

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**PROJETO DE FORMATURA:
ANÁLISE DA PERDA DE CARGA EM VÁLVULAS
BORBOLETA DE GRANDE PORTE ATRAVÉS DA MECÂNICA
DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL**

95

Formando:

Celso Daniel Galvani Junior

Orientador:

Prof. Dr. Júlio Romano Meneghini

SÃO PAULO

1999

Agradecimentos

Muitas pessoas colaboraram na elaboração deste trabalho de formatura, à elas sou muito grato.

Agradeço ao **Prof. Dr. Júlio Romano Meneghini**, pela orientação no desenvolvimento do projeto e constante apoio para obtenção de melhores resultados.

Agradeço também ao **Engenheiro Hans Poll**, pelo incentivo na realização deste trabalho de formatura e explicações sobre o funcionamento e fabricação de válvulas borboleta.

Aos projetistas **Sérgio Marcondes, Sérgio Gomes e Celso Yacote**, pelas explicações sobre o projeto de válvulas borboleta.

A **Voith Hydro** e toda sua equipe, por permitir a realização de grande parte deste trabalho durante o estágio supervisionado.

A toda a equipe do **Laboratório de CFD da EPUSP**, pelas explicações sobre o funcionamento dos softwares **Fluent** e **Gambit**.

Agradeço aos meus pais e avós pelo apoio durante o período da faculdade.

SUMÁRIO

Resumo

1	INTRODUÇÃO	01
2	OBJETIVOS	04
3	REVISÃO DA LITERATURA	05
3.1	Equacionamento.....	05
3.1.1	Equação da conservação de massa.....	05
3.1.2	Equação da conservação da quantidade de movimento.....	05
3.1.3	Equação da conservação de espécies.....	06
3.1.4	Escoamento turbulento.....	07
3.1.4.1	Média de Reynolds das equações de conservação.....	08
3.1.4.2	Modelos de turbulência.....	09
3.2	Método dos Volumes Finitos.....	12
4	PRINCIPAIS TIPOS DE VÁLVULAS BORBOLETA	17
5	CRONOGRAMA	20
6	EQUIPAMENTOS	21
7	CONDIÇÕES DE CONTORNO	22
8	RESULTADOS	23
8.1	Chapas do obturador tipo "estrutura armada".....	23
8.1.1	Chapa nível 0.....	23
8.1.2	Chapa nível 1.....	29
8.1.3	Chapa nível 2.....	32
8.1.4	Chapa nível 3.....	35
8.2	Obturadores tipo lentilha.....	39
8.2.1	Lentilha bicôncava.....	39
8.2.2	Lentilha com um lado plano.....	43
8.3	Tratamento dos munhões para obturador tipo estrutura armada.....	46
8.3.1	Munhões sem tratamento.....	46
8.3.2	Munhões com tratamento.....	50

9 CONCLUSÕES	54
ANEXO I	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

RESUMO

Válvulas borboleta de grande porte tem sido largamente utilizadas em usinas para geração hidroelétrica de energia elétrica, uma das formas de geração mais limpas, seguras e econômicas existentes. Dentre suas funções está interromper o fluxo d'água quando da desenergização do gerador e para manutenção do conjunto turbina – gerador ou das palhetas diretrizes.

Com o objetivo de se comparar os vários tipos construtivos de válvula borboleta, suas variáveis construtivas e tratamento (usinagem) de suas superfícies para redução da perda de carga introduzida pela válvula no sistema hidráulico foram realizadas simulações de escoamentos bidimensionais ao redor de alguns modelos de válvulas borboleta.

Foi utilizado um software comercial de CFD (Fluent V) e foram obtidos para cada caso a distribuição de pressão estática, dinâmica e total e a distribuição de velocidade e vorticidade.

Para o obturador tipo biplano foram estudados os perfis das chapas que, soldados, compõe a sua estrutura básica e também a introdução de uma estrutura para redução da perda de carga na região dos munhões do obturador. Para o obturador tipo lenticilha foram estudados os dois tipos construtivos principais.

Para cada caso foram obtidos os valores do coeficiente de perda de carga singular.



1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica tem ocupado papel principal no desenvolvimento da humanidade desde sua descoberta, se tornando num item fundamental na sociedade atual e de consumo crescente.

Existe uma grande preocupação no que se diz respeito à geração de energia elétrica, seus impactos ambientais e custos envolvidos. Muitas formas de geração de energia são muito criticadas devido à sua nocividade ao meio ambiente, como usinas nucleares (que pode ser responsável por grandes catástrofes) e usinas térmicas (devido à emissão de material particulado e consumo de combustíveis fósseis). Novas tecnologias como energia solar e eólica se mostram excessivamente caras, pouco desenvolvidas e não confiáveis no que se diz respeito à sua regularidade.

As usinas hidroelétricas se mostram muito vantajosas por se utilizarem de uma fonte de energia renovável, de grande confiabilidade, baixos custos de manutenção, grande vida útil e níveis de eficiência de até 90%. Um grande volume de água é represado, formando-se um grande acumulador de energia, e então o fluxo de água é canalizado até o rotor, onde ocorre a transformação de energia hidráulica em mecânica e posteriormente elétrica no gerador.

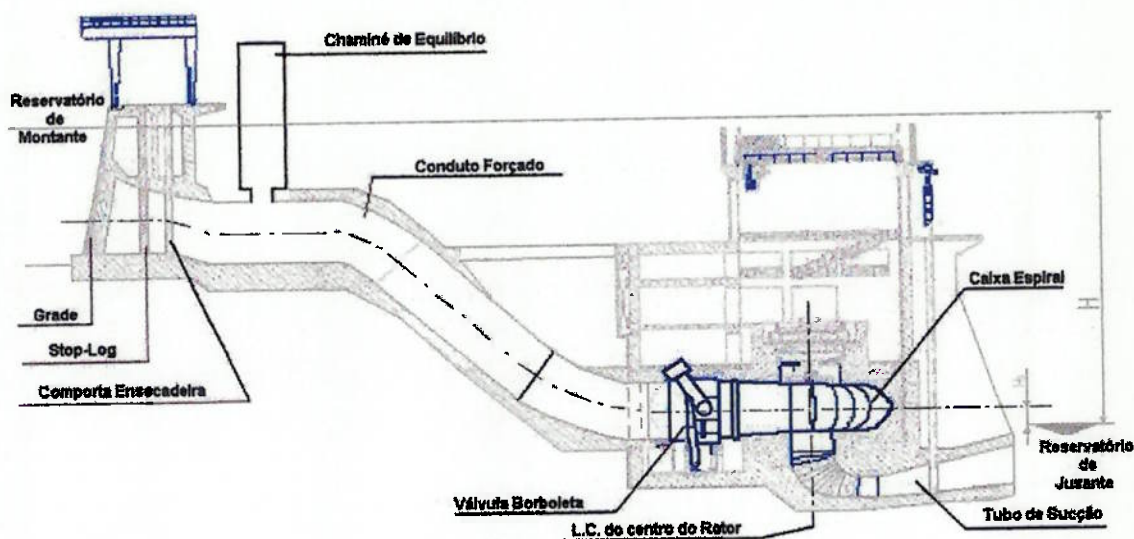


Figura 01: Instalação de uma usina hidroelétrica

Em situações de emergência, por exemplo uma queda na rede elétrica, desenergizando o gerador, o torque elétrico resistivo vai instantaneamente a zero, sendo necessária a parada do conjunto rotor + gerador, para que esse não seja acelerado a rotações muito elevadas que possam provocar ressonância do sistema.

Essa parada geralmente é feita através do fechamento das palhetas do distribuidor do rotor. Porém quando isto não é possível, seja devido á falhas no circuito hidráulico de acionamento das palhetas ou pela presença de corpos estranhos presos entre as palhetas (como um tronco de árvore), o fechamento tem que ser realizado por válvulas de segurança, que para a grande maioria das usinas em funcionamento são válvulas borboletas.



Os fabricantes de componentes hidromecânicos para usinas hidroelétricas tem hoje a sua disposição uma poderosa ferramenta de análise para estudo do comportamento de escoamento sobre esses componentes: a Mecânica dos Fluidos Computacional, que tem sido um dos principais alvos de estudos e desenvolvimento no campo da engenharia mecânica. A Mecânica dos Fluidos Computacional, principalmente através do Método dos Volumes Finitos MVF, se dedica à simulação numérica de escoamentos através das mais diversas geometrias, tendo como grande vantagem sobre ensaios práticos custo e tempo de execução dos ensaios menores, sem comprometimento de resultados.



2. OBJETIVOS

Devido à sua função de elemento de proteção reserva, as válvulas borboletas ficam abertas, posicionadas no meio da tubulação (conduto forçado) a grande maioria do tempo, antes da entrada do rotor, adicionando uma perda de carga que pode atingir valores consideráveis, diminuindo a capacidade de geração de energia elétrica.

Este estudo tem por objetivo estudar a perda de carga nos tipos mais comuns de válvulas borboleta, através de simulações numéricas de escoamentos sobre perfis bidimensionais de válvulas borboletas e/ou seus componentes separados.



3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. EQUACIONAMENTO

Fazer uma simulação numérica de um escoamento para uma dada geometria nada mais é do que resolver numericamente uma série de equações que regem o comportamento dos fluidos reais. Para escoamento laminar as equações básicas são:

3.1.1) Equação da conservação de massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot u_i) = S_m \quad (1)$$

Também conhecida como equação da continuidade, válida para escoamentos compressíveis ou não. S_m representa uma fonte que adiciona ou remove massa.

3.1.2) Equação da conservação da quantidade de movimento

A conservação da quantidade de movimento na direção x_i é representada pela seguinte fórmula:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot u_i \cdot u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho \cdot g_i + F_i \quad (2)$$

sendo,

p : pressão estática,

τ_{ij} : o tensor de tensões,

g_i : a aceleração da gravidade na direção i e

F_i : forças externas na direção i .



O tensor das tensões é dado por:

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \cdot \delta_{ij} \quad (3)$$

,sendo que o termo a extrema direita representa a dilatação volumétrica.

3.1.3) Equação da conservação das espécies

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot m_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \cdot u_i \cdot m_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}(J_{i,i}) + S_i \quad (4)$$

sendo m_i a fração de massa da espécie i' , $J_{i,i}$ o fluxo difusivo de massa da espécie i' na direção i e S_i a taxa líquida de produção da espécie i' por unidade de volume devido a reação química ou contribuição da fase dispersa.

A soma das equações de conservação para todas as espécies presentes no escoamento resulta na equação da continuidade.

O fluxo $J_{i,i}$ é composto por difusão devido à efeitos térmicos e gradiente de concentração, difusão de pressão e difusão devido à forças externas.

$$J_{i,i} = -\rho \cdot D_{i,m} \cdot \frac{\partial m_i}{\partial x_i} - D_i^T \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (5)$$

sendo $D_{i,m}$ o coeficiente de difusão para espécie i' na mistura e D_i^T o coeficiente de difusão térmica.

1.1) Equação da conservação da energia

Pode ser resolvida sendo resolvida a conservação da entalpia estática, h , definida como:



$$h = \sum_{i'} m_{i'} \cdot h_{i'} \quad (6)$$

$$h_{i'} = \int_{T_{ref}}^T c_{p,i'} \cdot dT$$

onde T_{ref} é a temperatura de referência e $c_{p,i'}$ é o calor específico a pressão constante da espécie i' .

Assumindo que a difusão de espécies devido a pressão e forças externas é insignificante, a equação então pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \cdot u_i \cdot h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{j'} h_{j'} \cdot J_{j'} + \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h \end{aligned} \quad (7)$$

onde T é a temperatura, τ_{ij} é o tensor das tensões viscosas, $J_{j'}$ é o fluxo das espécies j' , e k é a condutividade térmica da mistura. S_h é uma fonte térmica que inclui fontes de entalpia devido à reação química, radiação e troca de calor com uma segunda fase dispersa.

Há de se notar que algumas características do fluido em questão (como densidade, condutividade térmica e viscosidade) devem ser conhecidas e podem ter um valor fixo ou variável com a temperatura, por exemplo. A correta aplicação desses valores pode ter grande influência nos resultados a serem obtidos.

3.1.4) Escoamento Turbulento

Para escoamentos turbulentos, as equações de conservação das quantidades diferem daquelas para escoamento laminar a fim de descrever as flutuações turbulentas de velocidade e quantidades escalares. Vai ser



apresentado um procedimento (média no tempo) e um modelo para fechar o conjunto de equações que regem o comportamento do fluido.

3.1.4.1) Média de Reynolds das equações de conservação

Pegando como exemplo uma equação genérica de transporte para uma quantidade escalar ϕ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \cdot u_i \cdot \phi) = D_\phi + S_\phi \quad (8)$$

O valor de ϕ em um escoamento turbulento é composto de um valor médio e uma parcela flutuante: $\phi = \bar{\phi} + \phi'$, sendo a parcela média definida como:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \phi \cdot dt \quad (9)$$

Δt é uma escala de tempo de ordem superior à das flutuações turbulentas.

Flutuações turbulentas são ditas randômicas, tal que:

$$\phi' = 0$$

Aplicando-se esta técnica a equação de conservação de ϕ , chega-se ao seguinte resultado:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \cdot \bar{\phi}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \cdot \bar{u}_i \cdot \bar{\phi}) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \cdot \overline{u'_i \cdot \phi'}) + \bar{D}_\phi + \bar{S}_\phi \quad (10)$$

Desse modo as equações de conservação agora apresentam valores médios e um novo termo contendo a correlação $\overline{u'_i \cdot \phi'}$ que multiplicada pela densidade representa a "difusão" de ϕ devido à flutuações turbulentas. Essa correlação aparece nas equações de conservação de entalpia e de espécies e são modeladas usando a analogia do gradiente de transporte:



$$\begin{aligned}\rho \cdot \overline{u'_i \cdot m'_i} &= -\frac{\mu_t}{\sigma_m} \cdot \frac{\partial m_i}{\partial x_i} \\ \rho \cdot \overline{u'_i \cdot h'} &= -\frac{\mu_t}{\sigma_h} \cdot \frac{\partial h}{\partial x_i}\end{aligned}\quad (11,12)$$

Sendo que os termos σ_m e σ_h são respectivamente os números turbulentos de Schmidt e Prandtl.

A equação para conservação da quantidade de movimento para o caso turbulento terá a seguinte forma:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \cdot u_i \cdot u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right) \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho \cdot g_i + F_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \cdot \overline{u'_i \cdot u'_j})\end{aligned}\quad (13)$$

Que tem a mesma forma que a equação fundamental da conservação da quantidade de movimento, com as velocidades representando valores médios no tempo e o efeito da turbulência incorporado através das "Tensões de Reynolds", $\rho \cdot \overline{u'_i \cdot u'_j}$, que é um tensor simétrico de segunda ordem que possui seis únicos termos. A tarefa principal dos modelos de turbulência é prover equações ou modelos de fechamento que propiciem valores para essas correlações.

3.1.4.2) Modelos de turbulência

São três os principais, sendo que o modelo $k-\epsilon$ será descrito mais intensamente por ter uma faixa ampla de utilização.



A) Modelo $\kappa-\epsilon$

As tensões de Reynolds são assumidas serem proporcionais aos gradientes médios de velocidades, tendo como constante de proporcionalidade a viscosidade turbulenta, μ_t .

$$\rho \cdot \overline{u'_i \cdot u'_j} = \rho \frac{2}{3} k \cdot \delta_{ij} - \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (14)$$

sendo k a energia cinética turbulenta:

$$k = \frac{1}{2} \sum_i \overline{u_i'^2}$$

A viscosidade turbulenta é obtida assumindo-se que ela é proporcional ao produto da escala de velocidade turbulenta pela escala de comprimento, obtidos de dois parâmetros, κ e ϵ , que é a taxa de dissipação de κ . A escala da velocidade é dada pela raiz quadrada de κ e a escala de comprimento é tomada

como $\frac{\sqrt{k^3}}{\epsilon}$, logo:

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \text{ sendo } C_\mu \text{ uma constante empírica de proporcionalidade.}$$

Os valores de κ e ϵ são obtidos da solução das equações de conservação:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \cdot u_i \cdot k) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \cdot \epsilon \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \cdot u_i \cdot \epsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + \\ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + (1 - C_{3\epsilon}) G_b) - C_{2\epsilon} \rho \cdot \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (15,16)$$



onde $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ e $C_{3\epsilon}$ são constantes empíricas, σ_k e σ_ϵ são números de Prandtl que governam a difusão turbulenta de k e ϵ , G_k é a taxa de produção de energia cinética turbulenta, e G_b é geração de turbulência:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (17,18)$$
$$G_b = -g_i \cdot \frac{\mu_t}{\rho \cdot \sigma_h} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

Já as constantes tem os seus valores estipulados como sendo:

$$C_{1\epsilon}=1.44, C_{2\epsilon}=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_k=1.0 \text{ e } \sigma_\epsilon=1.3.$$

B) *Modelo Diferencial da Tensão de Reynolds (RSM)*

Um dos principais problemas do modelo $k-\epsilon$ está no fato que μ_t é isotrópico, o que implica que as escalas de velocidade e comprimento são as mesmas em todas as direções, o que pode gerar resultados não condizentes com a realidade no caso de escoamentos altamente complexos, como escoamentos altamente recirculantes.

O método RSM calcula cada uma das tensões individuais de Reynolds, o que se mostra uma melhor alternativa para casos como este.

C) *Modelo RNG $k-\epsilon$*

Este método é derivado das equações governadoras originais para escoamento de um fluido usando técnicas matemáticas chamada método da renormalização de grupo. Baseado neste fundamento matemático para modelamento do transporte turbulento, o modelo RNG oferece um modelo mais geral e fundamental e possibilita previsões melhoradas de escoamentos próximo à paredes (incluindo separação de fluxo), escoamentos com altas curvaturas,



baixos números de Reynolds e escoamento transacional, transferência de calor/massa em paredes e comportamento "vortex-shedding".

Porém este modelo não se aplica bem a casos onde existam forças rotacionais, onde deve ser aplicado o método RSM.

A escolha correta do modelo de turbulência a ser utilizado pode ter um grande efeito nos resultados obtidos, podendo se levar desde resultados coerentes e satisfatórios a resultados totalmente distorcidos e não condizentes com a realidade.

3.2. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS (MVF)

O MVF foi desenvolvido principalmente para análise de problemas de Mecânica dos Fluidos Computacional e nele, as equações aproximadas são obtidas através de balanços de conservação da propriedade envolvida (seja ela massa, quantidade de movimento, entalpia, etc..) no volume elementar. Uma das grandes evoluções que o MVF introduziu foi a utilização de sistemas de coordenadas generalizados coincidentes com a fronteira do domínio, o que possibilitou a resolução de problemas de fluidos em geometrias irregulares.

O fato das equações aproximadas representarem a conservação em nível de volumes elementares vem do fato que a solução da equação diferencial (por exemplo: Equação de Navier-Stokes) representa a conservação da propriedade em nível de ponto (infinitesimal).

Outra vantagem do MVF é que como os balanços de conservação são satisfeitos em nível de volumes elementares, para qualquer tamanho de malha, por mais grosseira que ela for, os princípios de conservação podem ser checados.



A técnica se divide em três principais passos:

- Divisão do domínio contínuo em volumes de controle discretos através de uma malha;
- Integrar as equações aproximadas para cada volume de controle individual para se construir as equações algébricas para as variáveis desconhecidas;
- Resolver numericamente as equações algébricas.

A técnica dos volumes de controle consiste de integrar as equações diferenciais nos volumes elementares, levando-se a equações de diferenças finitas que conservam as quantidades (movimento, massa, etc...) numa base de volume de controle.

Os volumes de controle são definidos usando-se um esquema de armazenamento como mostrado na figura abaixo. Desse modo todas as variáveis são armazenadas no centro da célula do volume de controle, e o mesmo volume de controle é utilizado para integração de todas equações de conservação.

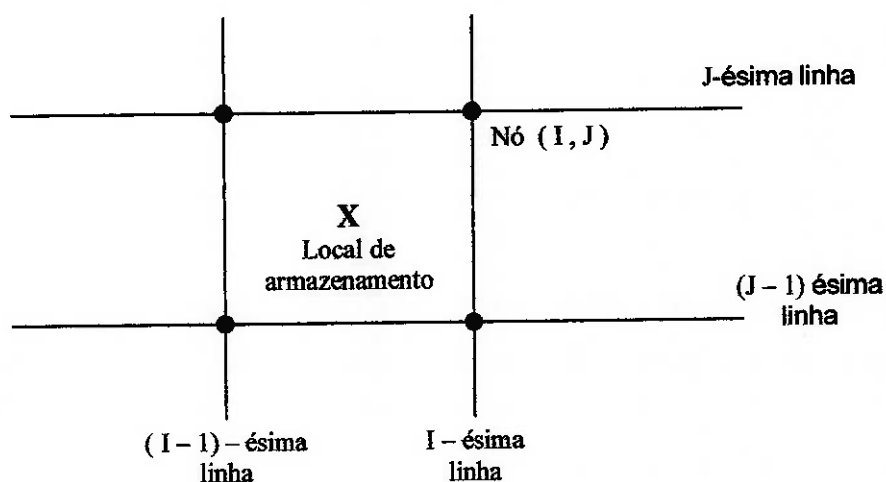


Figura 02: Esquema de armazenamento no volume de controle



A integração das equações diferenciais será mostrada para um conjunto de equações unidimensional, sendo que estas podem facilmente serem estendidas para o caso bidimensional ou tridimensional. Sejam as equações diferenciais para continuidade, quantidade de momento e quantidade escalar ϕ :

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u \cdot u) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + F, \quad (19, 20, 21) \\ \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u \cdot \phi) &= \frac{\partial}{\partial x} \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} + S_\phi\end{aligned}$$

Essas equações podem ser integradas no volume em relação ao volume de controle empregando o Teorema da Divergência:

$$\int_{\text{volume}, V} \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u) dV = \int_A \rho \cdot u \cdot dA \quad (22)$$

A integração das equações 19, 20 e 21 nos dá os seguintes resultados:

$$\begin{aligned}J_e - J_w &= 0 \\ J_e \cdot u_e - J_w \cdot u_w &= -(p_e - p_w)A + \left[\frac{\mu_e}{\Delta x_e} (\mu_E - \mu_P) - \frac{\mu_w}{\Delta x_w} (\mu_P - \mu_W) \right] A + S_\phi \cdot \Delta V, \quad (23, 24, 25) \\ J_e \cdot \phi_e - J_w \cdot \phi_w &= \left(\Gamma_e \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x_e} - \Gamma_w \frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x_w} \right) A + S_\phi \cdot \Delta V\end{aligned}$$

As equações 23, 24 e 25 obtidas são equações algébricas que podem ser resolvidas dado que as variáveis indeterminadas (u , p e ϕ) são interpoladas de uma maneira que relaciona seus valores nas faces do volume de controle aos valores no centro do volume de controle. O procedimento de discretização se baseia no esquema ilustrado na figura abaixo.

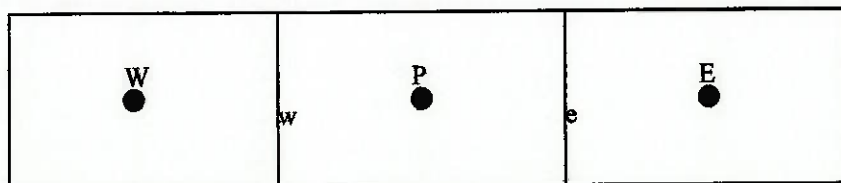


Figura 03: Esquema dos volumes de controle para discretização.

A solução das equações expressas acima requer: o cálculo da pressão nas faces do volume de controle (p_e , p_w), que se determine o fluxo nas faces (J_e , J_w), e a interpolação para relacionar os valores nas faces com os valores das incógnitas (u e ϕ) com os valores nos centros dos volumes de controle.

O fluxo nas faces são obtidos de tal forma que as velocidades na face obedecem um balanço médio do momento. Já as pressões nas faces são obtidas de tal forma que as velocidades armazenadas no centro da células obedece o balanço de massa.

Existem vários métodos de interpolação para se calcular os valores das incógnitas nas faces, sendo que abaixo será descrito o método Power Law, um dos métodos utilizados pelo FLUENT 4.4.

Método Power Law : o valor na face de uma variável, ϕ , é interpolado usando a exata solução de uma equação unidimensional convectiva-difusiva, que descreve o fluxo de ϕ como:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u \cdot \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (26)$$

sendo Γ e ρu constantes durante o intervalo dx . Integrando-se a equação acima, chega-se a seguinte relação entre ϕ e x :



$$\frac{\phi(x) - \phi_0}{\phi_L - \phi_0} = \frac{\exp\left(Pe \cdot \frac{x}{L}\right) - 1}{\exp(Pe) - 1} \quad (27)$$

onde:

$$\phi_0 = \phi \text{ p/ } x = 0,$$

$$\phi_L = \phi \text{ p/ } x = L,$$

e Pe é o número de Peclet, dado por:

$$Pe = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\Gamma} \quad (28)$$

Após a aproximação numérica, chega-se a uma matriz de coeficientes que geralmente apresenta alto índice de esparsidade, torna-se então fundamental escolher apropriadamente o método de solução do sistema linear, para que essa solução não leve um tempo exagerado. Quando se utilizam malhas não estruturadas, como no caso em questão, cada volume pode ter um número diferente de vizinhos, o que origina matrizes com uma banda diagonal variável, e não matrizes tri, penta ou heptadiagonais quando se utilizam malhas estruturadas. Isto torna os métodos de solução para sistemas lineares mais elaborados.



4. PRINCIPAIS TIPOS DE VÁLVULAS BORBOLETAS

Existem três principais concepções de obturadores para válvulas borboletas que serão abordados neste estudo, todos utilizados para alturas de queda abaixo de 250m.c.a. , a partir de onde se utilizam válvulas esféricas, de alto custo.

A) Concepção "Chapão"

Consiste basicamente de uma simples chapa com eixos presos às extremidades que se caracteriza pela facilidade e baixo custo de fabricação. Geralmente só é utilizada em aplicações de baixa pressão, pois para altas pressões a espessura necessária da chapa geralmente acarreta em uma perda de carga geralmente muito alta. Além disso, espessuras de chapa muito grandes não são padronizadas, o que pode implicar em custos elevados.

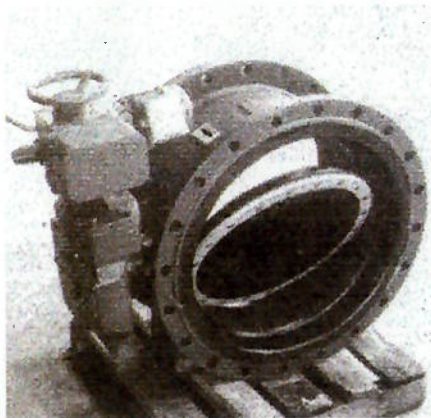


Figura 04: Obturador tipo "chapão"



B) Conceção Lentilha

A concepção em lentilha difere do “chapão” por apresentar um perfil mais favorável ao fluxo d’água, introduzindo uma perda de carga menor ao sistema. Geralmente é feita fundida ou por chapas soldadas e é oca no seu interior para redução de peso.

b.1) Lentilha com ambas as faces côncavas

A primeira concepção de lentilha a ser utilizada, assim como o “chapão” apresenta um problema de vedação na região onde se encontra o eixo.



Figura 05: Obturador Lentilha bicôncavo

b.2) Lentilha com uma face plana

Esta concepção se caracteriza por possuir os eixos fora do plano de vedação da válvula, apresentando uma vedação mais eficiente que o outro modelo de obturador lentilha.



Figura 06: Obturador Lentilha com uma face plana



C) Concepção Estrutura Vazada

Esta concepção, também conhecida como biplano, tem sido a mais utilizada para instalações hidroelétricas, principalmente para utilizações com alturas de queda mais elevadas, devido a sua baixa perda de carga devido à sua geometria composta de várias barras não espessas. Também apresentam eixos fora do plano de vedação, o que os torna muito eficientes no que diz respeito a vedação.

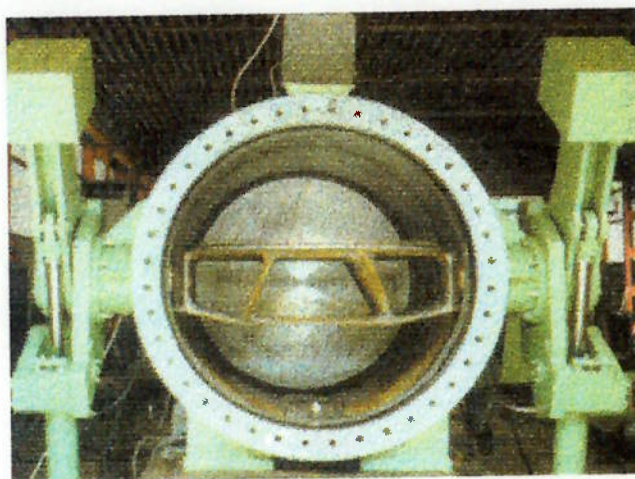


Figura 07: Obturador tipo Estrutura Vazada



5. CRONOGRAMA

O cronograma das atividades desenvolvidas pelo aluno e as atividades previstas se encontra abaixo com alguns dos dead lines mais importantes.

- Março de 1999: levantamento bibliográfico sobre método dos volumes finitos e mecânica dos fluidos computacional;
- Abril de 1999: levantamento bibliográfico sobre instalações hidroelétricas e válvulas borboleta;
- 30 de Abril de 1999: entrega do primeiro relatório ao professor orientador;
- Maio de 1999: determinação de geometrias a se estudar e condições de contorno;
- Junho de 1999: geração de malhas não estruturadas de acordo com as geometrias propostas.
- 8 de Junho de 1999:- entrega do primeiro relatório ao professor orientador.
- 28/29 de Junho de 1999:- apresentação da primeira parte do trabalho perante banca examinadora.
- Agosto de 1999:- Geração de malhas não estruturadas.
- Setembro/Outubro de 1999:- Simulações numéricas utilizando o Fluent V.
- Novembro de 1999:- Elaboração do relatório final com considerações finais e apresentação perante banca examinadora.
- 06 a 08 de Dezembro de 1999:- Apresentação do trabalho final perante banca examinadora.



6. EQUIPAMENTOS

Os estudos serão realizados no Laboratório de Mecânica dos Fluidos Computacional do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, sobre coordenação do Prof. Dr. Júlio Romano Meneghini.

Para realização das experiências serão utilizados:

- SPARCstation 4, da SUN Microsystems, com sistema operacional UNIX System V Release 4.0 e ambiente gráfico Solaris 3.4 (SunOS 5.4);
- SPARCstation 5, da SUN Microsystems, com sistema operacional UNIX System V Release 4.0 e ambiente gráfico Solaris 3.4 (SunOS 5.4);
- SPARCstation 20, da SUN Microsystems, com sistema operacional UNIX System V Release 4.0 e ambiente gráfico Solaris 3.4 (SunOS 5.4);
- Alpha Station 600 5/266, da DEC, Digital Equipment Corporation, com sistema operacional Digital UNIX v3.2C.
- Alpha Station 255 4/266, da DEC, Digital Equipment Corporation, com sistema operacional Digital UNIX v4.0C.
- o Software FLUENT/UNS versão V que se utiliza do método dos volumes finitos para solução de problemas de mecânica dos fluidos;
- o Software Gambit, um gerador de malhas não estruturadas bidimensionais e tridimensionais, para as mais diversas geometrias.



7. CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para o problema em questão foi escolhida a seguinte geometria para que fosse garantido que o escoamento fosse totalmente desenvolvido:

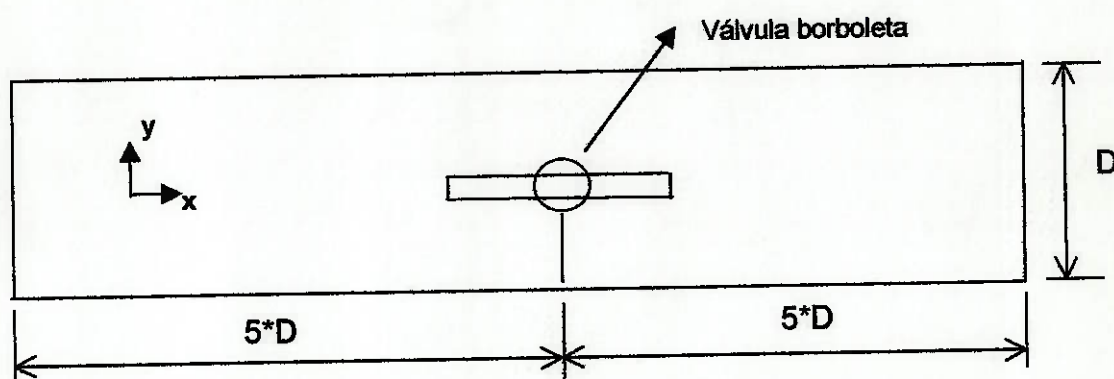


Figura 08: Geometria do problema

Como condições de contorno para realização das simulações foi aplicada velocidade nula (componentes x e y) nas paredes da tubulação e em todas as faces do obturador e/ou seus componentes, considerou-se também na seção de entrada uma velocidade na direção x de 4 m/s e nula na direção y . Foi escolhido como fluido água líquida, o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ RNG.

Todas as simulações foram em regime transitório com step-times de 0.1s, com número máximo de 20 divisões por step-time e tempo total de simulação de 500s.



8. RESULTADOS

Utilizando-se o software de geração de malhas GAMBIT, foram geradas malhas e simulados escoamentos bidimensionais para algumas das geometrias a serem estudadas, começando-se pelas geometrias mais simples. Abaixo se encontram as malhas geradas para cada um dos casos estudados e os resultados obtidos, como figuras das distribuições de velocidade, vorticidade, pressão estática, dinâmica e total. Para cada caso foi também calculado o coeficiente de perda de carga singular. O método para se calcular o coeficiente de perda de carga singular se encontra no ANEXO I.

8.1 Chapas do obturador tipo "estrutura armada"

As primeiras malhas geradas foram para o estudo da influência do "nível" de tratamento (usinagem) das chapas que formam a estrutura armada do obturador tipo biplano. Em todos os casos as chapas foram calculadas para o caso de uma válvula de 2800mm de diâmetro nominal e uma pressão de cálculo de 138 metros de coluna d'água.

8.1.1 Chapa nível 0

O "nível 0" corresponde a chapa sem nenhum tratamento para diminuição da perda de carga, a malha obtida se encontra abaixo. Possui 26978 nós e 53400 elementos.



Figura 09: malha obtida para chapa "nível 0"

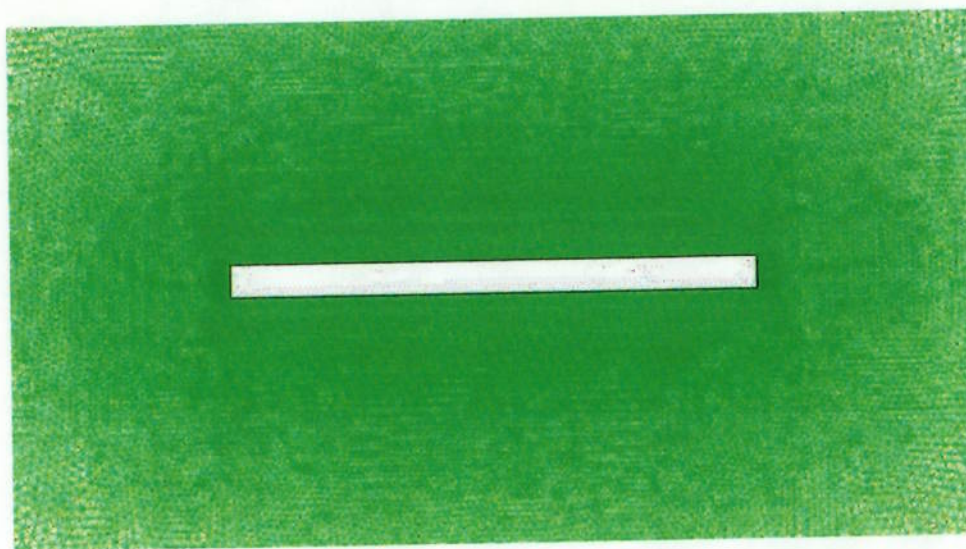


Figura 10:- zoom da malha ao redor da chapa "nível 0"

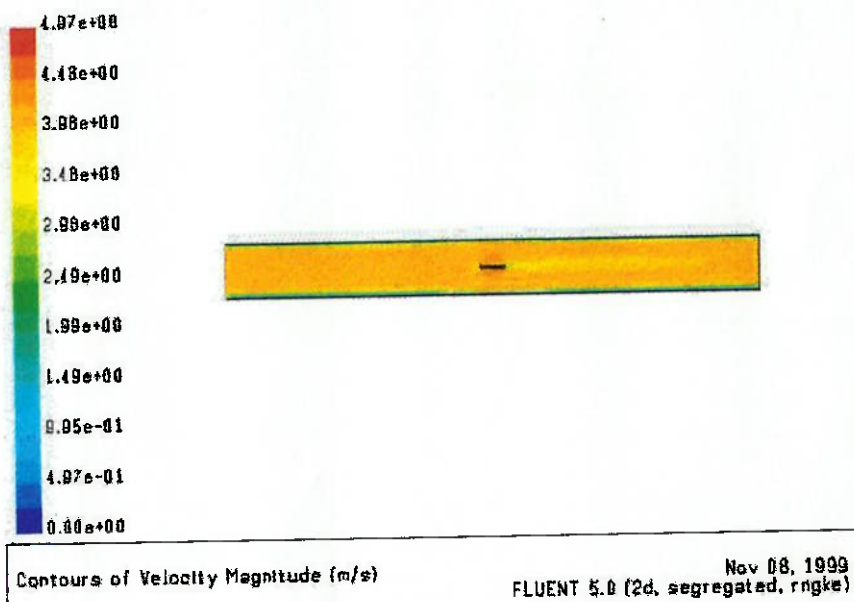


Figura 11: Distribuição de velocidades

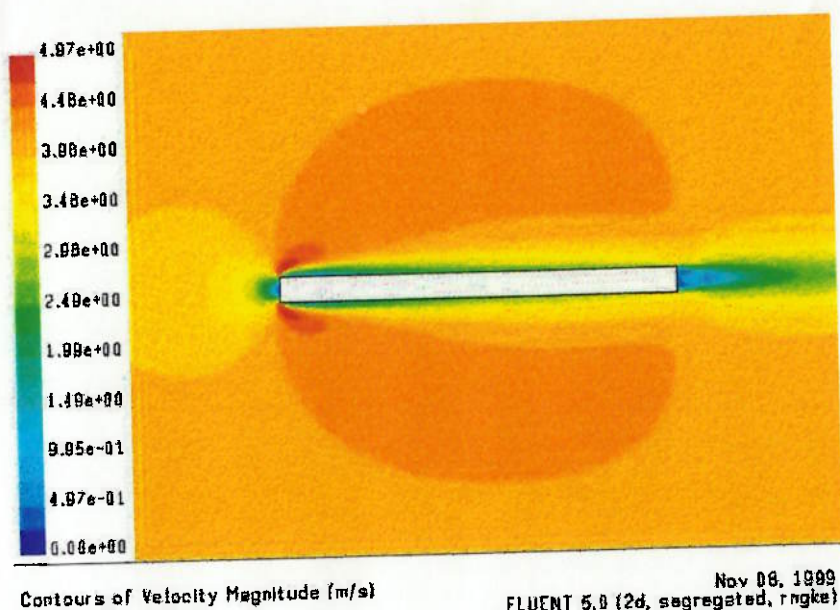


Figura 12: zoom da distribuição de velocidades

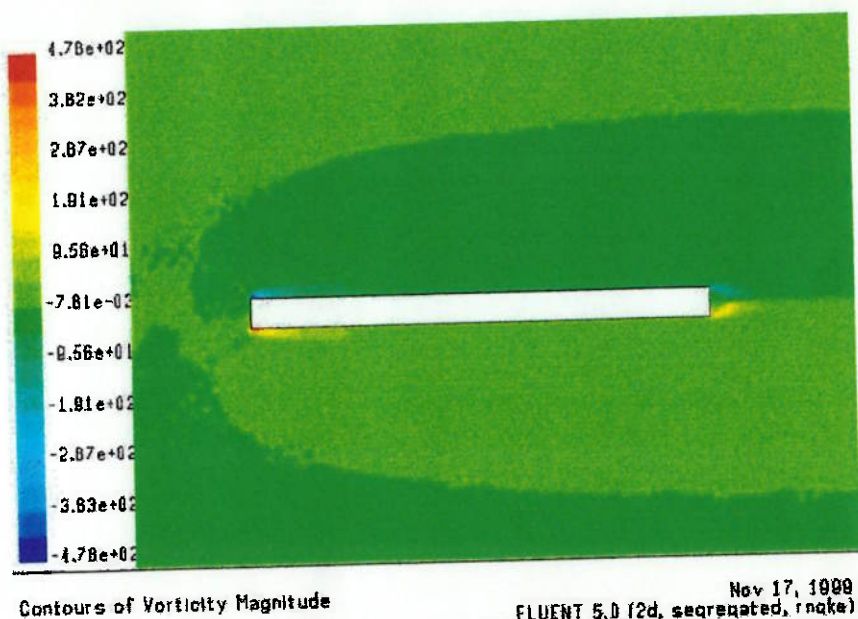


Figura 13: Distribuição da magnitude da vorticidade

As figuras acima mostram um pico de velocidade de, aproximadamente 5m/s no canto vivo frontal da chapa, onde também ocorreu uma concentração do valor da vorticidade, com magnitude de 478.

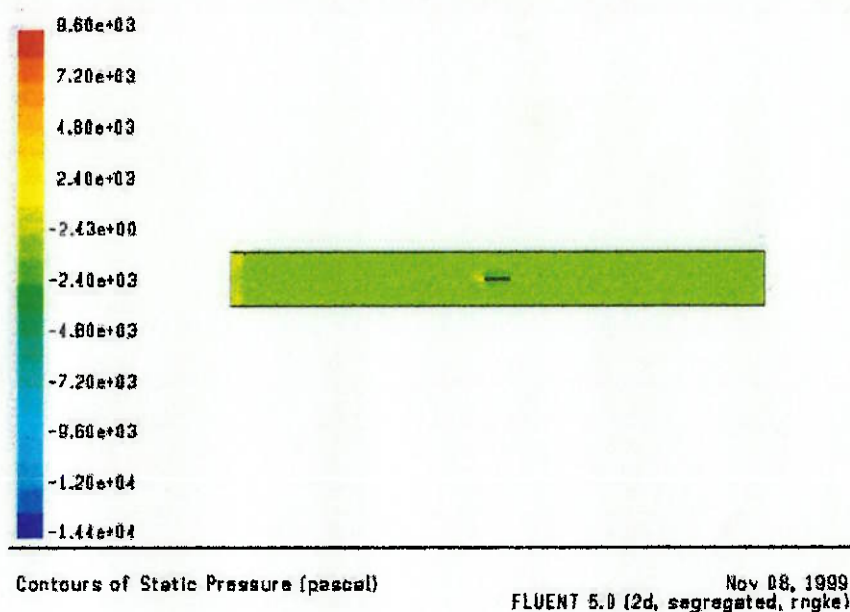


Figura 14: Distribuição de pressão estática

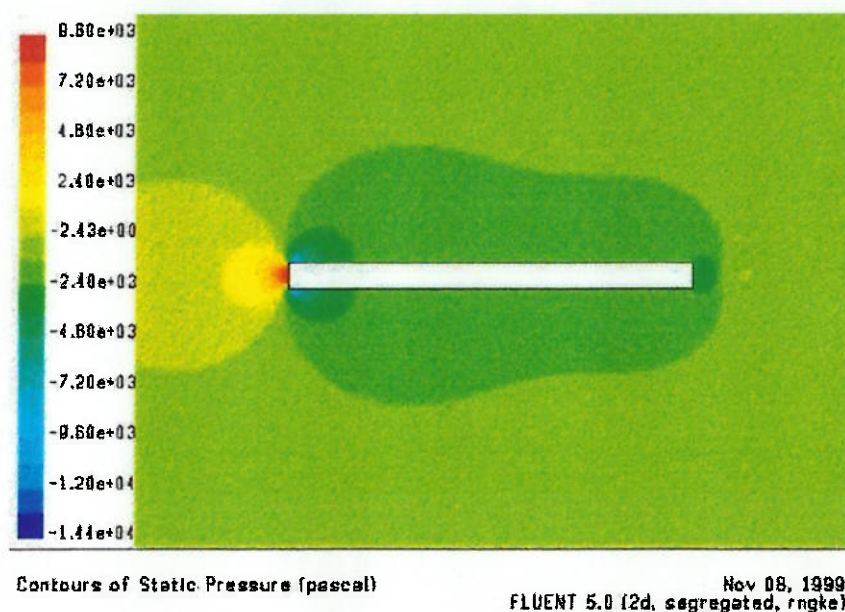


Figura 15: Zoom da distribuição de pressão estática

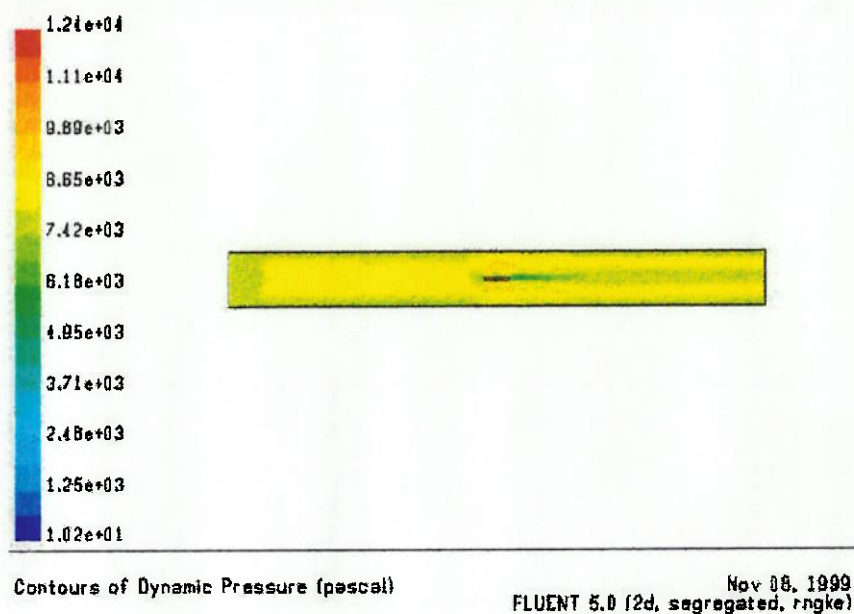


Figura 16: Distribuição de pressão dinâmica

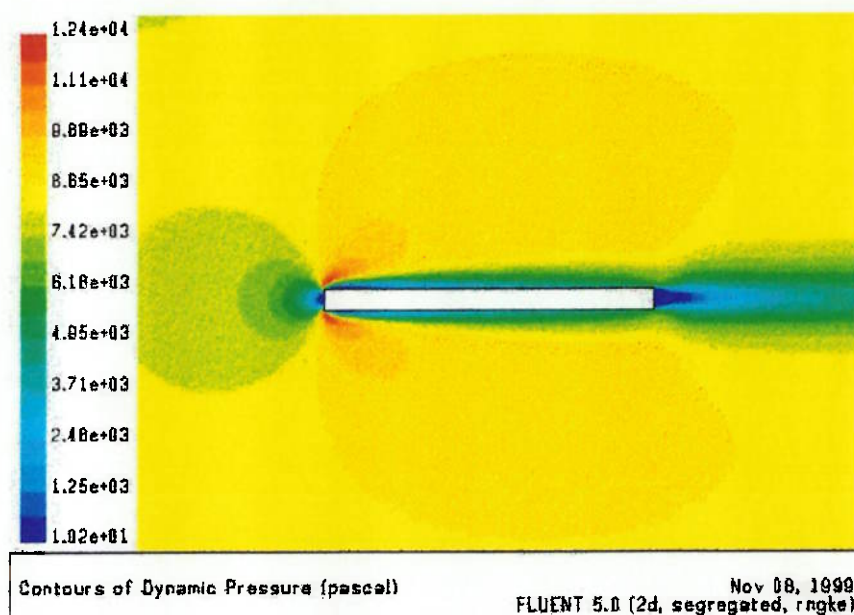


Figura 17: Zoom da distribuição de pressão dinâmica

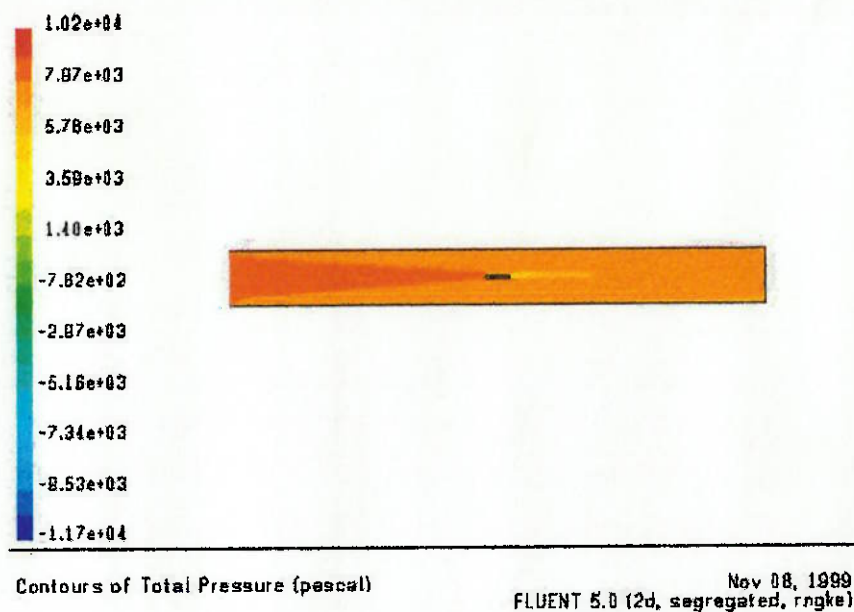


Figura 18: Pressão total

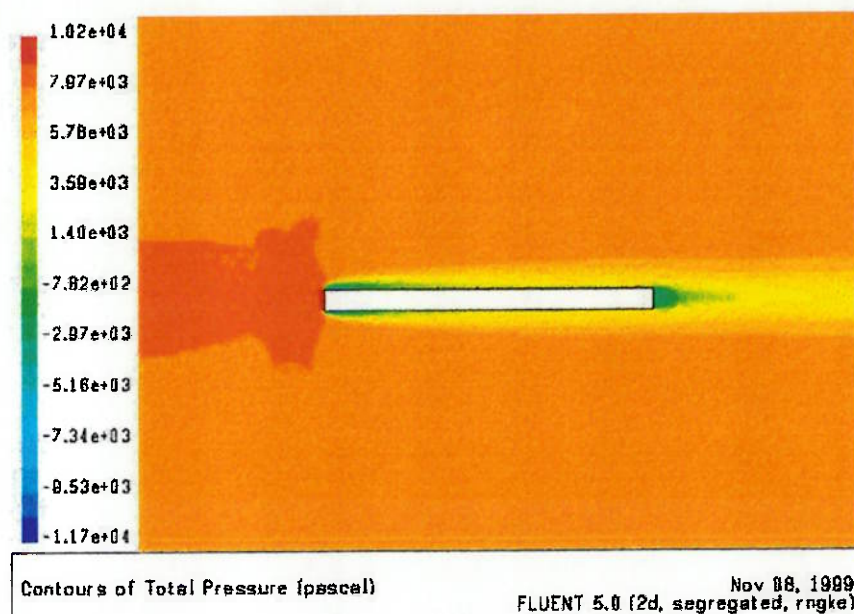


Figura 19: Zoom da distribuição de pressão total

Para esta configuração de chapa para o obturador estrutura armada o valor do coeficiente de perda de carga singular (K_s) foi calculado como sendo 0.084.



8.1.2 Chapa nível 1

Já o “nível 1” é caracterizado por chanfros nas chapas com ângulos grandes (45°), para redução da perda de carga, a malha, com 33603 nós e 66266 elementos, ao redor da chapa se encontra abaixo:

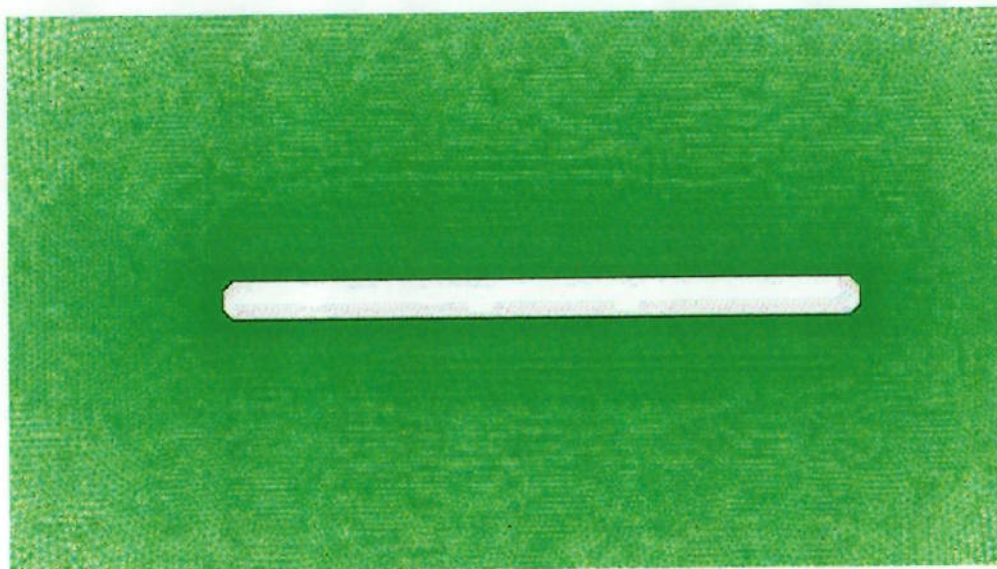


Figura 20: malha próxima à chapa “nível 1”

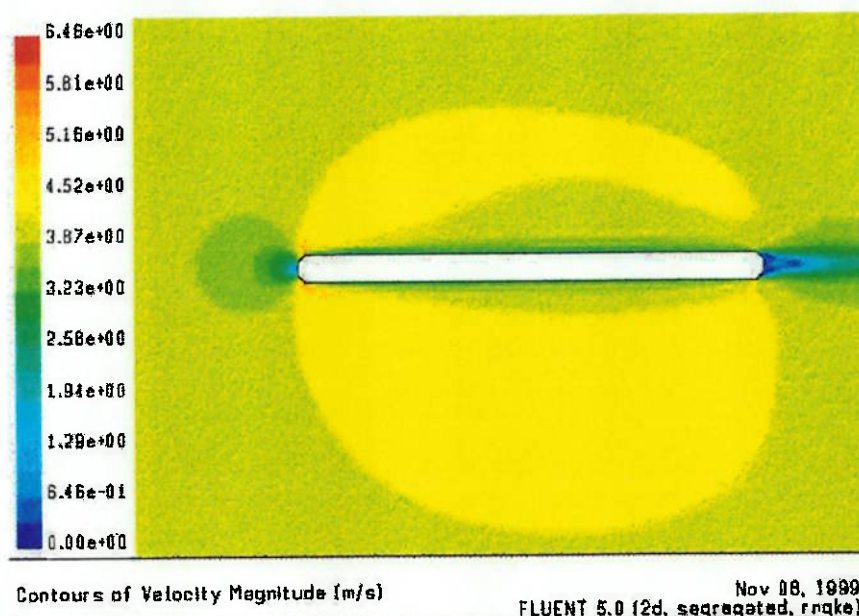


Figura 21: Distribuição de velocidade

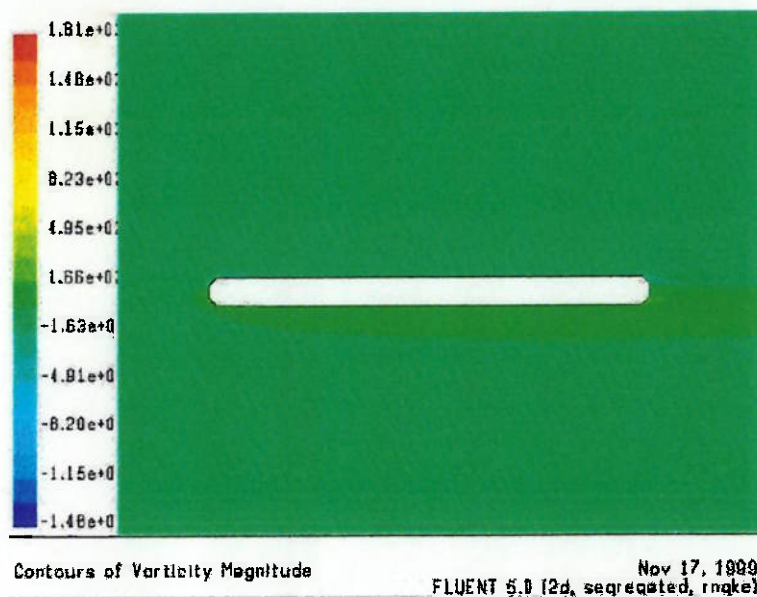


Figura 22: Magnitude da vorticidade

O valor da velocidade chegou a 6.46m/s, um valor maior do que para a chapa sem tratamento que pode aumentar a possibilidade de ocorrer cavitação. Porém esse valor de velocidade se distribuiu por uma faixa bem menor. O valor máximo de vorticidade, de 1810 se mostrou muito alto, porém somente na camada limite, numa região muito pequena, apresentando valores baixos em geral.

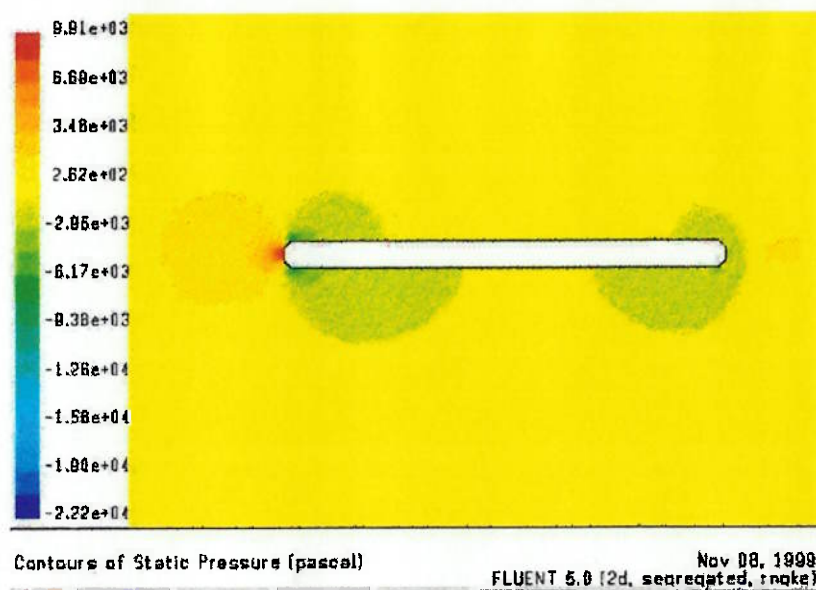


Figura 23: Pressão estática

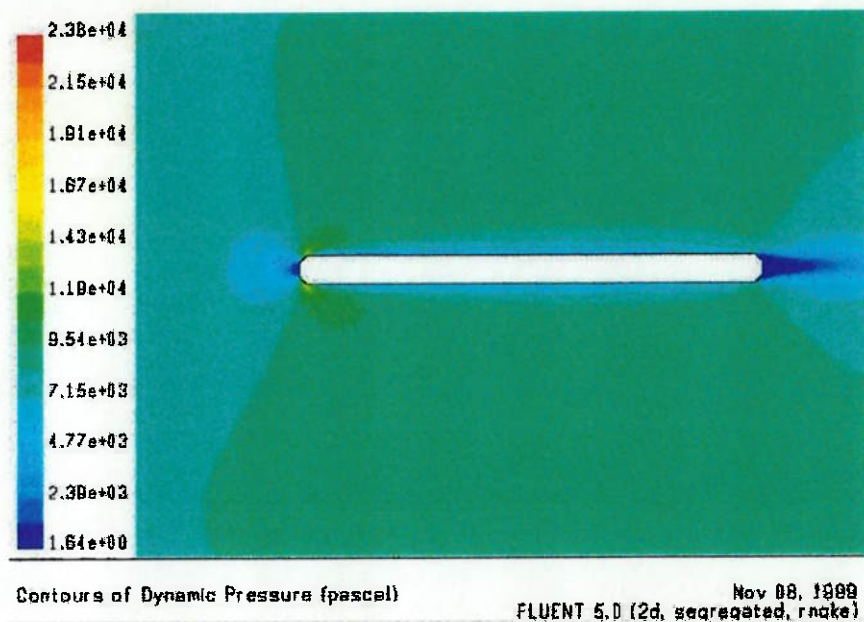


Figura 24: Pressão dinâmica

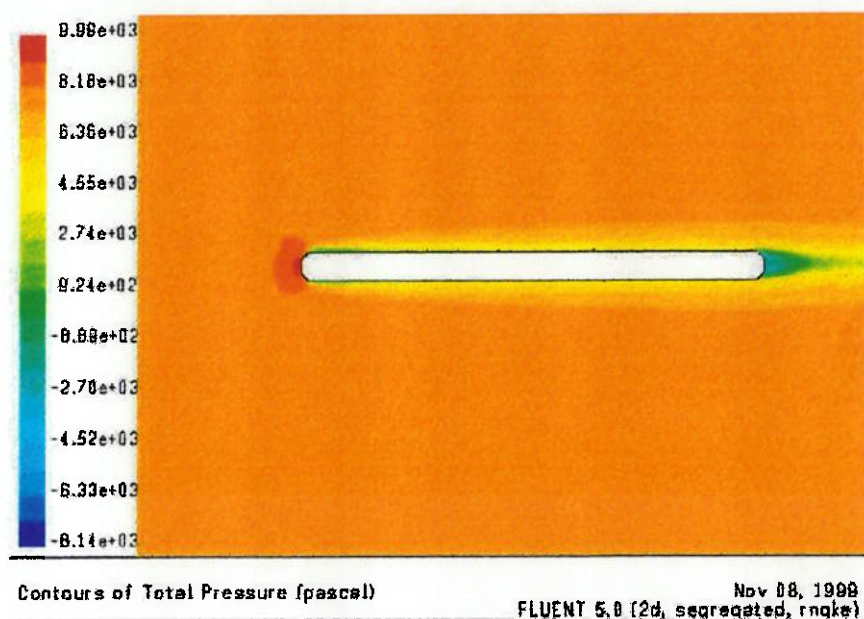


Figura 25: Pressão total

Para esta configuração de chapa para o obturador estrutura armada o valor do coeficiente de perda de carga singular (K_s) foi calculado como sendo 0.05, 40.5% menor do que o valor apresentado pela chapa sem tratamento algum.



8.1.3 Chapa nível 2

No “nível 2” os chanfros possuem ângulos menores (30°), o que significa um maior tempo de usinagem e consequentemente maiores custos de fabricação; um zoom da malha se encontra na figura abaixo. Esta malha possui 34437 nós e 67914 elementos.

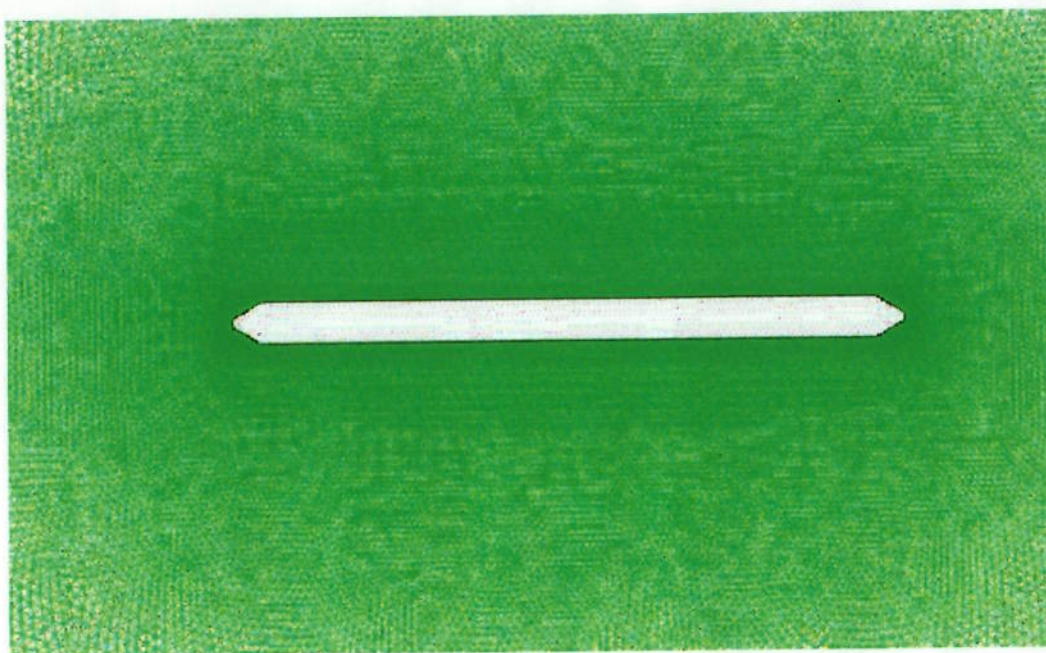


Figura 26: zoom da malha para chapa “nível 2”

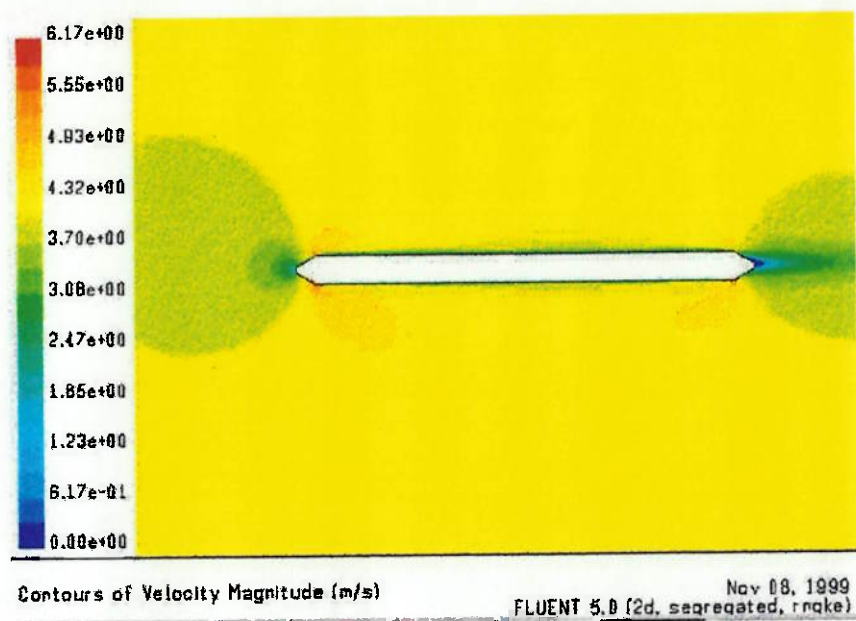


Figura 27: Distribuição de velocidade

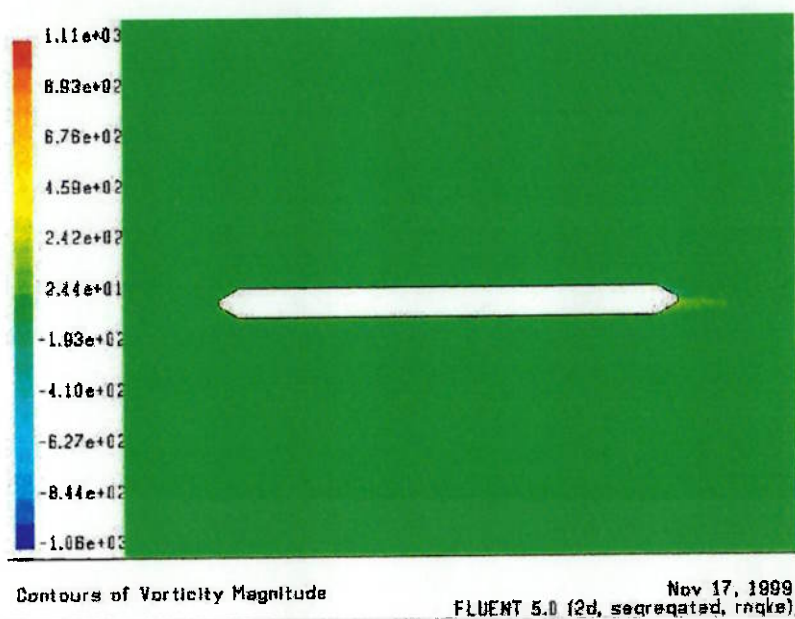


Figura 28: Magnitude de vorticidade

O pico de velocidade foi de 6.17m/s e o de vorticidade de 1110, mais uma vez não sendo notável na figura mostrando a sua distribuição ao redor do perfil da chapa.

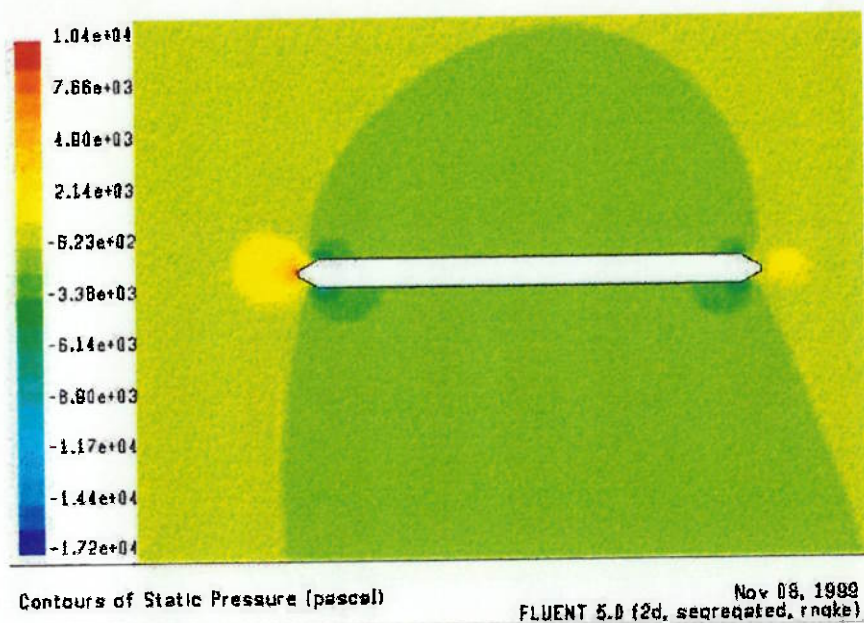


Figura 29: Pressão estática

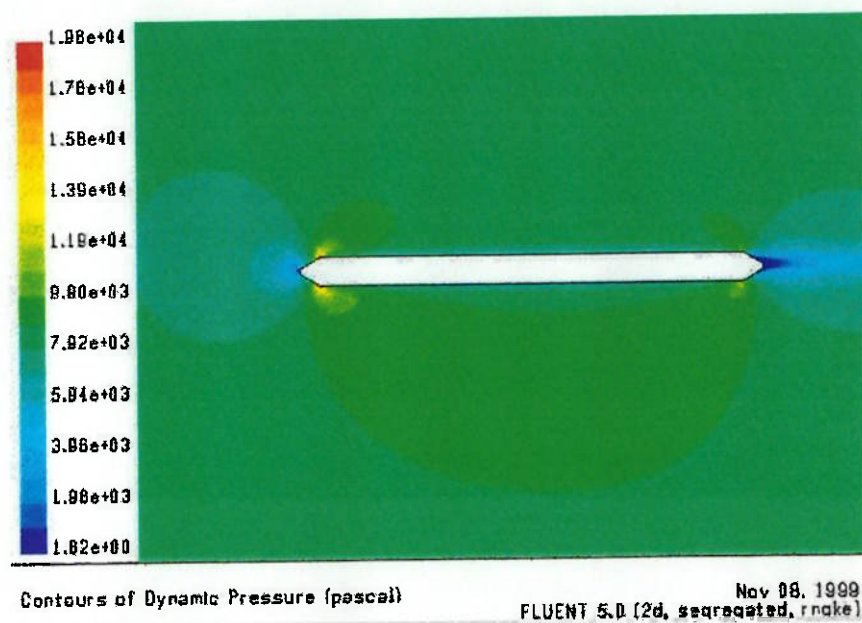


Figura 30: Pressão dinâmica

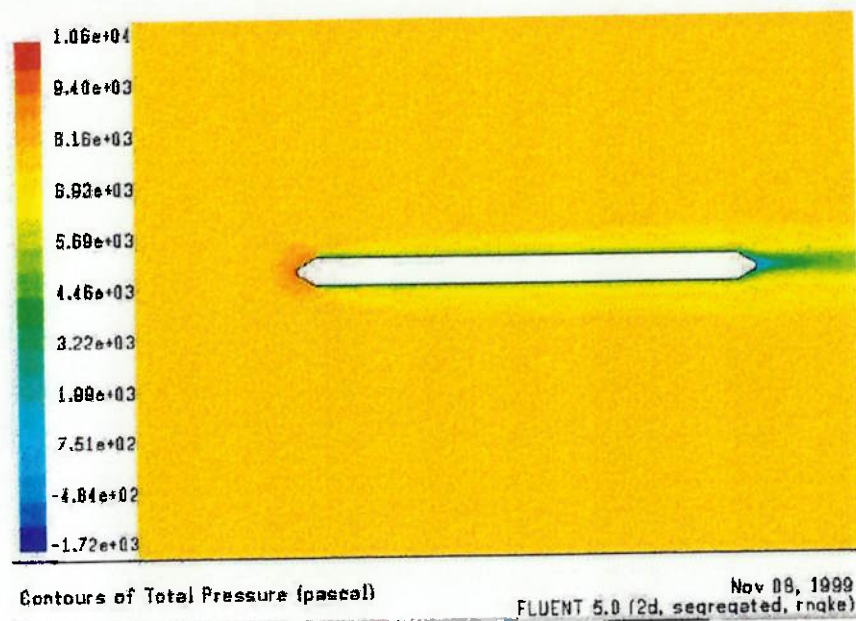


Figura 31: Pressão total

Para esta configuração de chapa o valor do coeficiente de perda de carga singular (K_s) foi calculado como sendo 0.035, um valor 58.3% menor do que o calculado para a chapa "nível 0".

8.1.4 Chapa nível 3

A figura do zoom para uma chapa "nível 3" se encontra abaixo, ela se caracteriza por ângulos bem reduzidos de chanfragem (da ordem de 15°) e arredondamento de cantos a fim de se chegar a um valor bem reduzido da perda de carga. Vale ressaltar que esta opção de fabricação apresenta altos custos de fabricação. A malha possui 35605 nós e 70210 elementos.

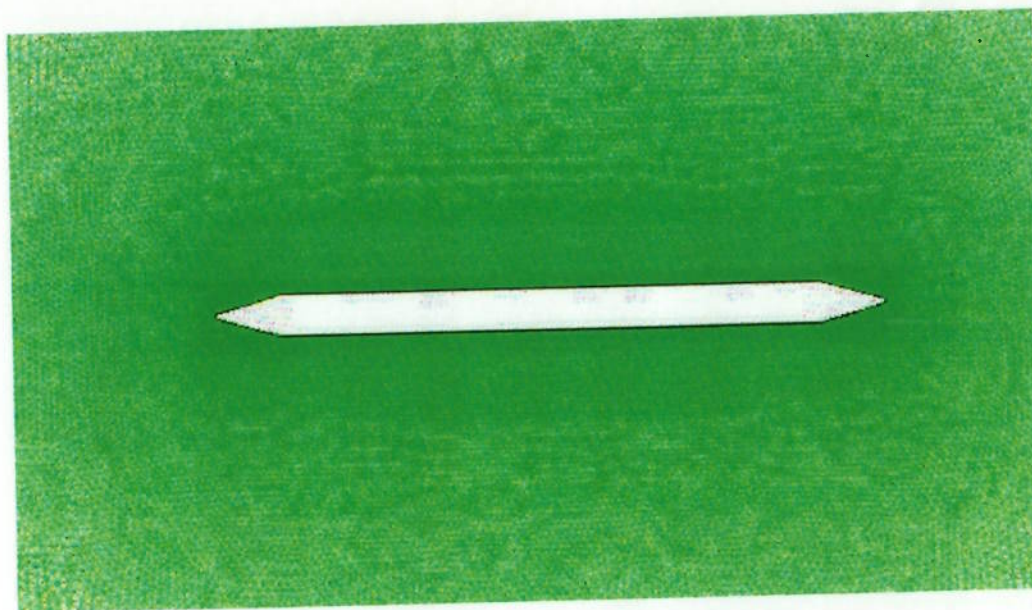


Figura 32: distribuição da malha próxima à chapa "nível 3"

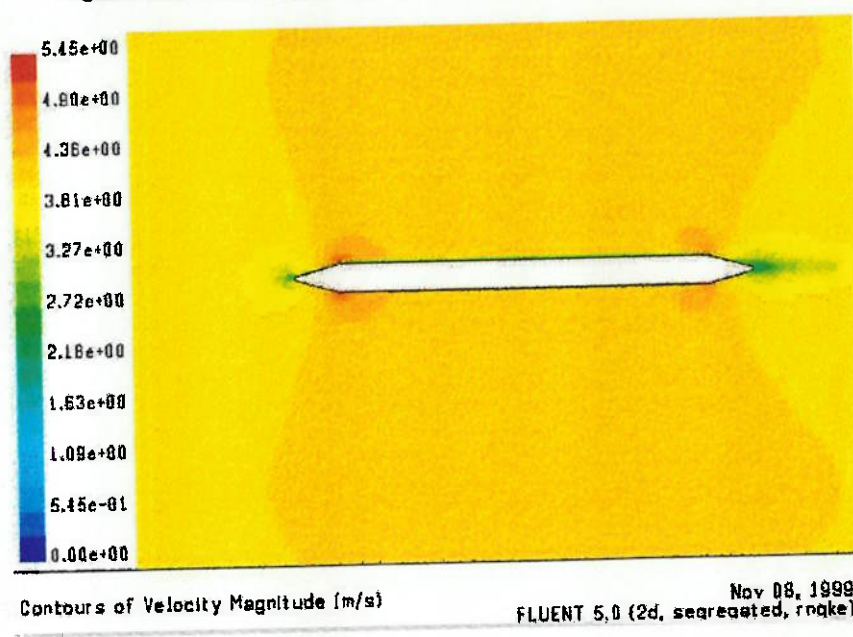


Figura 33: Distribuição de velocidade

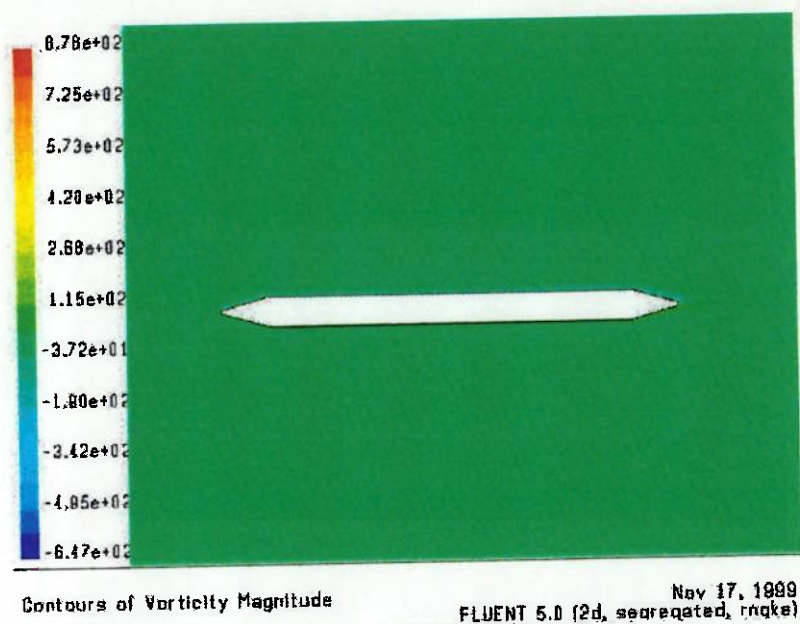


Figura 34: Vorticidade

A velocidade máxima ao redor do perfil desta chapa foi de 5.45, com o pico de vorticidade sendo de 878, também sendo numa região muito pequena na camada limite.

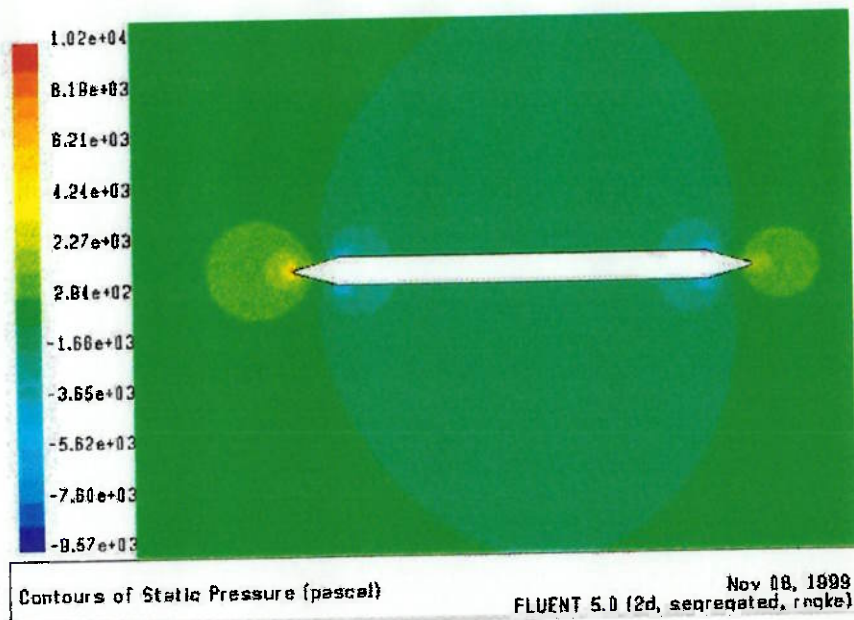


Figura 35: Pressão estática

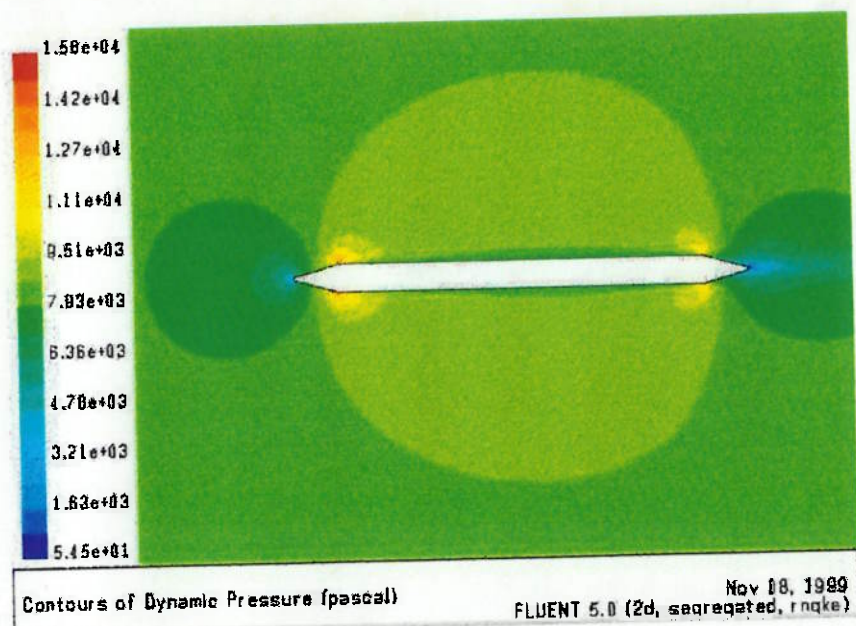


Figura 36: Pressão dinâmica

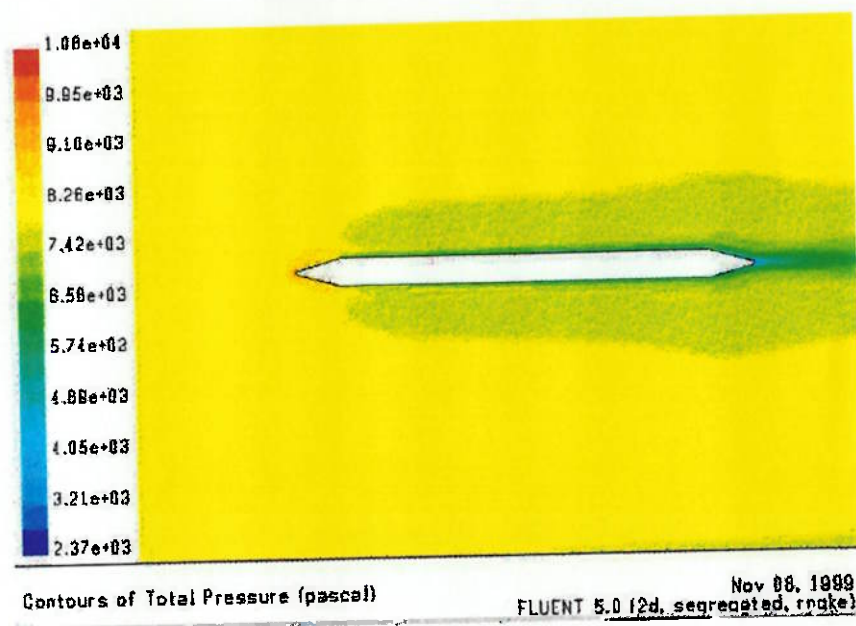


Figura 37: Pressão total

Para esta configuração de chapa para o obturador estrutura armada o valor do coeficiente de perda de carga singular (K_s) foi calculado como sendo 0.0225, ou seja, 73.2% menor que o valor calculado para a chapa "nível 0".



8.2 Obturadores tipo lentilha

O próximo passo consiste em comparar os dois tipos construtivos de obturador tipo lentilha, ambos foram calculados para as mesmas condições das descritas acima para chapas do obturador biplano. As malhas se encontram abaixo, juntamente com os resultados.

8.2.1 Lentilha bicôncava

A malha encontrada para a lentilha bicôncava, que se encontra abaixo, apresenta 18067 nós e 35410 elementos. Os resultados obtidos para esse tipo de obturador também se encontram abaixo.

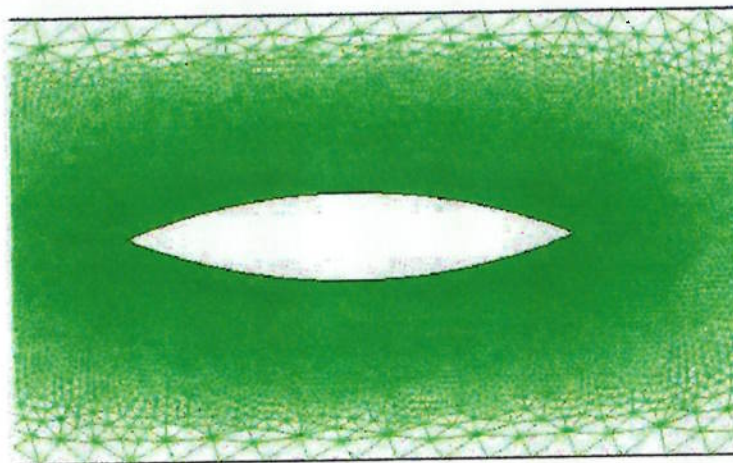


Figura 38: detalhe da malha ao redor do obturador lentilha bicôncava

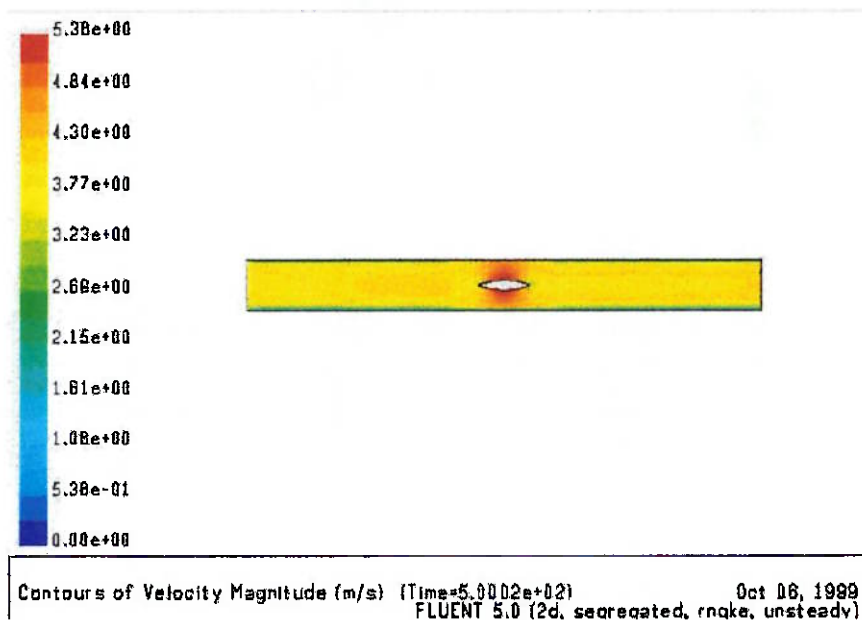


Figura 39: Distribuição de velocidade

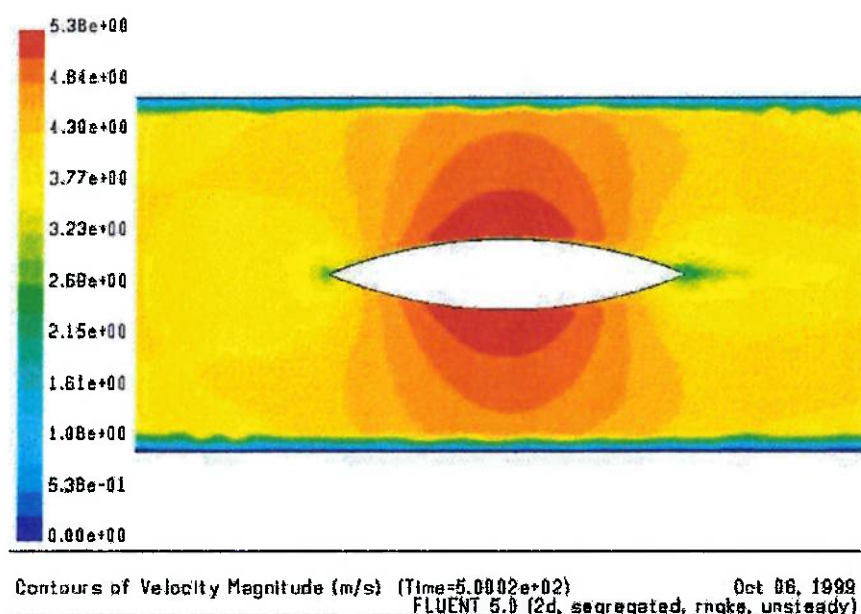


figura 40: Zoom da distribuição de velocidade

A velocidade chegou a um valor de 5.38m/s na seção central da lentilha, devido à diminuição da área de passagem de fluxo, com um perfil simétrico de distribuição de velocidade.

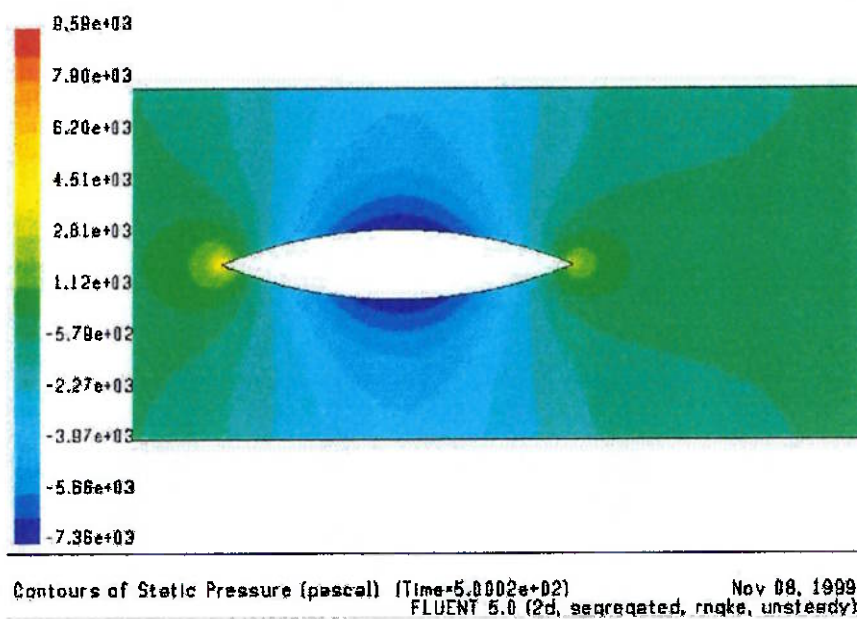


Figura 41: Pressão estática

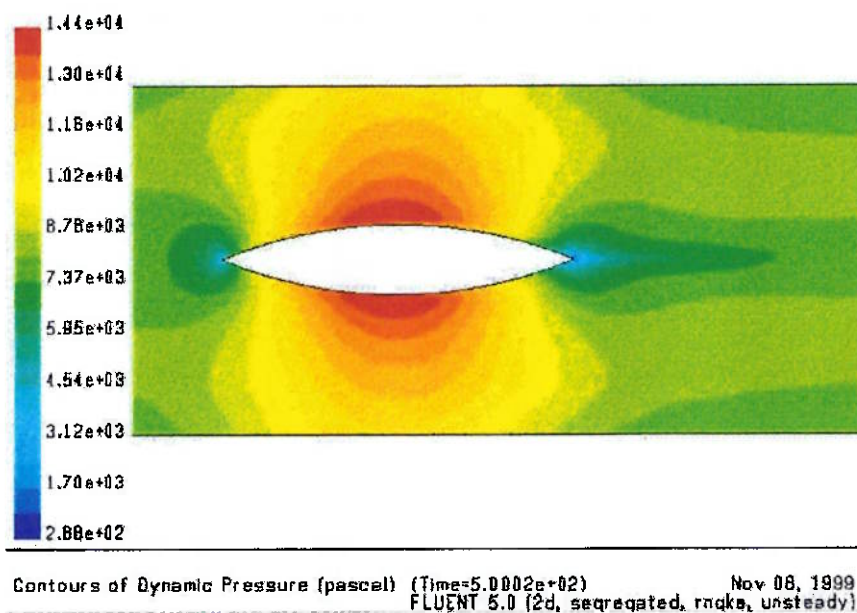


Figura 42: Pressão dinâmica

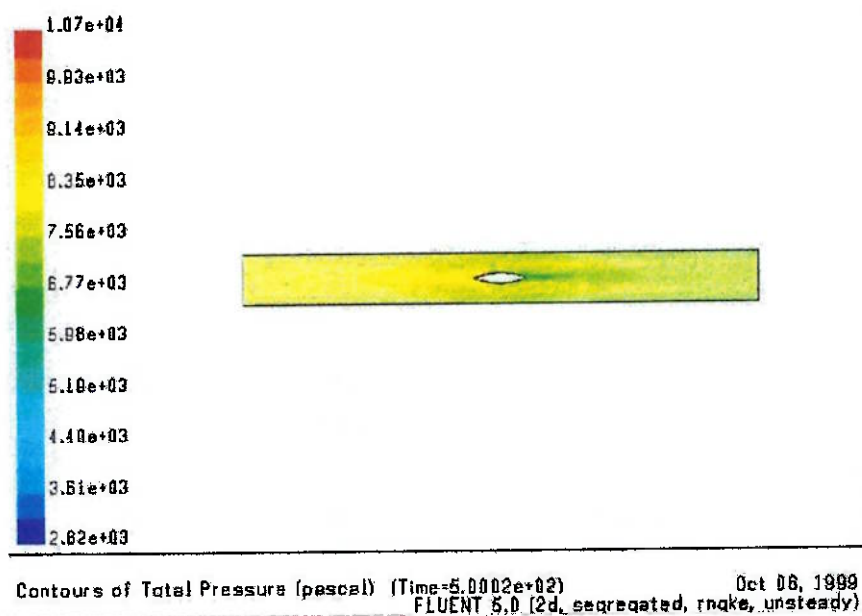


Figura 43: Pressão total

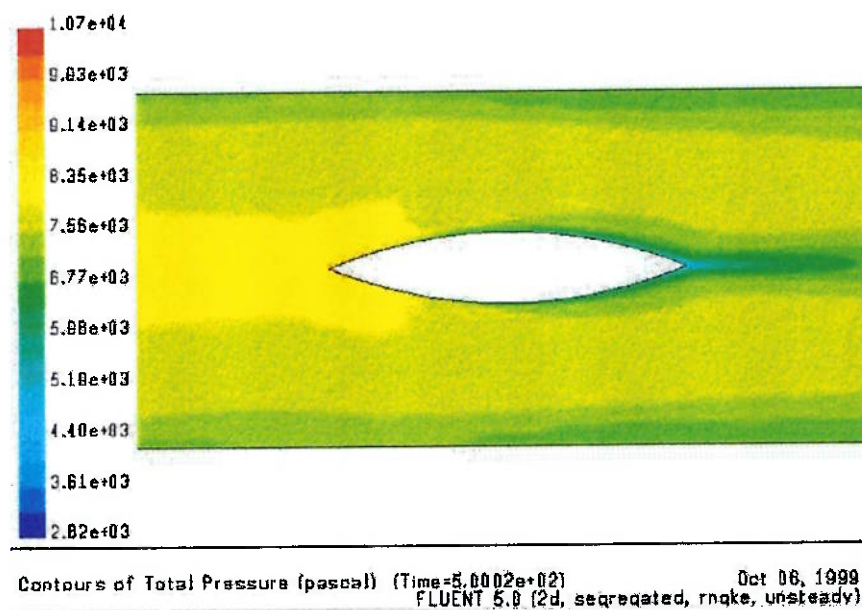


Figura 44: Pressão total ao redor do obturador

O valor do coeficiente de perda de carga singular calculado para este tipo de obturador lenteira foi 0.108.



8.2.2 Lentilha com um lado plano

A malha, com 14217 nós e 27760 elementos, e os resultados obtidos para o obturador tipo lentilha com um lado plano se encontram abaixo.

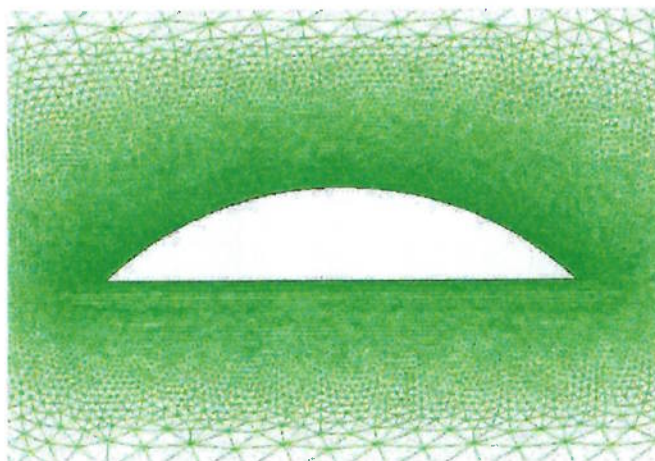


Figura 45: zoom da malha para obturador lentilha tipo lado plano

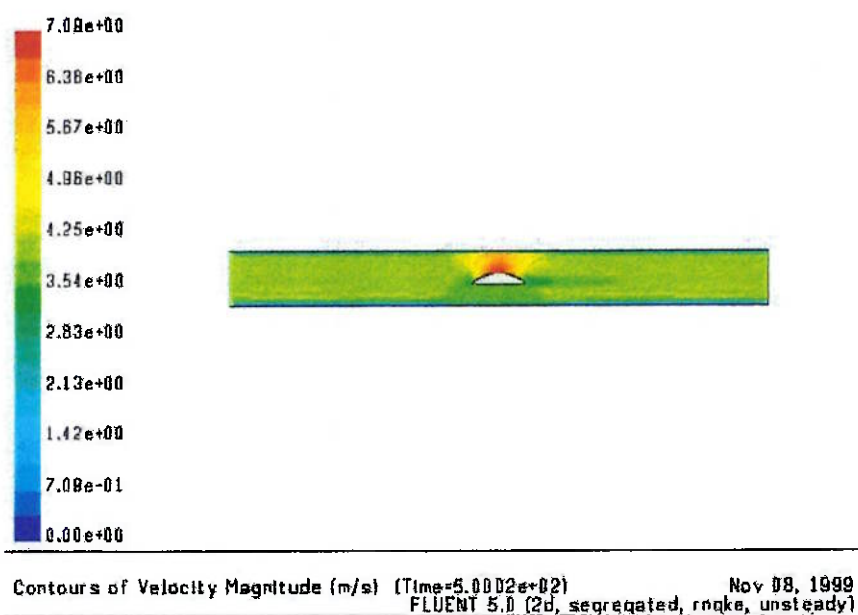


Figura 46: Distribuição de velocidade

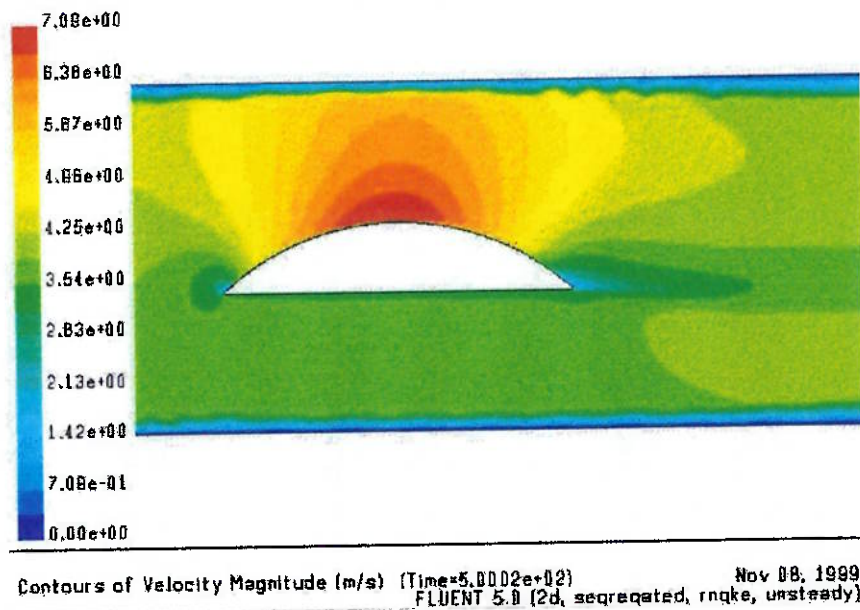


Figura 47: Distribuição de velocidade ao redor do obturador

A velocidade chegou a um valor máximo de 7.09m/s na seção central da lentilha, no lado côncavo da lentilha, com um perfil assimétrico de distribuição de velocidade. Esse valor muito alto de velocidade pode significar em possibilidade de cavitação.

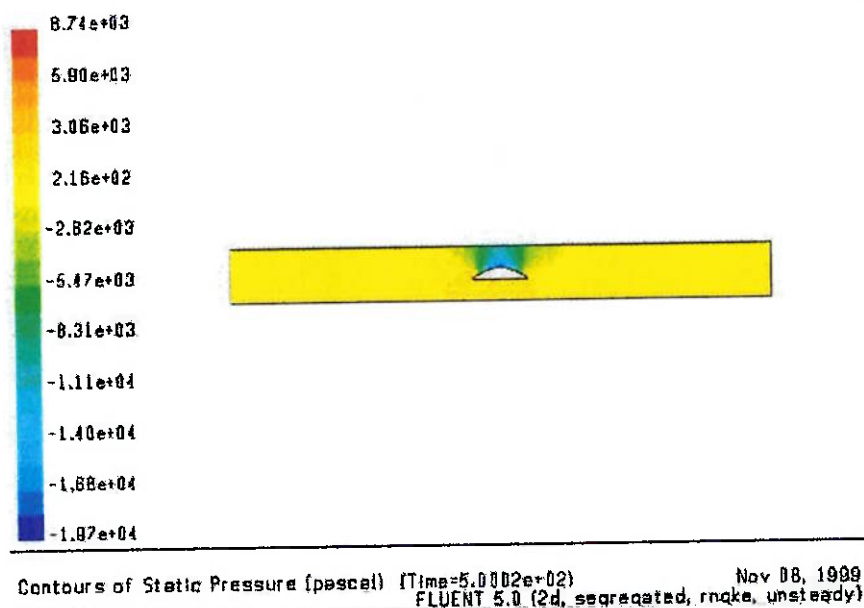


Figura 48: Pressão estática

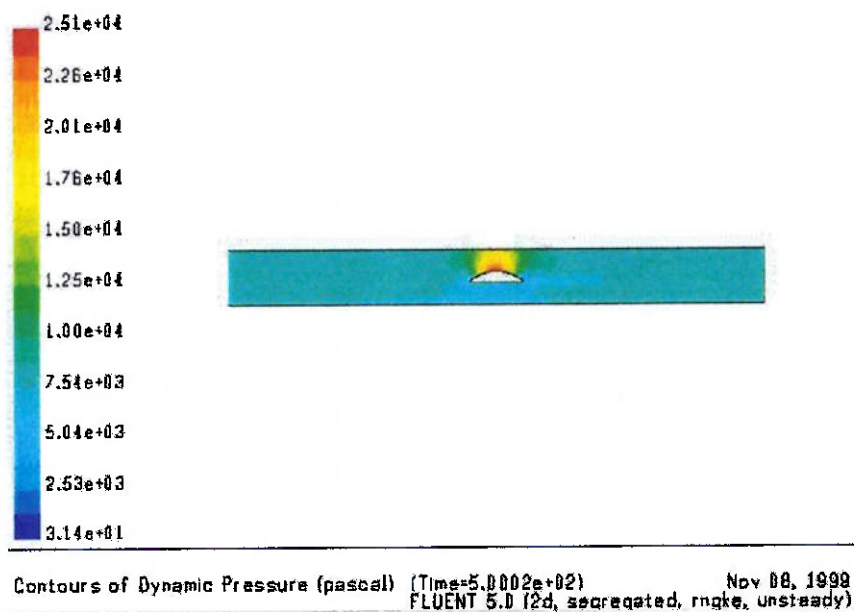


Figura 49: Pressão dinâmica

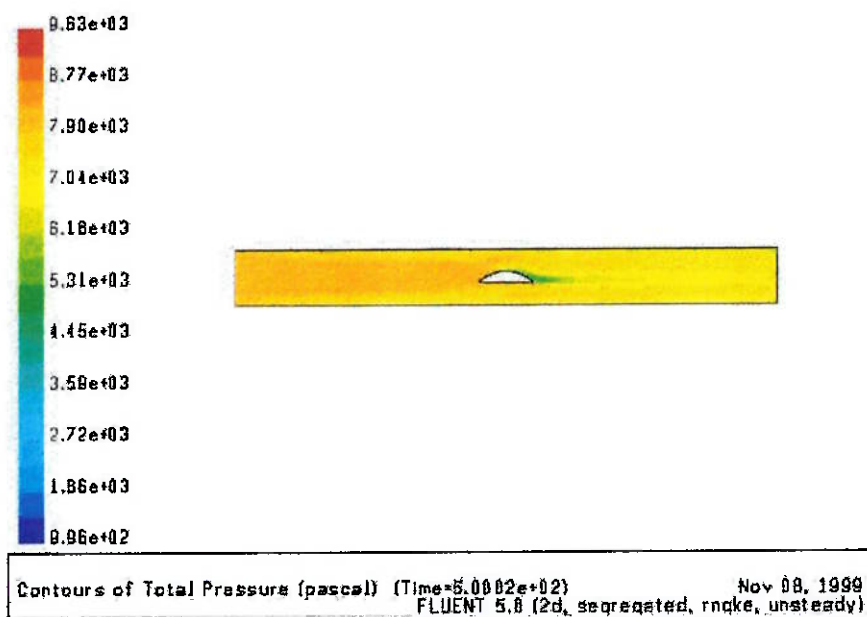


Figura 50: Pressão total

Para essa configuração de obturador lentilha calculou-se o valor de K_s como 0.108, um valor exatamente igual ao valor calculado para o obturador lentilha bicôncava.



8.3 Tratamento dos munhões para obturador tipo estrutura armada

As últimas simulações foram para verificar o efeito da adoção de um dispositivo para minimizar a perda de carga e possível recirculação do escoamento na região do munhão para o obturador estrutura armada. Para esse caso foram considerados os munhões de uma válvula borboleta de diâmetro nominal de 3.6m. As malhas e os resultados encontrados se encontram abaixo.

8.3.1 Munhões sem tratamento

Para a geometria dos munhões sem tratamento para reduzir a perda de carga foi gerada uma malha com 35479 nós e 69880 elementos. As figuras da malha e dos resultados obtidos se encontra abaixo.

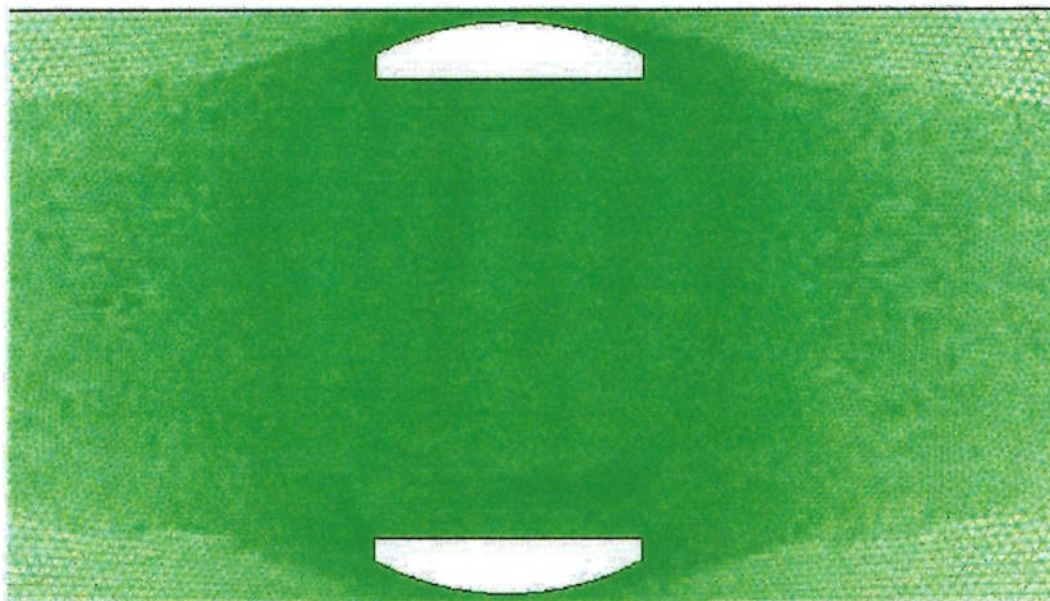


Figura 51: zoom da malha na região do munhão sem tratamento

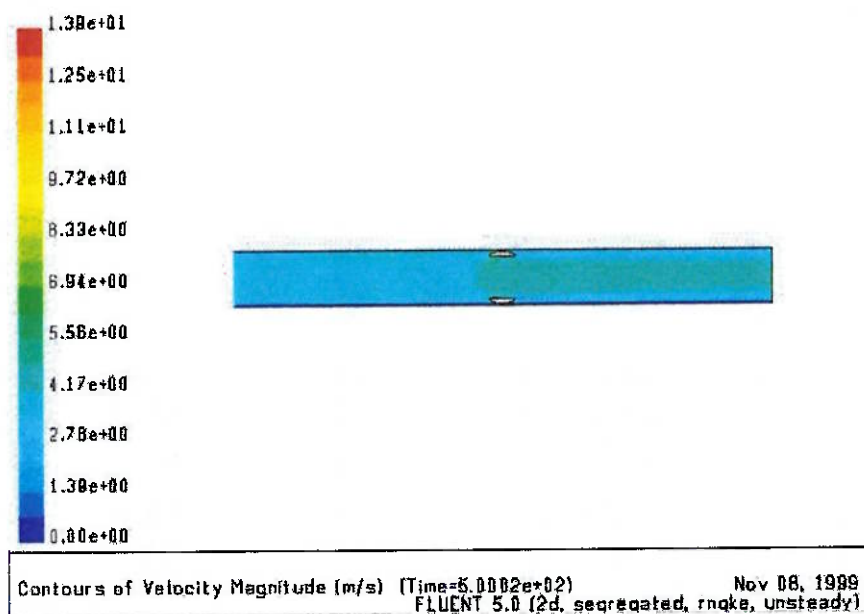


Figura 52: Distribuição de velocidade

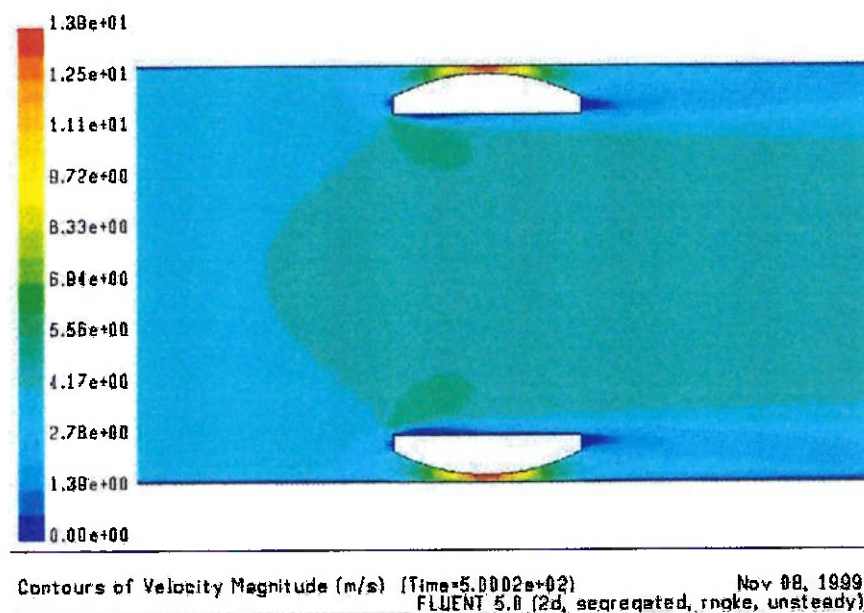


Figura 53: Distribuição de velocidade na região do munhão

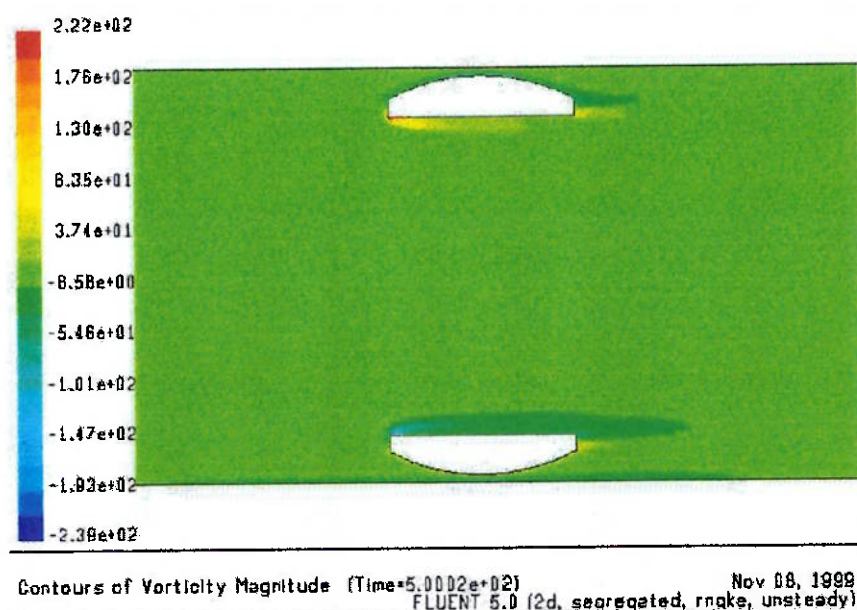


Figura 54: Distribuição de vorticidade

A velocidade atingiu um valor de 13.9m/s na região entre o munhão e a tubulação, um valor muito elevado que pode levar à cavitação do obturador ou mesmo da tubulação. A vorticidade atingiu um valor máximo de 238 no canto vivo frontal do munhão.

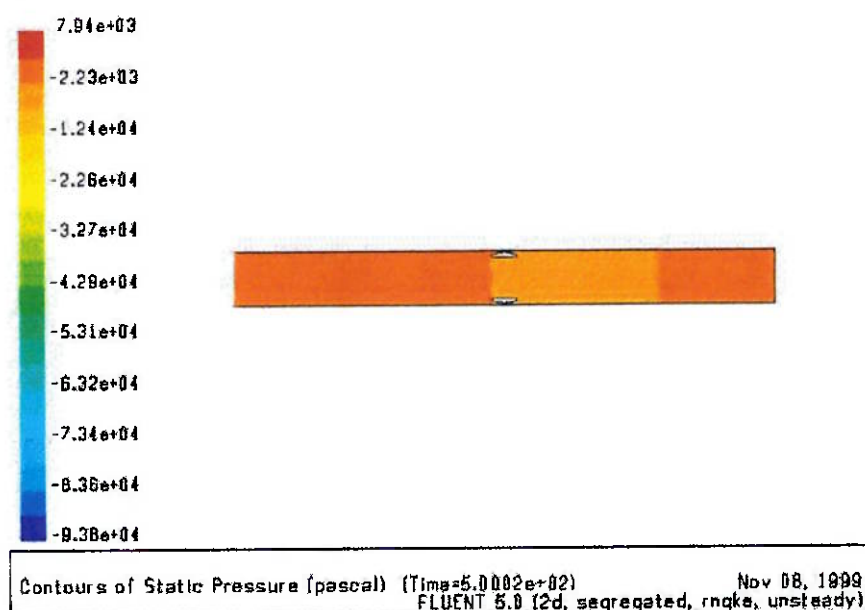


Figura 55: Pressão estática

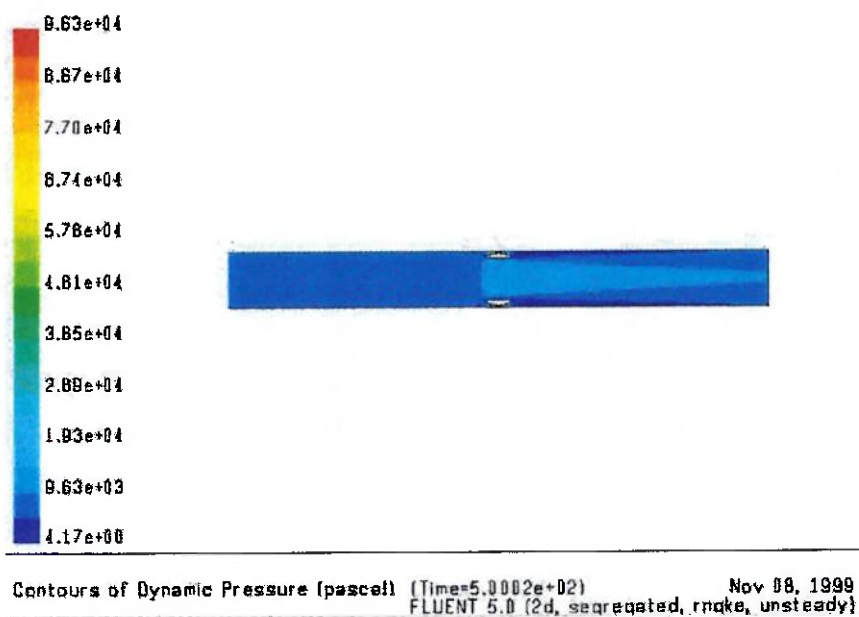


Figura 56: pressão dinâmica

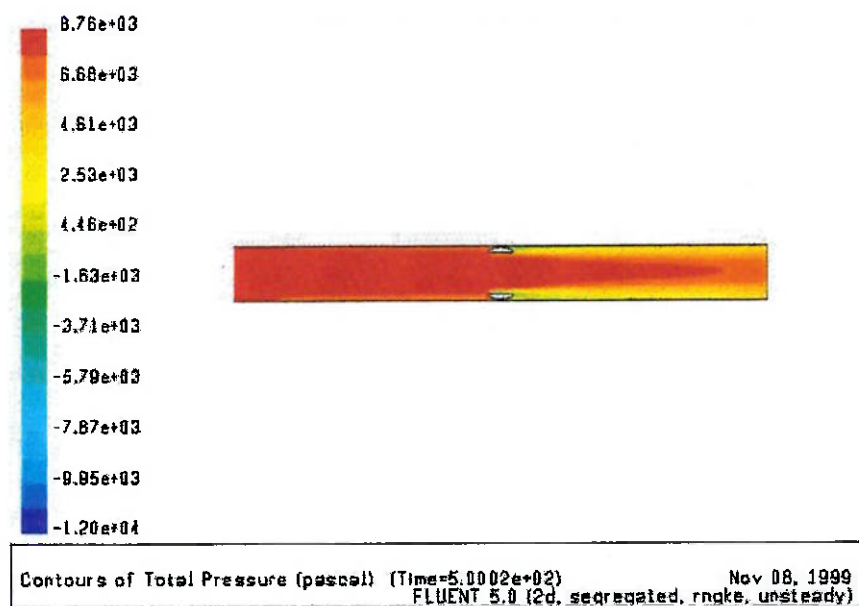


Figura 57: Pressão total

O coeficiente de perda de carga singular para os munhões sem tratamento algum para amenizar a perda de carga foi de 0.0573.



8.3.2 Munhões com tratamento

A malha para a geometria, com 45702 nós e 90146 elementos, e os resultados obtidos se encontram abaixo.



Figura 58: malha na região do munhão com dispositivo

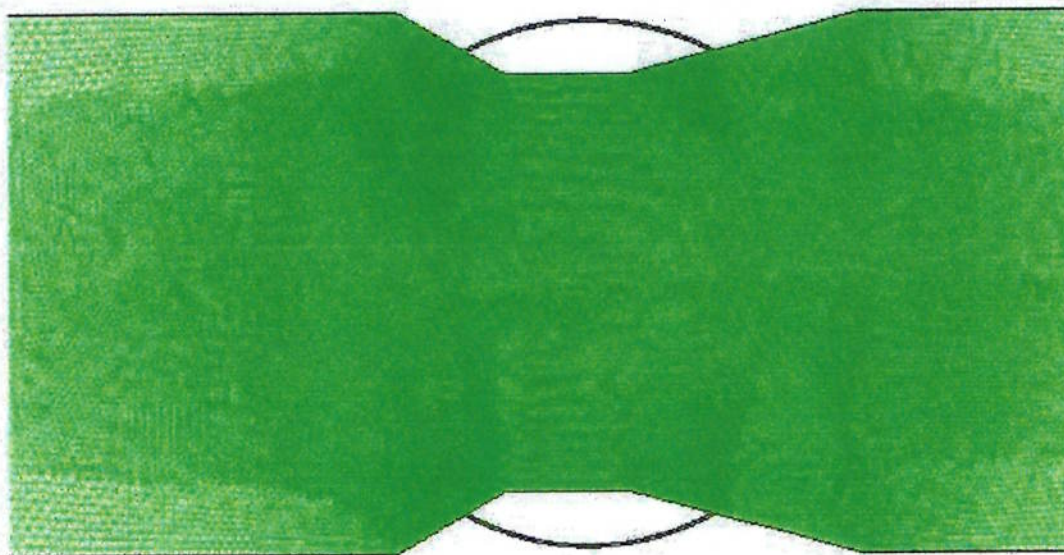


Figura 59: zoom da malha na região do munhão com tratamento

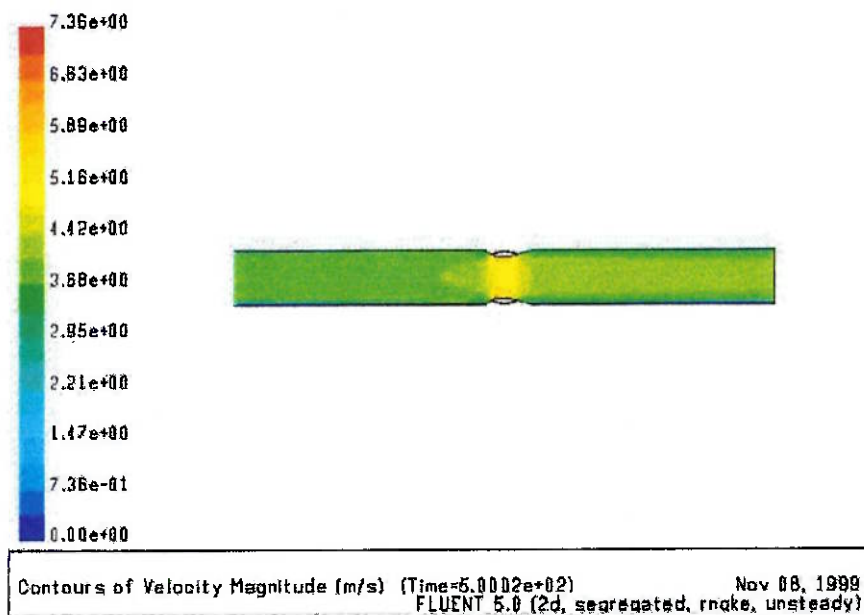


Figura 60: Distribuição de velocidade

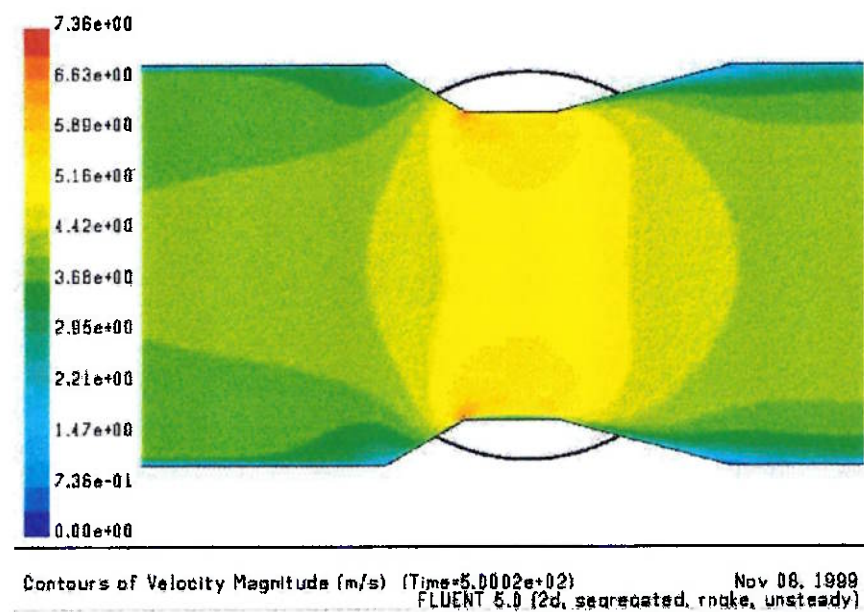


Figura 61: Distribuição de velocidade na região do munhão

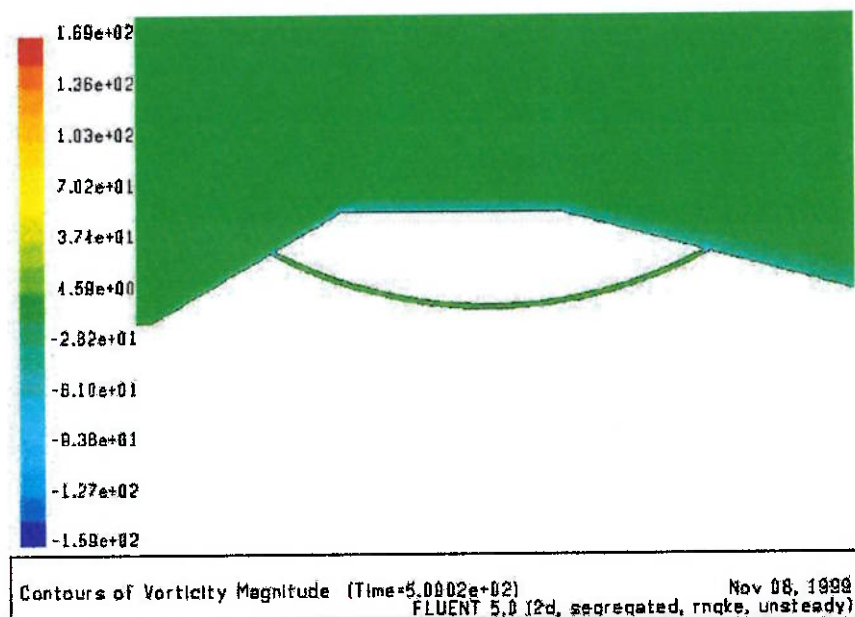


Figura 62: Vorticidade

As figuras acima mostram que o tratamento do munhão para redução da perda de carga reduziram a velocidade máxima para um valor de 7.36m/s, 47% inferior ao valor para os munhões sem tratamento. O valor da vorticidade máxima também se mostrou inferior, 169 contra 239, uma redução de 29.3%.

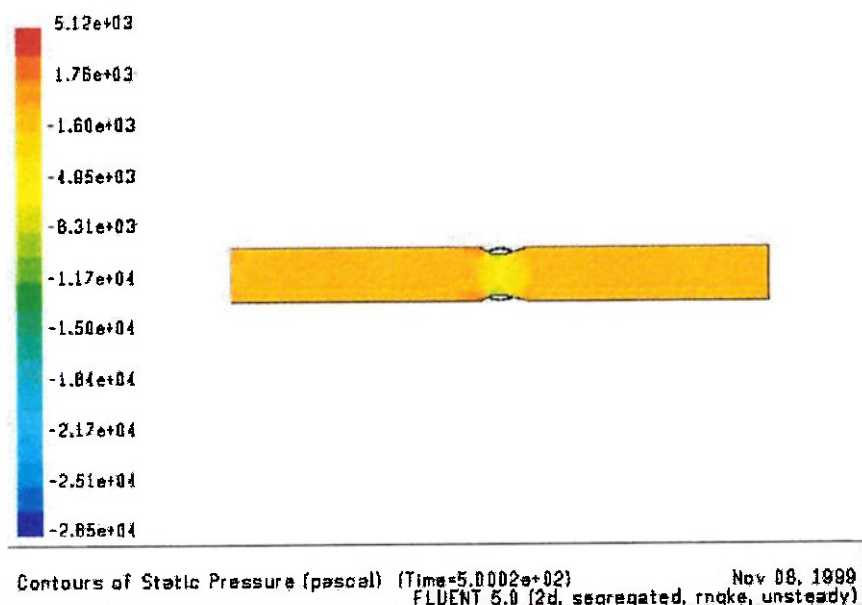


Figura 63: Pressão estática

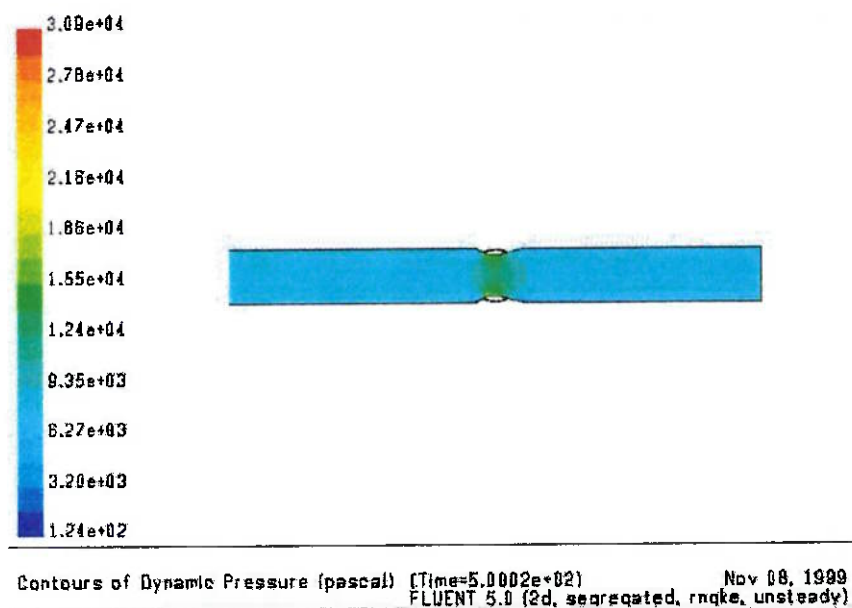


Figura 64: Pressão dinâmica

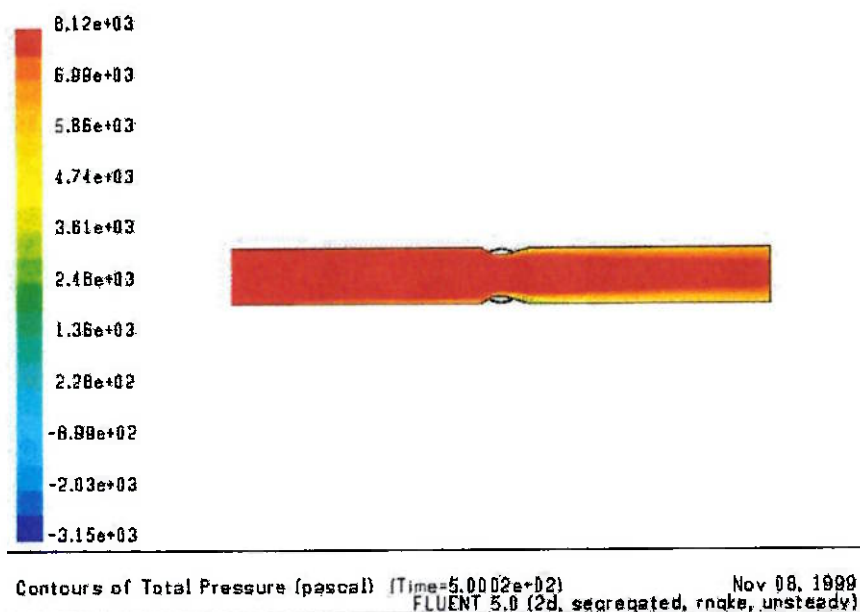


Figura 65: Pressão total

O valor do coeficiente de perda de carga singular com o tratamento do munhão para redução da perda de carga sofreu uma redução considerável, caindo para 0.0176, 69.3% menor do que o valor obtido para o munhão sem tratamento algum.



9. CONCLUSÕES

Foram geradas algumas malhas para certas geometrias; um dos problemas consistiu em estudar o efeito do nível de usinagem nas chapas que soldadas formam a estrutura do obturador tipo biplano a fim de se verificar qual a melhor relação custo-benefício para fabricação deste tipo de obturador.

Para a chapa sem tratamento (usinagem) algum o valor do coeficiente de perda de carga singular obtido foi 0.08388. A chapa "nível 1" apresentou um valor de 0.05, % inferior. A chapa "nível 2" teve um K_s de 0.035 e a chapa "nível 3" (a mais usinada, e conseqüentemente de maior custo de fabricação) teve $K_s = 0.0225$, valores respectivamente 58.3 e 73.2% inferiores ao obtido para a chapa "nível 0".

A adoção de um "tratamento", com usinagem de chanfros e raios de arredondamento se mostra então uma opção interessante para as chapas que soldadas formam a estrutura armada do obturador que leva esse nome. O nível de usinagem é um parâmetro a ser escolhido dependendo da perda de carga desejável, pois os custos de fabricação são fatores de grande importância na fabricação de produtos de grande porte.

Outra comparação realizada foi entre os dois tipos construtivos de obturador tipo lentilha, sendo que na literatura dificilmente se encontra tal comparação quando se leva em conta a perda de carga como fator principal.

Os resultados obtidos mostraram um valor do coeficiente de perda de carga singular idêntico para os dois tipos de obturadores ensaiados. O obturador com



um lado plano mostrou um valor de velocidade máxima mais elevado que o obturador bicôncavo (13.9 contra 5.38m/s), o que pode ser causa de cavitação dos componentes hidráulicos. Porém seu uso se explica devido à grande vantagem que ele possui de ter a vedação fora dos eixos da válvula.

A última análise foi feita a fim de se verificar o efeito da adoção de um dispositivo para redução da perda de carga na região do munhão do obturador tipo estrutura vazada.

Os munhões sem tratamento para redução da perda de carga apresentaram um coeficiente de perda de carga singular K_s de 0.0573, já os munhões com tratamento apresentaram um K_s de 0.0176, um valor 69.3% menor.

Portanto a adoção de um "tratamento" na região dos munhões para redução da perda de carga se mostra uma situação muito atraente quando se deseja uma perda de carga baixa, o que pode ser uma especificação contratual. Vale lembrar que este dispositivo para redução da perda de carga nos munhões possui um custo de fabricação muito elevado, por se tratarem de peças fundidas em aço inoxidável.

Vale ressaltar que, apesar do fato dos valores de perda de carga encontrados não podem ser tomados como os que se encontraria com ensaios de modelo, a comparação qualitativa entre eles é válida.



ANEXO I

Para o cálculo da perda de carga singular causada por um corpo no caminho do escoamento, dado que no restante da tubulação a perda de carga é linear distribuída, dada pelas perdas viscosas.

Foi desenvolvida uma metodologia baseada nas listagens de saída do programa Fluent5, considerando que nas regiões onde não se encontram corpos no escoamento (perda de carga singular) a perda de carga será linear.

Dada uma listagem de saída do programa com a pressão total na linha central ($x = 0$), do trecho a montante do corpo que se deseja estimar o coeficiente de perda de carga singular, foram tomados os valores de pressão e distância em x numa faixa distante da entrada. Isso para garantir que o escoamento turbulento já estaria plenamente desenvolvido, a faixa de valores também não se aproximava muito do corpo, para que não houvesse distúrbios causados por ele.



Perda de Carga no Obturador

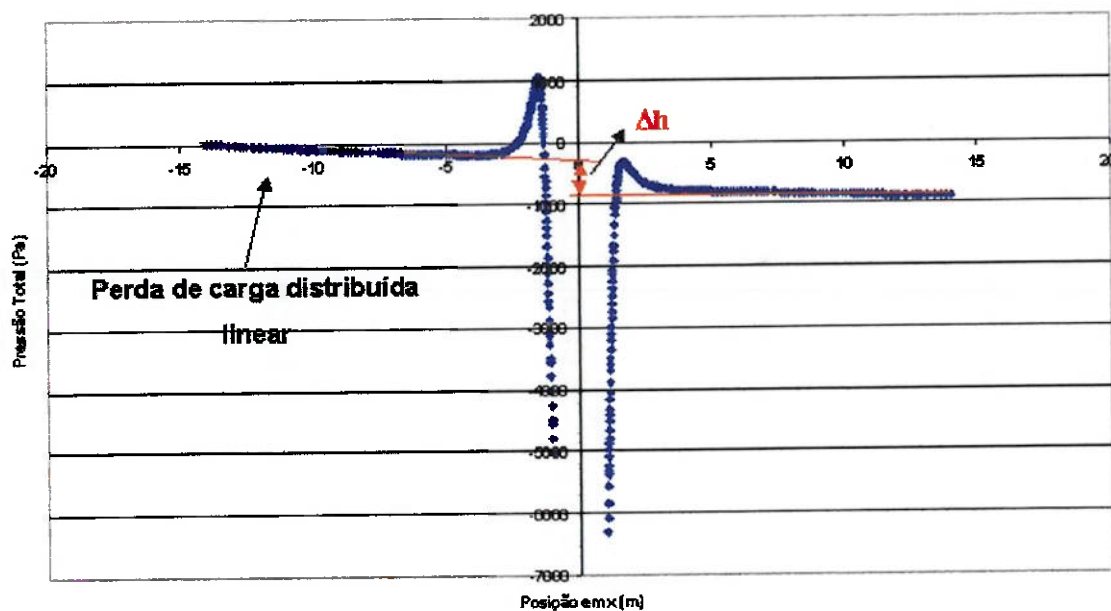


Figura 01: Regiões do escoamento

Era então traçado um gráfico Pressão total x distância e tirada uma equação linear que dava a perda de carga neste trecho de tubulação. Com isso era estimado o valor da pressão na seção média da tubulação ($x = L/2$) se não houvesse o corpo no caminho do escoamento.

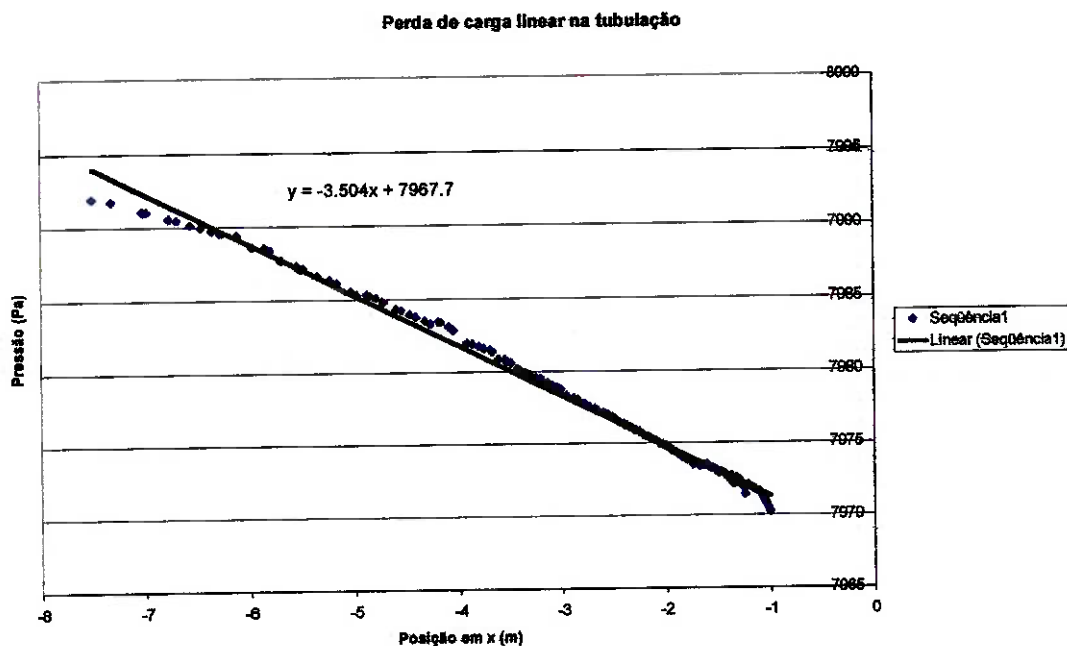


Figura 02: Cálculo da perda de carga linear

Então foi pego o valor da pressão total na seção de saída do escoamento e somado a este valor a perda de carga devido à metade da tubulação, sendo assim encontrado o valor da pressão na seção central logo após a perda de carga singular.

Foi calculado então Δh como a diferença entre os dois valores encontrados acima, a partir daí o valor do coeficiente de perda de carga singular pode ser facilmente encontrado pela relação:

$$K_s = \frac{2 \cdot g \cdot \Delta h}{V^2} \quad (1)$$

sendo:

g = aceleração da gravidade = 9.8 m/s^2 , neste caso;

V = velocidade média na seção (4 m/s).



Dessa maneira foram calculados para todos os casos os valores da perda de carga provocada pela presença de um corpo no caminho do escoamento e então o coeficiente de perda de carga singular deste corpo.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Maliska, C. R., **Transferencia de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**, 1.ed. Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1995.

Fluent User's Guide – Revision 4.4, Fluent Inc., 1997

Hoerner, S. F., **Fluid Dynamic Drag**, 1965

Anderson, J. D., **Fundamentals of Aerodynamics**, Second Edition, McGraw-Hill, Inc.

Groover, M, P, **Fundamentals of Modern Manufacturing**, First Edition, Prentice Hall, 1996.

