

VITOR AUGUSTO DA SILVA CRUZ

**Redução da perda de carga e arrasto através da análise de
sensibilidade em escoamento monofásico**

Santos
2018

VITOR AUGUSTO DA SILVA CRUZ

**Redução da perda de carga e arrasto através da análise de
sensibilidade em escoamento monofásico**

Área de concentração:
Engenharia de Petróleo

Orientador:
Prof. Dr. Rafael dos Santos Gioria

Santos
2018

VITOR AUGUSTO DA SILVA CRUZ

**Redução da perda de carga e arrasto através da análise de
sensibilidade em escoamento monofásico**

(TFII-2018-1/06)

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para Graduação no Curso de Engenharia
de Petróleo

Área de concentração:
Engenharia de Petróleo

Orientador:
Prof. Dr. Rafael dos Santos Gioria

Santos
2018



Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catálogo-na-Publicação

10

Dedico este trabalho aos meus pais
Carlos e Silvana, e a minha irmã Amanda.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmã pelo esforço, paciência e incentivo que me proporcionaram condições para a realização da minha graduação.

Aos meus amigos e colegas que estiveram comigo durante este período e contribuíram para minha formação tanto pessoal quanto educacional.

Aos meus professores pelo conhecimento transmitido e pelos ensinamentos, em especial ao meu orientador Rafael dos Santos Gioria.

Aos funcionários da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelo auxílio durante a graduação.

RESUMO

O escoamento de fluidos está presente em diversos processos da cadeia exploratória do petróleo. Nestes, a perda de carga e a força de arrasto, muitas vezes, acabam por prejudicar a eficiência dos procedimentos. Com isso, este trabalho busca estudar o processo de minimização da perda de carga e do arrasto para um escoamento monofásico através da geometria de uma placa de orifício, aplicando, posteriormente, tais conceitos uma malha rochosa para identificação de possíveis poros sensíveis. Para tal, realiza-se uma análise de sensibilidade com base nos conceitos matemáticos do método de elementos finitos e método adjunto aplicados a simulações computacionais de situações de escoamento em fluxo laminar constante e incompressível. O número de Reynolds considerado para as simulações possui valores de 40 e 100. O método de resolução é primeiramente validado com base nos resultados da literatura, sendo por fim discutida também a questão da convergência e eficiência dos métodos matemáticos utilizados neste trabalho. Com base na validação deste método, é feito então a análise de sensibilidade para uma situação de escoamento através de uma placa de orifício, visando a diminuição da perda de carga e do arrasto na situação estudada. Verifica-se que a diminuição da perda de carga e do arrasto possui relação direta com a alteração da geometria da placa de orifício, assim como a inserção de novos corpos e a alteração das características do escoamento. Por fim, aplica-se o conceito iterativo da análise de sensibilidade do estudo a uma malha de rocha para identificação de possíveis poros interconectados e regiões sensíveis que afetem consideravelmente a permeabilidade da rocha.

Palavras-chave: *análise de sensibilidade em escoamentos, redução da perda de carga, redução do arrasto, escoamento ao redor de um cilindro*

ABSTRACT

The flow of fluids is present in several processes of petroleum exploration. In these, the loss of load and the drag force, often, end up harming the efficiency of the processes. This work aims to study the process of minimizing the loss of load and drag to a single phase flow through the geometry of an orifice plate, applying later this concepts a rocky mesh to identify possible sensitive pores. For this, a sensitivity analysis is carried out based on the mathematical concepts of the finite element method and the adjoint method applied to computational simulations of flow situations in constant and incompressible laminar flow. The Reynolds number considered for the simulations has values of 40 and 100. The resolution method is first validated based on the results of the literature. Finally, the question of the convergence and efficiency of the mathematical methods used in this work is also discussed. Based on the validation of this method, sensitivity analysis is performed for a flow situation through an orifice plate, aiming to reduce the loss of load and drag in the studied situation. It is verified that the reduction of the loss of load and of the drag has a direct relation with the alteration of the geometry of the orifice plate, as well as the insertion of new bodies and the alteration of the characteristics of the flow. Finally, the iterative concept of sensitivity analysis of the study is applied to a rock mesh to identify possible interconnected pores and sensitive regions that considerably affect the permeability of the rock.

Key words: flow sensitivity analysis, reduction of load loss, reduction of drag, flow around a cylinder

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVO	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3	ANÁLISE DO ESCOAMENTO	7
3.1	PROPRIEDADES DE ESCOAMENTO	7
3.2	RELAÇÃO DO ARRASTO COM A PERDA DE CARGA.....	9
3.3	IMPLEMENTAÇÃO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	10
3.4	RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	11
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
4.1	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	12
4.2	MÉTODO ADJUNTO	14
4.3	SOFTWARE FREEFEM++	15
4.4	SOFTWARE VISIT.....	16
4.5	MÉTODO DE EXECUÇÃO DAS SIMULAÇÕES.....	17
4.5.1	<i>Validação</i>	<i>17</i>
4.5.2	<i>Análise da convergência do FEM</i>	<i>17</i>
4.5.3	<i>Simulação Numérica Direta (DNS)</i>	<i>18</i>
4.5.4	<i>Situação de estreitamento da placa de orifício com $Re = 100$</i>	<i>18</i>
4.5.5	<i>Aplicação ao modelo de rocha.....</i>	<i>18</i>
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	20
5.1	VALIDAÇÃO.....	20
5.2	ANÁLISE DA CONVERGÊNCIA DO FEM.....	23
5.3	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DIRETA (DNS).....	31
5.4	SITUAÇÃO DE ESTREITAMENTO DA PLACA DE ORIFÍCIO COM $Re = 100$	32
5.5	APLICAÇÃO AO MODELO DE ROCHA.....	37
6	CONCLUSÕES.....	40
7	REFERÊNCIAS	42
	APÊNDICE A – ARTIGO SÍNTESE.....	44
A1	INTRODUÇÃO.....	45

A2 ANÁLISE DO ESCOAMENTO	46
A3 MATERIAIS E MÉTODOS	47
A3.1 MATERIAIS	47
A3.1.1 <i>Software FreeFem++</i>	47
A3.1.2 <i>Software VisIt</i>	47
A3.2 MÉTODOS	48
A3.2.1 <i>Validação</i>	48
A3.2.2 <i>Análise da convergência do FEM</i>	48
A3.2.3 <i>Simulação Numérica Direta</i>	48
A3.2.4 <i>Situação de estreitamento da placa de orifício com $Re = 100$</i>	48
A3.2.5 <i>Aplicação ao Modelo de Rocha</i>	48
A4 RESULTADOS	49
A4.1 VALIDAÇÃO	49
A4.2 ANÁLISE DA CONVERGÊNCIA DO FEM	49
A4.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DIRETA (DNS)	50
A4.4 SITUAÇÃO DE ESTREITAMENTO DA PLACA DE ORIFÍCIO COM $Re = 100$	50
A4.5 APLICAÇÃO AO MODELO DE ROCHA	51
A5 CONCLUSÃO	51
A6 REFERÊNCIAS	52

LISTA DE SIGLAS

FEM	Método de Elementos Finitos (<i><u>F</u>inite <u>E</u>lement <u>M</u>ethod</i>)
CFD	Fluidodinâmica Computacional (<i><u>C</u>omputational <u>F</u>luid <u>D</u>ynamic</i>)
DNS	Simulação Numérica Direta (<i><u>D</u>irect <u>N</u>umeric <u>S</u>imulation</i>)
LBM	Métodos de Lattice Boltzmann (<i><u>L</u>attice <u>B</u>oltzmann <u>M</u>ethods</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Massa específica
p	Pressão
u	Velocidade do escoamento
Ω	Domínio computacional
∇	Nabla- operador diferencial
∂	Derivada parcial
∂_t	Derivada parcial em relação ao tempo
σ	Tensor de tensão
Re	Número de Reynolds
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
π	Número Pi
r	Raio
λ	Perda de carga
dp	Variação de pressão
I	Matriz Identidade
δf	Variação no valor da força
n	Vetor Normal
e_x	Divergência Vetorial no eixo x
D	Arrasto
$u_b^\dagger$	Valor do escoamento solução do sistema linear adjunto
δD	Variação no valor do arrasto D
$p_b^\dagger$	Valor da pressão solução do sistema linear adjunto
$\nabla_f D$	Função Sensibilidade

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura	Descrição	<i>página</i>
Figura 1-	Situação de formação de vórtice devido a inserção de um corpo no escoamento. Fonte: Van Dyke (1988).	1
Figura 3.1-	Representação corpo inserido em fluxo com velocidade horizontal de módulo u . Fonte: Meliga et al. (2014).	7
Figura 3.2-	Representação esquemática de um tubo circular de raio r . Fonte: Mechanics of Fluids (2014).	9
Figura 4.1-	Representação da divisão de um domínio em pequenos elementos no FEM. Fonte: http://ensus.com.br/elementos-finitos-quais-os-beneficios/	13
Figura 4.2-	Programa FreeFem++ em execução. Fonte: do próprio do autor.	15
Figura 4.3-	Exemplo de interpretação gráfica no programa VisIt. Fonte do próprio do autor.	16
Figura 4.4-	Representação da malha utilizada na simulação. Fonte: Boek et al. (2010).	19
Figura 5.1-	Variação da força de arrasto sob o cilindro de diâmetro 0.1 e $Re = 40$ segundo Meliga et al. Fonte: Meliga et al. (2014).	20
Figura 5.2-	Variação da força de arrasto para $Re = 40$ e cilindro com diâmetro 0.1. Fonte: do próprio do autor.	21
Figura 5.3-	Variação da força de arrasto sob o cilindro de diâmetro 0.1 e $Re = 100$ segundo Meliga et al. Fonte: Meliga et al. (2014).	22
Figura 5.4-	Variação da força de arrasto para $Re = 100$ e cilindro com diâmetro 0.1. Fonte: do próprio do autor.	22

Figura 5.5-	Análise da formação de vórtices para a malha n20. Fonte: do próprio do autor.	24
Figura 5.6-	Análise da formação de vórtices para a malha n40. Fonte: do próprio do autor.	25
Figura 5.7-	Análise da formação de vórtices para a malha n60. Fonte: do próprio do autor.	25
Figura 5.8-	Vetores velocidade para a malha n20. Fonte: do próprio do autor.	26
Figura 5.9-	Vetores velocidade para a malha n40. Fonte: do próprio do autor.	27
Figura 5.10-	Vetores velocidade para a malha n60. Fonte: do próprio do autor.	27
Figura 5.11-	Variação da pressão ao longo do escoamento para a malha n20. Fonte: do próprio do autor.	28
Figura 5.12-	Variação da pressão ao longo do escoamento para a malha n40. Fonte: do próprio do autor.	29
Figura 5.13-	Variação da pressão ao longo do escoamento para a malha n60. Fonte: do próprio do autor.	29
Figura 5.14-	Variação da força de arrasto para a malha n60.	30
Figura 5.15-	Análise da formação de vórtices para a malha do caso 03. Fonte: do próprio do autor.	32
Figura 5.16-	Análise da formação de vórtices com $Re = 100$. Fonte: do próprio do autor.	33
Figura 5.17-	Análise da formação de vórtices $Re = 100$ e placa mais estreita. Fonte: do próprio do autor.	34
Figura 5.18-	Variação da pressão para $Re = 100$. Fonte: do próprio do autor.	34

Figura 5.19-	Variação da pressão para $Re = 100$ e placa mais estreita. Fonte: do próprio do autor.	35
Figura 5.20-	Vetores de velocidade para $Re = 100$. Fonte: do próprio do autor.	36
Figura 5.21-	Vetores de velocidade para $Re = 100$ e placa mais estreita. Fonte: do próprio do autor.	36
Figura 5.22-	Variação da pressão ao longo da malha. Fonte: do próprio do autor.	37
Figura 5.23-	Função sensibilidade ao longo do meio poroso. Fonte: do próprio do autor.	38
Figura 5.24-	Variação da velocidade ao longo da malha. Fonte: do próprio do autor.	38
Figura A1-	Representação de corpo no escoamento. Adaptado de Meliga et al. (2014).	46
Figura A2-	Malha do modelo de rocha – Boek et al. (2010).	48
Figura A3-	Resultados da simulação para Reynolds 40 e 100, respectivamente. Fonte: do próprio autor.	49
Figura A4-	Resultados da análise de sensibilidade para a malha n60. Fonte: do próprio autor.	50
Figura A5-	Resultados da para a malha de rocha. A esquerda a função sensibilidade e a direita a velocidade. Fonte: do próprio autor.	51

LISTA DE TABELAS

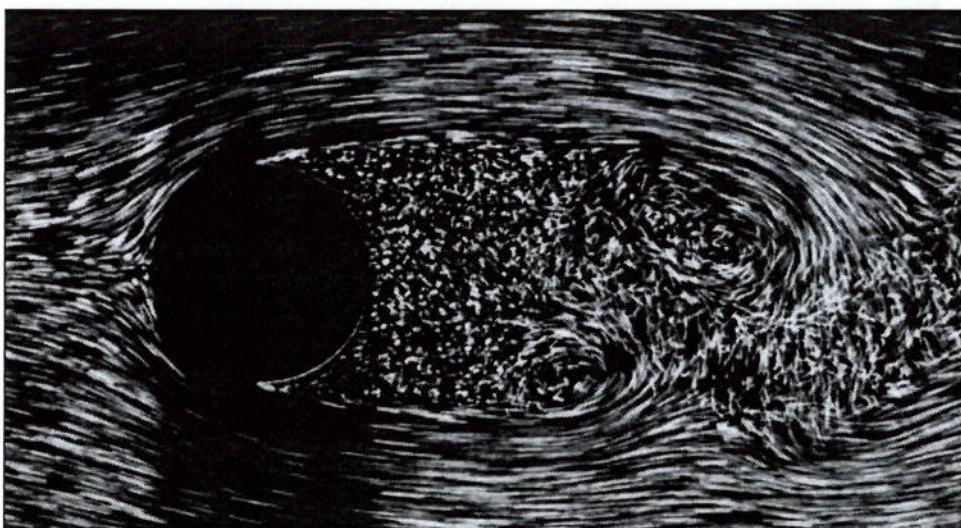
Tabela	Descrição	página
Tabela 4.1 –	Características para os três tipos de malhas utilizadas.	18
Tabela 5.1-	Valores de perda de carga encontrados para os 3 tipos de malhas.	23
Tabela 5.2-	Valores da força de arrasto encontrada para os 3 tipos de malhas.	23
Tabela 5.3-	Valor da perda de carga para dois cilindros anteriores a placa.	31
Tabela 5.4 -	Valor da força de arrasto para dois cilindros anteriores a placa.	31
Tabela 5.5-	Valor da perda de carga para $Re = 100$.	32
Tabela 5.6-	Valor força de arrasto para $Re = 100$.	32
Tabela A1 -	Diferentes características para os três tipos de malhas	49
Tabela A2 -	Valores de perda de carga encontrados para os 3 tipos de malhas.	49
Tabela A3 -	Valores da força de arrasto encontrada para os 3 tipos de malhas.	49
Tabela A4 -	Valor da perda de carga para dois cilindros anteriores a placa.	50
Tabela A5 -	Valor da força de arrasto para dois cilindros anteriores a placa.	50
Tabela A6 -	Valor da perda de carga para $Re = 100$.	50
Tabela A7 -	Valor força de arrasto para $Re = 100$.	51

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento do mecanismo de escoamento de fluidos se apresenta com extrema importância para os diversos segmentos da indústria petrolífera. Desde a questão da estabilidade de plataformas *offshore* até o processo de exploração e produção, grande número de processos demandam a necessidade do entendimento do comportamento do escoamento de fluidos, sendo necessárias, muitas vezes, técnicas que modifiquem tal comportamento para uma maior eficácia do processo.

As propriedades do escoamento variam de acordo com o número de Reynolds e do local de ocorrência. Quando um corpo é imerso em um fluxo a região necessariamente após sua posição é reconhecida por uma região de turbulência, causada por recirculação do fluido podendo apresentar vórtices e características diferentes de escoamento, como mostrado pela figura 1.1.

Figura 1.1- Formação de região de vórtice em um escoamento com corpo imerso.



Fonte: Van Dyke (1988).

Como consequência, sobre o corpo em questão atuam forças de arrasto e de elevação vertical. Quanto mais próximas forem as frequências de vórtice e do corpo imerso, mais intensa será a atuação da força de arrasto e da elevação vertical, estimulando vibrações que podem induzir fadigas e desgastes ao corpo.

Na área *upstream*, tais vibrações acabam por prejudicar integridade da plataforma e dos equipamentos ali presentes, afetando consequentemente, os

procedimentos de exploração do petróleo. Levando o conceito da força de arrasto para escoamentos internos, a perda de carga se torna fator crucial a ser analisado para garantir um bom rendimento tanto para a injeção quanto para a retirada de componentes do reservatório através dos dutos. Quanto maior o rendimento, menos energia é demandada ao procedimento.

O controle desta região de turbulência pode ser feito de maneira passiva ou ativa. A maneira passiva se define como mudanças na geometria do corpo que consequentemente irão alterar as características da região turbulenta com a inserção de novos corpos no fluxo. Não são aplicadas nessa situação modificações no escoamento que demandam energia externa. Quanto ao controle ativo, este se define como modificações situacionais que demandam energia externa. Por exemplo a oscilação do corpo inserido no fluxo, mudança de temperatura do corpo, inserção de energia no fluxo.

No âmbito da diminuição da força de arrasto e da perda de carga gerados pelo escoamento sobre um corpo, este trabalho busca através da implementação do processo de análise de sensibilidade um controle passivo do escoamento, com a ajuda de softwares de simulação computacional que utilizam como princípio matemático de aplicação o Método de Elementos Finitos (FEM) juntamente com o Método Adjunto. Assim, na malha do escoamento, encontram-se os locais mais sensíveis às modificações.

Partindo deste mesmo princípio, aplica-se também o método de análise de sensibilidade para uma malha de rocha poroso, identificando locais de possíveis poros interconectados e regiões sensíveis e críticas no interior desta malha. Nesta situação, a interpretação não necessariamente garante um caminho de maior fluxo, mas sim, um caminho que caso seja interrompido pode resultar em uma maior variação da permeabilidade da rocha.

O estudo e análise da diminuição da perda de carga e arrasto em um corpo imerso em fluxo garante um melhor entendimento do escoamento, além de fornecer informações importantes que podem ser traduzidas em ações para um melhor controle e aplicabilidade do processo. Além disso, pode-se estender o seu conceito físico para a interpretação geofísica de rochas porosas.

1.1 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é estudar a técnica de otimização da perda de carga e arrasto através da análise de sensibilidade em um escoamento monofásico incompressível, isotérmico, de fluxo constante e laminar em uma geometria de placa de orifício.

Como objetivo secundário, utilizar o método de análise de sensibilidade em um modelo de rocha para identificar possíveis locais de poros interconectados que representem caminhos mais relevantes para a permeabilidade da rocha em questão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresentam-se nesta etapa um breve histórico de estudos realizados e publicações acerca do tema que envolve o trabalho, destacando também contribuições e as principais conclusões dos autores.

O controle do arrasto e da perda de carga através do controle passivo e ativo representa um tópico importante no estudo de escoamentos. Strykowski e Sreenivasan (1989) promoveram pesquisas de controle passivo das regiões de turbulência para baixos valores de Reynolds (compreendidos na faixa de 50 a 100, caracterizando um fluxo laminar) com um corpo cilíndrico imerso em um fluxo. Pelos resultados, os autores chegaram à conclusão de que a inserção de um outro cilindro (chamado de cilindro de controle) próximo a região de turbulência pode diminuir a ocorrência de vórtices, chegando em certos casos a supressão total da região de turbulência. Além disso, verificaram que o tamanho da região de vórtice é diretamente proporcional ao número de Reynolds do escoamento em questão.

Posteriormente, Sakamoto e Haniu (1991 e 1994), Igarashi (1997) e Parezanovic e Cadot (2009 e 2012) exploraram o controle passivo para valores de Reynolds da ordem de 10^4 a 10^5 . Neste momento, introduz-se também modificações na geometria dos corpos do escoamento, com formas circulares, quadradas e em formato de D. Dadas as condições, observou-se uma redução de 20% a 30% de arrasto sobre o corpo principal com a aplicação de corpos de controle. As mudanças nas geometrias dos corpos de controle também foram estudadas mais a fundo por Szepessy e Bearman (1992), utilizando placas em seus estudos, enquanto Korkischko e Meneghini (2010) utilizaram cilindros com formas helicoidais.

Na maior parte destes estudos, os dados utilizados são provenientes de um mapeamento global, com grande número de medidas em diversos posicionamentos dos corpos de controle, sendo considerado apenas um número limitado de posições para a obtenção dos resultados. Uma obtenção de dados otimizadas com os pontos mais influentes nas alterações das características estudadas garantiria uma melhor análise do resultado, além de diminuir o número de simulações.

Com isso, o experimento de Strykowski e Sreenivasan fora revisado por diversos pesquisadores, entre eles Hill (1992), Marquet e Jacquin (2008). Realizou-se

uma nova análise da situação de escoamento estudada com uma abordagem através de uma função de sensibilidade obtida por métodos adjuntos e uma força corporal que representava o cilindro de controle do escoamento. Esta nova interpretação matemática teórica garantiu a obtenção das áreas mais sensíveis à implementação da força corporal. Logo, as áreas de interesse foram obtidas e os dados para a formulação dos resultados foram otimizados.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, Meliga et al. (2014) estudam a diminuição do arrasto e a elevação vertical sobre um cilindro em escoamentos laminares com diferentes características. Novamente são utilizadas as técnicas de simulações computacionais juntamente com cálculo numérico e equações adjuntas. Os autores observam que para Reynolds igual a 40 ou 100, um cilindro de controle colocado próximo a um cilindro principal pode reduzir em até 20% a força de arrasto sobre este. Porém, é sabido que o próprio cilindro de controle acaba por gerar uma força de arrasto, de forma que a redução da força de arrasto sobre todo o sistema diminua apenas cerca de 5%.

A questão da implementação da análise de sensibilidade aplicada a escoamentos é estudada por Patino et al. (2017) objetivando o controle dos vórtices gerados por um cilindro em um escoamento. O estudo utiliza a métodos numéricos juntamente com métodos adjuntos analisando desta forma a taxa de rotação mínima para a minimização dos vórtices e também os locais mais sensíveis para a implementação de cilindros passivos para a diminuição dos vórtices gerados.

Passando para a questão do controle ativo, a inserção de energia no fluxo é conhecida como MSBC (Moving surface boundary layer control). Se baseia presença de corpos rotativos (comumente cilindros) que de acordo com a relação da velocidade de rotação (U_c) e da velocidade de fluxo (U) acabam por diminuir o arrasto. Este procedimento é dependente de diversos parâmetros, como o diâmetro dos cilindros rotativos, a velocidade de rotação, a distância e localização em relação aos corpos principais. Patnaik e Wei (2012) aplicaram o método MSBC com base em cilindros rotativos e uma relação de velocidades $U_c/U = 1,25$.

A variação dos parâmetros para o caso MSBC exige elevado investimento em simulações numéricas assim como a existência de equipamentos capacitados para tais tarefas. Novamente, uma formulação teórica otimizada baseada no método

adjunto foi utilizada por Hill (1992), apresentando um método de análise de sensibilidade MSBC baseado na existência de uma força constante sendo aplicada ao fluxo, gerando um número menor de simulações. Posteriormente, esse mesmo método de análise de sensibilidade para uma força constante foi utilizado por Giannetti e Luchini (2007) introduzido o conceito de *wavemaker*, já caracterizando as possíveis regiões onde o controle de fluxo poderia ser alcançado. Marquet, Sipp e Jacquin (2008) formularam o embasamento teórico para a aplicação desta análise de sensibilidade para essa força constante sendo aplicada de modo instável, analisando o crescimento e decrescimento nas frequências de vibração dos corpos.

Em relação a aplicação dos conceitos de perda de carga e arrasto a modelos de rochas, Boek et al. (2010) usa o método de *Lattice Boltzman* (LBM) para o cálculo da fluidez de partículas dentro de uma rochosa através de simulação computacional, tanto para situações 2D quanto 3D. Nesse estudo, ao invés de resolvida a equação de *Navier Stokes*, o autor utiliza como base a resolução da equações de *Boltzman*. Em sua pesquisa, os modelos de rocha utilizados são um modelo 2D de arenito de Berea e posteriormente um 3D de arenito de Bentheimer. Os autores chegaram à conclusão de que a permeabilidade é diretamente afetada pelo tamanho da amostra e que a Lei de *Darcy* é válida para uma grande gama de valores de forçamento do fluxo.

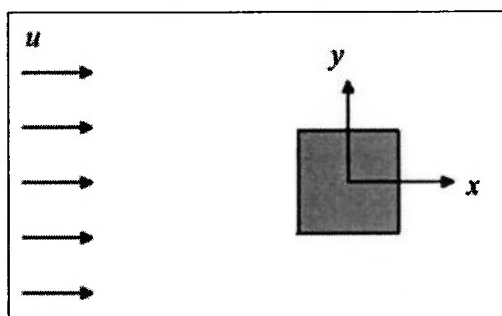
3 ANÁLISE DO ESCOAMENTO

As propriedades do escoamento e a fundamentação matemática são essenciais para a correta interpretação dos resultados. A seguir são apresentadas as formulações teóricas que funcionam como a base para a realização deste estudo.

3.1 PROPRIEDADES DE ESCOAMENTO

Considera-se um escoamento laminar, 2D, incompressível em torno de um corpo em um domínio fechado com condições de contorno pré-estabelecidas. Toma-se o sistema cartesiano como referência com arrasto positivo no sentido positivo do eixo x , como demonstrado pela figura 3.1. A origem é definida no centro do corpo imerso no fluxo. Adota-se massa específica constante para o corpo ρ . A pressão é representada por p , enquanto o vetor velocidade do fluxo no eixo x é representado por u .

Figura 3.1- Representação corpo inserido em fluxo com velocidade horizontal de módulo u .



Fonte: Meliga et al. (2014)

Supondo um espaço fechado Ω , o escoamento é regido pelas equações de *Navier-Stokes*. Pela conservação de massa, por *Navier*:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot u = 0$$

(1)

Pela equação 1 e sabendo que o fluido estudado será considerado como incompressível, a densidade ρ não é uma função tempo, fazendo com que a equação 1 seja reduzida a:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

Com base no valor encontrado na equação 2 e pela conservação do momento, em Ω , o fluxo fica regido por:

$$\partial_t u + \nabla u \cdot u - \nabla \cdot \sigma(p, u) = 0 \quad (3)$$

Nos pontos referentes as dimensões do corpo, supõe-se $u = 0$, ou seja, a velocidade do fluxo nesses pontos é nula, uma vez que representam o corpo em questão.

O termo $\sigma(p, u)$ representa o tensor de tensão, sendo representado pela seguinte equação matemática:

$$\sigma(p, u) = -pI + \frac{1}{Re} (\nabla u + \nabla u^T) \quad (4)$$

O termo Re se refere ao número de Reynolds, o qual qualifica o tipo de escoamento com base na viscosidade dinâmica do fluido (μ), velocidade (u), massa específica do fluido e o comprimento do corpo em questão (L):

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (5)$$

Lembrando que será considerado para estudo escoamentos com números de Reynolds suficientemente baixos para serem considerados escoamentos laminares.

O princípio físico da análise de sensibilidade presente neste trabalho se baseia nos resultados da inserção de uma força de magnitude δf no fluxo. Estes resultados serão baseados no valor do arrasto em diferentes situações e diferentes geometrias para corpos imersos. A equação do arrasto pode ser definida como:

$$D = 2 \oint \{ \sigma(p, u) \cdot n \} \cdot e_x dl \quad (6)$$

Na equação 6, n representa o versor normal a superfície do corpo imerso no fluido. O termo e_x representa a divergência vetorial no eixo x .

3.2 RELAÇÃO DO ARRASTO COM A PERDA DE CARGA

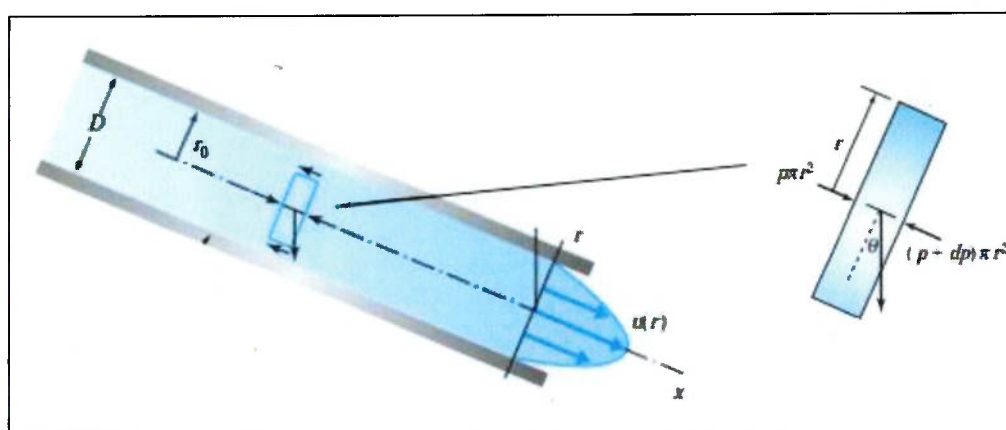
Para escoamentos internos a questão da análise do arrasto não fornece resultados pertinentes. É apropriado, nesses casos, uma análise da perda de carga do escoamento interno.

A perda de carga (λ) e o escoamento se relacionam através da equação 7:

$$p\pi r^2 - (p + dp)\pi r^2 = \lambda \quad (7)$$

Na equação 7, supõe-se um tubo circular como mostrado na imagem 3.2.

Figura 3.2 – Representação esquemática de um tubo circular de raio r .



Fonte: Mechanics of Fluids (2014).

Dessa forma, para a questão da perda de carga em escoamentos internos, analisa-se a variação da diferença de pressão para a implementação da análise de sensibilidade através da equação 7.

3.3 IMPLEMENTAÇÃO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A inserção de uma força de magnitude δf tem como consequência uma alteração no valor do arrasto. Essa alteração de valores pode ser representada matematicamente como o produto interno (|) entre a função sensibilidade e a própria força.

$$(a | b) = \int_{\Omega} a \cdot b \, dxdy \quad (8)$$

Tomando como base os parâmetros e características do fluxo existente, a equação 3 pode ser descrita como:

$$\nabla u_b \cdot u_b - \nabla \cdot \sigma(p_b, u_b) = 0 \quad (9)$$

Na equação 9, os valores p_b e u_b representam os parâmetros pressão e velocidade do fluxo base natural. Da mesma forma, a equação 06 fica na forma:

$$D = 2 \oint \{ \sigma(p_b, u_b) \cdot n \} \cdot e_x \, dl \quad (10)$$

Inserindo uma força δf ao fluxo, temos uma modificação na pressão e velocidade de magnitude δp_b e δu_b , respectivamente. Consequentemente há uma modificação de valores para o tensor de tensões, ocasionando um novo valor para o arrasto δD . O valor de δD pode ser expresso pela expressão 10, considerando os novos parâmetros. Representando a função sensibilidade por $(\nabla_f D)$, pode-se estabelecer uma relação entre a equação 10 e a função sensibilidade referente a nova força δf inserida:

$$\delta D = 2 \oint \{ \sigma(\delta p_b, \delta u_b) \cdot n \} \cdot e_x \, dl = (\nabla_f D | \delta f) \quad (11)$$

3.4 RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A expressão analítica da análise de sensibilidade é baseada na derivação de uma técnica computacional do multiplicador de *Lagrange*, utilizado em problemas de otimização. A equação 11 não fornece uma expressão analítica, sendo na verdade apenas o produto interno de valores reais. Dessa forma, obtemos:

$$\nabla_f D = u_b^\dagger \quad (12)$$

Considera-se $u_b^\dagger, p_b^\dagger$ a solução do sistema linear adjunto:

$$-\nabla u_b^\dagger \cdot u_b + \nabla u_b^T \cdot u_b^\dagger - \nabla \cdot \sigma(-p_b^\dagger \cdot u_b^\dagger) = 0 \quad (13)$$

A expressão 13 é criada para ser adjunta às equações de *Navier-Stokes* através da integração por partes e do teorema da divergência. Como resultado deste procedimento, obtemos a expressão analítica 14, como base para a simulação numérica.

$$\int_{\Omega} u_b^\dagger \cdot \delta f \, dx dy = \oint \{ \sigma(\delta p_b, \delta u_b) \cdot n \} \cdot u_b^\dagger \, dl \quad (14)$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Objetivando a análise e o estudo da otimização da perda de carga e arrasto através da análise de sensibilidade em um escoamento monofásico incompressível de fluxo constante e laminar em uma geometria de placa de orifício, utilizou-se softwares de simulação computacional considerando situações diversas e programas de análises gráficas.

Os métodos e os programas utilizados são descritos adiante, assim como a caracterização das situações simuladas.

4.1 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

A simulação computacional voltada para a análise da dinâmica dos fluídos, comumente conhecida como CFD, é resultado da interação de conceitos provenientes do cálculo numérico e da mecânica dos fluídos. As equações utilizadas para tal análise são resultado da modificação da equação diferencial de transporte aplicada a um certo volume. Matematicamente a equação se mostra como diferencial parcial, uma vez que envolve derivadas parciais de uma função com mais de uma variável independente. É sabido que tal equação não possui uma solução analítica, sendo necessário um método de discretização e uma posterior linearização para a obtenção uma forma algébrica para ser resolvida.

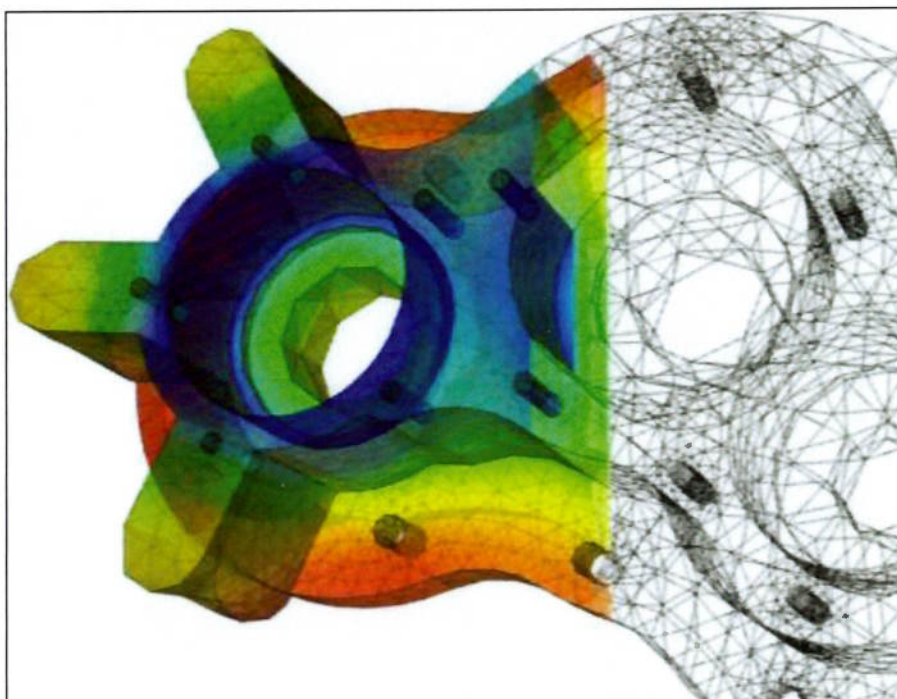
Dentre os principais métodos de discretização, destaca-se o Método de Elementos Finitos (FEM). O método trata o domínio trabalhado como um domínio discreto e limitado através da divisão de sua geometria em elementos, como mostrado na figura 4.1. Os elementos possuem, comumente, formas triangulares ou quadriculadas.

Os pontos de união dos elementos são definidos como ponto nodais e o conjunto é denominado malha. As equações diferenciais governantes são então integradas no domínio de cada célula.

A garantia da eficiência do procedimento do método de elementos finitos ocorre através de um estudo de convergência de resultados para diferentes tipos de malha

de um mesmo caso estudado. Com resultados que possuem pouca ou nenhuma variação para diferentes malhas, a eficiência do projeto é confirmada. Vale ressaltar que quanto maior o número de elementos gerados, mais confiável será o resultado. Posterior a este processo, a malha escolhida é então submetida a um processo iterativo com base nas equações previamente definidas, até que o resultado entre duas iterações consecutivas seja menor que um valor pré-determinado.

Figura 4.1 - Representação da divisão de um domínio em pequenos elementos no FEM.



Fonte: <http://ensus.com.br/elementos-finitos-quais-os-beneficios/>

A utilização do método de elementos finitos em simulações computacionais foi fortemente estudada por Zienkiewicz. Em seu livro *Introductory Lectures on the Finite Element Method* (1972) o autor discute a aplicação do método e, juntamente com Talyor e Zhu, publica também *The Finite Element Method – Its basis & fundamentals* (2000), no qual discutem a implementação do método aplicado a resolução de problemas de engenharia.

Max D. Gunzburguer se destaca em seus estudos do FEM aplicado a CFD. Em seu livro *Finite Element Methods for Viscous Incompressible Flows- A guide to theory, Practice, and Algorithms* (1989), o autor discute algoritmos e resultados matemáticos relevantes para a implementação de cálculos computacionais para casos de escoamentos incompressíveis.

4.2 MÉTODO ADJUNTO

O método adjunto pode ser entendido como um procedimento alternativo quando se objetiva uma otimização aplicada a problemas de CFD. Sua ideia foi desenvolvida por Pirroneau (1973). O principal benefício do método adjunto é a restrição ao processo iterativo de apenas situações com configurações realizáveis, poupando dessa forma a iteração para situações que fogem do possível para as condições pré-determinadas. Com isso, o tempo para a implementação da otimização é reduzido.

Esse benefício do método provém do fato da restrição da aplicação das equações com base nos domínios das variáveis consideradas para a situação. Logo, em uma situação de simulação escoamento com um grande número de variáveis, um processo iterativo como o método de elementos finitos juntamente com o método adjunto, é aconselhável uma vez que este grande número de variáveis acaba por delimitar e restringir os processos iterativos com base no domínio das variáveis. Desta forma, o cálculo do gradiente de sensibilidade se torna mais fácil.

Inicialmente estudadas por Barkley et al. (2012), quando aplicado a CFD e às equações de *Navier-Stokes*, o método demanda algumas modificações. Por exemplo: as equações de *Navier-Stokes* para os casos de escoamentos incompressíveis e isotérmicos (equações 1 e 2) são as próprias restrições para se considerar apenas as soluções realizáveis.

A aplicação com base nas equações de *Navier-Stokes* e sua implementação para o processo de análise de sensibilidade é estudado por diversos autores, entre eles, Patino et al. (2017) que utiliza do método para o estudo de controle de vórtices gerados por um cilindro em um escoamento. Meliga et al. (2014) também utilizam o método para a implementação da análise de sensibilidade para a força de arrasto através de um cilindro presente no escoamento.

4.3 SOFTWARE FREEFEM++

A execução do método de resolução para as situações de escoamento escolhidas foi feita através do software FreeFem++. Criado por *Frédéric Hetch*, o software utiliza uma linguagem de programação própria, sendo capaz de resolver sistemas não lineares em 2D e 3D. Seu método de resolução se baseia no processo iterativo do método de elementos finitos, como mostrado na figura 4.2. O código implementado, além do método de elementos finitos, se baseia também no método adjunto. No estudo que se segue, utilizou-se a versão 3.56, para o sistema operacional Windows em 64-bits.

Figura 4.2 – Programa FreeFem++ em execução.

```

259 : real diam = 0.1;
260 : umag = sqrt(u1*u1+u2*u2);
261 :
262 : deltad = -0.5*diam*( 0.8558 + 10.05*(diam*umag*reynolds)^(-0.7084) ) * um
263 :
264 : savevtk("Steady-Re"+reynolds+".vtk",Th,[(u1),(u2),0.0],vort,p,[phi1,phi2,
265 :
266 : sizestack + 1024 =12616 ( 11592 )

-- mesh: Nb of Triangles = 57766, Nb of Vertices 29265
number of required edges : 0
error in orientation of internal face beetwen region 0 , 4 to no zero value 122
teste = -2.83107e-015
Warning: -- Your set of boundary condition is incompatible with the mesh label.
-- Solve :
    min -0.000197663 max 1
    min -0.484875 max 0.484875
    min -0.0515644 max 0.0690411
Warning: -- Your set of boundary condition is incompatible with the mesh label.
-- Solve :
    min -0.0322242 max 1.20973
    min -0.578704 max 0.578798
    min -0.483275 max 0.494016
Newton iter: 1 residual 0.736489 time to solve 10.268
Warning: -- Your set of boundary condition is incompatible with the mesh label.

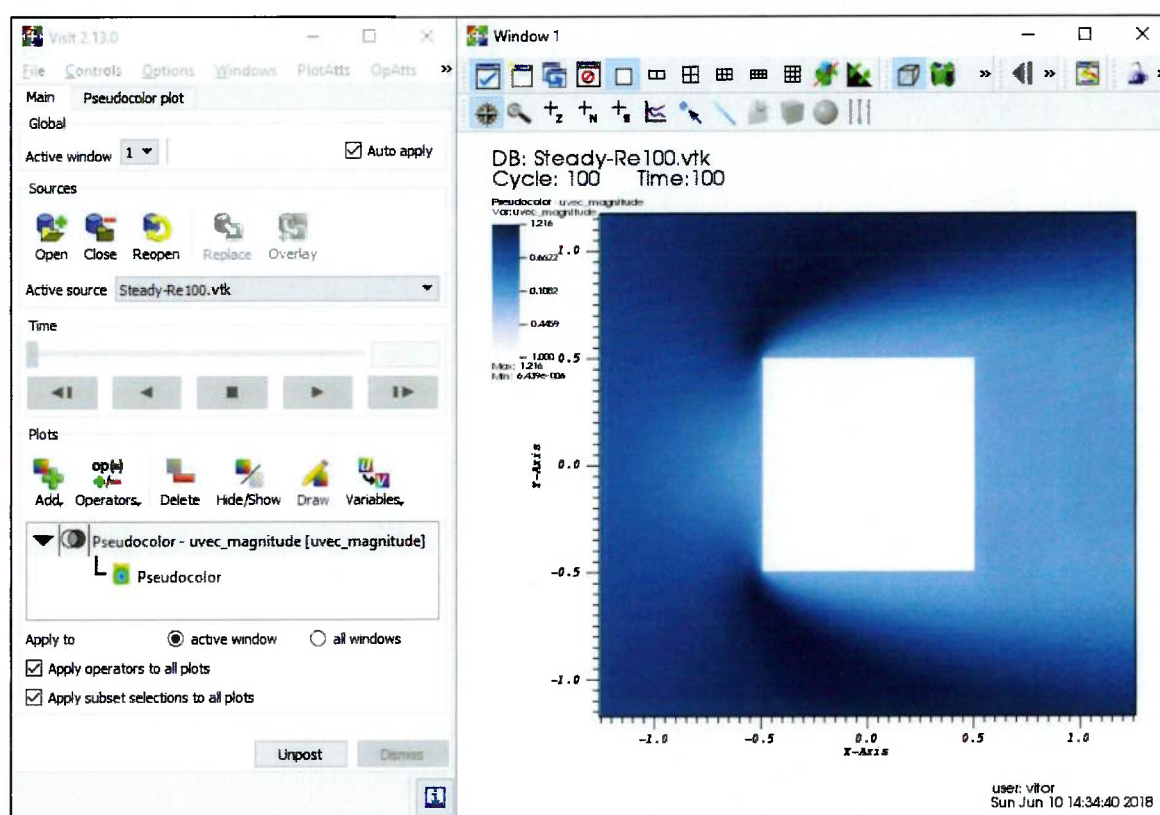
```

Fonte: do próprio do autor

4.4 SOFTWARE VISIT

Para a visualização gráfica dos resultados gerados pelo programa FreeFem++, utilizou-se o software VisIt. Este foi desenvolvido pelo *Department of Energy (DOE) Advanced Simulation and Computing Initiative (ASCI)* para a visualização e análise de resultados de simulações baseadas em malhas 2D e 3D, como mostrado na figura 4.3.

Figura 4.3 – Exemplo de interpretação gráfica no programa VisIt.



Fonte: do próprio do autor

A versão utilizada neste estudo é a 2.13.0 voltada para o sistema operacional Windows 64-bits.

4.5 MÉTODO DE EXECUÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Utilizando o software FreeFem++, executou-se o caso de um escoamento de fluxo constante laminar com diferentes características de escoamento e diferentes quantidades de corpos inserido neste escoamento. O método de discretização do domínio gerou elementos com geometria triangular.

Visto que se trata de estudo considerando um regime laminar, os números de Reynolds adotados foram 40 e 100. Os corpos inseridos no escoamento são descritos por cilindros com diâmetro 0,1. É válido ressaltar que o problema estudado é tratado com adimensionais, de forma que as unidades das grandezas aqui tratadas são por consequência, também adimensionais.

4.5.1 Validação

O processo de validação do método foi feito com base nos estudos de Meliga et al. em seu artigo *Sensitivity of aerodynamic forces in laminar and turbulent flow past a square cylinder* (2014) para o caso de fluxo externo laminar constante passando por um cilindro com diâmetro 0,1, com $Re = 40$ e também $Re = 100$. Para ambas as simulações a malha é composta por 57766 triângulos e 29265 vértices.

A situação descrita foi simulada nas mesmas condições e os resultados dos dois estudos foram comparados.

4.5.2 Análise da convergência do FEM

Procedimento importante para a eficiência do método de elementos finitos, considerou-se agora o escoamento interno de fluxo constante e laminar através de uma placa de orifício, utilizando 3 malhas com características diferentes, considerando $Re = 40$.

Tabela 4.1 – Características para os três tipos de malhas utilizadas.

Malha	Número de triângulos	Número de vértices
n20	5784	3171
n40	23238	12171
n60	55867	28759

4.5.3 Simulação Numérica Direta (DNS)

Foram colocados na situação de escoamento laminar com fluxo constante caracterizado com $Re = 40$ através de uma placa de orifício, dois cilindros no escoamento com diâmetros de 0,1. Analisou-se a influência da presença do segundo cilindro no escoamento.

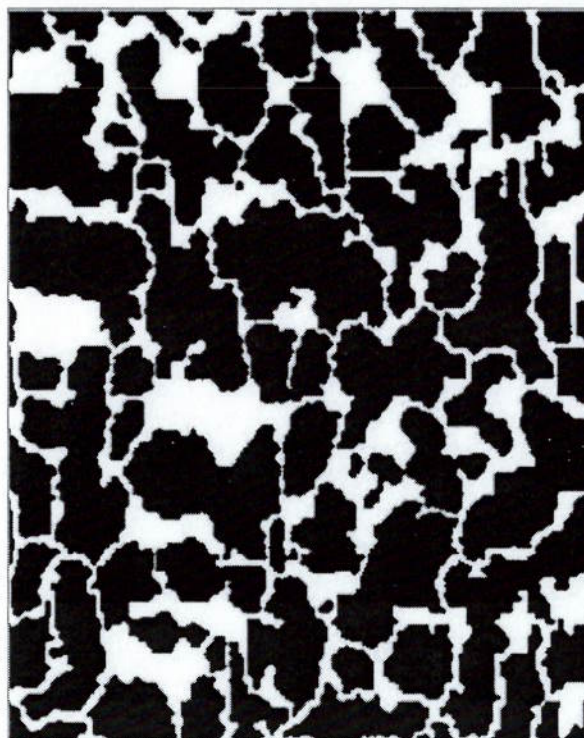
4.5.4 Situação de estreitamento da placa de orifício com $Re = 100$

Para dada geometria de placa de orifício e considerando $Re = 100$, simulou-se um escoamento laminar com fluxo constante com um cilindro de diâmetro 0,1 inserido ao fluxo. Posteriormente, a situação foi modificada para uma geometria de placa de orifício mais estreita e a simulação foi executada novamente.

4.5.5 Aplicação ao modelo de rocha

Com base na malha do modelo de rocha mostrado pela figura 4.4, aplica-se a ideia da análise de sensibilidade afim de descobrir os locais mais sensíveis a permeabilidade e aqueles com maior propensão ao escoamento do fluxo dentro desta rocha. Na figura 4.4, os locais brancos representam a região porosa, enquanto a região escura representa a região não porosa. Tal figura é a mesma utilizada por Boek et al. (2010) em seu estudo.

Figura 4.4 – Representação da malha utilizada na simulação.



Fonte: Boek et al. (2010)

Para este caso, considera-se um Reynolds de 0.00196208 e uma situação de escoamento de um óleo 100 vezes mais viscoso que a água.

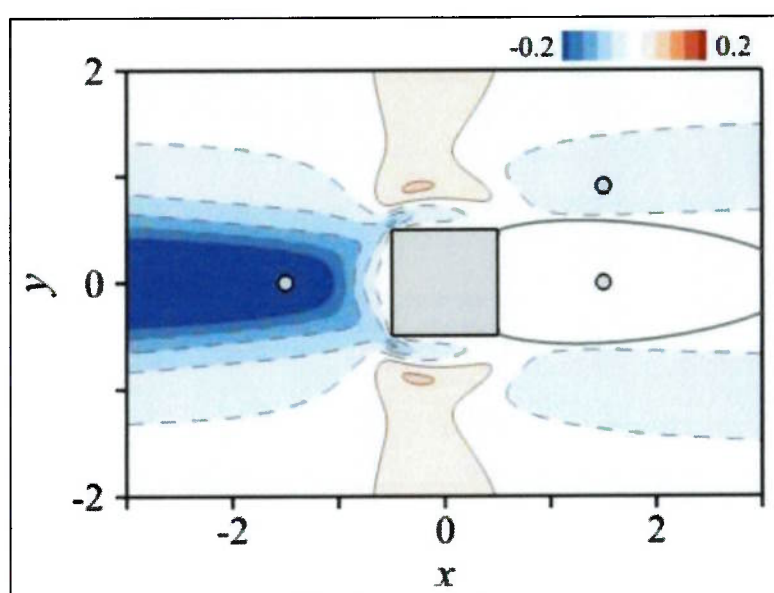
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o procedimento da simulação das diversas situações com o software FreeFem++, os resultados foram interpretados com a ajuda do software VisIt quando conveniente. Os resultados obtidos em cada processo são descritos adiante.

5.1 VALIDAÇÃO

Com base no artigo de Meliga et al. (2014), para $Re = 40$ a análise do arrasto sobre o cilindro é relatada na figura 5.1.

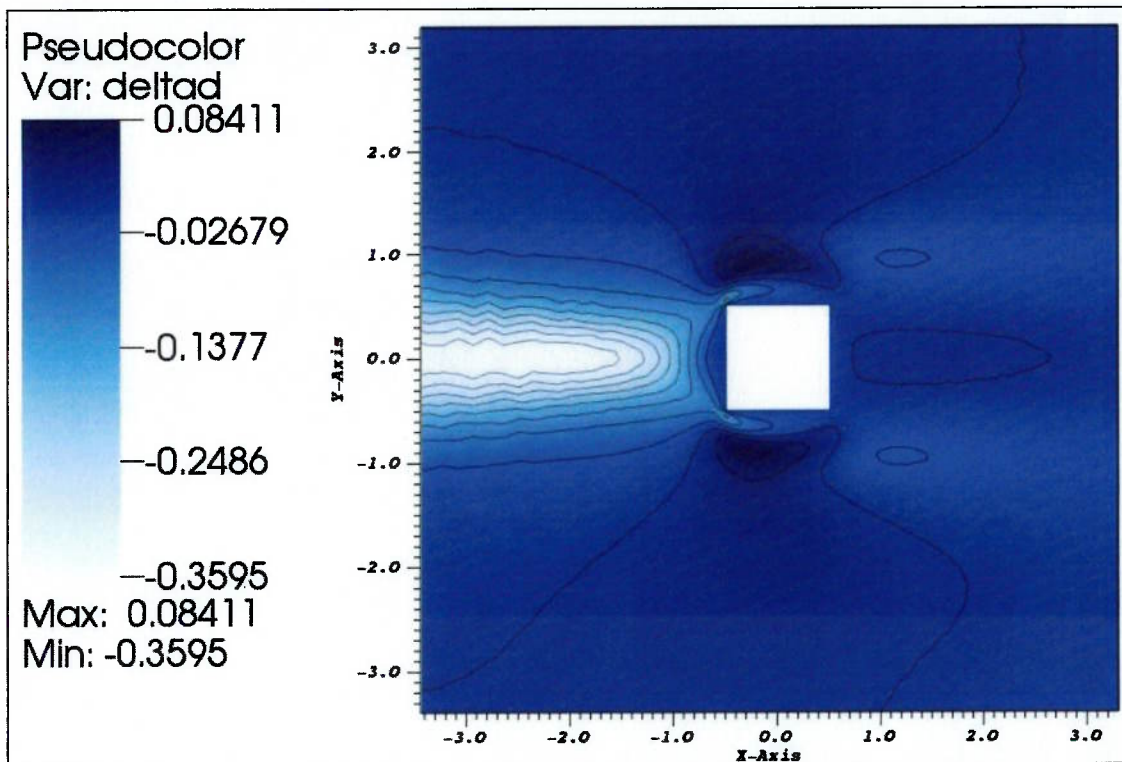
Figura 5.1 – Variação da força de arrasto sob o cilindro de diâmetro 0.1 e $Re = 40$ segundo Meliga et al. (2014).



Fonte: Meliga et al. (2014)

O resultado da simulação através do FreeFem++ para o caso de $Re = 40$ é mostrado na figura 5.2.

Figura 5.2 – Variação da força de arrasto para $Re = 40$ e cilindro com diâmetro 0.1.



Fonte: do próprio do autor

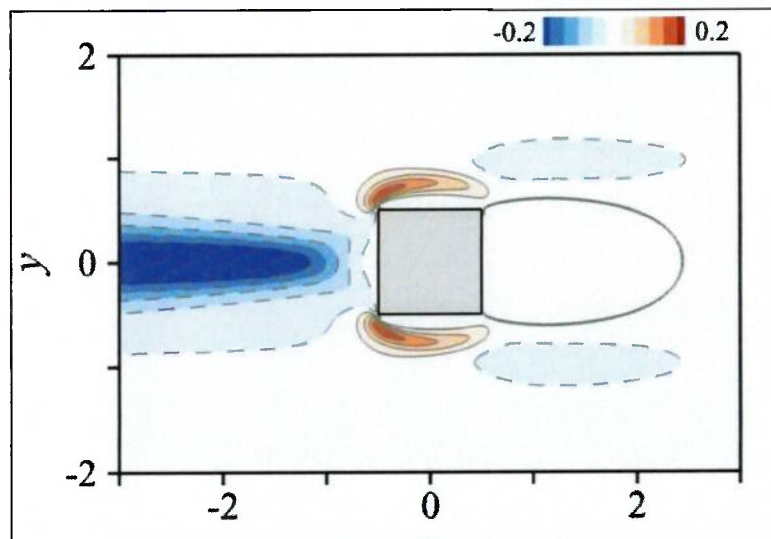
Comparando as imagens 5.1 e 5.2, observa-se que as características da força de arrasto sob o cilindro são semelhantes, apresentando contornos parecidos e valores condizentes.

As regiões superiores e inferiores ao cilindro são aquelas que apresentam maiores valores da força de arrasto, chegando a valores de 0,08 (representadas pela cor azul escuro na figura 5.2). É válido observar também que essas regiões não se encontram imediatamente acima ou abaixo do cilindro, ou seja, há uma distância de aproximadamente 0.3 entre o cilindro e essas regiões.

Já a região de menor arrasto ocorre na região anterior ao cilindro, representada na figura 5.2 pela cor branca.

Para o caso $Re = 100$, o resultado encontrado por Meliga et al. é demonstrado pela figura 5.3.

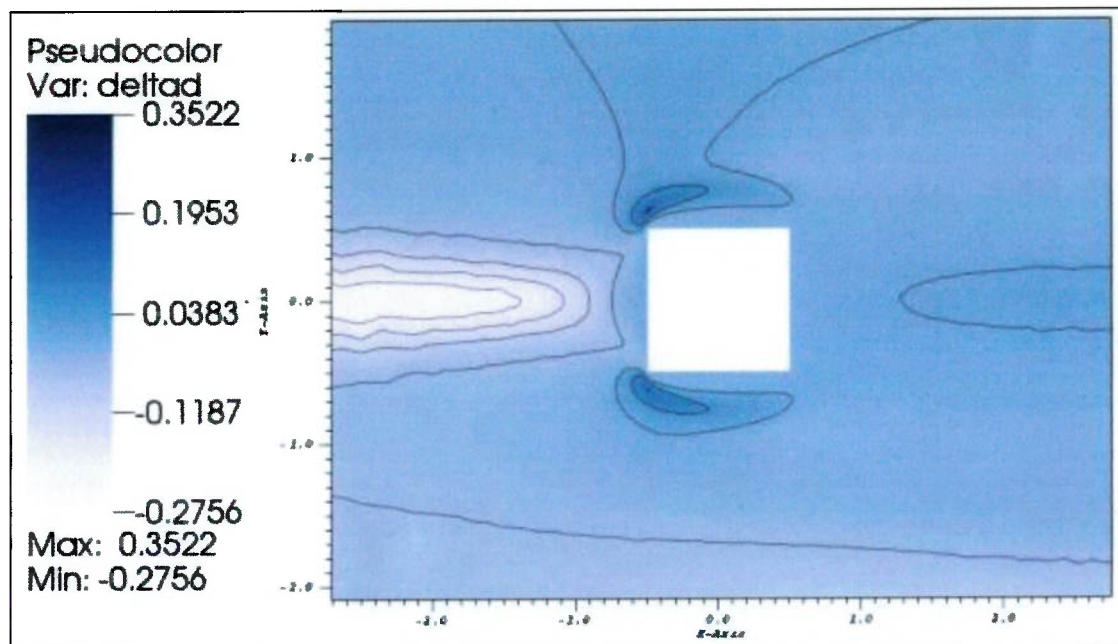
Figura 5.3 – Variação da força de arrasto sob o cilindro de diâmetro 0.1 e $Re = 100$ segundo Meliga et al (2014).



Fonte: Meliga et al. (2014)

O resultado da simulação através do FreeFem++ para o caso de $Re = 100$ é mostrado na figura 5.4.

Figura 5.4- Variação da força de arrasto para $Re = 100$ e cilindro com diâmetro 0.1.



Fonte: do próprio do autor

Comparando as figuras 5.3 e 5.4 é possível perceber que assim como no caso de $Re = 40$, o resultado da simulação no FreeFem++ apresenta semelhanças significativas com o resultado obtido por Meliga et al.. Os contornos das regiões são semelhantes, assim como seus respectivos valores.

As regiões de maior força de arrasto na situação de $Re = 100$ estão localizadas nos vértices esquerdos do cilindro representado e em comparação com o caso da figura 5.2 ($Re = 40$) pode-se ver que as regiões se apresentam mais perto dos limites do cilindro.

Quanto a região de menor valor de força de arrasto, localiza-se anterior ao cilindro assim como no caso de $Re = 40$ (figura 5.2).

5.2 ANÁLISE DA CONVERGÊNCIA DO FEM

Utilizando três tipos de malhas diferentes, denominadas n20, n40 e n60 verificou que os valores obtidos para perda de carga e arrasto não apresentam grande discrepância para os três tipos de malha, como relatado pelas tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1- Valores de perda de carga encontrados para os 3 tipos de malhas.

Malha	Valor da perda de carga (Pressão Adimensional)
n20	9,6721
n40	9,4102
n60	9,9773

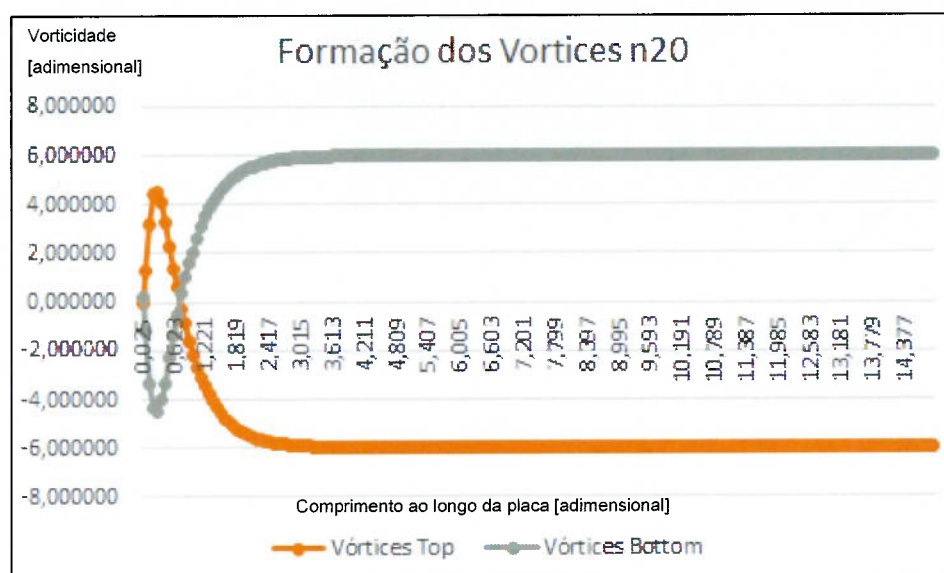
Tabela 5.2- Valores da força de arrasto encontrada para os 3 tipos de malhas.

Malha	Valor do Arrasto (Força Adimensional)
n20	9,0380
n40	9,1907
n60	9,0915

Se observarmos os valores de vorticidade nas paredes superior (Top) e inferior (Bottom) obtidos para os 3 casos descritos, percebe-se que há uma simetria com ínfima variação de valores, como demonstrado pelas figuras 5.5, 5.6 e 5.7.

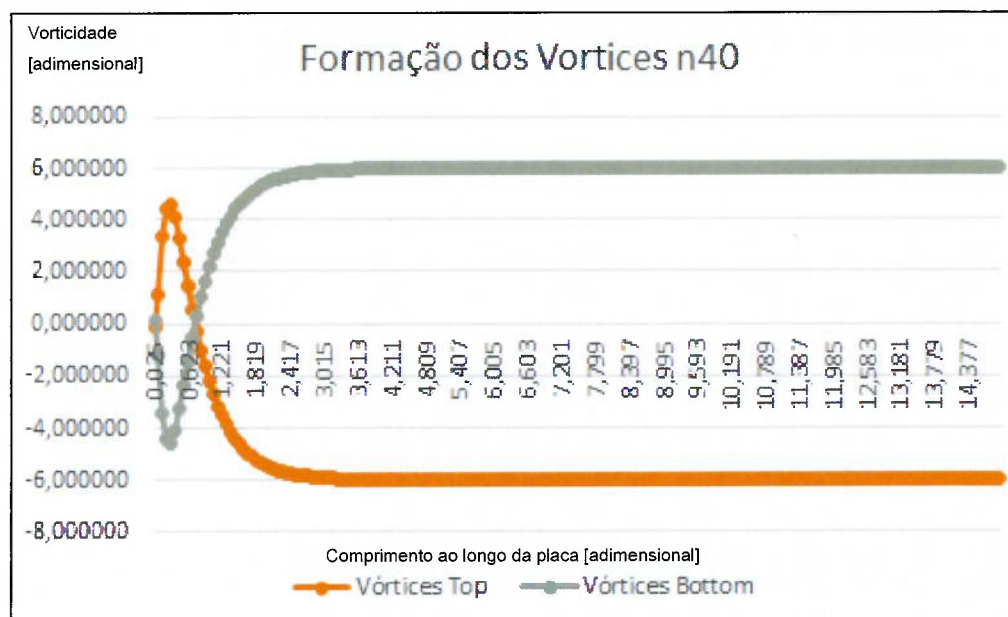
O eixo x das figuras 5.5, 5.6 e 5.7 representa o comprimento ao longo do duto levando em consideração que a placa de orifício se encontra na posição (0,0). Logo, as informações relatadas por tais imagens demonstram a formação de vórtices após a placa. O eixo y representa o valor da vorticidade.

Figura 5.5 – Análise da formação de vórtices para a malha n20.



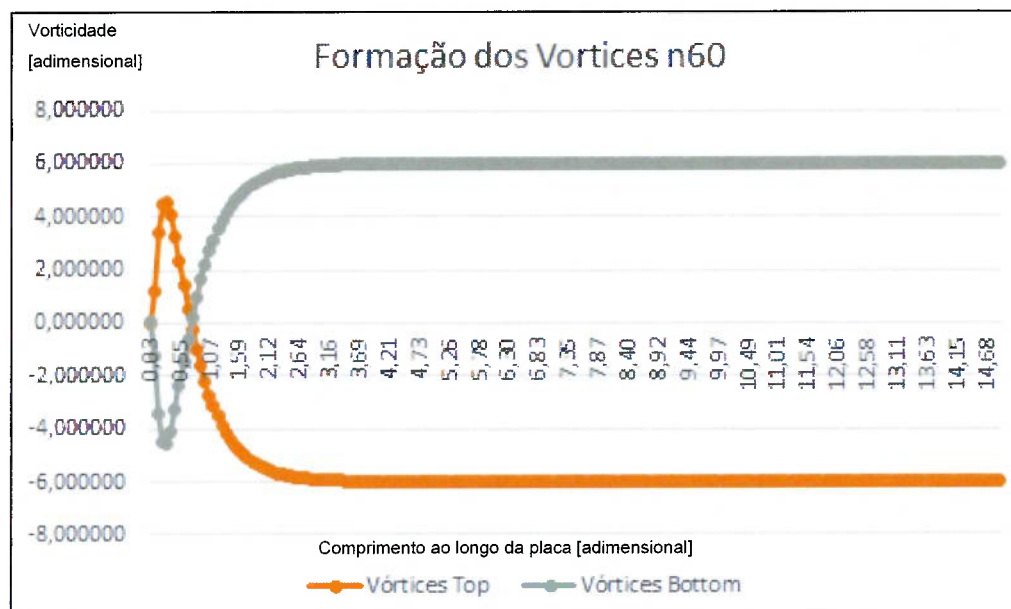
Fonte: do próprio do autor.

Figura 5.6 – Análise da formação de vórtices para a malha n40.



Fonte: do próprio do autor.

Figura 5.7 – Análise da formação de vórtices para a malha n60.



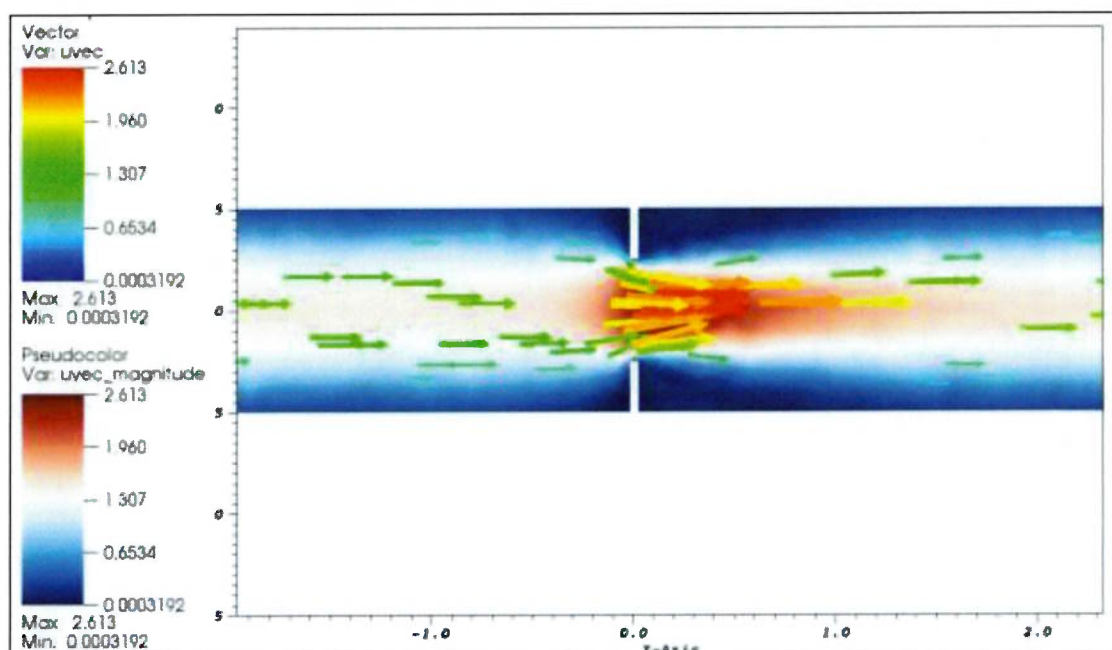
Fonte: do próprio do autor.

Os dois pontos com vorticidade igual a zero representam respectivamente os pontos de separação e recolamento do escoamento. Nas imagens 5.5 a 5.7 esses pontos ocorrem aproximadamente nos valores (0;0,07) e (0;0,6).

As figuras 5.8 a 5.10 demonstram os vetores de velocidade e sua variação na região da placa de orifício. Nas 3 situações é possível observar que logo após as a placa, as regiões superior e inferior apresentam velocidade praticamente negativa, identificadas com a cor azul.

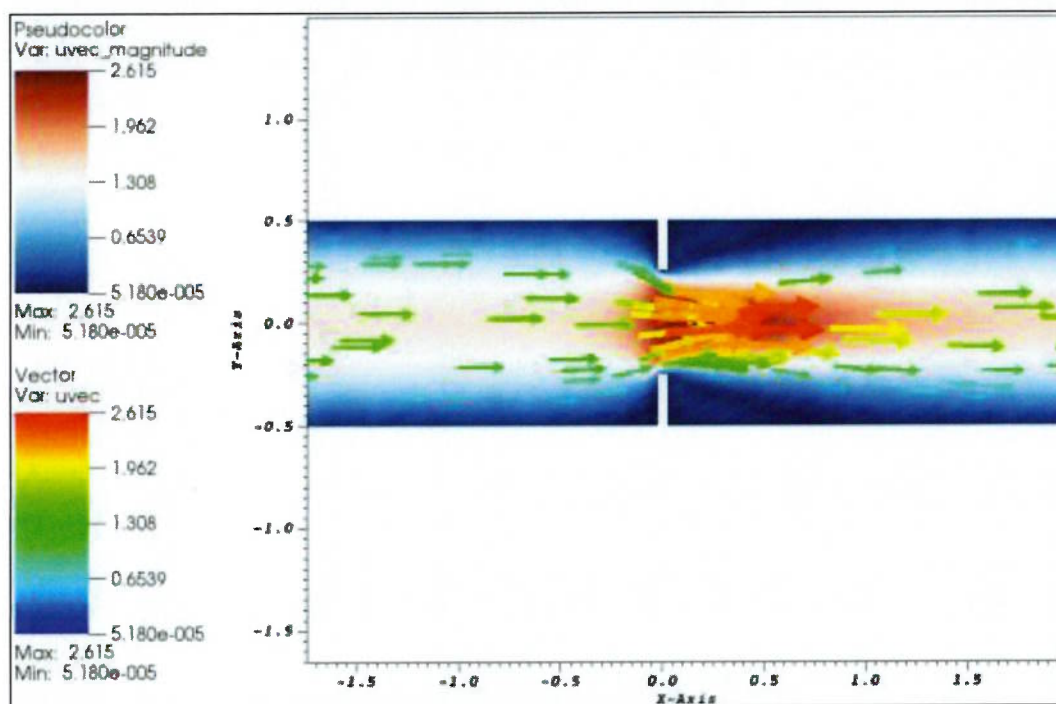
A maior velocidade ocorre na região central, imediatamente na placa. Tal fato pode ser explicado pela diminuição da área de vazão proporcionado pela placa de orifício.

Figura 5.8 – Vetores velocidade para a malha n20.



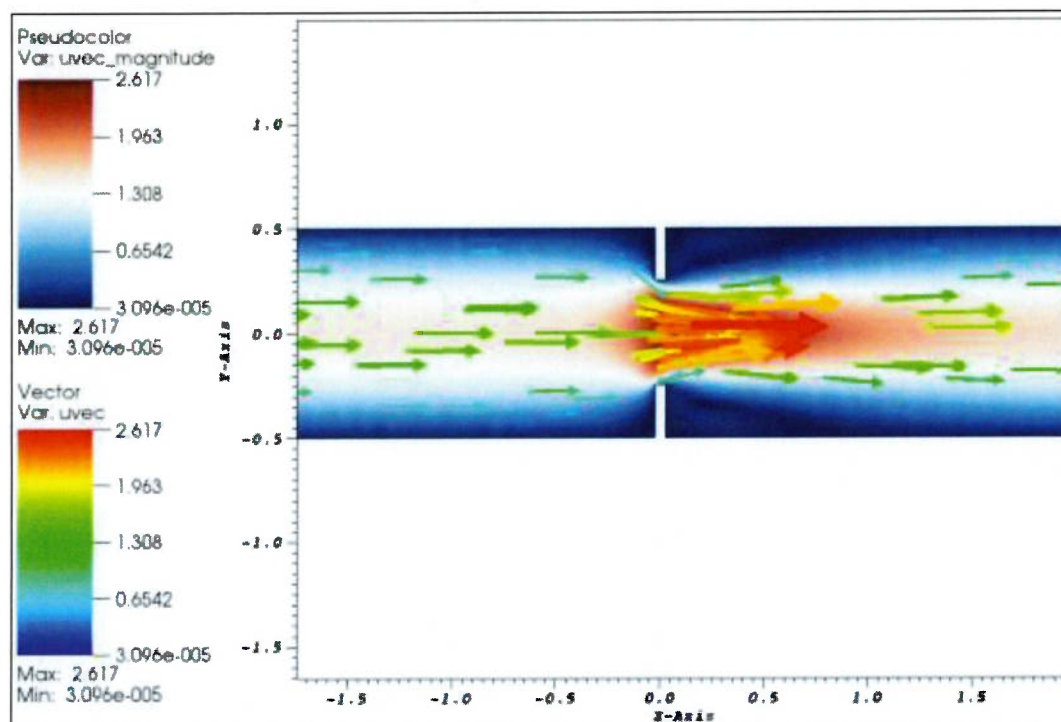
Fonte: do próprio do autor

Figura 5.9- Vetores velocidade para a malha n40.



Fonte: do próprio do autor

Figura 5.10- Vetores velocidade para a malha n60.

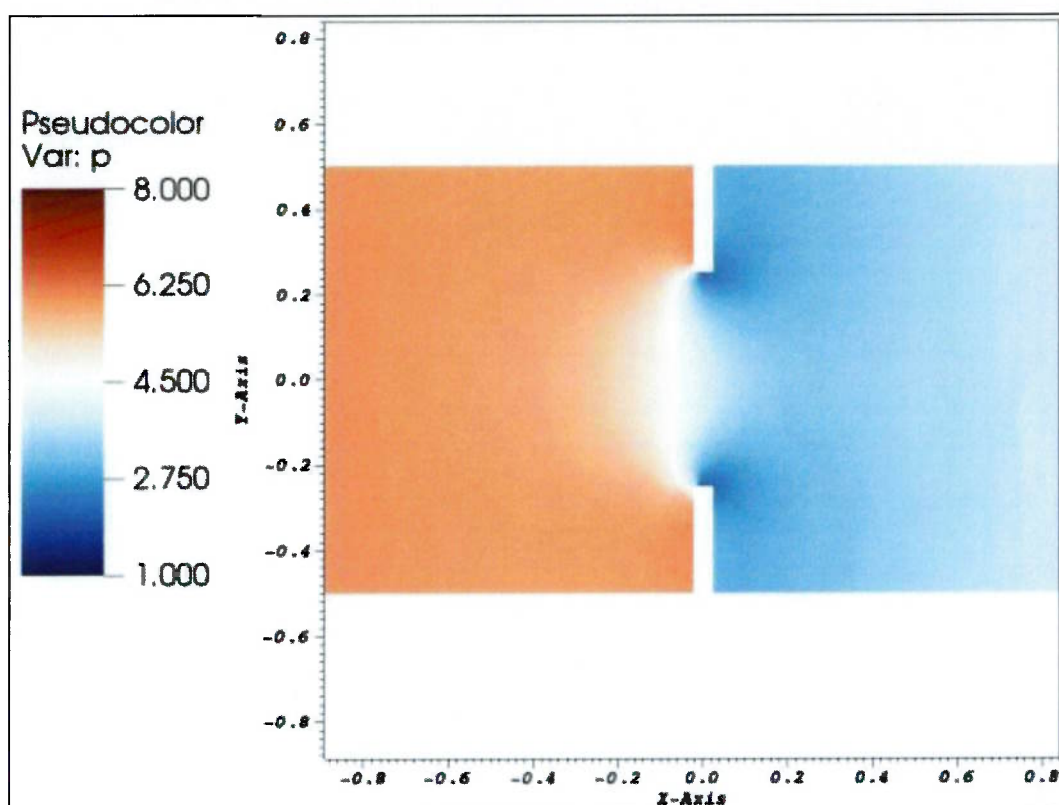


Fonte: do próprio do autor

Uma observação interessante a ser feita e bem visível neste caso é a questão da discretização das malhas e dos resultados gerados. Como descrito no tópico 4.1, quanto mais discretizado for o domínio, melhor será a geração dos resultados. Analisando as imagens 5.8 e 5.10, por exemplo, e, sabendo que a malha n60 é mais discretizada que a malha n20, é visível que o resultado gerado pela malha n60 possui resultados mais precisos melhor delimitados do que a n20, mesmo sabendo que ambas chegaram a resultados coincidentes.

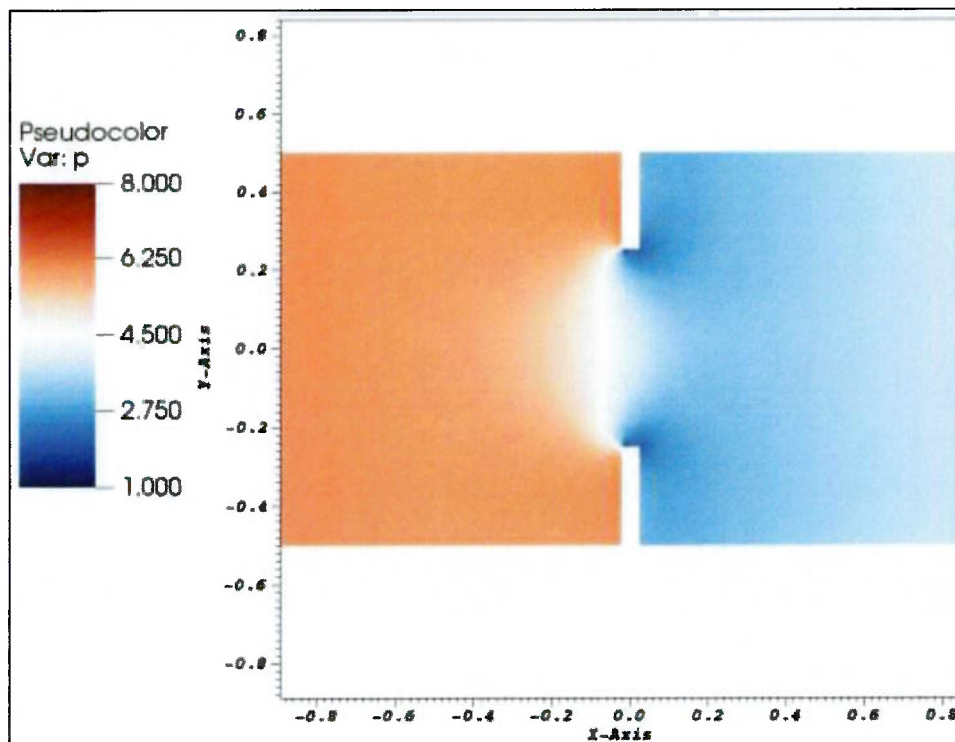
A plotagem das pressões também pode ser feita para os tipos diferentes de malhas. As imagens 5.11 a 5.13 relatam tais situações.

Figura 5.11 – Variação da pressão ao longo do escoamento para a malha n20.



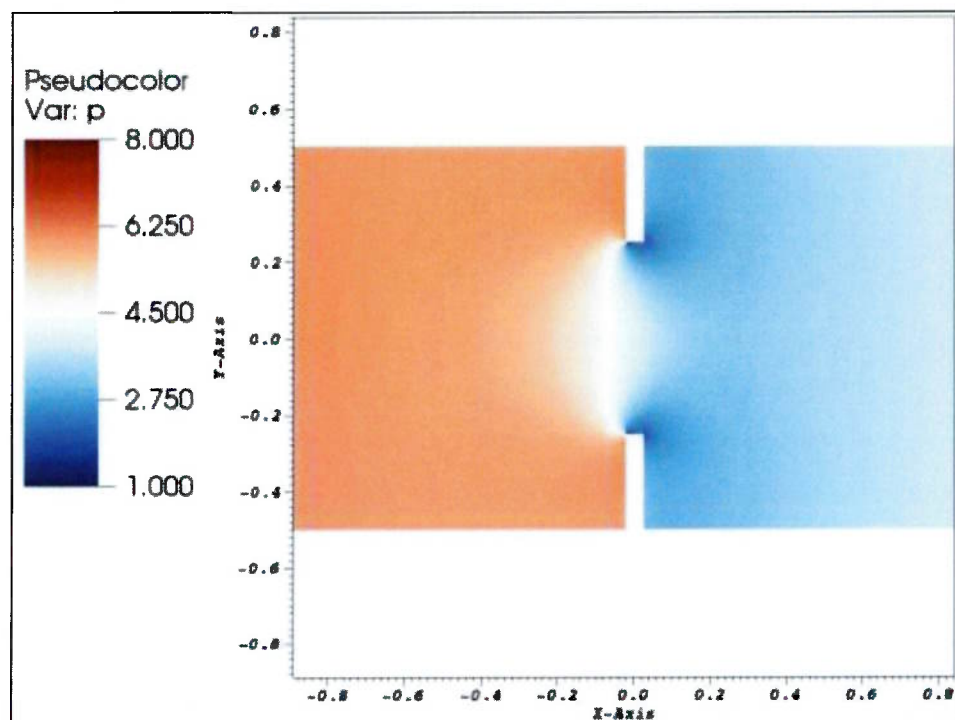
Fonte: do próprio do autor

Figura 5.12- Variação da pressão ao longo do escoamento para a malha n40.



Fonte: do próprio do autor

Figura 5.13- Variação da pressão ao longo do escoamento para a malha n60.

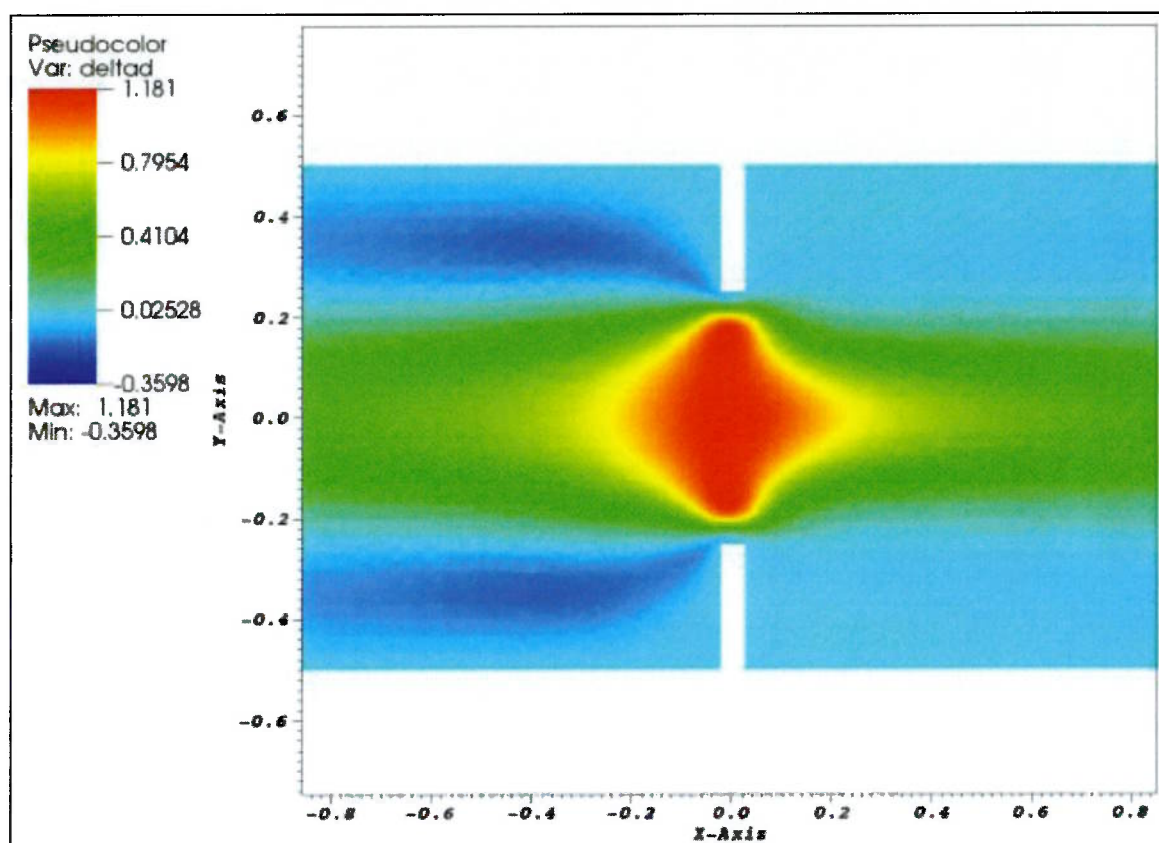


Fonte: do próprio do autor

Observa-se pelas figuras 5.11 a 5.13 que após a placa, a pressão diminui consideravelmente. Tal fato provém da questão da perda de carga gerada pela placa de orifício. Além disso, nos vértices direitos da placa, temos as regiões de mínima pressão. Nas figuras 5.11, 5.12 e 5.13 é possível observar que após a placa a pressão vai caindo gradualmente até seu valor mínimo. Em todas as situações, na região da entrada da placa a pressão fica por volta de 4.5.

Dada a questão da convergência, analisando a malha n60 em relação a função sensibilidade, observamos a situação descrita pela figura 5.14

Figura 5.14- Variação da força de arrasto para a malha n60.



Fonte: do próprio do autor

Pelos dados obtidos, na figura 5.14, observa-se que as regiões anteriores a placa e de cor azul escura representam regiões propensas a diminuição da força de arrasto para inserção de corpos de controle, uma vez que apresentam valor de variação negativa.

5.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DIRETA (DNS)

Com a presença de dois pequenos cilindros anteriores a placa exatamente nas regiões de diminuição da força de arrasto, como descrito na imagem 5.14, os valores da variação da pressão e força de arrasto tiveram seus valores alterados. As tabelas 5.3 e 5.4 descrevem tal alteração.

Tabela 5.3- Valor da perda de carga para dois cilindros anteriores a placa

Malha	Valor da perda de carga (Pressão Adimensional)
Caso 03	9,79025

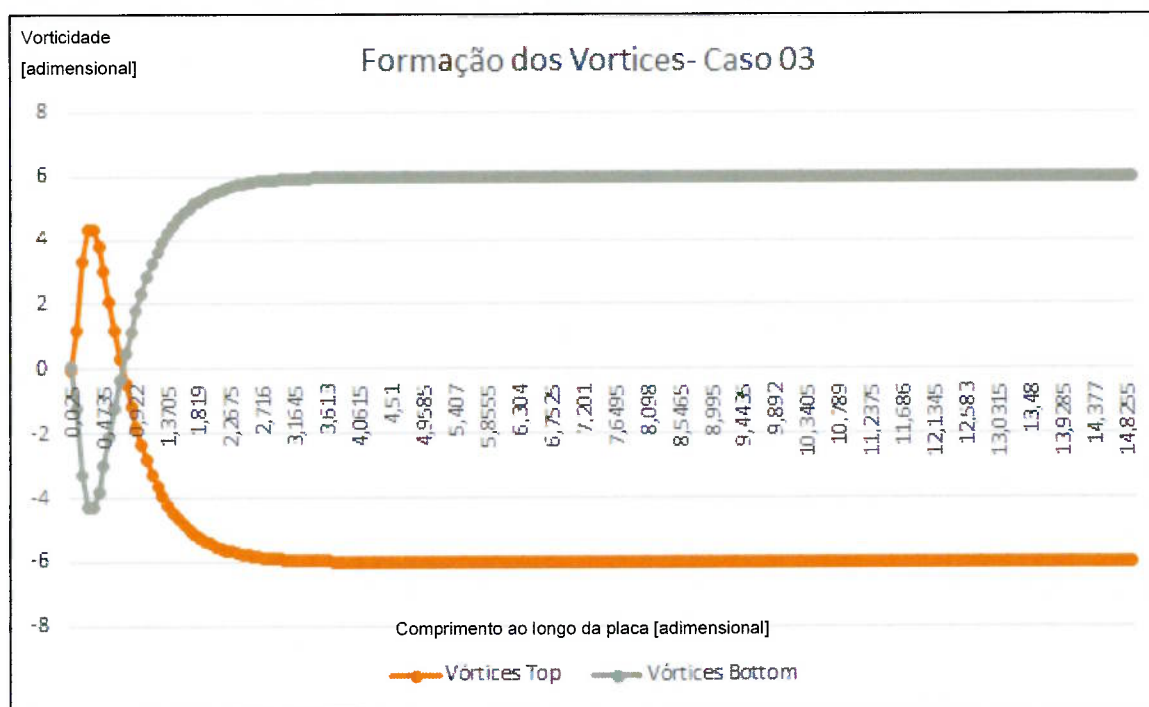
Tabela 5.4 - Valor da força de arrasto para dois cilindros anteriores a placa

Malha	Valor do Arrasto (Força Adimensional)
Caso 03	8,90785

Em comparação com as tabelas 5.1 e 5.2, tomando como base a malha n60 por ser a mais discretizada, observa-se que os valores de perda de carga e arrasto diminuíram, respectivamente em 2% e 3% respectivamente. Isso se deve a presença dos dois cilindros no escoamento.

Para a questão dos vórtices, há uma pequena modificação para os pontos onde a vorticidade é igual a zero: (0,01) e (0;0,73) aproximadamente, como demonstrado na figura 5.15. Ainda assim, há uma simetria na vorticidade nas paredes superiores e inferiores. O eixo x da figura representa o comprimento ao longo do duto levando em consideração que a placa de orifício se encontra na posição (0,0). Logo, as informações relatadas por tais imagens demonstram a formação de vórtices após a placa. O eixo y representa o valor da vorticidade.

Figura 5.15- Análise da formação de vórtices para a malha do caso 03.



Fonte: do próprio do autor

5.4 SITUAÇÃO DE ESTREITAMENTO DA PLACA DE ORIFÍCIO COM $Re = 100$

Considerando $Re = 100$, para o escoamento através da placa de orifício e para uma placa de orifício mais estreita, os valores de perda de carga e força de arrasto encontrados são descritos nas tabelas 5.5 e 5.6.

Tabela 5.5- Valor da perda de carga para $Re = 100$.

Malha	Valor da perda de carga (Pressão Adimensional)
Caso 04- Placa Normal	4,37893
Caso 04- Placa mais estreita	12,2152

Tabela 5.6 - Valor força de arrasto para $Re = 100$.

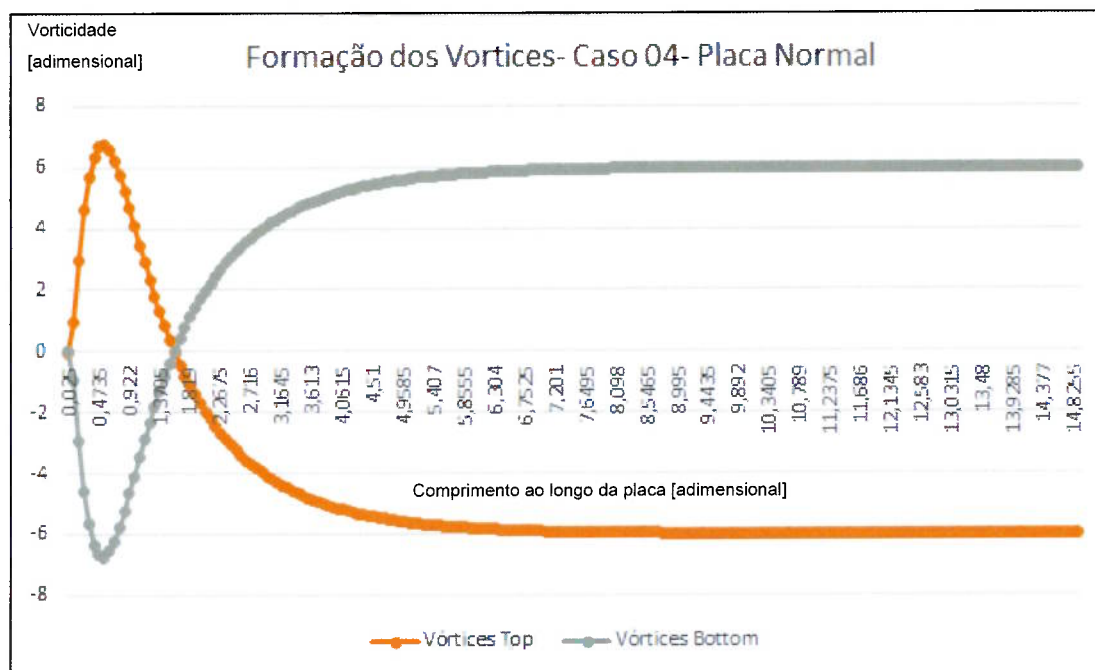
Malha	Valor do Arrasto (Força Adimensional)
Caso 04- Placa Normal	4,16910
Caso 04- Placa mais estreita	12,0259

Analisando as tabelas 5.5 e 5.6 é possível verificar que a perda de carga e o arrasto foram aumentados cerca de em 183% devido a mudança na geometria da placa.

A questão da vorticidade nas paredes superiores e inferiores também sofreu alterações consideráveis para as duas situações.

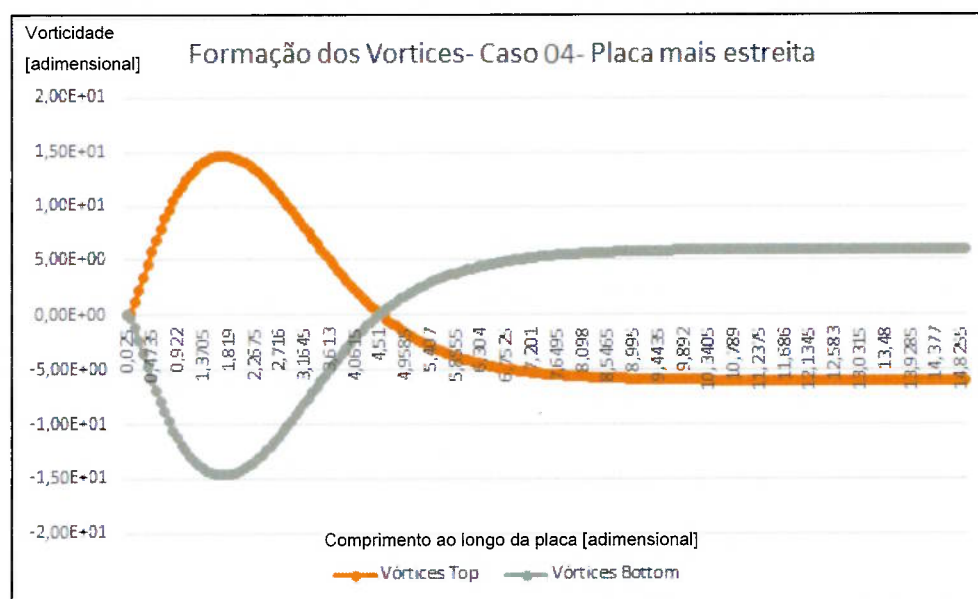
As figuras 5.16 e 5.17 mostram que as alterações nas dimensões da placa aumentaram o módulo desta vorticidade, sendo seu máximo cerca de o dobro da situação com a placa normal. Além disso, é possível ver que a distância entre os dois pontos com vorticidade igual a zero estão mais distantes um do outro. Por fim, após a estabilização desta vorticidade, vê-se que o valor atingido é menor que seu ponto de máximo, situação contrária em comparação com todas as outras análises. O eixo x das figuras 5.16 e 5.17 representa o comprimento ao longo do duto levando em consideração que a placa de orifício se encontra na posição (0,0). Logo, as informações relatadas por tais imagens demonstram a formação de vórtices após a placa. O eixo y representa o valor da vorticidade.

Figura 5.16 - Análise da formação de vórtices com $Re = 100$.



Fonte: do próprio do autor

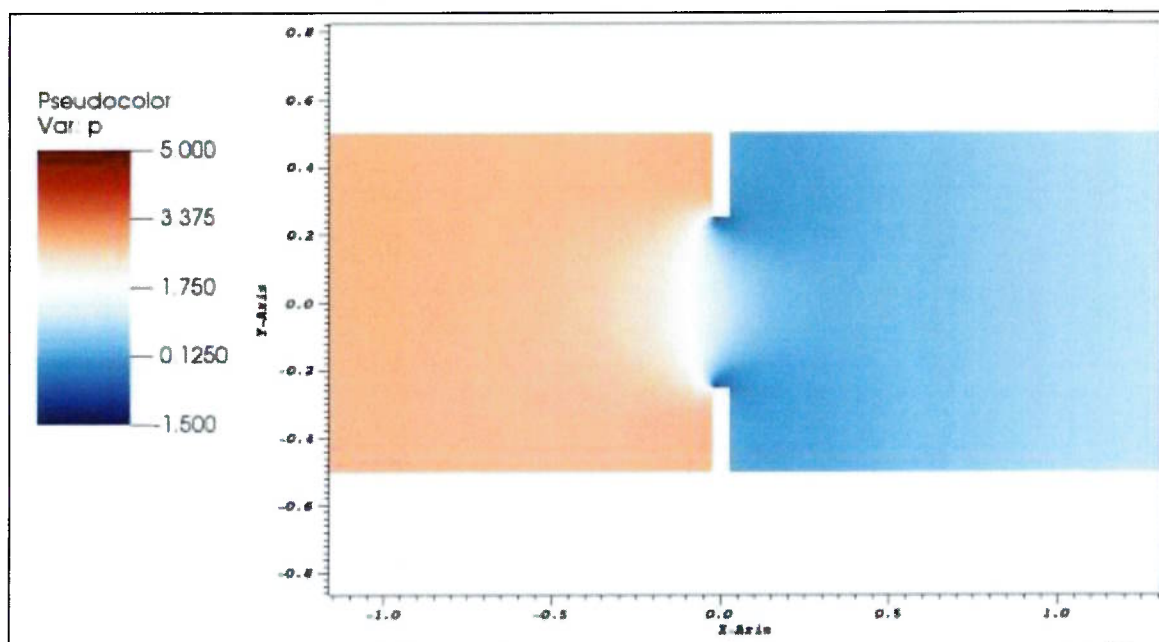
Figura 5.17- Análise da formação de vórtices $Re = 100$ e placa mais estreita



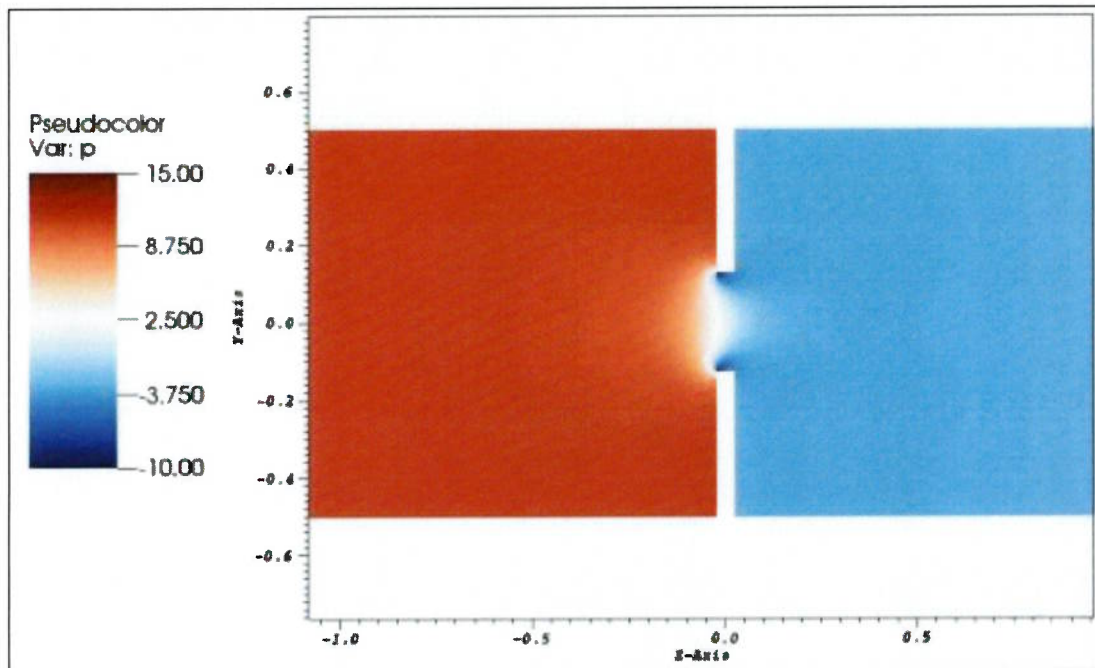
Fonte: do próprio do autor

A análise da velocidade e da variação da pressão são relatadas pelas imagens 5.18 a 5.21.

Figura 5.18- Variação da pressão para $Re = 100$.

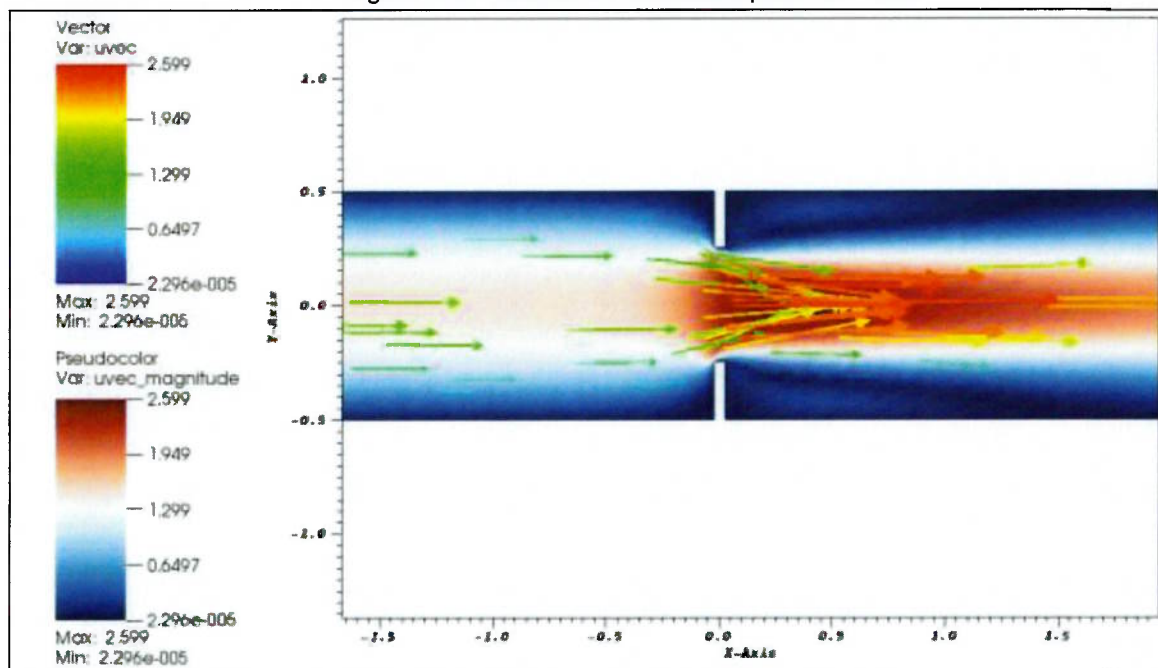


Fonte: do próprio do autor

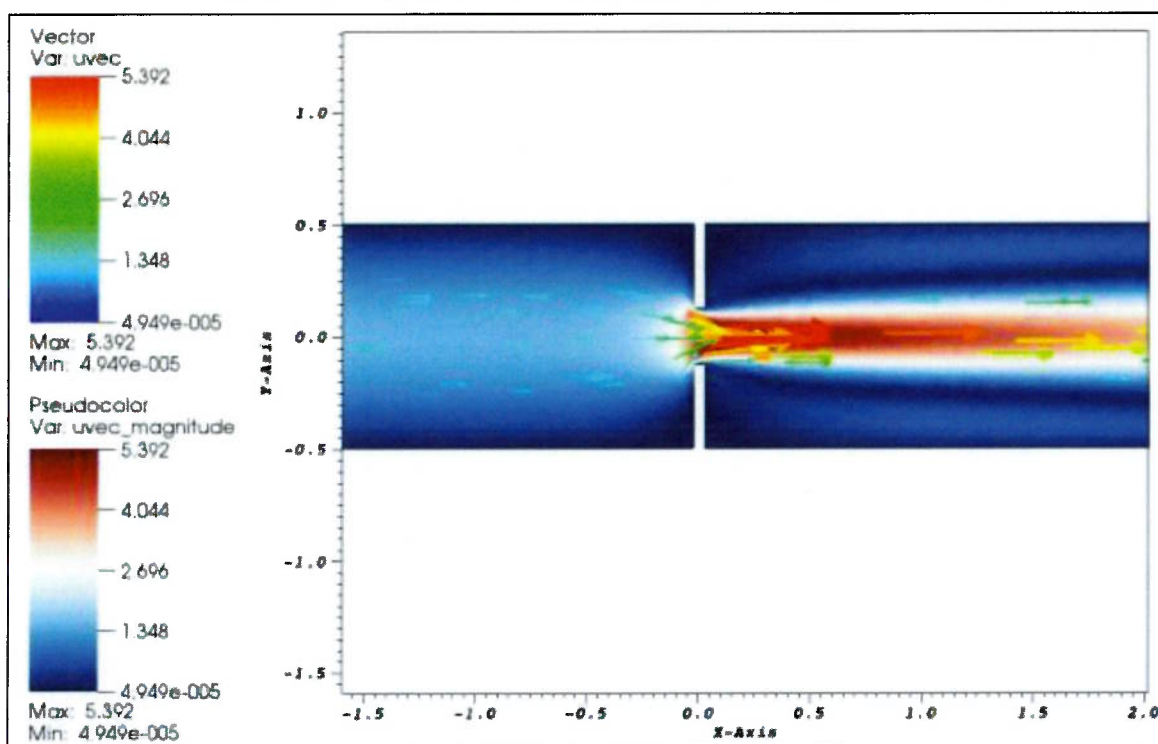
Figura 5.19 - Variação da pressão para $Re = 100$ e placa mais estreita

Fonte: do próprio do autor

Pela análise das figuras 5.17 e 5.18 juntamente com a tabela 5.4, observa-se a questão da grande diferença de pressão entre os dois casos: a figura 5.18 relata uma pressão envolvida na situação de escoamento. Como semelhança, as duas situações mostram pressões elevadas anteriores a placa que vão diminuindo gradualmente após esta geometria.

Figura 5.20- Vetores de velocidade para $Re = 100$.

Fonte: do próprio do autor

Figura 5.21 – Vetores de velocidade para $Re = 100$ e placa mais estreita.

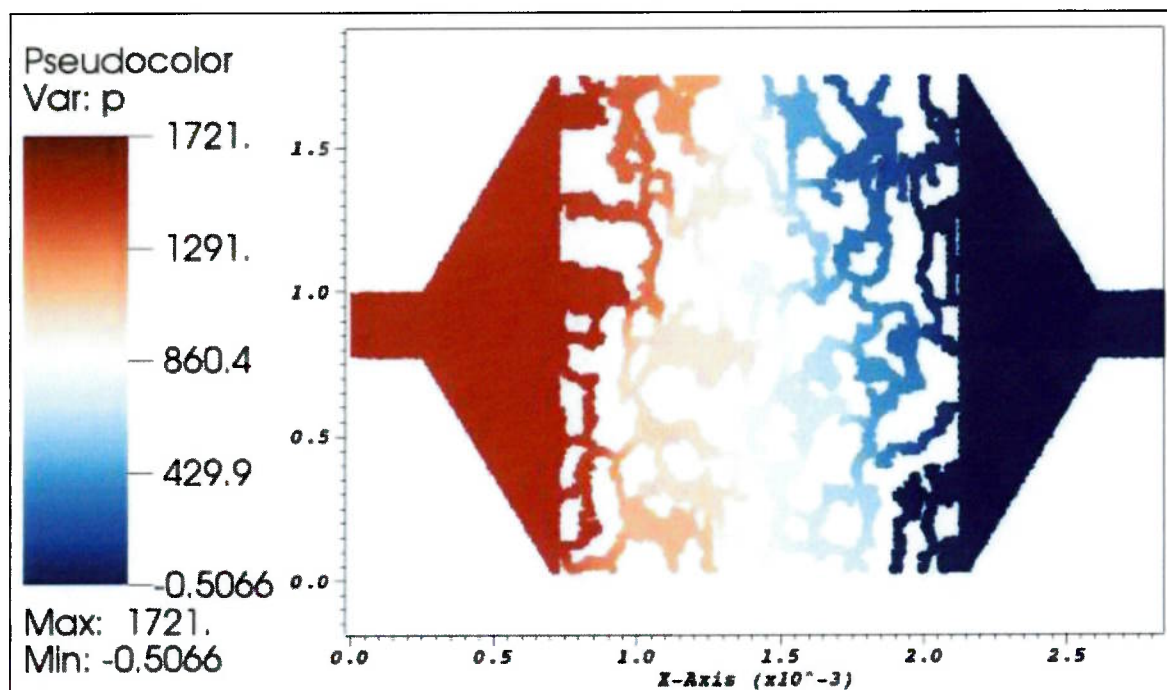
Fonte: do próprio do autor

A figura 5.21 demonstra uma menor velocidade na região anterior a placa e imediatamente após a placa é possível observar uma maior região com velocidade mínima tanto na parte superior quanto inferior. Isso pode ser explicado pelo estreitamento da placa. Em ambos os casos, a maior velocidade é encontrada na parte de afinamento do escoamento proporcionado pela placa de orifício.

5.5 APLICAÇÃO AO MODELO DE ROCHA

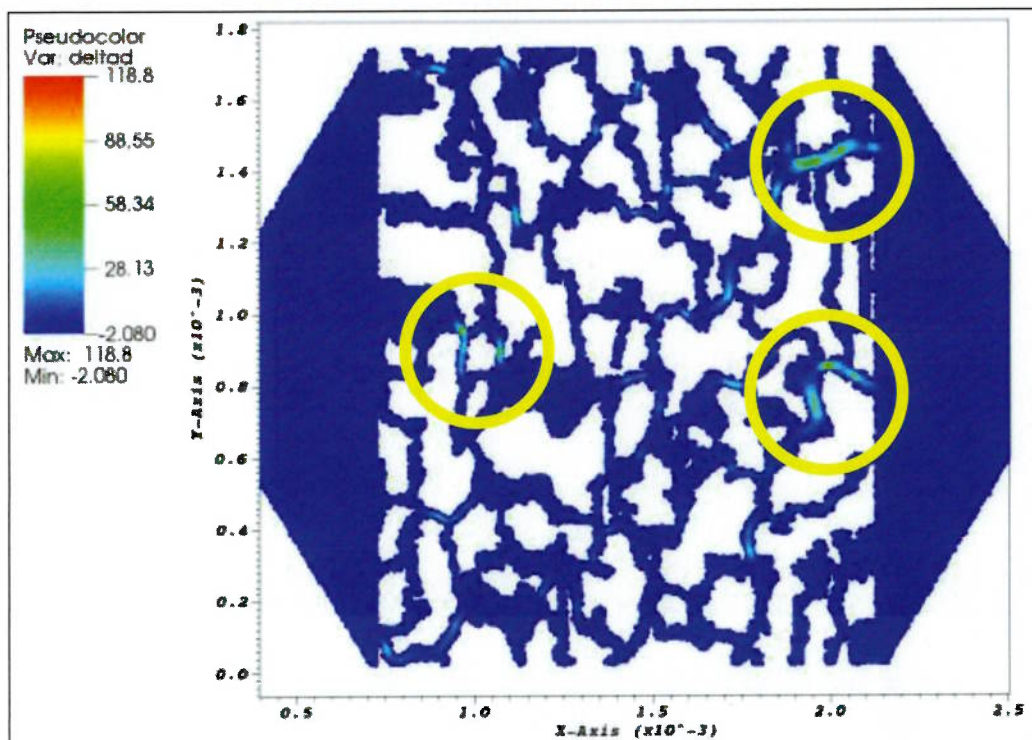
Para a malha do modelo de rocha, a variação da pressão, a função sensibilidade e a variação da velocidade são demonstradas através das figuras 5.22, 5.23 e 5.24 respectivamente.

Figura 5.22– Variação da pressão ao longo da malha.



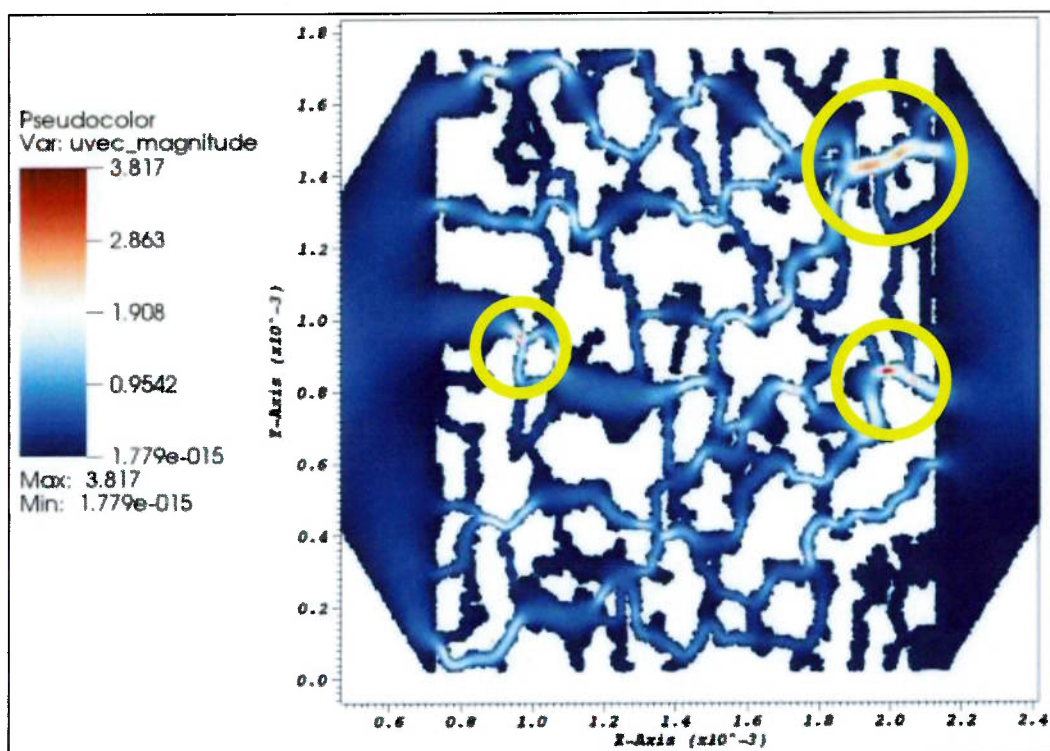
Fonte: do próprio do autor

Figura 5.23- Função sensibilidade ao longo do meio poroso.



Fonte: do próprio do autor

Figura 5.24 – Variação da velocidade ao longo da malha.



Fonte: do próprio do autor

Pela figura 5.22, é nítido uma considerável diferença de pressão entre os dois lados da malha. Tal situação é completamente esperada, uma vez que para que ocorra um fluxo entre os dois lados da rocha, devemos ter uma diferença de potencial. Dessa forma, o fluxo migrará da região de alta pressão para a região de baixa pressão. Logo, de acordo com a figura 5.22 vemos que o fluxo migra da esquerda para a direita.

A figura 5.23 nos mostra o resultado da função sensibilidade ao longo do meio poroso. Pelas regiões circuladas de amarelo, é visível que há 3 pontos principais que se apresentam como os mais sensíveis e relação a porosidade da malha rochosa.

Quanto a figura 5.24 podemos observar que quanto maior a velocidade do fluxo, mais avermelhada é a região. Com isso, é possível verificar caminhos na malha que possuem maior velocidade, com destaque para as 3 regiões destacadas com o círculo amarelo. Esses caminhos representam os locais com maior facilidade para o escoamento. Em comparação com a figura 5.23, é visível que os locais de maior velocidade são condizentes com os locais que mais afetam a permeabilidade da rocha em questão. A velocidade máxima do escoamento obtida na simulação foi de 3.817.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados de Meliga et al. (2014) em comparação com os dados gerados pela simulação podemos perceber que o objetivo de validação do método estudado fora atingido: os resultados entre os procedimentos apresentam valores e gráficos semelhantes, conforme observamos pelas imagens 5.1 - 5.2 e 5.3 – 5.4. Com isso, o intuito inicial de demonstrar que o método de simulação e utilização dos softwares é condizente com a literatura foi concluído e dessa forma podemos considerar o método como validado.

Neste mesmo viés, o método de resolução utilizado (FEM) também pode ser considerado como eficiente para o problema estudado, uma vez que para os diferentes tipos de malhas (n20, n40 e n60) temos valores convergentes, como podemos observar nas tabelas 5.1 e 5.2. É visível também a questão da convergência nos valores de pressão, velocidade e vorticidade: nos três casos considerados os resultados não apresentam valores destoantes para essas características. Importante ressaltar que a confirmação da ideia de uma malha bem discretizada realmente fornece resultados mais precisos, com uma interpretação gráfica mais definida, é realmente verificada quando se comparam os gráficos gerados pelas malhas n20, n40 e n60: a malha n60, por ser mais discretizada apresenta resultados mais precisos e contornos gráficos mais bem definidos.

A simulação numérica direta com a presença de dois cilindros anteriores a placa de orifício garantiu também uma diminuição no valor da perda de carga quando comparados a malha n60 sem a presença dos cilindros, diminuição essa de respectivamente 2% e 3%. Essa pequena diminuição fora suficiente para um ligeiro aumento na distância entre os dois pontos com vorticidade igual a zero quando os dois pequenos cilindros foram adicionados ao escoamento.

A questão da alteração da geometria da placa de orifício implica em alterações consideráveis nas características do escoamento. Analisando o caso do estreitamento da placa de orifício, pode-se concluir que ao estreitarmos a placa o valor da perda de carga e também da força de arrasto se elevam (no caso estudado, um aumento de 183%). A pressão anterior à placa também se eleva e as regiões superiores e inferiores com velocidade mínima imediatamente após a placa possuem uma

dimensão maior. Por fim, a vorticidade também é afetada: a magnitude do valor e a distância entre os pontos de vorticidade igual a zero (separação e recolamento do escoamento) aumentam quando o estreitamento da geometria ocorre.

Em suma, com os resultados obtidos, de fato pode-se concluir que os métodos de elementos finitos e adjuntos da simulação numérica através de FreeFem++ apresentam resultados adequados ao estudo. Além disso, a presença de cilindros no escoamento anteriores as placas de orifício reduzem a perda de carga e a força de arrasto. Contrário a isso, o estreitamento da placa de orifício acaba por aumentar consideravelmente a perda de carga e o arrasto.

Para o modelo de rocha, o método de simulação utilizado para a placa de orifício se mostrou aplicável, gerando resultados condizentes que atendem ao objetivo da proposta: observar as regiões mais propensas ao escoamento e sensíveis a permeabilidade. Com a análise da variação da velocidade é nítida a formação de poros interconectados e os caminhos mais fáceis para escoamentos dentro da malha.

7 REFERÊNCIAS

BARKLEY, D.; BLAKBURN, H. M.; SHERWIN, S. J. Direct optimal growth for timesteppers. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v.1, n.231, p. 1-21, 2002.

BOEK, Edo S.; VENTUROLI, Maddalena. Lattice-Boltzmann studies of fluid flow in porous media with realistic rock geometries. *Computers & Mathematics with Applications*, v. 59, n. 7, p. 2305-2314, 2010.

CADOT O.; THIRIA B.; BEAUDOIN J. F. Passive drag control of a turbulent wake by local disturbances, in *Unsteady Separated Flows and their Control*, p.529, 2009.

GIANNETTI F.; LUCHINI P. Structural sensitivity of the first instability of the cylinder Wake, *J. Fluid Mech.* v.581, p.167–19, 2007.

GUNZBURGER, Max D. *Finite element methods for viscous incompressible flows: a guide to theory, practice, and algorithms*. Elsevier, 2012.

HILL D. C. A theoretical approach for analyzing the restabilization of wakes, *AIAA Paper*, n.92-0067, 1992.

IGARASHI T. Drag reduction of a square prism by flow control using a small rod, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* v.69, p.141, 1997.

KORKISCHKO I.; MENEGHINI J. Experimental investigation of flow-induced vibration on isolated and tandem circular cylinders fitted with strakes, *J. Fluids Struct.*, v.26, p.611–625, 2010.

MARQUET O.; SIPP D.; JACQUIN L. Sensitivity analysis and passive control of cylinder flow, *J. Fluid Mech.* v.615, p.221–252, 2008.

MELIGA, P., BOUJO, E.; PUJALS, G.; GALLAIRE, F. Sensitivity of aerodynamic forces in laminar and turbulent flow past a square cylinder. *Physics of Fluids*, v.26(10), p.104101, 2014.

PAREZANOVIC V.; CADOT O. Experimental sensitivity analysis of the global properties of a 2D turbulent wake, *J. Fluid Mech.* v.693, p.115, 2012.

PAREZANOVIC V.; CADOT O. The impact of a local perturbation on global properties of a turbulent wake, *Phys. Fluids*, v. 21, p.071701, 2009.

PATINO, G. A.; GIORIA, R. S.; MENEGHINI, J. R. Evaluating the control of a cylinder wake by the method of sensitivity analysis. *Physics of Fluids*, v. 29, n. 4, p. 044103, 2017.

PATNAIK B. S. V.; WEI G. W. Controlling wake turbulence. *Phys. Rev. Lett.* v.88, p.054502, 2002.

PIRRONEAU, O. *Optimal Shape Design for Elliptic Systems*. 1st ed. [S.I.]: Springer- Verlag, 1983.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C.; RAMADAN, B. H. *Mechanics of fluids*. Nelson Education, 2016.

van DYKE, M. *An Album of Fluid Motion*. 4. Ed [S.I.]: The Parabolic Press, 1988.

SAKAMOTO H.; HANIU H. Optimum suppression of fluid forces acting on circular cylinder, *ASME Trans. J. Fluids Eng.* p.116, 221, 1994.

SAKAMOTO H.; TAN K.; HANIU H. An optimum suppression of fluid forces by controlling a shear layer separated from a square prism. *ASME Trans. J. Fluids Eng.* v. 113, p.183, 1991.

STRYKOWSKI P. J; SREENIVASAN K. R. On the formation and suppression of vortex 'shedding' at low Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.* n.218, p.71–107,1990.

SZEPESSY S.; BEARMAN P. W. Aspect ratio and end plate effects on vortex shedding from a circular cylinder, *J. Fluid Mech.* v. 234, p. 191–217, 1992.

ZIEMKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 2000.

ZIENKIEWICZ, Olgierd C. *Introductory Lectures on the Finite Element Method: Course Held at the Department of Mechanics of Solids*, July 1972. Springer, 2014.

APÊNDICE A – ARTIGO SÍNTESE

Universidade de São Paulo

Engenharia de Petróleo – Escola Politécnica

Número USP: 8585432 Data: 02/06/2018



Redução da perda de carga e arrasto através da análise de sensibilidade em escoamento monofásico

Vitor Augusto da Silva Cruz

Orientador: Prof. Dr. Rafael Gioria

Artigo Sumário referente à disciplina PMI1096 – Trabalho de Formatura para Engenharia de Petróleo II
Este artigo foi preparado como requisito para completar o curso de Engenharia de Petróleo na Escola Politécnica da USP. Template
versão 2018v11.

Resumo

O escoamento de fluidos está presente em diversos processos da cadeia exploratória do petróleo. A perda de carga e a força de arrasto, muitas vezes, acabam por prejudicar a eficiência dos procedimentos. Com isso, este artigo estuda o processo de minimização da perda de carga e do arrasto para um escoamento monofásico através da geometria de uma placa de orifício, aplicando, posteriormente, tais conceitos uma malha rochosa para identificação de possíveis poros sensíveis, através da análise de sensibilidade baseado nos conceitos matemáticos do método de elementos finitos e método adjunto aplicados a simulações computacionais de situações de escoamento em fluxo laminar constante e incompressível. Verifica-se que a diminuição da perda de carga e do arrasto possui relação direta com a alteração da geometria da placa de orifício, assim como a inserção de novos corpos no escoamento e a alteração das características do escoamento. A aplicação deste método a uma malha rochosa fornece resultados pertinentes que garantem uma análise das possíveis regiões sensíveis dentro da malha.

Abstract

The flow of fluids is present in the processes of the petroleum exploration chain. In these, the loss of load and the drag force, often, end up undermining the effectiveness of the procedures. With this, it looks for the process of minimizing the loss of charge and drag to a single-phase process through the geometry of an orifice plate, then applying after a mesh to identify the sensitive pores, through the analysis. The evaluation method uses the mathematical methods of data flow method and adjunct methods applied in computational simulations of situations of constant and incompressible laminar flow. The verification of the load-carrying flexibility and its function is the direct change of the geometry of the positioning plate, as well as the presentation of new functions in the space and the alteration of the characteristics of the system. The application of this method of an electronic mesh presents results that guarantee energy savings within the mesh.

A1 Introdução

O conhecimento do mecanismo de escoamento de fluidos se apresenta com extrema importância para os diversos segmentos da indústria petrolífera. Desde a questão da estabilidade de plataformas *offshore* até o processo de exploração e produção, grande número de processos demandam a necessidade do entendimento do comportamento do escoamento de fluidos, sendo necessárias, muitas vezes, técnicas que modifiquem tal comportamento para uma maior eficácia do processo.

Quando um corpo é imerso em um fluxo a região necessariamente após sua posição é reconhecida por uma região de turbulência, causada por recirculação do fluido podendo apresentar vórtices e características diferentes de escoamento. Como consequência, sobre o corpo em questão atuam forças de arrasto e de elevação vertical. Quanto mais próximas forem as frequências de vórtice e do corpo imerso, mais intensa será a atuação da força de arrasto e da elevação vertical, estimulando vibrações que podem induzir fadigas e desgastes ao corpo. Na área *upstream*, tais vibrações acabam por prejudicar integridade da plataforma e dos equipamentos ali presentes, afetando consequentemente, os procedimentos de exploração do petróleo. Levando o conceito para escoamentos internos, a perda de carga se torna fator crucial a ser analisado para garantir um bom rendimento tanto para a injeção quanto para a retirada de componentes do reservatório através dos dutos.

O controle desta região de turbulência pode ser feito de maneira passiva ou ativa. A maneira passiva se define como mudanças na geometria do corpo que consequentemente irão alterar as características da região turbulenta com a inserção de novos corpos no fluxo. Strykowski e Sreenivasan (1989) promoveram pesquisas de controle passivo das regiões de turbulência para baixos valores de Reynolds (compreendidos na faixa de 50 a 100, caracterizando um fluxo laminar) com um corpo cilíndrico imerso em um fluxo. Os autores chegaram à conclusão de que a inserção de um outro cilindro (chamado de cilindro de controle) próximo a região de turbulência pode diminuir a ocorrência de vórtices, chegando em certos casos a supressão total da região de turbulência. Verificaram que o tamanho da região de vórtice é diretamente proporcional ao número de Reynolds do escoamento.

Posteriormente, Sakamoto e Haniu (1991 e 1994), Igarashi (1997) e Parezanovic e Cadot (2009) exploraram o controle passivo para valores de Reynolds da ordem de 10^4 a 10^5 . Neste momento, introduz-se também modificações na geometria dos corpos do escoamento, com formas circulares, quadradas e em formato de D. Dadas as condições, observou-se uma redução de 20% a 30% de arrasto sobre o corpo principal com a aplicação de corpos de controle.

O experimento de Strykowski e Sreenivasan fora revisado por diversos pesquisadores, entre eles Hill (1992), Marquet e Jacquin (2008). Realizou-se uma nova análise da situação de escoamento estudada com uma abordagem através de uma função de sensibilidade obtida por métodos adjuntos das e uma força corporal que representava o cilindro de controle do escoamento. Esta nova interpretação matemática teórica garantiu a obtenção das áreas mais sensíveis à implementação da força corporal e consequentemente dados mais concisos para a interpretação dos resultados.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, Meliga et al. (2014) estuda a diminuição do arrasto e a elevação vertical sobre um cilindro em escoamentos laminares com diferentes características. Novamente são utilizadas as técnicas de simulações computacionais juntamente com cálculo numérico e equações adjuntas. Os autores observam que para Reynolds igual a 40 ou 100, um cilindro de controle colocado próximo a um cilindro principal pode reduzir em até 20% a força de arrasto sobre este. A questão da implementação da análise de sensibilidade aplicada a escoamentos é estudada por Patino et al. (2017) objetivando o controle dos vórtices gerados por um cilindro em um escoamento.

Em relação a aplicação dos conceitos de perda de carga e arrasto a modelos de rochas, Boek et al. (2010) usa o método de Lattice Boltzman (LBM) para o cálculo da fluidez de partículas dentro de uma rochosa através de simulação computacional, tanto para situações 2D quanto 3D. Os autores chegaram à conclusão de que a permeabilidade é diretamente afetada pelo tamanho da amostra e que a Lei de Darcy é válida para uma grande gama de valores de forçamento do fluxo.

A2 Análise do Escoamento

Considera-se um escoamento laminar, 2D, incompressível em torno de um corpo em um domínio fechado com condições de contorno pré-estabelecidas. Toma-se o sistema cartesiano como referência com arrasto positivo no sentido positivo do eixo x, como demonstrado na Figura A1. A origem é definida no centro do corpo imerso no fluxo. Adota-se massa específica constante para o corpo ρ . A pressão é representada por p , enquanto o vetor velocidade do fluxo no eixo x é representado por u .

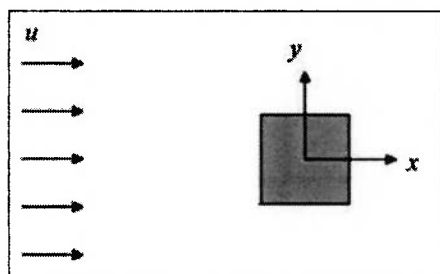


Figura A1- Representação de corpo no escoamento. Adaptado de Meliga et al. (2014).

Supondo um espaço fechado Ω , o escoamento é regido pelas equações de *Navier-Stokes*. Pela conservação de massa, por *Navier*:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot u = 0 \quad (A1)$$

Pela equação A1 e sabendo que o fluido estudado será considerado como incompressível, a densidade ρ não é uma função tempo, fazendo com que a equação 1 seja reduzida a:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (A2)$$

Com base no valor encontrado na equação A2 e pela conservação do momento, em Ω , o fluxo fica regido por:

$$\partial_t u + \nabla u \cdot u - \nabla \cdot \sigma(p, u) = 0 \quad (A3)$$

Nos pontos referentes as dimensões do corpo, supõe-se $u = 0$, ou seja, a velocidade do fluxo nesses pontos é nula, uma vez que representam o corpo em questão.

O termo $\sigma(p, u)$ representa o tensor de tensão, sendo representado pela seguinte equação matemática:

$$\sigma(p, u) = -pI + \frac{1}{Re} (\nabla u + \nabla u^T) \quad (A4)$$

O termo Re se refere ao número de Reynolds, o qual qualifica o tipo de escoamento com base na viscosidade dinâmica do fluido (μ), velocidade (u), massa específica do fluido e o comprimento do corpo em questão (L):

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (A5)$$

O princípio físico da análise de sensibilidade presente neste trabalho se baseia nos resultados da inserção de uma força de magnitude δf no fluxo. Estes resultados serão baseados no valor do arrasto em diferentes situações e diferentes geometrias para corpos imersos. A equação do arrasto pode ser definida como:

$$D = 2 \oint \{ \sigma(p, u) \cdot n \} \cdot e_x dl \quad (A6)$$

Na equação A6, n representa o versor normal a superfície do corpo imerso no fluido. O termo e_x representa a divergência vetorial no eixo x. Por Meliga et al. (2014) e sendo a função sensibilidade por $(\nabla_f D | \delta f)$, a relação entre a equação A6 e a função sensibilidade referente a nova força δf inserida é:

$$\delta D = 2 \oint \{ \sigma(\delta p_b, \delta u_b) \cdot n \} \cdot e_x dl = (\nabla_f D | \delta f) \quad (A7)$$

Para escoamentos internos, a relação entre a perda de carga (λ) e o fluxo será dado por:

$$p\pi r^2 - (p + dp)\pi r^2 = \lambda \quad (A8)$$

A3 Materiais e Métodos

Os métodos e os programas utilizados são descritos adiante, assim como a caracterização das situações simuladas. É válido ressaltar que o problema estudado é tratado com adimensionais, de forma que as unidades das grandezas aqui tratadas são por consequência, também adimensionais.

A3.1 Materiais

A3.1.1 *Software FreeFem++*

Criado por *Frédéric Hetch*, o software utiliza uma linguagem de programação própria, sendo capaz de resolver sistemas não lineares em 2D e 3D. Seu método de resolução se baseia no processo iterativo do método de elementos finitos sendo implemetado também o método adjunto. No estudo que se segue, utilizou-se a versão 3.56, para o sistema operacional Windows em 64-bits.

A3.1.2 *Software VisIt*

Para a visualização gráfica dos resultados gerados pelo programa FreeFem++, utilizou-se o software VisIt. Este foi desenvolvido pelo *Department of Energy (DOE) Advanced Simulation and Computing Initiative (ASCI)* para a visualização e análise de resultados de simulações baseadas em malhas 2D e 3D. A versão utilizada neste estudo é a 2.13.0 voltada para o sistema operacional Windows 64-bits.

A3.2 Métodos

A3.2.1 Validação

O processo de validação do método foi feito com base nos estudos de Meliga et al. em seu artigo *Sensitivity of aerodynamic forces in laminar and turbulent flow past a square cylinder* (2014) para o caso de fluxo externo laminar constante passando por um cilindro com diâmetro 0,1, com $Re = 40$ e também $Re = 100$. A situação descrita foi simulada nas mesmas condições e os resultados foram comparados.

A3.2.2 Análise da convergência do FEM

Considerou-se agora o escoamento interno de fluxo constante e laminar através de uma placa de orifício, utilizando 3 malhas com características diferentes, considerando $Re = 40$.

A3.2.3 Simulação Numérica Direta

Foram colocados na situação de escoamento laminar com fluxo constante caracterizado com $Re = 40$ através de uma placa de orifício, dois cilindros no escoamento com diâmetros de 0,1. Analisou-se a influência da presença do segundo cilindro no escoamento.

A3.2.4 Situação de estreitamento da placa de orifício com $Re = 100$

Para dada geometria de placa de orifício e considerando $Re = 100$, simulou-se um escoamento laminar com fluxo constante com um cilindro de diâmetro 0,1 inserido ao fluxo. Posteriormente, a situação foi modificada para uma geometria de placa de orifício mais estreita e a simulação foi executada novamente

A3.2.5 Aplicação ao Modelo de Rocha

Com base na malha mostrada pela figura A2, aplica-se a ideia da análise de sensibilidade afim de descobrir os locais mais sensíveis a permeabilidade e aqueles com maior propensão ao escoamento do fluxo dentro desta rocha. Os locais brancos representam a região porosa, enquanto a região escura representa a região não porosa. Tal figura é a mesma utilizada por Boek et al. (2010) em seu estudo.



Figura A2- Malha do modelo de rocha – Boek et al. (2010).

A4 Resultados

Após o procedimento da simulação das diversas situações com o software FreeFem++, os resultados foram interpretados com a ajuda do software VisIt quando conveniente. Os resultados obtidos em cada processo são descritos adiante.

A4.1 Validação

Os resultados são descritos na figura A3, para Reynolds 40 e 100 respectivamente. Em comparação com Meliga et al. (2014), os valores são condizentes. Para ambas as simulações a malha é composta por 57766 triângulos e 29265 vértices.

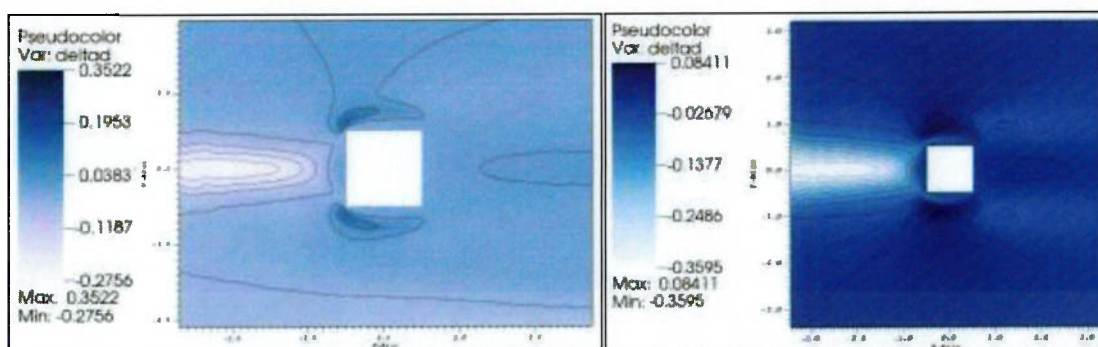


Figura A3- Resultados da simulação para Reynolds 40 e 100, respectivamente. Fonte: do próprio autor.

A4.2 Análise da convergência do FEM

As três malhas utilizadas (denominadas n20, n40 e n60) são descritas na tabela A1. Não apresentaram grande discrepância de valores em relação a perda de carga e arrasto, como visto nas tabelas A2 e A3. O resultado da análise de sensibilidade é mostrado na figura A4.

Tabela A1- Diferentes características para os três tipos de malhas.

Malha	Número de triângulos	Número de vértices
n20	5784	3171
n40	23238	12171
n60	55867	28759

Tabela A2- Valores de perda de carga encontrados para os 3 tipos de malhas.

Malha	Valor da perda de carga (Pressão Adimensional)
n20	9,6721
n40	9,4102
n60	9,9773

Tabela A3- Valores da força de arrasto encontrada para os 3 tipos de malhas.

Malha	Valor do Arrasto (Força Adimensional)
n20	9,0380
n40	9,1907
n60	9,0915

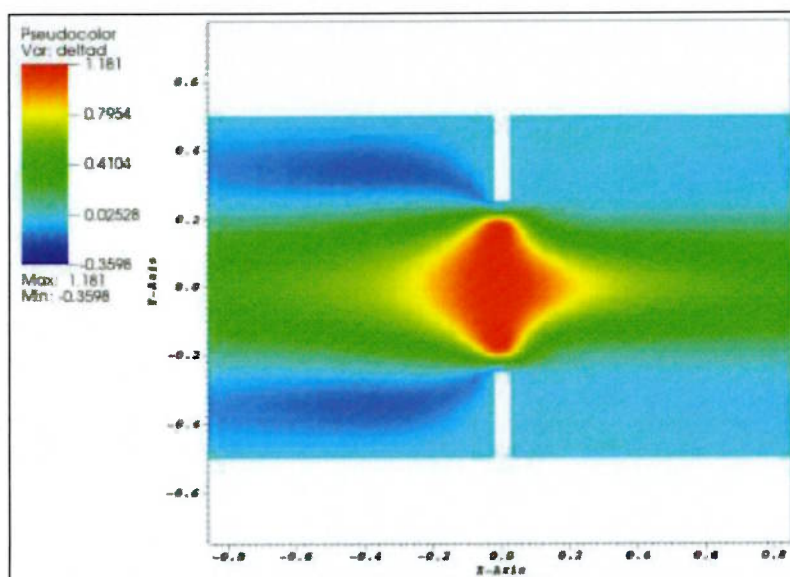


Figura A4- Resultados da análise de sensibilidade para a malha n60. Fonte: do próprio autor.

A4.3 Simulação Numérica Direta (DNS)

Com a presença de dois pequenos cilindros anteriores a placa nos locais de variação negativa descritos pela figura A4, os valores da diferença de pressão e força de arrasto tiveram seus valores alterados. As tabelas A4 e A5 descrevem tal alteração.

Tabela A4- Valor da perda de carga para dois cilindros anteriores a placa.

Malha	Valor da perda de carga (Pressão Adimensional)
Caso 03	9,79025

Tabela A5 - Valor da força de arrasto para dois cilindros anteriores a placa.

Malha	Valor do Arrasto (Força Adimensional)
Caso 03	8,90785

Em comparação com a malha mais discretizada, n60, os valores foram reduzidos em 2% para a perda de carga e 3% para o arrasto, graças a presença dos cilindros no escoamento.

A4.4 Situação de estreitamento da placa de orifício com $Re = 100$

Considerando $Re = 100$, para o escoamento através da placa de orifício e para uma placa de orifício mais estreita, os valores de perda de carga e força de arrasto encontrados são descritos nas tabelas A6 e A7.

Tabela A6- Valor da perda de carga para $Re = 100$.

Malha	Valor da perda de carga (Pressão Adimensional)
Caso 04- Placa Normal	4,37893
Caso 04- Placa mais estreita	12,2152

Tabela A7 - Valor força de arrasto para $Re = 100$.

Malha	Valor da perda de carga (Pressão Adimensional)
Caso 04- Placa Normal	4,16910
Caso 04- Placa mais estreita	12,0259

Analisando as tabelas A6 e A7 é possível verificar que a perda de carga e o arrasto foram aumentados cerca de em 183% devido à mudança na geometria da placa.

A4.5 Aplicação ao modelo de rocha

Como resultado a aplicação do método à malha da figura A2, em relação a velocidade e a variação da força de arrasto (função sensibilidade), obteve-se a figura A5. Observa-se que quanto maior a velocidade do fluxo, mais avermelhada é a região. Com isso, é possível verificar caminhos na malha que possuem maior velocidade, com destaque para 3 pontos destacados. Estes são condizentes com os três locais mais sensíveis da análise de sensibilidade, também destacados. Esses caminhos representam os locais com maior facilidade para o escoamento e conseqüentemente os locais que mais afetam a permeabilidade da rocha em questão. A velocidade máxima do escoamento obtida na simulação foi de 3.817.

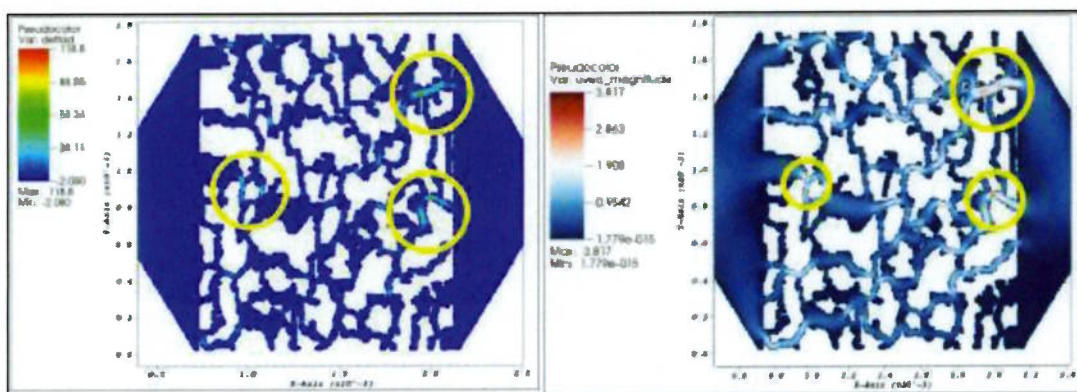


Figura A5- Resultados da para a malha de rocha. A esquerda a função sensibilidade e a direita a velocidade. Fonte: do próprio autor.

A5 Conclusão

Pelos resultados das simulações é verificado que o estreitamento da placa de orifício acaba por aumentar a perda de carga e o arrasto no escoamento. Por outro lado, a presença de corpos de controle passivo, quando posicionados de maneira correta, acabam por diminuir estes dois fatores. O número de Reynolds também é fator influenciável para o aumento da perda de carga e arrasto, sendo diretamente proporcional a estas.

É visto também que o método de elementos finitos somado ao método adjunto provém valores condizentes com a literatura, além de proporcionar uma vantagem no tempo de simulações. A aplicação do método iterativo a malha rochosa gerou resultados que atendem a proposta: regiões propensas ao melhor escoamento e sensíveis a permeabilidade.

A6 Referências

- BARKLEY, D.; BLAKBURN, H. M.; SHERWIN, S. J. Direct optimal growth for timesteppers. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, v.1, n.231, p. 1-21, 2002.
- BOEK, Edo S.; VENTUROLI, Maddalena. Lattice-Boltzmann studies of fluid flow in porous media with realistic rock geometries. **Computers & Mathematics with Applications**, v. 59, n. 7, p. 2305-2314, 2010.
- CADOT O.; THIRIA B.; BEAUDOIN J. F. Passive drag control of a turbulent wake by local disturbances, in **Unsteady Separated Flows and their Control**, p.529, 2009.
- HILL D. C. A theoretical approach for analyzing the restabilization of wakes, **AIAA Paper**, n.92-0067, 1992.
- IGARASHI T. Drag reduction of a square prism by flow control using a small rod, **J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.** v.69, p.141, 1997.
- KORKISCHKO I.; MENEGHINI J. Experimental investigation of flowinduced vibration on isolated and tandem circular cylinders fitted with strakes, **J. Fluids Struct.**, v.26, p.611-625, 2010.
- MARQUET O.; SIPP D.; JACQUIN L. Sensitivity analysis and passive control of cylinder flow, **J. Fluid Mech.** v.615, p.221-252, 2008.
- MELIGA, P., BOUJO, E.; PUJALS, G.; GALLAIRE, F. Sensitivity of aerodynamic forces in laminar and turbulent flow past a square cylinder. **Physics of Fluids**, v.26(10), p.104101, 2014.
- PAŘEZANOVIC V.; CADOT O. The impact of a local perturbation on global properties of a turbulent wake, **Phys. Fluids**, v. 21, p.071701, 2009.
- PATINO, G. A.; GIORIA, R. S.; MENEGHINI, J. R. Evaluating the control of a cylinder wake by the method of sensitivity analysis. **Physics of Fluids**, v. 29, n. 4, p. 044103, 2017.
- SAKAMOTO H.; HANIU H. Optimum suppression of fluid forces acting on circular cylinder, **ASME Trans. J. Fluids Eng.** p.116, 221, 1994.
- SAKAMOTO H.; TAN K.; HANIU H. An optimum suppression of fluid forces by controlling a shear layer separated from a square prism. **ASME Trans. J. Fluids Eng.** v. 113, p.183, 1991.
- STRYKOWSKI P. J.; SREENIVASAN K. R. On the formation and suppression of vortex 'shedding' at low Reynolds numbers, **J. Fluid Mech.** n.218, p.71-107, 1990.