

Monografia de Graduação

Determinação Das Características Aerodinâmicas De Um Riser Rígido De Seção Elíptica Através De Simulação Numérica

Jonathan Jalles Silva Batista

Natal, março de 2016.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

***DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS
AERODINÂMICAS DE UM RISER RÍGIDO DE SEÇÃO
ELÍPTICA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA.***

JONATHAN JALLES SILVA BATISTA

Prof. Dr. Sandi Itamar Schafer de Souza

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Orientador

Prof. Dr. Kleiber Lima de Bessa

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Co-orientador

Natal, março de 2016.

Resumo

Na exploração e produção de petróleo em ambientes off-shore, se faz necessário o uso de elementos tubulares para a elevação do petróleo. Para este fim, são empregados risers, que podem ser rígidos ou flexíveis, e interligam a cabeça de poço no fundo do oceano ao navio ou plataforma, na superfície. Uma vez que estão sob constante ação de forças devido ao escoamento no seu entorno e também do movimento da plataforma, os risers podem ter sua vida útil diminuída devido aos esforços provenientes de tal movimento. Assim, pretendeu-se neste trabalho investigar as características aerodinâmicas do escoamento no entorno de um riser rígido de seção transversal elíptica, em diferentes configurações, através da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), e compará-las com as obtidas para um riser de seção transversal circular. Para tanto, foram analisados os campos de velocidade e pressão no entorno do perfil elíptico do riser, a uma profundidade de 1500m, comumente atingida na produção de petróleo em alto mar. Os resultados indicaram que para determinadas configurações o riser de seção elíptica se mostra menos susceptível aos esforços provenientes da interação fluido-estrutura. Contudo, análises experimentais devem ser realizadas para atestar os resultados obtidos via CFD.

Palavras-Chave: Riser, Seção Transversal Elíptica, Escoamento, Dinâmica dos Fluidos Computacional.

Abstract

In the process of exploring and producing petroleum in off-shore environments, a set of tubular elements is used to lift the oil out. These tubular elements are called risers, which can be either rigid or flexible. They are responsible for connecting the well head to the vessel on the sea surface, and can have their life-time shortened due to different sorts of loads, caused by the wave and marine currents, and the movement induced by the vessel itself. This said, the present work aimed to investigate the aerodynamic characteristics of the flow in the surroundings of an elliptic cross-section rigid riser in different configurations, by using Computational Fluid Dynamics (CFD), and compare the results with the ones obtained for a circular cross-section rigid riser. The velocity and pressure fields on the elliptic profile were analyzed at a depth of 1,500 m, commonly reached in deep water oil basins. The results have showed that for specific configurations the elliptic cross-section riser is less susceptible to the loads due to the fluid-structure interaction. However, experimental studies must be carried out in order to testify the results obtained through CFD.

Keywords: Riser, Elliptic Cross-Section, Flow, Computational Fluid Dynamics.

Agradecimentos

À Petrobras, por prover o aporte financeiro para a realização desta pesquisa, juntamente com a comissão gestora do PRH-14 da UFRN.

Ao Laboratório de Mecânica Computacional da UFRN, na pessoa do Prof. Dr. Sandi Itamar Schafer de Souza, orientador deste estudo.

Aos colegas de laboratório e ao Prof. Dr. Kleiber Lima de Bessa, que com empenho e paciência se dispuseram a sanar dúvidas acerca do software e da teoria necessária para a realização do estudo.

Lista de figuras

Figura 1 - Coeficiente de Arrasto em função do número de Reynolds para um cilindro liso.	4
Figura 2 - Modelos de turbulência do pacote ANSYS.	8
Figura 3 - Tipos de malha estruturada (esquerda) e não estruturada (direita).	12
Figura 4 - Parâmetros para determinação de qualidade de malha.	13
Figura 5- Configuração de riser rígido e plataforma TLP.	14
Figura 6- Esquema da seção do domínio virtual que contém a elipse.	16
Figura 7 - Geometria da Elipse	16
Figura 8- Domínio virtual gerado no DesignModeler do ANSYS.	17
Figura 9 - Temperatura e densidade da água do mar em função da profundidade.	18
Figura 10 - Esquema da seção do domínio virtual para escoamento longitudinal.....	19
Figura 11- Esquema da seção do domínio virtual para escoamento transversal.....	19
Figura 12 - Geometria do perfil elíptico dos risers.	20
Figura 13 - Domínio criado no DesignModeler para $\alpha = 0^\circ$ e escoamento longitudinal.	20
Figura 14- Malhas obtidas no entorno da elipse, para $H/B = 0,7$	22
Figura 15- Malhas obtidas no entorno da elipse, para $H/B = 1,5$	22
Figura 16- Contornos de velocidade no entorno do cilindro obtidos via CFD, para $H/B = 0,7$. ..	23
Figura 17- Contornos de velocidade no entorno do cilindro obtidos de forma experimental para $H/B = 0,7$ (Choi & Lee, 2001).	24
Figura 18- Contornos de velocidade no entorno do cilindro obtidos via CFD, para $H/B = 1,5$. ..	25
Figura 19 - Contornos de velocidade no entorno do cilindro obtidos de forma experimental para $H/B = 1,5$ (Choi & Lee, 2001).	26
Figura 20 - Velocidade a 1 mm da placa, em função de x, para $H/B = 0,7$	27
Figura 21 - Velocidade a 1 mm da placa, em função de x, para $H/B = 1,5$	28
Figura 22- Distribuição de pressão sobre o cilindro, para $H/B = 0,7$ (Contorno de pressão à esquerda e Coeficientes de Pressão à direita).	29
Figura 23- Distribuição de pressão sobre o cilindro, para $H/B = 1,5$ (Contorno de pressão à esquerda e Coeficientes de Pressão à direita).	30
Figura 24- Malhas geradas no ANSYS Meshing para a análise do escoamento.	32
Figura 25 - C_p na superfície do riser a escoamento transversal, para diferentes instantes de tempo.	33

Figura 26 - Contorno de pressão sobre o riser a escoamento transversal, para diferentes instantes de tempo.....	34
Figura 27- Coeficiente de pressão sobre o riser a 0° e escoamento longitudinal.....	36
Figura 28 - Contorno de pressão sobre o riser a 0° e escoamento longitudinal.....	36
Figura 29 - Coeficiente de pressão sobre o riser a +15° e escoamento longitudinal.....	37
Figura 30 - Contorno de pressão sobre o riser a +15° e escoamento longitudinal.....	38
Figura 31 - Coeficiente de pressão sobre o riser a -15° e escoamento longitudinal.....	38
Figura 32- Contorno de pressão sobre o riser a -15° e escoamento longitudinal.....	39
Figura 33- Coeficiente de pressão sobre o riser com seção circular, para diferentes instantes de tempo.....	40
Figura 34 - Contorno de pressão sobre o riser de seção circular.....	41
Figura 35 - Campos de velocidade para a superfície superior com escoamento longitudinal.....	43
Figura 36 - Campos de velocidade para a superfície inferior com escoamento longitudinal.....	44
Figura 37 - Vetores velocidade no entorno do riser, com escoamento longitudinal.....	44
Figura 38 - Campo de velocidade para o riser de seção elíptica, com escoamento transversal para $t = 120s$	45
Figura 39 - Vetores velocidade no entorno do riser, com escoamento transversal ($t = 120s$).....	46
Figura 40 - Ampliação da seção do riser sob escoamento transversal, para destaque da região de recirculação, em $t = 120s$	46
Figura 41 - Campo de velocidade para riser de seção circular, a $t = 120s$	47
Figura 42 - Vetores velocidade no entorno do riser de seção circular, em $t = 120s$	47
Figura 43- Ampliação da seção do riser de seção circular, para destaque da região de recirculação, em $t = 120s$	48

Lista de Tabelas

Tabela 1- Condições de contorno para análise do escoamento sobre os risers.....	18
Tabela 2- Características das malhas geradas para a validação do método.....	21
Tabela 3- Características das malhas geradas para análise dos risers.....	31

Sumário

Resumo	ii
Abstract	iii
Agradecimentos	iv
Lista de figuras	v
Lista de Tabelas	vii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo geral.....	1
1.2 Objetivos específicos.....	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1 Escoamento externo	2
2.2 CFD e o escoamento externo.....	6
2.3 Modelos de turbulência	7
2.3.1 Modelo de turbulência k-ε (k-épsilon)	8
2.3.2 Modelo de turbulência SST (Shear Stress Transport)	9
2.4 Equações governantes	9
2.5 Geração e qualidade de malha.....	11
2.6 Risers.....	13
3 METODOLOGIA	15
3.1 Validação do método computacional com dados experimentais.....	15
3.2 Aplicação do modelo à análise do escoamento sobre risers de seção elíptica.....	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1 Resultados da validação	21
4.2 Resultados da análise do escoamento sobre risers de seção elíptica	31
5 – CONCLUSÕES	49
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

O estudo de escoamentos, principalmente daqueles definidos como externos, se faz importante em várias áreas da engenharia, tendo em vista que uma grande variedade dos problemas práticos que os Engenheiros encontram no cotidiano se deve a esse fenômeno. Na indústria do petróleo o escoamento tem grande relevância, por exemplo, influenciando diretamente alguns procedimentos de suma importância na extração em poços marítimos. Tal extração é feita através do uso de Risers, os quais são dutos que interligam o poço de petróleo no fundo do oceano à plataforma ou navio armazenador, e estão constantemente submetidos às forças provenientes das correntes marítimas, cujos danos acabam por diminuir sua vida útil. Ademais, o aumento da profundidade de extração tem exigido que tais dutos sejam cada vez mais resistentes aos efeitos do escoamento externo sobre sua superfície, visto que, com o aumento de seu comprimento, aumenta a intensidade das forças devidas ao escoamento. Com isso, o objetivo desse estudo é analisar as características do escoamento sobre um riser rígido com seção transversal elíptica, em comparação com a geometria comumente utilizada (seção transversal circular), utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

Uma vez que não há uma vasta bibliografia que trate das características do escoamento sobre cilindros elípticos, pretende-se avaliar este escoamento a partir da reprodução numérica bem sucedida de um caso experimental, a fim de conhecer melhor os aspectos que norteiam esse fenômeno.

1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral identificar as características do escoamento longitudinal e transversal sob risers de seção transversal elíptica, para diferentes ângulos de ataque, e comparar os resultados com os obtidos para um riser de seção transversal circular

1.2 Objetivos específicos

De forma a alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser atingidos:

- Validar o método numérico a ser utilizado, reproduzindo estudo experimental que trata o escoamento no entorno de cilindros de seção elíptica;
- Definir um domínio virtual para a análise do escoamento no entorno da geometria proposta para o riser;
- Reproduzir o domínio virtual para diferentes situações de escoamento e ângulos de ataque;
- Gerar as malhas de cada domínio;
- Resolver cada domínio numericamente, através do software ANSYS-CFX;
- Tratar os resultados das simulações e interpretá-los.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o projeto em questão, o conhecimento de alguns dos principais conceitos de Mecânica dos Fluidos faz-se necessário, especificamente, o conceito de escoamento externo. Além disso, as características dos risers e seus diferentes tipos também devem ser conhecidos, de modo a tratar o problema de forma mais verossímil. Por fim, mas não menos importante, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) é peça fundamental neste estudo, uma vez que é através desta ferramenta que as análises do problema serão feitas. Com isso, conhecer os modelos de análise disponíveis, bem como sobre geração e qualidade de malhas, se faz mais que necessário.

2.1 Escoamento externo

Por escoamento externo define-se aquele em que corpos se movem imersos em um fluido, sem fronteiras, ou quando um fluido se move em relação a um corpo imerso. Uma vez que o ar também é um fluido, aviões, carros e tudo aquilo que apresentar alguma velocidade relativa ao ar, estará imerso e sobre a ação de um escoamento externo. No caso de líquidos, tal fenômeno pode ser observado em um submarino se deslocando em águas profundas, por exemplo. Esse tipo de escoamento depende, normalmente, de vários fatores, entre os quais pode-se citar: Forma do corpo, orientação do escoamento, propriedades do fluido (viscosidade, massa específica), velocidade, número de Reynolds (Re), sendo este último um dos parâmetros mais importantes. Devido ao escoamento, ocorrem interações entre o fluido e o corpo, provenientes das características viscosas que o fluido apresenta, bem como dos efeitos de pressão, na interface fluido-corpo. As interações viscosas, que se dão na direção do escoamento, são denominadas forças de arrasto e se devem

tanto à pressão como ao cisalhamento na superfície. As interações normais ao escoamento, oriundas prioritariamente dos efeitos da variação da pressão, são ditas forças de sustentação.

Outro conceito bastante importante se tratando de escoamentos externos é o de Camada Limite, introduzido primeiramente pelo alemão Ludwig Prandtl em 1904, que abriu novos horizontes para a fluidodinâmica, uma vez que enuncia que o efeito da viscosidade só é importante nas fronteiras da superfície sólida sobre a qual se dá o escoamento, ou seja, a interface fluido-corpo (camada limite), sendo desprezível para regiões mais distantes. Desse modo, a análise dos efeitos de escoamentos viscosos se dá através da análise do comportamento da camada limite, uma vez que é este comportamento (como descolamento ou separação) que influencia as interações de arrasto e sustentação, aumentando, por exemplo, a intensidade dessas forças e pondo em risco estruturas sujeitas a constante escoamento, como cascos de navios, risers e dutos submarinos em geral.

A separação da Camada Limite consiste no fenômeno que ocorre quando há um gradiente de pressão adverso, que causa a inversão do perfil de velocidade do escoamento na interface fluido-corpo. Na região após a separação da Camada Limite forma-se uma esteira de vórtices, conhecida também por Esteira de Von Kármán, caracterizada por ser muito irregular justamente devido à formação dos vórtices, que influenciam os coeficientes de arrasto aerodinâmico e de sustentação, o que gera esforços flutuantes em estruturas sob escoamento externo.

A descrição de um escoamento ao redor de um cilindro liso e circular depende do número de Reynolds (Re), dado pela relação a seguir:

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (1)$$

Onde D é o diâmetro do cilindro, U é a velocidade do escoamento, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, e ρ a sua densidade. O escoamento é perturbado pela presença do cilindro, o que causa variações da velocidade e pressão em diferentes regiões do escoamento. Estas variações são as responsáveis pelo surgimento das forças, as quais são frequentemente escritas em função de um coeficiente, que consiste na razão entre as forças de natureza viscosa e as forças de natureza inercial. Desse modo, quanto menor for este coeficiente, menor será a força experimentada pelo cilindro. Segundo Schlichting (1979), o coeficiente de arrasto (C_D) em um cilindro, varia com o

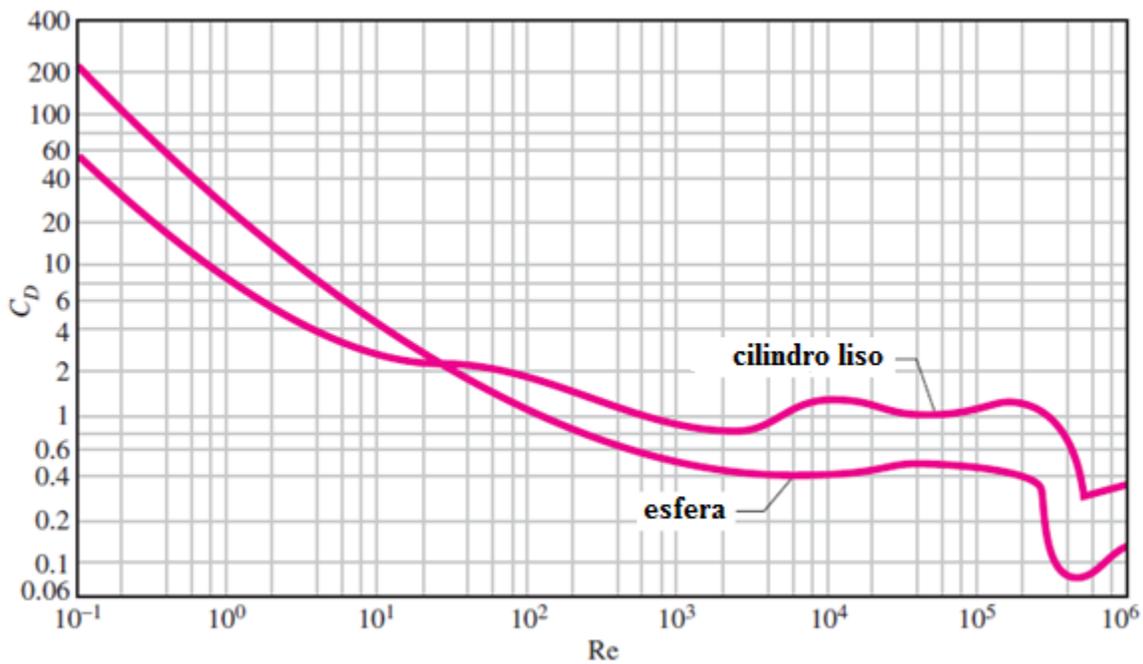
número de Reynolds conforme a fig. 1, e para o caso do cilindro liso circular, as forças de arrasto e sustentação são, respectivamente, dadas pelas equações (2) e (3):

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A_P U^2 \quad (2)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A_P U^2 \quad (3)$$

Onde F_D é a força de arrasto, F_L é a força de sustentação, C_D é coeficiente de arrasto, C_L é o coeficiente de sustentação, ρ é a densidade do fluido, A_P é a área projetada do cilindro, e U é a velocidade do escoamento em corrente livre.

Figura 1- Coeficiente de Arrasto em função do número de Reynolds para um cilindro liso.



A análise do escoamento nas proximidades de corpos rombudos (tal como um cilindro), vem sendo realizada há muitos anos, devido às várias aplicações práticas que esta análise permite. Como extensão dessa análise, muitos pesquisadores têm investigado o escoamento sobre cilindros circulares próximos a superfícies planas, já que essa situação é verificada em vários problemas de engenharia, tais como dutos submersos horizontalmente, construção de edifícios, entre outros. A

influência da proximidade entre a superfície plana e o cilindro, no comportamento do escoamento, é analisada com base no adimensional obtido pela razão entre a distância da superfície ao cilindro (L) e o diâmetro deste (D). Estudos mostram que, para determinados valores de L/D , o escoamento não pode ser descrito somente pelo número de Reynolds (Re), e, mesmo havendo muitos estudos dedicados ao escoamento sobre cilindros, alguns aspectos desse acontecimento ainda não são conhecidos na sua totalidade, tal como ocorre para cilindros junto a superfícies estacionárias.

Marumo et al. (1978) investigaram a camada limite perturbada junto a um cilindro, para vários valores de L/D . O estudo permitiu concluir que a camada limite se recuperou mais rapidamente na região interior (próximo à superfície), do que na região exterior.

Bearman & Zdravkovich (1978) mediram a distribuição da pressão e o desprendimento de vórtices para diversos espaçamentos de um cilindro circular embutido em uma camada limite de espessura equivalente a 80% do diâmetro do cilindro. Eles descobriram que a formação de vórtices se restringiu a valores de L/D menores que o valor crítico (0,3). Além disso, o número de Strouhal, St , se manteve constante para valores maiores que o valor crítico. Para escoamentos que apresentam características periódicas, utiliza-se com frequência o número de Strouhal, um adimensional que descreve mecanismos de fluxo oscilante. Seu valor é dado pela relação $(f \times L)/U$, onde f é a frequência dos vórtices; L é o comprimento característico e U é a velocidade do fluxo.

Angrilli & Bergamaschi (1982) estudaram o efeito da superfície na frequência do desprendimento de vórtices sobre números de Reynolds abaixo do valor subcrítico, com camada limite de espessura $0,25D$. A análise concluiu, contudo, que a frequência de desprendimento de vórtices aumentava à medida que o cilindro se aproximava da superfície.

Taniguchi & Miyakoshi (1990) investigaram as forças devidas ao escoamento do fluido e à distribuição de pressão agindo em um cilindro circular próximo a uma superfície plana, para estudar o efeito da espessura da camada limite sobre o valor crítico de L/D . As análises revelaram que o número de Strouhal foi de aproximadamente 0,2 e praticamente independente da espessura da camada limite.

Meneghini (2002) fez em seus trabalhos uma vasta revisão dos aspectos relacionados à camada limite junto à superfície de um cilindro, bem como das frequências fundamentais de desprendimento de vórtices à frente deste, e das características da esteira viscosa. Os resultados indicaram que em cilindros não confinados, o principal parâmetro que influencia tais

características é o número de Reynolds. A mudança para diferentes regimes de desprendimento de vórtices altera as características das forças atuantes na estrutura.

Nishino et al. (2007) também promoveram estudos sobre as características do desprendimento de vórtices próximo a um cilindro nas proximidades de um plano estacionário. Com base na simulação numérica, o desprendimento de vórtices de Von Kármán ocorria logo à frente do cilindro para L/D maior que 0,5. Para valores dessa razão menores que 0,35 não se observou o desprendimento dos vórtices. Com relação ao coeficiente de arrasto (CD), seu valor decrescia para L/D diminuindo de 0,5 a 0,35. Os autores concluíram que a interrupção na formação da esteira de Kármán causou a diminuição do CD .

2.2 CFD e o escoamento externo

A Dinâmica dos Fluidos Computacional, ou CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*), consiste numa ferramenta para solucionar de forma numérica as equações fundamentais da mecânica de fluidos, ou seja, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, às quais são atribuídas as propriedades de um fluido. Este conjunto de equações é também conhecido como as equações de Navier-Stokes, e resulta em equações diferenciais parciais não lineares, tendo, assim, solução analítica impraticável. Desse modo, para resolver numericamente esse sistema de equações diferenciais, utiliza-se métodos de discretização, tais como, o Método das Diferenças Finitas (MDF), o Método dos Volumes Finitos (MVF) ou o Método dos Elementos Finitos (MEF). Através desses métodos é possível linearizar as equações que modelam o fenômeno do escoamento, transformando-as num conjunto de equações algébricas que são resolvidas pelos diferentes métodos numéricos existentes (Maliska, 2004).

No caso da mecânica dos fluidos, o método de discretização mais empregado em pacotes comerciais é o MVF. A preferência é em função da robustez, devido às suas características conservativas. Neste método, equações aproximadas são obtidas através dos balanços de conservação no volume elementar e, por conseguinte, a conservação das propriedades é satisfeita no nível de todos os volumes elementares.

Vale lembrar que a Dinâmica dos Fluidos Computacional não deve ser utilizada em substituição às análises experimentais, mas sim ser uma ferramenta adicional no entendimento de fenômenos que envolvem a mecânica dos fluidos. Por isso, a simulação numérica é aplicada atualmente em diversas áreas industriais, tais como a modelagem de explosões e dispersão de

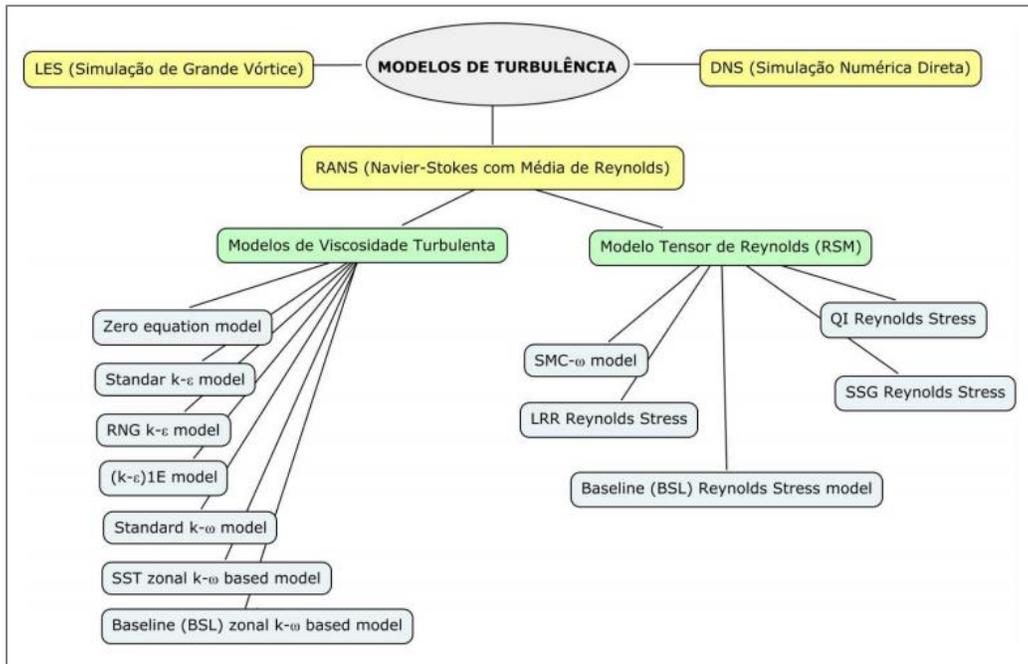
gases, poluição ambiental, aerodinâmica de aviões e veículos, projeto de equipamentos térmicos, entre tantas outras. Dentre os diversos pacotes comerciais para análise em CFD, pode-se dizer que o ANSYS CFX é um dos mais completos, tendo sido o escolhido para as análises neste trabalho.

2.3 Modelos de turbulência

No movimento fluídico, a turbulência em geral surge de uma instabilidade do escoamento em regime laminar, e é indicada por um aumento no número de Reynolds ($Re > 10^5$ caracteriza escoamento turbulento, quando sobre cilindros). As instabilidades estão relacionadas com interações entre termos viscosos e termos de inércia não lineares nas equações de quantidade de movimento. Segundo Bird et al. (1960), as equações de continuidade e movimento podem ser aplicadas diretamente no cálculo dos perfis de velocidade em regime turbulento. Esse tipo de abordagem, conhecida como Simulação Numérica Direta (ou DNS, do inglês *Direct Numerical Simulation*), não requer alto grau de modelagem, haja vista que resolve as equações para todas as escalas de turbulência ao longo do domínio. Porém, já que demanda elevado esforço computacional e tempo, limita-se o uso do DNS a números de Reynolds baixos e equipamentos de escalas reduzidas. Assim, é preferível resolver escoamentos turbulentos através da solução das equações de movimento em conjunto com equações adicionais provenientes dos modelos de turbulência.

Conforme Joshi et al. (2011), as abordagens para a modelagem da turbulência em CFD podem ser classificadas em: Simulação Numérica Direta (DNS), Simulação de Grande Vórtice (LES ou *Large Eddy Simulation*) e Navier-Stokes com Média de Reynolds (RANS ou *Reynolds Averaged Navier-Stokes*). Dentro dos modelos de turbulência RANS, podem-se encontrar diferentes abordagens, presentes no pacote ANSYS CFX-13 e mostrados na fig. 2.

Figura 2 - Modelos de turbulência do pacote ANSYS.



Dentro da técnica RANS também se pode encontrar outras expressões para determinar os tensores de Reynolds que descrevam o transporte de movimento em escoamentos turbulentos; tais como, o comprimento de mistura de Prandtl, a teoria do transporte de vórtice de Taylor, a hipótese de Von Karmàn e expressões obtidas por análise dimensional (Brodkey, 1967). Contudo, ainda não existe um modelo de turbulência que pode prever, com certeza, todos os escoamentos turbulentos com a suficiente precisão, uma vez que todos os modelos de turbulência utilizam algum nível de aproximação para resolver as equações. Ainda assim, esses modelos são válidos e necessários para a representação da natureza das condições do escoamento. Visto que, dentro da abordagem tipo RANS, encontram-se alguns dos modelos de turbulência mais populares em uso para aplicações na engenharia, descreve-se brevemente, a seguir, alguns dos mais utilizados.

2.3.1 Modelo de turbulência $k-\epsilon$ (k -épsilon)

Este é um dos modelos da família de modelos de dois parâmetros. Consiste em um modelo semiempírico e baseado, em grande parte, na observação de escoamentos com alto número de Reynolds e assumindo a existência de uma turbulência isotrópica. Se utiliza de duas equações para determinar os tensores de Reynolds. É um dos modelos mais robustos, principalmente pela sua estabilidade numérica, sendo, por isso, aplicado a uma ampla faixa de escoamentos turbulentos. O modelo $k-\epsilon$ introduz duas novas variáveis no sistema de equações, sendo elas a energia cinética

turbulenta k e a taxa de dissipação de turbulência ε ; utilizadas para o cálculo da viscosidade turbulenta μ_t (Eq. 4). A resolução numérica consiste em determinar os valores k e ε a partir das equações de transporte.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

Onde C_μ é uma constante empírica.

2.3.2 Modelo de turbulência SST (Shear Stress Transport)

Atualmente, entre os modelos de duas equações mais destacados encontra-se o modelo SST, desenvolvido por Menter (1994). Nesta abordagem, se considera no transporte de momento o efeito da tensão de cisalhamento próximo da parede, fornecendo uma melhor predição na modelagem de escoamentos com interação fluido-superfície. Além disso, este modelo combina as vantagens do modelo $k-\omega$ de Wilcox (1986) e o modelo $k-\varepsilon$, já visto anteriormente. O modelo de Wilcox apresenta uma boa capacidade para descrever a camada limite turbulenta perto da uma superfície, onde as velocidades são baixas, requisito no qual os modelos baseados na dissipação turbulenta (ε) apresentam falhas. Ainda assim, o $k-\varepsilon$ é aplicado nas regiões de livre escoamento, onde se localizam as maiores velocidades, e conseqüentemente maiores números de Re.

2.4 Equações governantes

O escoamento em questão será resolvido numericamente através da aplicação do modelo de turbulência SST, uma vez que, com a aplicação deste, é possível tratar os efeitos de parede de forma mais adequada e, ao mesmo tempo, resolver com confiabilidade o escoamento em regiões mais distantes. As equações governantes podem ser expressas em sua forma média, conforme segue, com a equação da conservação da massa (eq. 5) e a equação de Navier Stokes (eq. 6):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \overline{u_i u_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \bar{\tau}_{i,j}}{\partial x_j} \quad (6)$$

Onde u_i são as componentes de velocidade, ρ é a massa específica, p é a pressão, e τ é o tensor das tensões viscosas de Reynolds.

O modelo κ - ω SST, Menter et al (2003), foi empregado para tratar os efeitos da turbulência. Este modelo utiliza o equacionamento de dois outros modelos de turbulência bem conhecidos, o κ - ϵ e o κ - ω . A viscosidade turbulenta deste modelo é definida como:

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 \kappa}{\max \left[a_1 \omega (S_{i,j} S_{i,j})^{1/2}, \omega \right]} F_2 \quad (7)$$

Onde $(S_{i,j} S_{i,j})^{1/2}$ é uma medida invariante do tensor taxa de deformação, F_2 é uma das funções de combinação, κ a energia cinética turbulenta, ω é a dissipação específica.

O modelo SST necessita também das soluções das equações de transporte de k (energia cinética turbulenta) e de ω (dissipação), mostradas a seguir:

$$\rho \overline{u_i} \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega \quad (8)$$

$$P_k = \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \Rightarrow P_k = \min(P_k, 10 \beta^* \rho k \omega) \quad (9)$$

$$\rho \overline{u_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \tilde{\rho} S^2 - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (10)$$

Onde o termo F_1 é definido como:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{\kappa}}{B^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}\kappa}{CD_{\kappa\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (11)$$

Sendo:

$$CD_{\kappa\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (12)$$

E a função de combinação F_2 :

$$F_2 = \tanh \left\{ \max \left(\frac{2\sqrt{\kappa}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right\} \quad (13)$$

Na Equação (9), y é a distância da superfície de não deslizamento e as outras constantes são todas oriundas dos modelos $k-\varepsilon$ e $k-\omega$ com alguns ajustes e são determinadas como descrito por Menter et al (2003): $\beta^* = 0,09$, $\alpha_1 = 5/9$, $\beta_1 = 0,075$, $\sigma_k = 0,85$, $\sigma_{\omega 1} = 0,5$, $\alpha_2 = 0,44$, $\beta_2 = 0,0828$, $\sigma_{k2} = 1$ e $\sigma_{\omega 2} = 0,856$.

2.5 Geração e qualidade de malha

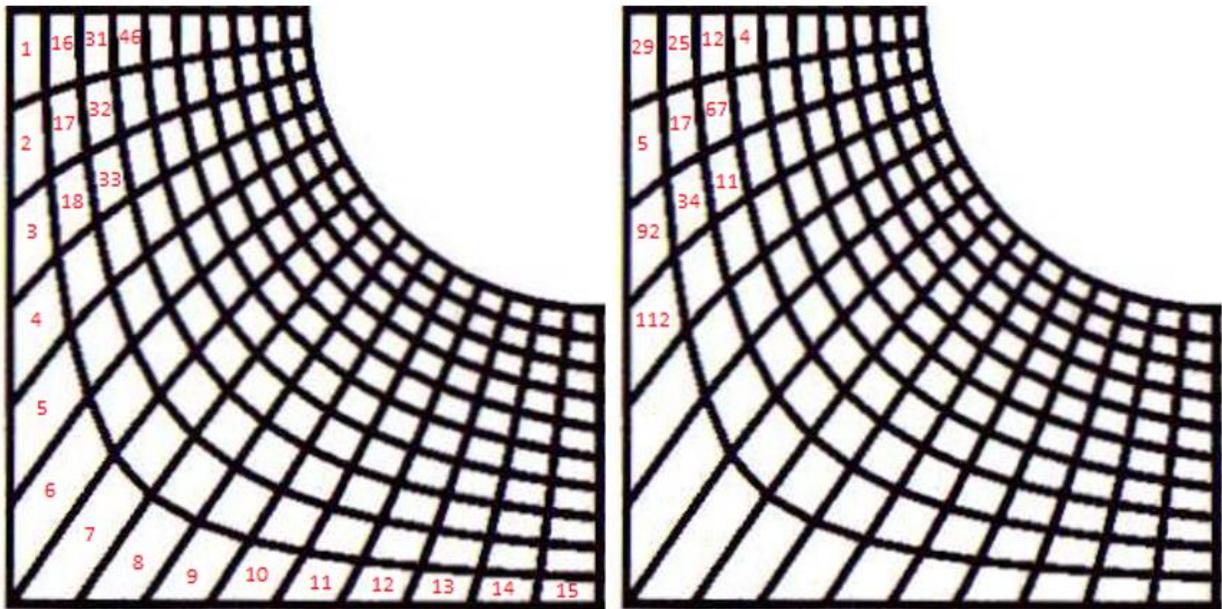
A geração da malha consiste na discretização do domínio que representa o problema físico a ser analisado. Esta técnica divide a geometria representativa do domínio em volumes de controle infinitesimais através de um dos métodos de discretização citados anteriormente (MDF, MVF, MEF), a fim de que as equações fundamentais da mecânica dos fluidos sejam resolvidas no domínio, por um dos modelos de turbulência. As técnicas de refino de malha estão diretamente ligadas ao modelo de turbulência que será aplicado ao problema. Assim, no caso de simulações que visam analisar as características do escoamento próximo a superfícies, é preciso que a malha tenha elementos pequenos o suficiente nesta região, de modo a permitir a reprodução do escoamento de forma satisfatória.

Quanto aos tipos de malhas, pode-se dividi-las em estruturadas e não estruturadas. Estas definições estão relacionadas com a disposição dos elementos ao longo da malha. No caso da

estruturada, a numeração dos volumes segue uma estrutura fixa, de modo que cada célula tem seus vizinhos numerados consecutivamente. Este arranjo facilita o cálculo dos balanços de massa e energia, diminui o número de acessos à memória e a própria quantidade de memória necessária para executar a simulação.

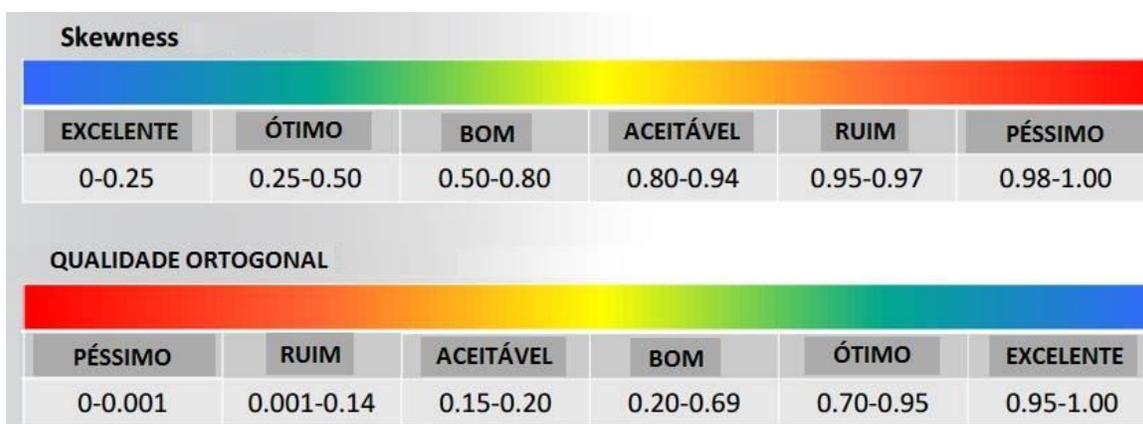
Nas malhas não estruturadas, contudo, os volumes se encontram numerados de forma aleatória e, uma vez que é necessário conhecer os elementos “vizinhos” para resolver as equações, é preciso se ter na memória matrizes ou vetores de "conectividade", que são responsáveis por relacionar cada volume ao seu vizinho numérico. O uso da malha não estruturada faz com que o código a ser programado seja mais complexo, impondo também a necessidade de acessar a matriz de conectividade várias vezes, o que aumenta o número de operações na máquina, em relação à malha estruturada. A vantagem desse tipo de malha, contudo, é a facilidade que ela proporciona em discretizar geometrias complexas. Ademais, softwares como o ANSYS FLUENT ou ANSYS CFX são escritos para operar com malhas não estruturadas, de modo que, mesmo que a numeração dos volumes esteja sequencial, eles vão precisar de matrizes de conectividade, tratando a malha estruturada como não estruturada. Existem vários softwares que podem ser utilizados para geração de malhas, estando entre os mais conhecidos: Pointwise, ICEM, ANSYS Meshing.

Figura 3 - Tipos de malha estruturada (esquerda) e não estruturada (direita).



Há também alguns parâmetros que permitem a classificação da malha em termos de qualidade. Uma discretização de boa qualidade implica diretamente em boa convergência e na obtenção de soluções coerentes. O ANSYS Meshing oferece alguns parâmetros para análise de malhas quanto à qualidade. Destes, *Skewness* e *Orthogonal Quality* foram de mais valia para este trabalho. O primeiro, que deve ser mantido tão baixo quanto possível, refere-se à acurácia da solução em regiões interpoladas; enquanto o segundo deve ser mantido o mais próximo possível de 1, conforme a figura a seguir:

Figura 4 - Parâmetros para determinação de qualidade de malha.

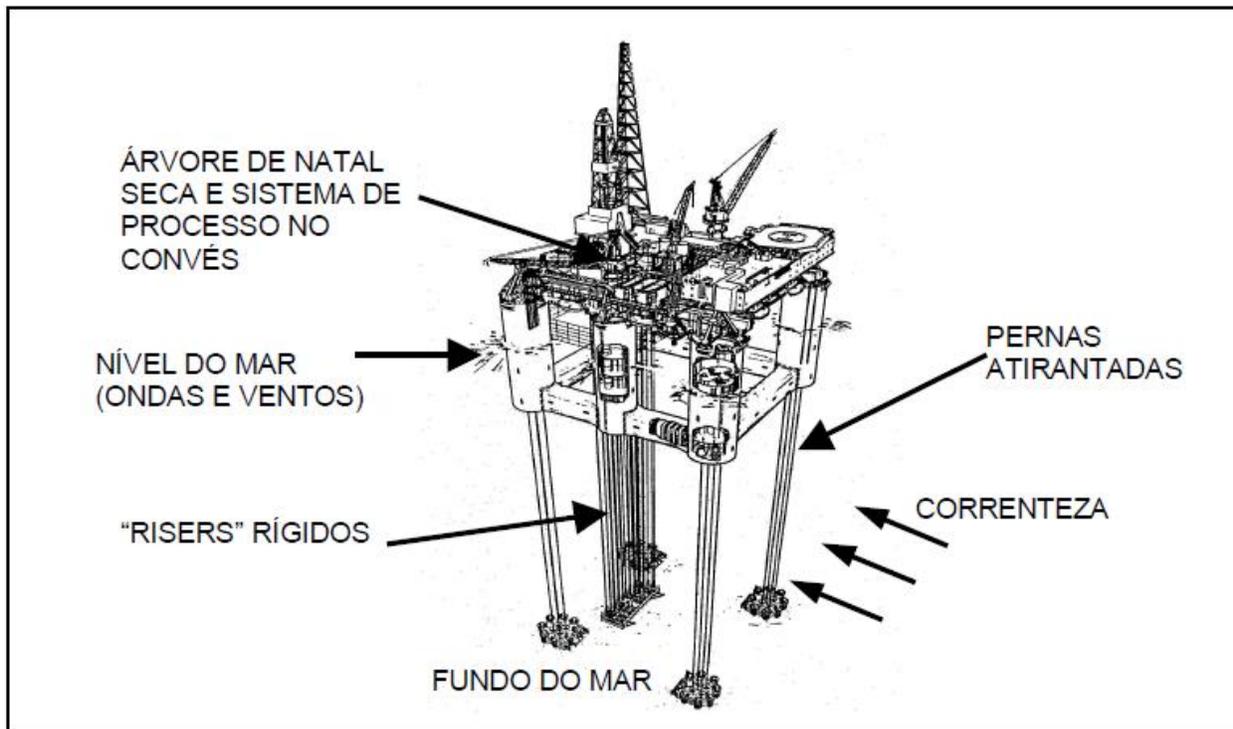


2.6 Risers

É sabido que o Brasil tem sido cenário de grandes descobertas de petróleo num passado não muito distante, cujas reservas se localizam em áreas marítimas e a grandes profundidades, como é com os campos do Pré-sal. Para a exploração destas reservas, utiliza-se corpos tubulares que interligam a cabeça de poço no fundo do mar ao navio ou à plataforma flutuante na superfície, conhecidos como riser. A figura 5 mostra um sistema flutuante de produção que utiliza risers rígidos verticais de produção.

De modo geral, existem dois tipos de risers, sendo sua utilização dependente do tipo de operação a ser realizada. O riser do tipo flexível é aplicado na produção. Esse tipo de riser é utilizado em forma similar a catenária, tendo o diâmetro externo variando de 0,064m (2,5”) a 0,41m (16,0”).

Figura 5- Configuração de riser rígido e plataforma TLP.



Durante a perfuração, é utilizado o riser do tipo rígido, que é encarregado do transporte do fluido de perfuração e por guiar a broca até a cabeça do poço. O diâmetro desse tipo de riser varia de 0,5 a 1,0 m, com a restrição de operar apenas sob pequenas deflexões. É possível desconectar hidráulicamente este tipo de riser da cabeça do poço, por razões de segurança, quando a embarcação atinge o máximo deslocamento horizontal permissível (*offset*). É possível utilizar também o riser rígido para exploração, desde que ele obedeça a certos limites operacionais. Em geral, os risers rígidos de produção possuem diâmetro externo na ordem de 0,25m, e são utilizados em estruturas flutuantes tais como TLP's (*Tension Leg Platforms*), plataformas SPAR, dentre outros que apresentam pequenos movimentos de translação vertical possibilitando a utilização desse tipo de riser.

Dentre os vários fatores que influenciam o comportamento de um riser, que pode ser visto como um corpo cilíndrico imerso em um escoamento, pode-se citar, como os mais importantes, as forças de correnteza e de onda agindo diretamente sobre ele, e o movimento induzido pela embarcação sob o efeito de ondas, vento e correnteza. Como visto, sabe-se que o escoamento externo sobre corpos rombudos, tais como cilindros, tende a causar o surgimento de forças, que interagem com a estrutura e, conseqüentemente, podem diminuir sua vida útil.

3 METODOLOGIA

Sabe-se que a análise de fenômenos de engenharia através de simulação numérica tem sido de grande valia no que diz respeito à redução de custos em projetos e até previsão de possíveis falhas, sem ter que necessariamente construir ou fabricar. Ainda assim, os modelos utilizados para simulação numérica, sobretudo na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), requerem certo grau de validação antes de serem aplicados, dada a complexidade presente na mecânica dos fluidos. Com um modelo validado, os resultados de uma análise via CFD podem, enfim, ser tidos como próximos ao que de fato ocorre na prática. Com isso, procedeu-se uma validação da abordagem numérica neste estudo, antes de aplicar a ferramenta à análise do escoamento sobre os risers de seção elíptica.

3.1 Validação do método computacional com dados experimentais

Antes de aplicar a ferramenta computacional à análise do riser de seção elíptica, fez-se inicialmente a validação do modelo numérico escolhido para modelar os efeitos turbulentos, o SST, com base no trabalho de Choi & Lee (2001), os quais estudaram de forma experimental as características do escoamento externo de ar a 25 °C, no entorno de um cilindro elíptico próximo a uma placa plana, para diferentes ângulos de ataque. A partir da reprodução computacional do mesmo experimento, mediu-se os valores obtidos para os coeficientes de pressão. Com o pacote comercial ANSYS 13, foram modeladas as geometrias para o domínio virtual de cada situação, no ANSYS DesignModeler, e também desenvolvidas as malhas, no ANSYS Meshing, a fim de que fosse aplicado o método dos volumes finitos para resolver o escoamento. A obtenção das soluções ocorreu a partir da aplicação do modelo de turbulência SST, descrito em tópico anterior. Para a fase inicial foram realizadas 8 simulações, tendo sido as duas primeiras descartadas após constatação da possibilidade de redução do domínio virtual, para diminuir os custos de tempo e computacional. Com o domínio remodelado, utilizou-se então dois valores de distância entre o cilindro e a placa plana, conforme feito pelos autores supracitados, havendo para cada distância três ângulos de ataque distintos para o cilindro (-15°, 0°, e +15°). O ângulo α assume valores positivos no sentido horário. Novos domínios serão utilizados, com o mesmo modelo de turbulência, para as condições de contorno às quais estão submetidos os risers (escoamento de água do mar, baixas temperaturas), no intuito de obter as características aerodinâmicas do cilindro

de seção elíptica para estas condições. Em seguida, um domínio virtual com um cilindro de seção circular também será resolvido, permitindo assim a comparação do comportamento observado na geometria mais comum (circular) e a geometria elíptica com diferentes ângulos de ataque.

Para avaliação do fenômeno descrito anteriormente, um domínio virtual foi definido, no qual uma elipse (razão entre eixos A/B igual a 2) está posicionada a uma distância H de uma placa plana, conforme Fig. 6. Neste estudo, utilizou-se dois valores de H/B , sendo estes iguais a 0,7 e 1,5, conforme Choi e Lee (2001). O domínio virtual consistiu em um prisma de dimensões 1500 mm de comprimento, 500 mm de altura, 10 mm de espessura, sendo esta última dimensão muito menor que as outras devido à natureza bidimensional do problema. A elipse foi posicionada a 200 mm da borda de entrada, onde a velocidade U_0 foi fixada em 10 m/s. A geometria da elipse utilizada está mostrada na Fig. 7, com $A = 42,4$ mm e $B = 21,2$ mm. A figura 8 indica o domínio geométrico utilizado. Para cada caso mudou-se apenas o ângulo de ataque e a relação H/B .

Figura 6- Esquema da seção do domínio virtual que contém a elipse.

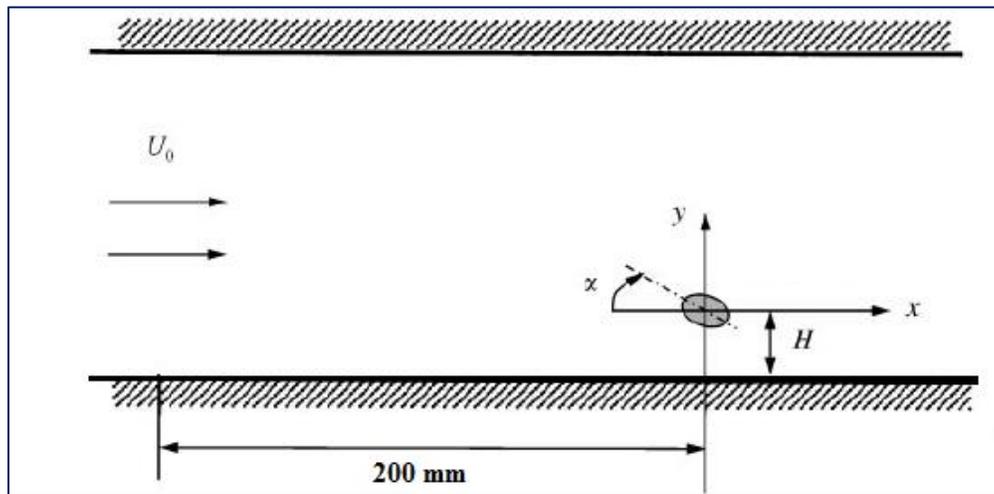


Figura 7 - Geometria da Elipse

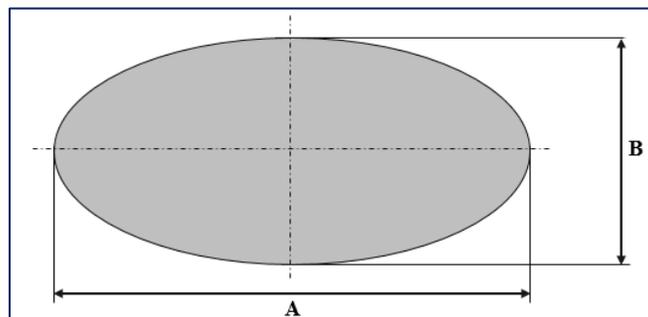
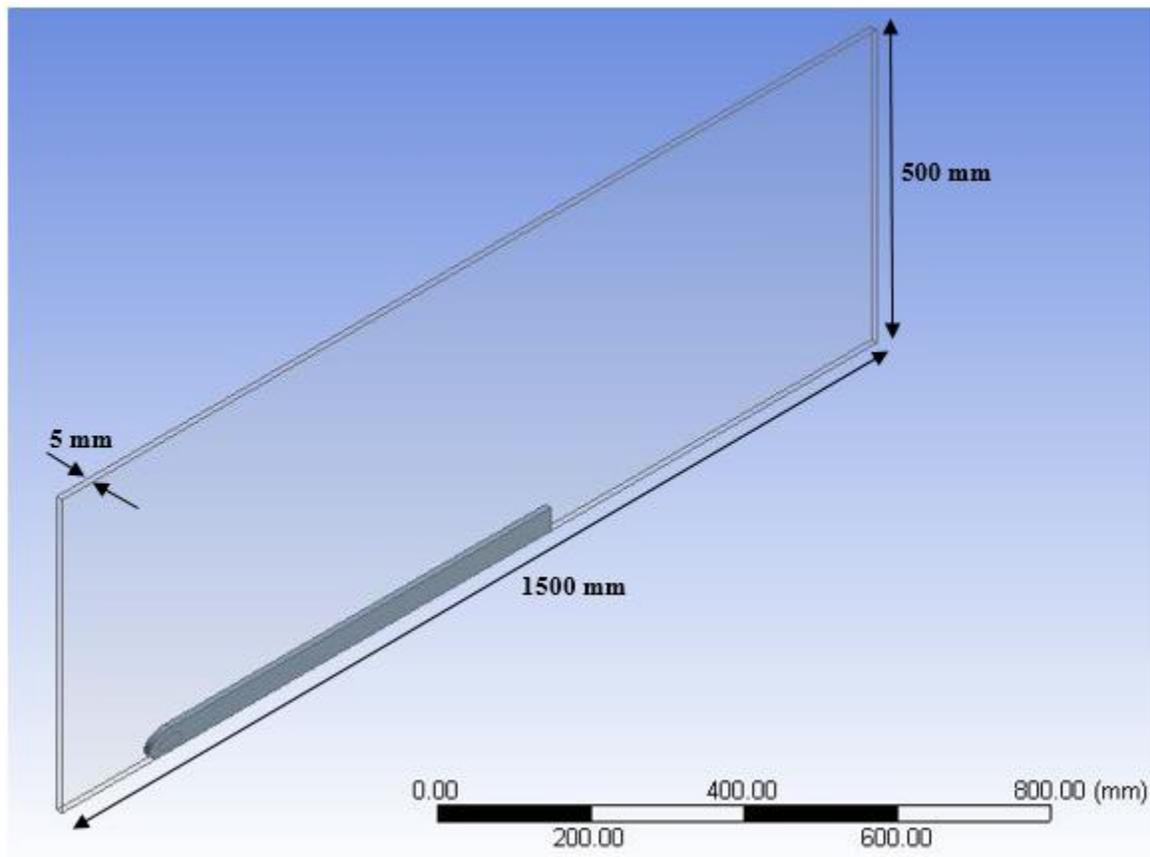


Figura 8- Domínio virtual gerado no DesignModeler do ANSYS.



3.2 Aplicação do modelo à análise do escoamento sobre risers de seção elíptica.

Tendo sido validada a abordagem com o modelo de turbulência SST, conforme o tópico anterior, o problema com risers de seção transversal elíptica foi abordado com base nas condições de contorno mostradas tabela 1. Uma vez que risers com essa geometria não são empregados na prática, considerou-se a seção elíptica de razão $A/B = 2$, conforme utilizado na validação. Para a geometria de seção circular, utilizou-se um diâmetro externo de 0,25 m. Os dados de temperatura e densidade são referentes aos dados de latitude média, fornecidos pela Associação Nacional dos Professores de Ciências da Terra, NESTA (*National Earth Science Teachers Association*), conforme as figuras a seguir, para uma profundidade referente a uma lâmina d'água de 1500m.

Figura 9 - Temperatura e densidade da água do mar em função da profundidade.

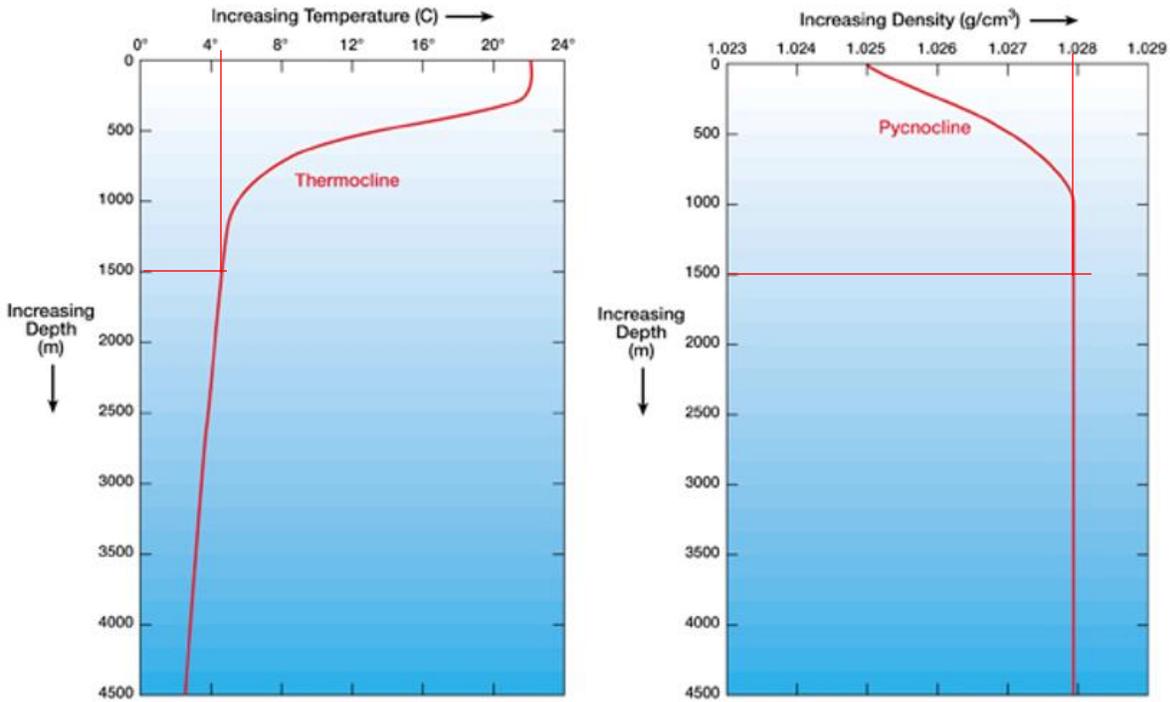


Tabela 1- Condições de contorno para análise do escoamento sobre os risers.

DESCRIÇÃO	VALOR
Tipo de riser	Rígido
Diâmetro	0,25 m
Corda maior da elipse	A = 0,25 m
Corda menor da elipse	B = 0,125 m
Profundidade	1500 m
Temperatura	5 °C
Densidade	1028 kg/m ³
Viscosidade dinâmica	1,62x10 ⁻³ Pa.s
Pressão	150 atm
Velocidade	U = 1 m/s

Para a análise do problema, criou-se um domínio virtual consistindo de um prisma de dimensões iguais a 5000 mm de comprimento, 2000 mm de altura e 10 mm de espessura, também devido à abordagem bidimensional que foi realizada. O perfil elíptico foi posicionado a 1500 mm da borda de entrada do domínio, e no seu centro vertical, de modo evitar os efeitos de parede, já que esta análise visa resolver o escoamento para um único riser rígido. Foram criados ao todo 7

geometrias, sendo 3 para a análise de escoamento longitudinal à corda maior da seção elíptica, 3 geometrias para análise de escoamento transversal à corda maior da seção elíptica, e um domínio com cilindro de seção circular, com diâmetro igual a 0,25m, representando a geometria convencional de um riser. Utilizou-se a razão entre os diâmetros maior e menor do perfil elíptico para o riser também de $A/B = 2$, com $A = 0,25\text{m}$. A figura 12 indica a geometria do perfil elíptico utilizado nesta parte do trabalho. As 3 geometrias para os casos longitudinal e transversal referem-se à utilização de 3 ângulos de ataque diferentes ($\alpha = -15^\circ, 0^\circ, +15^\circ$), com α assumindo valores positivos no sentido horário. As figuras 10 e 11 mostram as configurações para os domínios nas situações longitudinal e transversal, respectivamente. A figura 13 mostra um dos domínios, criado no ANSYS DesignModeler, para o caso longitudinal com $\alpha = 0^\circ$.

Figura 10 - Esquema da seção do domínio virtual para escoamento longitudinal.

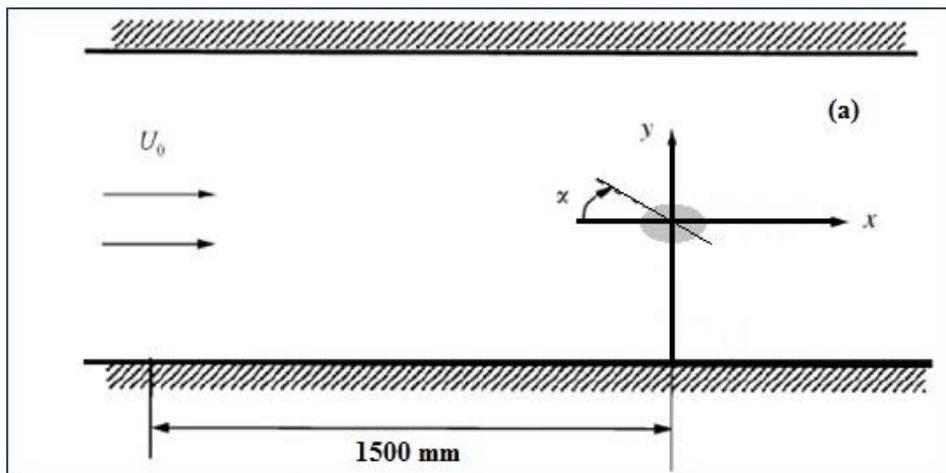
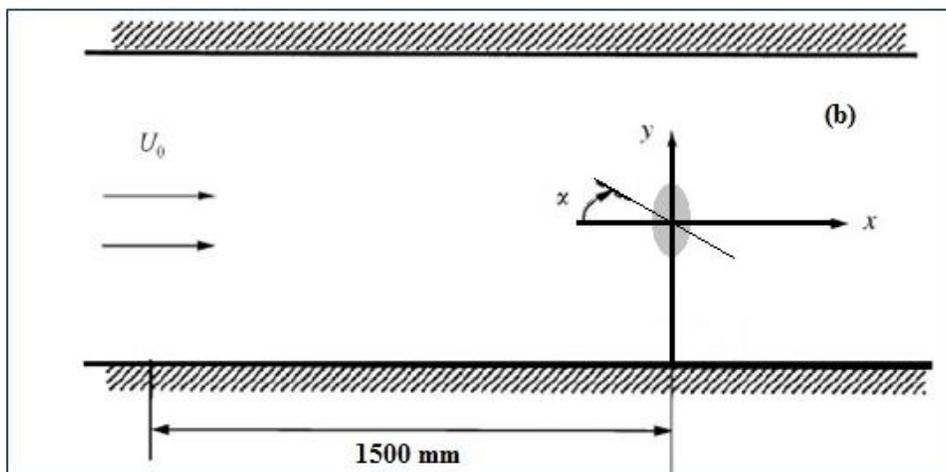


Figura 11- Esquema da seção do domínio virtual para escoamento transversal.



A figura a seguir mostra um dos domínios criados no ANSYS DesignModeler, para o caso com escoamento longitudinal e $\alpha = 0^\circ$. A região em destaque no entorno do perfil elíptico consiste em um corpo de influência que foi usado para refinar a malha nos pontos mais importantes, ou seja, nas regiões próximas à superfície do cilindro, onde o escoamento deve ser investigado.

Figura 12 - Geometria do perfil elíptico dos risers.

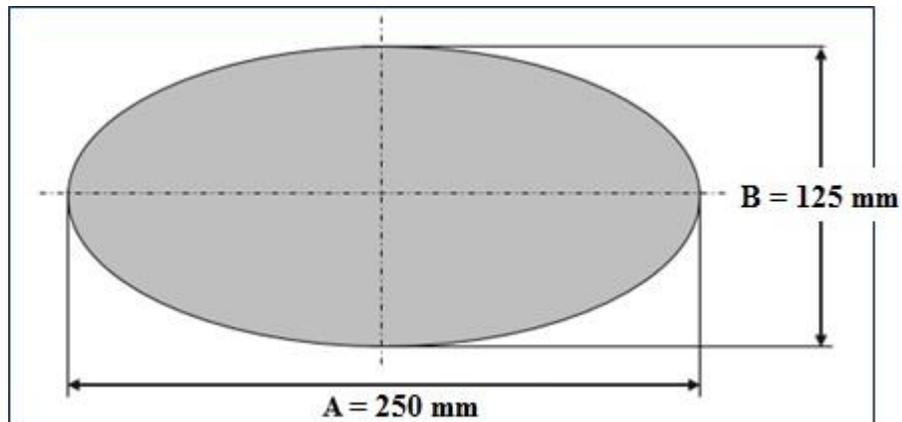
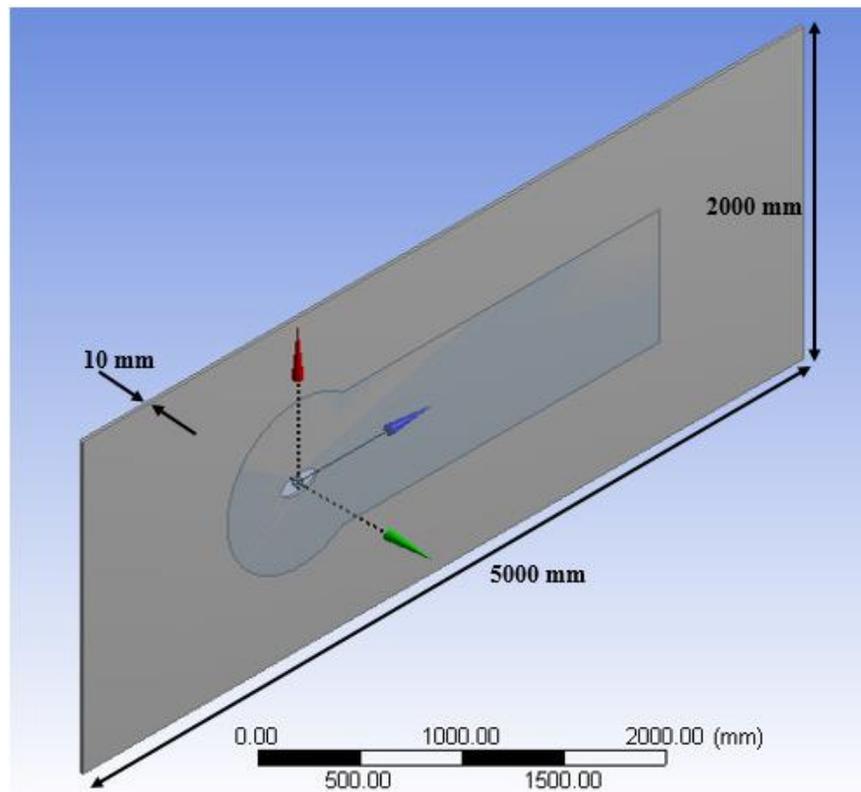


Figura 13 - Domínio criado no DesignModeler para $\alpha = 0^\circ$ e escoamento longitudinal.



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, tanto os resultados da validação do método numérico como aqueles obtidos para a análise do escoamento sobre risers serão discutidos. A separação em tópicos distintos visa a melhor compreensão do leitor, haja vista que foram utilizados domínios distintos em cada caso.

4.1 Resultados da validação

Se tratando das malhas, nos seis casos, mais de 98% dos volumes possuem forma hexaédrica. A Tabela 2 lista as características das 6 malhas obtidas, as quais podem ser vistas nas figs. 14 e 15. Na região no entorno da seção elíptica realizou-se um refino mais específico, com o tamanho dos elementos mais distantes sendo dependente do tamanho dos elementos próximos ao cilindro, uma vez que os fenômenos a serem observados se concentram no entorno do mesmo. Com isso, garante-se que os resultados obtidos estarão mais próximos do esperado. As malhas obtidas geraram resultados satisfatórios, conforme será visto a seguir.

Tabela 2- Características das malhas geradas para a validação do método.

H/B	α	NÚMERO DE NÓS	NÚMERO DE ELEMENTOS	ORTOGONALIDADE MÉDIA	DESVIO PADRÃO
0,7	-15	213.492	105.639	0,986	0,034
	0	213.828	105.797	0,985	0,037
	15	217.518	107.642	0,986	0,032
1,5	-15	1.470.131	1.344.660	0,987	0,023
	0	1.978.704	1.838.610	0,987	0,029
	15	1.483.573	1.357.056	0,987	0,023

Figura 14- Malhas obtidas no entorno da elipse, para $H/B = 0,7$.

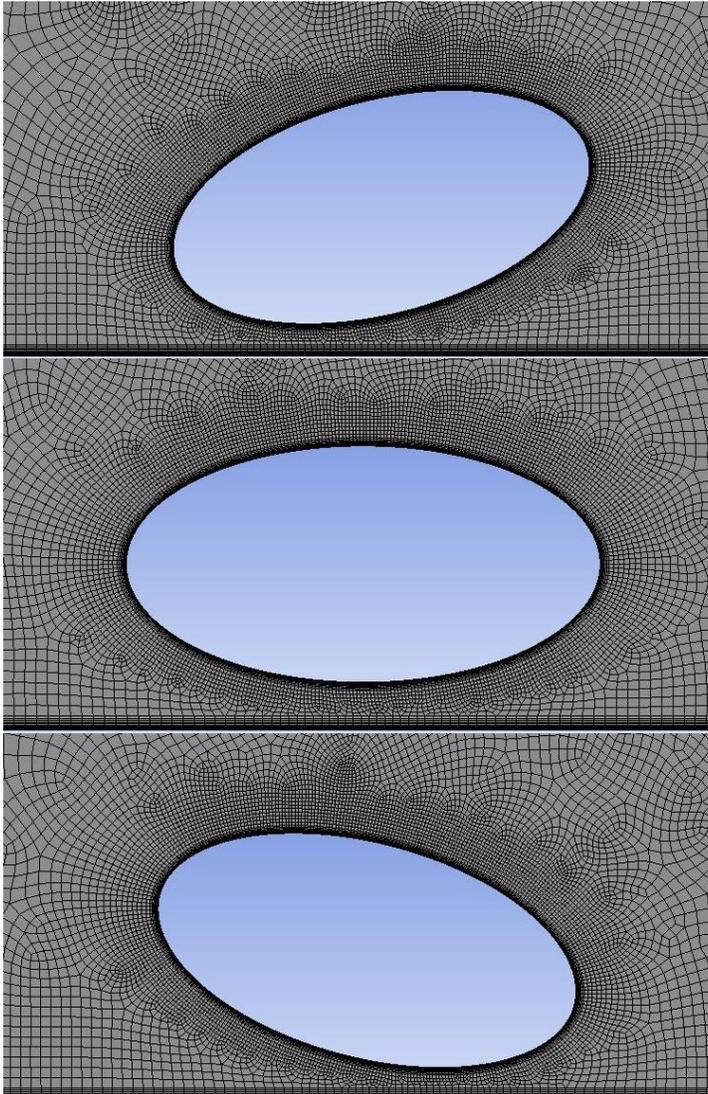
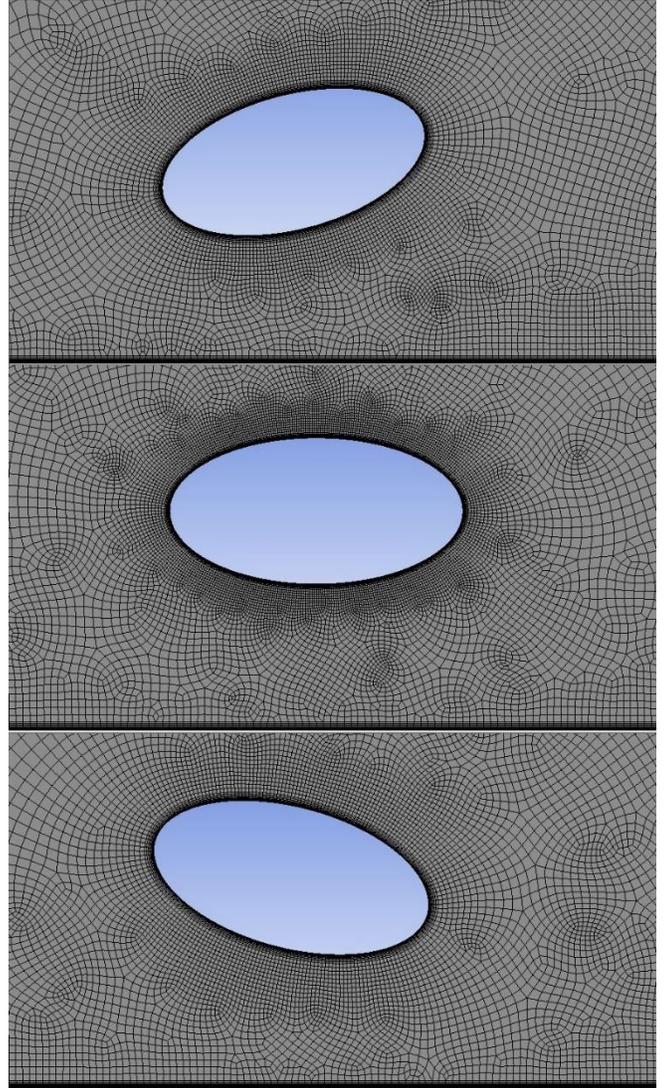


Figura 15- Malhas obtidas no entorno da elipse, para $H/B = 1,5$.



As figuras 16 – (a), (b), e (c), mostram o contorno de velocidades gerado para cada ângulo de ataque, com H/B igual a 0,7. É possível observar que as regiões de recirculação existem independentemente do ângulo de ataque, conforme descrito por (Choi e Lee, 2001). À montante do cilindro, tem-se uma maior região de recirculação para um ângulo de ataque positivo (fig. 16(c)). Além disso, também para este caso, observa-se a separação do escoamento na parte superior do cilindro ocorrer também mais à montante do que para $\alpha = 0^\circ$ e -15° . A região da esteira, contudo, é menor do que nas outras duas situações. No caso do ângulo de ataque negativo, observa-se uma região de recirculação à montante do cilindro muito menor do que nas outras duas situações (fig. 16(a)), com a separação do escoamento ocorrendo mais à jusante em ambas as partes do cilindro.

Neste caso, observa-se uma região da esteira maior do que nos casos anteriores. Para o ângulo de ataque nulo, observou-se as menores regiões de recirculação, tanto à montante como à jusante do cilindro elíptico. Os campos de velocidade verificados de forma experimental para $H/B = 0,7$, estão mostrados nas figs. 17 – (a), (b), e (c), para efeito de comparação com os resultados obtidos via CFD.

Figura 16- Contornos de velocidade no entorno do cilindro obtidos via CFD, para $H/B = 0,7$.

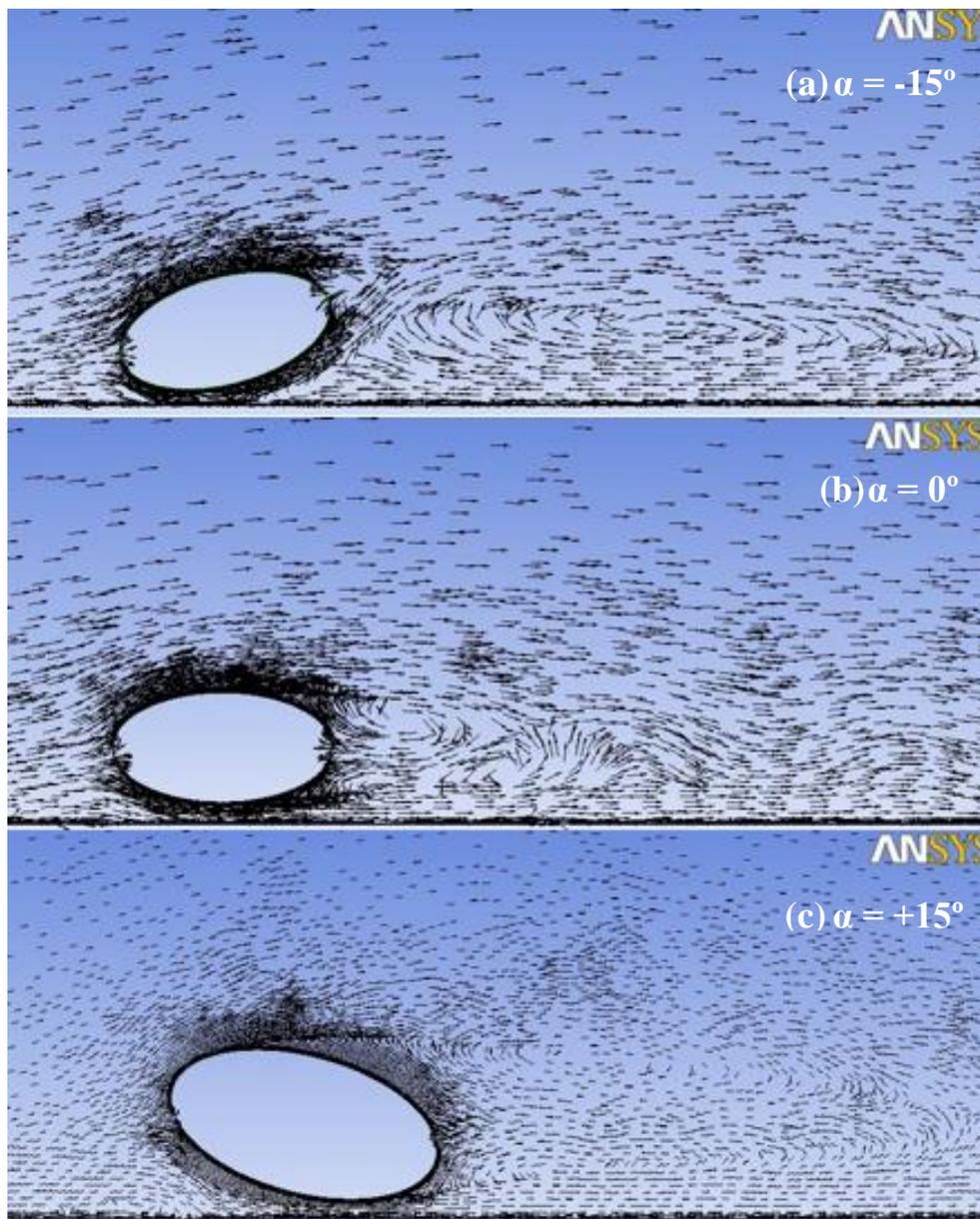
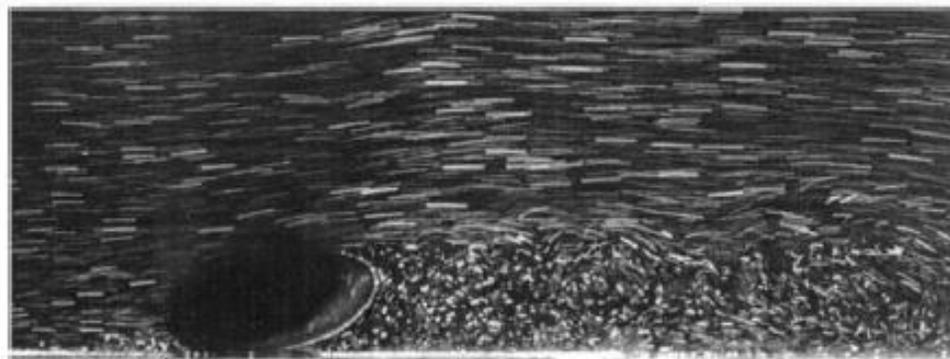
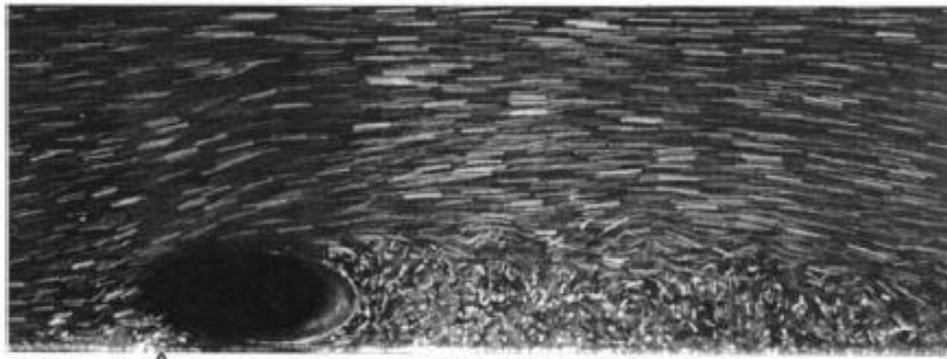


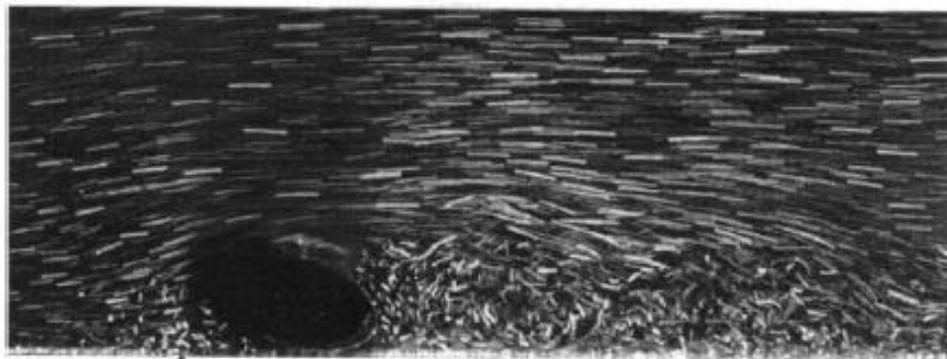
Figura 17- Contornos de velocidade no entorno do cilindro obtidos de forma experimental para $H/B = 0,7$ (Choi & Lee, 2001).



(a) $\alpha = -15^\circ$



(b) $\alpha = 0^\circ$



(c) $\alpha = 15^\circ$

Para o caso onde $H/B = 1,5$, foi possível observar a interação entre a camada limite e a esteira formada à jusante do cilindro. À medida que o escoamento ocorre, o desprendimento de vórtices acontece, independente do ângulo de ataque. Para $\alpha = -15^\circ$, a ejeção de vórtices

enfraquece primeiro, se comparada aos outros dois ângulos de ataque, uma vez que neste caso a camada cisalhante separada da placa plana e a camada cisalhante mais inferior da esteira de vórtices à jusante do cilindro interagem fortemente. As figuras 18 – (a), (b), e (c) mostram os campos de velocidade obtidos via simulação para cada ângulo de ataque, com $H/B = 1,5$. Nas figuras 19 – (a), (b), e (c) é possível visualizar os campos de velocidade obtidos por Choi & Lee, de forma experimental.

Figura 18- Contornos de velocidade no entorno do cilindro obtidos via CFD, para $H/B = 1,5$.

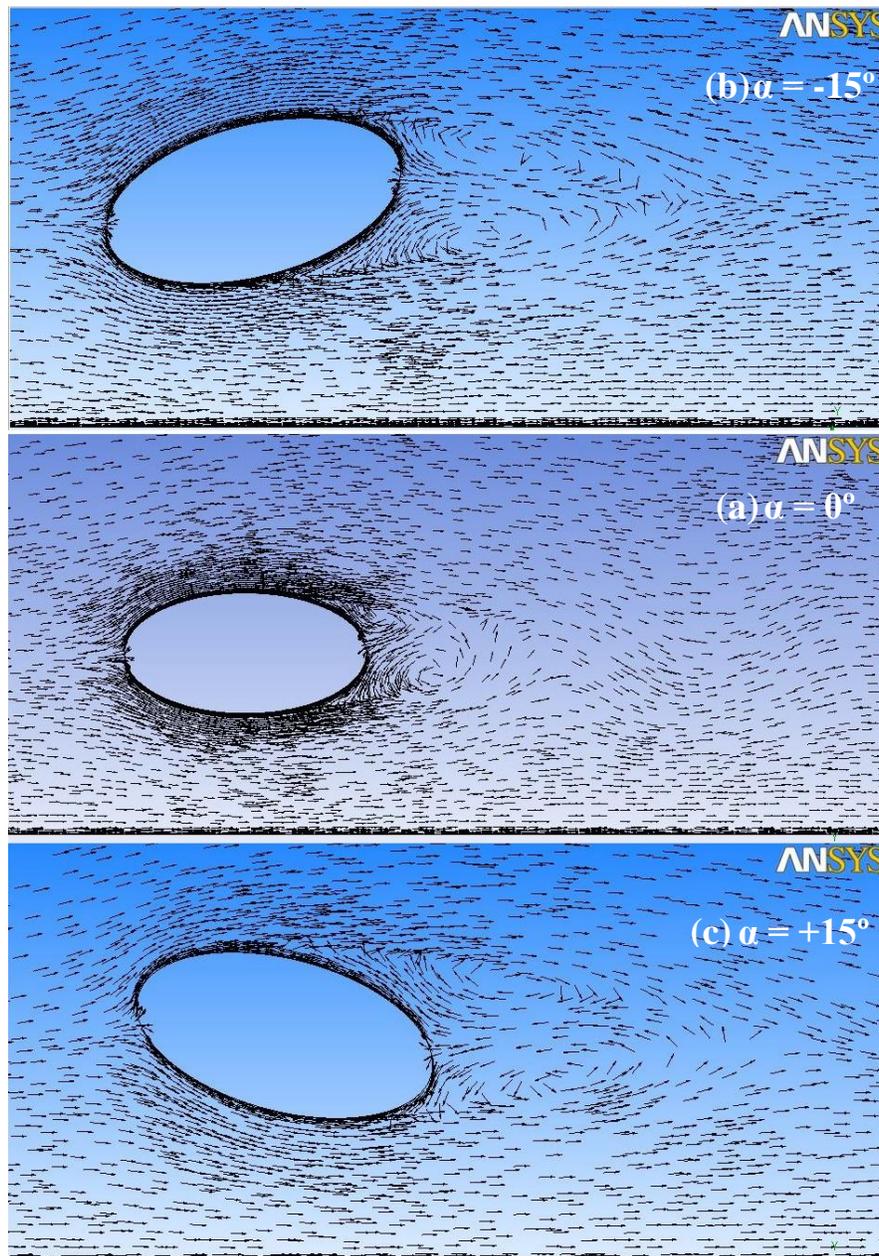
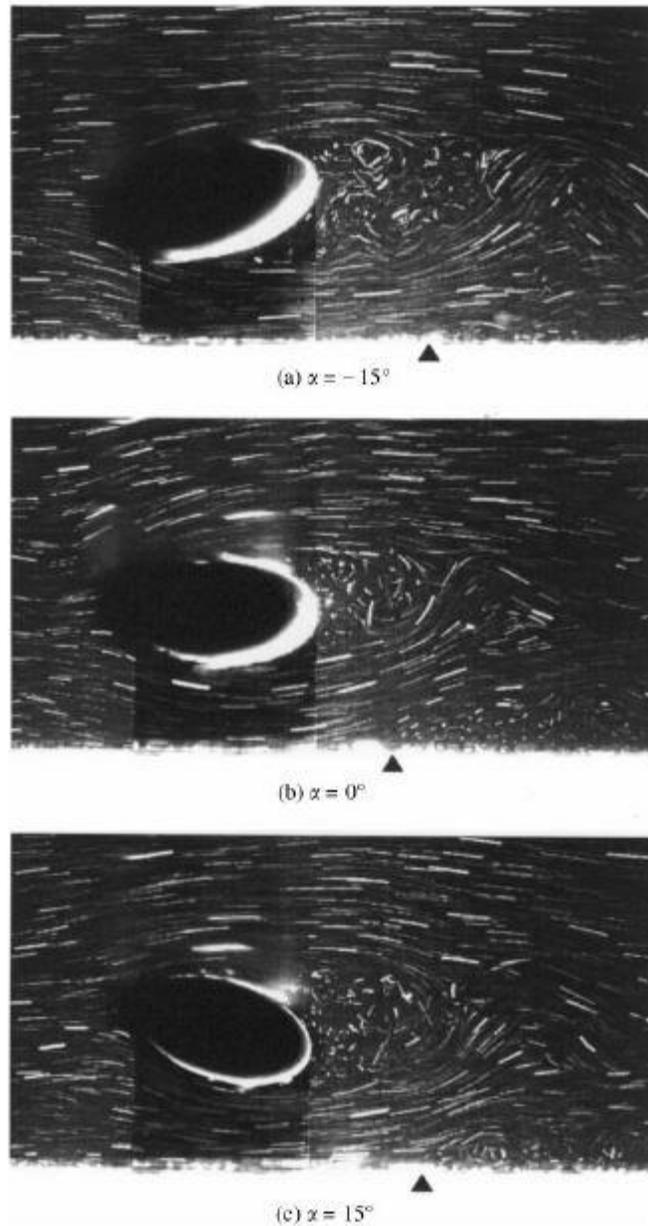


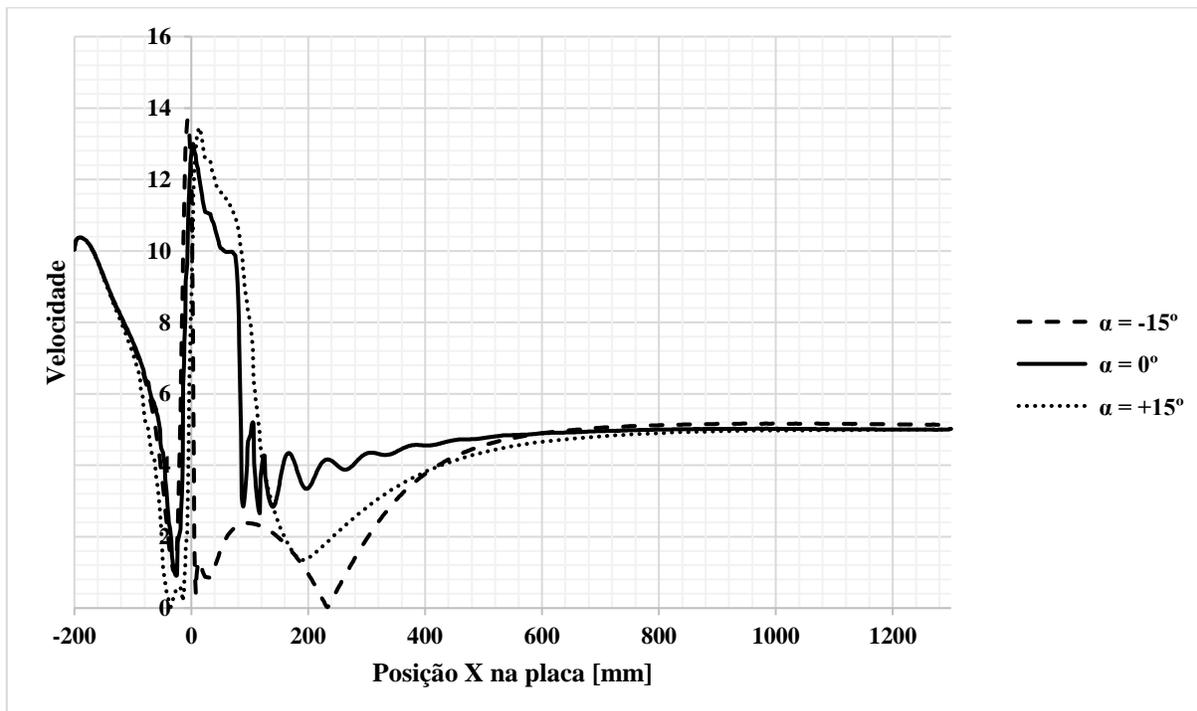
Figura 19 - Contornos de velocidade no entorno do cilindro obtidos de forma experimental para $H/B = 1,5$ (Choi & Lee, 2001).



Para melhor observar a influência do ângulo de ataque do cilindro no escoamento ao longo da placa, plotou-se o gráfico da velocidade 1 mm acima da placa plana em função da posição x (onde x cresce para a direita e varia de -200 a 1300 mm, uma vez que a seção transversal do

cilindro se encontra no centro dos eixos). Com base no gráfico da fig. 20, percebe-se que, quando $H/B = 0,7$, para valores de x acima de 600 mm, ou seja, a 400 mm de distância do centro do cilindro, a velocidade a 1 mm da placa já equivale à metade da velocidade U_0 . Além disso, para $\alpha = -15^\circ$, tem-se uma maior variação da velocidade à jusante da elipse, tal como se observa na fig. 15 (a). Para $\alpha = 0^\circ$, a flutuação da velocidade é, em média, menor que nos outros dois casos, com $\alpha = +15^\circ$ apresentando variação sem oscilação. Com respeito aos pontos de velocidade máxima, tem-se que para $\alpha = 0^\circ$ este valor ocorre exatamente em $x = 0$. Para o caso de α negativo, a velocidade máxima ocorre antes de $x = 0$, observando-se o oposto para α positivo. Além disso, as magnitudes das velocidades máximas para o ângulo de ataque diferente de zero são maiores do que para a situação de simetria.

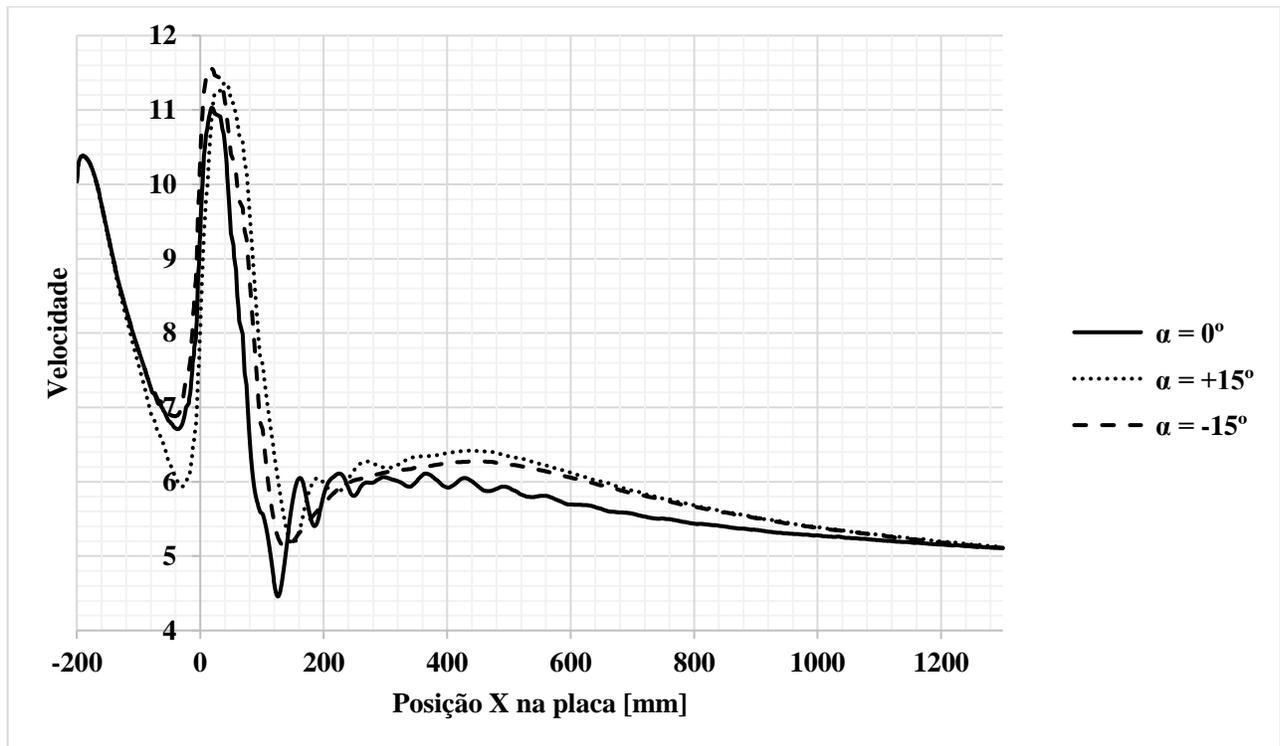
Figura 20 - Velocidade a 1 mm da placa, em função de x , para $H/B = 0,7$.



Para o caso onde $H/B = 1,5$, observou-se uma menor influência do cilindro na velocidade a 1 mm da parede onde $X = 0$ (centro da seção elíptica), uma vez que neste ponto a velocidade caiu para aproximadamente 4,5 m/s, diferentemente do que foi verificado para a outra relação de H/B , conforme a fig. 21. Também, é possível constatar que a velocidade volta a estabilizar por volta de 5 m/s, porém em uma região mais distante do cilindro, se comparado à situação descrita anteriormente. Este fato pode ser atribuído à menor influência da subcamada viscosa da placa plana

na esteira viscosa formada atrás do cilindro. As flutuações mais evidentes para $\alpha = 0^\circ$ se devem ao desprendimento de vórtices ao longo de uma extensão maior do que nos outros ângulos de ataque. As velocidades máximas se deram também por volta de $x = 0$, tendo sido, contudo, menores do que as verificadas para $H/B = 0,7$. Mais uma vez, verifica-se que a maior distância entre o cilindro e a placa implicou em uma menor influência no escoamento ao longo de ambos os elementos (cilindro e placa).

Figura 21 - Velocidade a 1 mm da placa, em função de x , para $H/B = 1,5$.

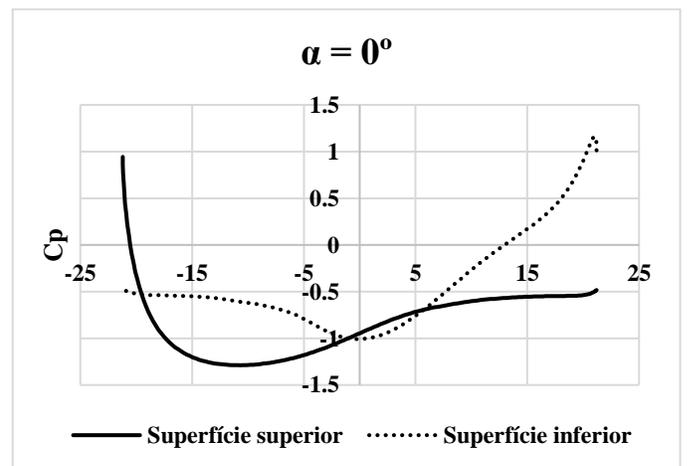
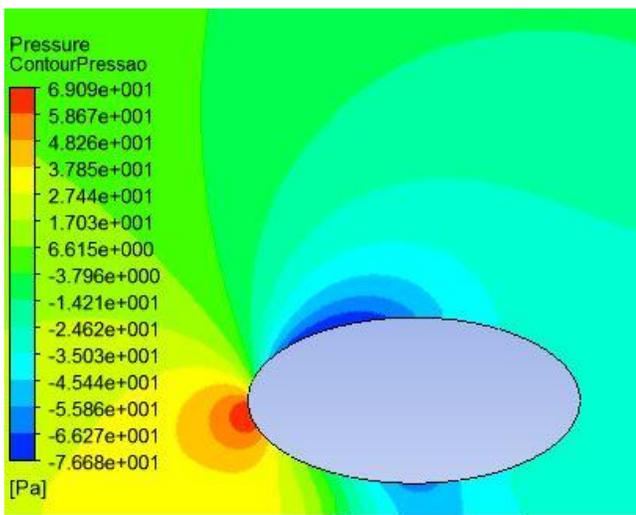
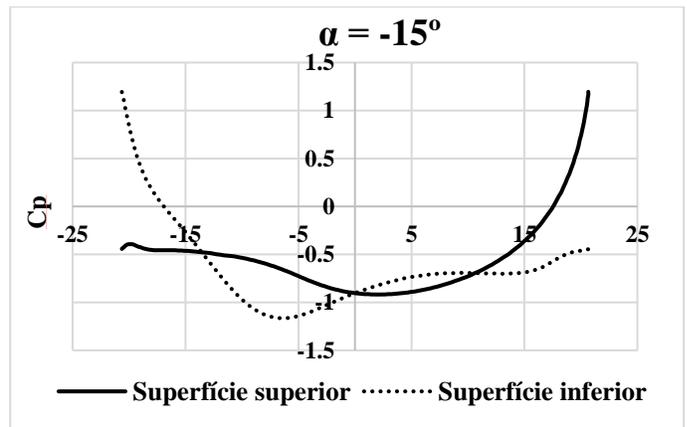
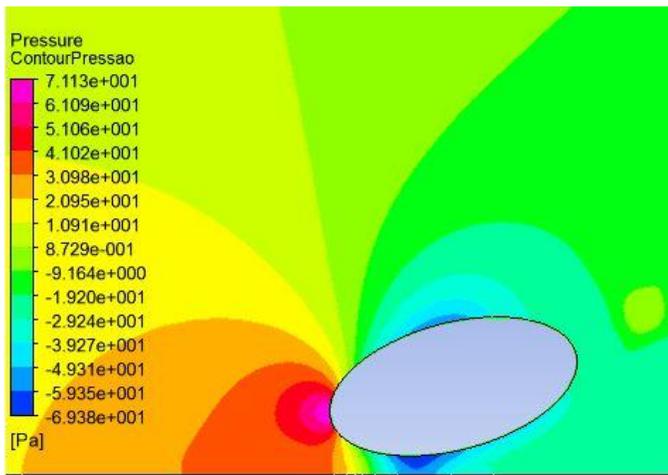


Analisou-se ainda a dependência entre de pressão na superfície do cilindro e o ângulo de ataque, conforme mostrado nas figs. 21 e 22. A diferença de pressão entre a superfície do cilindro e a pressão de referência ($P_s - P_0$) foi adimensionalizada através do coeficiente de pressão, C_p , cuja expressão corresponde à mostrada na Eq. 14. Pôde-se observar que, para $\alpha = 0^\circ$, as distribuições de pressão nas superfícies superior e inferior do cilindro se tornam simétricas em relação à dimensão A da elipse, quando $H/B = 1,5$. Observou-se também que a razão H/B afeta de forma mais evidente a distribuição de pressão na superfície inferior do cilindro, e à medida que o cilindro se afasta da placa plana esta influência se torna menor, já que o estrangulamento do escoamento diminui com o aumento de H/B . Para $\alpha = -15^\circ$ com $H/B = 0,7$, verificou-se uma

inversão no comportamento da pressão, com relação aos outros casos, ocorrendo os menores valores de pressão na superfície inferior do cilindro. Isso se deve ao fato de, devido à maior obstrução da área de escoamento entre o cilindro e a placa, a velocidade do fluido aumentar consideravelmente neste setor, acarretando a diminuição na pressão (escoamento incompressível).

$$C_p = \frac{P_s - P_0}{\rho \frac{U_0^2}{2}} \quad (14)$$

Figura 22- Distribuição de pressão sobre o cilindro, para H/B = 0,7 (Contorno de pressão à esquerda e Coeficientes de Pressão à direita).



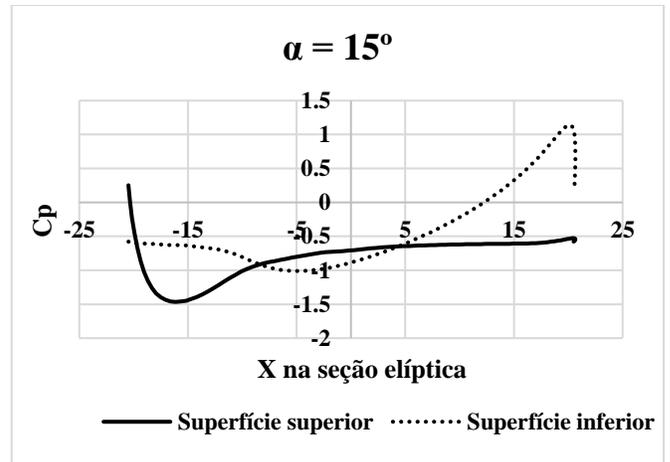
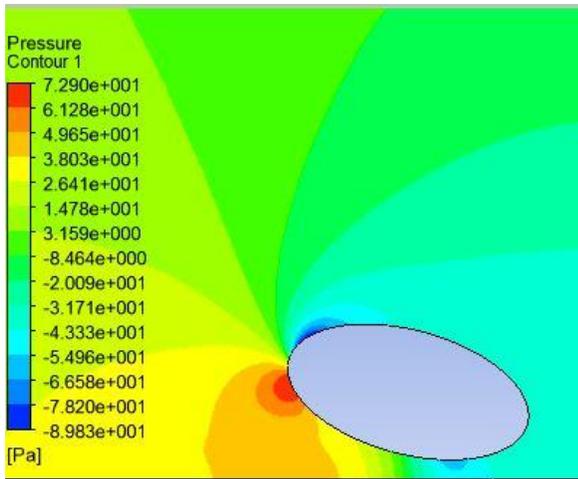
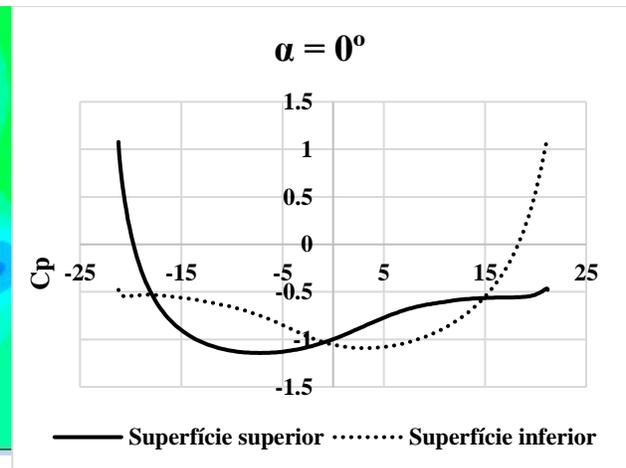
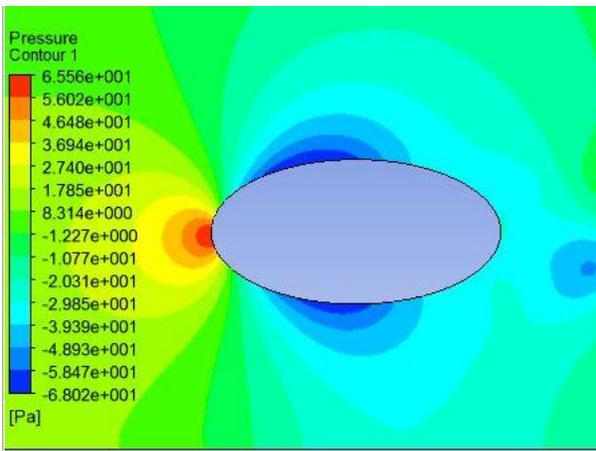
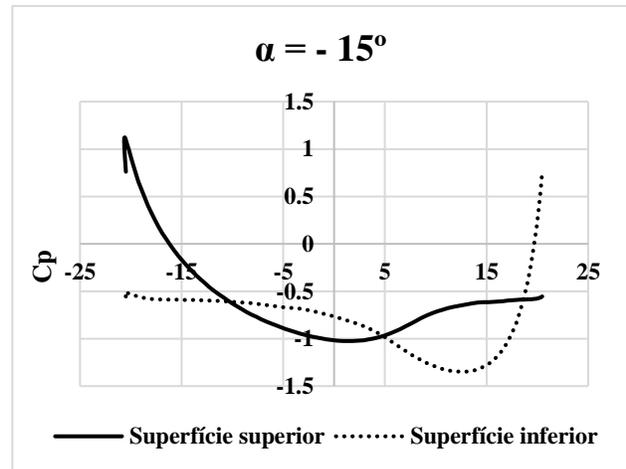
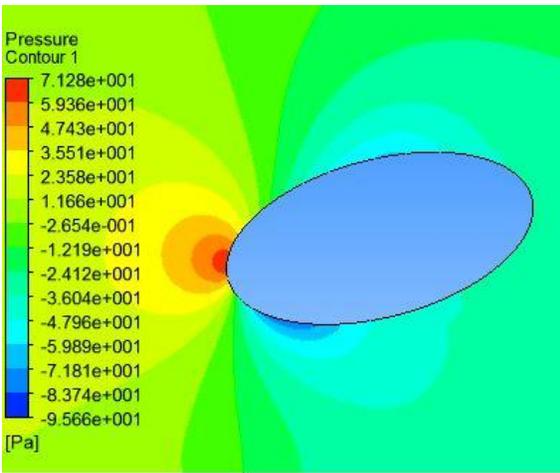
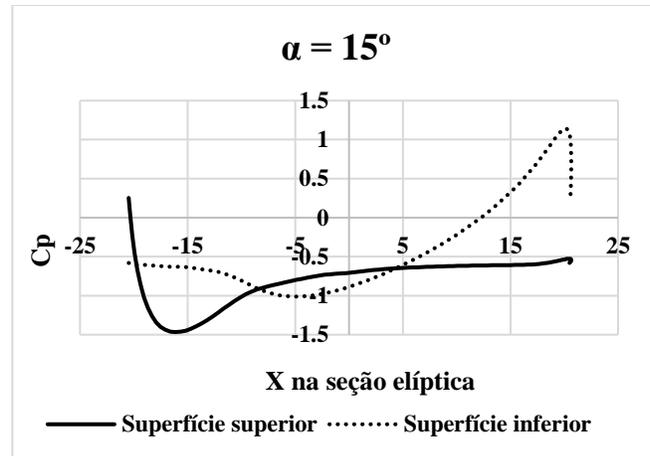
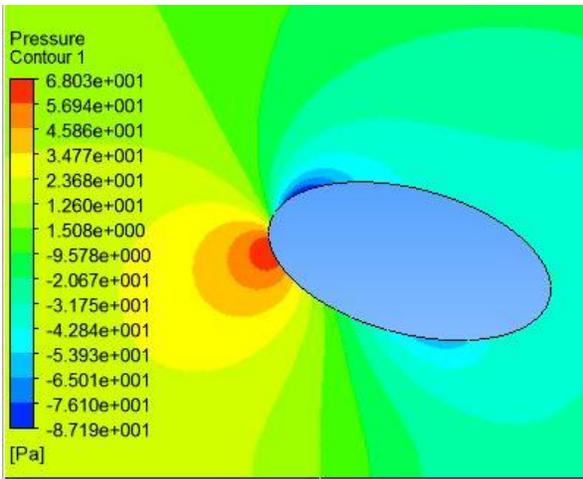


Figura 23- Distribuição de pressão sobre o cilindro, para $H/B = 1,5$ (Contorno de pressão à esquerda e Coeficientes de Pressão à direita).





Observou-se também que com o afastamento da placa plana, a distribuição de pressão no cilindro se aproxima da situação simétrica para $\alpha = 0^\circ$, conforme a fig. 23. Os comportamentos da pressão verificados nas figs. 22 e 23 estão de acordo com os resultados experimentais de Choi & Lee, para os casos analisados.

4.2 Resultados da análise do escoamento sobre risers de seção elíptica

No que se refere às malhas geradas para a análise dos risers de seção elíptica, os domínios para cada caso, após discretização, apresentaram as características indicadas na tabela 3. Com base na fig. 4, pode-se afirmar que as malhas obtidas foram de boa qualidade, analisando os parâmetros de ortogonalidade e *skewness*. A fim de capturar as características do escoamento na região do entorno do riser, representado pelo cilindro de perfil elíptico, fez-se um refinamento da malha nesta parte do domínio, obtendo-se uma discretização mais fina para os pontos de interesse. As malhas construídas para os ângulos de ataque 15° e -15° , na situação de escoamento transversal, não são especificadas a seguir devido ao fato de que a solução para estes casos não atingiu o critério de convergência estabelecido para o método numérico (10^{-6}). As malhas para os casos listados na tabela 3 estão mostradas na fig. 24.

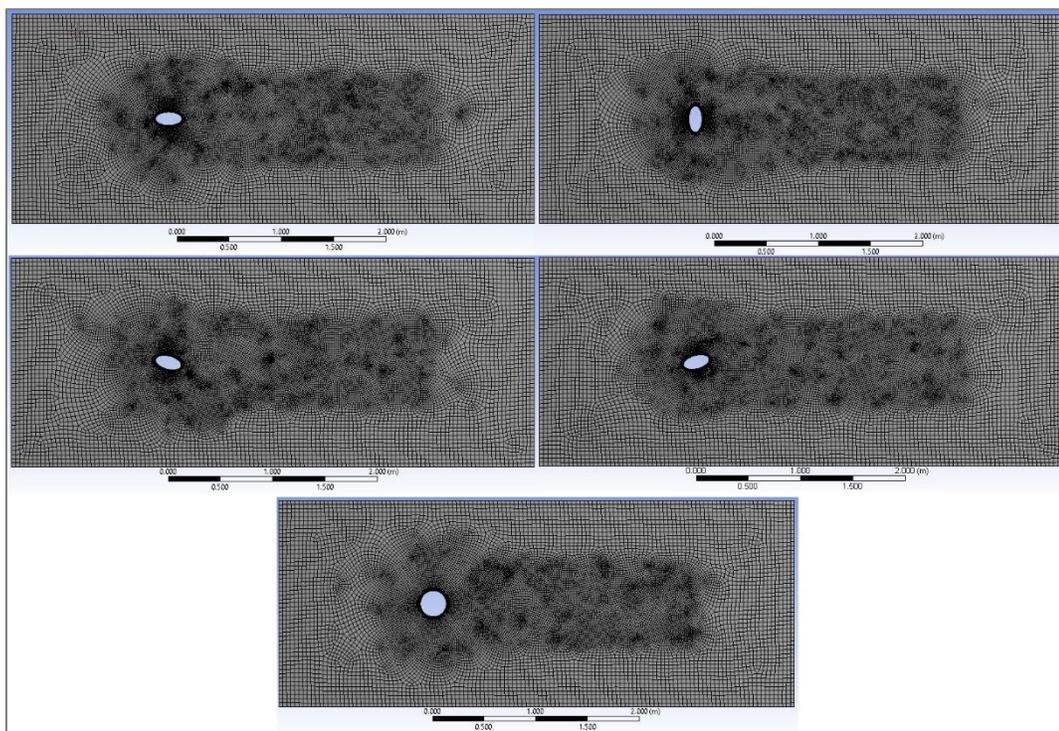
Tabela 3- Características das malhas geradas para análise dos risers.

SENTIDO DO ESCOAMENTO	α	NÚMERO DE NÓS	NÚMERO DE ELEMENTOS	ORTOGONALIDADE MÉDIA	DESV.PAD. DA ORTOGONALIDADE	SKEWNESS MÉDIA	DESV. PAD. SKEWNESS
LONGITUDINAL	-15	35316	17450	0.9851	0.0242	0.1055	0.0901
	0	38094	18837	0.9851	0.0233	0.1075	0.0888
	15	37324	18460	0.9840	0.0284	0.1071	0.0926

-	Seção Circular	35274	17433	0.9859	0.0274	0.0974	0.0927
TRANSVERSAL	-15	*	*	*	*	*	*
	0	37580	18593	0.9835	0.0270	0.1106	0.0947
	15	*	*	*	*	*	*

*Soluções não atingiram critério de convergência.

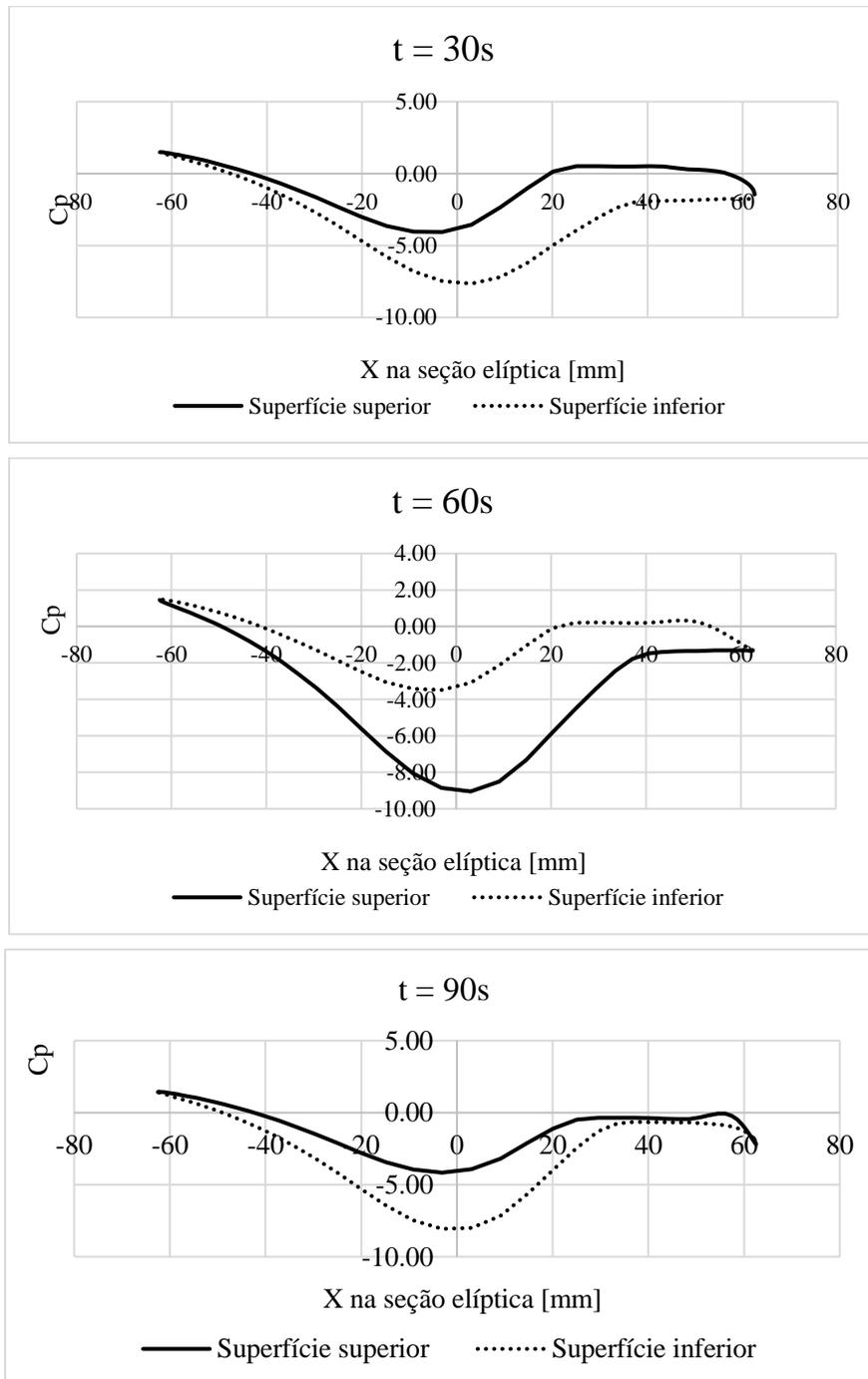
Figura 24- Malhas geradas no ANSYS Meshing para a análise do escoamento.



A fim de analisar o comportamento da pressão no entorno do riser, utilizou-se o coeficiente de pressão, C_p , conforme a eq. 14. Considerando o caso com escoamento transversal e $\alpha = 0^\circ$, observa-se que haverá a formação de uma esteira de vórtices, conforme a fig. 26. Tal esteira, que tem características periódicas, apresenta variações de pressão e velocidade ao longo do tempo, o que varia também o coeficiente de pressão, C_p . Desse modo, o vetor força atuando no riser muda ao longo do tempo, o que pode vir a causar a fadiga da estrutura. A fim de observar tal fenômeno, plotou-se as curvas para o coeficiente de pressão em diferentes instantes de tempo, conforme a fig. 25. Como se observa, os valores de C_p variam ao longo da superfície com o tempo, assumindo hora valores positivos, hora valores negativos. Observa-se nos contornos de pressão da fig. 26 a formação da esteira de vórtices, à jusante do riser, que consiste em regiões de recirculação, com baixa pressão, variando com o tempo. Este comportamento pode ser atribuído à uma maior área

frontal para retardar o escoamento, que encontra uma seção cerca de duas vezes maior que a observada nos casos para escoamento longitudinal, o que acarreta em uma maior pressão estagnação.

Figura 25 - C_p na superfície do riser a escoamento transversal, para diferentes instantes de tempo.



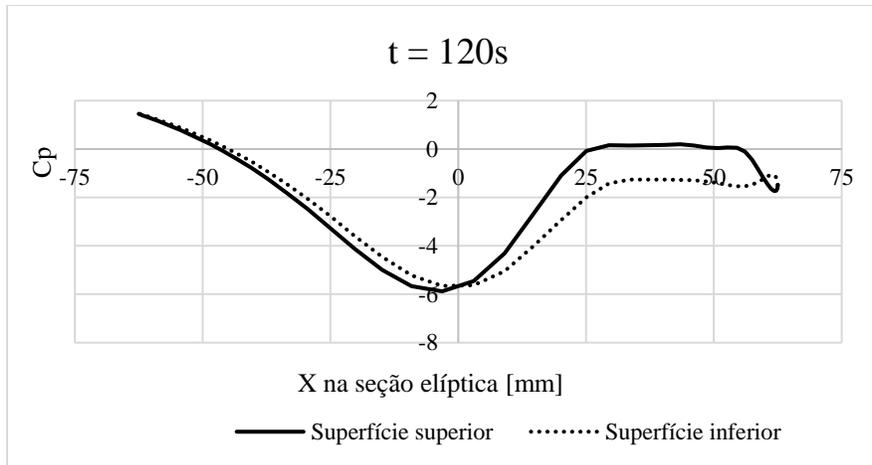
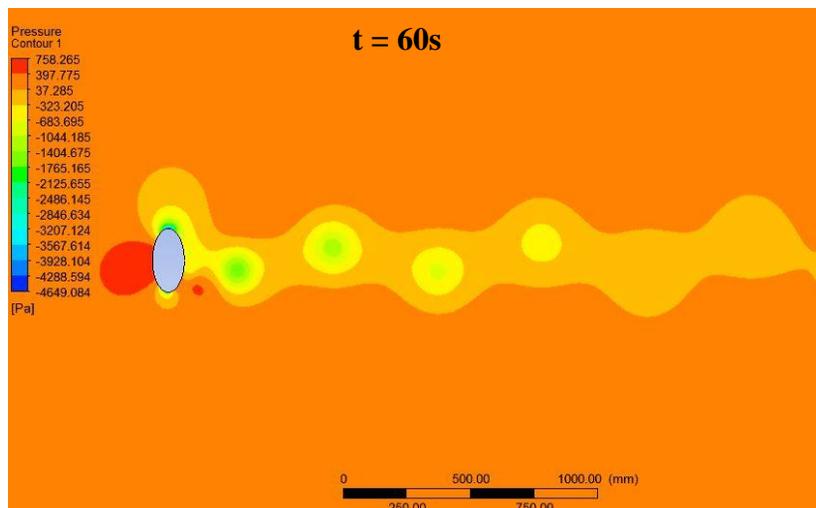
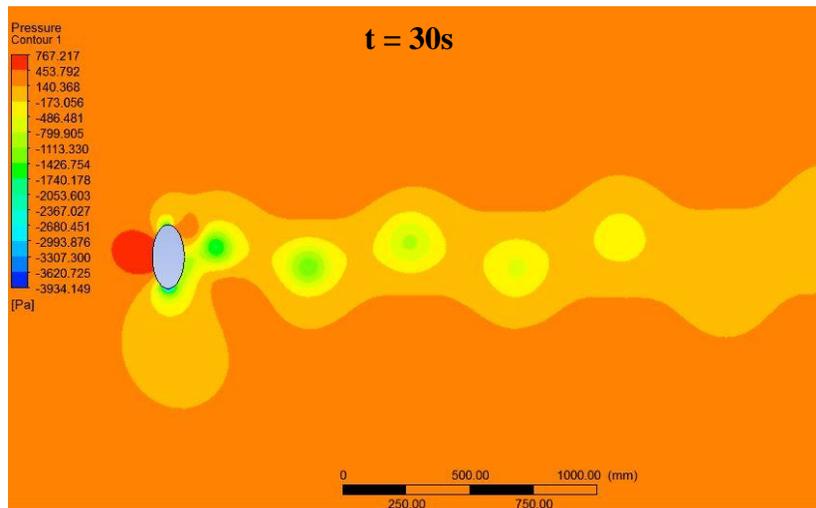
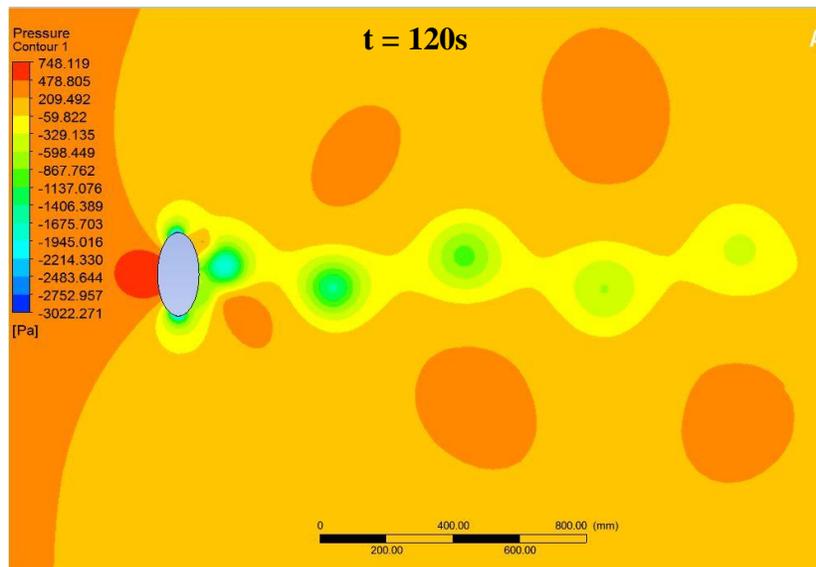
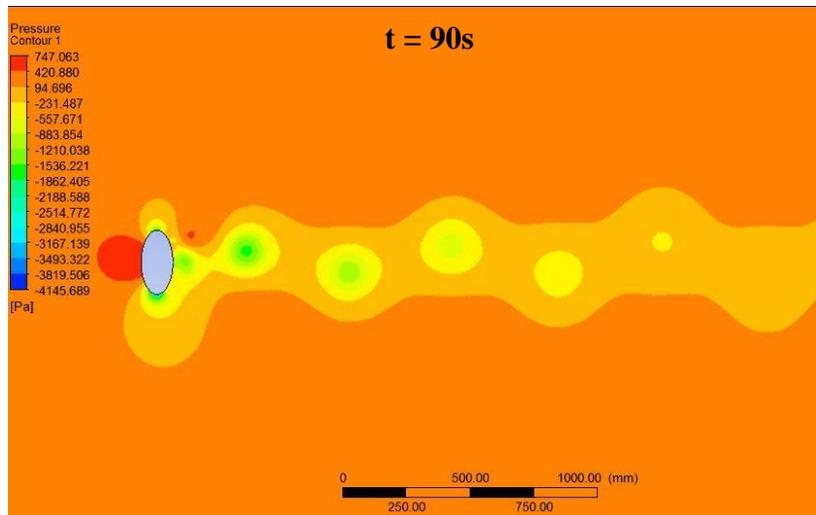


Figura 26 - Contorno de pressão sobre o riser a escoamento transversal, para diferentes instantes de tempo.





Para o caso com $\alpha = 0^\circ$ e escoamento longitudinal, foi observada uma menor perturbação no escoamento, se comparado com os demais casos. Este fato pode ser atribuído à forma elíptica do perfil, que funciona como uma espécie de carenamento da seção, retardando o descolamento da camada limite e diminuindo os efeitos da pressão. O comportamento do coeficiente de pressão foi praticamente o mesmo nas superfícies superior e inferior do riser, devido à simetria geométrica. Uma pequena região de recirculação pode ser observada imediatamente à jusante do riser, conforme fig. 28. A não formação da esteira de vórtices confere mais estabilidade à estrutura, que ficaria livre da vibração induzida por vórtices.

Como o efeito periódico não é observado neste caso nem nos dois próximos, são mostrados os gráficos para o coeficiente de pressão a 120s, uma vez que o comportamento não muda ao longo do tempo. Também, os valores de C_p entre -1 e 1,4, indicados na fig. 27, mostram que as forças agindo nesse riser seriam de menor intensidade se comparado com o caso anterior, já que o carregamento depende diretamente do valor do coeficiente de pressão.

Figura 27- Coeficiente de pressão sobre o riser a 0° e escoamento longitudinal.

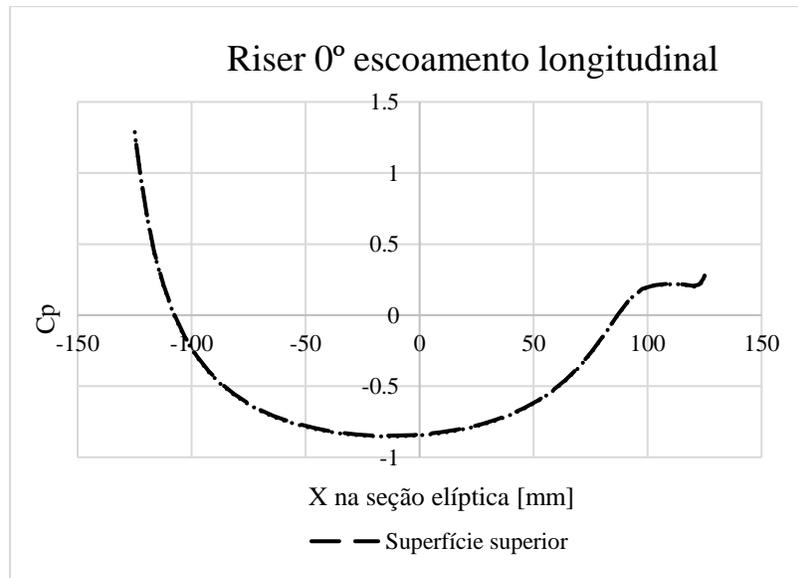
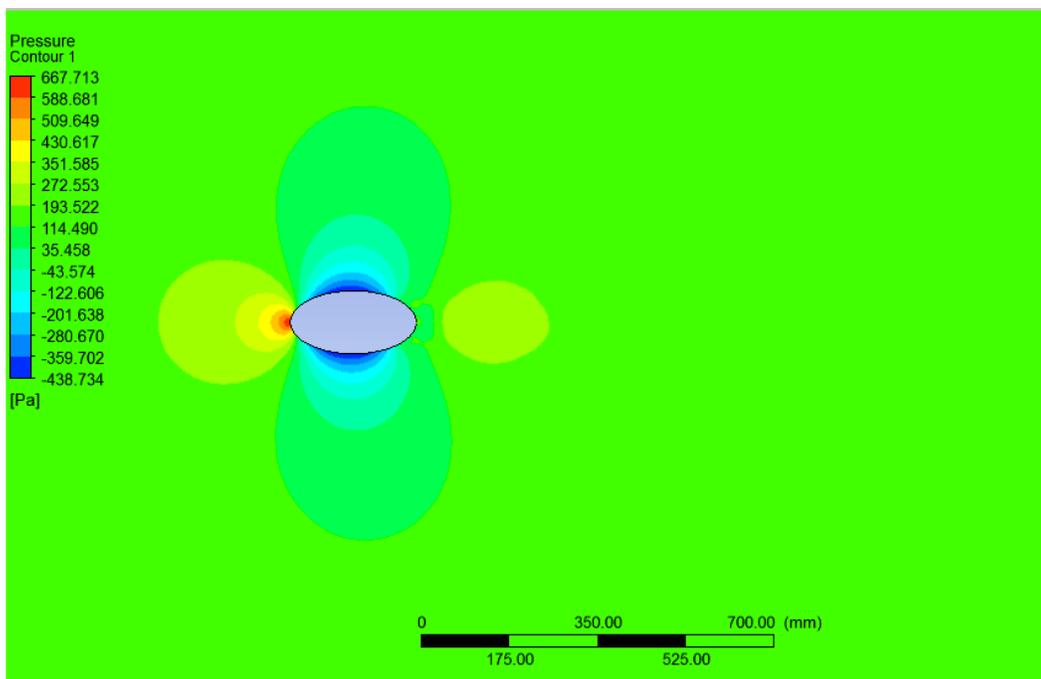


Figura 28 - Contorno de pressão sobre o riser a 0° e escoamento longitudinal.



Os casos com escoamento longitudinal e ângulo de ataque diferente de 0° mostram situações diametralmente opostas. Para o caso com $\alpha = +15^\circ$, observa-se que a pressão na superfície superior do riser, à montante, é menor do que na superfície inferior, sugerindo a existência de forças na direção $+Y$ (fig. 30). O descolamento da camada limite ocorre mais à montante na parte superior, e mais à jusante na parte inferior, devido ao efeito da inclinação positiva da seção transversal. O comportamento do coeficiente de pressão nas duas superfícies difere consideravelmente devido à diferente localização do ponto de descolamento da camada limite, em cada uma das superfícies (fig. 29). Observa-se ainda uma maior região de recirculação à jusante do riser, se comparado com o caso de ângulo de ataque nulo, porém, sem formação de esteira de vórtices. Para esta situação, o C_p varia entre -1,5 e 1,3, indicando a presença de carregamentos ligeiramente maiores que os observados para $\alpha = 0^\circ$.

Com $\alpha = -15^\circ$, o ponto de menor pressão é também à montante, mas na superfície inferior. Este comportamento sugere a existência de força na direção $-Y$. O descolamento da camada limite ocorre ligeiramente mais à montante na superfície inferior, se comparado com a superfície de cima. Para este caso não se observou também a formação de esteira, e a região de recirculação à jusante do riser tem tamanho similar àquela presente no caso com ângulo de ataque positivo. O coeficiente de pressão variou também entre -1,5 e 1,3, sendo o comportamento invertido ao indicado na fig. 29. As figuras 31 e 32 mostram o coeficiente de pressão e o contorno de pressão para este caso, respectivamente.

Figura 29 - Coeficiente de pressão sobre o riser a $+15^\circ$ e escoamento longitudinal.

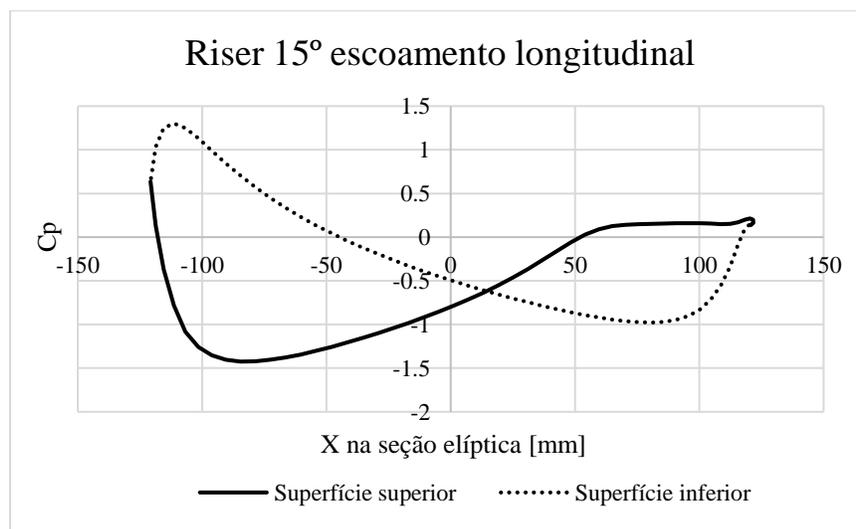


Figura 30 - Contorno de pressão sobre o riser a +15° e escoamento longitudinal.

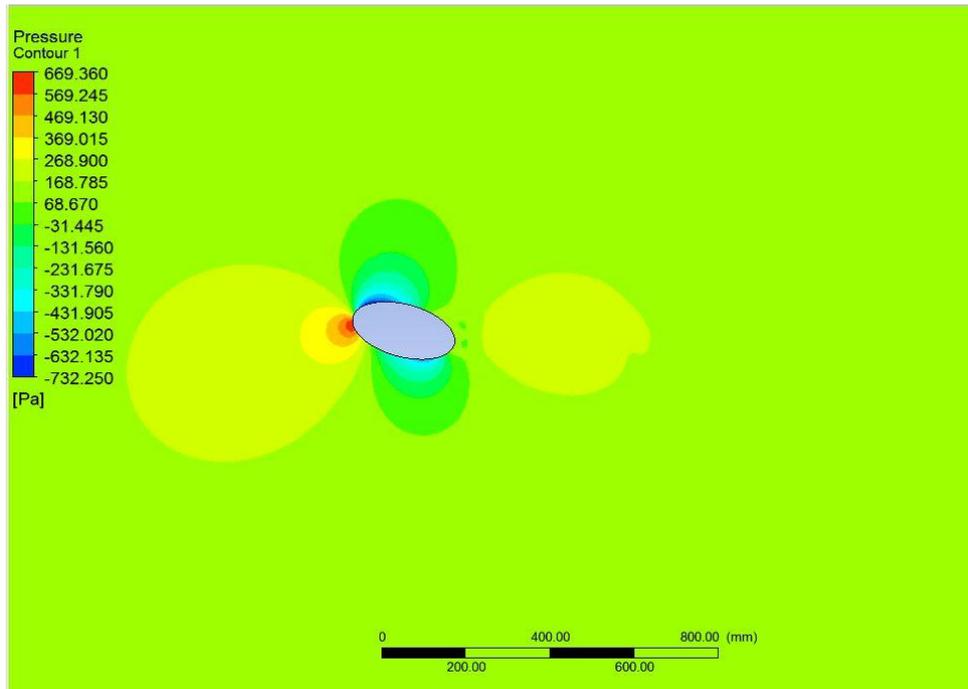


Figura 31 - Coeficiente de pressão sobre o riser a -15° e escoamento longitudinal.

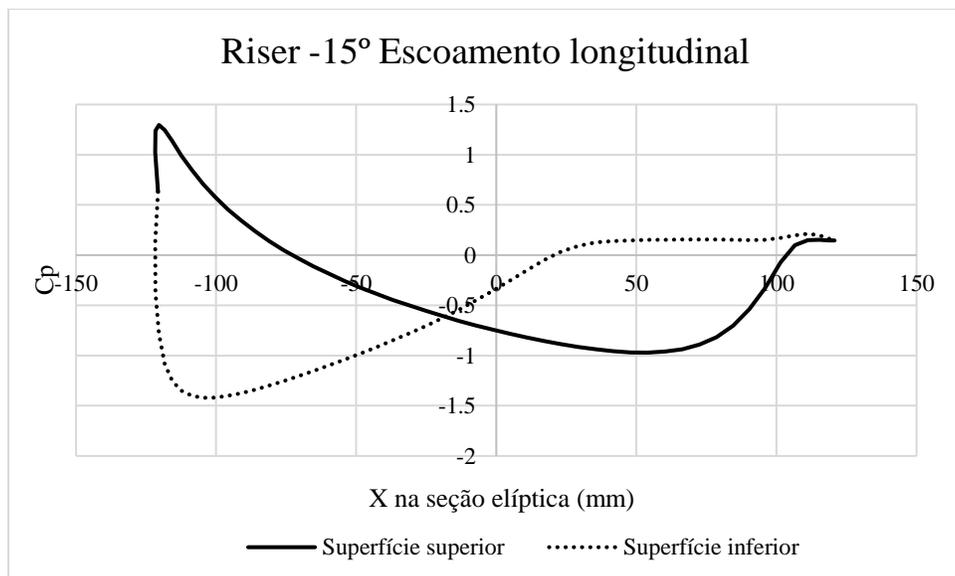
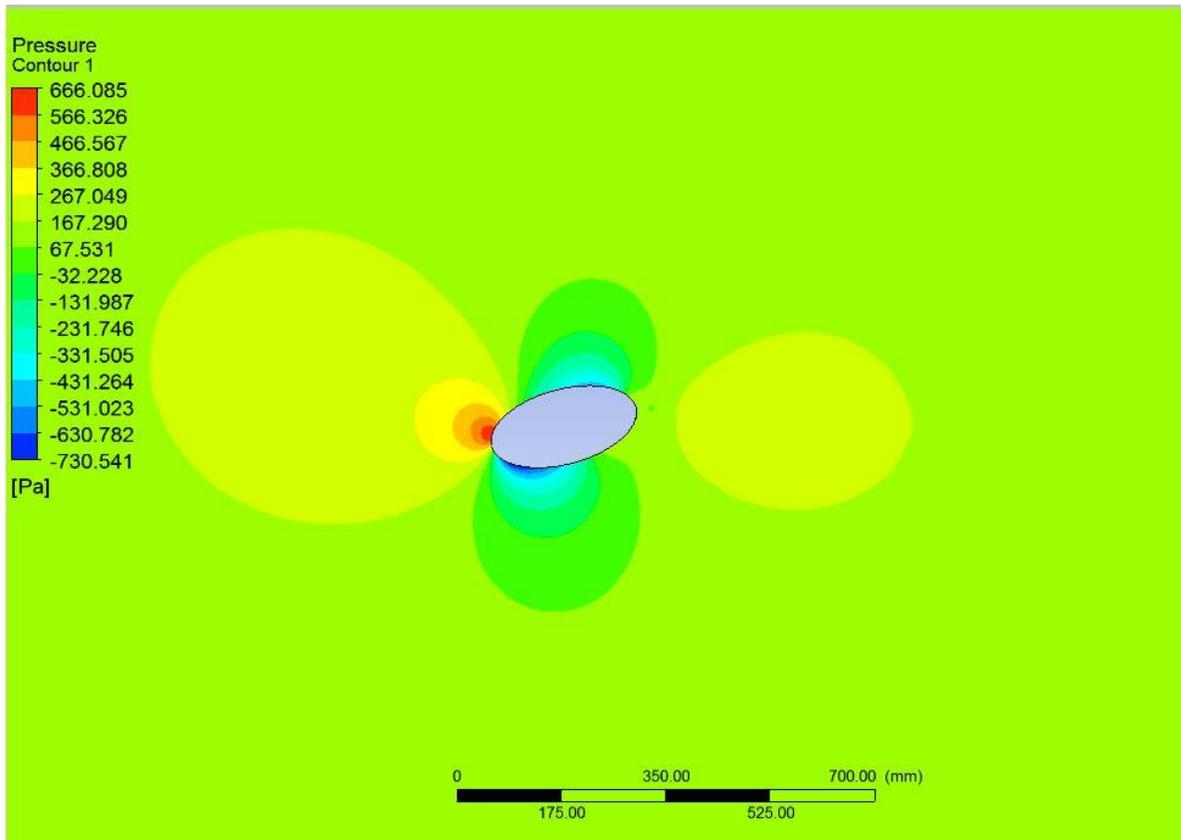
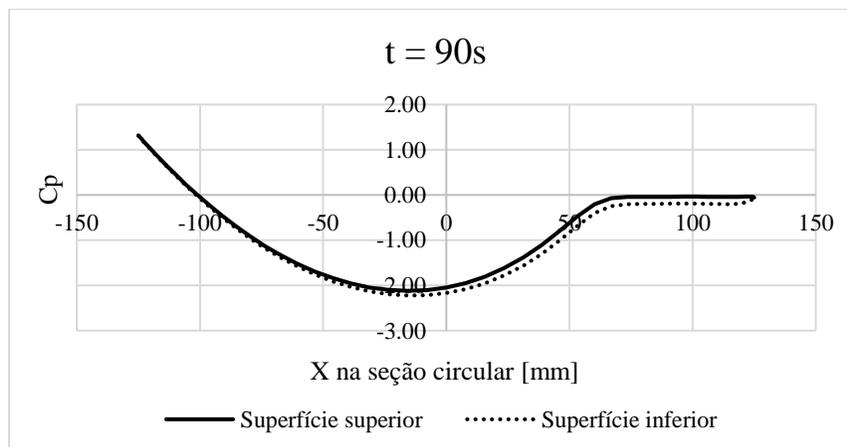
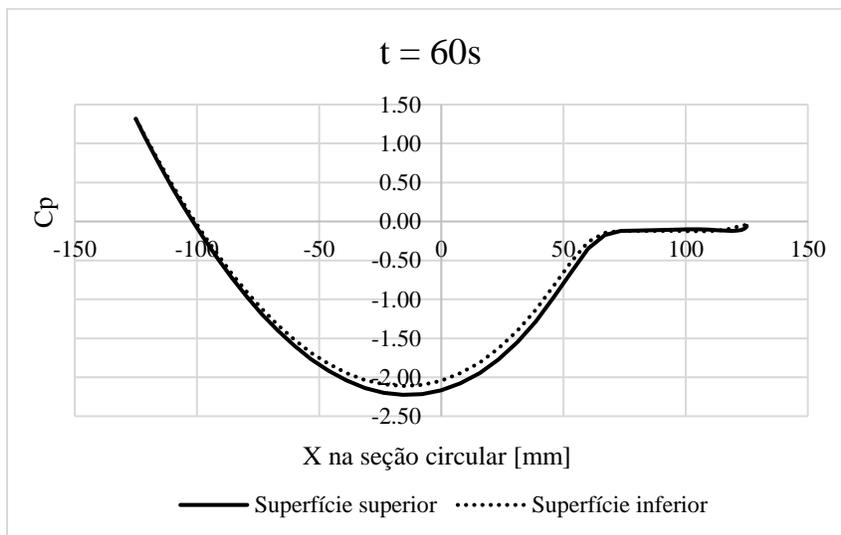
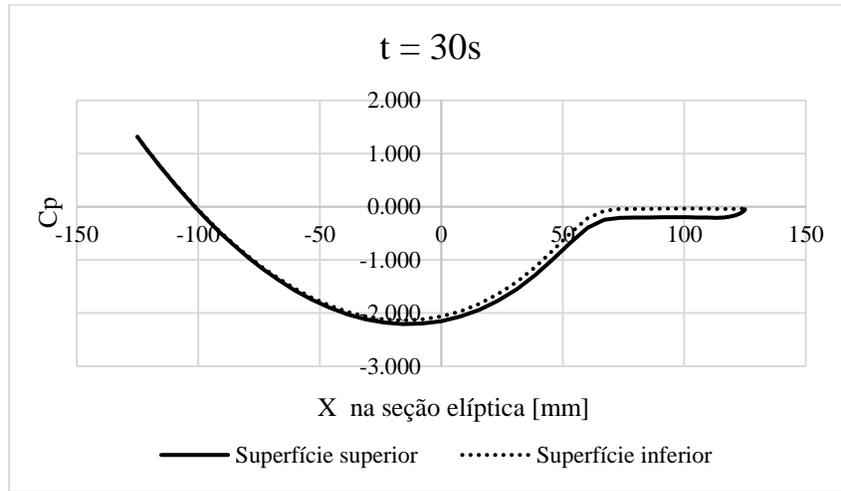


Figura 32- Contorno de pressão sobre o riser a -15° e escoamento longitudinal.



O caso com riser de seção circular foi analisado para fins de comparação, uma vez que esta é a geometria convencional deste elemento. Nesta configuração, observou-se a formação da esteira de vórtices, porém em menor intensidade que a existente na situação com escoamento transversal. Conforme a fig. 33, o coeficiente de pressão também varia com o tempo, porém em menor intensidade. Contudo, as curvas se mostram similares. Observa-se que a camada limite tem um comprimento de superfície maior para se desenvolver, se comparado com a situação de escoamento transversal. Este fato ajuda a retardar o descolamento da camada limite, retardando assim a formação das regiões de recirculação, de modo que quando o descolamento ocorre o escoamento já se encontra a uma velocidade menor, implicando em vórtices de menor intensidade. A fig. 34 indica contornos de pressão para diferentes instantes de tempo, evidenciando o fenômeno periódico da esteira de vórtices. Esta configuração tende a apresentar forças de intensidade maiores do que as observadas nos casos para escoamento longitudinal, sendo, porém, mais estável do que a situação com escoamento transversal.

Figura 33- Coeficiente de pressão sobre o riser com seção circular, para diferentes instantes de tempo.



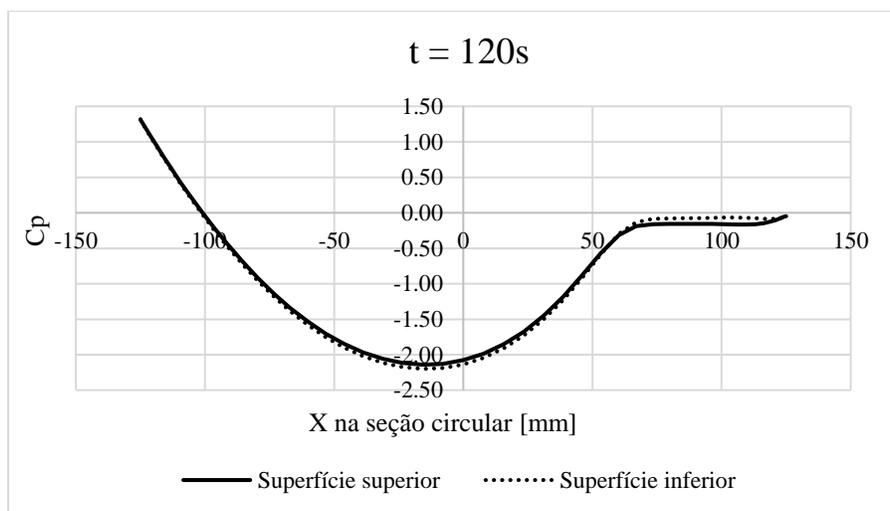
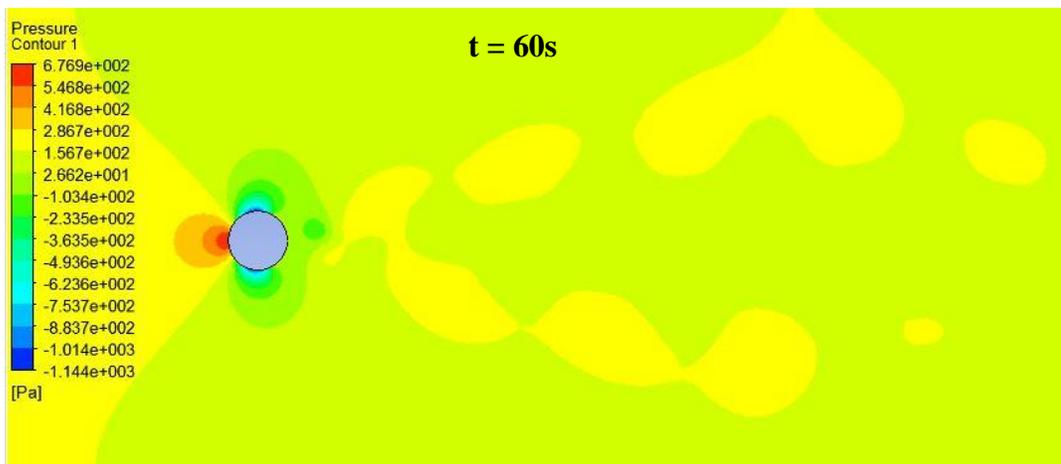
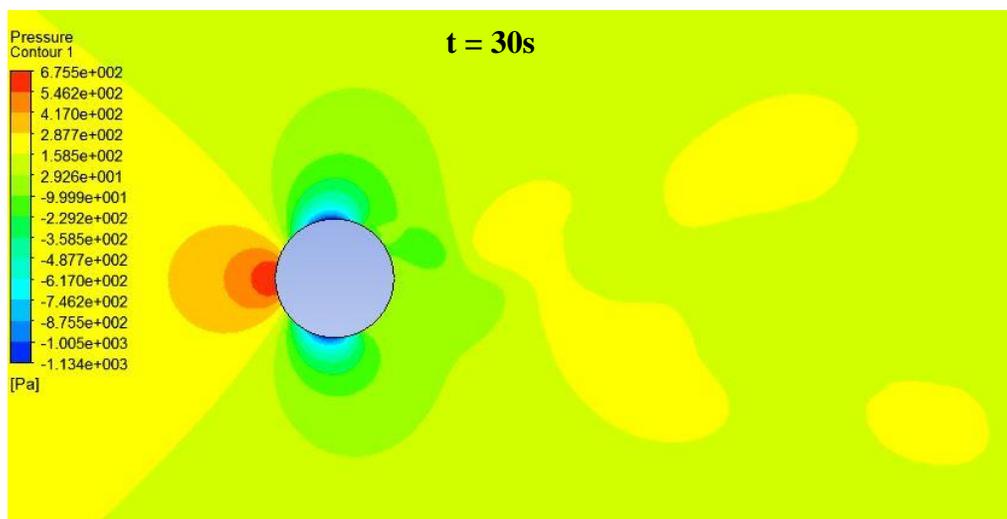
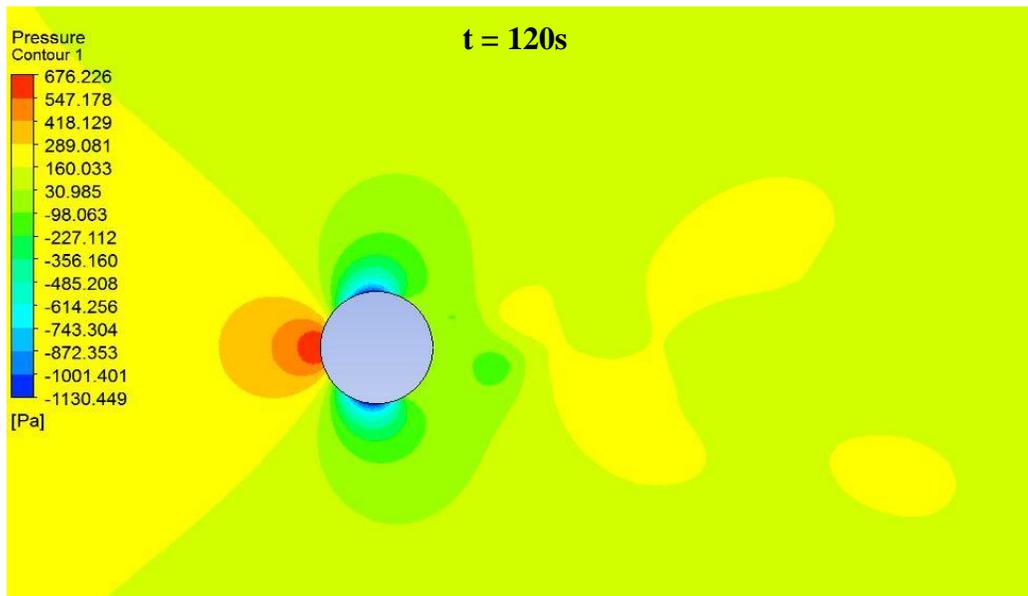
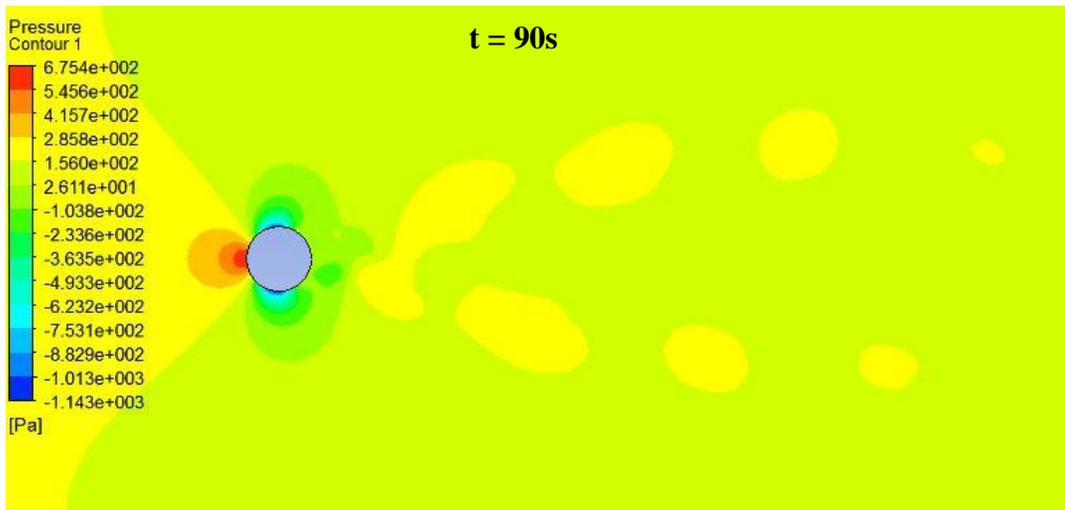


Figura 34 - Contorno de pressão sobre o riser de seção circular.





Procedendo a uma análise dos campos de velocidade no entorno do riser, é possível perceber a relação direta entre o comportamento da camada limite e o escoamento nesta região. As figuras a seguir mostram os campos de velocidade para os 3 casos com escoamento longitudinal, tanto para a superfície superior quanto para a inferior do riser.

Para o caso com $\alpha = +15^\circ$, observa-se a velocidade decrescendo ao longo da superfície superior, o que já era esperado, uma vez que nesta região a camada limite se descola à montante. Para este mesmo ângulo, a velocidade tende a aumentar em direção à borda de fuga, devido

justamente à inclinação, que retarda o descolamento da camada limite, na superfície inferior. Este comportamento está de acordo com o observado na análise do comportamento da pressão.

Com $\alpha = -15^\circ$, observa-se o oposto, com a velocidade decrescendo na superfície inferior, região onde o descolamento da camada limite ocorre mais cedo. Na parte superior a velocidade aumenta, já que neste caso o descolamento é retardado. O campo de velocidade para $\alpha = 0^\circ$ mostra-se praticamente simétrico, como era de se esperar, já que não há outros corpos na proximidade desta situação de simetria. À medida que o escoamento se aproxima da borda de fuga em todos os casos, a velocidade tende a diminuir, como pode ser visto para X próximo a 100 mm. Nesta situação, o fluxo se encontra quase que totalmente separado da superfície. A figura 37 mostra os vetores velocidade no entorno do riser, para as configurações mostradas adiante, onde é possível visualizar os pontos de separação do escoamento.

Figura 35 - Campos de velocidade para a superfície superior com escoamento longitudinal.

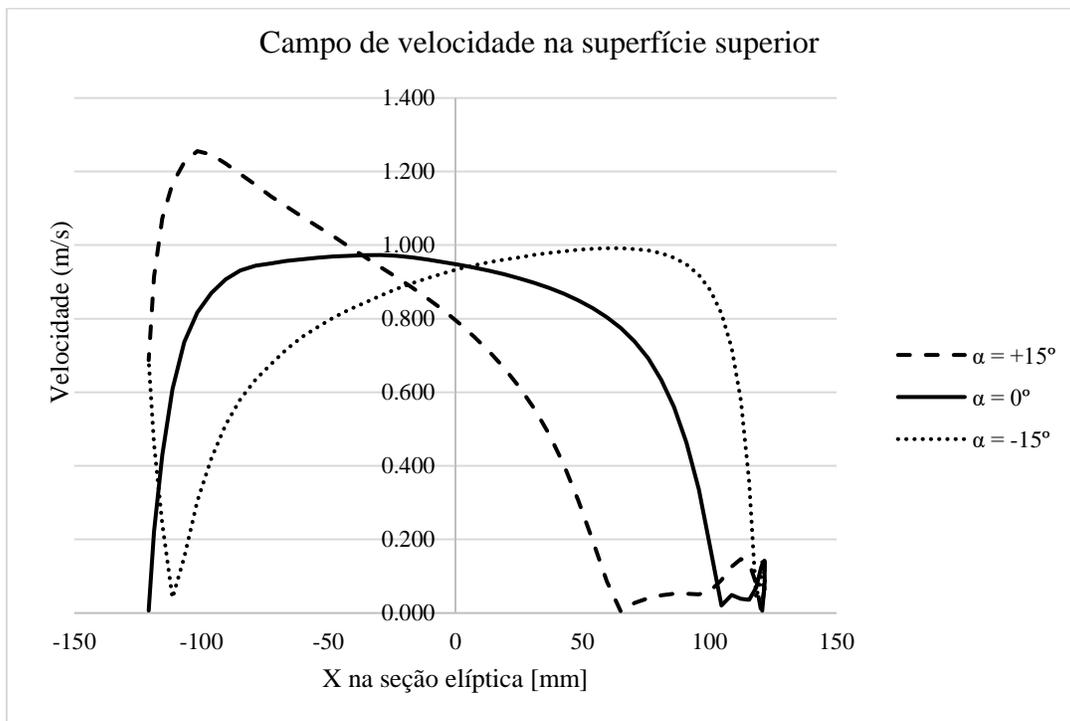


Figura 36 - Campos de velocidade para a superfície inferior com escoamento longitudinal.

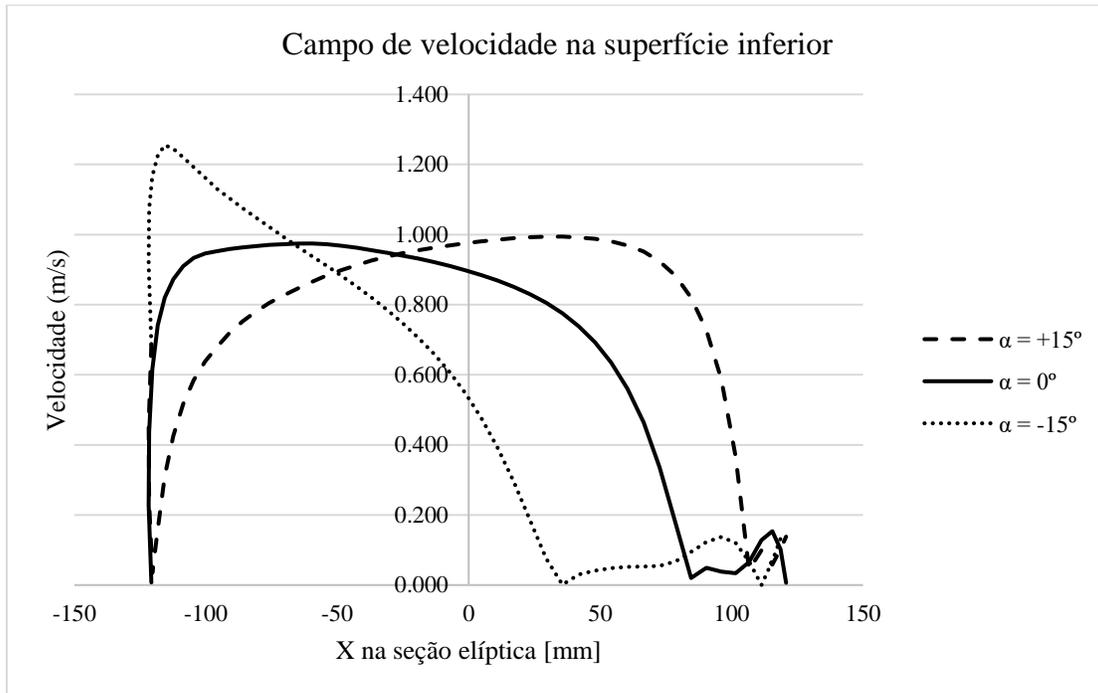
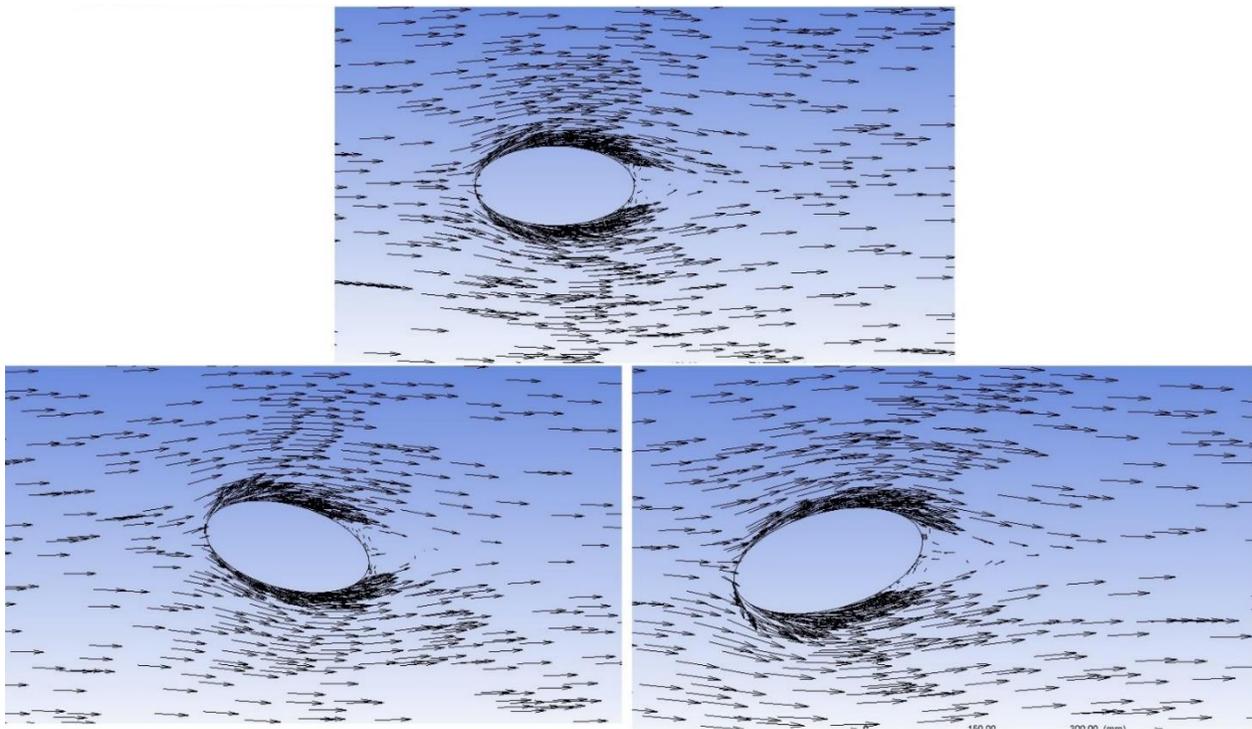


Figura 37 - Vetores velocidade no entorno do riser, com escoamento longitudinal.



Analisando a configuração com escoamento transversal, é possível observar a perturbação acentuada no escoamento, conforme a fig. 39, quando $t = 120s$. Próximo a $X = 0$ mm, a velocidade do escoamento quase dobra em relação à de entrada (1 m/s), sendo maior na superfície superior, o que indica que nesta região a separação do escoamento é ligeiramente retardada, em comparação à superfície inferior. Uma forte região de recirculação existe imediatamente à jusante do riser (Fig. 40), dando origem à esteira de vórtices. Como já constatado antes, esta configuração se mostra a menos estável e provavelmente a que representaria menor vida útil para a estrutura.

As figuras 41 e 42 mostram, respectivamente, o campo de velocidades e os vetores velocidade no entorno do riser de seção circular, quando $t = 120s$. Esta configuração retorna também um aumento da velocidade por volta de $X = 0$ mm, com decréscimo rápido até $X = 80$ mm, região onde se inicia o descolamento da camada limite. Os campos de velocidade para ambas as superfícies são praticamente simétricos, como era de se esperar, devido à ausência de outros corpos nas proximidades. Ocorre a formação da esteira de vórtices, contudo em menor intensidade do que a observada no caso com escoamento transversal.

Figura 38 - Campo de velocidade para o riser de seção elíptica, com escoamento transversal para $t = 120s$.

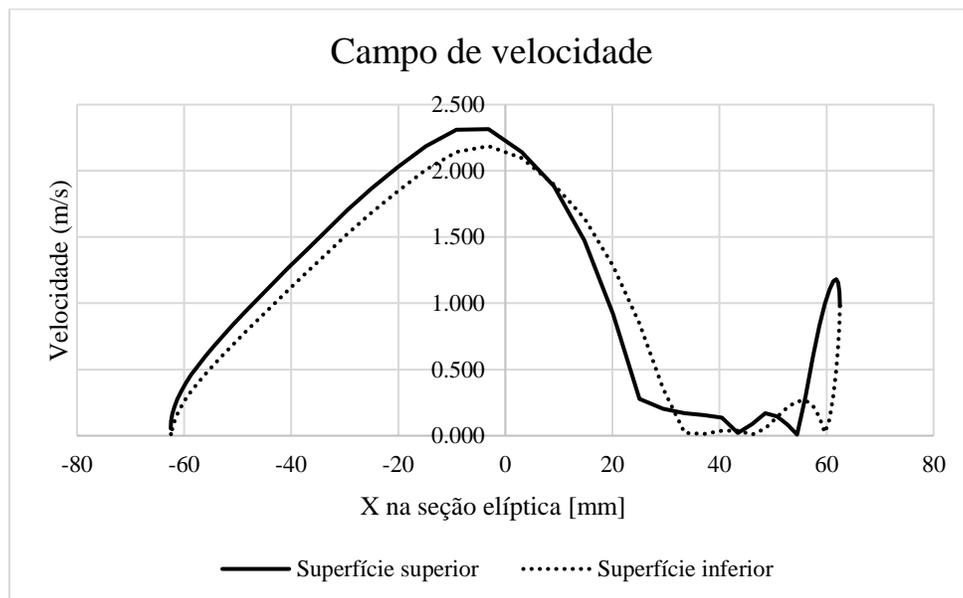


Figura 39 - Vetores velocidade no entorno do riser, com escoamento transversal ($t = 120s$).

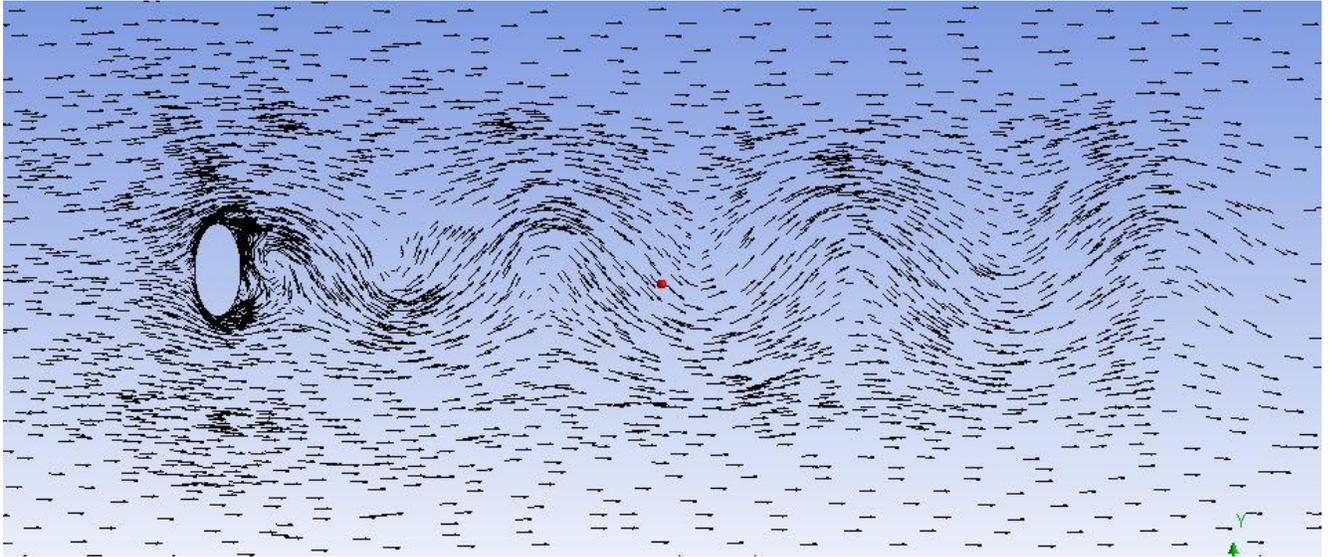


Figura 40 - Ampliação da seção do riser sob escoamento transversal, para destaque da região de recirculação, em $t = 120s$.

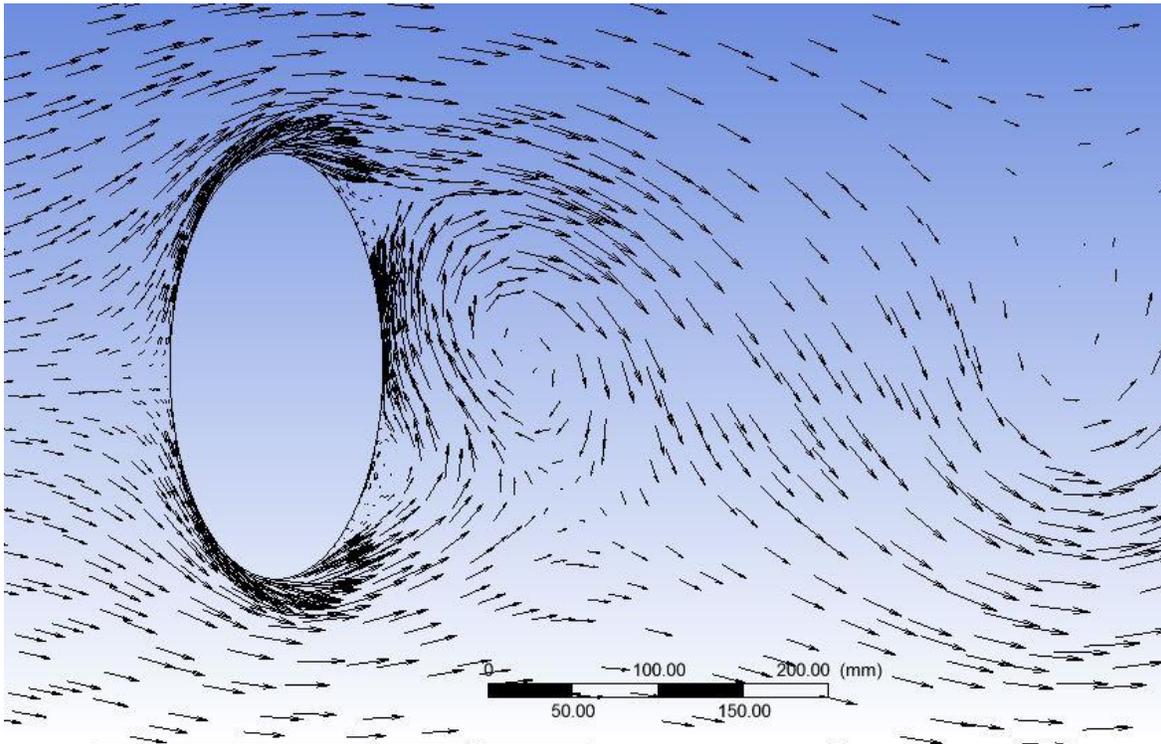


Figura 41 - Campo de velocidade para riser de seção circular, a $t = 120s$.

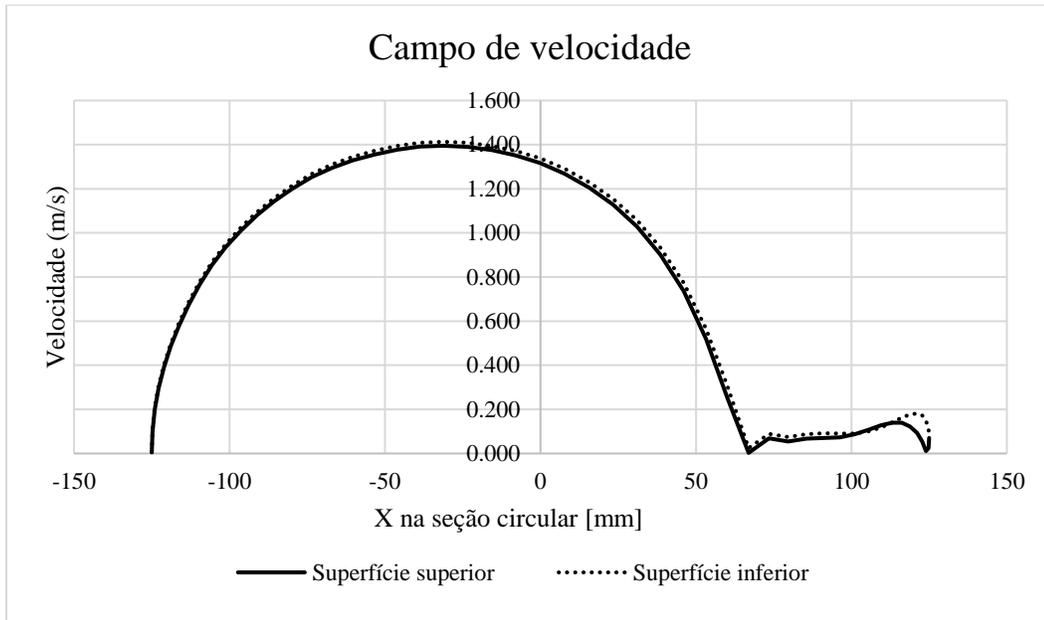


Figura 42 - Vetores velocidade no entorno do riser de seção circular, em $t = 120s$.

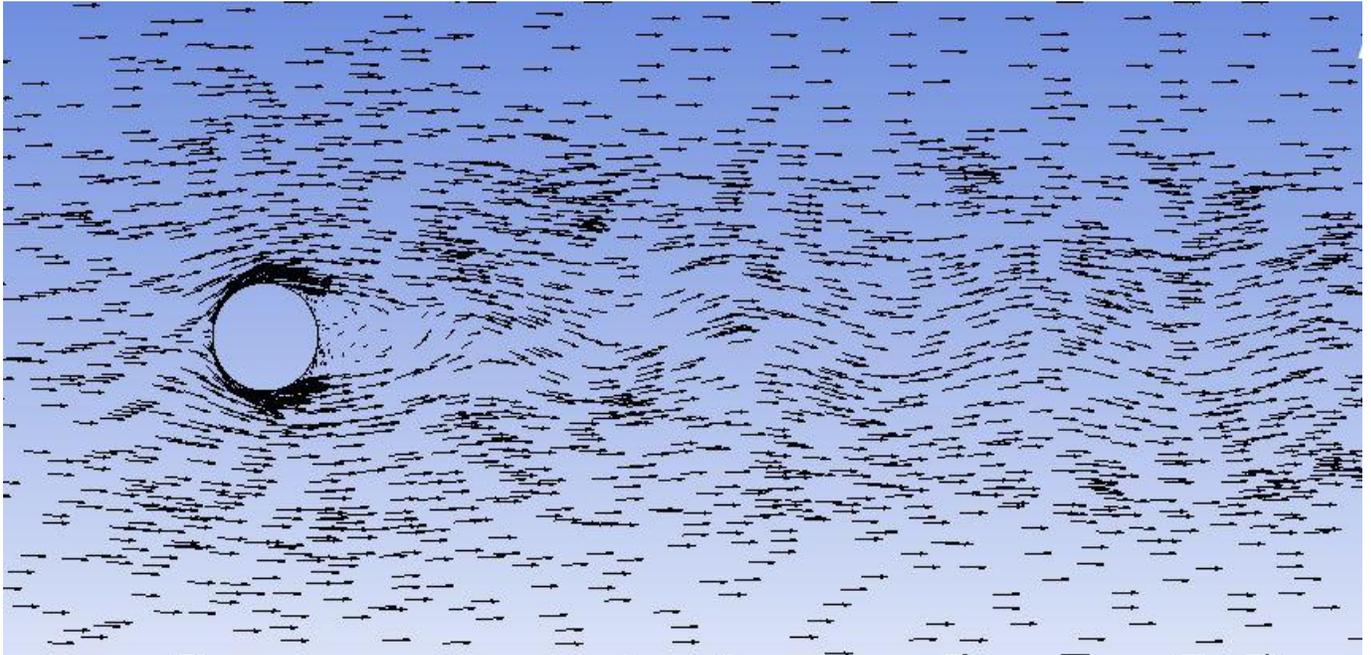
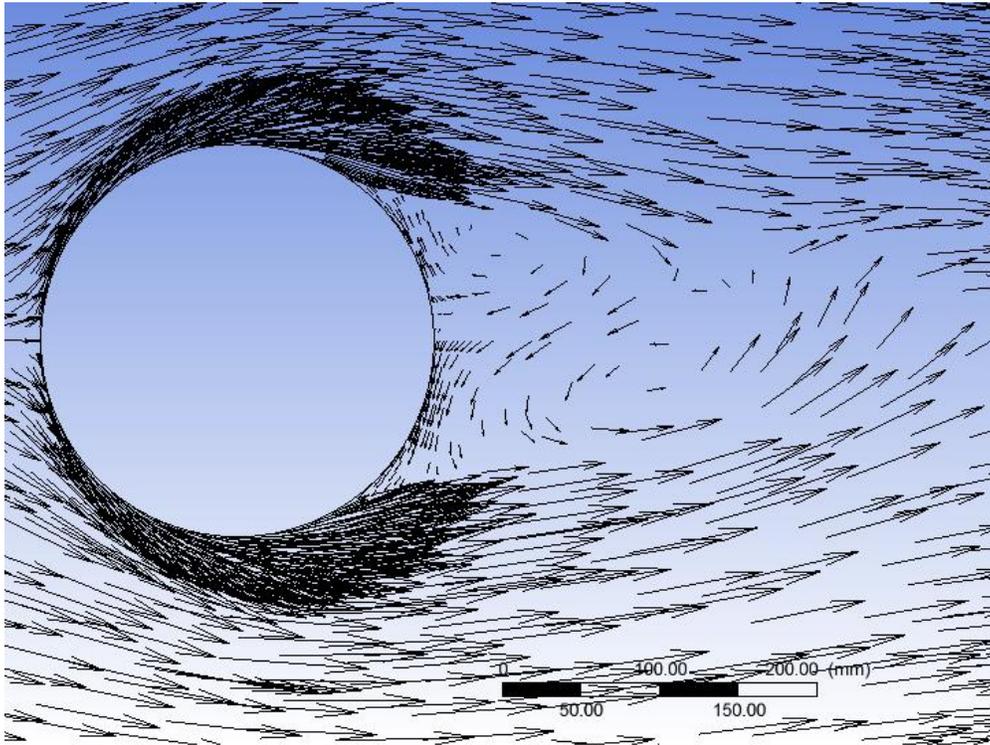


Figura 43- Ampliação da seção do riser de seção circular, para destaque da região de recirculação, em $t = 120s$.



5 – CONCLUSÕES

Com base no exposto, pode-se constatar que a variação do ângulo de ataque do cilindro elíptico influencia de forma consistente o escoamento ao longo do mesmo, tanto quando no entorno de uma placa plana, como em escoamento livre. Além disso, as interações entre a camada limite da placa e a camada cisalhante no cilindro tem um papel importante nas características do escoamento no entorno da geometria estudada. No caso da reprodução do estudo experimental, os resultados obtidos via simulação numérica estão coerentes com aqueles obtidos por Choi & Lee, para os valores de H/B especificados. Verificou-se que o modelo de turbulência SST retorna resultados coerentes com fenômeno analisado experimentalmente, o que o credenciou para ser utilizado na análise dos risers sob as condições de operação utilizadas neste estudo. Com base na análise do riser de seção elíptica, comparando as configurações em escoamento longitudinal e transversal com a situação referência (seção circular), pode-se afirmar que, com base nos resultados obtidos via simulação numérica, risers de seção elíptica submetidos a escoamento longitudinal apresentam melhores características aerodinâmicas, diminuindo os esforços provenientes das correntes marítimas e também a formação da esteira de vórtices. A configuração com ângulo de ataque nulo se mostrou menos susceptível aos efeitos do escoamento, uma vez que retornou os menores coeficientes de pressão e uma menor região de recirculação. O caso com escoamento transversal se apresentou pior do que a configuração padrão, mostrando-se não indicada para operação. As geometrias que não atingiram o critério de convergência não apresentariam resultados muito diferentes dos obtidos para a configuração transversal com ângulo de ataque igual a zero, uma vez que o ângulo de inclinação seria pequeno. Por fim, é preciso lembrar que resultados obtidos via CFD não devem de forma alguma serem tidos como finais, mas sim corroborados por análises experimentais.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHOI J. H.; LEE S. J., 2001, Flow Characteristics around an inclined elliptic cylinder in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluids and Structures*. V. 15, p. 1123-1135.

CHOI J. H.; LEE S. J., 2000, “GROUND EFFECT OF FLOW AROUND AN ELLIPTIC CYLINDER IN A TURBULENT BOUNDARY LAYER”, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 14, pp. 697-709.

Meneghini, J.R., 2002, “Mecânica de Geração e desprendimento de vórtices no escoamento ao redor de cilindros”, Universidade Federal de Santa Catarina, ABCM (Org.) III Escola de Primavera de Transição e Turbulência, pp. 217-344.

Sousa, P.A.S.G., Reis, I.B., Borges, J.V.Q.S., Goulart, J.N.V., Souza, S.I.S., 2012, “ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO TURBULENTO EM TORNO DE UM CILINDRO JUNTO A UMA SUPERFÍCIE”, VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.

Nishino, T., Roberts, G.T. and Zhang, X., 2007, “Vortex shedding from a circular cylinder near a moving ground”, *Physics of Fluids*, Vol. 19, pp. 1-12.

FOX, R. W.; MCDONALD A.T. *Introdução à mecânica dos fluidos*. 8a Edição, Rio de Janeiro: LTC editora Guanabara Dois SA, 2014.

J. H. Ferziger, M. Péric. *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3rd Edition, Springer.

BIRD, R. B., STEWART, W. E., LIGHTFOOT, E. N. *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, Inc., 1960.

JOSHI, J. B., NERE, N. K., RANE, C. V., MURTHY, B. N., MATHPATI, C. S., PATWARDHAN, A. W., RANADE, V. V. *CFD simulation of stirred tanks: Comparison of turbulence models. Part I: Radial flow impellers*. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89, 23–82, 2011.

BRODKEY, R. S. *The Phenomena of Fluid Motions*, Addison - Wesley Pub. Co., 1967.

MENTER, F. R. *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*. AIAA-Journal, 32, 1598 - 1605, 1994.

WILCOX, D. C. *Multiscale model for turbulent flows*. 24th Aerospace Sciences Meeting, AIAA, 1986.

H. Schlichting, *Boundary Layer Theory* 7e. Copyright © 1979 The McGraw-Hill Companies, Inc.

MALISKA, C. R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. 2ª Edição. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 2004. 472 p.

Anderson, W. Kyle; *A Grid Generation and Flow Solution Method for the Euler Equations on Unstructured Grids*; Journal of Computational Physics 110, 23-38; 1994.