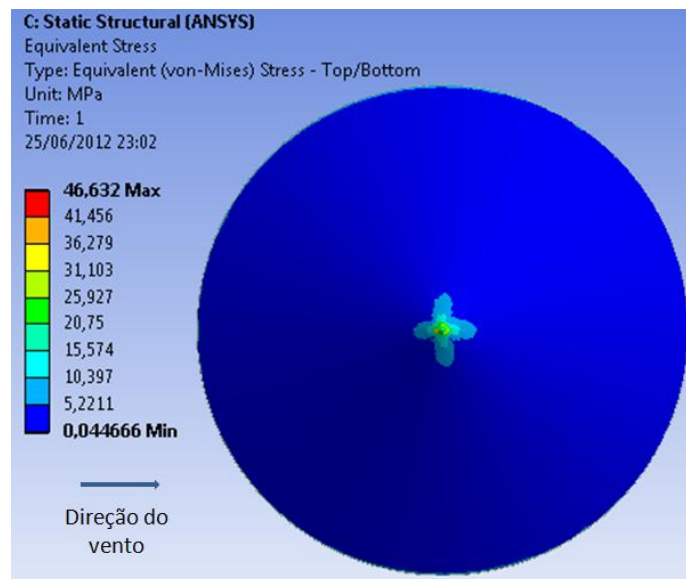


Figura 6.19 Tensão  $\sigma_2$  para o ponto ótimo

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O objetivo principal do trabalho que era encontrar o ângulo de inclinação ótimo foi atingido. Os três métodos de otimização mostraram-se eficientes no processo de procura pelo menor volume, com resultados bastante parecidos. A diferença maior ocorre no tempo que os algoritmos levaram para encontrar essa resposta. O método NLPQL levou apenas 4 s e encontrou a melhor resposta, enquanto o método MOGA levou 232 s e o método *Screening* levou 200 s. Para esses dois últimos algoritmos o MOGA apresentou uma resposta um pouco melhor que o *Screening*. Pode-se concluir que o método NLPQL é o mais adequado para esse trabalho, pois encontrou os melhores resultados e, além disso, levou um tempo bem inferior aos demais.

Um problema encontrado no processo de otimização foi que o ponto ótimo possuía deslocamentos  $u_1$  e  $u_2$  e tensões  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  que não batiam com a simulação deste mesmo ponto no Ansys. Diversos fatores contribuem para que isso ocorra:

- A amostra pode ser muito pequena;
- A localização dos pontos da amostra pode não ser a mais adequada;
- O modelo utilizado para desenvolver o gráfico na response surface (*Full 2-nd Order Polynomials*) talvez não seja o mais adequado.

Esse problema foi amenizado com o uso de uma opção melhorada (com um número maior de pontos) do DOE. A verificação do ponto ótimo através de nova simulação é de extrema importância uma vez que fornece ao engenheiro dados mais confiáveis a respeito do comportamento da estrutura.

As espessuras referentes aos pontos apresentados no decorrer do trabalho são resultados de algumas simplificações e, por isso, devem ser avaliadas para cada caso em específico. Uma simplificação adotada é considerar uma carga distribuída para a condição 1. A região da solda não é avaliada. Porém é uma região que merece atenção especial. O teto é considerado liso, ou seja, sem passarelas ou outros acessórios comumente presentes em tanques, o que pode modificar tanto os resultados da análise CFD quanto da análise estrutural. Esta metodologia, corrigido alguns pontos, pode ser importante na determinação da espessura do teto, trazendo economia e, ao mesmo tempo, segurança.

A comparação dos coeficientes de pressão obtidos através dessa metodologia com os obtidos em ensaio em túnel de vento mostrou que a distribuição desses coeficientes no teto é muito parecida, o que é importante. A magnitude dos valores, no entanto, é diferente. Porém,



não se conseguiu reproduzir todas as condições do experimento na simulação e, portanto, as diferenças encontradas eram esperadas. Futuros trabalhos devem se concentrar na validação das simulações através de ensaios em túnel de vento ou medições em protótipos.

Conforme pode ser visto existe uma assimetria nos resultados encontrados para os coeficientes de pressão, se considerada uma direção horizontal e perpendicular ao fluxo de vento. Na prática, quando considerado um escoamento médio essa assimetria não existe. Uma hipótese é que isso seja causado pelo desprendimento de vórtices que ocorre de forma alternada na estrutura do tanque. Sugere-se que, em estudos posteriores, se trabalhe no sentido de identificar a real causa desse problema e que se apontem possíveis soluções.

Uma contribuição do trabalho é a utilização desta metodologia para encontrar o ângulo de inclinação ótimo. É uma metodologia que faz uso da interdisciplinaridade, uma vez que trabalha com a análise CFD, análise estrutural e finaliza com um problema de otimização. Traz a facilidade de ser uma ferramenta que pode ser utilizada em qualquer lugar, diferente da área experimental, onde os túneis de vento normalmente estão restritos a área acadêmica.

Sugere-se estudos futuros no sistema de passarelas superiores afixados em cima do teto. Esses estudos podem servir tanto para o dimensionamento das passarelas, quanto para o estudo das cargas transmitidas por estas para o teto.

A metodologia deste trabalho pode ser usada para otimizar o ângulo de inclinação do teto  $\beta$  para outras relações  $h/D$ . De acordo com Portela e Godoy, 2005, a relação  $h/D$  influencia nas pressões da casca cilíndrica. Para tanques baixos com relação  $h/D$  de 0,4 a 0,5 as pressões no costado são mais baixas que para tanques altos, com relação  $h/D$  maior que 0,5. Conforme pode ser visto em MacDonald et al., 1986, um aumento da relação  $h/D$  aumenta as pressões de sucção na entrada do teto na região a barlavento.

É comum reforçar o teto do tanque com perfis soldados. Com isso é possível fabricar o teto com uma espessura menor. Sugere-se o desenvolvimento de uma metodologia para o estudo de tais tetos, verificando também a viabilidade econômica destes em relação aos tetos sem tais perfis.

O trabalho aqui desenvolvido é um trabalho multidisciplinar e é também um primeiro trabalho no sentido de encontrar o ângulo de inclinação ótimo para o teto do tanque. Assim, sugere-se utilizar a base desse trabalho e, desse modo, trabalhar alguns itens específicos, tais como: modelagem da turbulência, utilizar camada limite atmosférica e desenvolver análise de flambagem.

Outra sugestão de trabalho é determinar para cada diâmetro de tanque qual é o tipo de teto fixo tecnicamente aceito e qual é o mais viável economicamente. Realizar esse estudo levando em consideração não apenas o teto, mas toda a estrutura do tanque, uma vez que, formas construtivas diferentes para o teto podem exigir um costado mais reforçado com consequente aumento de espessura e/ou presença de perfis de reforço.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade Junior, L. J. de; **Análise Estrutural das Chapas metálicas de Silos e de Reservatórios Cilíndricos**. São Carlos, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos.

Andrade Junior, L. J. de; **A Ação do Vento em Silos Cilíndricos de Baixa Relação Altura/Diâmetro**. São Carlos, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos.

Andrade Junior, L. J. de; Júnior, C. C.; Comportamento Aerodinâmico e Efeito de Enrijecimento Externo em Silos Cilíndricos sob a Ação do vento, **SciELO**, Eng. Agríc., Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 512-526, 2004.

Ansys, Inc., **Ansys CFX Tutorials**, Tutorial, Canonsburg, United States, 2009.

Ansys, Inc., **Design Exploration**, Tutorial, Canonsburg, United States, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988. 66p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7821**: tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados. Rio de Janeiro, 1983. 118p.

Camera. **Foto**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por fabio.zorzo@yahoo.com.br em: 21 jun 2012.

Carrera, F. H.; **Estudo Numérico para a Determinação das Pressões Devidas a Ação do Vento em Torres Metálicas de Seção Circular**. Ilha Solteira, 2007. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Unesp.

Cóstola, D.; Alucci, M. P.; Aplicação de CFD para o Cálculo de Coeficientes de Pressão Externos nas Aberturas de um Edifício, **SciELO**, ANTAC, v. 11, n. 1, p. 145-158, 2011.

Economia&Negócios. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/economia,consumo-de-bebidas-energeticas-cresce-325-,55706,0.htm>> Acesso em: 11 abril 2012.

Engarrafador Moderno. Disponível em: <<http://www.engarrafadormoderno.com.br/noticias.aspx?page=noticias&id=1>> Acesso em: 11 abril 2012.

Hafez, K. A.; Elsamni, O. A.; Zacaria, K. Y.; Numerical Investigation of the Fully Developed Turbulent Flow Over a Moving Wavy Wall Using  $k-\varepsilon$  Turbulence Model, **Alexandria Engineering Journal**, v. 50, p. 145-162, 2011.

Haftka, R. T.; Gurdal, Z.; **Elements of Structural Optimization**. Kluwer Academic Publishers, 1992. 481 p.

Jaca, R. C.; **Límites Inferiores en Inestabilidad de Láminas de Tanques de Pared Delgada**. Córdoba, 2008. 206 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia). Universidade Nacional de Córdoba.

MacDonald, P. A.; Kwok, K. C. S.; Holmes, J. D.; Wind Loads on Isolated Circular Storage Bins, Silos and Tanks: point pressure measurement, **9<sup>th</sup> Australasian Fluid Mechanics Conference**, p. 312 – 315, 1986.

Maliska, C. R.; **Transferência de Calor e Mecânica dos fluidos Computacional**. LTC, Rio de Janeiro, 1995.

Mandloi, P.; Verma, G.; Boland, A.; Design Optimization of an In-cylinder Engine Intake Port, **Nafems**, 2009.

Manfrim, S. T.; **Estudo Numérico para a Determinação das Pressões Devidas à Ação do Vento em Edifícios Industriais**. Ilha Solteira, 2006. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Unesp.

Patankar, S. V.; **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. McGraw-Hill, New York, 1980.

Petrobrás. Disponível em: <<http://fatosedados.blogspotrobras.com.br/2011/12/20/ven-da-gasolina-aumento-expressivo/>> Acesso em: 12 abril 2012.

Portela, G.; Godoy, L.A.; Wind Pressures and Buckling of cylindrical steel tanks with a conical roof, **Journal of Constructional Steel Research** **61**, p. 786-807, 2005.

Sabransky, I. J.; Melbourne, W.H.; Design Pressure Distribution on Circular Silos With Conical Roofs, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** **26**, p. 65-84, 1987.

Scalabrin, L. A., **Dimensionamento de Silos Metálicos para Armazenagem de Grãos**. Porto Alegre, 2007. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), UFRGS.

Schultz, F.; Losito, M.; Simos, A.; Ensaio de Túnel de Vento e Simulação Numérica em CFD no Estudo do Escoamento ao Redor de uma Asa, **22<sup>o</sup> Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore (Sobena)**, 2008.

Scruton, C.; **An Introduction to Wind Effects on Structures**. Oxford University Press, 3<sup>st</sup> ed., 1981. 79 p.

Silva, E. C. N.; **Otimização Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003. 151 p.

Soriano, H. L.; **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. Edusp, São Paulo, 2002.

Streeter, V. L.; Wylie, E. B.; **Mecânica dos Fluidos**. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1982. 585 p.

Timoshenko, S. P.; Krieger, S. W.; **Theory of Plates and Shells**. McGraw-Hill, 2<sup>nd</sup> ed., New York, 1959. 580 p.

Vinícola Casa Rodrigues. **Autorização Foto**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por fabio.zorzo@yahoo.com.br em: 28 jun 2012.

Zdravkov, L. A.; Determinação do Tipo de Teto Fixo, **Revista da Construção**, v. 4, 2006.

## APÊNDICE A - Etapas da simulação

O objetivo do apêndice é ajudar no entendimento do trabalho e permitir que este seja reproduzido com maior facilidade. Esta metodologia foi empregada com o objetivo principal de otimizar o ângulo de inclinação do teto. No entanto, ela pode ser utilizada para diversos tipos de estruturas que, de um modo ou de outro, estão sob a ação da carga de vento. É apresentado nesse apêndice os programas utilizados junto com alguns dos principais comandos. Algumas configurações utilizadas também estão presentes nesse apêndice, principalmente no que se refere ao programa Ansys CFX.

### A-1 Workbench

Duplo clique no programa workbench.

Em analysis system duplo clique em *fluid flow* (CFX), conforme Figura A-1.1. Em *project schematic* é criado a célula “A”.

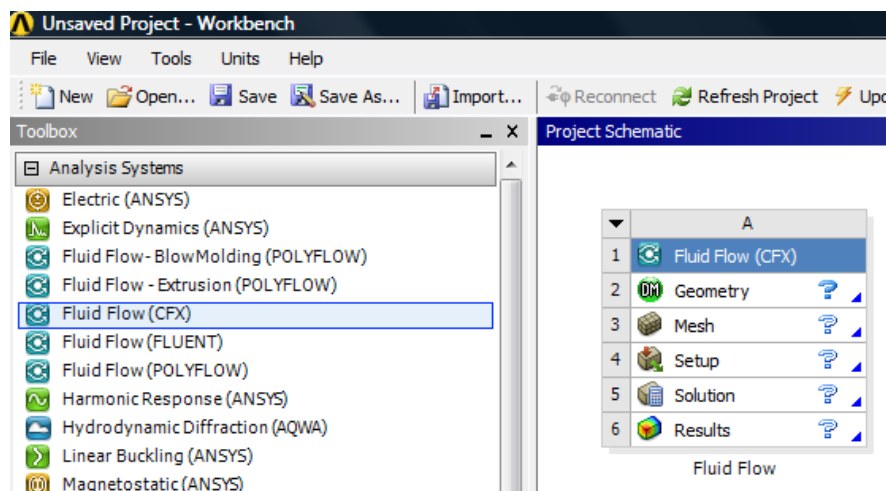


Figura A-1.1 Inicializando o *Fluid flow* (CFX)

Clicar em *save*. Salvar com o nome de tanque.

Clicar com o botão direito do mouse no item “A5” (*solution*) < *transfer data to new* > *static structural ansys*. Com isso é criada a célula “B” em *project schematic*.

Clicar com o botão direito do mouse no item “A5” (*solution*) < *transfer data to new* > *static structural ansys*. Com isso é criada a célula “C” em *project schematic*.

Duplo clique em *geometry* na célula “A”. Com isso abre o programa design modeler. Terminado o modelamento, retornar para o workbench .

Retornando ao workbench, clicar em *save*.

Realizar o mesmo procedimento dos parágrafos anteriores para todos os itens da célula “A”, “B” e “C”, deixando-os atualizados, conforme Figura A-1.2.

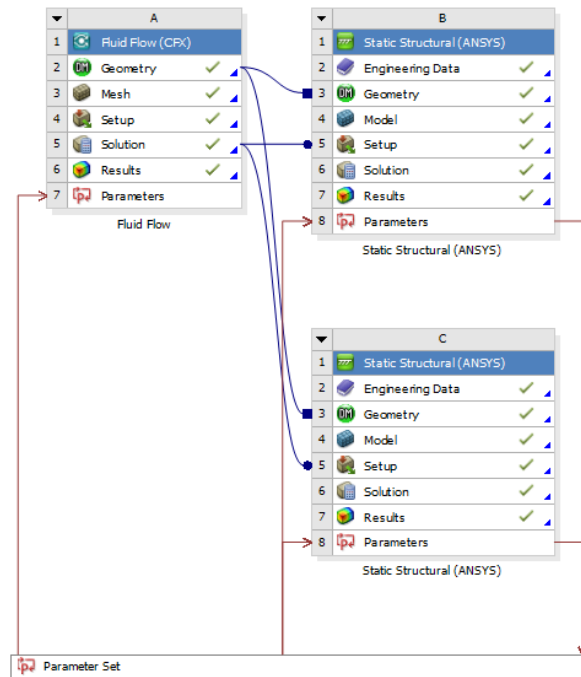


Figura A-1.2 Detalhe do *project schematic* com a simulação CFD e as duas simulações estruturais

Duplo clique em *goal driven optimization*. Com isso é criada a célula “D”, conforme pode ser visto na Figura A-1.3. Clicar em *save*. Esta é a única ferramenta que é inteiramente processada na plataforma do workbench.

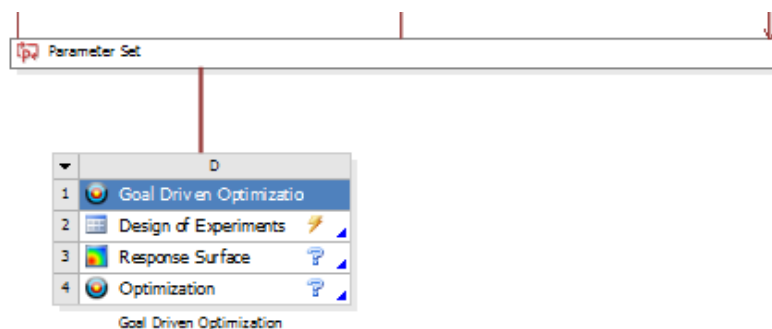


Figura A-1.3 Adicionando a ferramenta *goal driven optimization*

## A-2 Design Modeler

Duplo clique na célula “A2” (*geometry*), no workbench. Com isso abre o programa design modeler.

Primeiramente desenhar o volume de controle que é um paralelepípedo. Retirar material desse volume de controle, correspondente ao tanque.

Desenvolver o tanque exatamente no local onde foi retirado material do volume de controle com o formato do tanque. Modelar de modo que sejam criados 2 corpos: o teto e o corpo cilíndrico. Contando o volume de controle serão três corpos modelados.

Ir em *tools > mid – surface >* e aplicar este comando ao teto e ao corpo cilíndrico para transformá-lo em um elemento estrutural de casca.

Ir em *tools > form new part >* selecionar o teto e o corpo cilíndrico. Estes devem formar uma única parte, embora tenha sido criado dois corpos.

É preciso definir os parâmetros (variáveis de projeto) para a otimização. Ir no *sketch* na cota correspondente ao ângulo de inclinação do teto  $\beta$ . Selecionar a caixa para o ângulo de 10°. Com isso abre uma janela onde deve ser digitado a palavra “inclinação”. Essa medida fica marcada com a letra “D” para indicar que é uma variável de projeto. Ver Figura A-2.1.

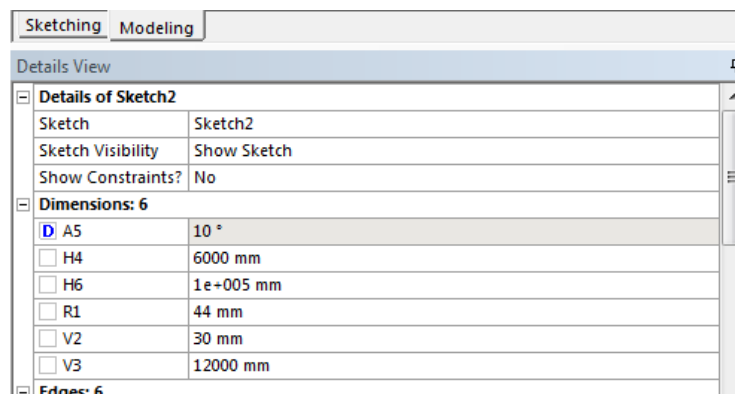


Figura A-2.1 Definindo a variável de projeto  $\beta$

Desenvolver o mesmo procedimento do parágrafo anterior para a espessura  $t$  do teto do tanque. Ver Figura A-2.2.



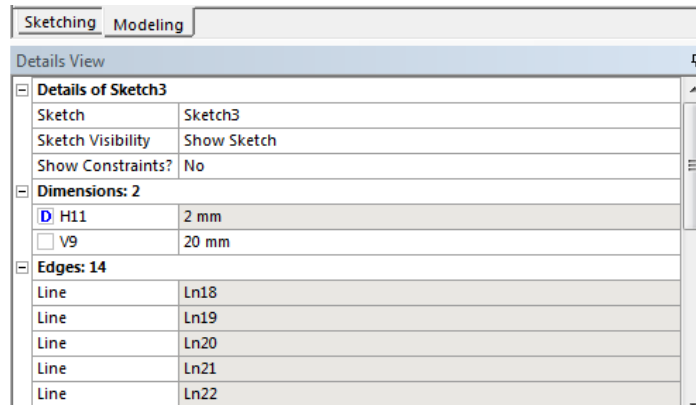


Figura A-2.2 Definindo a variável de projeto  $t$

Retornar para o workbench e clicar em *save*.

### A-3 Mesh

Duplo clique na célula “A3” (*mesh*), no workbench. Com isso abre o programa gerador da malha.

Clicar no símbolo “+” para abrir a árvore *geometry*.

Clicar com o direito em *part* (correspondente as superfícies do teto e do corpo cilíndrico) > *suppress body*.

Com isso fica ativo apenas o volume de controle.

Clicar com o direito em *mesh* > *generate mesh*, conforme Figura A-3.1. É gerado um resultado parecido com o da Figura A-3.2.

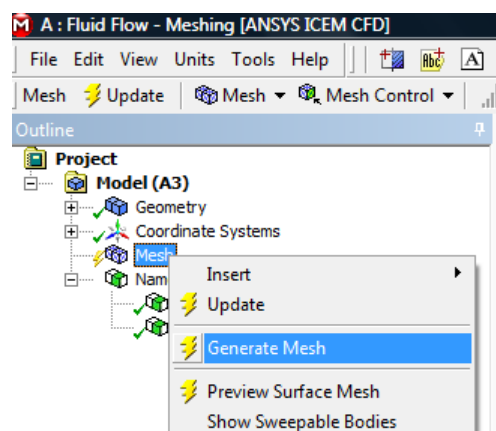


Figura A-3.1 Gerando a malha

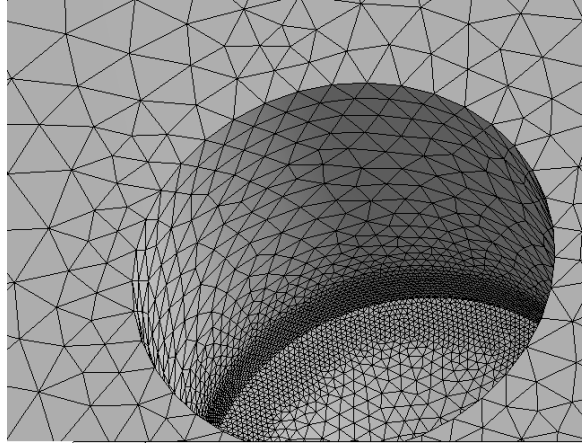


Figura A-3.2 Malha do volume de controle

Clicar com o direito em *mesh > insert > sizing*. Definir um tamanho de elemento para a malha da superfície do volume de controle correspondente ao teto. Clicar em *generate*.

Retornar ao workbench e clicar em *save*.

#### **A-4 CFX Pré**

Duplo clique na célula “A4” (*setup*), no workbench. Com isso abre o programa CFX Pré.

Duplo clique em *analysis type*. Determinar o tipo de análise como sendo *steady state*. Em *external solver coupling* definir a opção *none*.

Duplo clique em *default domain*. Preencher conforme Figura A-4.1 e Figura A-4.2.

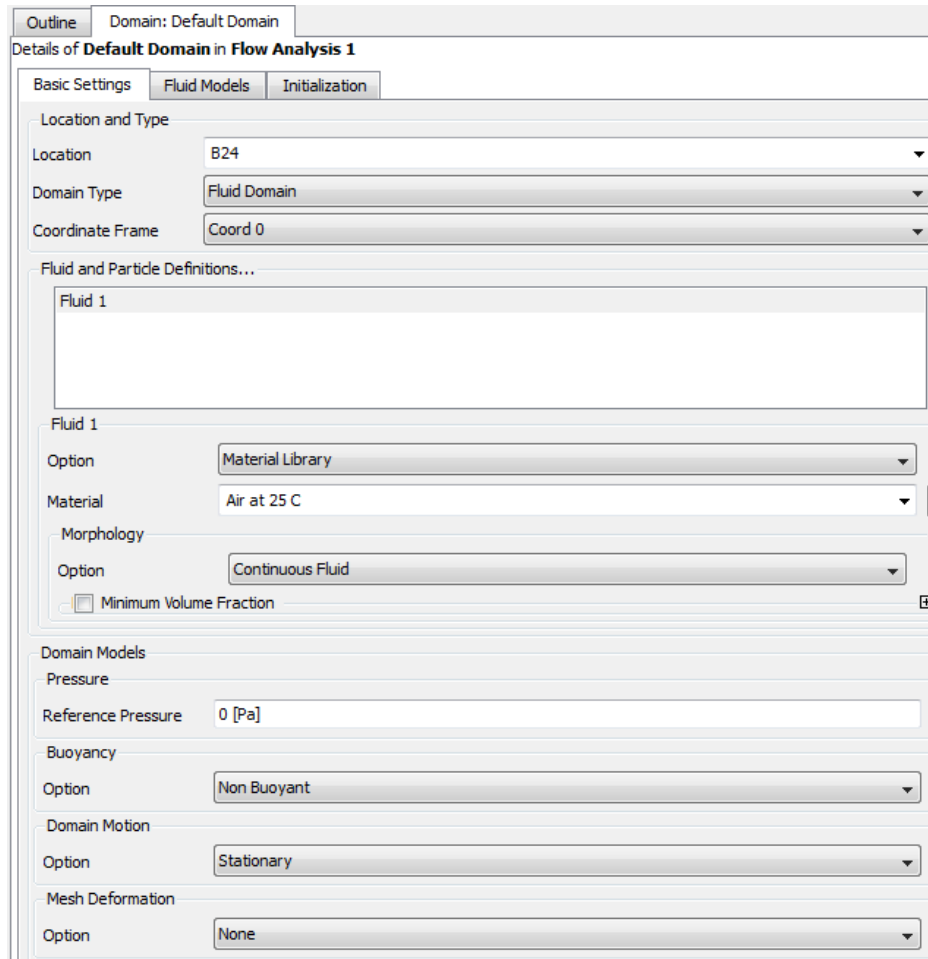


Figura A-4.1 Configuração para o *default domain*

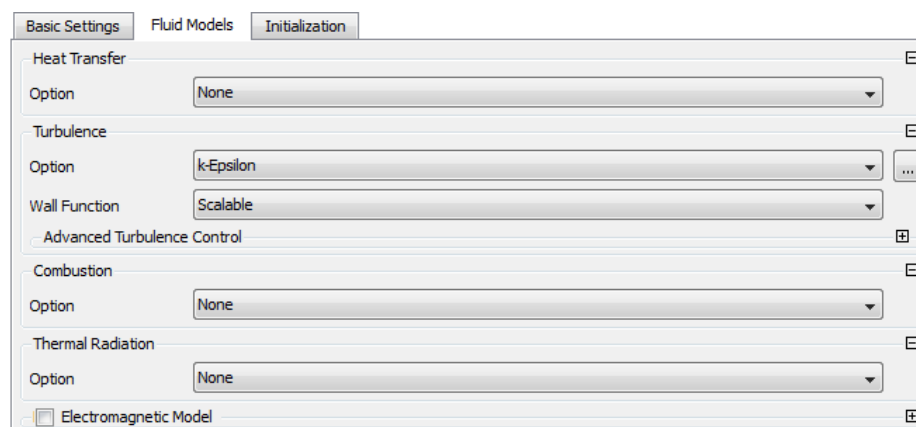


Figura A-4.2 Configuração para o *default domain*

Clicar em *boundary*. Digitar o nome da condição de contorno da entrada: *inlet*.  
Duplo clique na condição de contorno *inlet* e definir conforme Figura A-4.3.

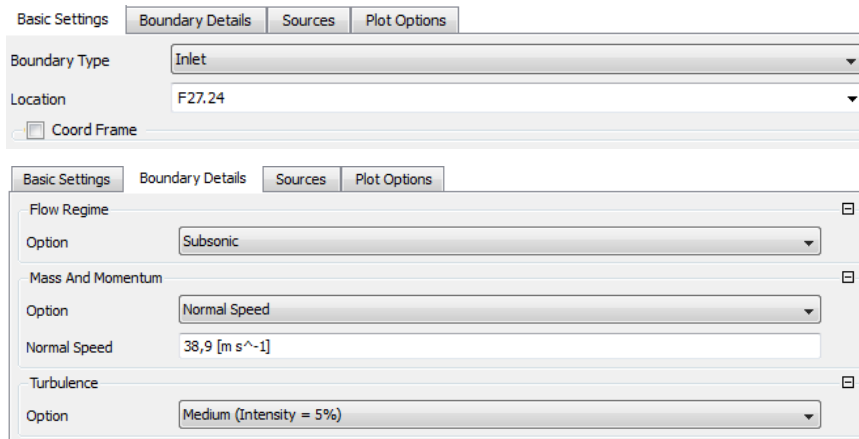


Figura A-4.3 Condição de contorno entrada

Definir a condição de contorno saída conforme Figura A-4.4.

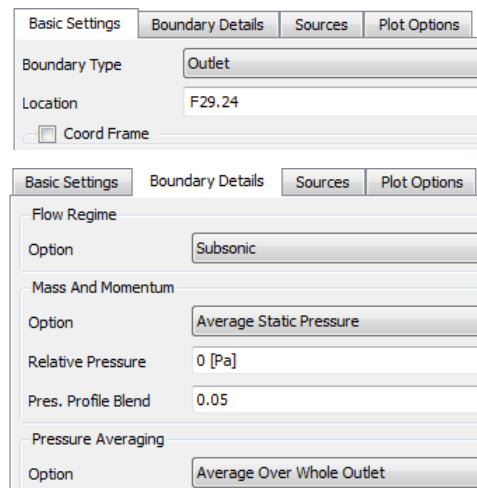


Figura A-4.4 Condição de contorno saída

Definir a condição de contorno simetria conforme Figura A-4.5.

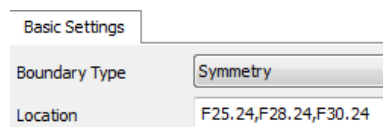


Figura A-4.5 Condição de contorno simetria

Definir a condição de contorno tanque (região do volume de controle formado pelas superfícies referentes ao costado e teto do tanque) conforme Figura A-4.6.

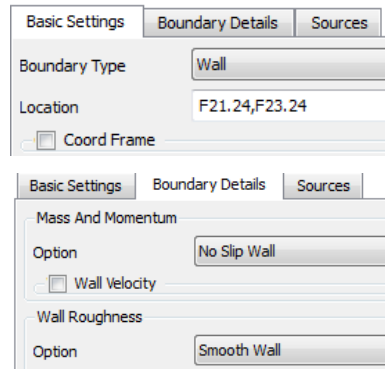


Figura A-4.6 Condição de contorno tanque

Definir a condição de contorno piso conforme Figura A-4.7.

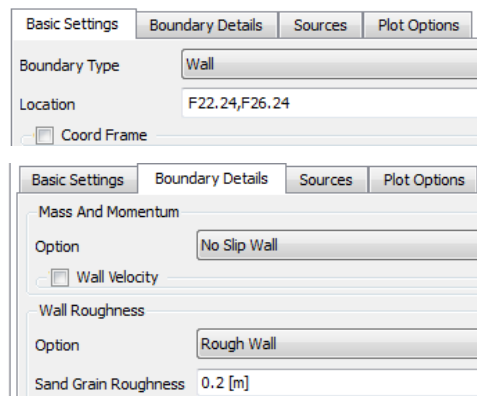


Figura A-4.7 Condição de contorno piso

O resultado, com as condições de contorno definidas, é mostrado na Figura A-4.8.

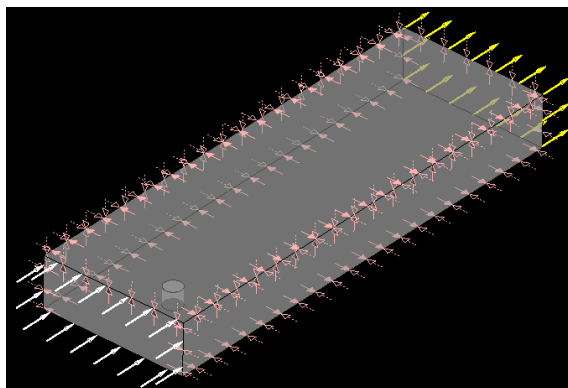


Figura A-4.8 Condições de contorno

Duplo clique em *solver control*. Configurar conforme Figura A-4.9.

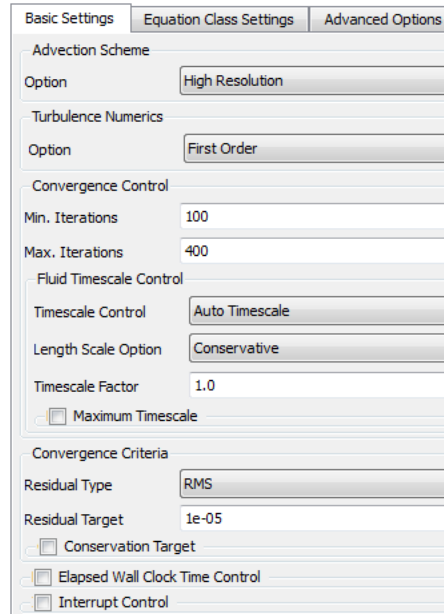


Figura A-4.9 Configuração do *solver control*

Retornar ao workbench e clicar em *save*.

## A-5 CFX Solver

Duplo clique na célula “A5” (*solution*), no workbench. Com isso abre o programa CFX Solver, conforme pode ser visto na Figura A-5.1. Clicar em *start run*.

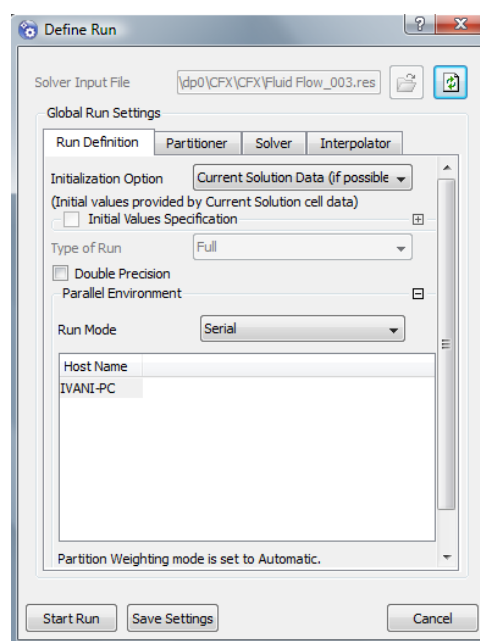


Figura A-5.1 CFX Solver

O programa interrompe a simulação quando é atingida a convergência especificada no *solver control* ou então quando é atingido o número máximo de iterações, também especificado no *solver control*. Como pode ser visto na Figura A-5.2 a simulação converge muito antes do número máximo de iterações que é 400.

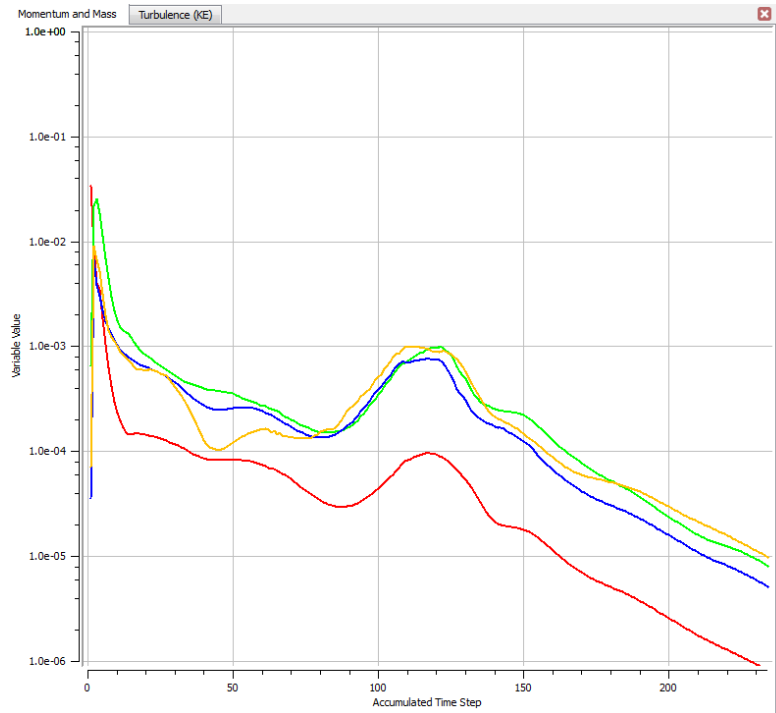


Figura A-5.2 Iterações do CFX Solver

## A-6 Ansys Mechanical

Na Figura A-6.1 pode ser visto uma configuração final da simulação no Ansys Mechanical para a carga da condição 1.

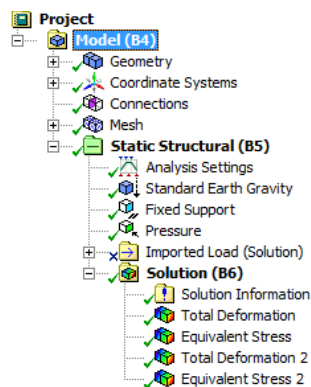


Figura A-6.1 Configuração final no Ansys Mechanical para a carga da condição 1

Clicar no símbolo “+” para abrir a árvore *geometry*. Clicar com o direito em vento > *suppress body*.

Clicar com o direito em *mesh > insert > sizing* > inserir o tamanho do elemento para a malha do teto.

Clicar com o direito em *static structural > insert > standard earth gravity* > selecionar todos os corpos (teto e corpo cilíndrico do tanque).

Clicar com o direito em *static structural > insert > fixed support* > selecionar a face do fundo.

Clicar com o direito em *static structural > insert > pressure* > selecionar a face externa do teto > 1 kPa.

Clicar com o direito em *Imported Load > suppress* (isso porque está sendo considerada a carga da condição 1. Se fosse para a condição 2, não seria necessário esse comando pois a condição 2 engloba a carga de vento).

Clicar com o direito em *solution > insert > deformation* > selecionar a face do teto.

Clicar em *solve*.

Clicar em *total deformation* e marcar a opção *maximum*. Dessa maneira esse valor poderá ser usado na otimização como uma restrição.

Retornar ao workbench e clicar em *save*.

## A-7 Goal Driven Optimization

A ferramenta *goal driven optimization* é desenvolvida toda dentro da plataforma do workbench.

Ir em tools e marcar as seguintes opções: *table, chart, properties* e *outline*.

Clicar em *parameter set*.

Ir em *outline*. Clicar em *new output parameter*. Digitar a equação para o volume (equação 5.14).

Clicar em *design of experiments*.

Ir em *outline* e clicar na espessura *t*. Ir em *properties* e clicar no campo para *lower band* e então digitar o valor de 2. Clicar no campo para *upper band* e então digitar 12,5.

Ir em *outline* e clicar em inclinação. Ir em *properties* e clicar no campo para *lower band* e então digitar o valor de 10. Clicar no campo para *upper band* e então digitar 37.

Ir em *properties*. Em *design of experiments type* definir como *central composite design*. Em *design type* definir como *auto defined*.



Clicar em *optimization*.

Ir em *table* e configurar conforme a Figura A-7.1.

A	B	C	D	E	F	G	H
	P3 - Inclinação	P4 - Espessura	P1 - Total Deformation Maximum (mm)	P2 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	P5 - Total Deformation Maximum (mm)	P6 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	P7 - Volume
Optimization Study							
Objective	No Objective	No Objective	Values <= Target	Values <= Target	Values <= Target	Values <= Target	Minimize
Target Value			1	145	1	145	
Importance	Default	Default	Default	Default	Default	Default	Default

Figura A-7.1 Configuração para a otimização

Ir em *properties* e configurar conforme a Figura A-7.2.

	A	B
1	Property	Value
2	Optimization	
3	Optimization Method	Screening
4	Number of Initial Samples	10000
5	Constraint Handling (GDO)	As Hard Constraints
6	Size of Generated Sample Set	10000
7	General	
8	Cell ID	Optimization

Figura A-7.2 Configuração para a otimização