

**Luís Henrique Procópio Pinto**

**Ricardo de Paula Costa**

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM  
PERFIL DE VELA EM DIFERENTES  
CONDIÇÕES DE VENTO**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para a obtenção do  
título de Graduação em  
Engenharia Mecânica.

São Paulo  
2003

**Luís Henrique Procópio Pinto**

**Ricardo de Paula Costa**

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM  
PERFIL DE VELA EM DIFERENTES  
CONDIÇÕES DE VENTO**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para a obtenção do  
título de Graduação em  
Engenharia Mecânica.

*Área de Concentração:*

Mecânica dos Fluidos

*Orientador:*

Prof. Dr. Fábio Saltara

São Paulo  
2003

136194

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600010616

## FICHA CATALOGRÁFICA

Pinto, Luís Henrique Procópio

Costa, Ricardo de Paula

Avaliação do desempenho de um conjunto de perfis de vela (vela principal e genoa) para embarcações de vela oceânica, em diferentes ângulos de vento, utilizando CFD. São Paulo, 2003.

Dissertação (Graduação) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Mecânica dos Fluidos. – 2. Aerodinâmica computacional.

I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica.

Aos nossos pais, que foram peças fundamentais para que esta nossa conquista fosse possível e que são responsáveis pelas pessoas que nos tornamos hoje.

“O grande amigo não é o que vem  
separar a briga, mas sim aquele que  
chega dando a ‘voadora’.”

[Chuck Norris]

## AGRADECIMENTOS

Ao nosso colega e professor orientador Dr. Fábio Saltara, pelo direcionamento constante neste trabalho e permanente incentivo.

Ao Mário Buckup, Juan Garay e Gabriel Borgstrom, das fabricantes North Sails do Brasil e North Sails da Argentina, por disponibilizar os perfis de vela reais, que proporcionaram resultados mais interessantes.

Ao Ricardo Lobato da fabricante Quantum Sails pelas informações indispensáveis.

A minha querida namorada pela paciência e compreensão durante todo o período que deixei de estar ao seu lado em função deste trabalho.

Ao meu amigo Ricardo de Paula Costa, por me proporcionar a oportunidade de desenvolver ao seu lado um projeto tão interessante e repleto de oportunidades futuras.

Aos nossos colegas Leonídio Buk Júnior e Luís Felipe Viliotti, pela ajuda que nos ofereceram, sem a qual este trabalho jamais estaria concluído.

A Escola Politécnica por permitir a utilização dos softwares necessários em suas estações de trabalho.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho e para a nossa formação acadêmica.

## RESUMO

Inicialmente, apresentaremos um resumo teórico dos principais fenômenos físicos presentes em uma embarcação à vela navegando em alto mar e os fenômenos referentes aos escoamentos de vento na vela. Posteriormente, descreveremos as características da embarcação à vela selecionada, que utilizamos como parâmetros de entrada nas simulações (como peso, comprimento, largura etc), e as diferentes condições de vento estudadas, assim como daremos uma explicação e justificativa das simplificações e hipóteses pertinentes que foram adotadas para a conclusão deste projeto. Finalmente, apresentaremos os resultados da avaliação do desempenho de um perfil de vela para embarcações oceânicas à vela, em diferentes condições de ângulo de incidência do vento. Os resultados foram obtidos através da simulação do perfil e das condições de vento selecionadas no software Fluent, após o seu desenvolvimento no AutoCAD e a criação da malha computacional da vela no software Gambit. Além do cumprimento da formalidade acadêmica para a conclusão do curso de graduação em Engenharia Mecânica, este trabalho tem a pretensão de transmitir alguma experiência prática, vivida pelos autores, na utilização de softwares de mecânica dos fluidos para a avaliação de desempenho em embarcações à vela.

## ABSTRACT

Initially, we are going to present a teorical abstract of the principals physical phenomena present in a sailing ship, when it is navigating high seas. After that, we are going to describe the selectionated sailing ship's characteristics that we used as input parameters in the simulations (like weight, length, width etc). We are also going to describe the different studied wind's conditions, and we are going to explain and justify the simplifications and hypothesis that we assume to be true. Finally, we are going to present the results of the performance evaluation of the sail contour for ocean sailing ships in different wind conditions (incidence angle). The results were obtained with the simulation of the sail and selectionated wind's conditions in the Fluent software, after design on AutoCAD and the computational mesh design in the Gambit software. Beside the target of being an academic formality for conclusion of the Mechanical Engineering Graduation Course, the present report aims to transmit some practical experience of the authors in using flow mechanical software to evaluate the performance of sailing ships.

# SUMÁRIO

## LISTA DE FIGURAS

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	4
3. UTILIDADE DO PROJETO.....	4
4. MOTIVAÇÃO PESSOAL.....	5
5. INTRODUÇÃO TEÓRICA.....	6
5.1 MOVIMENTOS DAS EMBARCAÇÕES.....	6
5.2 O VENTO APARENTE.....	8
5.3 DIAGRAMA DE FORÇAS.....	14
5.4 DIFERENÇA DE PRESSÃO.....	15
5.5 O EFEITO DO MASTRO.....	22
5.6 INTERAÇÃO ENTRE AS VELAS.....	24
5.6.1 INFLUÊNCIA DA GENOA NA MESTRA.....	25
5.6.2 QUAL VELA CONTRIBUI MAIS?.....	30
5.7 OS EFEITOS DAS FORÇAS AERODINÂMICAS.....	33
5.8 DIMENSIONAMENTO DAS FORÇAS AERODINÂMICAS.....	36
5.9 FORÇA DE ARRASTO NAS VELAS.....	39
5.9.1 ARRASTO INDUZIDO.....	40
5.9.2 ARRASTO DE SUPERFÍCIE.....	42
5.9.3 ARRASTO DE FORMA.....	47
5.9.4 ARRASTO AERODINÂMICO ADCIONAL.....	48

5.10 CENTRO DE APLICAÇÃO DAS FORÇAS.....	49
5.10.1 O CENTRO DE ESFORÇOS.....	51
5.10.2 MOVIMENTAÇÃO DOS CENTROS DE ESFORÇOS....	52
6. LIMITAÇÕES.....	54
7. SIMPLIFICAÇÕES.....	54
8. METODOLOGIA.....	56
8.1 DESENVOLVIMENTO NO AUTOCAD.....	56
8.2 OBTENÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL.....	58
8.2.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	61
8.3 SIMPLIFICAÇÕES NO FLUENT.....	63
8.3.1 CARACTERÍSTICAS DAS SOLUÇÕES.....	63
8.3.2 MODELO DE VISCOSIDADE.....	64
8.3.3 CONSTANTES.....	65
8.3.4 FATORES DE SUB RELAXAÇÃO.....	65
8.3.5 QUANTO A DISCRETIZAÇÃO.....	65
8.3.6 PROPRIEDADES DO AR.....	66
9. ESCOLHA DA EMBARCAÇÃO.....	67
10. DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE VENTO.....	70
11. DETERMINAÇÃO DOS ÂNGULOS DE VELA.....	71
12. RESULTADOS OBTIDOS.....	72
13. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	122
14. CONCLUSÃO.....	124
15. BIBLIOGRAFIA.....	126
GLOSSÁRIO.....	127

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Barco velejando contra o sentido do vento.....	2
Figura 2 - Embarcação velejando a favor do vento.....	3
Figura 3 - Movimentos básicos de uma embarcação à vela quando em alto mar.....	7
Figura 4 - Efeitos do rolling e acelerações quando os movimentos pitching e heaving na capacidade da tripulação.....	8
Figura 5 - Demonstração da forma de determinação das características (intensidade, direção e ângulo de incidência) do vento aparente. ....	10
Figura 6 - Gradiente de velocidades em um barco à vela em função da cota em relação ao nível do mar.....	11
Figura 7 - Devido aos movimentos de rolling e pitching, os ângulos de incidência efetivos nos quais a vela opera aumentam e diminuem constantemente a taxas diferentes, dependendo da cota da seção da vela em relação ao nível do mar.....	13
Figura 8 - Diagrama de forças em uma vela.....	14
Figura 9 - Método de medição direta da pressão dinâmica, $q$ , e de medição indireta da velocidade do fluido, $V$ , por meio do manômetro de tubo em U.....	15

Figura 10 - Figura simplificada de fluxo entre um perfil de vela e um duto (princípio de Venturi) .....	17
Figura 11 - Distribuições da velocidade do vento local e da pressão local em uma vela sob vento aparente com pequeno ângulo de incidência.....	19
Figura 12 - Representação da pressão local $P_1$ , $P_2$ e $P_3$ para três pontos de medida em uma seção transversal típica de uma vela com pequeno ângulo de ataque. ....	21
Figura 13 - Distribuição de pressão ao redor de um mastro circular sem a presença da vela.....	22
Figura 14 - Coeficientes de arrasto para diferentes seções de mastros.....	24
Figura 15 - Definição dos ângulos de incidência para pequenos ângulos de ataque da vela.....	25
Figura 16 - Visualização do fluxo de ar no sotavento de um conjunto vela principal - genoa para pequeno ângulo de ataque.....	26
Figura 17 - Fig. 17 – Fluxo de ar ao redor de uma vela simples e interação entre a vela principal e a genoa.....	28
Figura 18 - A quantidade de ar que escoa através do espaço entre a genoa e a vela principal depende dos ângulos $\delta_F$ e $\delta_M$ .....	29
Figura 19 - Distribuição de pressão e sucção na vela principal e na genoa operando em conjunto.....	30

Figura 20 - Diagrama de explicação do comportamento das pressões na vela principal e na genoa.....	31
Figura 21 - O efeito da interação da genoa na distribuição da sucção na vela principal.....	32
Figura 22 - Geometria e definição das forças aerodinâmicas presentes em um barco à vela em um certo ângulo de inclinação....	34
Figura 23 - Significado e definições de curvatura e aspect ratio.....	37
Figura 24 - Geometria das forças aerodinâmicas para pequeno ângulo de ataque.....	39
Figura 25 - O desenho maior mostra esquematicamente como o fluxo ao redor do topo da vela, movimentado do barlavento para o sotavento, se transforma em um vórtice em espiral e o mecanismo do Downwash.....	41
Figura 26 - Ilustração da Camada limite ocorrendo no sotavento de uma vela.....	43
Figura 27 - Coeficientes de Arrasto de Superfície aproximados, $C_{fr}$ , para placas planas, em função do número de Reynolds. .	45
Figura 28 - Efeito aproximado do arrasto em corpos 'parasitas' nas características aerodinâmicas da combinação entre a vela e o casco.....	49
Figura 29 - Método Tradicional para o estabelecimento da posição do centro de esforços, CE.....	50

Figura 30 - Movimentação do CE ao longo da curvatura de uma seção de uma vela com curvatura de 1/10, em função do ângulo de incidência.....	53
Figura 31 - Desenvolvimento do modelo 3D do conjunto vela principal / genoa utilizado nas simulações. (vela principal a esquerda e genoa a direita).....	57
Figura 32 - Ilustração dos perfis de vela dentro do volume de controle e dos eixos de coordenadas.....	59
Figura 33 - Ilustração de uma das malhas computacionais desenvolvidas no Gambit.....	61
Figura 34 - Número das faces do Volume de Controle.....	63
Figura 35 - Casco do Soto 45.....	68
Figura 36 - Ilustrações da embarcação San Gregório em regata.....	68
Figura 37 - Desenho de elevação e planta do barco. ....	69
Figura 38 - Determinação do ângulo de posicionamento da vela para simulação.....	71

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AR – Proporção de Aspecto (Aspect Ratio)

CE – Centro de Aplicação de Forças (vela)

CL – Camada Limite

CLL – Camada Limite Laminar

CLR – Centro de Resistência Lateral

CLT – Camada Limite Turbulenta

Re – Número de Reynolds

Ângulo de Stall – ângulo em que um perfil aerofólico perde sua função

Barlavento – Lado da vela de incidência do vento (pressão)

Sotavento – Lado da vela oposto a incidência do vento (sucção)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$  – ângulo de incidência do vento aparente em relação à vela (em graus)

$\beta$  – ângulo entre a direção do vento aparente e o curso navegado (em graus)

$\gamma$  - ângulo entre a direção do vento real e curso navegado da embarcação (em graus)

$\rho$  - densidade do ar (kg / m<sup>3</sup>)

$\theta$  - ângulo de inclinação da embarcação (em graus)

$\lambda$  - ângulo entre o curso navegado e a linha central do casco (em graus)

$\delta_F$  – ângulo trim da genoa (ângulo entre a linha central do casco e as direções de inclinação da genoa) – (em graus)

$\delta_M$  – ângulo trim da vela principal (ângulo entre a linha central do casco e as direções de inclinação da vela principal) – (em graus)

$\mu$  - Coeficiente de viscosidade dinâmica (N.s / m<sup>2</sup>)

$b$  – altura da vela

$c$  – comprimento da corda principal da vela

$C$  – coeficiente aerodinâmico ou fator de forma

$C_D$	–	coeficiente de arrasto
$C_{fr}$	–	coeficiente de arrasto de superfície
$C_H$	–	coeficiente de inclinação
$C_L$	–	coeficiente de sustentação
$C_R$	–	coeficiente de empuxo
$C_T$	–	coeficiente aerodinâmico total
$D$	–	força de arrasto
$D_i$	–	força de arrasto induzido
$F$	–	arco da seção da vela
$F_H$	–	força de inclinação da embarcação
$F_{lat}$	–	força lateral (ou horizontal)
$F_R$	–	força de empuxo
$F_T$	–	força total resultante
$F_{vert}$	–	força vertical
$h$	–	distância entre o CE e o CLR
$K$	–	constante de proporcionalidade para o calculo da força de arrasto
$K_{adm}$	–	espessura da camada limite
$l$	–	largura da vela
$L$	–	força de sustentação

$M_H$	–	momento de inclinação da embarcação
$P_{atm}$	–	pressão atmosférica local
$P_i$	–	pressão em uma seção i qualquer da vela
$P_L$	–	região de pressão negativa (sucção)
$P_{st}$	–	pressão estática
$P_{tot}$	–	pressão total
$P_w$	–	região de pressão positiva
$q$	–	pressão dinâmica
$S_A$	–	área da vela
$S_i$	–	área de uma seção transversal i qualquer da vela
$S_p$	–	área parasita
$V$	–	velocidade do fluido
$V_i$	–	velocidade do vento na seção i da vela
$w_1$	–	velocidade de oscilação do mastro do barlavento para o sotavento
$w_2$	-	velocidade de oscilação do mastro do sotavento para o barlavento



## 1. INTRODUÇÃO

As embarcações à vela com características de vela oceânica são barcos com dimensões superiores à 20 pés de comprimento (6,0 metros). Estes possuem relativa autonomia para navegação em oceanos abertos, já que possuem dimensões suficientes para suportar condições muito adversas de tempo, e possuem suficiência de conforto e manter toda a sua tripulação por algum tempo.

Apesar do difícil momento econômico que enfrenta o país, a fabricação deste tipo de embarcação, tanto para lazer quanto para competições, vem crescendo nos últimos anos no país. Porém, o número de barcos para vela oceânica fabricados no Brasil é ainda muito inferior a países como os da Europa e até mesmo a Argentina.

A propulsão de uma embarcação à vela é dada pelo empuxo causado pela diferença de pressão gerada entre os lados da vela na passagem do vento. Dessa forma, o formato do perfil da vela é responsável por proporcionar mais ou menos velocidade (força) à embarcação.

Outra característica importante dos perfis de vela existentes é o quanto ela consegue se armar (abrir) em relação à direção de incidência do vento e quanto o seu perfil consegue ser alterado, regulando os pontos de fixação da vela na mastreação. Fazendo uma analogia com uma asa de avião, a regulagem da vela junto a mastreação se equiparia aos flaps da asa que funcionam toda a vez que o avião precisa de mais sustentação ou de menos arrasto.

Uma característica de barco a vela é que nenhum barco consegue navegar diretamente contra o sentido do vento. Porém, uma



vela bem projetada permite que o barco navegue até 30° do rumo do vento.

Nas embarcações oceânicas encontramos um grande acervo de tipos de vela em cada barco. Quando o barco está velejando em um rumo contrário ao sentido do vento, ele utiliza uma genoa, que é vela da proa (termo náutico para a frente do barco), e a mestra, que é a vela principal que fica presa no mastro e na retranca, conforme a figura a seguir.



Fig. 1 - Barco velejando contra o sentido do vento. Genoa (vela mais a frente) e mestra (vela mais atrás). [Ref.9]

A genoa, é trocada conforme a intensidade do vento e vai diminuindo cada vez que o vento é maior. Cada barco, geralmente, carrega até 4 tamanhos de genoas diferentes, sendo a maior utilizada para ventos fracos à qual pode possuir dimensões maiores que as da mestra.

Quando o veleiro se encontra em rumos que o vento chega na embarcação pela popa (termo náutico para a parte traseira da embarcação), ele utiliza a vela balão e a vela mestra, conforme figura.



Fig. 2- Embarcação velejando a favor do vento.

Vela Balão (vela em azul e verde). [Ref.9]



Nas simulações, foram utilizadas apenas a genoa maior e a mestra da embarcação escolhida.



## 2. OBJETIVO

O objetivo deste projeto é a avaliação da mudança do desempenho (empuxo) fornecido por um perfil de vela, conforme a variação da direção de incidência do vento em relação à vela. Dessa forma, o projeto pretende apresentar resultados que proporcione o melhor posicionamento da embarcação em relação ao ângulo de incidência do vento, de acordo com as condições de vento locais (dentre àquelas que serão foco deste trabalho).

## 3. UTILIDADE DO PROJETO

São inúmeras as contribuições e oportunidades futuras que este trabalho pode proporcionar no mercado de embarcações à vela.

O projeto poderá ser utilizado por velejadores de competições de vela oceânica, onde terão a oportunidade de conhecer qual o melhor posicionamento angular de sua embarcação, de forma a obter o melhor rendimento possível, ou seja, a maior velocidade de cruzeiro, de acordo com as condições climáticas locais.

Fabricantes de velas poderão desenvolver novos e melhores perfis de vela, não apenas utilizando os resultados obtidos com a finalização deste trabalho, mas utilizando a mesma metodologia de estudo em novos projetos de perfis de vela.

Estaleiros poderão selecionar as velas que farão parte de seus projetos de veleiros, com base em dados experimentais.



Uma pessoa leiga poderá obter um conhecimento básico dos fenômenos físicos que regem o comportamento de uma embarcação movida a vela.

#### 4. MOTIVAÇÃO PESSOAL

O estudante *Ricardo de Paula Costa* veleja desde os 9 anos de idade. Incentivado pelos pais, se apaixonou pelo esporte e desde então jamais deixou de velejar. Participou de inúmeras competições e venceu muitas delas. Atualmente, aos 22 anos de idade, possui uma larga experiência em vela oceânica e é muito conhecido e respeitado no mundo das embarcações de competição no Brasil.

O estudante *Luís Henrique Procópio Pinto* sempre se interessou pelas histórias do amigo. Apesar de combinarem uma série de vezes, jamais tiveram a oportunidade de velejarem juntos. Mesmo assim, ao ser convidado pelo amigo Ricardo para participar deste projeto, se interessou muito pelo assunto. Decidiu, então, abandonar o projeto que planejava desenvolver, a respeito do desenvolvimento de um novo produto, e decidiu desenvolver o presente trabalho com o amigo.



## 5. INTRODUÇÃO TEÓRICA

Neste item do trabalho serão introduzidos os conceitos físicos que regem o comportamento das embarcações a vela, como os movimentos da embarcação influenciados pelo oceano, formulações matemáticas que permitem calcular o escoamento do vento através das superfícies das velas, diagramas de composição de forças que esclarecem o porquê a embarcação a vela navega para frente, introdução dos gradientes de pressão nas velas e etc.

Neste trabalho não estão apresentados os conceitos matemáticos de CFD dos softwares Fluent e Gambit. Os mesmos foram utilizados apenas como ferramentas.

### 5.1 – Movimentos das embarcações

A qualidade mais desejável em um barco é a estabilidade. Em melhores termos, isto significa que a embarcação deve ser capaz de receber forças violentas do mar e responder a elas de forma suave, possibilitando uma fácil navegação. A estabilidade de um barco é a sua habilidade de providenciar um ambiente que permita a tripulação exercer suas funções da melhor maneira possível, física e mentalmente, sem enjoarem devido ao excesso de “rolling”, “pitching”, “heaving” e “yawing” da embarcação.

A Fig. 3 mostra quais são os movimentos que um barco em mar aberto pode apresentar.

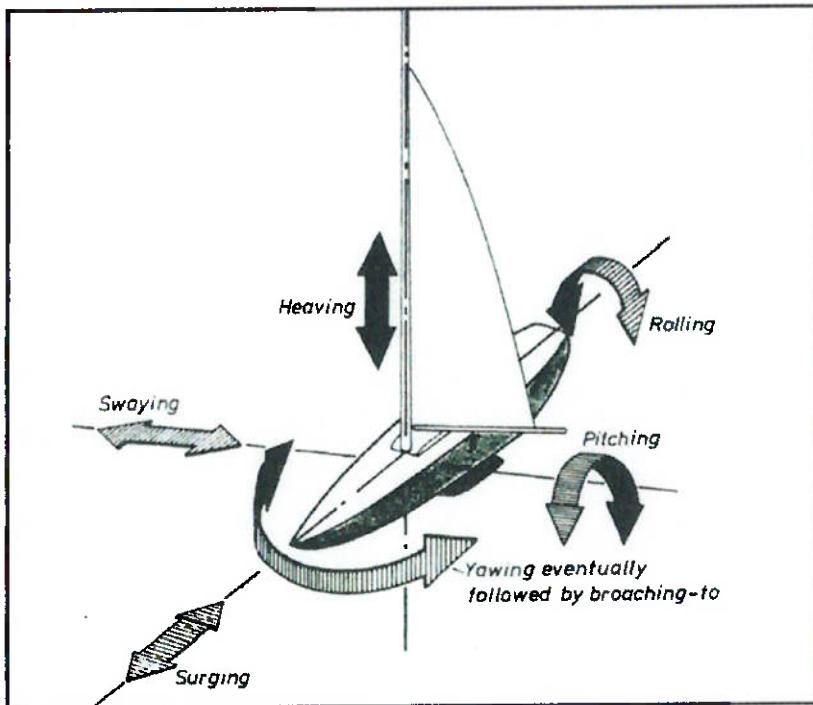


Fig. 3 – Movimentos básicos de uma embarcação à vela quando em alto mar.

[Ref.8]

Os movimentos demonstrados na figura anterior podem ser enjoativos e exaustantes a ponto de alguns ou todos os membros da tripulação se tornem totalmente incapacitados. Em geral, a intensidade e a freqüência das acelerações irá depender da inércia do barco. Então, duas embarcações – uma pesada e outra muito leve – quando expostas às mesmas forças, irão experimentar diferentes acelerações. O que é certamente esperado, é que o barco mais pesado seja mais estável para a sua tripulação que o mais leve. Dessa forma, um barco que é duas vezes mais pesado que um outro, sofrerá acelerações de cerca da metade da intensidade sofrida por este último.

A intensidade da aceleração também irá depender do volume do casco submerso. Barcos leves e modernos, com superestruturas que estão muito acima da linha da água, são particularmente vulneráveis em mares agitados.



As Figs. 4a e b mostram os efeitos na capacidade de ação da tripulação devido aos movimentos de “rolling”, e acelerações devido a “pitching” e “heaving”.

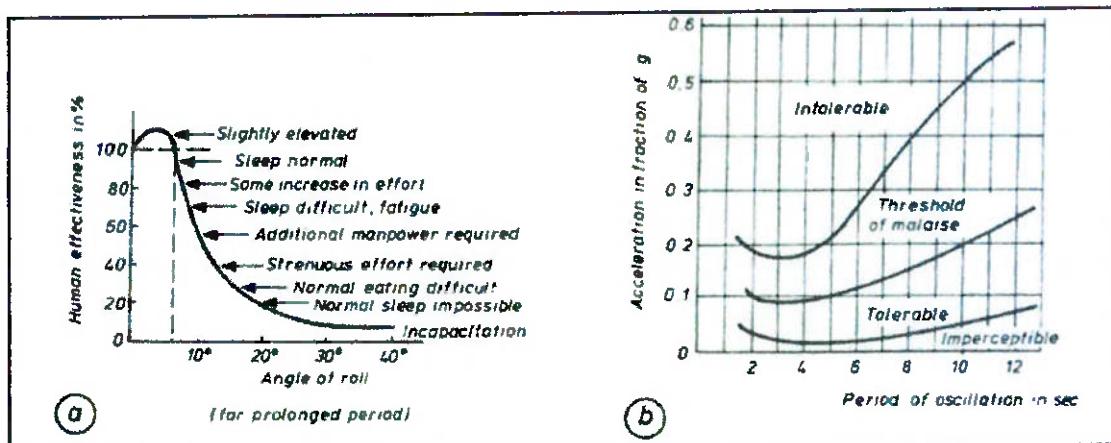


Fig. 4 – Efeitos do rolling e acelerações quando os movimentos pitching e heaving na capacidade da tripulação. [Ref.8]

## 5.2 - O vento aparente

No estudo das forças aerodinâmica que atuam em uma vela, o que realmente importa é como a embarcação à vela “vê” a incidência do vento em relação ao seu curso, e não as características (direção, intensidade e ângulo de incidência) do vento real. Dessa forma, para o cálculo das forças aerodinâmicas que agem em uma vela, utilizamos sempre as propriedades do vento aparente, cujos valores dependem da direção de incidência do vento real, da direção do curso navegado e a velocidade de ambos.

A força aerodinâmica produzida pelo vento varia com o quadrado da velocidade do vento aparente. Em outras palavras, um aumento de duas vezes na velocidade do vento aparente irá resultar em um aumento quatro vezes maior na resultante das forças



aerodinâmicas na vela. O vento aparente não é uniforme em intensidade e direção ao longo de toda vela, mas depende dos seguintes fatores:

1. O ângulo entre o curso navegado e a direção do vento real,  $\gamma$
2. A velocidade da embarcação,  $V_s$
3. Variação da velocidade do vento real,  $V_T$ , para diferentes cotas em relação ao nível do mar
4. “Rolling” e “Pitching” da embarcação

O vento aparente ‘sentido’ pelo mastro na movimentação da embarcação é o vetor resultante da composição dos vetores de velocidade do vento real e da embarcação. A Fig. 5 ilustra a forma de determinação das características do vento aparente.

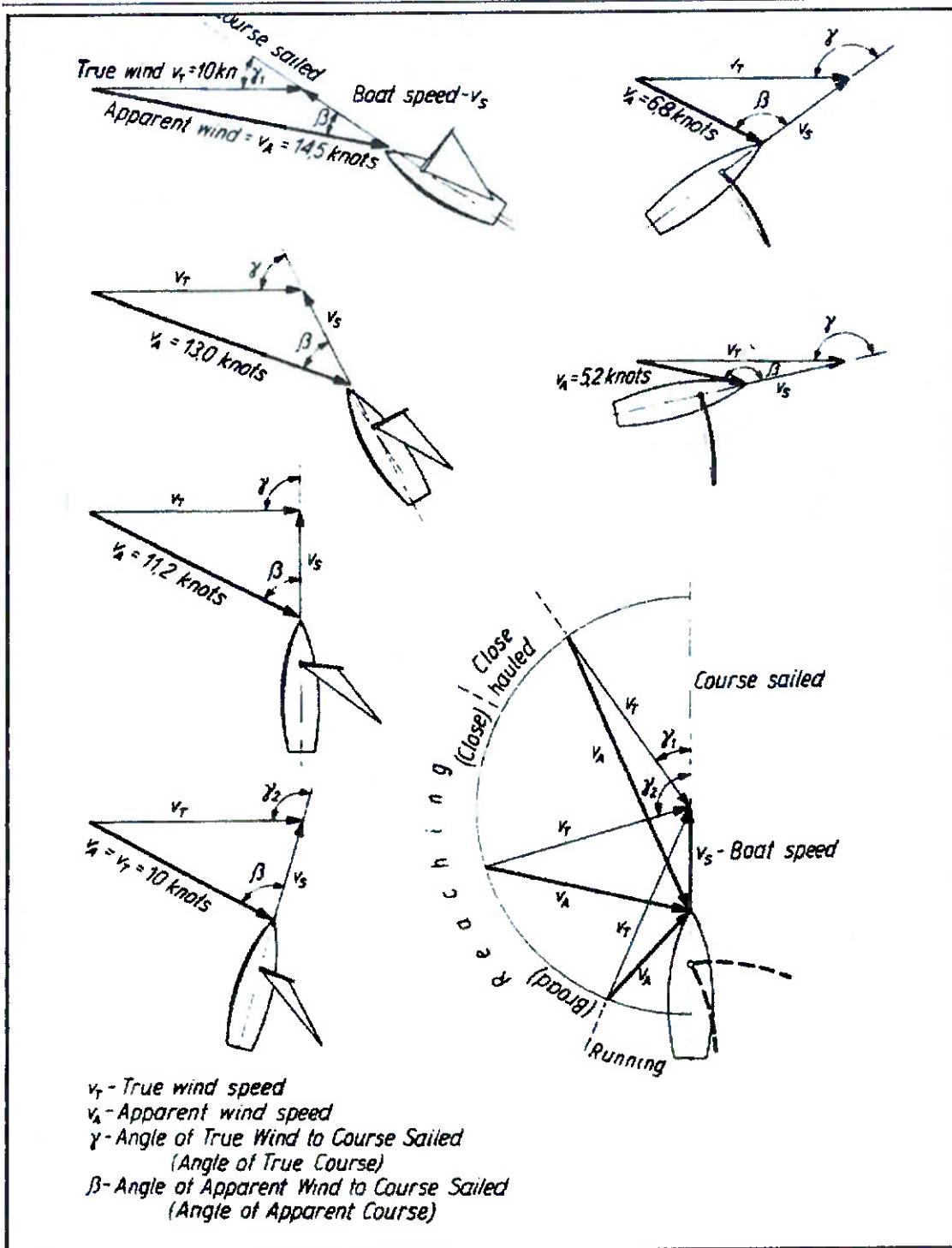


Fig. 5 – Demonstração da forma de determinação das características (intensidade, direção e ângulo de incidência) do vento aparente.  $V_T$  = velocidade do vento real;  $V_A$  = velocidade o vento aparente;  $V_s$  = velocidade da embarcação;  $\gamma$  = ângulo entre a direção do vento real e o curso navegado;  $\beta$  = ângulo entre a direção do vento aparente e o curso navegado. [Ref.8]



A velocidade do vento real aumenta com o aumento da cota em relação ao nível do mar. Na superfície, o movimento do vento é retardado devido ao atrito de superfície, que também ocorre entre a superfície do mar e o vento, em um fenômeno muito similar ao que iremos descrever em seções posteriores para o arrasto de superfície na vela. É claro que o gradiente de velocidades do vento real em função da altura em relação ao nível do mar depende das condições climáticas. A Fig. 6 ilustra uma curva de gradiente típica para condições médias de tempo em mar aberto.

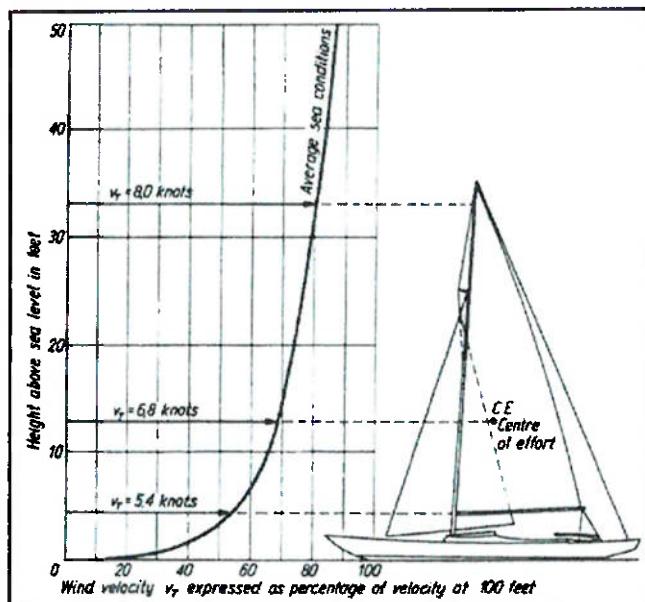


Fig. 6 – Gradiente de velocidades em um barco à vela em função da cota em relação ao nível do mar. [Ref.8]

A variação da velocidade do vento real,  $V_T$ , com a altura irá afetar a direção e a magnitude do vento aparente para cada seção da vela em cotas diferentes. Experiências nos mostram que a máxima velocidade do vento aparente encontrada na vela (topo) chega a ser mais de 50% maior do que a mínima, encontrada na parte inferior da vela, além do que a variação do ângulo de incidência do vento aparente,  $\beta$ , pode chegar a  $15^\circ$ .



“Rolling” e “Pitching” também podem influenciar o vento aparente em sua força e direção, por causa da associação de movimentos do mastro e da vela (Fig. 7). O efeito é maior no topo do mastro, onde os movimentos são mais violentos. Olhando para a ocorrência de rolling, Fig. 7a, é possível vermos que o topo do mastro oscila entre as posições 1 e 2, com uma velocidade  $w_1$  do barlavento para o sotavento, e com velocidade  $w_2$  para retorno. O efeito deste fenômeno pode ser considerado em termos do triângulo de velocidades, representado ao lado, que mostra as mudanças no vento aparente.

O ângulo de incidência em posições superiores da vela pode variar entre limites grandes, sendo muito significativa esta variação quando o rolling é muito violento. Como resultado das flutuações dinâmicas do vento aparente, mudanças periódicas irão ocorrer na intensidade e direção da força aerodinâmica resultante. Em uma análise similar, Fig. 7b, verificamos que o movimento de pitching do barco também induz mudanças no vento aparente.

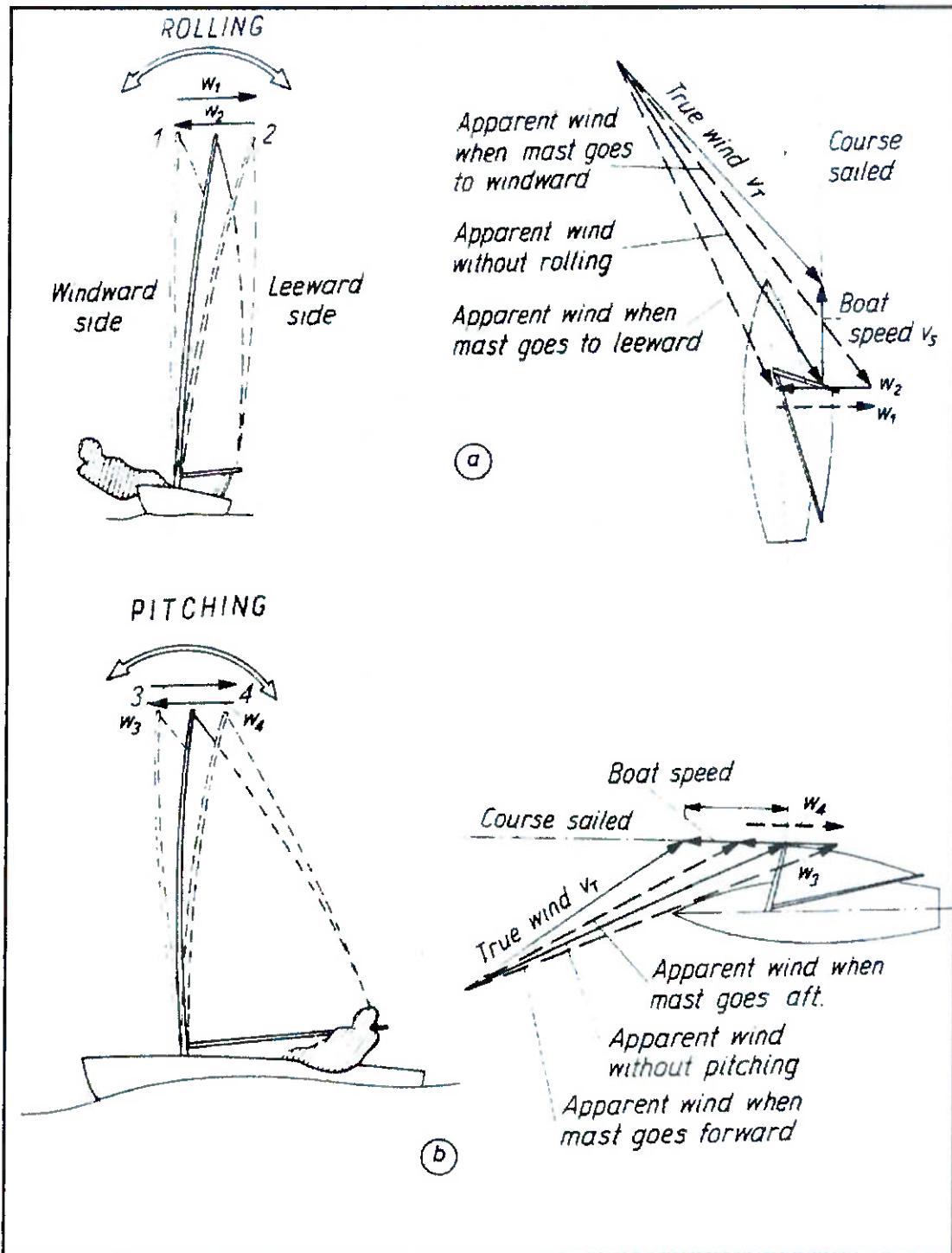


Fig. 7 – Devido aos movimentos de rolling e pitching, os ângulos de incidência efetivos nos quais a vela opera aumentam e diminuem constantemente a taxas diferentes, dependendo da cota da seção da vela em relação ao nível do mar.  
[Ref.8]



### 5.3 – Diagrama de forças

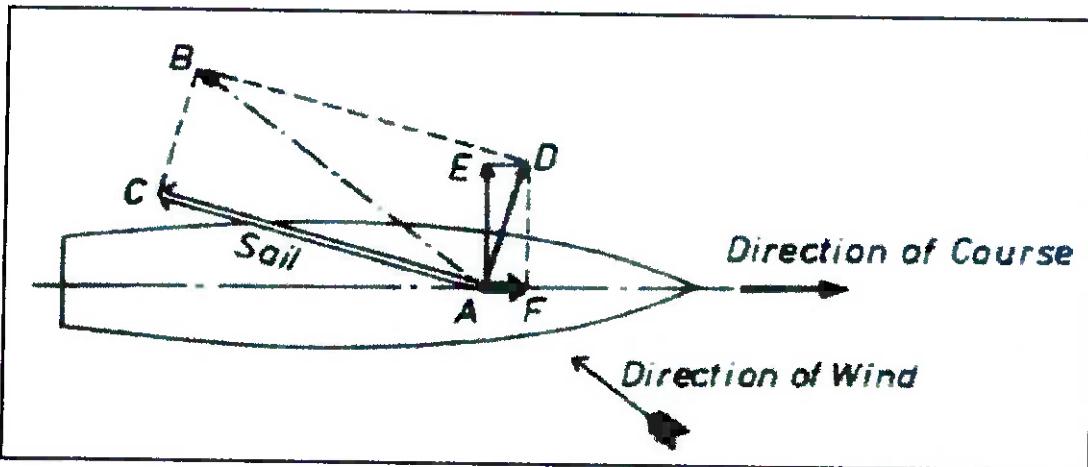


Fig. 8 - Diagrama de forças em uma vela. [Ref.8]

O diagrama acima representa um barco à vela em curso. A direção e a intensidade do vento são representadas graficamente pela linha AB. De acordo com o paralelogramo de forças, o empuxo resultante do vento na vela pode ser representado por duas forças componentes: uma de intensidade maior, linha AC, que age paralelamente e ao longo da vela, sem produção de nenhum efeito de deslocamento na embarcação, mas apenas de uma certa quantidade de atrito superficial; e uma de menor intensidade, linha AD, que atua perpendicularmente a esta última. A componente de força AD, por sua vez, pode ser novamente decomposta em duas outras forças, perpendiculares entre si. Uma maior, representada pela linha AE, perpendicular à direção de navegação e sem realização de trabalho; e uma de menor intensidade, a linha AF, responsável pelo trabalho de deslocamento da embarcação.

No passado, acreditava-se que o fenômeno acima descrito (força de empuxo representado pela linha AF) era o único responsável pela movimentação dos barcos. Entretanto, hoje é sabido que esta

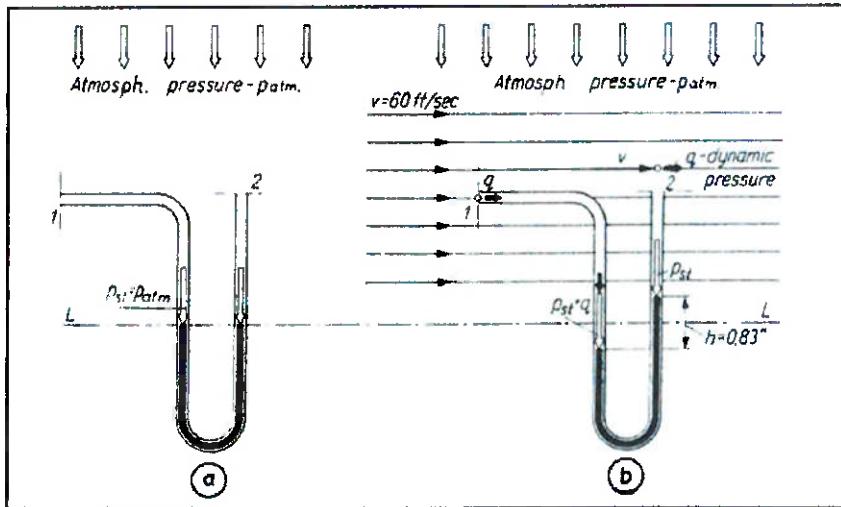


componente de trabalho é relativamente menor quando comparado com a força resultante da diferença de pressão entre os lados da vela, principalmente em pequenos ângulos de ataque, isto é, abaixo do ângulo de stall.

#### 5.4 - Diferenças de Pressão - a maneira correta de explicação das forças na vela

Para o entendimento do fenômeno de surgimento de forças a partir da diferenças de pressões, considere um manômetro de tubo em U de vidro, cuja forma pode ser observada na Fig. 9a mostrada abaixo, preenchido com água até o nível L-L e com as extremidades abertas para a atmosfera. Note que a abertura 1 é perpendicular e a 2 é paralela à direção de incidência do vento.

Fig 9 – Método de medição direta da pressão dinâmica,  $q$ , e de medição indireta da velocidade do fluido,  $V$ , por meio do manômetro de tubo em U. [Ref.8]



Quando não há incidência de vento, Fig. 9a, os níveis de líquido são os mesmos nos dois tubos, já que ambos estão sob a ação da mesma pressão estática,  $P_{st}$ , a pressão atmosférica  $P_{atm}$ . Se um outro manômetro é colocado em um local com movimentação de ar, como é



mostrado na Fig. 9b, a pressão estática agindo em ambos os tubos continua a mesma e igual à pressão atmosférica,  $P_{st}$ . Entretanto, a seção 1, cuja abertura está dirigida para o fluxo, irá receber, em adição à pressão estática  $P_{st}$ , uma pressão dinâmica,  $q$ , que aumenta a pressão neste local quando o ar é forçado ao estado estacionário. Este fenômeno não acontece na seção 2, já que sua abertura está perpendicular ao fluxo de ar.

A soma da pressão estática com a dinâmica é conhecida como pressão total ou pressão de estagnação,  $P_{tot}$ :

$$P_{tot} = P_{st} + q \quad (1)$$

A pressão dinâmica, por sua vez, pode ser representada pela expressão:

$$q = \frac{\rho V^2}{2} \quad (2)$$

onde,  $V$  = velocidade do fluido  
 $\rho$  = densidade do fluido

O fenômeno de diferenças de pressão em uma vela é semelhante ao que observamos em uma asa de avião. A Fig. 10 representa a seção transversal de uma vela.

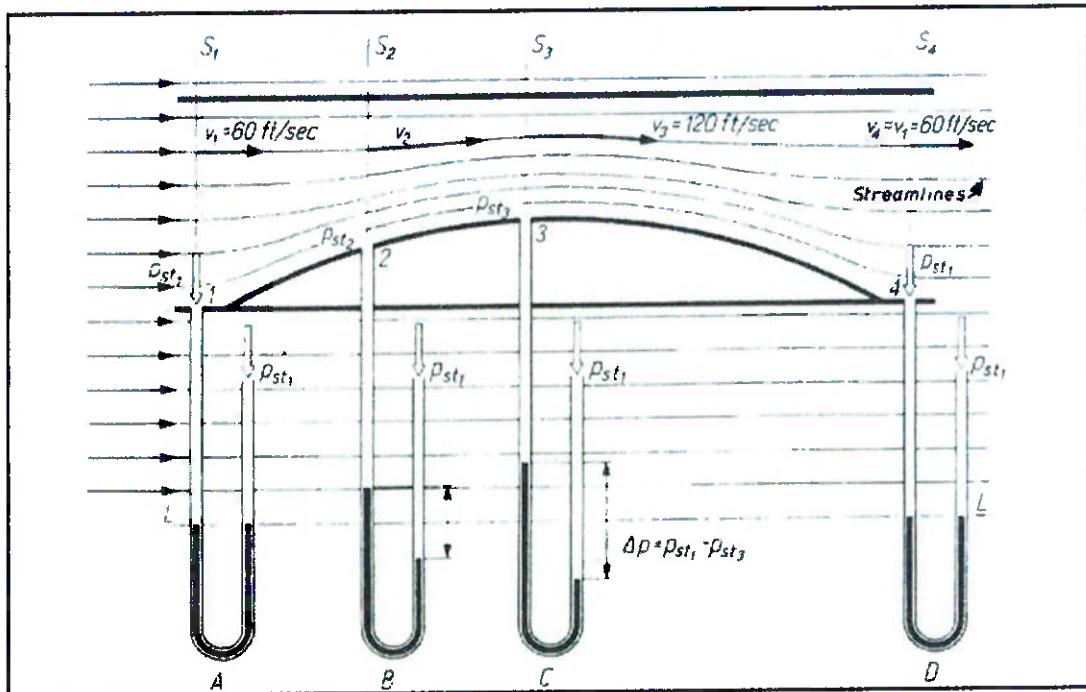


Fig. 10 – Figura simplificada de fluxo entre um perfil de vela e um duto (princípio de Venturi). Note que na seção  $S_3$ , o fluxo de ar é convergente. Como resultado, a velocidade do fluido,  $V_3$ , é aumentado, quando comparado à velocidade  $V_1$  na seção  $S_1$ . [Ref.8]

Na Fig. 10, um fluxo de ar atravessa as seções  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$ . Nestes quatro pontos, são posicionados manômetros de tubo em U, preenchidos com água até um nível comum  $L-L$ , e tendo suas extremidades abertas paralelas as duas placas. Sem a presença de fluxo de ar, os níveis indicados nos manômetros serão os mesmos. Entretanto, com o início da passagem de ar, observaremos que os níveis de água nos manômetros  $B$  e  $C$  serão alterados, indicando claramente haver uma queda de pressão (sucção) nos pontos 2 e 3 respectivamente. Esta queda de pressão é originada devido à variação de velocidade do escoamento ao longo das seções  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$ . Os manômetros  $A$  e  $D$  não indicarão diferenças de nível, já que as seções  $S_1$  e  $S_4$  têm a mesma área de seção transversal e ambas estão



sujeitas as mesmas velocidades do escoamento,  $V_1$  (ignorando perdas devido ao atrito viscoso do ar). Porém, o fluxo de ar deverá ser acelerado nas seções  $S_2$  e  $S_3$ , já que a vazão mássica (ou volumétrica) de ar deverá se manter constante em todas as seções (pela lei da Continuidade da Mecânica dos Fluidos). A vazão mássica de ar é encontrada através da multiplicação da velocidade do escoamento pela área da seção na qual ocorre o escoamento do fluido, e pode ser representada pela seguinte expressão:

$$S_1 V_1 = S_3 V_3 \quad \text{ou} \quad \frac{S_1}{S_3} = \frac{V_3}{V_1} \quad (3)$$

Ou seja, a velocidade do escoamento é tanto maior quanto menor for a seção transversal de passagem do fluido. Conseqüentemente, a pressão dinâmica do escoamento também varia ao longo do perfil analisado. Isto significa que a energia cinética do ar na seção  $S_3$  aumenta muito em relação à seção  $S_1$ . O aumento da pressão dinâmica  $q_3$ , na seção  $S_3$ , é seguido de uma redução da pressão estática local  $P_{st}$ . Este fenômeno foi explicado pela primeira vez em 1738, quando Daniel Bernoulli estabeleceu uma relação entre as pressões estática e dinâmica, a qual diz que o valor da soma destas duas pressões é sempre igual em qualquer ponto do escoamento, ou seja:

$$P_{st} + q = P_{st1} + q_1 = P_{tot} \text{ (constante)} \quad (4)$$

i.e. pressão estática + pressão dinâmica = pressão total

Em outras palavras, quando a velocidade do escoamento aumenta, sua pressão estática diminui e vice-versa. Este fenômeno é



essencial para que exista a sustentação em aviões ou para o deslocamento de barcos à vela.

Dessa forma, a força aerodinâmica gerada na vela pelo vento depende quase que inteiramente da diferença de pressão entre os lados da vela, conhecida como sucção, que empurra a vela da região de maior pressão (lado da vela de ataque do vento - barlavento) para a de menor pressão (lado da vela oposto à incidência do vento - sotavento).

O fenômeno descrito acima ilustra claramente a importância da curvatura na vela. É através dela que a diferença de pressão entre os lados da vela é obtida, gerando, assim, o empuxo necessário para o deslocamento da embarcação.

A Fig. 11 demonstra a distribuição de pressões em uma vela.

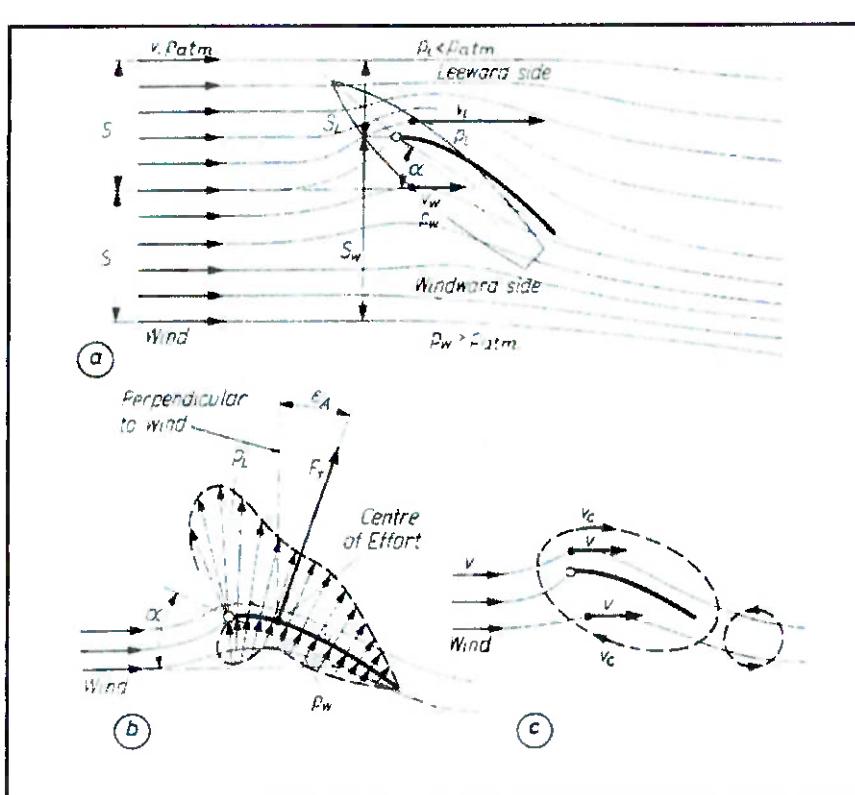


Fig. 11 – Distribuições da velocidade do vento local e da pressão local em uma vela sob vento aparente com pequeno ângulo de incidência. A razão de velocidades entre os lados da vela pode ser maior que três vezes. [Ref.8]



Na Fig. 11, podemos observar duas regiões. Uma de pressão, representada pela letra  $P_w$ , e uma de succção,  $P_L$ . A força resultante está representada pelo vetor  $F_T$  e é representada na figura no centro de aplicação de forças da vela, CE. Há duas considerações que podem ser explicitadas da figura acima: a primeira é que há uma grande concentração de pressão de succção próxima ao "luff". Por outro lado, longe do "luff", a succção cai rapidamente, aproximando-se de zero no "leech". A outra é que existe uma grande diferença na intensidade das pressões nas regiões do sotavento para aquelas do barlavento. Comparando as succções e as pressões na parte frontal da vela, é possível estimar que o sotavento é responsável por 65-70 porcento do total da força aerodinâmica que impulsiona a embarcação. Dessa forma, é preferível aumentarmos a intensidade da succção no sotavento do que a pressão no barlavento.

Para aumentarmos a succção, é possível a utilização de duas velas em conjunto – uma principal e outra auxiliar (genoa).

A importância da concentração de pressão próxima ao "luff" pode ser explicitada quando explicamos o mecanismo de pressão responsável pelo deslocamento da embarcação. Ao longo de qualquer ponto da seção da vela, a succção no sotavento e a pressão no barlavento podem ser somadas, e representadas por vetores, indicando a direção e a magnitude da pressão resultante, como por exemplo  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  mostrados na Fig. 12.

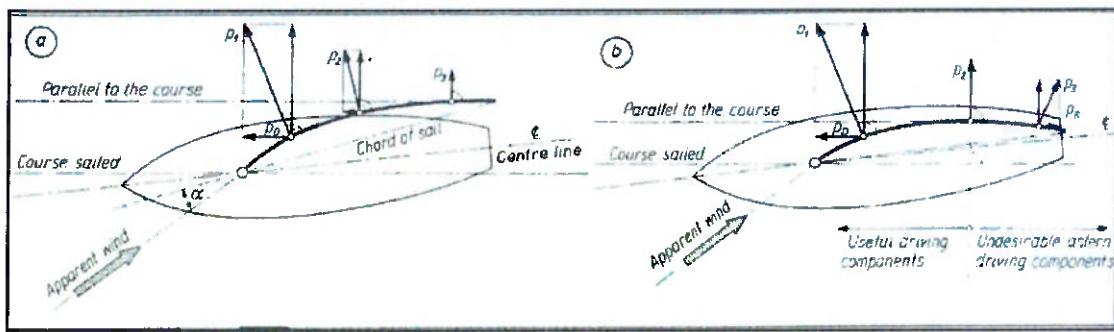


Fig. 12 – Representação da pressão local  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  para três pontos de medida em uma seção transversal típica de uma vela com pequeno ângulo de ataque. Note que praticamente todas as forças de empuxo são desenvolvidas ao redor do luff, onde a componente de pressão na direção de navegação é relativamente grande. Outra componente de pressão, perpendicular à força de empuxo, é indesejável, mas inevitável. Esta última deve ser mantida em valores baixos para que a inclinação da embarcação não se torne excessiva. [Ref.8]

As pressões resultantes sempre agem normais à superfície da vela. Elas também podem ser decompostas em duas componentes, uma paralela ao curso de navegação e outra perpendicular a ela. É claro que apenas a componente  $P_D$  realiza trabalho no deslocamento do barco. É evidente que a maior contribuição para a força de empuxo, responsável por esta movimentação das embarcações, provém da região frontal da vela, em virtude de suas magnitudes e direções. Entretanto, longe do “luff”, a componente de empuxo cai rapidamente, chegando a se tornar negativa na extremidade oposta da vela.



## 5.5 - O efeito do mastro na distribuição de pressões nas velas

A presença do mastro, posicionado em uma das extremidades da vela principal, faz com que o fluxo e a distribuição de pressão nas velas se tornem mais complexas. Uma das razões, mas não única, é que a distribuição de pressão ao redor do mastro afeta, em particular, a distribuição da sucção posteriormente a ele. Experiências em túneis de vento nos mostram que é possível identificarmos uma queda brusca da pressão de sucção após o mastro.

A Fig. 13 mostra a distribuição de pressão ao redor de um mastro circular sem a presença da vela. A máxima sucção ocorre quando a velocidade local relativa do fluxo é maior. Logo atrás deste ponto ocorre a separação do fluxo, fazendo tanto a velocidade do fluido quanto a pressão de sucção caírem. Vórtices são formados inevitavelmente após o mastro, incorrendo em perdas de pressão em ambos os lados da vela.

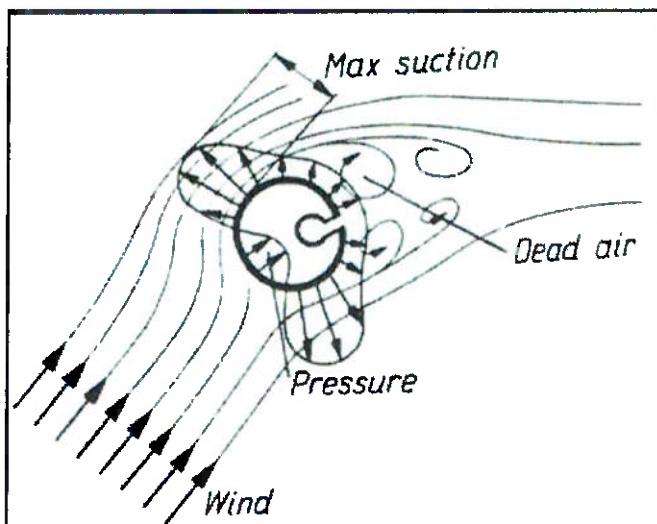


Fig. 13 – Distribuição de pressão ao redor de um mastro circular sem a presença da vela. O mastro, assim como o borda frontal da vela principal, é um importante fator na determinação da distribuição de pressão nos sotaventos das velas posicionadas logo atrás.  
[Ref.8]

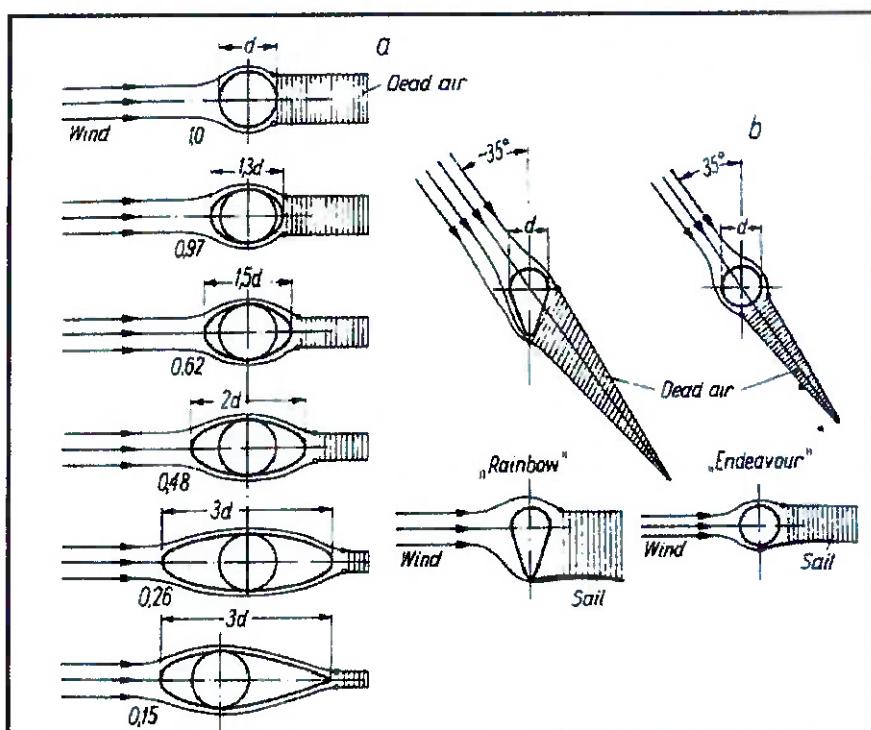


É claro que dependendo da geometria do mastro, a distribuição de pressão ao longo de toda a vela será diferente. Também será diferente a tolerância da vela em relação aos ângulos de incidência do vento. Tolerância, neste contexto, significa a capacidade da vela de manter o fluxo atingindo the “trailing edge”, apesar da variação do ângulo de incidência do vento aparente. Se o ângulo de incidência não está correto, considerável separação no fluxo irá ocorrer no ponto de maior curvatura da vela, ou seja, no sotavento, seguido de uma redução da intensidade da sucção. O ângulo de incidência ideal é definido pela ciência que estuda a aerodinâmica como sendo aquele no qual o fluido atinge a borda frontal da vela de forma plana e linear, isto é, sem a ocorrência de separação em nenhum dos lados da vela.

Na Fig. 14, a seguir, encontramos alguns coeficientes de arrasto para diferentes formas de mastros. A variação de valores é de 0.15 até 1.0. Podemos observar nos diagramas que, afunilando a extremidade final do mastro, é possível reduzirmos o coeficiente de arrasto. Entretanto, se levarmos em conta que nenhuma embarcação é capaz de navegar com um vento aparente de incidência inferior a  $20^\circ$ , sendo que para a maioria delas o valor deste ângulo inferior é maior, nós podemos concluir que um mastro fusiforme não é melhor que um circular, a não ser que aquele rotacione junto com a vela.



Fig. 14 -  
Coeficientes de  
arrasto para  
diferentes seções  
de mastros. [Ref.8]



## 5.6 - Interação entre as Velas

A Fig 15 indica alguns dos ângulos que determinam a eficiência da interação entre as velas. A interação entre a vela principal e a genoa depende principalmente dos ângulos Trim,  $\delta_F$  e  $\delta_M$ , entre a linha central da casco e as direções de inclinação da genoa e da vela principal respectivamente. Para um comportamento satisfatório, é recomendado que o ângulo trim,  $\delta_F$ , da genoa esteja entre 7 e 20°.

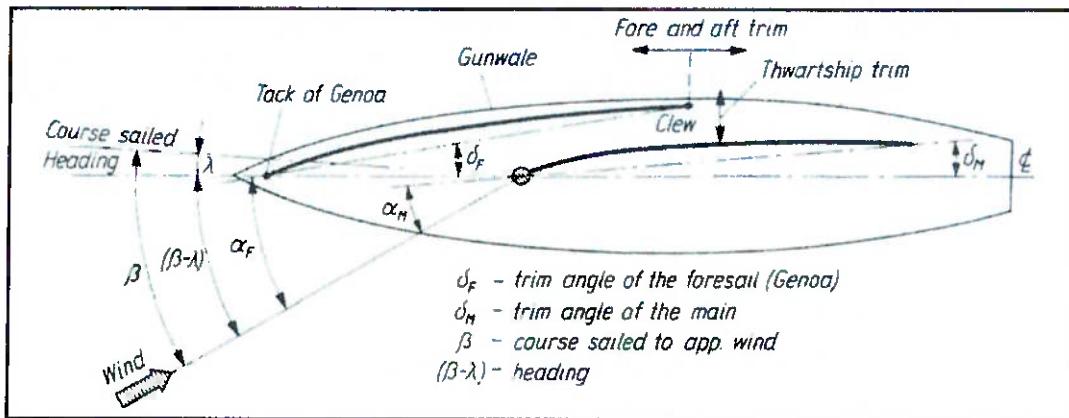


Fig. 15 – Definição dos ângulos de incidência para pequenos ângulos de ataque da vela. [Ref.8]

### 5.6.1 - Influência da genoa na vela principal

Como um exemplo de interação entre as velas, considere o conjunto vela principal – genoa estuda no túnel de vento da Universidade de Southampton – Estados Unidos – que mostra o comportamento do fluxo de ar no sotavento de alguns modelos de vela. O ângulo trim,  $\delta_F$ , da genoa era de  $10^\circ$ , e para a vela principal,  $\delta_M$  era  $5^\circ$ . Ambas as velas tinham uma curvatura de 4%. As quatro ilustrações da Fig. 16 mostram as características do fluxo de ar para vários ângulos de incidência do vento aparente ( $\beta - \lambda$ ). Então, como os ângulos de incidência  $\alpha_F$  e  $\alpha_M$  variam juntos, a posição relativa entre as duas velas é mantida constante.

Três tipos básicos de fluxo de ar são mapeados nas velas. Tipo A – laminar e estacionário – representa as condições quando todas as partículas de ar se movem na mesma direção e de forma ordenada (Fig. 16a). O fluxo instável B indica a presença de movimentos randômicos do fluxo em relação à velocidade principal (Fig. 16b). O



fluxo reverso, C, ocorre quando o fluxo separa da vela principal e corresponde ao mecanismo de stall (Fig. 16c).

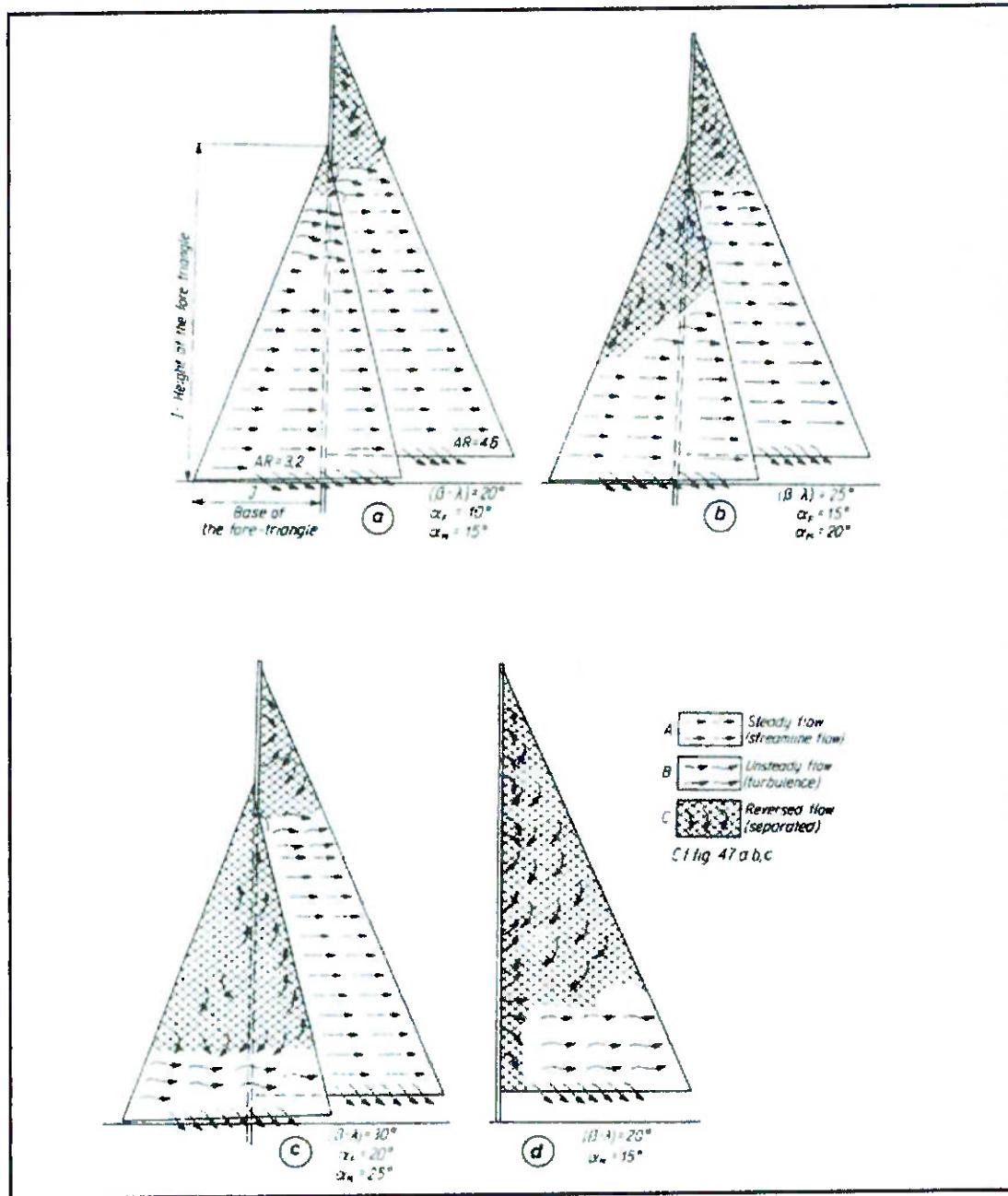


Fig. 16 – Visualização do fluxo de ar no sotavento de um conjunto vela principal - genoa para pequeno ângulo de ataque para um experimento em túnel de vento. [Ref.8]



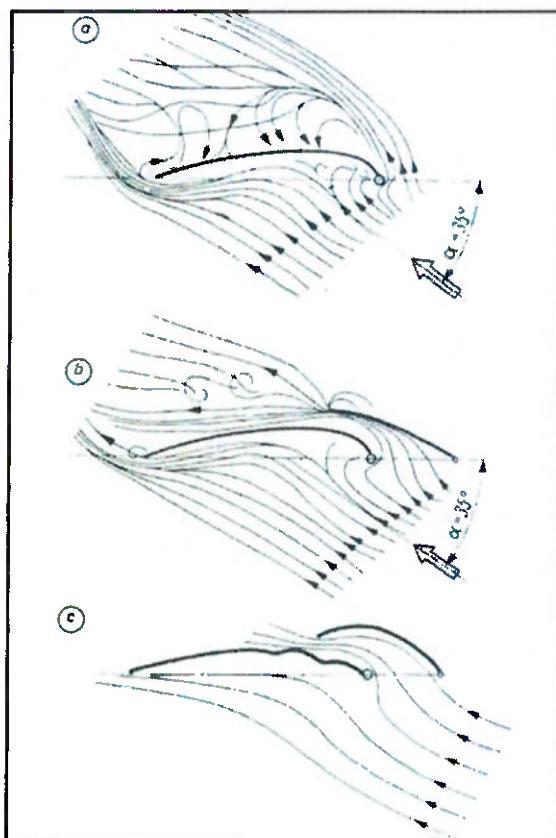
Para obtermos uma eficiência aerodinâmica alta, o fluxo no sotavento da vela deve ser laminar e estacionário. Como podemos observar na figura anterior, a medida que aumentamos o ângulo de incidência do vento aparente ( $\beta - \lambda$ ), aumentam também as áreas nas velas com ocorrência de escoamentos turbulentos e com separação.

Um detalhe curioso que podemos observar é o caso mostrado pela ilustração da Fig. 16d, que mostra o fluxo de ar passando apenas pela vela principal. Nela, o ângulo de incidência do vento aparente é o mesmo encontrado no caso a, e claramente demonstra que a genoa estabiliza o fluxo no sotavento da vela principal, impedindo a ocorrência de separação do fluxo de ar, principalmente nas regiões posteriores ao mastro. Isto porque a presença da genoa reduz a velocidade do fluxo de ar no sotavento da vela principal (maiores detalhes da influência da genoa na vela principal será apresentada na seção subsequente). Então, isto atrasa ou evita a separação do fluxo, que usualmente começa no mastro.



Fig. 17 – Fluxo de ar ao redor de uma vela simples e interação entre a vela principal e a genoa.

- a.) Fluxo totalmente separado no sotavento de uma vela principal isolada.
- b.) Para o mesmo ângulo de incidência do caso anterior, o fluxo é suavizado no sotavento da vela principal devido ao efeito da genoa.
- c.) Curvatura excessiva da genoa causa o 'backwinding' na vela principal. [Ref.8]



A figura 17 ilustra o fluxo de ar com a vela principal em um ângulo de ataque  $\alpha_M = 35^\circ$ . O caso (a), para a vela principal somente, mostra a separação do fluxo no sotavento, em que, na presença da genoa como no caso (b), a separação é eliminada. O caso (c) mostra um fenômeno conhecido como 'backwinding', onde a succção é reduzida de tal maneira, que faz com a diferença de pressão entre o barlavento e o sotavento se torne praticamente zero, fazendo a vela pamejar, em decorrência da má escolha do ângulo trim da genoa.

A correta geometria do espaço entre as duas velas deveria ser mantido constante em todas as cotas. O que freqüentemente encontramos é uma baixa eficiência da genoa. Isto ocorre principalmente devido a uma curvatura excessiva nas regiões



superiores da vela, apesar desta possuir um ângulo de curvatura correto em seu 'pé', causando 'backwinding' na vela principal.

A quantidade de ar que flui entre a vela principal e a genoa – e consequentemente a velocidade do escoamento, juntamente com a distribuição de pressão resultante desenvolvida em ambas as velas – irá variar dependendo dos ângulos de trim,  $\delta_M$  e  $\delta_F$ . A Fig. 18 ilustra o que acontece com o fluxo de ar que passa entre as velas quando os ângulos trim são alterados. Os valores – 60%, -30% e +20% indicam a variação percentual da quantidade de ar que passa entre as duas vela, com relação a situação inicial

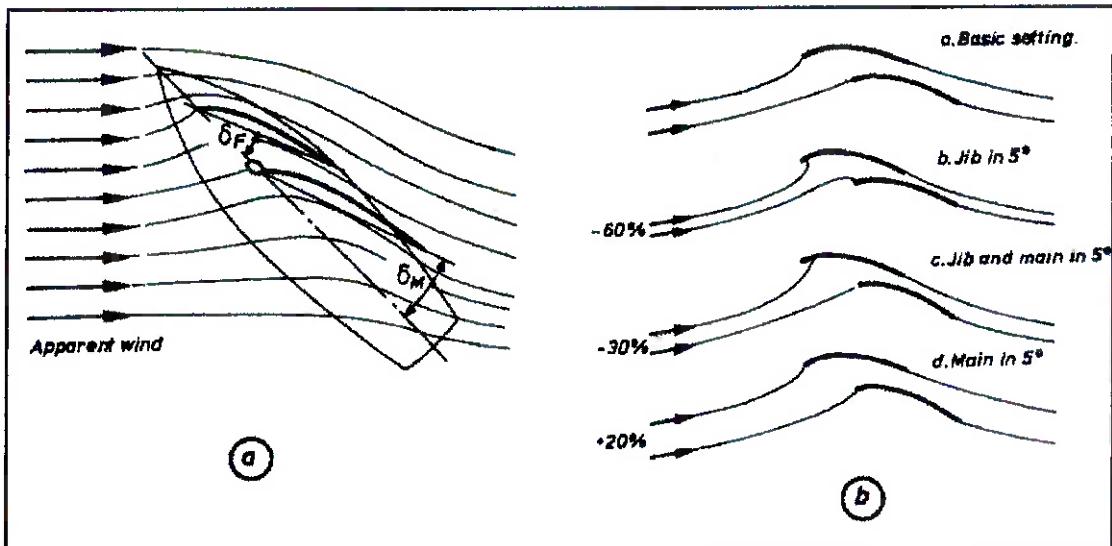


Fig. 18 – A quantidade de ar que escoa através do espaço entre a genoa e a vela principal depende dos ângulos  $\delta_F$  e  $\delta_M$ . [Ref.8]



### 5.6.2 - Qual vela contribui mais para a força de empuxo na vela: a principal ou a genoa?

Como pode ser identificado na Fig. 19, a curva de sucção no sotavento da genoa é muito maior que a da principal, proporcionadamente a sua área, do que na principal.

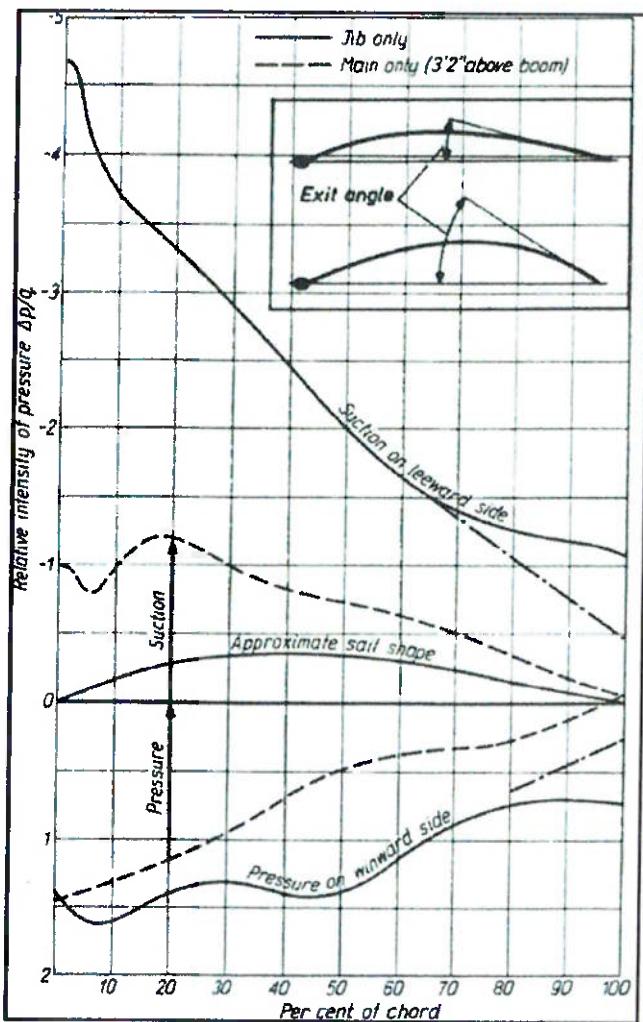


Fig. 19 – Distribuição de pressão e sucção na vela principal e na genoa operando em conjunto.  
[Ref.8]



As curvas mostradas na Fig. 19 podem ser explicadas pela Fig. 20.

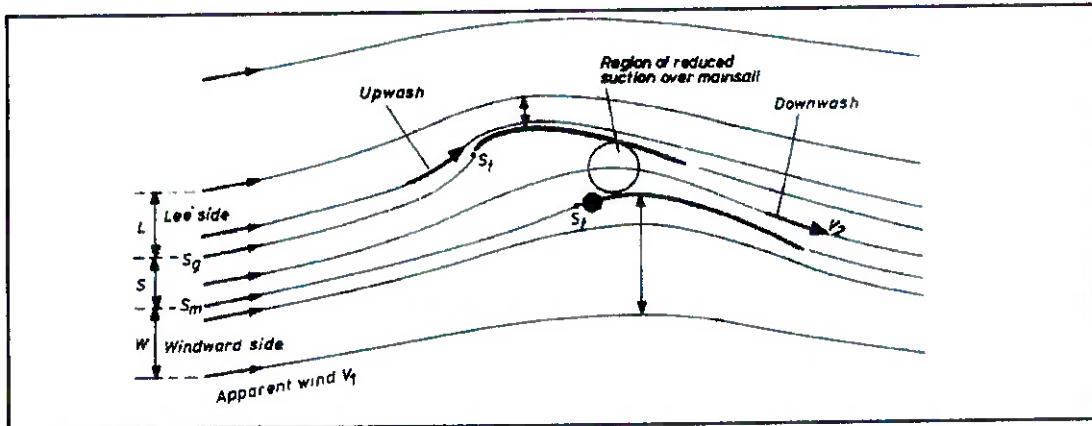


Fig. 20 – Diagrama de explicação do comportamento das pressões na vela principal e na genoa. [Ref.8]

A região de sucção (sotavento) da vela principal está posicionada muito próxima à região de pressão (barlavento) da genoa. Inevitavelmente, estas duas regiões, com características de pressões distintas (indicado pela região circulada na figura), tenderão a se anular, fazendo com que a sucção na vela principal seja muito reduzida. Na verdade, o que acontece é que as partículas de ar que se aproximam da região entre as duas velas são desaceleradas, sendo aceleradas apenas após o fim da genoa. Como resultado da interferência entre as duas velas, a distribuição de pressão na vela principal é modificada de uma maneira tal que provoca a redução do pico de intensidade da sucção. Então, o fenômeno de separação é atrasado, ou impedido de acontecer, dependendo da geometria do espaçamento entre as velas. Ao mesmo tempo, a velocidade do ar no sotavento da genoa é muito aumentada, o que contribui para a maior eficiência da genoa em relação à vela principal, pois a genoa suporta



um carregamento por unidade de área muito superior que a vela principal. Em outras palavras, a desaceleração do fluxo de ar verificada na região de interferência das duas velas contribui para aumentar a diferença de velocidade (conseqüentemente de pressão) verificada na genoa e reduzí-la na vela principal. Dessa forma, boa parte do empuxo é provocada pela genoa e não pela vela principal, como se acreditou por muitos anos.

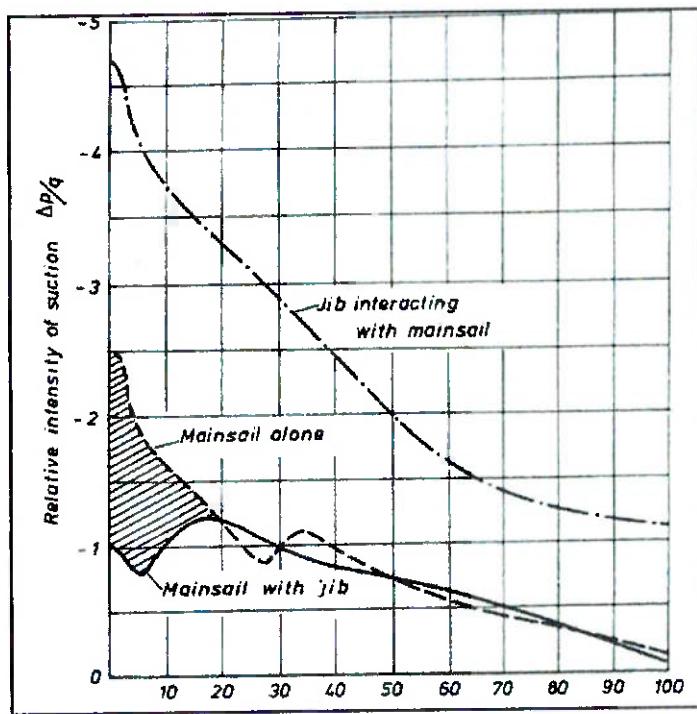


Fig. 21 – O efeito da interação da genoa na distribuição da sucção na vela principal.  
[Ref.8]



## 5.7 - Os Efeitos das Forças Aerodinâmicas na embarcação

A resultante das forças aerodinâmicas geradas nas velas (soma das forças de pressão, sucção e componentes vetoriais) pode ser decomposta em duas componentes em um plano que passa pelo Centro de Esforços CE (seção 5.8), como mostra a Fig. 22 . Estas componentes são:

- Uma força de empuxo,  $F_R$ , agindo ao longo da direção do curso de navegação.
- Uma força de inclinação  $F_H$  agindo perpendicularmente a ambos, mastro e curso, responsável pelo inclinação angular da embarcação.

A força  $F_H$  pode ser novamente decomposta em outras duas forças, cuja magnitude depende do ângulo de inclinação do barco  $\theta$ , então:

- Uma força horizontal (ou lateral)  $F_{lat} = F_H \cos \theta$  (5)

- Uma vertical  $F_{vert} = F_H \sin \theta$  (6)

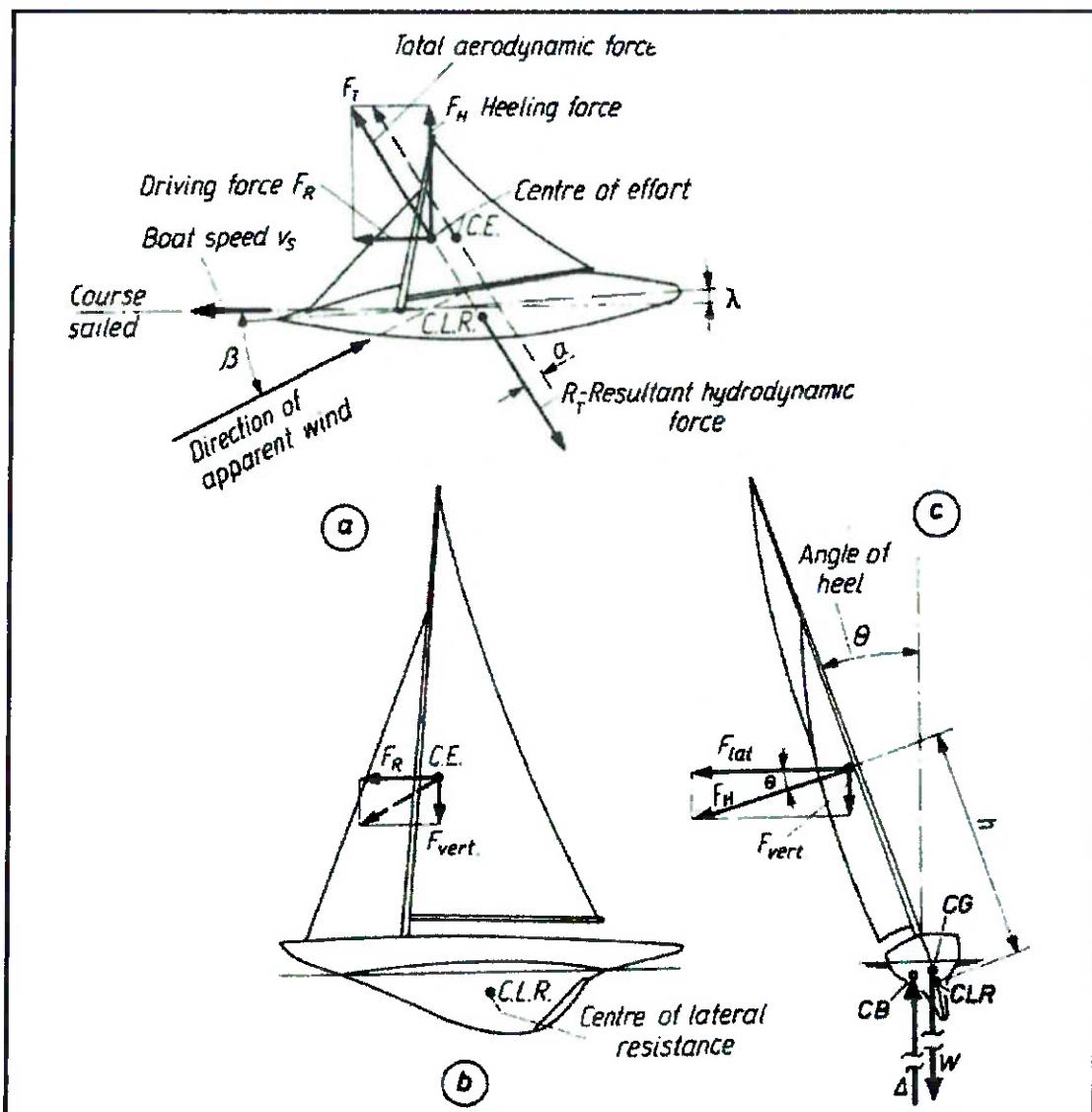


Fig. 22 – Geometria e definição das forças aerodinâmicas presentes em um barco à vela em um certo ângulo de inclinação. [Ref.8]



De uma forma geral, os efeitos dessas forças na embarcação serão:

1. O barco irá se mover ao longo de um curso com velocidade  $V_s$ . A magnitude de  $V_s$  depende da força de empuxo  $F_R$  e será maior quanto maior for  $F_H$ .
2. A direção de uma embarcação é descrita pelo ângulo  $\lambda$ , medido entre o curso navegado e a linha central do casco. Se  $F_{lat}$  aumenta, o ângulo  $\lambda$  também aumentará.
3. A inclinação da embarcação é dada pelo ângulo  $\theta$ . Este, por sua vez, depende da magnitude do momento de inclinação  $M_H = F_H \times h$ , onde  $h$  é a distância medida, ao longo do mastro, entre o CE, ponto de aplicação do total de esforços aerodinâmicos,  $F_T$ , e o centro de resistência lateral (CRL), que é o ponto de aplicação das forças hidrodinâmicas resultantes no casco.

A seguir, apresentaremos o procedimento para o dimensionamento destas forças aerodinâmicas.



## 5.8 - Dimensionamento das Forças Aerodinâmicas.

Segundo experiências em túneis de vento, as três características da força aerodinâmica - intensidade, direção e ponto de aplicação, CE – dependem:

- Da pressão dinâmica  $q = 0,5836 \times V_A^2$  do vento aparente, com  $V_A$  em m/s
- Da área da vela,  $S_A$
- Da posição angular da(s) vela(s), relativa(s) ao vento aparente, conhecido como ângulo de incidência,  $\alpha$
- Da geometria da vela, sua plataforma, curvatura etc
- Do material da vela: sua porosidade, tenacidade, elasticidade etc

Em consideração à geometria da vela, uma importante propriedade é o valor do seu “Aspect Ratio”, AR, dado pela sua altura dividido pelo comprimento de sua corda principal.

$$AR = \frac{b}{c} \quad (7)$$

onde  $b$  é a altura da vela

$c$  é o comprimento da corda principal da vela



Para plataformas diferentes de uma retangular (Fig. 23a e c), o "Aspect Ratio" é obtido diferentemente. Se a área da vela,  $S_A$ , é definida como o produto da altura, b, pelo seu comprimento, c (Fig. 23b), a corda principal é obtida dividindo-se  $S_A$  por b. Então, teremos:

$$AR = \frac{b \times b}{S_A} = \frac{b^2}{S_A} \quad (8)$$

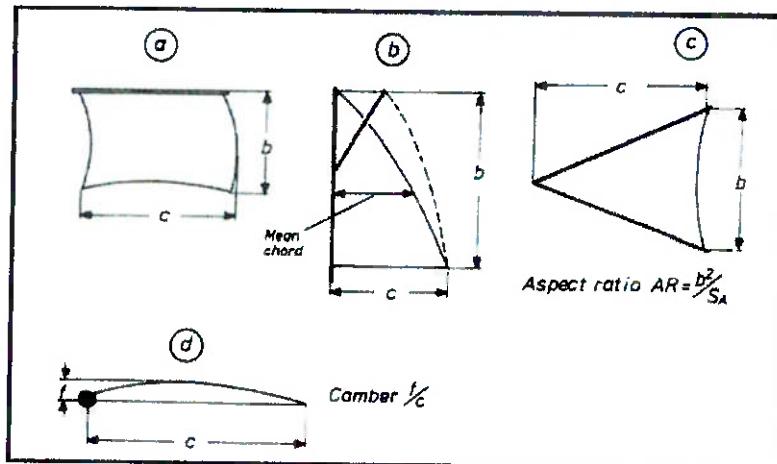


Fig. 23 – Significado e definições de curvatura e aspect ratio:  
curvatura =  $f / c$ ;  
aspect ratio (AR) =  $b / c$ ;  
para uma vela retangular, ou para outras geometrias retangulares:  $AR = b^2 / S_A$ . [Ref.8]

A curvatura de uma vela é usualmente expressa pela razão do arco da seção da vela,  $f$ , pelo comprimento de sua corda principal,  $c$  (Fig.23d):

$$\text{Curvatura} = \frac{f}{c} \quad (9)$$

Com uma certa reserva, podemos combinar os fatores mencionados anteriormente para determinarmos a força resultante na vela através de uma fórmula matemática. A fórmula implica que, se possuímos duas velas com a mesma forma geométrica, submetidas ao mesmo ângulo de incidência do vento aparente, mas com áreas diferentes (isto é, as velas são geometricamente semelhantes),



trabalhando em ventos com diferentes pressões dinâmicas, então as forças desenvolvidas serão proporcionais às suas respectivas áreas e pressões dinâmicas:

$$F = q \times S_A \times C = 0,5836 V_A^2 S_A C \quad (10)$$

Onde  $F$  é a força aerodinâmica em N

$V_A$  é a velocidade aparente do vento em m/s

$S_A$  é a área da vela em  $m^2$

$C$  é o coeficiente aerodinâmico ou fator de forma

O coeficiente aerodinâmico ou fator de forma,  $C$ , pode ser obtido para a força de sustentação  $C_L$ , para a força de arrasto,  $C_D$ , ou para a força total  $C_T$ . Para tal, basta dividirmos os valores adequados pela área da vela multiplicada pela pressão dinâmica:

$$\frac{L, D, F_T}{S_A \cdot 0,5836 V_A^2} = C_L, C_D, C_T \text{ respectivamente} \quad (11)$$

Os valores de  $C$  são também importantes para a comparação do desempenho apresentado por velas geometricamente semelhantes, uma vez que seus valores são adimensionais e estão divididos pela área. Dessa forma, podemos afirmar que velas geometricamente semelhantes, com valores de  $C$  iguais, apresentam o mesmo desempenho.



### 5.9 - Força de Arrasto nas velas

Quando o vento atinge a vela, é desejável que tenhamos a maior força de empuxo possível  $F_R$ , e simultaneamente a menor força de inclinação,  $F_H$ , onde obtemos, dessa forma, a maior velocidade de cruzeiro. Como poderá ser observado das relações trigonométricas, as magnitudes de  $F_R$  e  $F_H$  dependem do ângulo  $\beta$ , entre a linha de direção do curso da embarcação e a linha de incidência do vento aparente, da força de sustentação,  $L$ , e do arrasto,  $D$ .

$$F_R = L \sin \beta - D \cos \beta \quad (12)$$

$$F_H = L \cos \beta + D \sin \beta \quad (13)$$

E para os coeficientes, teremos que:

$$C_R = C_L \sin \beta - C_D \cos \beta \quad (14)$$

$$C_H = C_L \cos \beta + C_D \sin \beta \quad (15)$$

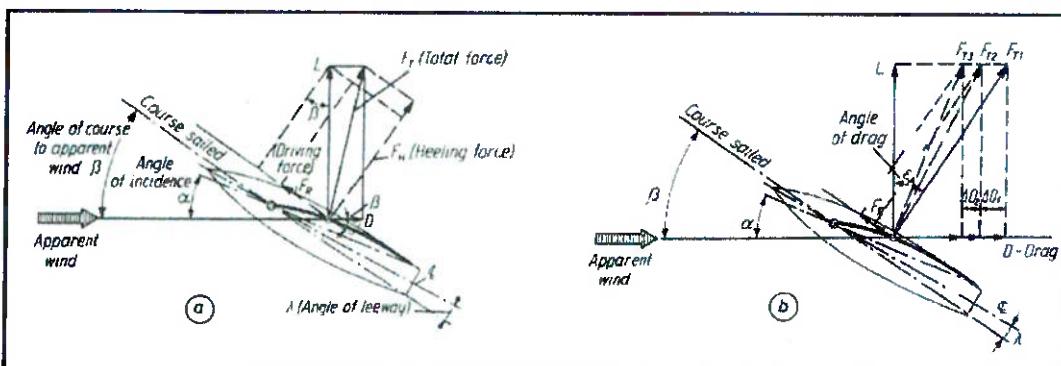


Fig. 24 – Geometria das forças aerodinâmicas para pequeno ângulo de ataque.  
[Ref.8]



A teoria e a prática indicam que a força total de arrasto é composta por três componentes:

1. Arrasto induzido
2. Arrasto de “Superfície” (Atrito)
3. Arrasto de forma ou de pressão

A contribuição individual de cada componente depende do “Aspect Ratio”, do modelo e da forma da vela, dos ângulos de incidência, da velocidade do vento, das propriedades do material da vela etc.

#### **5.9.1 - Arrasto Induzido**

Esta componente de atrito é uma medida da energia do vento que não é utilizada para a produção de empuxo devido ao aparecimento de vórtices atrás da vela.

Toda superfície com a finalidade de geração de força de empuxo, seja em uma asa de avião, vela de barco etc, rotaciona o fluido próximo às suas bordas, em uma espécie de pequeno tornado, denominado vórtices. Estes vórtices são originados a partir do fluxo de ar (ou água), deslocado de uma região de alta pressão aerodinâmica para uma de baixa pressão. Conseqüentemente, a diferença de pressão entre os dois lados do perfil gradativamente se torna menor nas proximidades das extremidades, desaparecendo e sendo substituída nas bordas pelos vórtices.



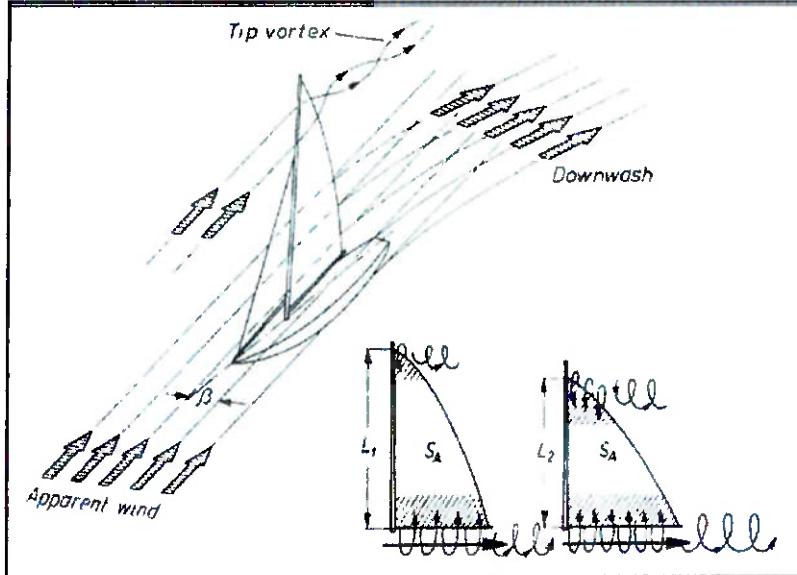
Como estes vórtices serão gerados continuamente e sempre que houver uma diferença de pressão entre os dois lados do perfil, uma quantidade de energia cinética do vento é continuamente dissipada, mas é trilhada atrás do perfil em força de massa rotacional de ar.

É possível provarmos que a intensidade do arrasto induzido pode ser estimado segundo a expressão:

$$D_i = k (L^2) / \pi AR \quad (16)$$

onde  $K$  é uma constante que depende principalmente da geometria da vela.

Fig. 25 – O desenho maior mostra esquematicamente como o fluxo ao redor do topo da vela, movimentado do barlavento para o sotavento, se transforma em um vórtice em espiral e o mecanismo do Downwash. [Ref.8]



É relativamente fácil entender como o "Aspect Ratio", juntamente com a geometria da vela, determinam a magnitude deste tipo de arrasto. Quanto maior o "Aspect Ratio", menor a perda de pressão nas



regiões superior e inferior da vela, em comparação com o resto da área da vela.

### ***5.9.2 - Arrasto de Superfície (Atrito)***

O ar possui uma certa viscosidade. Apesar de relativamente pequena a componente da força de atrito causado pela viscosidade do ar, seu efeito ao longo da vela não é insignificante. Quando um fluido escoa através de uma vela ou qualquer outro perfil semelhante, as partículas imediatamente adjacentes à superfície são trazidas ao descanso. Estas partículas, muito próximas à superfície, não continuam com o fluxo de fluido principal, mas são estacionadas junto à superfície, e, subseqüentemente, exercem uma ação de frenagem nas suas vizinhas imediatas, que também têm suas velocidades reduzidas. Este fenômeno, em cadeia, reduz a velocidade da próxima camada de partículas, e este processo é repetido até que, em uma certa distância da superfície, o fluxo de ar não é mais afetado. A região onde o fenômeno descrito é importante, entre a superfície e o fluxo principal de ar, é conhecida como camada limite, CL.

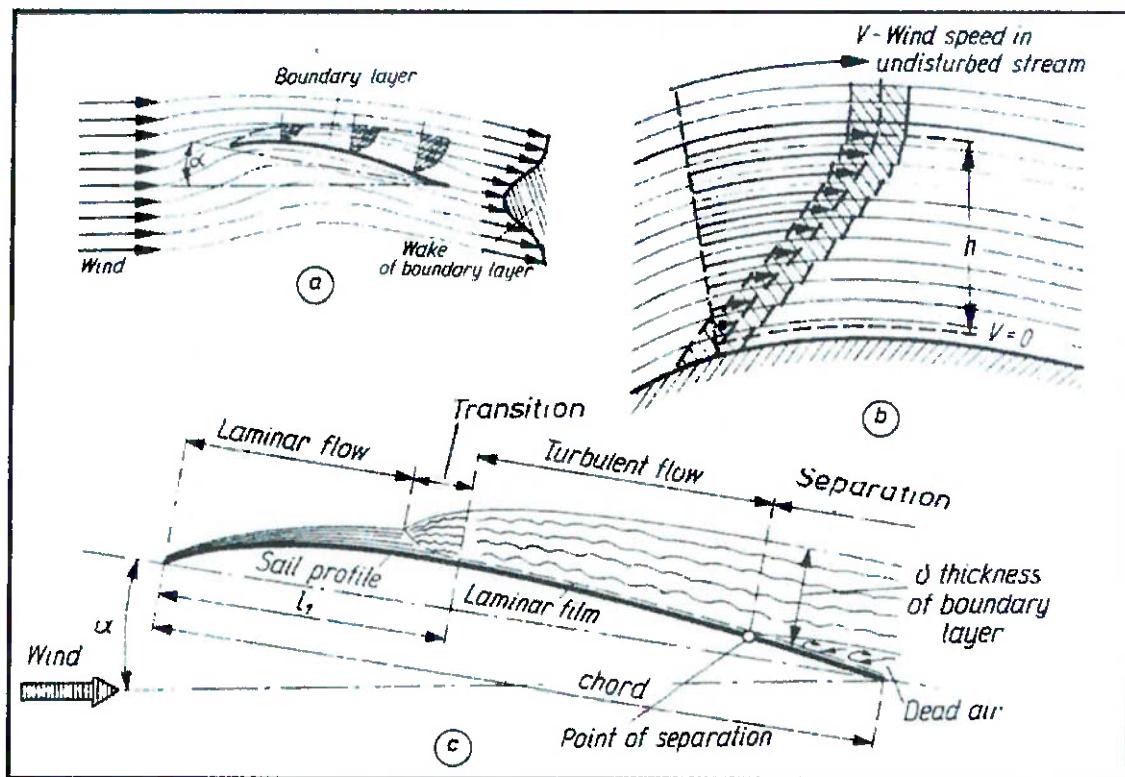


Fig. 26 – Ilustração da Camada limite ocorrendo no sotavento de uma vela.

- Como as partículas de ar são frenadas na camada limite devido a ação da viscosidade, elas perdem energia cinética. Esta perda está indicada na área hachurada - conhecida como 'esteira de camada limite' que pode ser medida atrás da borda frontal da vela.
- Representação da parte laminar da camada limite com espessura  $h$ . Cada camada desliza sobre a próxima (sem mistura), com aumento de velocidade, a partir do zero.
- Representação do comportamento da camada limite ao longo do sotavento de uma vela. [Ref.8]

É possível identificarmos na figura acima uma região de escoamento laminar, outra de regime turbulento, e uma região de transição entre elas.



É sabido que a camada limite laminar, por ser mais estreita, absorve menos energia do fluxo externo que a camada limite turbulenta, mais grossa. Dessa forma, a força de arrasto é menor em camadas limites laminares do que em turbulentas.

O arrasto de superfície depende principalmente da velocidade do escoamento externo, representado pelo número de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{\rho V_A L}{\mu} \quad (17)$$

Onde

$V_A$  = Velocidade do escoamento

$L$  = Largura da vela

$\mu$  = Coeficiente de viscosidade dinâmica

O arrasto de superfície depende também da rugosidade da superfície ao longo do qual ocorre o escoamento. Dessa forma, para o cálculo do arrasto de superfície, utilizamos um coeficiente que depende do tipo de escoamento e do número de Reynolds, conforme a Fig. 27.

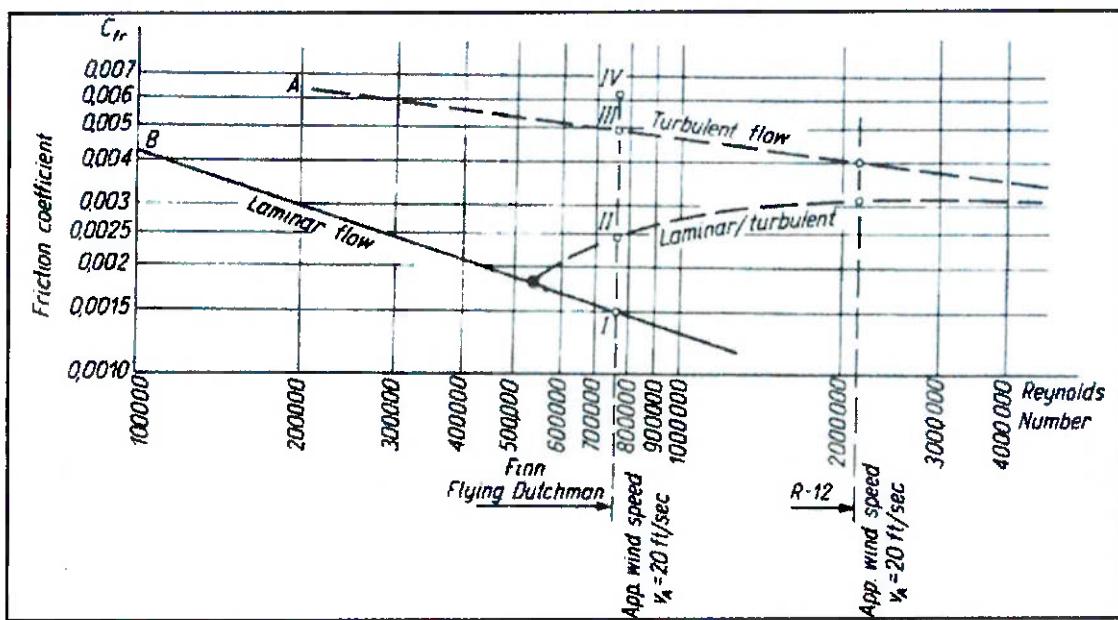


Fig. 27 – Coeficientes de Arrasto de Superfície aproximados,  $C_{fr}$ , para placas planas, em função do número de Reynolds. Estes coeficientes podem ser utilizados para uma estimativa do arrasto de superfície que ocorre em superfícies aerofólicas operando no ar e na água. [Ref.8]

A rugosidade na parte frontal do aerofólio pode causar uma transição prematura de regime laminar para turbulento. Porém, quando o valor de Reynolds está abaixo de um certo valor, as irregularidades da superfície não provocam um aumento da turbulência no escoamento principal: a subcamada laminar pode simplesmente ultrapassar a altura das imperfeições da superfície. Entretanto, com o aumento do  $Re$ , a subcamada laminar se torna cada vez mais fina, fazendo com que as maiores irregularidades da superfície ultrapassem a espessura da camada limite, começando a influenciar as características do escoamento principal.

A espessura da camada limite ( $K_{adm}$ ) pode ser aproximada como sendo :



Regime Laminar:  $K_{\text{adm}} = 5,0 \cdot x / Re_x^{1/2}$  (18)

Regime Turbulento:  $K_{\text{adm}} = 0,37 \cdot x / Re_x^{0,2}$  (19)

Onde,  $x$  – abscissa ao longo da vela, a partir do bordo de ataque

$Re_x$  – Número de Reynolds calculado no ponto  $x$ .

O Coeficiente de atrito médio ( $C_D$ ) pode ser representado pelas expressões:

Regime Laminar:  $C_{DL} = 1.328 / Re_x^{1/2}$  (20)

Regime Turbulento:  $C_{DT} = 0.074 / Re_x^{0,2}$  (21)

Dessa forma, o arrasto de superfície para superfícies planas onde há camada limite laminar e turbulenta pode ser aproximado como sendo:

$$D = \rho \cdot V^2 \cdot b [ C_{DL} \cdot x_1 + C_{DT} \cdot x_2 - C_{DL} \cdot x_2 ] \quad (22)$$

Onde,  $\rho$  - Densidade de fluido

$V$  – velocidade do escoamento

$b$  – altura da vela

$C_{DL}$  e  $C_{DT}$  – Coeficientes de arrasto laminar e turbulento respectivamente

$x_1$  e  $x_2$  – comprimentos da vela onde verificamos escoamento laminar e turbulento respectivamente.



### **5.9.3 Arrasto de forma**

O arrasto de forma é consequência da separação do escoamento em algum ponto do perfil de vela ou de um corpo qualquer imerso em um fluxo de ar. Isto é conhecido como uma componente da força de arrasto porque depende da forma do objeto e influencia o escoamento logo atrás do corpo.

Nas embarcações à vela, em particular, grande parte dessa componente de arrasto é causado pelo mastro, que influencia o escoamento normal do ar que incide sobre a vela, conforme já explicitado em seções anteriores. Dessa forma, um posicionamento adequado do mastro pode reduzir muito esta componente da força de arrasto.

Não há uma fórmula exata para o cálculo desta componente de atrito. Resultados experimentais ajudam em muito na estimativa da ordem de grandeza desta componente.



#### **5.9.4 - Arrasto aerodinâmico adicional**

Na nossa consideração do arrasto aerodinâmico da vela, e o modo com que ela afeta a intensidade e a direção da força aerodinâmica resultante, não incluímos as forças de arrasto geradas pelo vento quando em contato com o casco, tripulação etc. A influência desses na resultante das forças  $F_T$  pode ser considerável, e não pode ser ignorada na estimativa de performance de uma embarcação.

Dessa forma, a área total que está acima da linha d'água e que está exposta à ação do vento pode ser dividida em duas partes:

1. Área efetiva da vela –  $S_A$
2. Área Parasita  $S_p$ , que inclue tudo exceto a área da vela,  $S_A$ .

O efeito desse arrasto adicional irá depender da razão entre as áreas  $S_p$  e  $S_A$ , e do ângulo entre o curso de navegação e a direção do vento incidente. Quando velejamos a favor do vento, esta componente de arrasto irá agir a favor do movimento, sendo, dessa forma, benéfico à força de empuxo total. Entretanto, quando a embarcação está navegando na mesma direção que o vento, esta componente de arrasto agirá contrário à direção do movimento, fazendo com que a velocidade da embarcação seja diminuída.

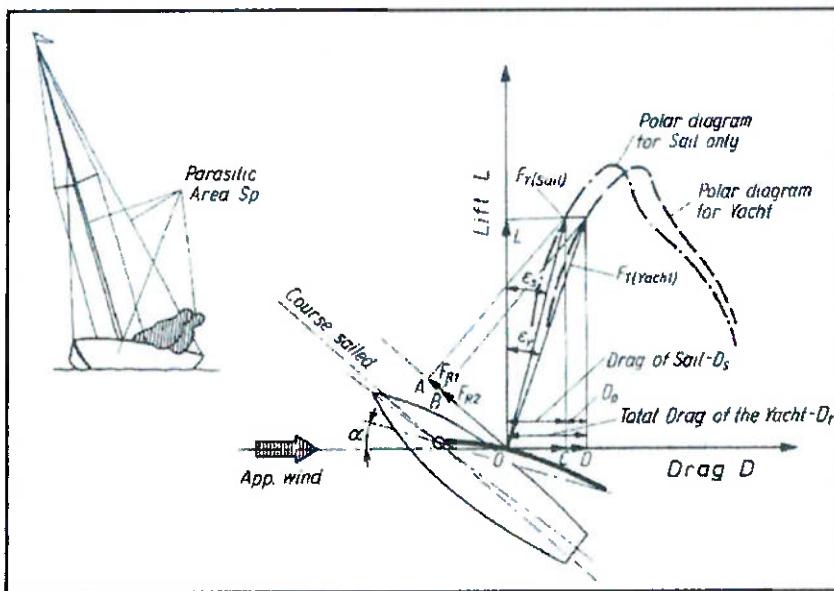


Fig. 28 – Efeito aproximado do arrasto em corpos ‘parasitas’ nas características aerodinâmicas da combinação entre a vela e o casco.  
[Ref.8]

Assim como para a componente de arrasto de forma, não há uma fórmula pronta para o cálculo do arrasto gerado pelas áreas parasitas. Novamente, experiências práticas auxiliam os projetistas no conhecimento da ordem de grandeza deste arrasto adicional.

### 5.10 – Centro de Aplicação da forças -CE

Quando discutimos que as succões e as pressões são distribuídas de uma forma muito complicada no sotavento e barlavento da vela, nós achamos conveniente assumir que seus efeitos poderiam ser representados com uma força simples global,  $F_T$ , atuando ao longo de uma linha particular. O ponto nesta linha onde a força é aplicada é conhecido como centro de esforços, CE.

O método tradicional para determinarmos a posição do CE é dado pelas Fig. 29a e b. Primeiramente determinamos o centro geométrico das áreas de cada uma das velas individualmente ( $CE_F$  e



$CE_M$  para a genoa e vela principal respectivamente, Fig 29a). Então, uma linha unindo estes dois pontos é dividida em duas partes, por uma construção geométrica simples, em proporção à área de cada vela. Então, um CE comum é encontrado, sendo mais próximo à vela de maior área. Na fig. 29b, os comprimentos  $CE_F$ -A e  $CE_M$ -B formam desenhados em escala, representando as áreas das vela principal e a genoa respectivamente. A linha AB que corta  $CE_F$  –  $CE_M$  é o CE.

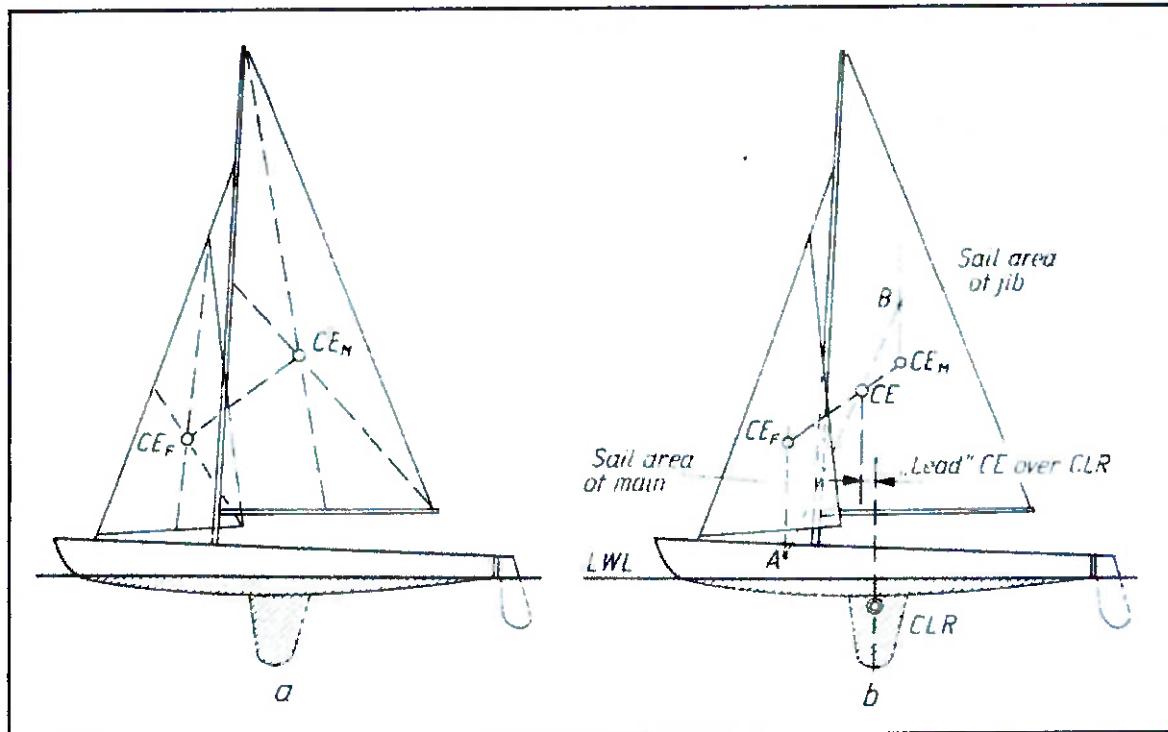


Fig. 29 – Método Tradicional para o estabelecimento da posição do centro de esforços, CE. [Ref.8]



### **5.10.1 - O centro de esforços e sua relação com o balanço direcional do barco**

O método tradicional para a determinação geométrica do CE nos dão um ponto que, na verdade, não corresponde à posição real do centro de pressões. Entretanto, ele nos fornece um certo valor prático para que os projetistas avaliem o balanço direcional do projeto. Na realidade, o CE verdadeiro muda sua posição em um limite grande de posições, e, para a maioria dos casos, ele está a frente do CE geométrico.

Os efeitos decorridos do posicionamento errado do CE das forças aerodinâmicas são compensados por erros similares na determinação do centro de resistência lateral, CLR, que também varia constantemente. O CLR é determinado como sendo o centro da área submersa do casco, quando este último é visto lateralmente, e, algumas vezes inclui o leme, outras não. A Fig. 29b mostra o posicionamento do CLR.

O método para encontrarmos o CE e o CLR (mostrado na Fig. 29) nos permite uma avaliação aproximada do equilíbrio direcional da embarcação que deve ser feito. O equilíbrio é encontrado quando a força aerodinâmica total,  $F_T$ , e a força hidrodinâmica total,  $R_T$ , atua ao longo da mesma linha. Se estas duas forças não atuarem sobre a mesma linha de ação, mas separadas por alguma distância 'a' conhecida como 'braço de desequilíbrio', então alguma compensação utilizando o leme será necessário para manter um curso estacionário. O valor de 'a' determina quão equilibrado é a embarcação. Uma embarcação que não é bem equilibrada tem maiores chances de serem lentas, uma vez que necessitam de constante atuação do leme,



o que resulta em maiores resistências, dificultando a navegação da embarcação.

#### ***5.10.2 - Movimentação do centro de esforços real.***

O CE real varia com o ângulo de incidência de vento aparente,  $\alpha$ . Para pequenos ângulos  $\alpha$ , o CE real situa-se próximo a borda de ataque da vela e, quando  $\alpha$  é aumentado para  $90^\circ$ , o CE se direciona para o centro da área da vela, ou seja, na direção do CE geométrico.

A Fig. 30 demonstra o fenômeno para uma seção de vela com  $AR = 5$  e  $1/10$  de curvatura. Por conveniência, a posição do CE real é dada como uma porcentagem do comprimento da corda principal,  $c$ , medida a partir da borda de ataque da vela. É fácil entender o porquê deste procedimento. Para pequenos ângulos de incidência, a distribuição de pressão na vela é caracterizada por uma grande sucção próximo do "luff", no sotavento, e a resultante de forças total,  $F_T$ , tem sentido a favor do curso. Quando o ângulo de incidência aumenta e a vela 'stola', as distribuições de pressão e sucção se tornam mais uniformes e a resultante de forças total tende a agir próxima ao centro das áreas.

O gráfico da Fig. 30 nos mostra dois casos específicos, forças  $F_{T15}$  e  $F_{T90}$  para ângulos de incidência de  $15^\circ$  e  $90^\circ$  respectivamente. Quando o ângulo de incidência é de  $15^\circ$ , o CE verdadeiro é cerca de 35% da corda da vela e o ponto de intersecção entre a linha de ação de  $F_T$  e a linha de centro da embarcação está ligeiramente afastado. Quando o vento aparente aumenta o seu ângulo de incidência, o ponto



de intersecção varia rapidamente até que  $F_T$  não mais intercepta a linha de centro do casco.

A posição de CE real depende da curvatura da vela. Isto quer dizer que, como o deslocamento do CE real é expresso em termos da corda da vela, velas com baixos AR, e consequentemente com uma grande comprimento de corda, irá experimentar uma variação na posição do CE maior do que naquelas com altos AR.

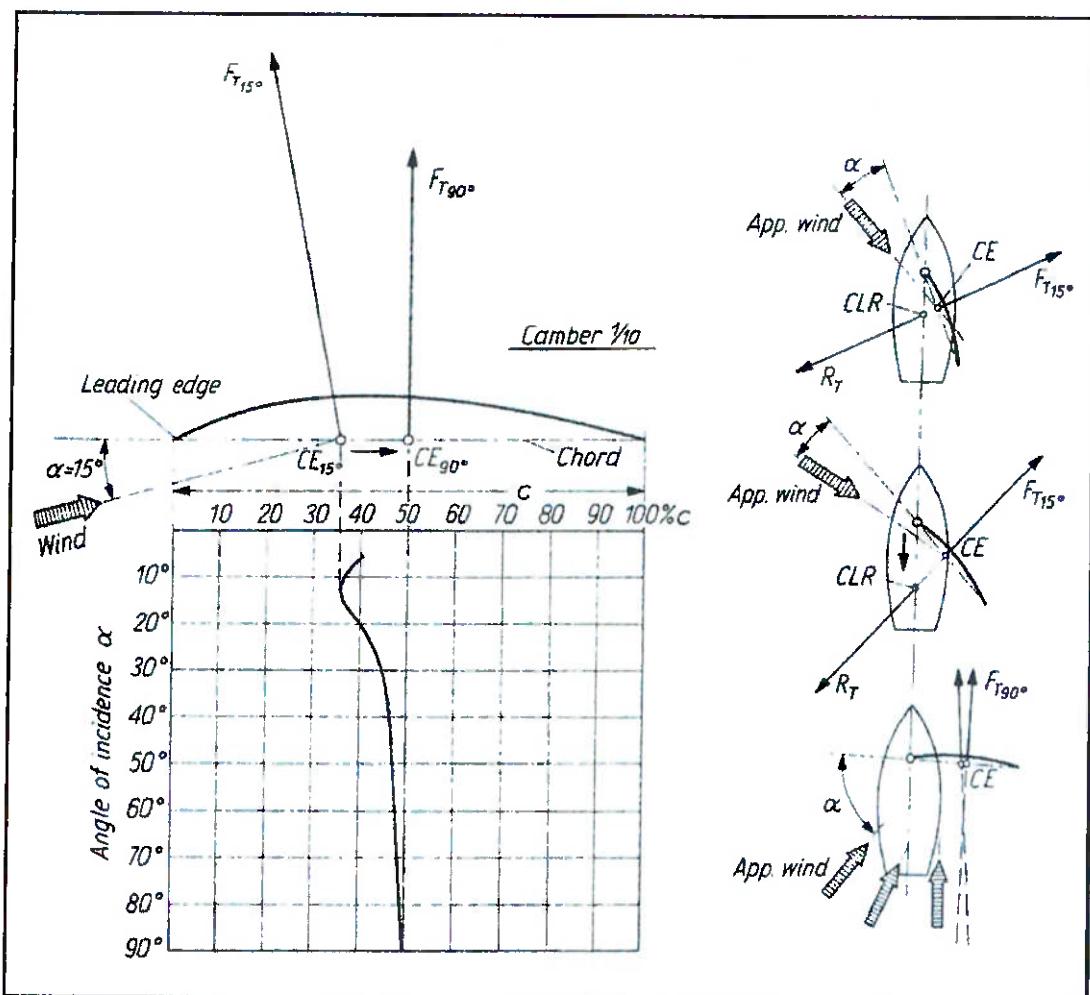


Fig. 30 – Movimentação do CE ao longo da curvatura de uma seção de uma vela com curvatura de 1/10, em função do ângulo de incidência. [Ref.8]



## 6. LIMITAÇÕES

As principais limitações do projeto estão relacionadas com o número de perfis de vela que utilizamos no nosso estudo e com a variedade de direções de incidência do vento.

Quanto ao número de diferentes condições de vento, foram simuladas 5 condições climáticas diferentes para o mesmo perfil de vela.

## 7. SIMPLIFICAÇÕES

Antes de se iniciar as simulações, foi selecionado um modelo de embarcação oceânica para ser utilizado em todas as simulações. As características da embarcação escolhida estão apresentadas em seção posterior deste relatório.

Os perfis de vela desta embarcação foram desenvolvidas para apresentar a configuração ótima segundo os seus projetistas. Estão no formato que estariam durante uma regata.

Também não foram considerados nenhum dos movimentos ascendentes e descendentes da embarcação nem o “rolling” e “pitching”, movimentos estes devidos às ondas do oceano e as correntes marítimas.

Os ventos foram considerados de intensidade constante, ou seja, foram desprezadas as influências de rajadas de vento laterais, devido ao turbilhamento do vento, e o gradiente de velocidades ao



longo das seções (cotas) da vela. Dessa forma, consideramos as simulações realizadas em mar aberto, com ventos constantes, sem presença de ondas, correntes marítimas e outros fatores externos.

Foram ainda adotadas como simplificações:

- Baixa rugosidade da vela
- Desconsiderado a influência do perfil do mastro
- Desconsiderado a influência do casco da embarcação e sua tripulação
- Inexistência de atrito entre o mar e o vento
- A embarcação está velejando com o mastro reto, ou seja, sem inclinação (heeling )



## 8. METODOLOGIA

O projeto se baseou em um estudo qualitativo objetivando a determinação do melhor ângulo de incidência do vento nas velas objeto deste trabalho proporcionando melhor rendimento na embarcação em uma determinada condição climática, e não na obtenção de valores numéricos. Ou seja, não era escopo deste projeto a mensuração, por exemplo, da velocidade que a embarcação poderia atingir com a utilização de um determinado perfil de vela.

### 8.1 – Desenvolvimento no AutoCAD

Os fabricantes forneceram desenhos dos perfis de vela que continham as bordas e algumas linhas representando o formato das superfícies nos perfis. Para a obtenção das malhas computacionais, foi necessário transformar as linhas das bordas das velas em sólidos. Para isso, utilizou-se o software AutoCAD da seguinte forma:

1. Com as linhas de contorno, foram criadas inúmeras faces como se a superfície das velas fosse um grande mosaico;
2. Uniu-se as faces de forma a obter-se uma única superfície;
3. A partir da superfície, estruturou-se com uma altura igual à espessura da vela e criou-se, dessa forma, um sólido que pudesse ser reconhecido no Gambit como uma estrutura 3D.

As ilustrações a seguir ilustram a metodologia apresentada.

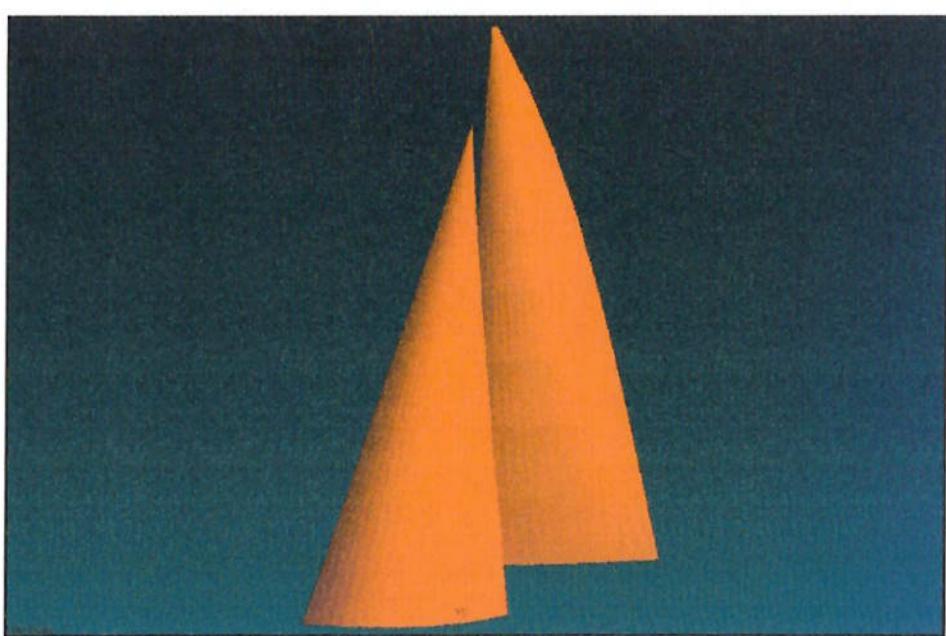
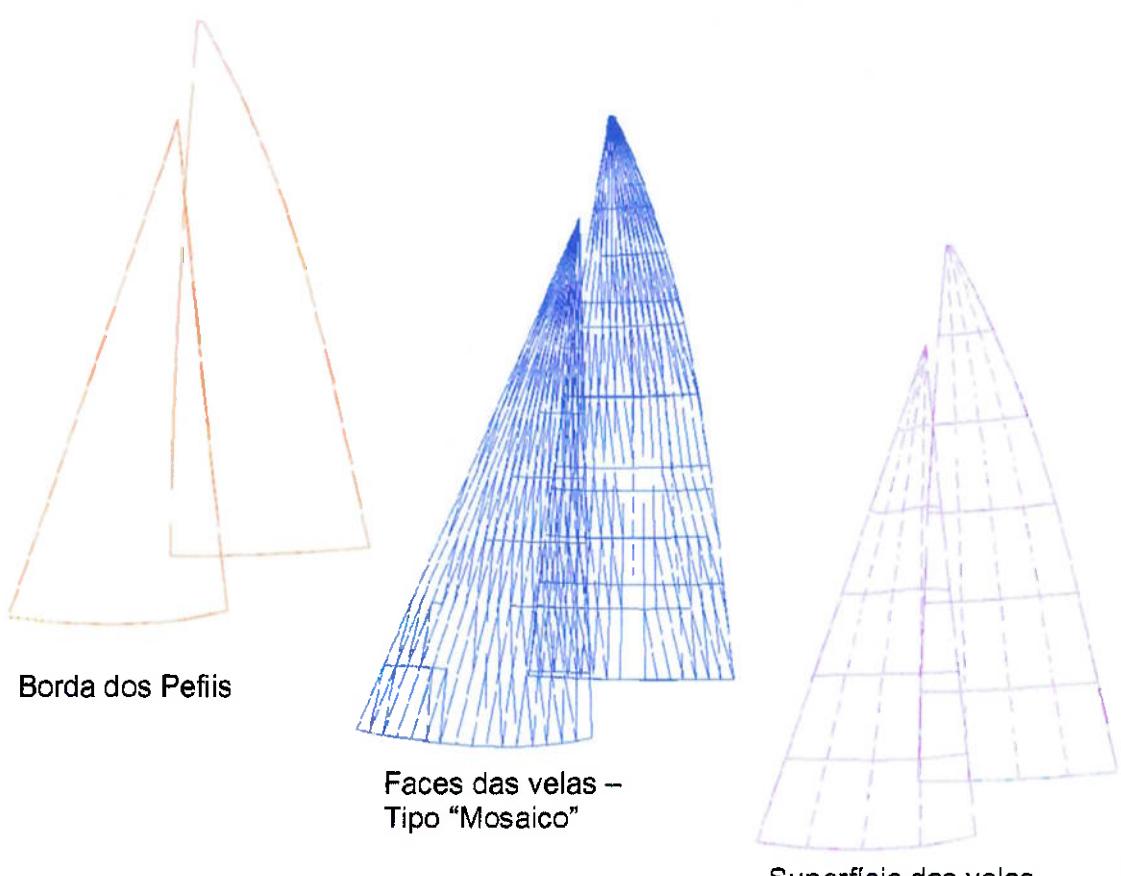


Fig. 31 – Desenvolvimento do modelo 3D do conjunto vela principal / genoa utilizado nas simulações. (vela principal a direita e genoa a esquerda).



Com o modelo da vela pronto em formato CAD, exportou-se em “ACIS”, no formato “.SAT”, que pode ser reconhecido pelo Gambit.

## 8.2 – Obtenção da Malha Computacional

Para o desenvolvimento da malha, criou-se um grande cubo ao redor da vela que seria simulada para a obtenção do volume de controle.

As dimensões deste cubo variaram de acordo com as condições de incidência de vento, de forma a possibilitar a verificação de todas as perturbações no escoamento durante as simulações, sem que a malha se tornasse maior que o necessário, o que acarretaria maiores tempo de processamento. As dimensões podem ser verificadas na tabela abaixo.

Tabela 1 – Dimensões dos Volumes de Controle

Ângulo do Vento (em graus)	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)
15	60	50	25
20	55	50	25
25	65	65	25
30	70	65	25
35	50	50	25
40	50	50	25



Tanto no Gambit, quanto no Fluent, o eixo de coordenadas estava posicionado na base do 'mastro virtual' com o 'casco virtual', de forma que o eixo das abscissas (X) estivesse sobreposto à linha longitudinal central da embarcação (sentido proa - popa). O eixo Y representava a altura (sentido positivo ascendente), enquanto o eixo Z representava a largura do barco, com valores positivos à esquerda, conforme figura a seguir.

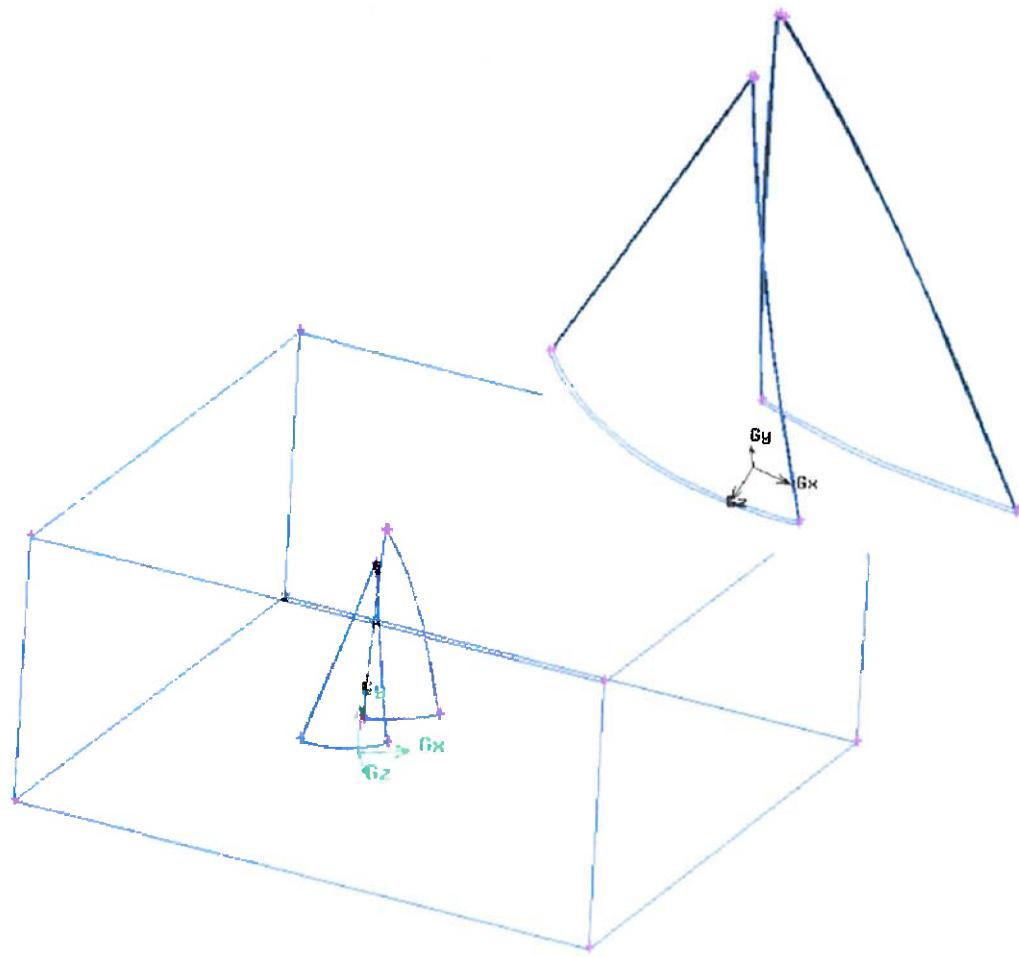


Fig. 32 – Ilustração dos perfis de vela dentro do volume de controle e dos eixos de coordenadas.

É importante ressaltar que o perfil de vela era mantido sempre fixo em relação ao eixo de coordenadas, e os cubos dos volumes de



controle eram girados em torno do eixo Y para a simulação da variação do ângulo de incidência do vento nas velas. Assim, foi utilizado no Fluent o recurso do vento entrar no volume de controle normal a face de entrada.

De posse dos volumes da vela e do cubo (volume de controle), subtraiu-se o primeiro deste último, resultando, assim, em um único volume onde seria criada a malha.

O modelo da malha criada tinha as seguintes características:

- Formato: tetagonal
- Distancia entre as células:

Com a malha pronta, contabilizou-se os totais de nós, faces e células mostrados pela tabela abaixo.

Tabela 2 – Números das Malhas

Ângulo do Vento (em graus)	Nós	Faces	Células
15	136.662	1.545.342	763.244
20	112.820	1.269.235	627.768
25	155.316	1.751.798	868.984
30	185.437	2.108.386	1.041.095
35	170.468	1.920.644	955.912
40	125.175	1.407.676	697.681

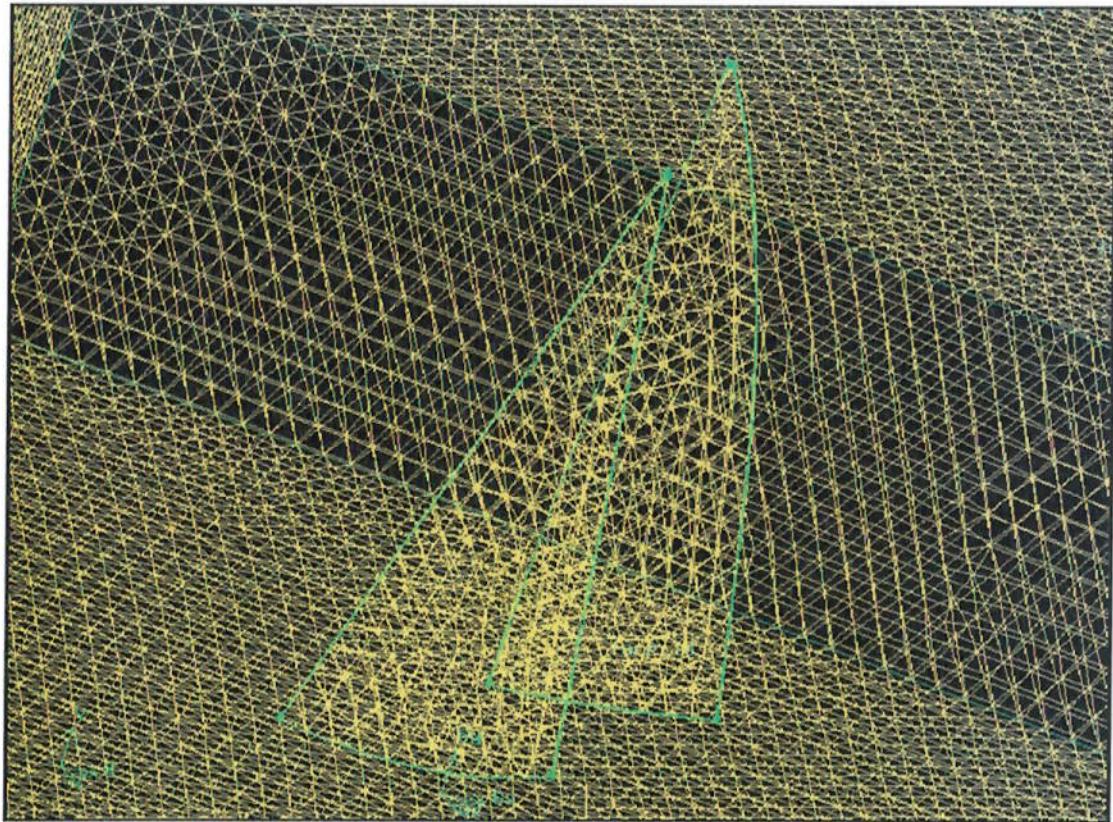


Fig. 33 - Ilustração de uma das malhas computacionais desenvolvidas no Gambit.

### **8.2.1 – Condições de Contorno (“Zones ou Boundary Conditions”)**

As condições de contorno adotadas para as faces dos volumes de controle foram as mesmas em todos os modelos simulados. As configurações descritas a seguir foram as que proporcionam os melhores resultados, após uma série de tentativas com diferentes configurações.



- **Face 18 - Entrada** – Face de entrada do escoamento, definida como “VELOCITY-INLET”. As condições de entrada do escoamento eram constantes, ou seja, as simulações foram realizadas considerando-se sempre regime permanente do fluido e fluxo de ar normal a esta face.
- **Face 2 – Velas** – Face representando as velas definida como “WALL”.
- **Face 16 – Mar** – Face representando o mar definida como “SYMMETRY”.
- **Faces 13 e 27 - Lados** – Faces representando as áreas laterais à vela. Foi considerado que nas extremidades da malha não há mais interferência no escoamento do ar devido às velas. Assim, estas faces foram definidas como “SYMMETRY”.
- **Face 14 - Céu** – Face superior do volume de controle representando o céu. Face também definida como “SYMMETRY”.

**Face 23 - Saída** – Face de saída do escoamento, definida como “OUTFLOW”.

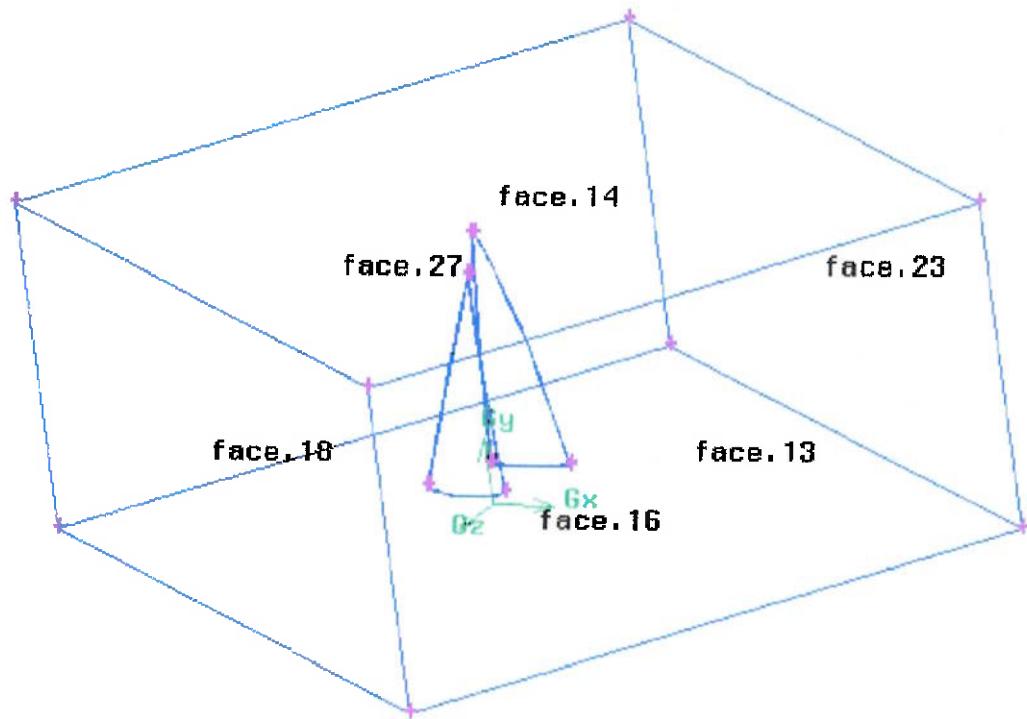


Fig. 34 – Número das faces do Volume de Controle.

Finalizada a malha computacional e as condições de contorno no Gambit, exportou-se o arquivo em ".MSH" para o Fluent 5.0.

### 8.3 – Simulações no Fluent

As condições em que foram realizadas as simulações foram mantidas constantes para cada malha simulada. Estas condições estão demonstradas abaixo.

#### 8.3.1 – Características das Soluções

Utilizou-se as características “padrão” do fluent para a configuração das soluções. São elas:



- Tipo de solução: segregada, 3D
- Formulação: implícita
- Regime: permanente
- Velocidade de formulação: absoluta

### **8.3.2 – *Modelo de Viscosidade***

Para simplificar as simulações e agilizar o processamento no computador, utilizamos o modelo de turbulência mais simples possível, conhecido como K-epsilon. Apesar de simplista, este modelo de turbulência atendeu de forma muito satisfatória as necessidades deste trabalho, já que o trabalho objetivava resultados qualitativos.

As propriedades de viscosidade utilizadas estão apresentadas a seguir.

- K-epsilon de duas equações (standard)
- $C_{mu}$ : 0.09
- $C_1$  – epsilon: 1.44
- $C_2$  – epsilon: 1.92
- Número de Prandtl TKE: 1
- Número de Prandtl TDR: 1.3
- Pressão atmosférica: 101.325 Pa



### 8.3.3 – *Constantes*

- Energia de Turbulência cinemática :  $10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}^2$
- Proporção de Dissipação de Turbulência:  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$

### 8.3.4 - *Fatores de Sub-relaxação*

- Pressão: 0.7
- Densidade: 1
- Forças no Corpo: 1
- Momento: 0.7
- Energia de Turb. Cinemática: 0.8
- Prop. Dissip. Turbulência: 0.8
- Viscosidade: 1
- Turbulência: 1

### 8.3.5 - *Quanto a discretização*

- Pressão: standard
- Pressão x velocidade: Simplec



- Momento: Upwind de 1 ordem
- Energia de Turb. Cinemática: Upwind de 1 ordem
- Prop. Dissip. Turbulência: Upwind de 1 ordem

### ***8.3.6 Propriedades do Ar***

Todas as simulações foram realizadas com as propriedades do ar mantidas nas seguintes condições:

- Temperatura: 25 °C
- Pressão Atmosférica: 760 mmHg (nível do mar)
- Densidade do ar: 1,255 Kg / m<sup>3</sup>
- Viscosidade do ar: 1,789 10<sup>-5</sup> N s / m<sup>2</sup>
- Umidade ( \* ): Não se aplica

( \* ) Não será considerada a umidade do ar, já que esta simplificação não terá influência no estudo qualitativo do desempenho das velas.



## 9. ESCOLHA DA EMBARCAÇÃO

As velas simuladas foram projetadas para a embarcação San Gregório, de origem argentina, modelo Soto 45, projetado pelo argentino Javier Soto Acebal e fabricado no estaleiro E.Anzola. Este é um veleiro de 45 pés, de custo aproximado de US\$ 300 mil. Algumas de suas características estão demonstradas abaixo:

- Comprimento do casco: 13.730 mm
- Comprimento da linha d'água: 11.650 mm
- Boca (largura): 3.929 mm
- Calado: 2.800 mm
- Peso (aproximado): 7.600 Kg
- Área da vela principal (mestra): 69 m<sup>2</sup>
- Área da vela de Proa (genoa): 58 m<sup>2</sup>
- Área da vela balão: 144 m<sup>2</sup>
- Tripulação: 11 pessoas
- Leme e Mastro: fibra de carbono
- Quilha: fixa

Demais características podem ser encontradas no Anexo A, "Certificado de Rating IMS" (neste anexo, estão apresentadas também



as velocidades máximas de projeto para a embarcação em questão para diferentes condições de vento.)

A seguir, seguem algumas ilustrações da embarcação.



Fig. 35- Casco do Soto 45. [Ref.10]



Fig. 36 – Ilustrações da embarcação San Gregório em regata. [Ref.10]

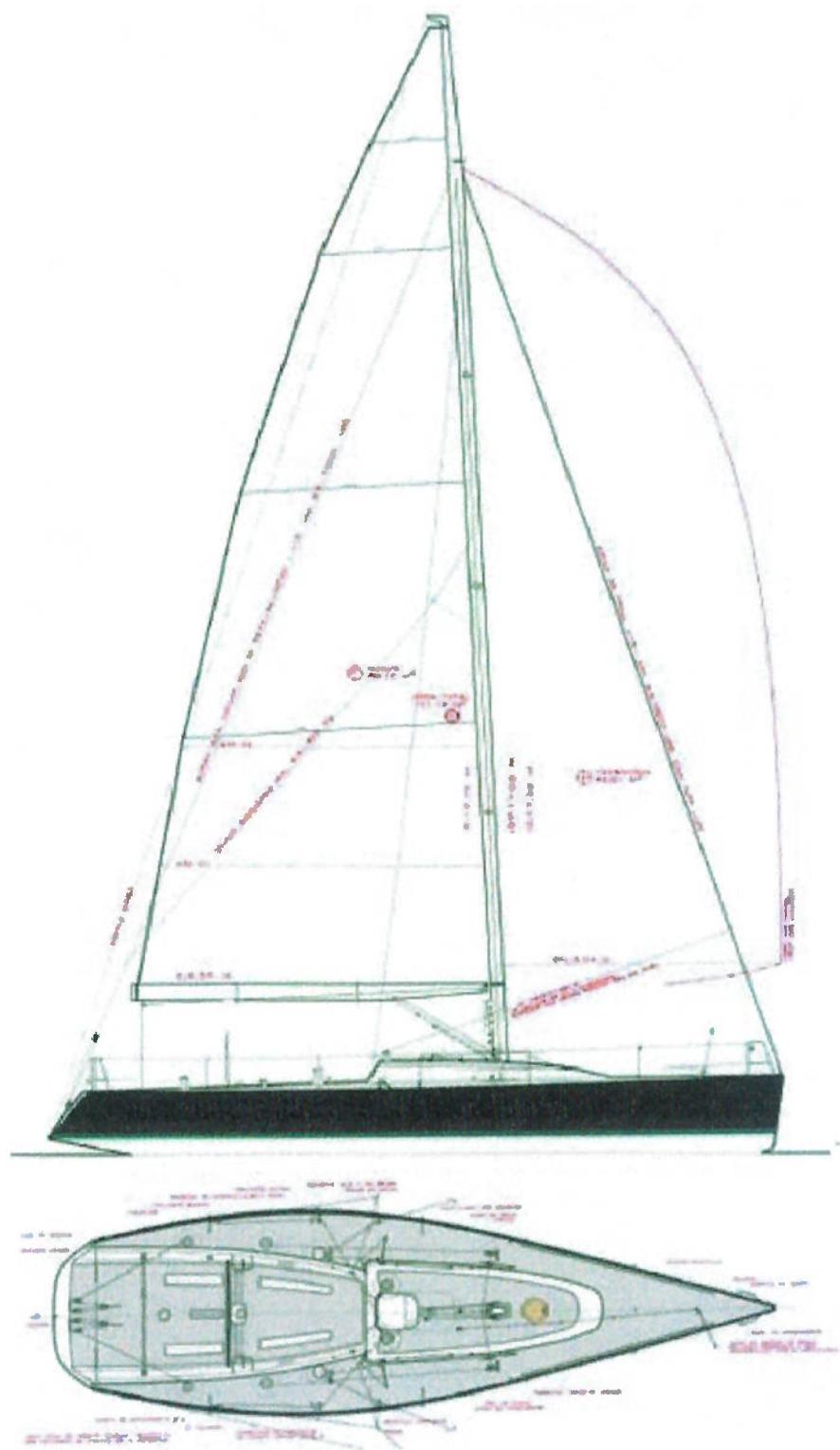


Fig. 37 – Desenho de elevação e planta do barco. [Ref.10]



## 10. DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE VENTO

As condições ambientais que foram simuladas em computador atendem as condições de melhor performance da embarcação selecionada para este conjunto de velas. Assim, as características dos ventos eram:

- Velocidade do vento: 18 nós ( 33,3 km / h - constante )
- Angulação ( $\beta$ ): 15 a 40 ° (em relação à vela)

As simulações foram realizadas da seguinte maneira: manteve-se constante a velocidade do vento e variou-se a sua direção de incidência em relação à vela de forma a percorrer toda a faixa de ângulos pré selecionados. Dessa forma, foram realizadas 6 simulações com ângulos de incidência dos ventos iguais a 15, 20, 25, 30, 35 e 40°.



## 11. DETERMINAÇÃO DOS ÂNGULOS DA VELA

Nas simulações, considerou-se que a embarcação navegava sempre em determinado ângulo em oposição ao vento. Dessa forma, para determinarmos o ângulo de inclinação da vela em relação a linha central do casco para a simulação de diversos ângulos de navegação, utilizou-se as construções geométricas descritas no resumo teórico para a determinação da intensidade e direção do vento aparente.

Para a exemplificação da metodologia utilizada, tomemos como exemplo uma das simulações realizadas onde a embarcação navegava a 8 knots sob ângulo de ataque de  $30^\circ$  ( $\gamma = 30^\circ$ ), sob vento de intensidade de 18 knots. O ângulo da vela deve ser o mesmo ao apresentado pelo vento aparente, no caso  $\beta = 20,1^\circ$ . A figura a seguir ajuda no entendimento do procedimento.

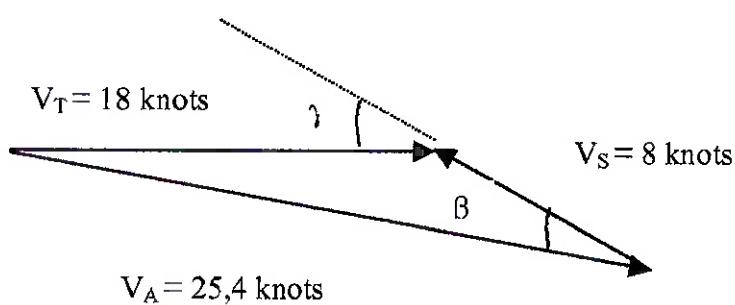


Fig.38 – Determinação do ângulo de posicionamento da vela para simulação.

Todas os demais ângulos de inclinação da vela foram obtidos da mesma maneira, variando-se o ângulo de navegação ( $\gamma$ ) e encontrando-se o novo ângulo  $\beta$  para a vela.



## 12. RESULTADOS OBTIDOS

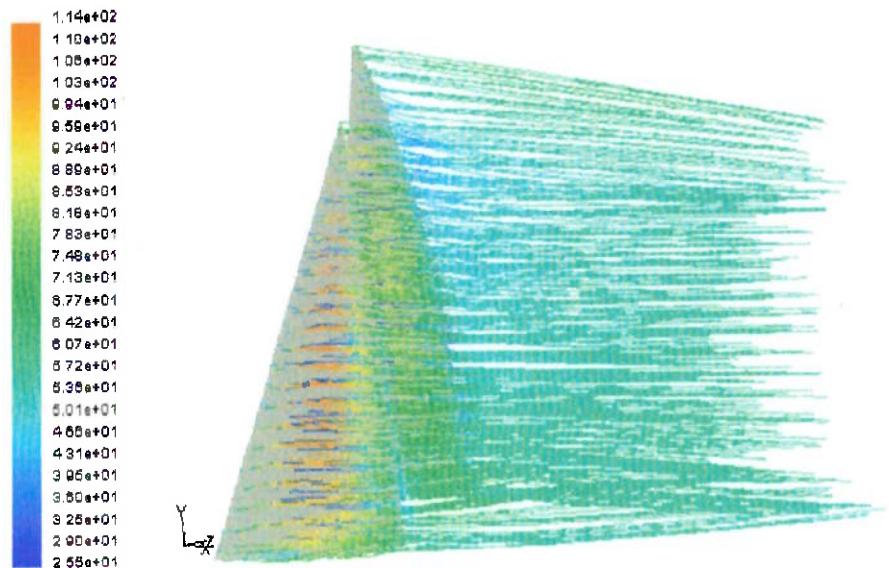
A partir de agora, serão apresentados os resultados obtidos com as simulações dos perfis de vela no Fluent. Como já explicitado anteriormente, foram utilizadas 6 condições de vento diferentes. Os resultados apresentados aqui estão segregados por seção, onde cada uma delas representa uma condição de vento estudada.

Para cada uma das seções, serão apresentadas fotos ilustrativas obtidas a partir do software, demonstrando as características do escoamento após sua incidência na vela, como gráficos de gradiente de pressão estática e dinâmica, gradientes de velocidades e linhas de corrente a partir das velas.

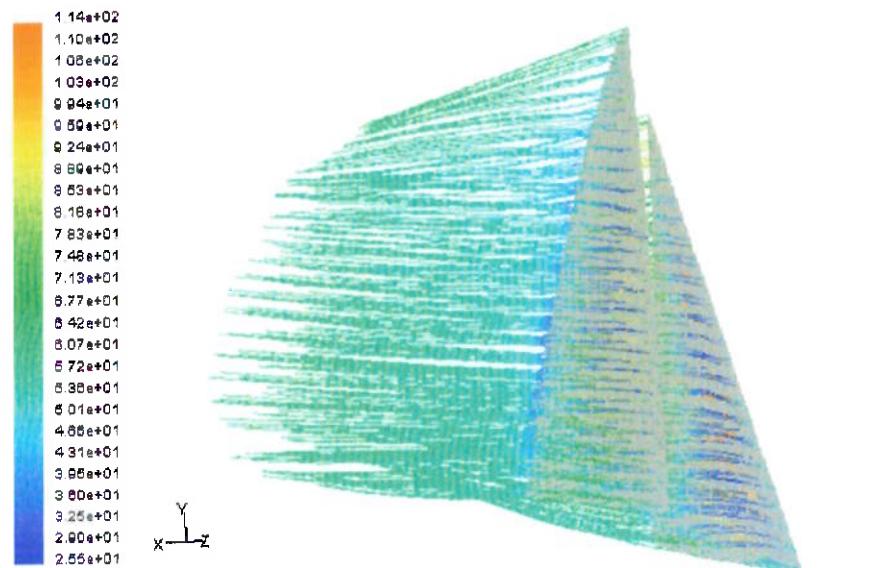


## SIMULAÇÃO 1 – VENTO À 15 GRAUS EM RELAÇÃO À VELA

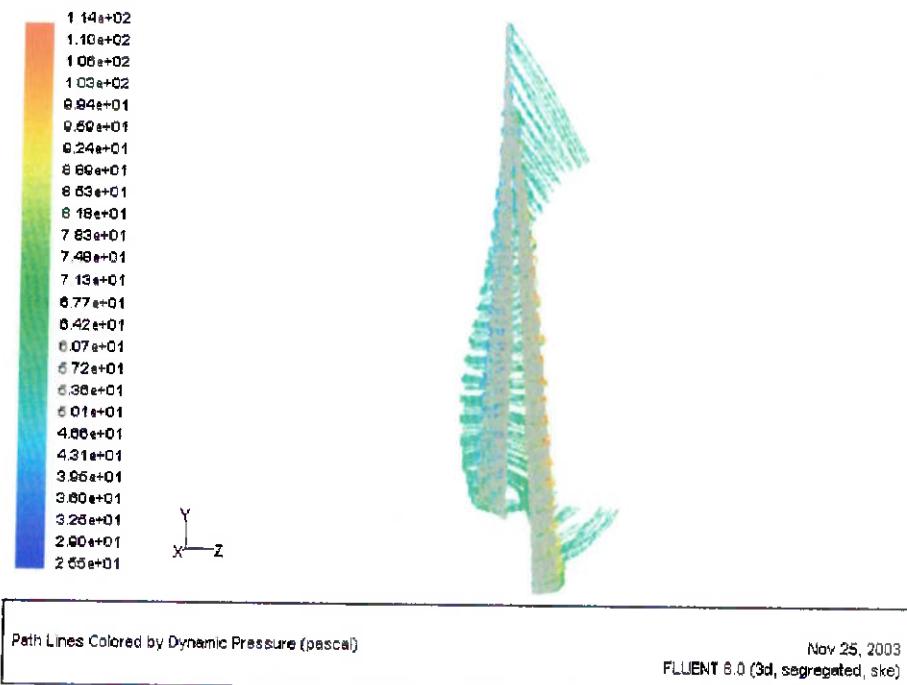
Linhas de escoamento coloridas pelo gradiente de pressão dinâmica.



Path Lines Colored by Dynamic Pressure (pascal) Nov 25, 2003  
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)

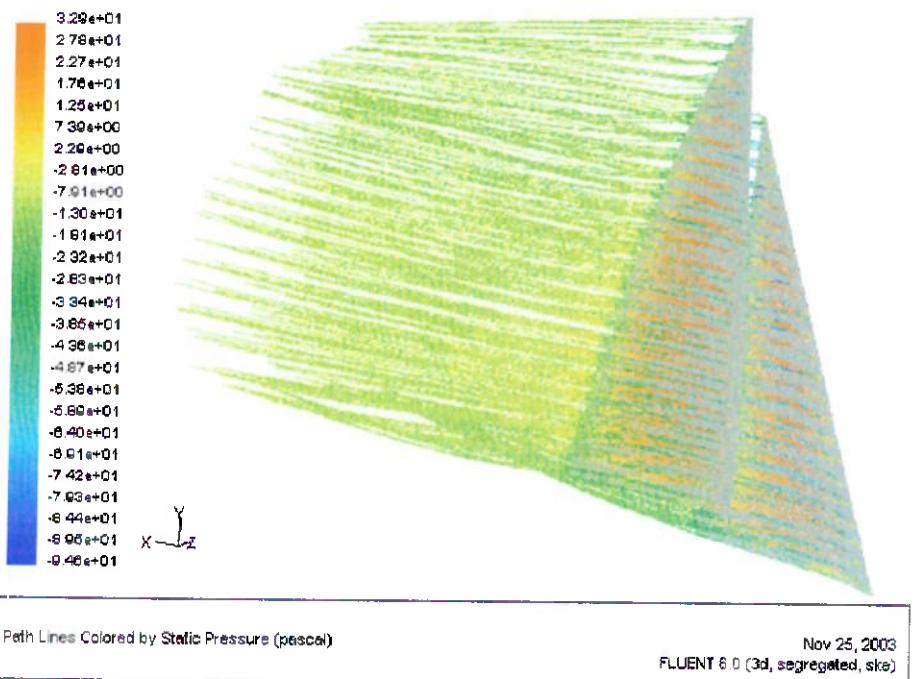
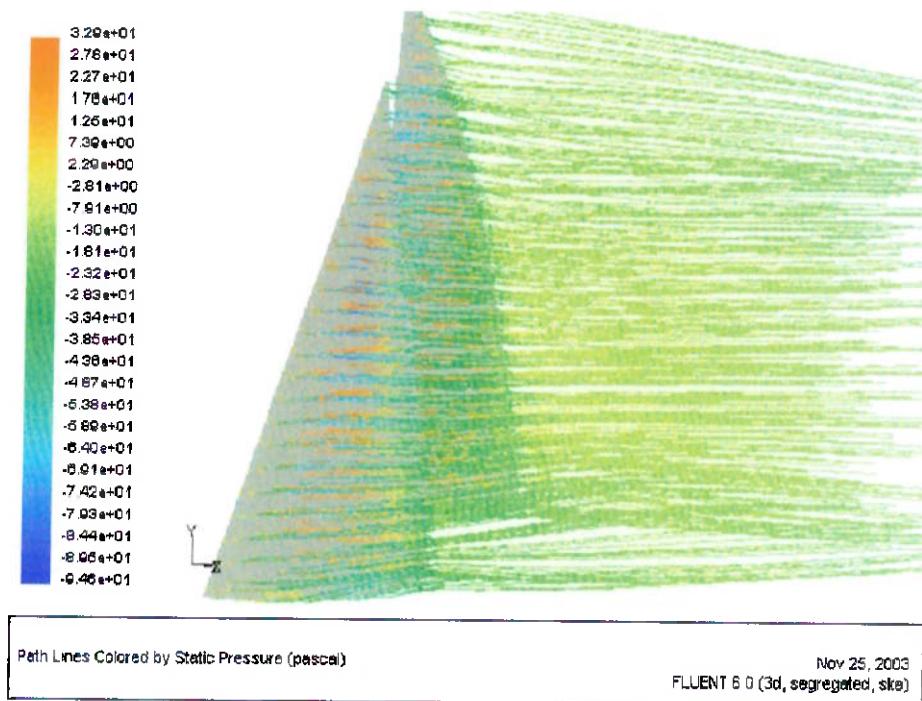


Path Lines Colored by Dynamic Pressure (pascal) Nov 25, 2003  
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)



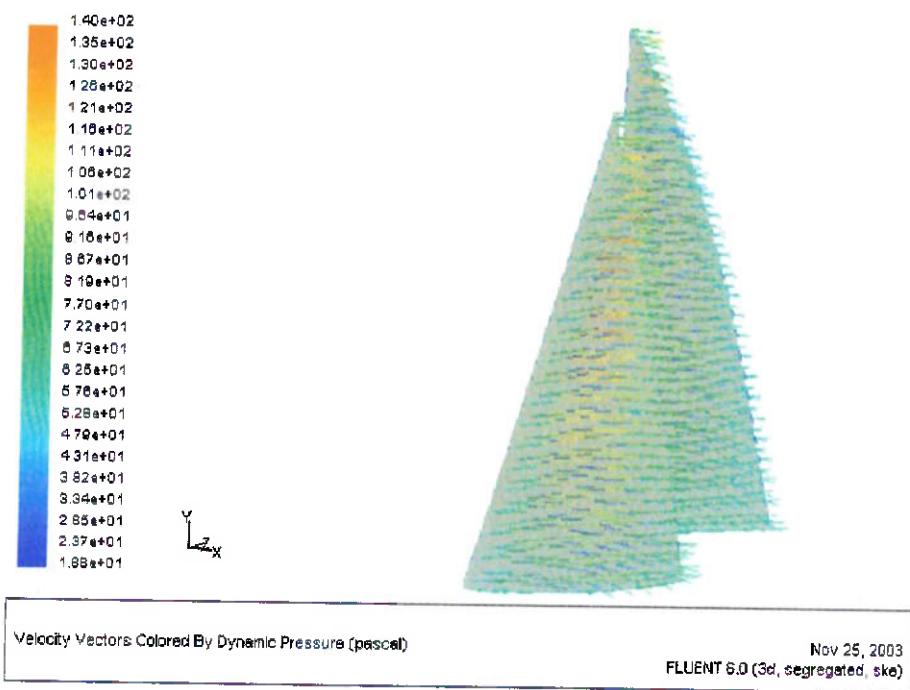
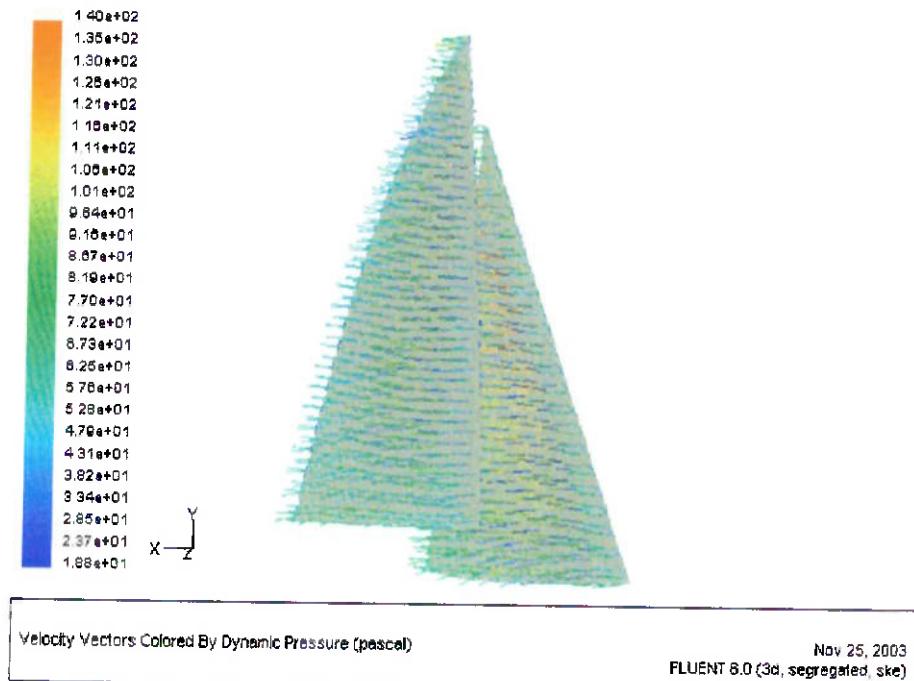


Linhas de escoamento coloridas pelo gradiente de pressão estática.



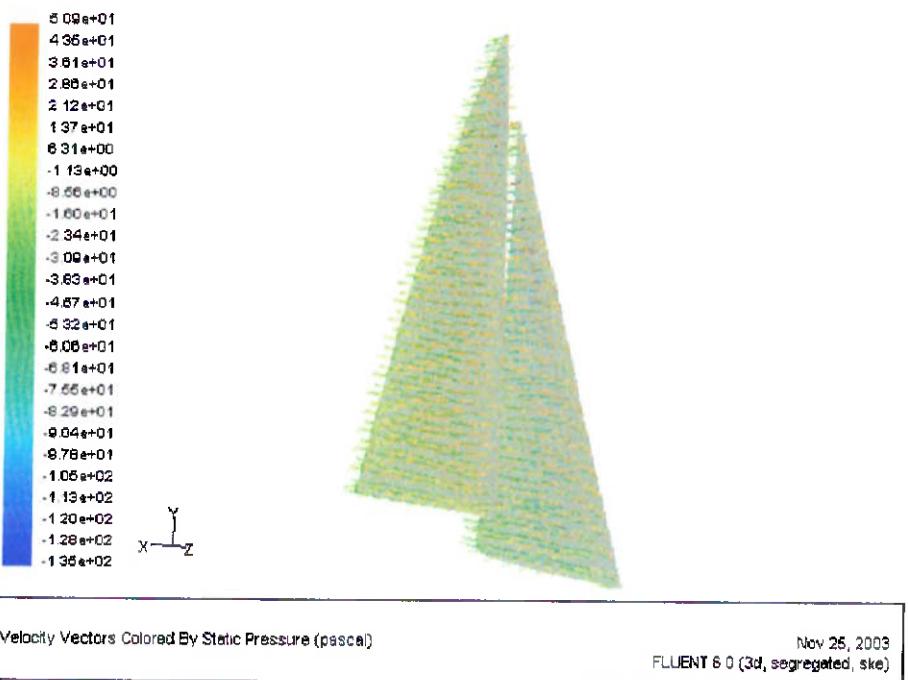
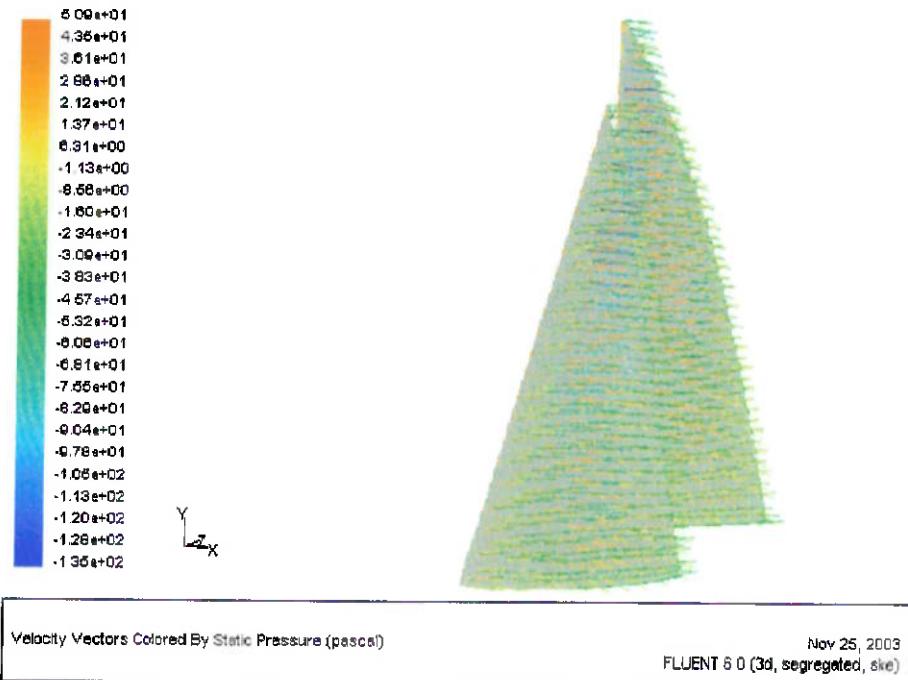


Vetores de velocidade coloridos pelo gradiente de pressão dinâmica.



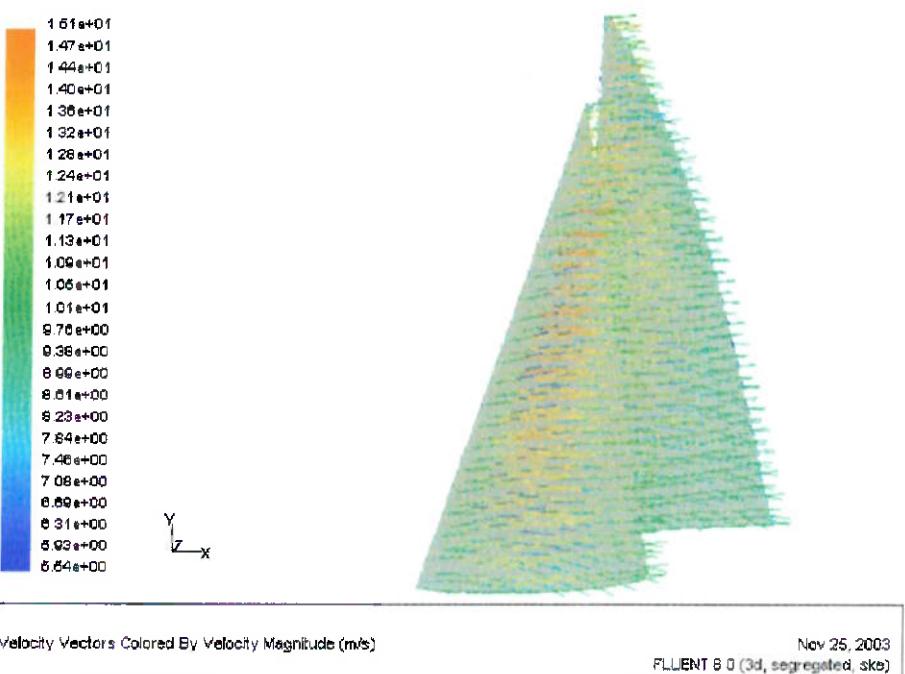
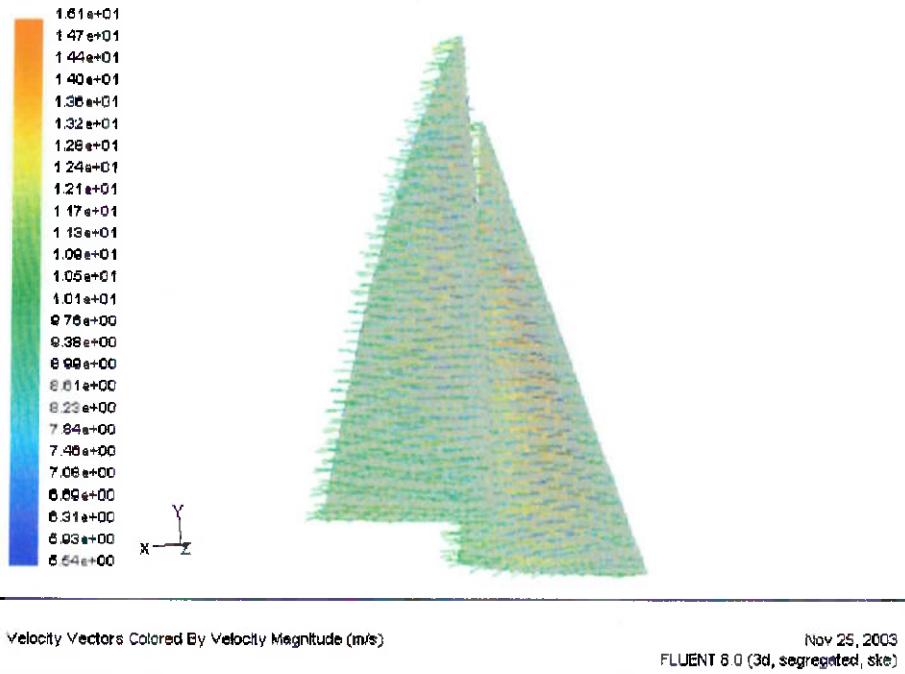


Vetores de velocidade coloridos pelo gradiente de pressão estática.



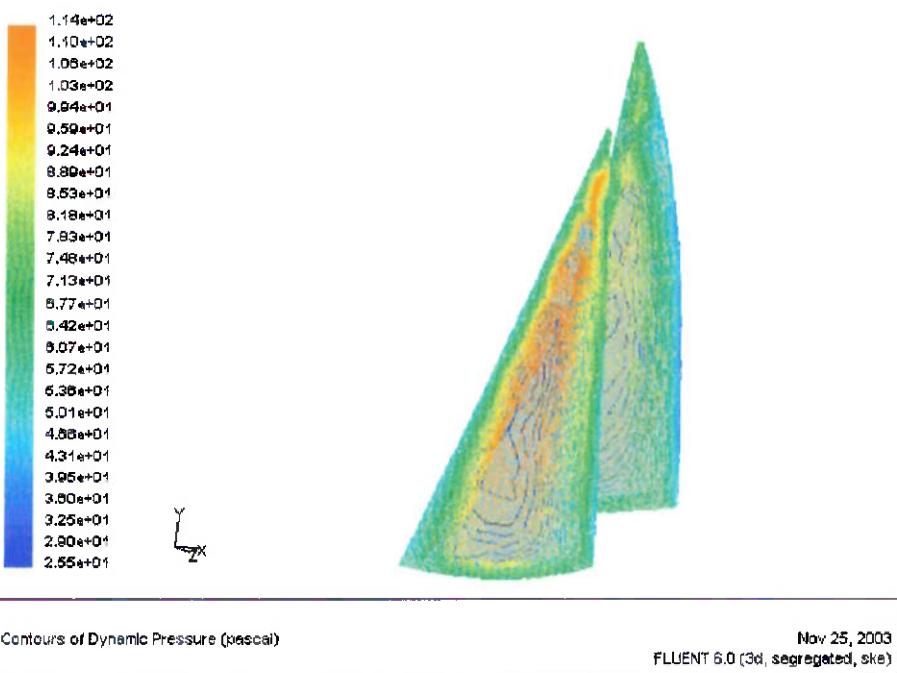
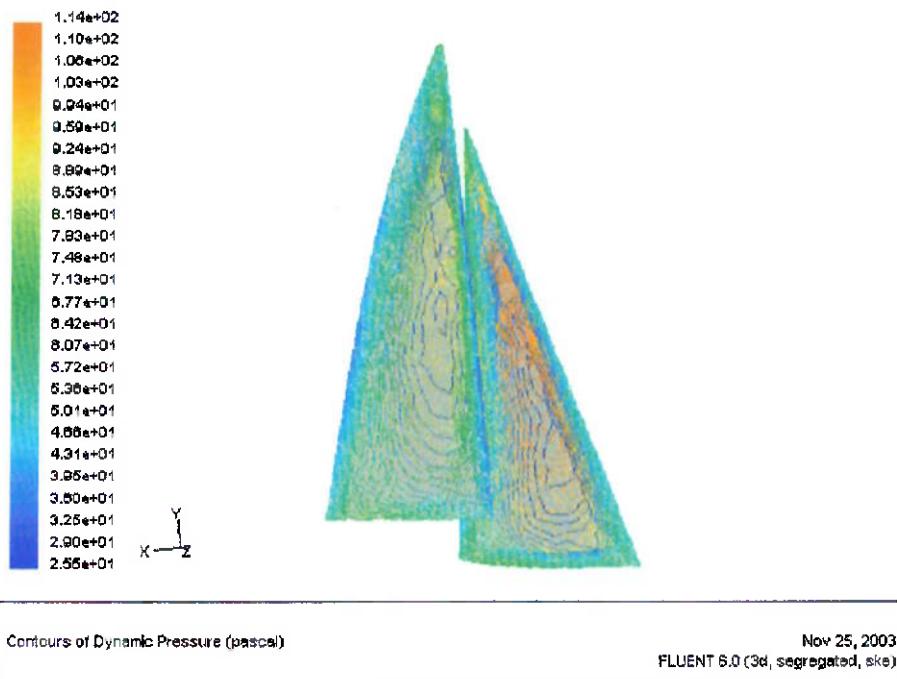


Vetores de velocidade coloridos pela magnitude da velocidade.



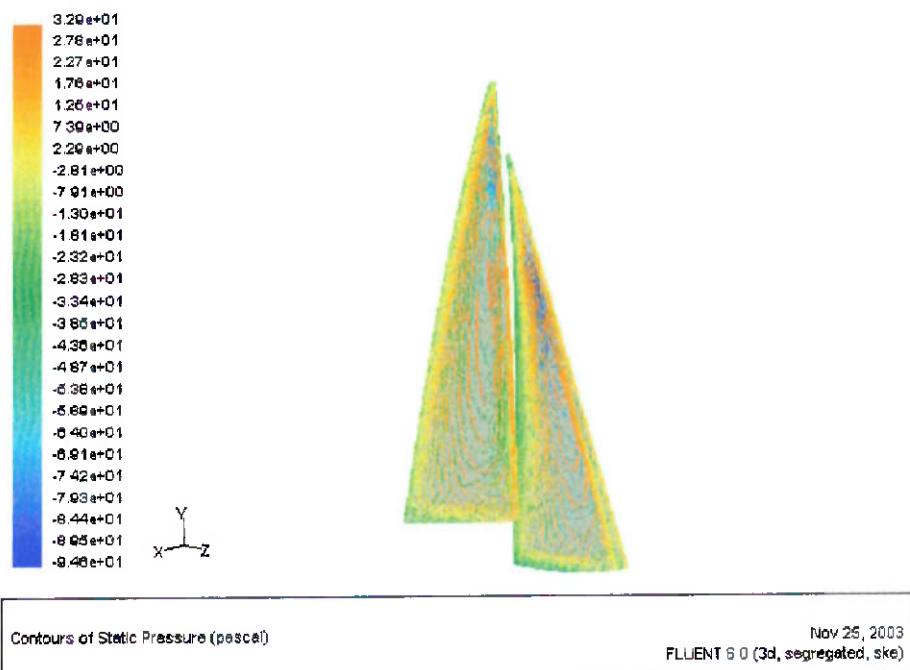
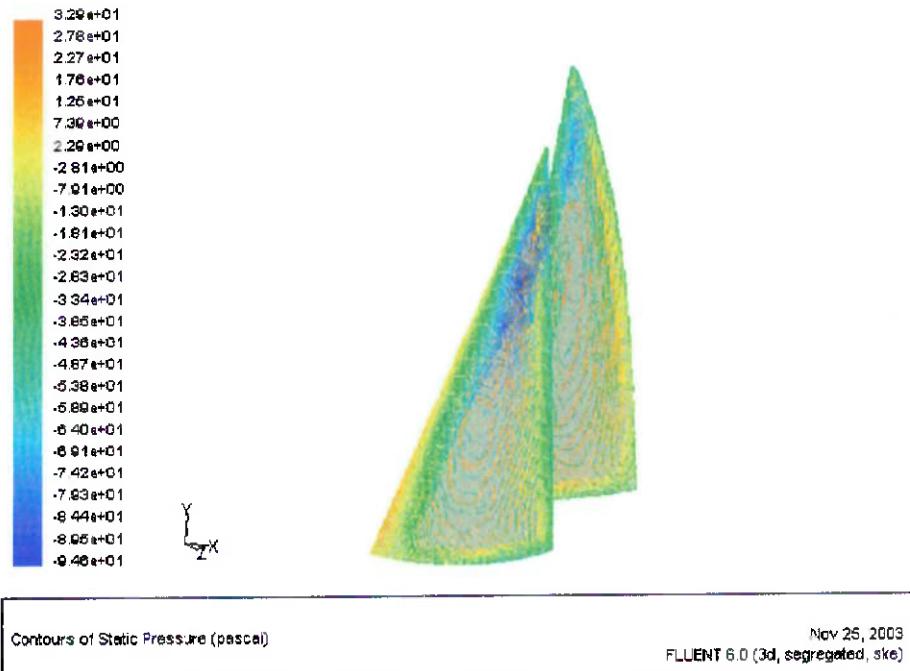


## Linhos de Contorno de Pressão Dinâmica





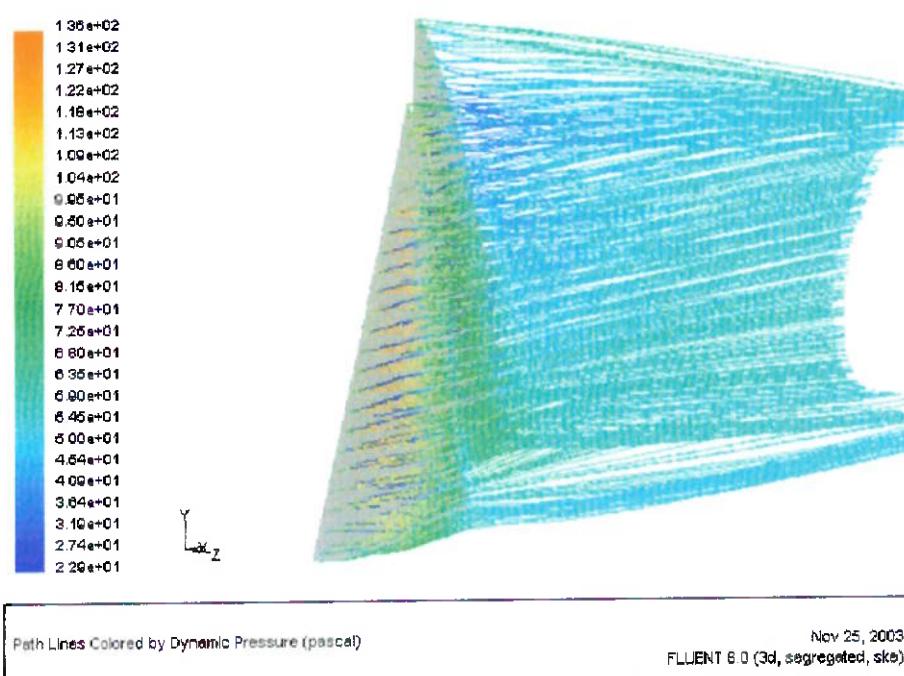
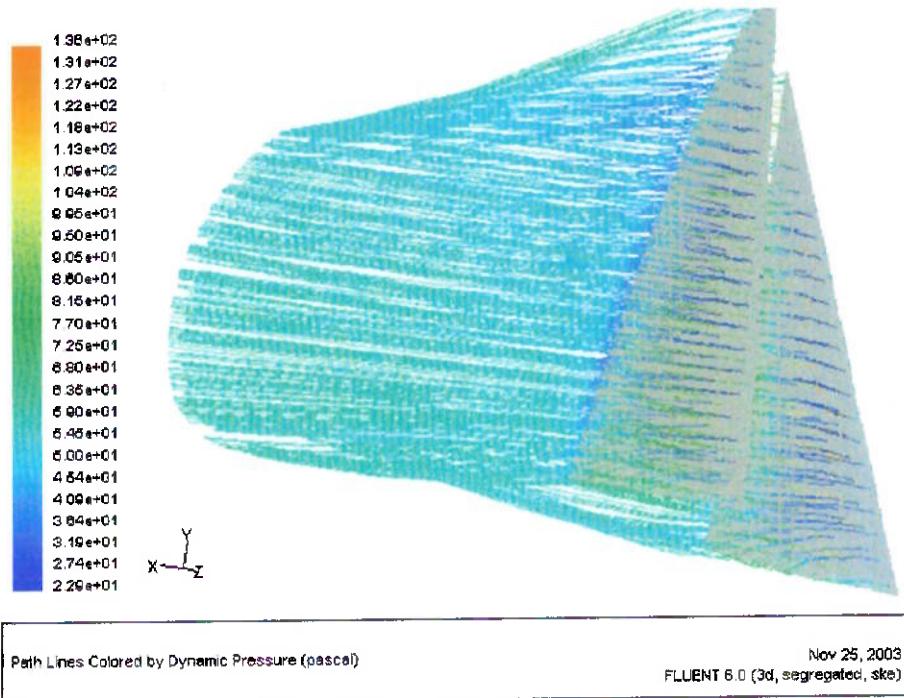
### Linhas de Contorno de Pressão Estática

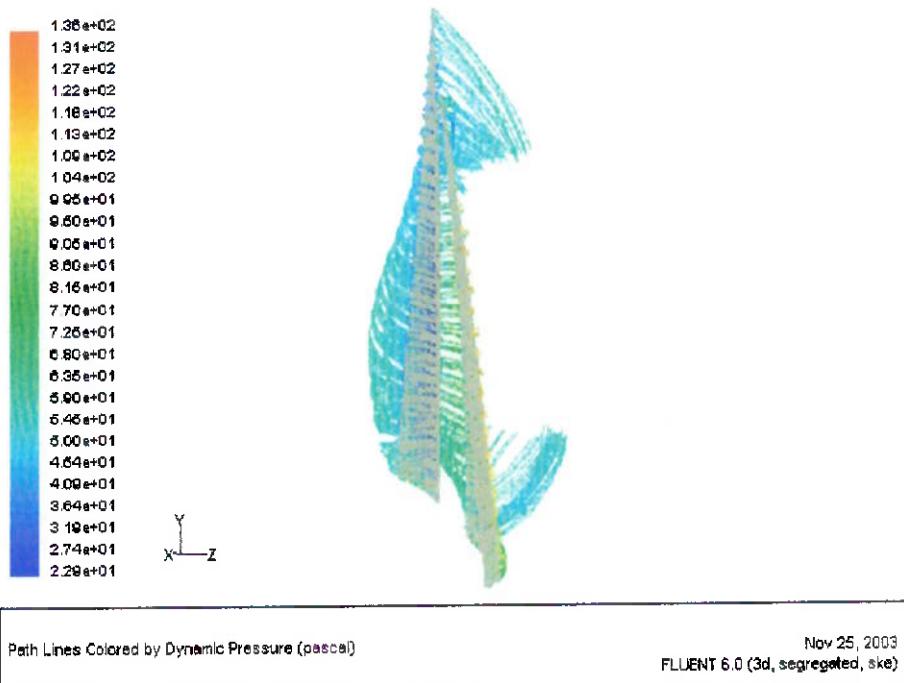




## SIMULAÇÃO 2 – VENTO À 20 GRAUS EM RELAÇÃO À VELA

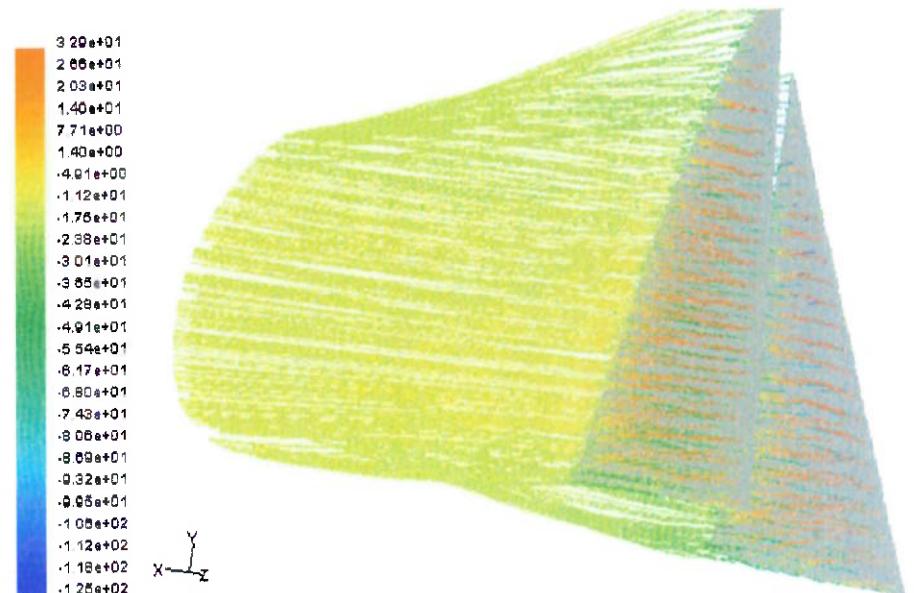
Linhos de escoamento coloridas pelo gradiente de pressão dinâmica.



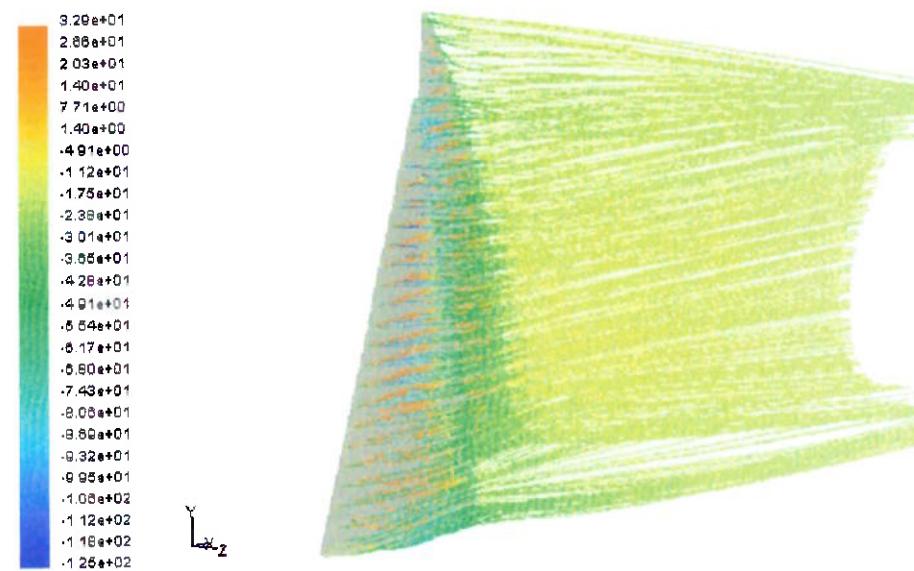




Linhos de escoamento coloridas pelo gradiente de pressão estática.



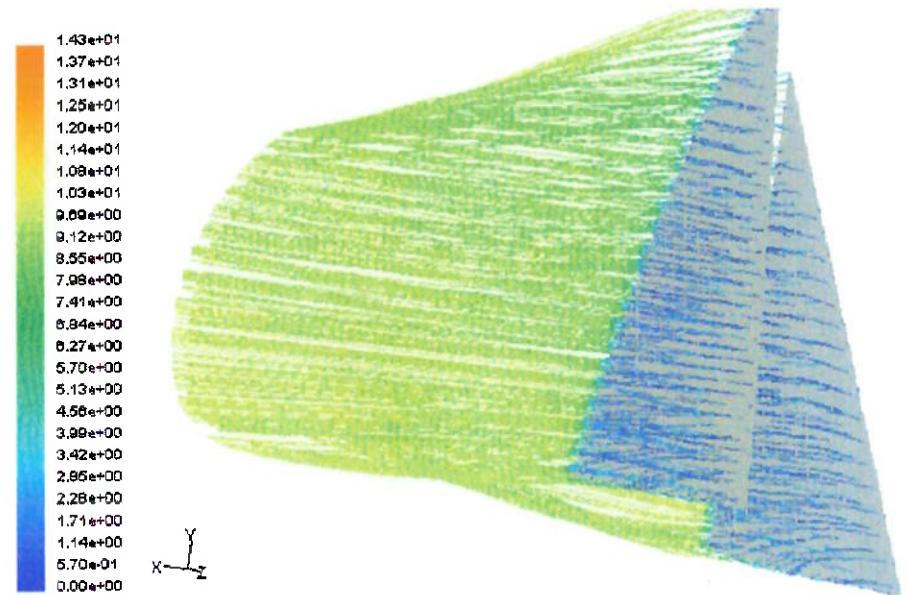
Path Lines Colored by Static Pressure (pascal) Nov 25, 2003  
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)



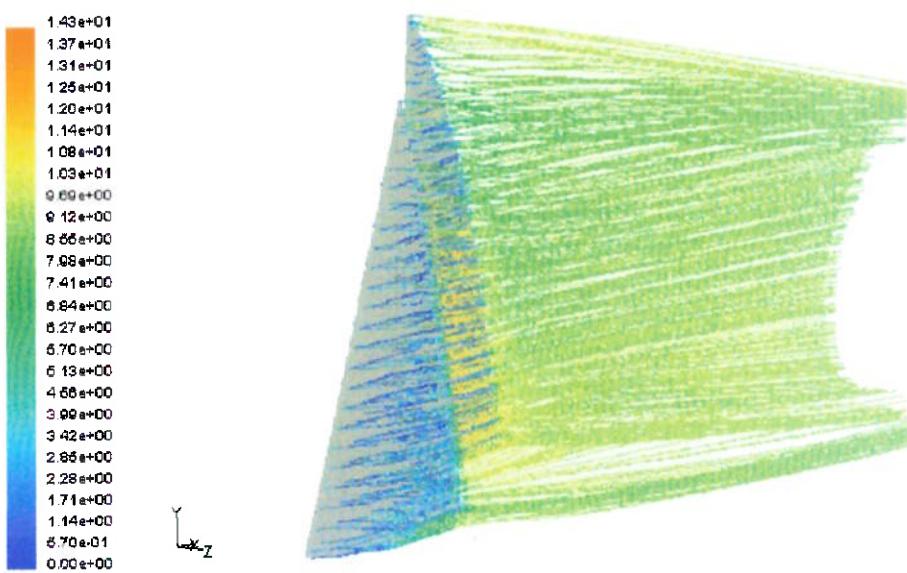
Path Lines Colored by Static Pressure (pascal) Nov 25, 2003  
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)



Linhos de escoamento coloridas pela magnitude da velocidade.



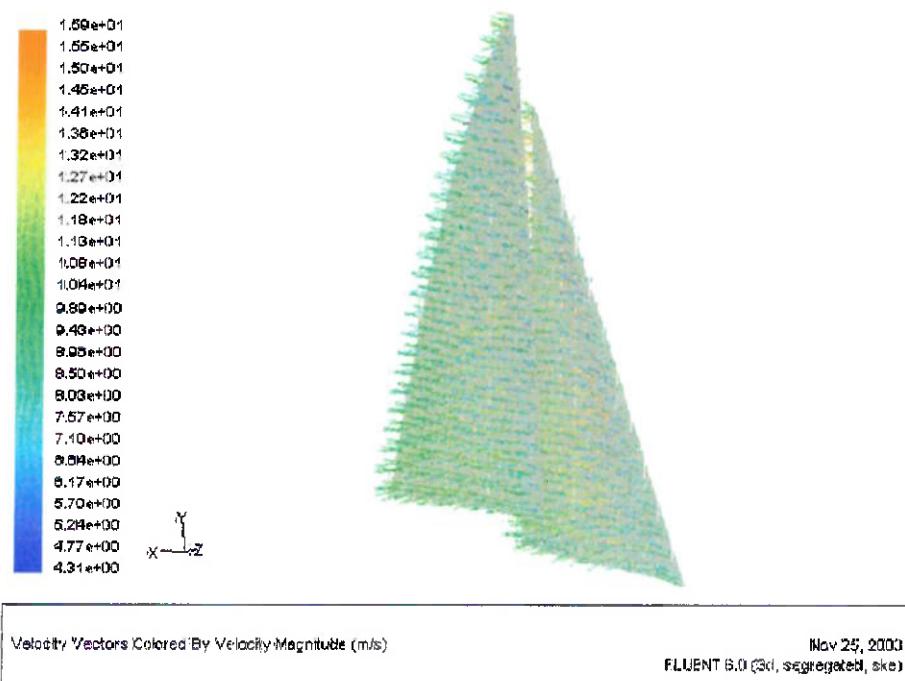
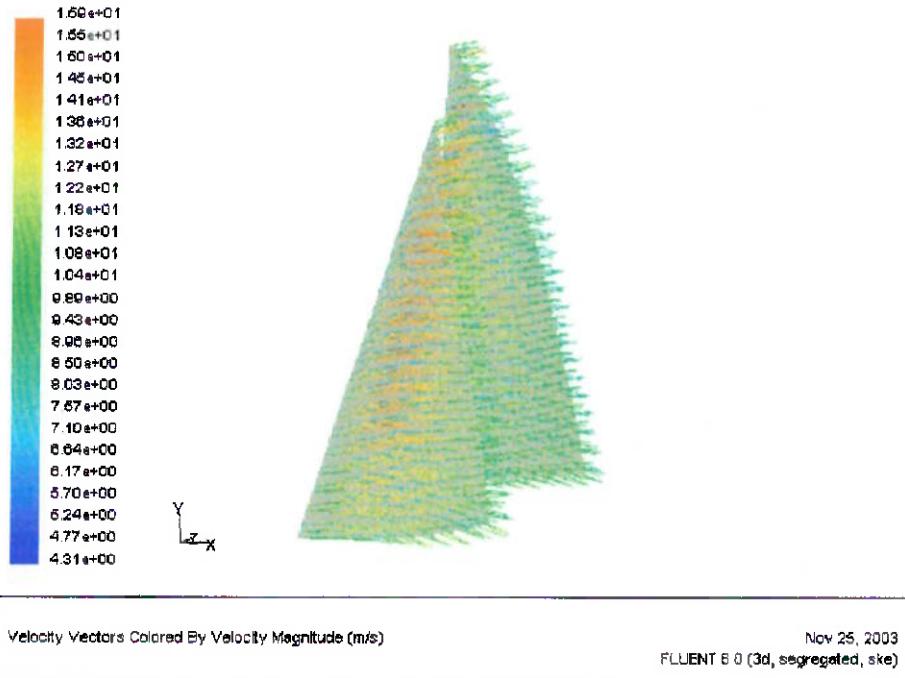
Path Lines Colored by Velocity Magnitude (m/s) Nov 25, 2003  
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)



Path Lines Colored by Velocity Magnitude (m/s) Nov 25, 2003  
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)

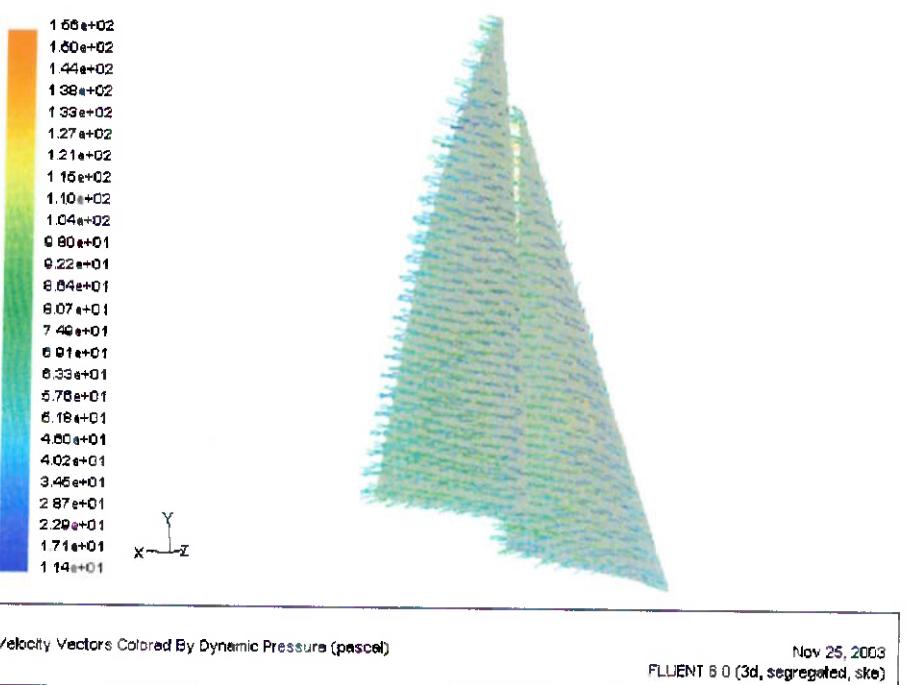
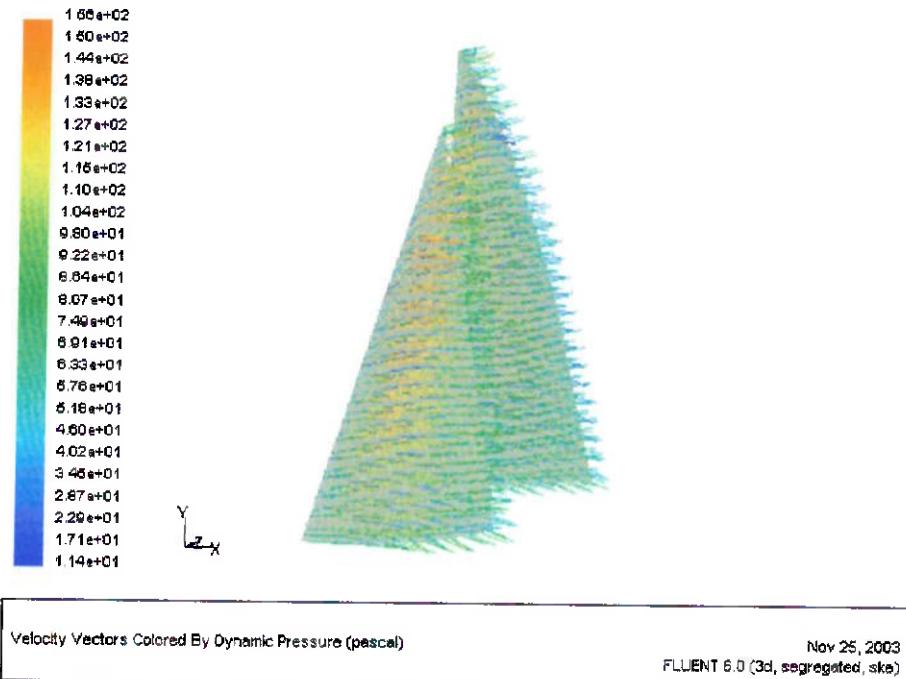


Vetores de velocidade coloridos pela magnitude da velocidade.



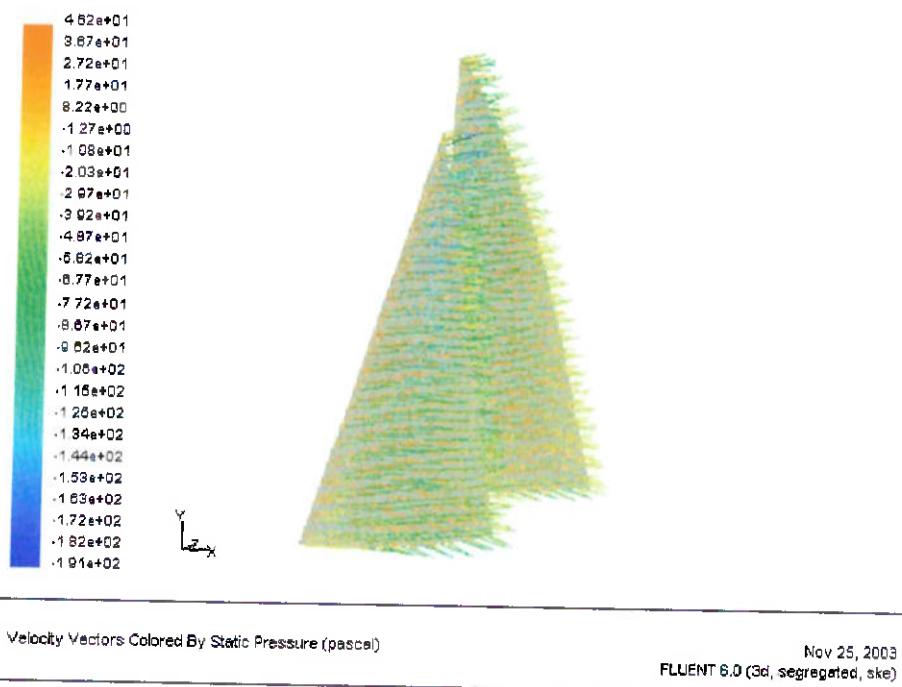
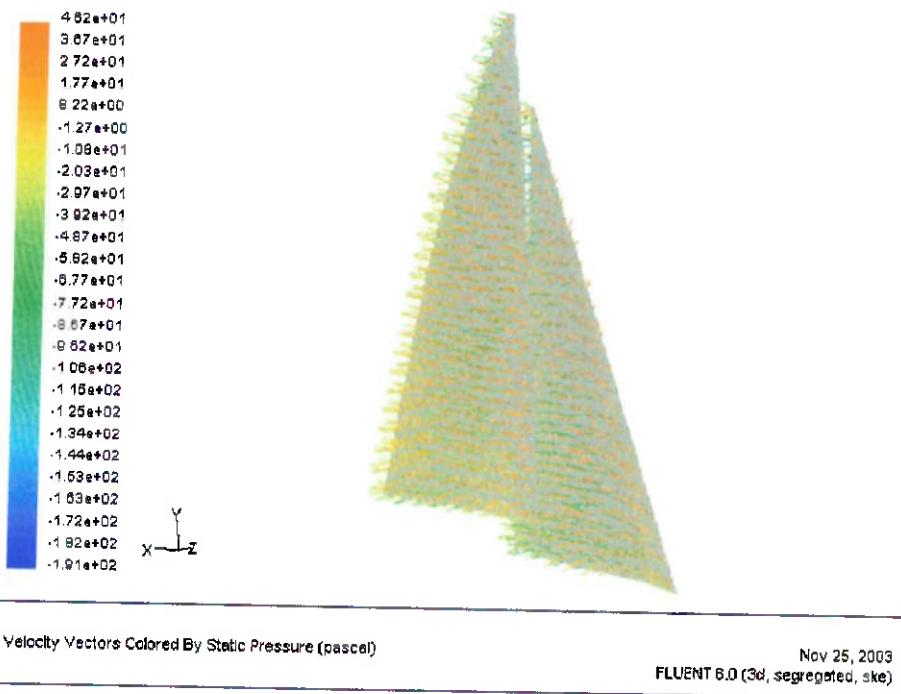


Vetores de velocidade coloridos pelo gradiente de pressão dinâmica.



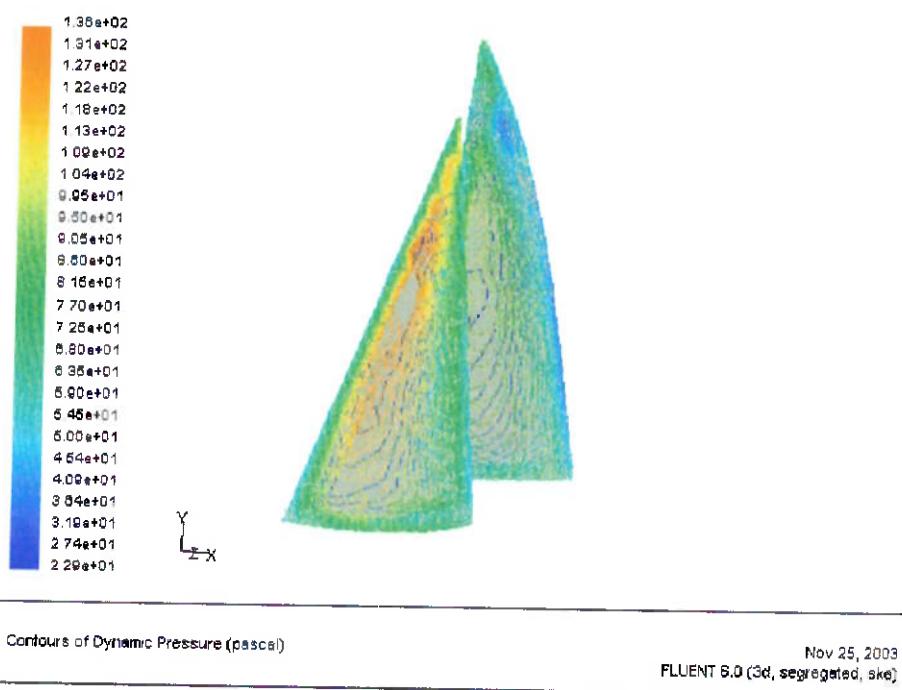
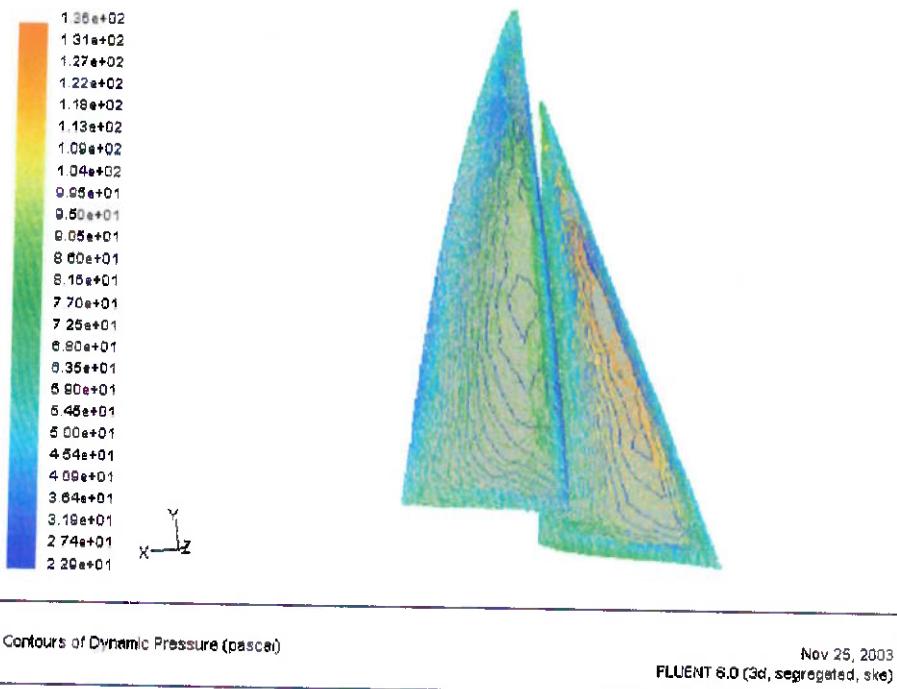


Vetores de velocidade coloridos pelo gradiente de pressão estática.



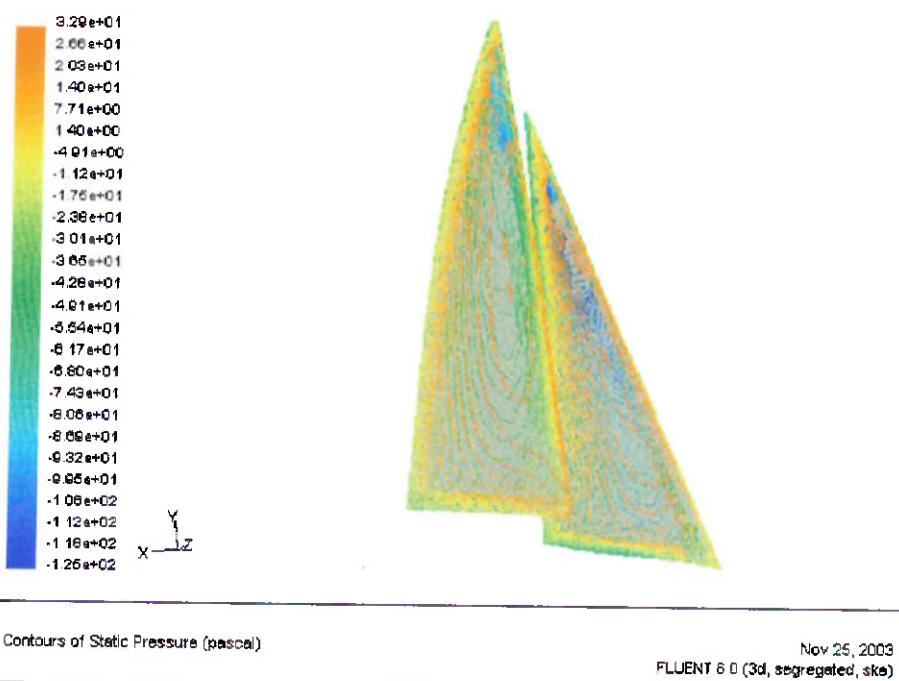
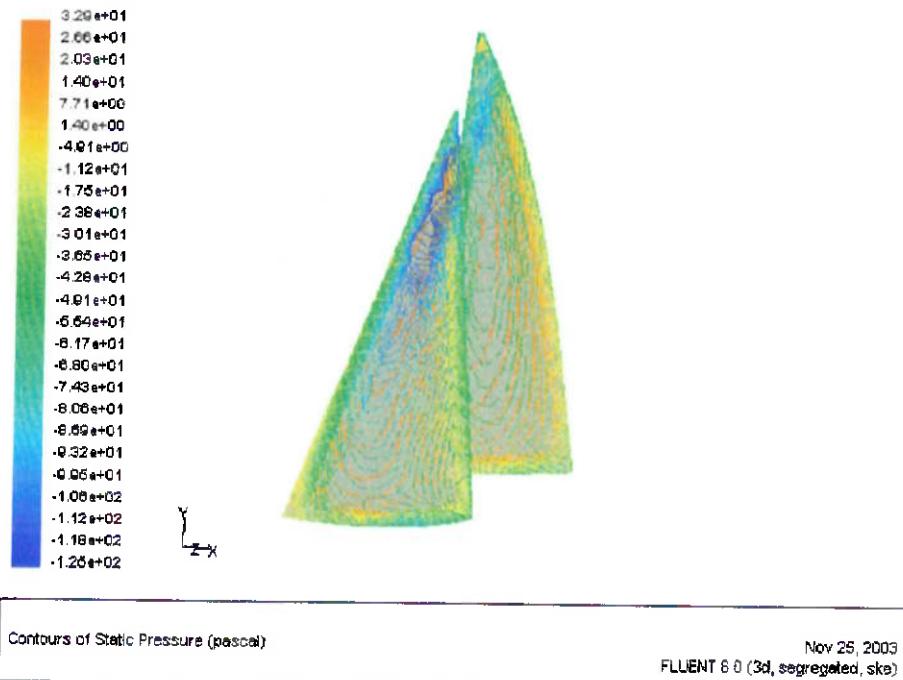


### Linhos de Contorno de Pressão Dinâmica





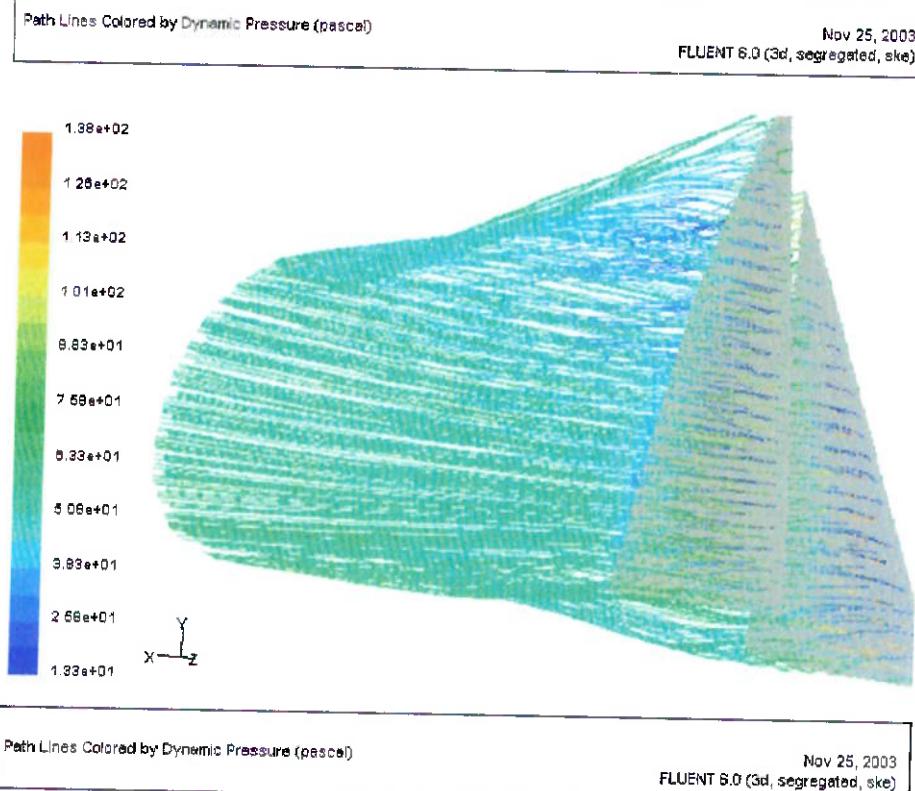
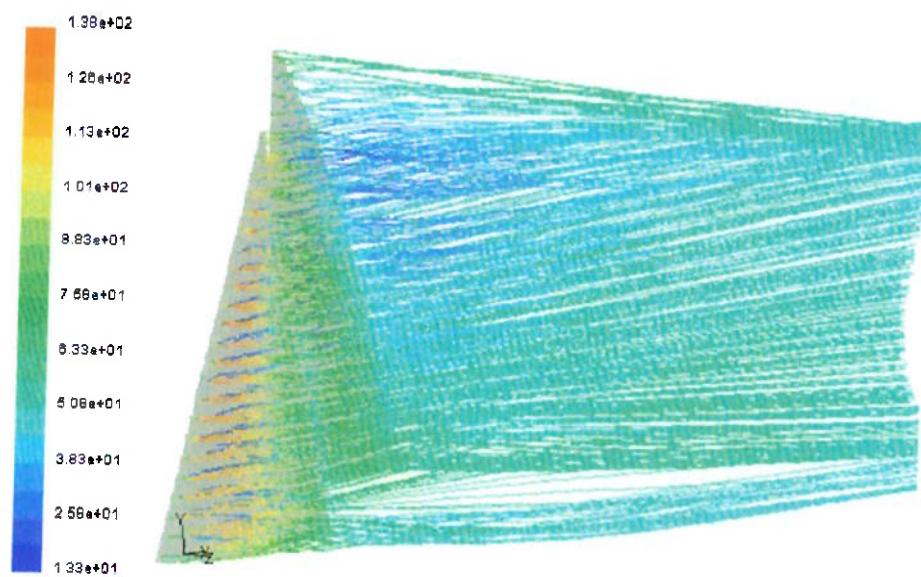
### Linhos de Contorno de Pressão Estática

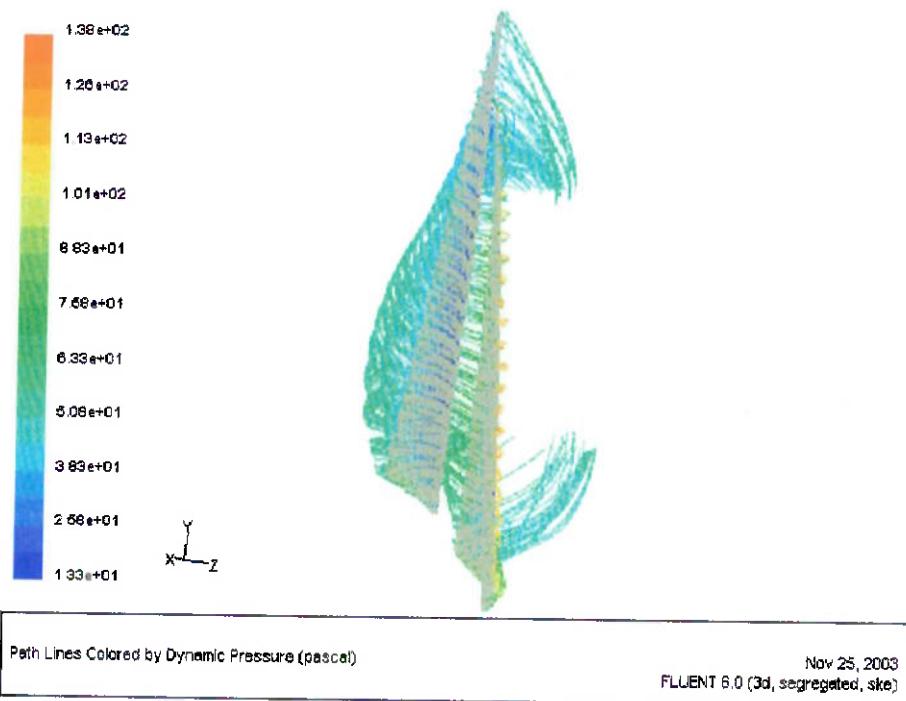




### SIMULAÇÃO 3 – VENTO À 25 GRAUS EM RELAÇÃO À VELA

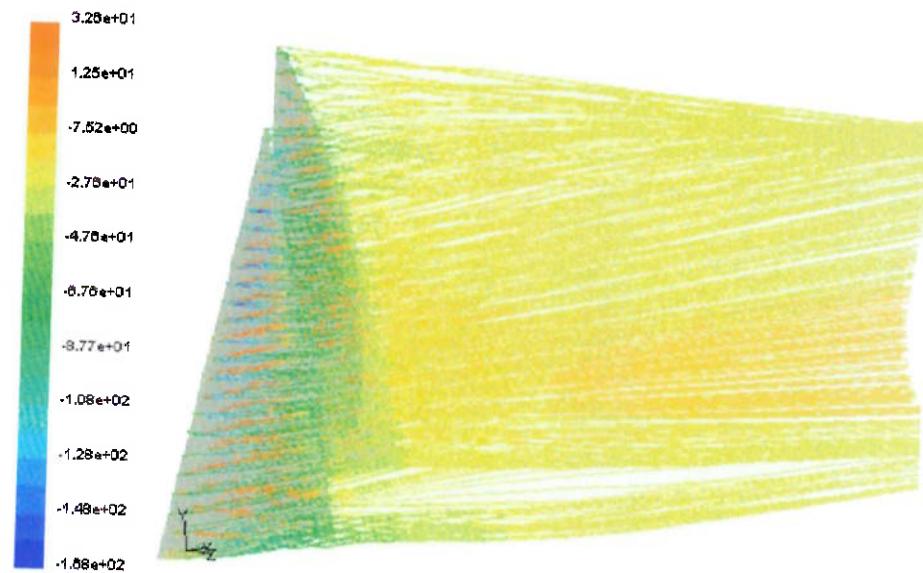
Linhos de escoamento coloridas pelo gradiente de pressão dinâmica.



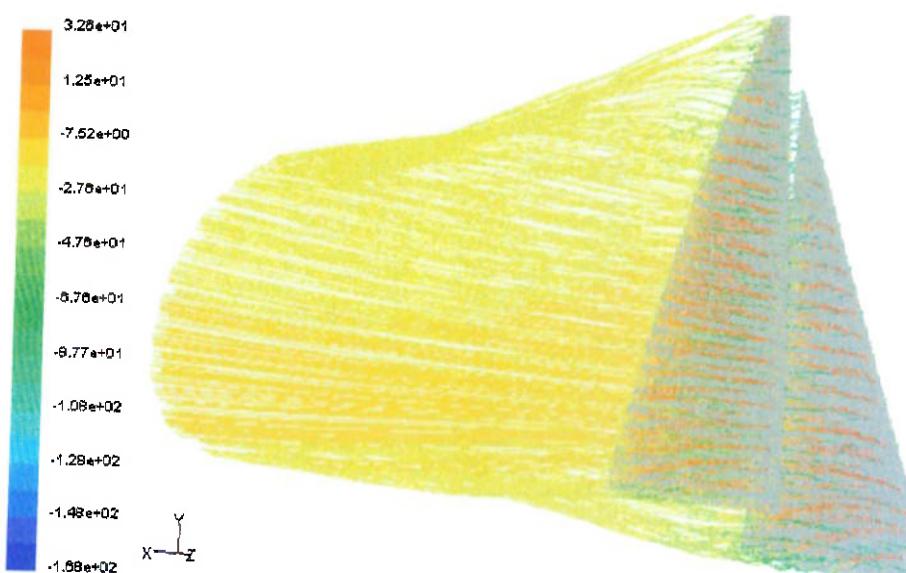




Linhos de escoamento coloridas pelo gradiente de pressão estática.



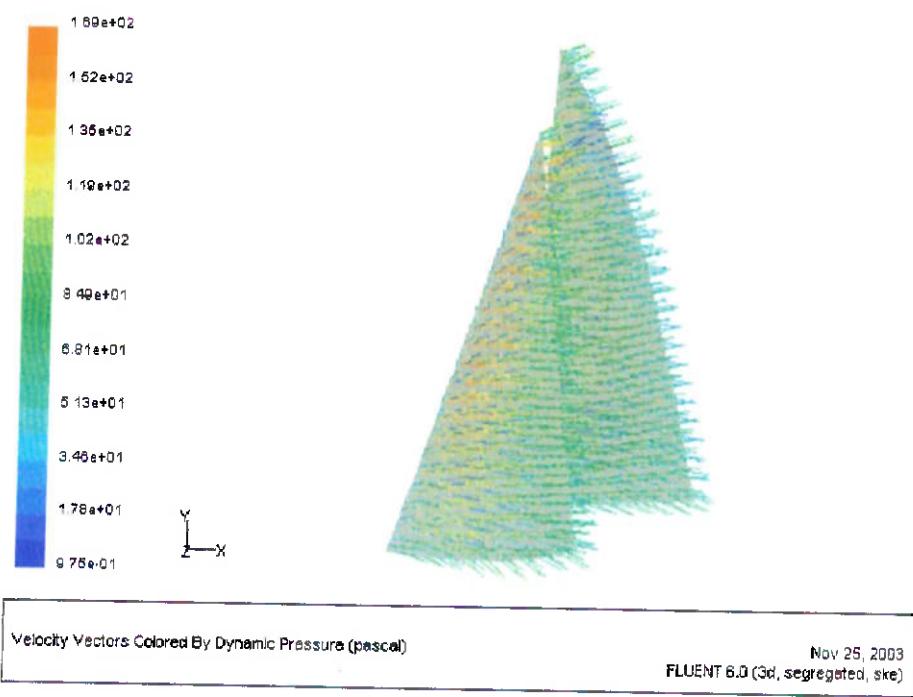
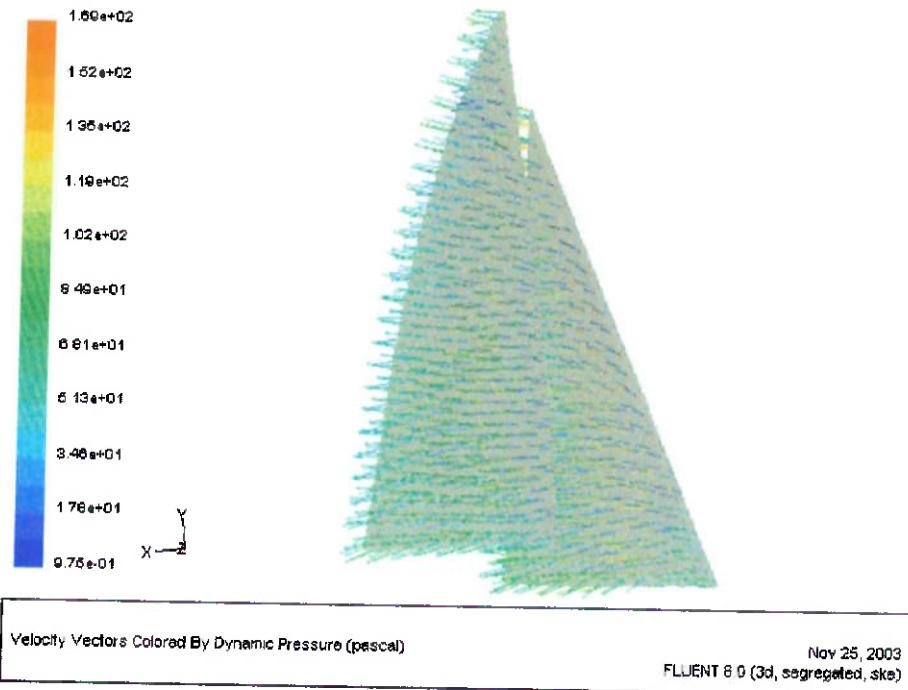
Path Lines Colored by Static Pressure (pascal) Nov 25, 2003  
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)



Path Lines Colored by Static Pressure (pascal) Nov 25, 2003  
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)

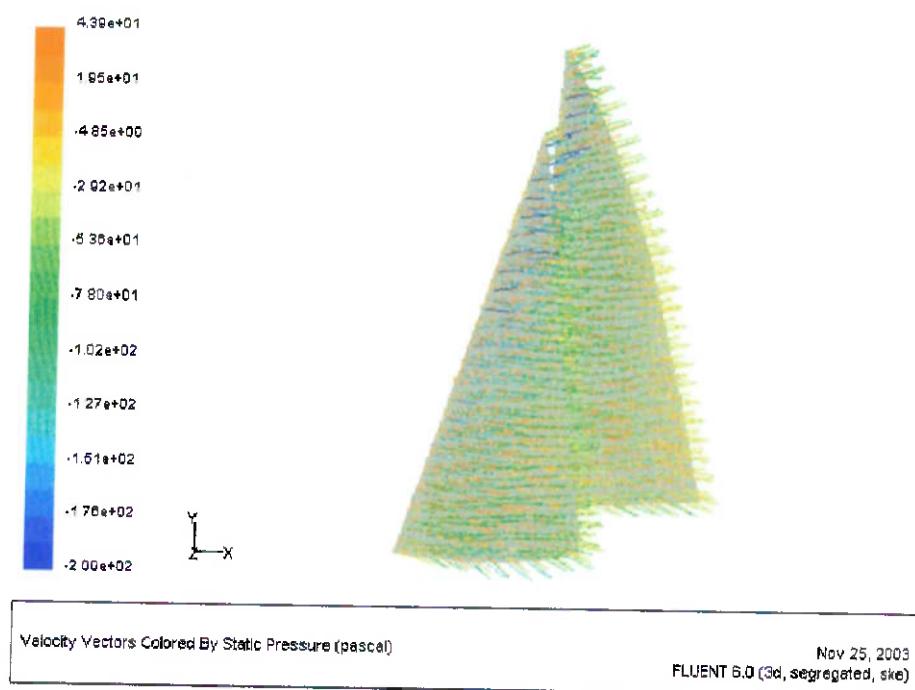
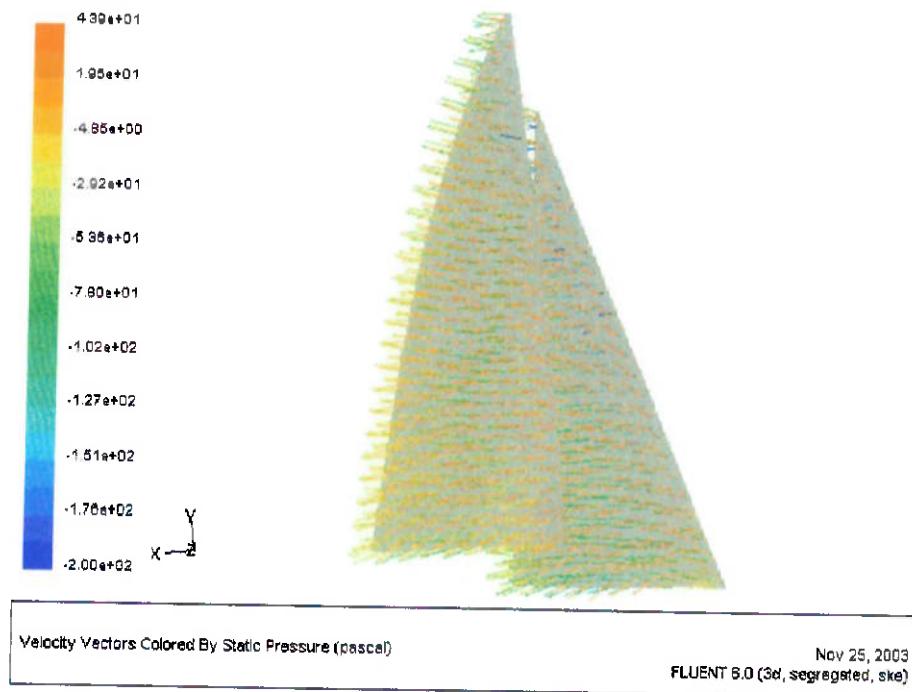


Vetores de velocidade coloridos pelo gradiente de pressão dinâmica.



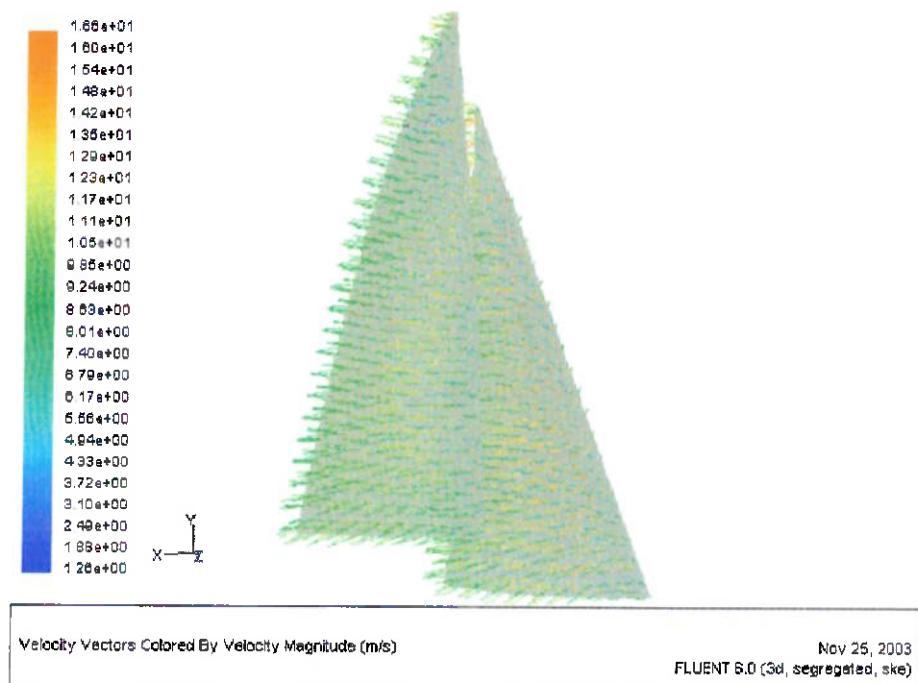
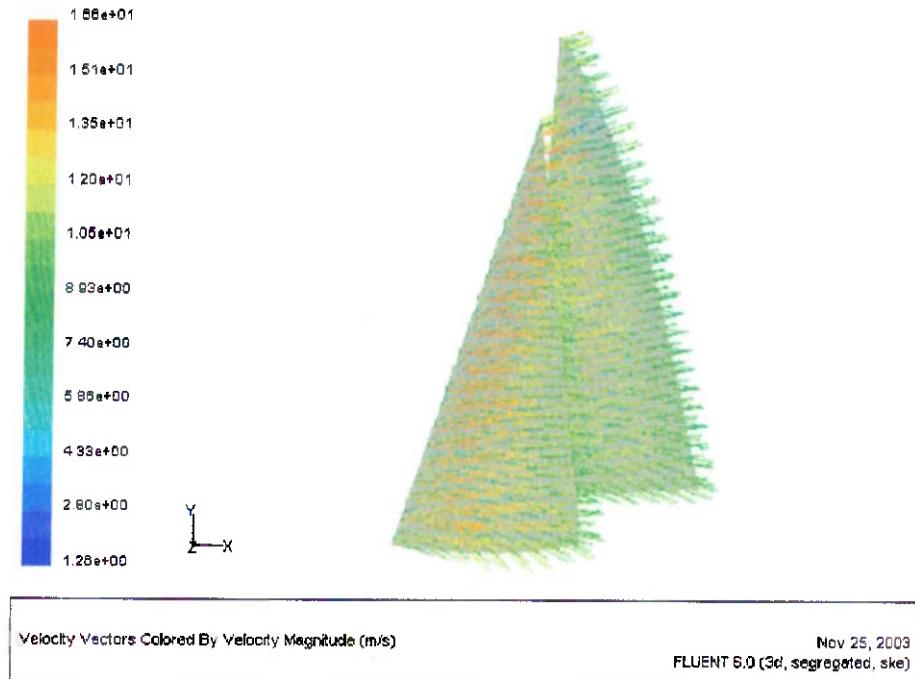


Vetores de velocidade coloridos pelo gradiente de pressão estática.



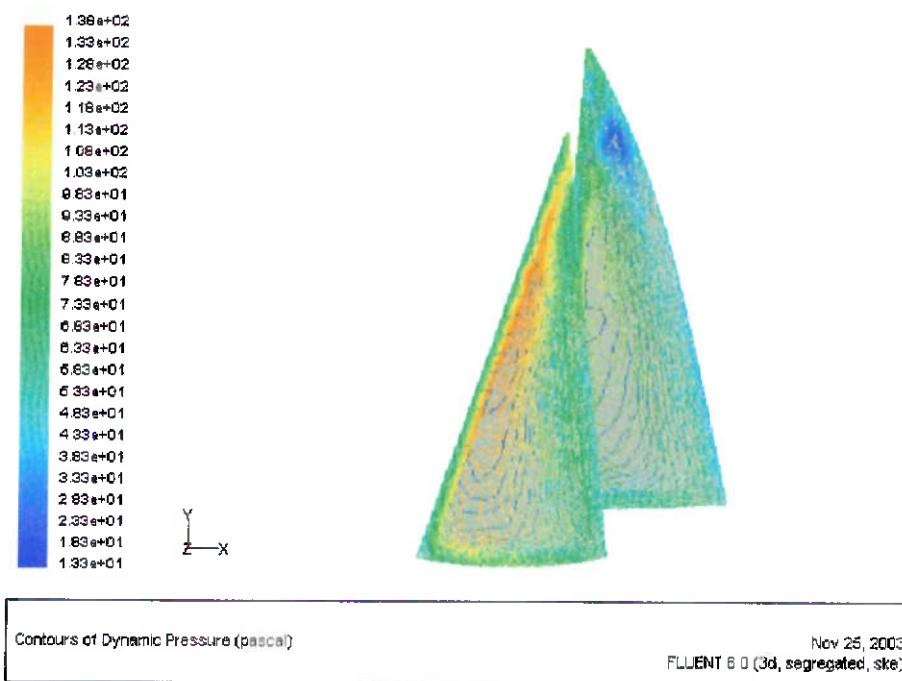
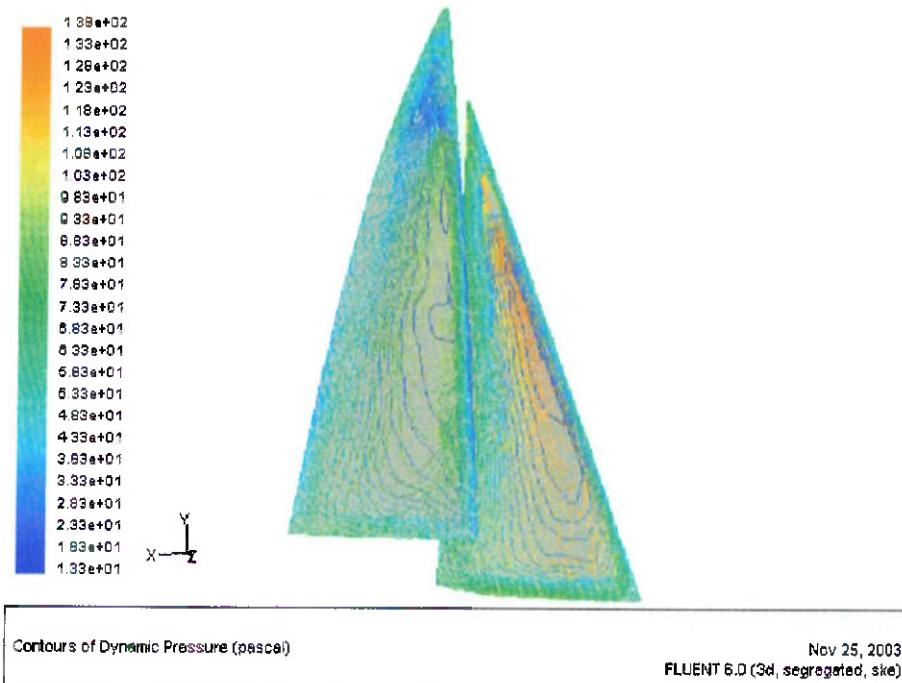


Vetores de velocidade coloridos pela magnitude da velocidade.



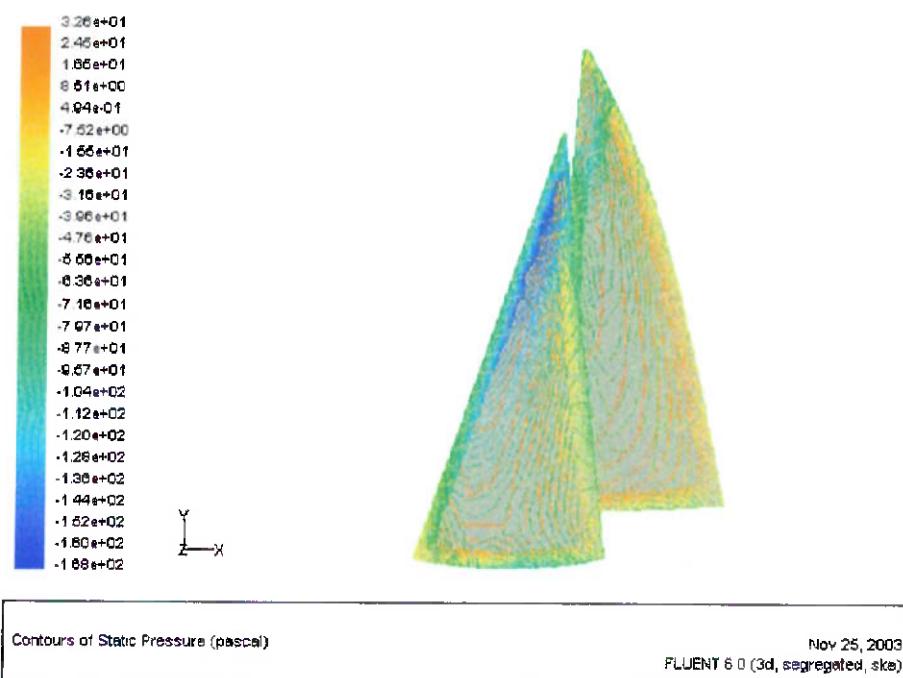
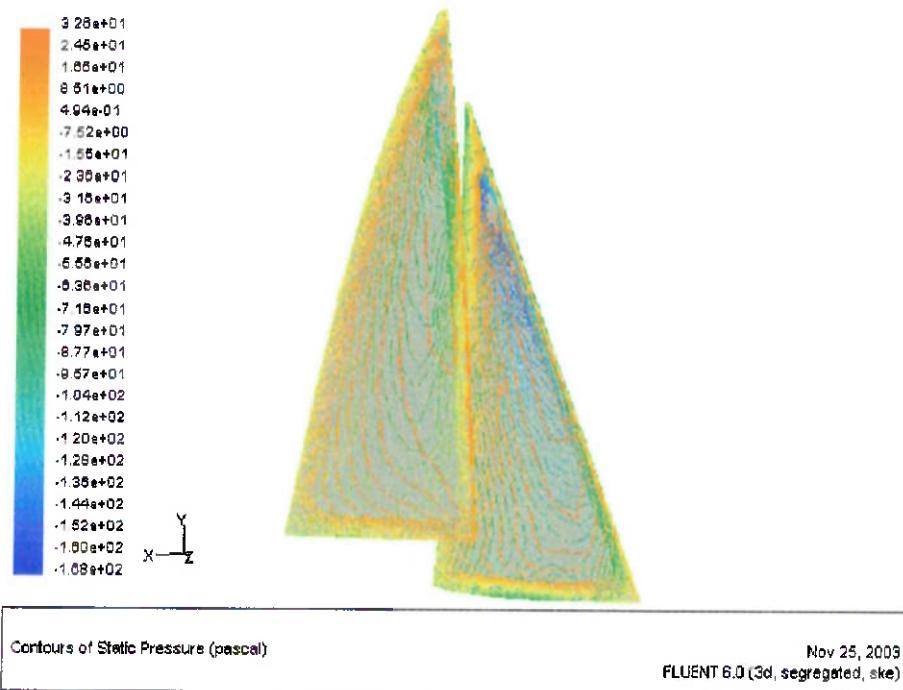


### Linhos de Contorno de Pressão Dinâmica





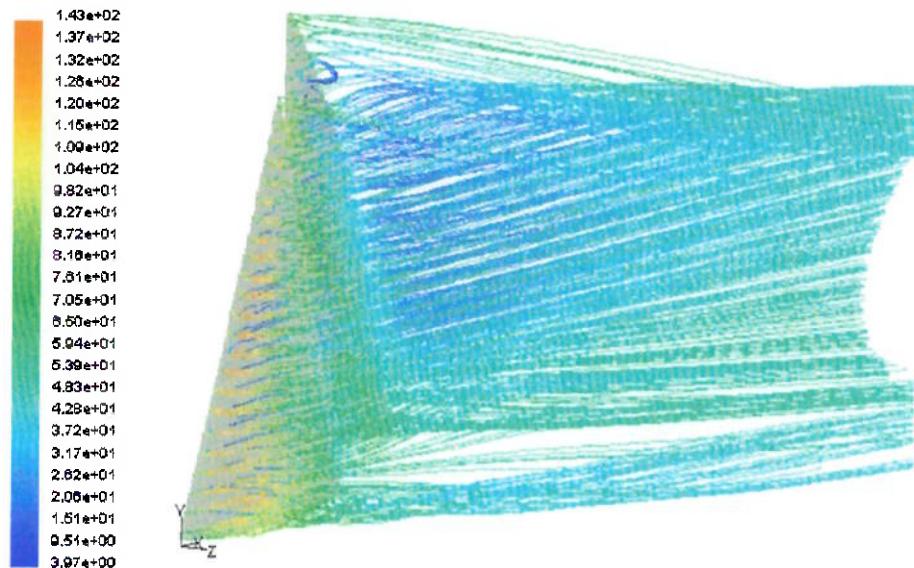
### Linhos de Contorno de Pressão Estática





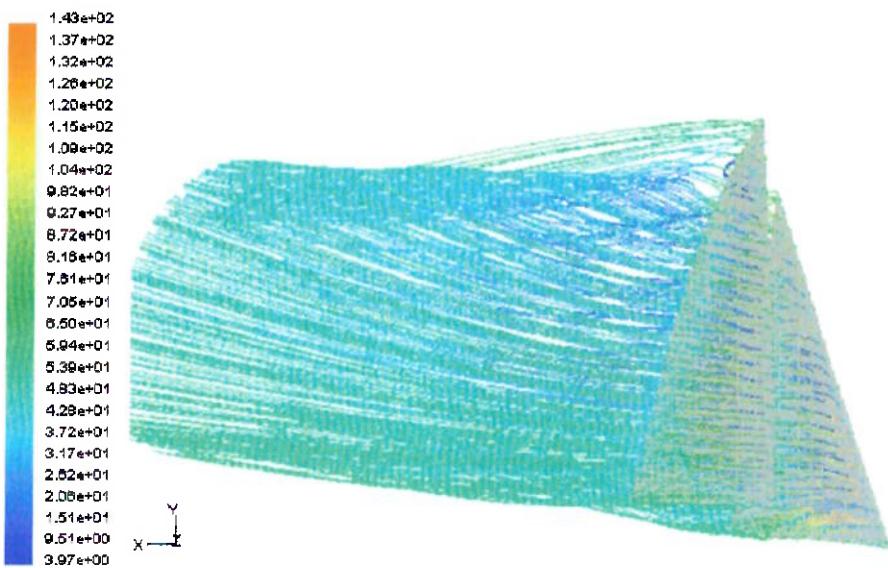
### SIMULAÇÃO 4 – VENTO À 30 GRAUS EM RELAÇÃO À VELA

Linhos de escoamento coloridas pelo gradiente de pressão dinâmica.



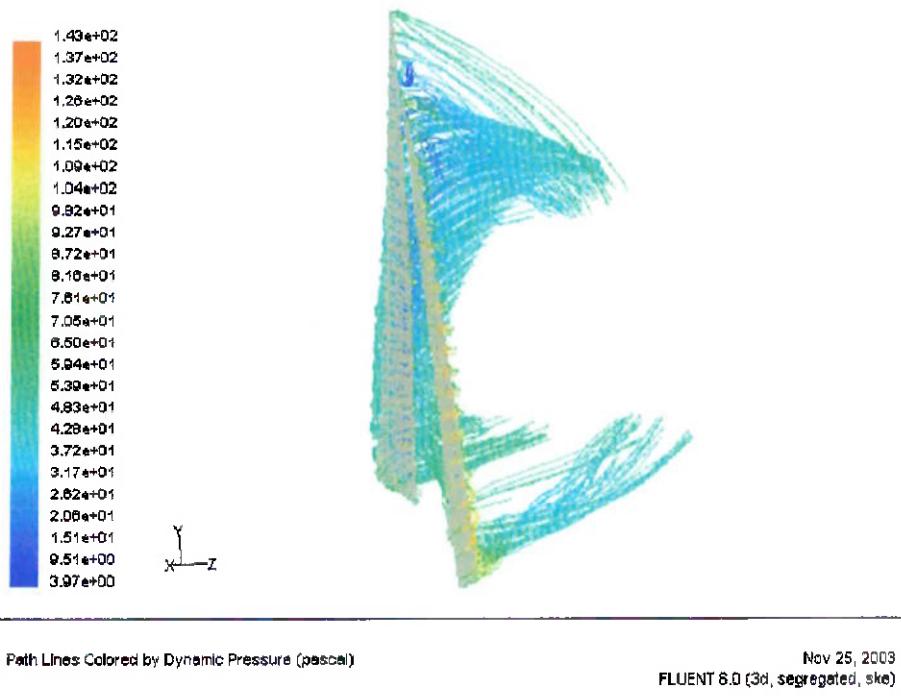
Path Lines Colored by Dynamic Pressure (pascal)

Nov 25, 2003  
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)



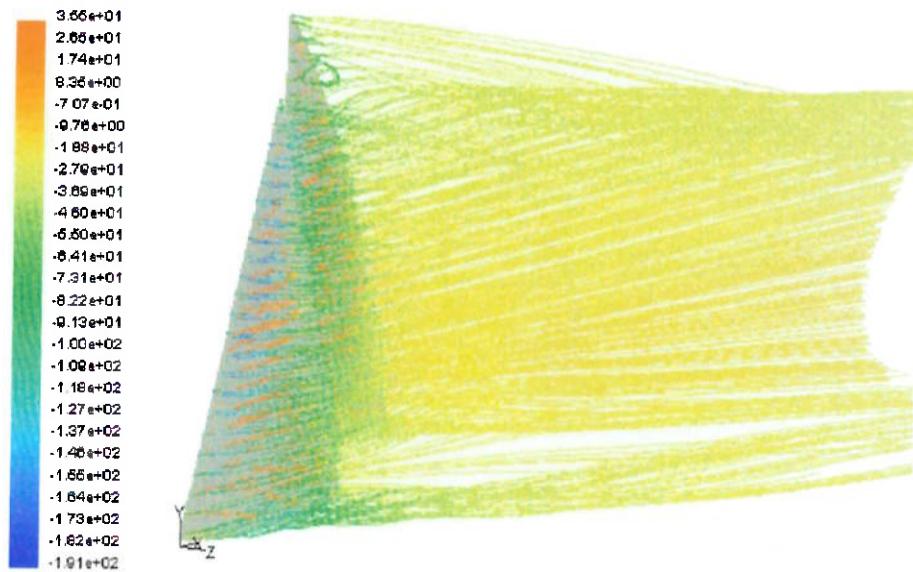
Path Lines Colored by Dynamic Pressure (pascal)

Nov 25, 2003  
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)

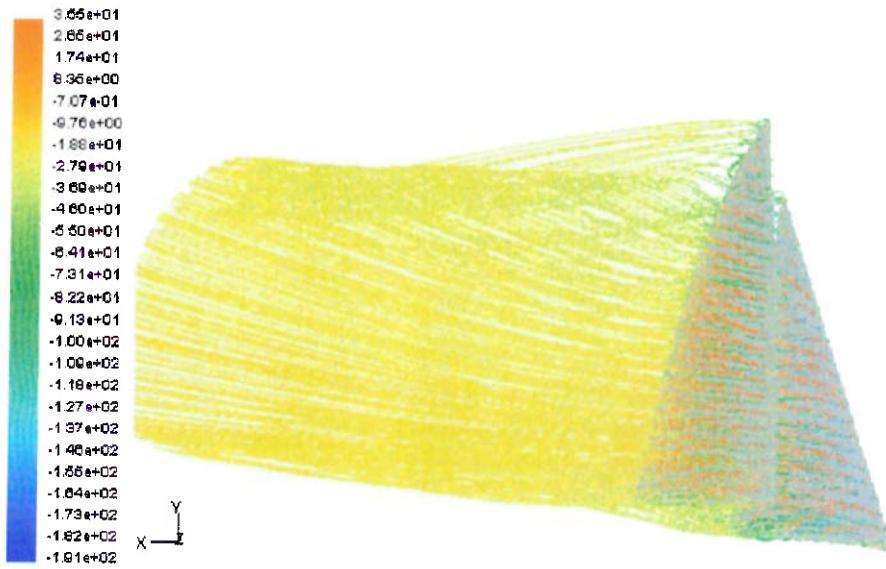




Linhos de escoamento coloridas pelo gradiente de pressão estática.



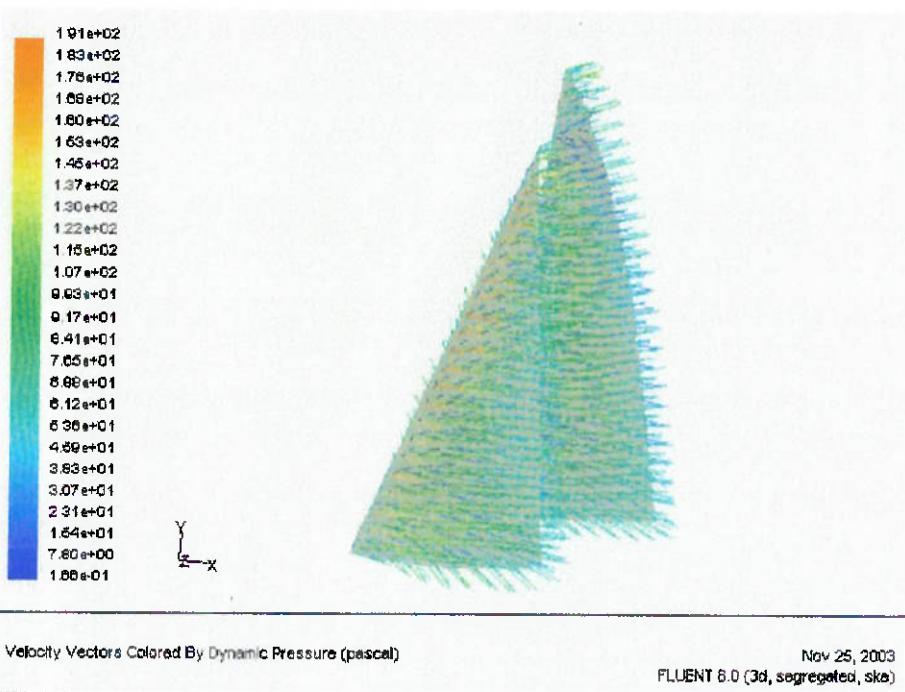
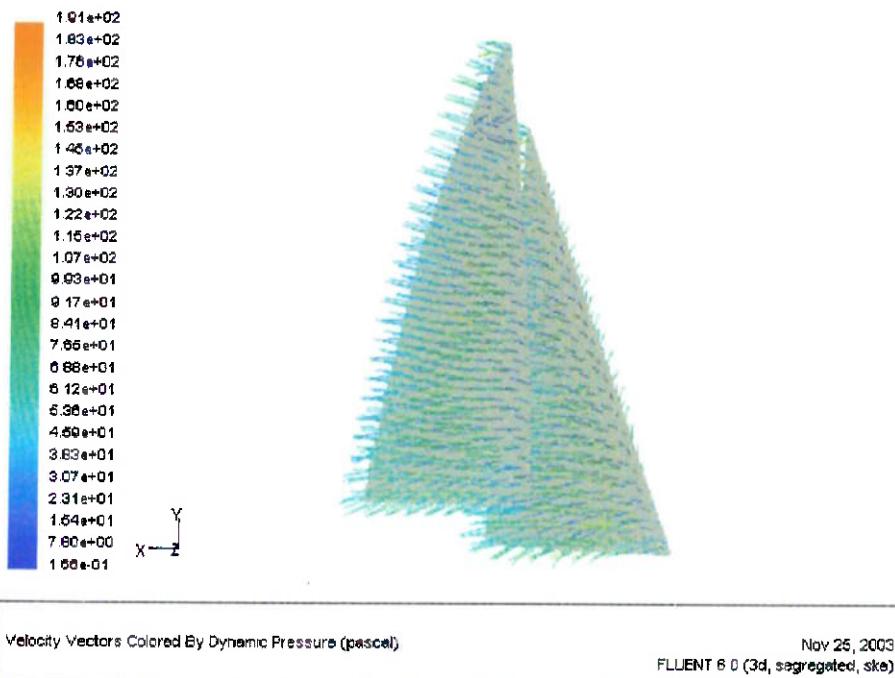
Path Lines Colored by Static Pressure (pascal) Nov 25, 2003  
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)



Path Lines Colored by Static Pressure (pascal) Nov 25, 2003  
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)

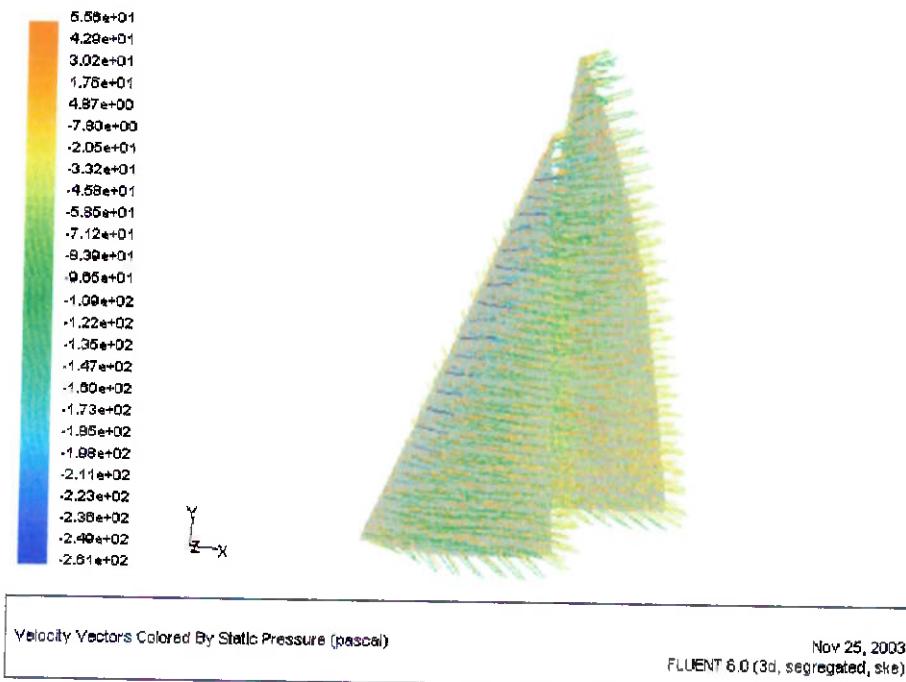
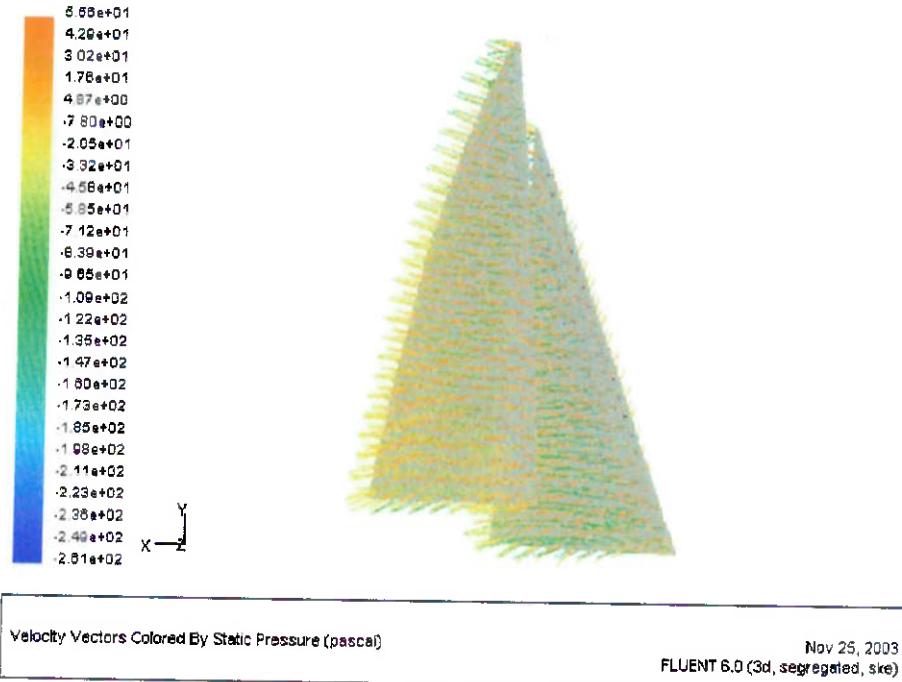


Vetores de velocidade coloridos pelo gradiente de pressão dinâmica.



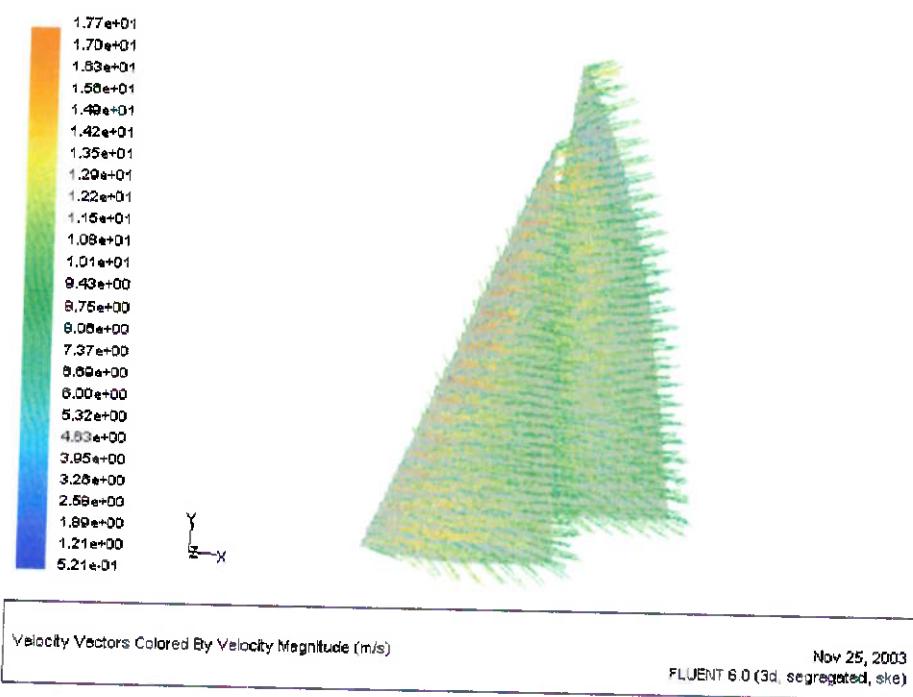
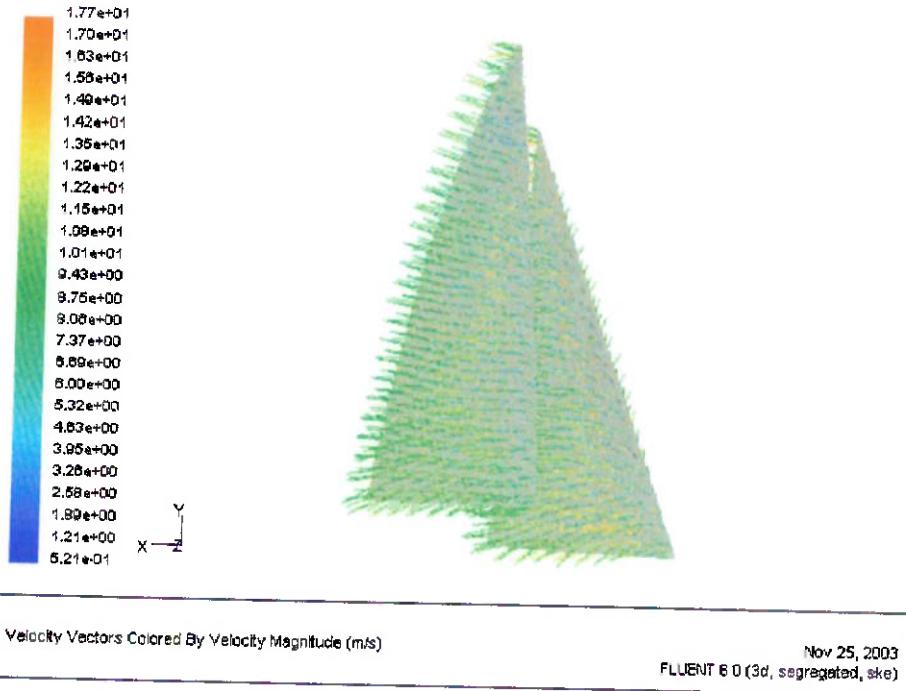


Vetores de velocidade coloridos pelo gradiente de pressão estática.



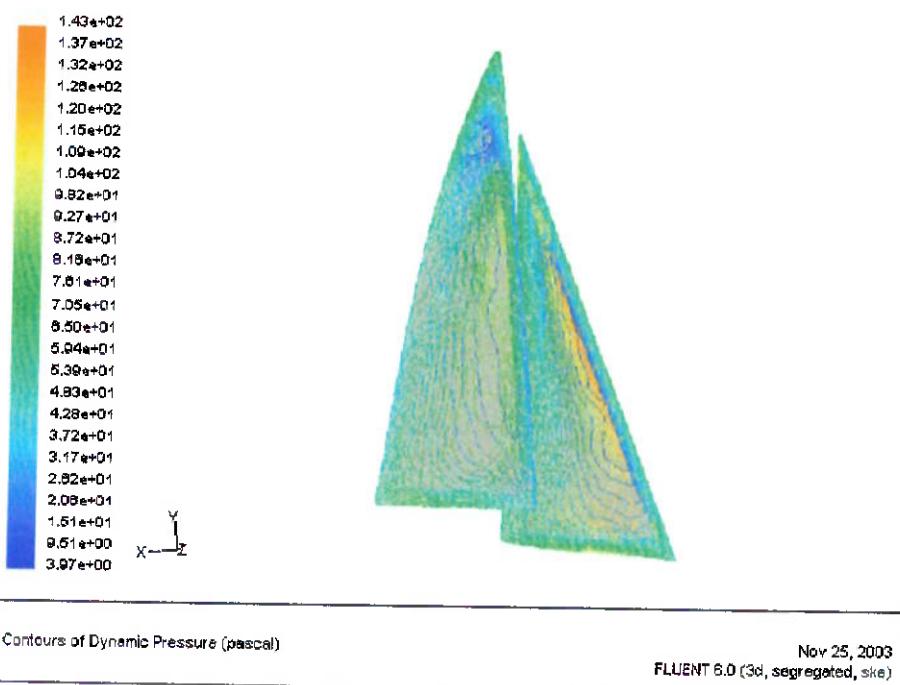
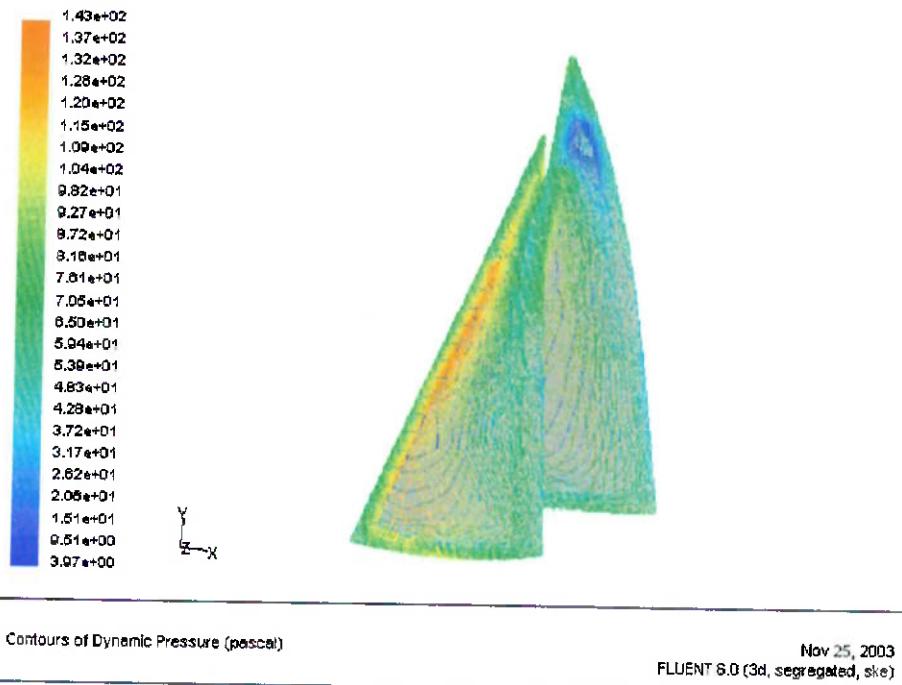


Vetores de velocidade coloridos pela magnitude da velocidade.



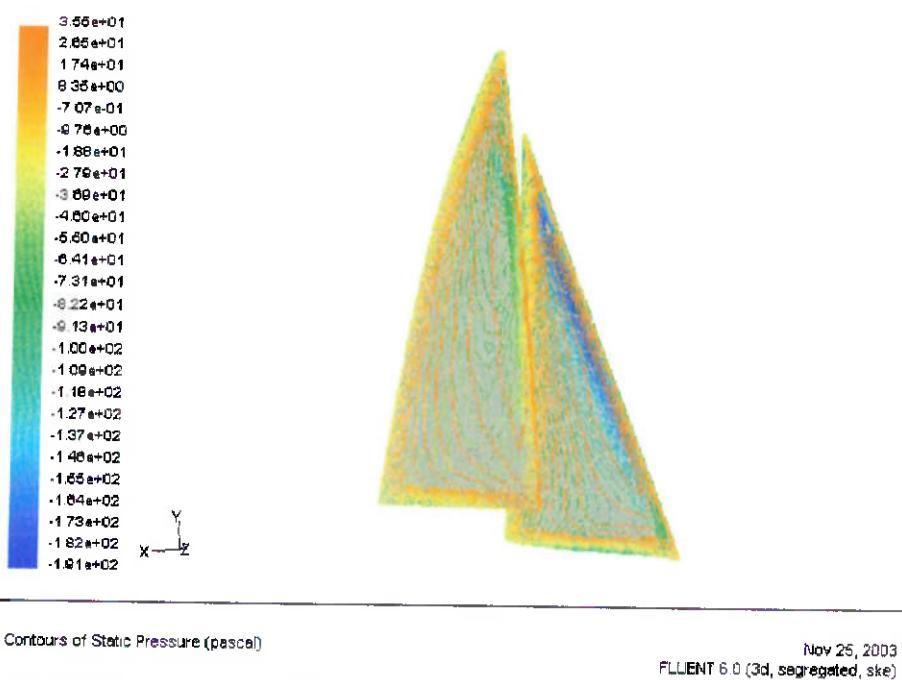
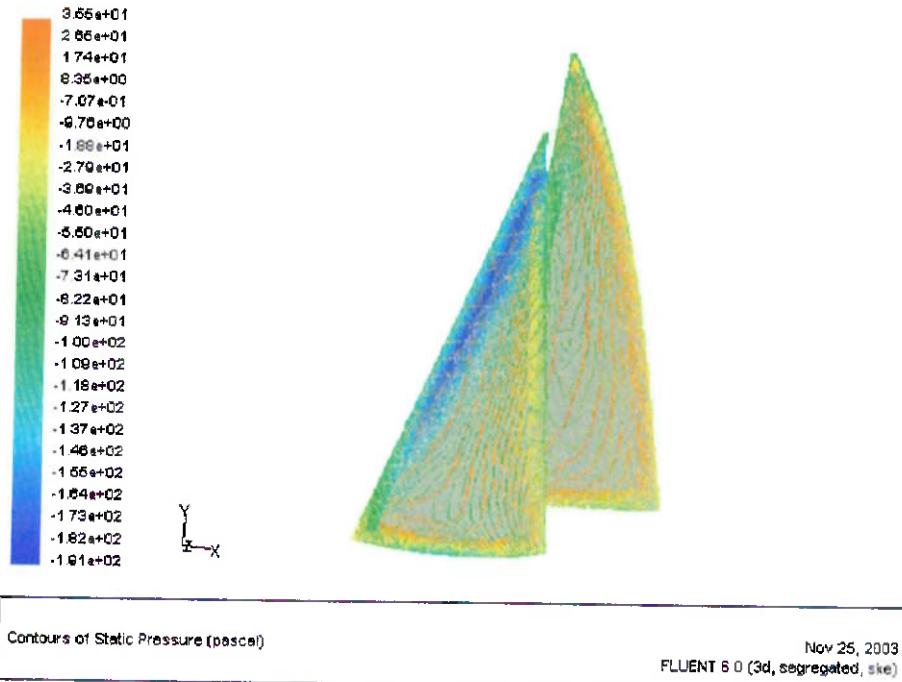


### Linhos de Contorno de Pressão Dinâmica





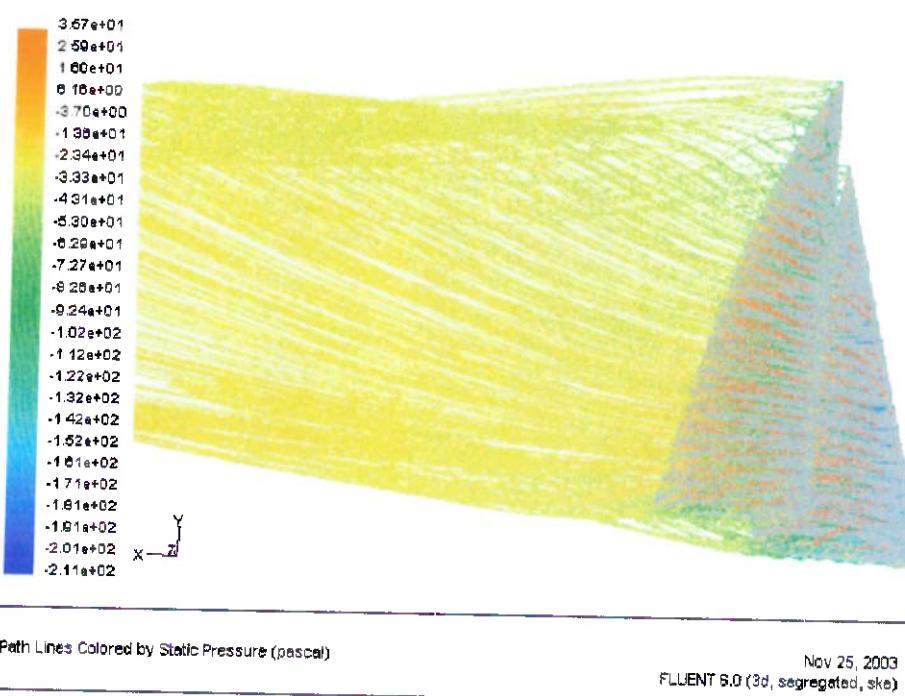
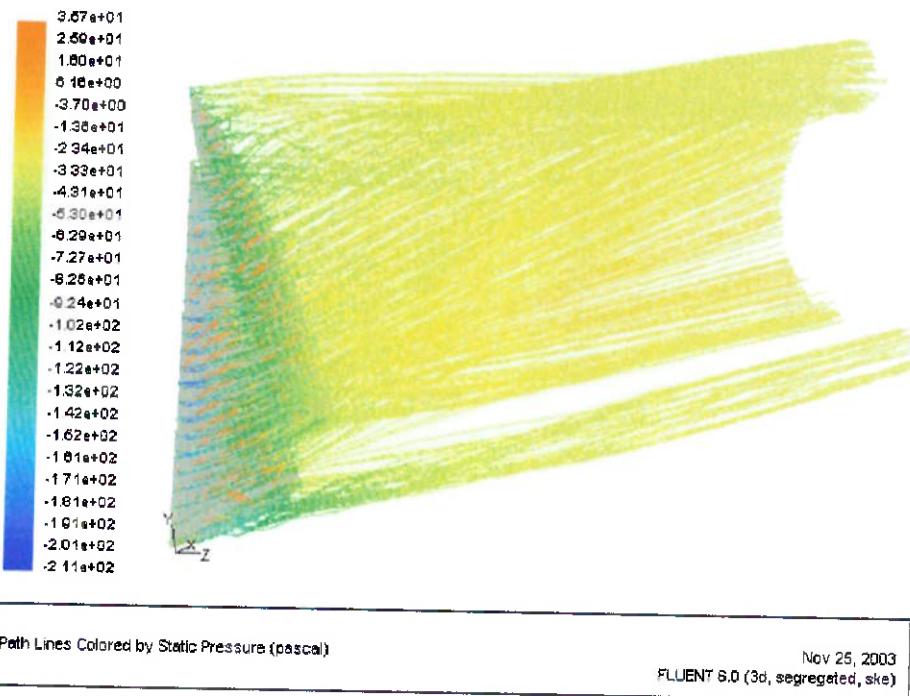
## Linhos de Contorno de Pressão Estática





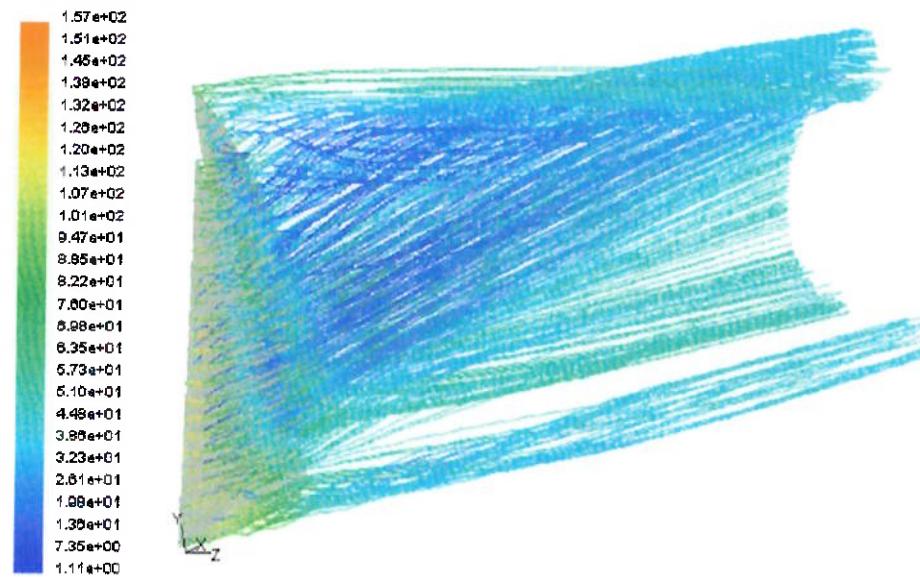
## SIMULAÇÃO 5 – VENTO À 35 GRAUS EM RELAÇÃO À VELA

Linhos de escoamento coloridas pelo gradiente de pressão estática.

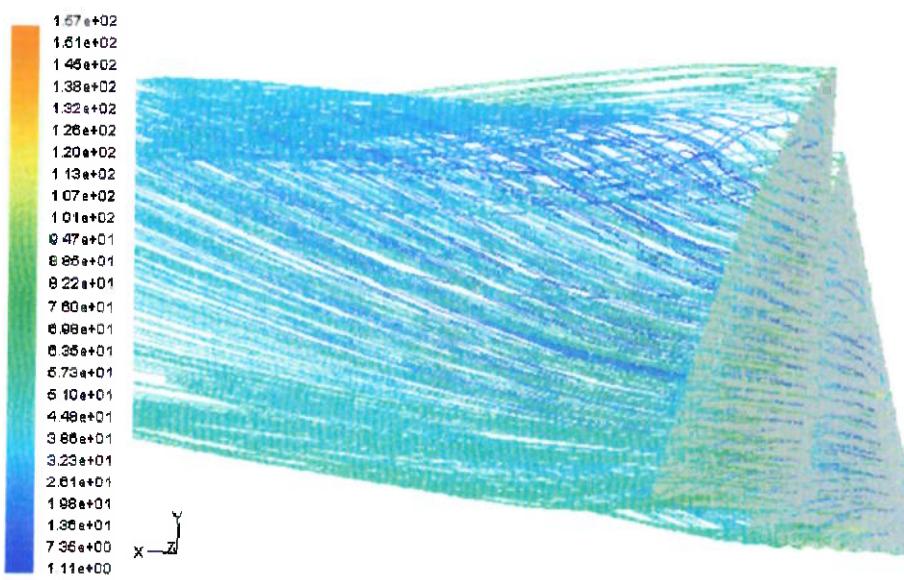




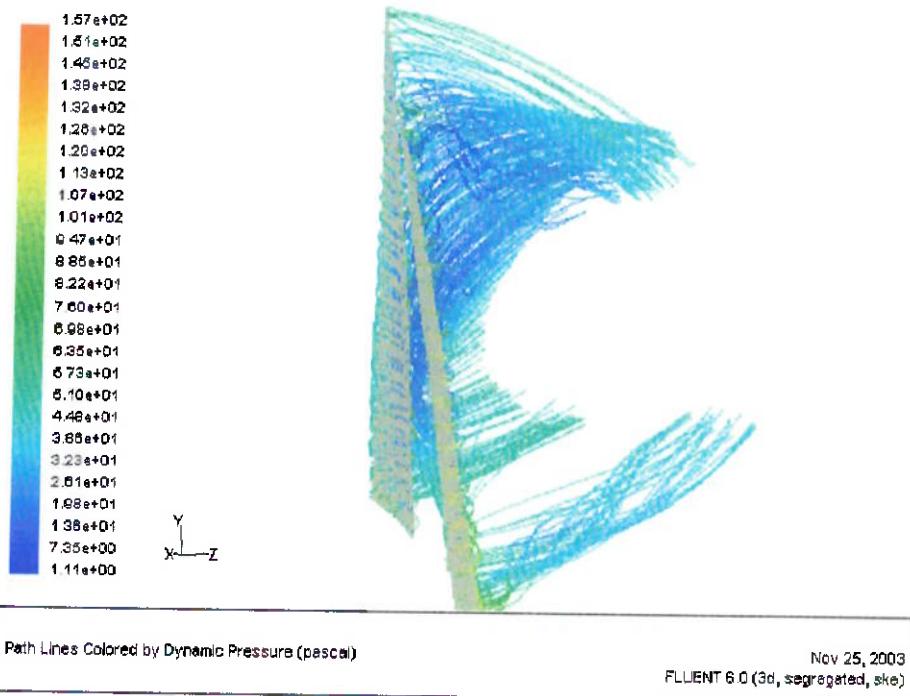
Linhas de escoamento coloridas pelo gradiente de pressão dinâmica.



Path Lines Colored by Dynamic Pressure (pascal) Nov 25, 2003  
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)

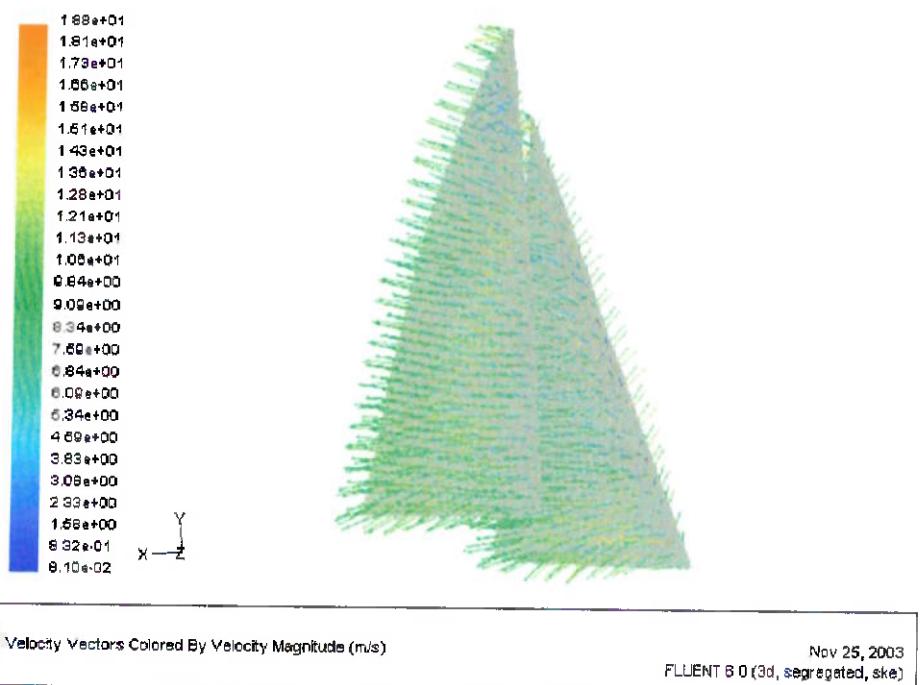
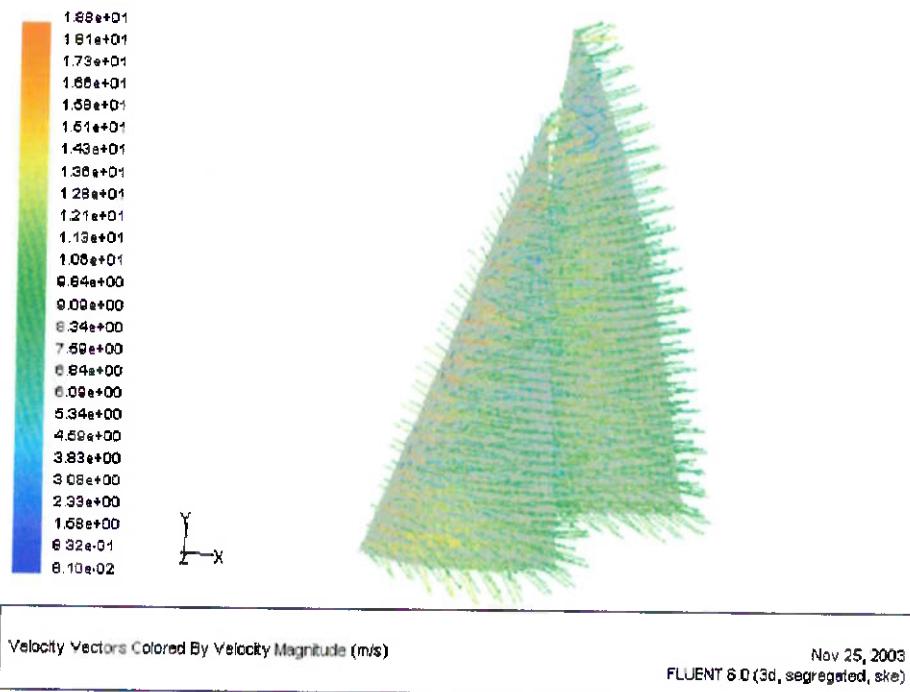


Path Lines Colored by Dynamic Pressure (pascal) Nov 25, 2003  
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)



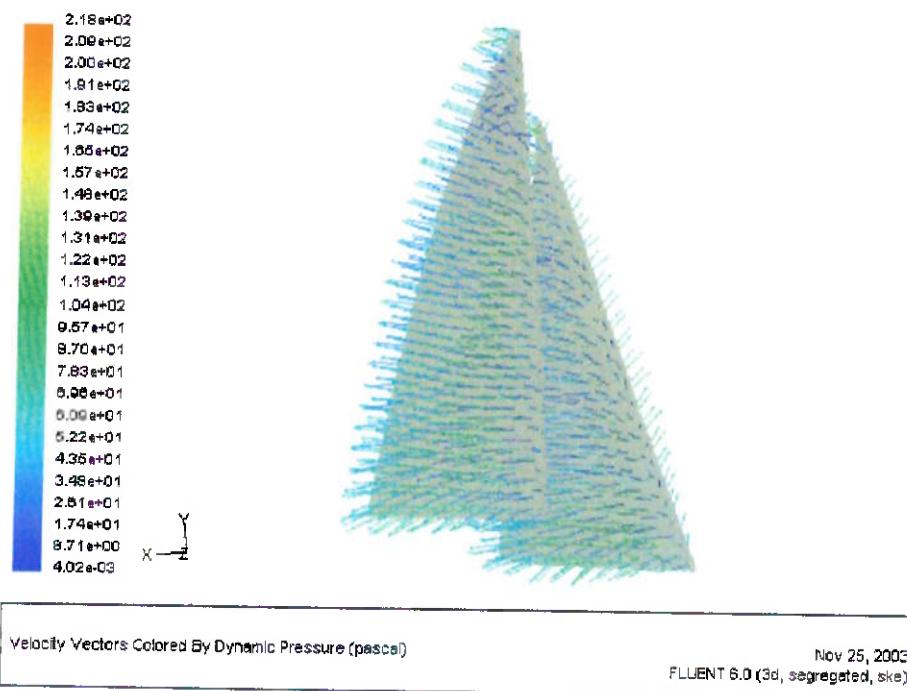
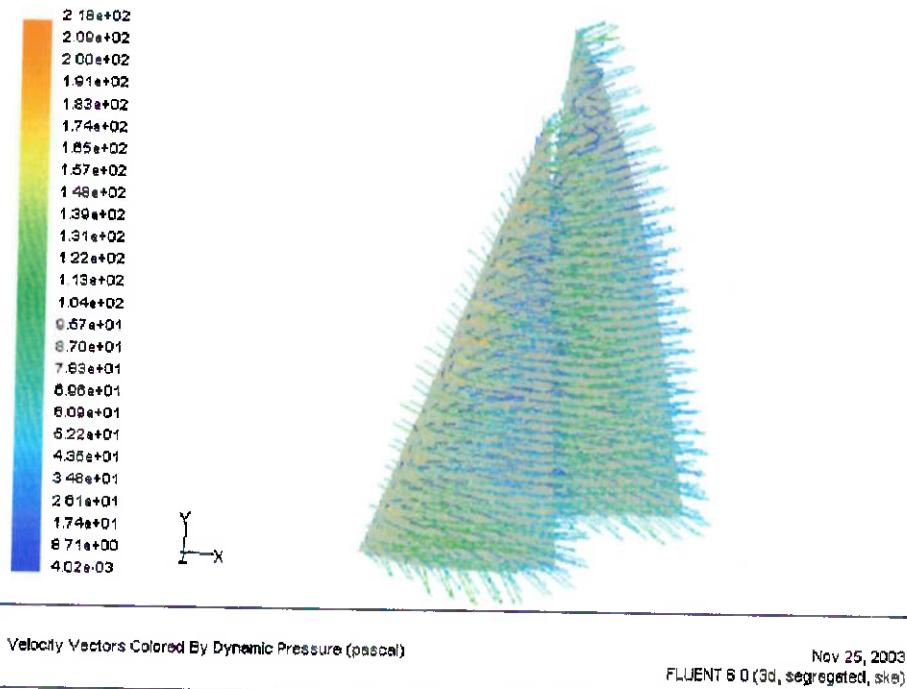


Linhos de velocidade coloridas pela magnitude da velocidade.



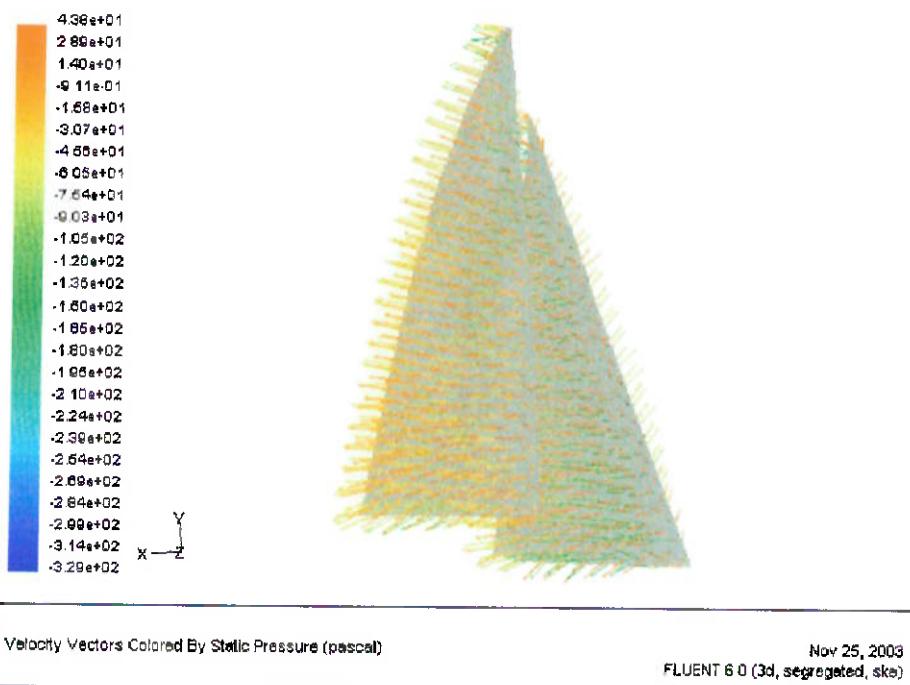
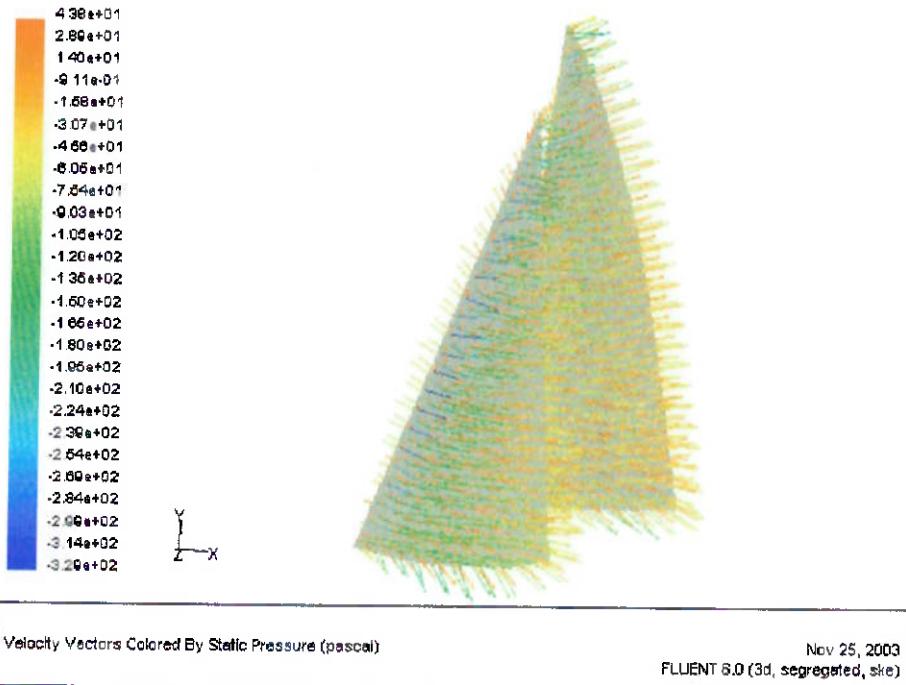


Vetores de velocidade coloridos pelo gradiente de pressão dinâmica.



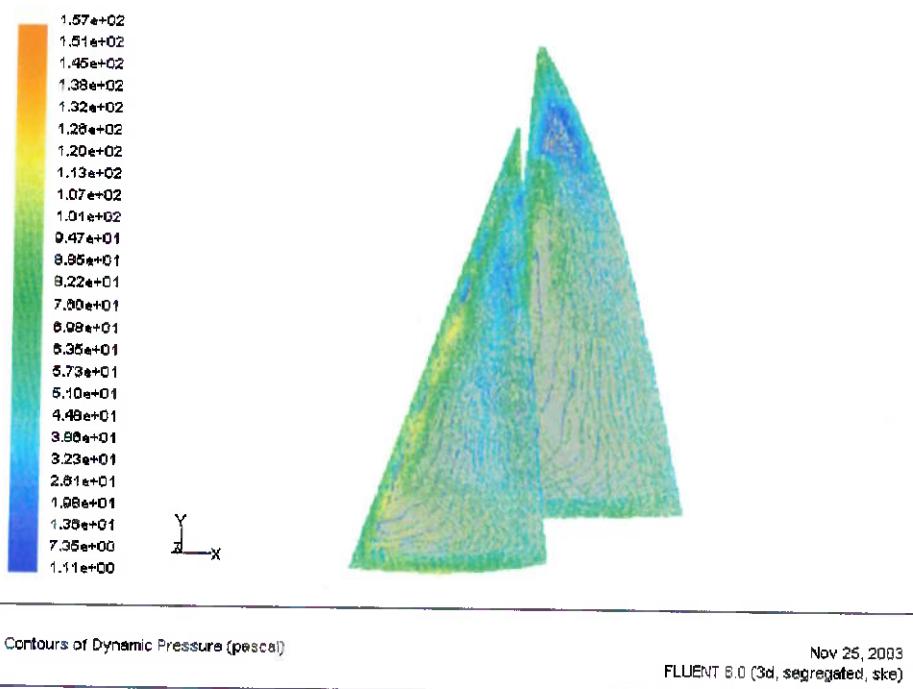
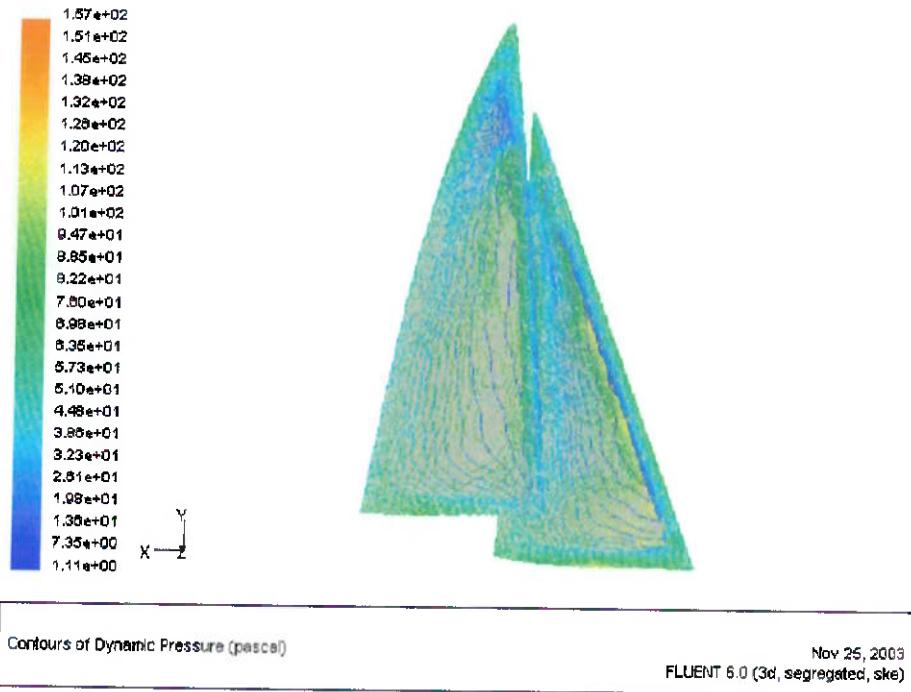


Vetores de velocidade coloridos pelo gradiente de pressão estática.



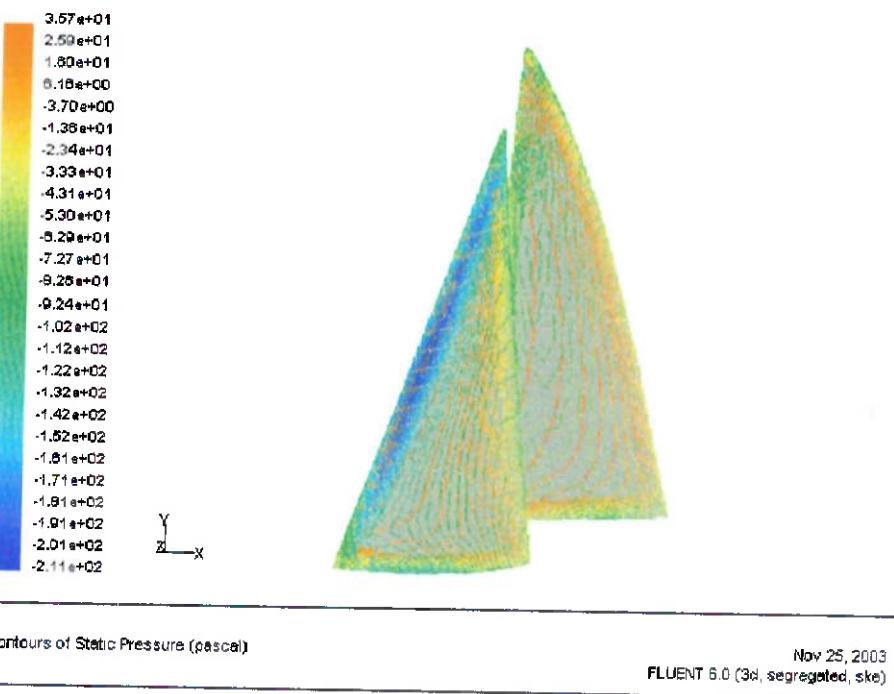
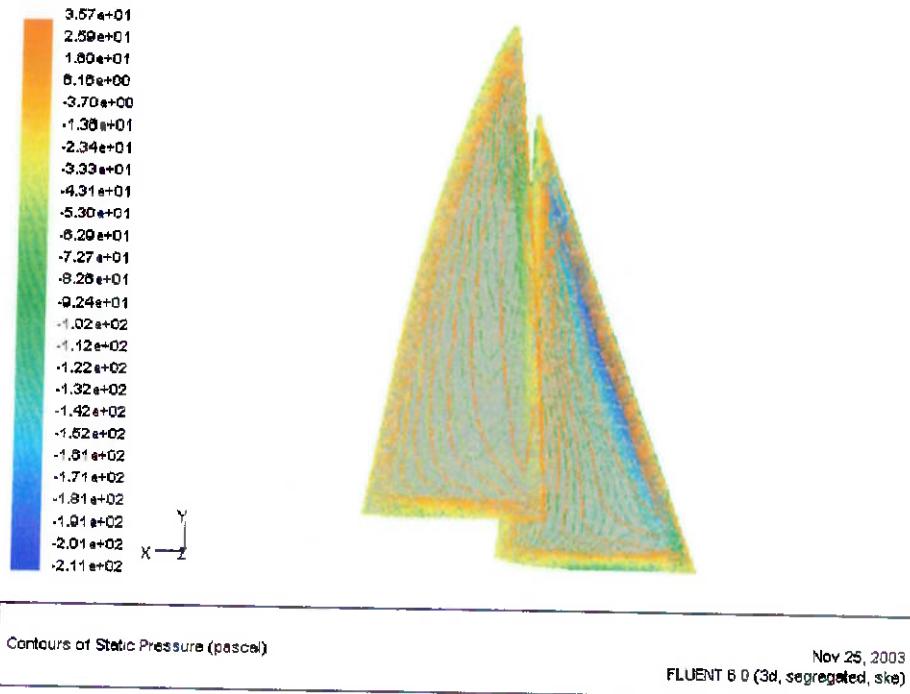


## Linhos de Contorno de Pressão Dinâmica





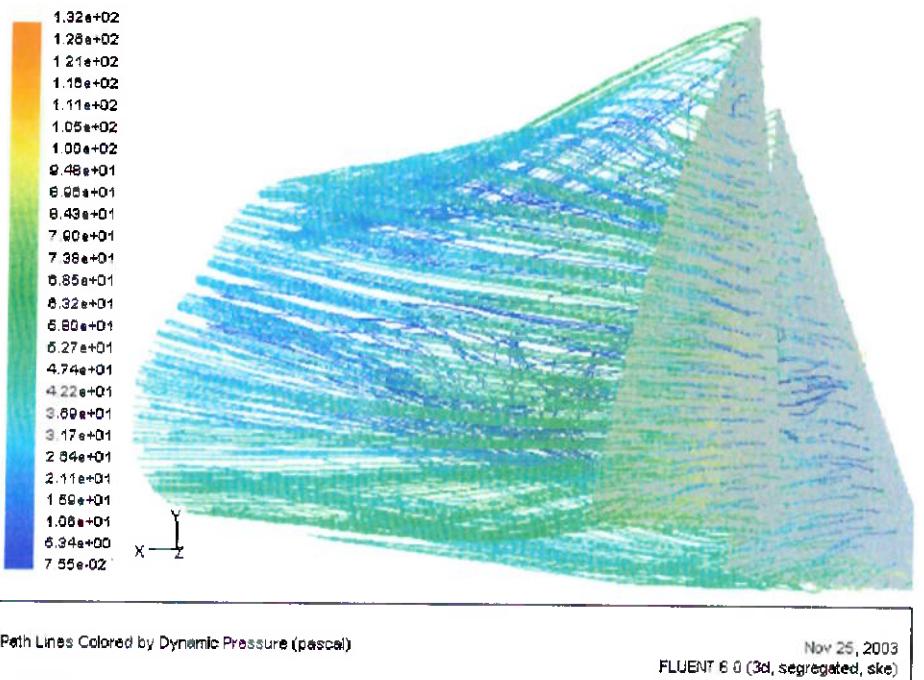
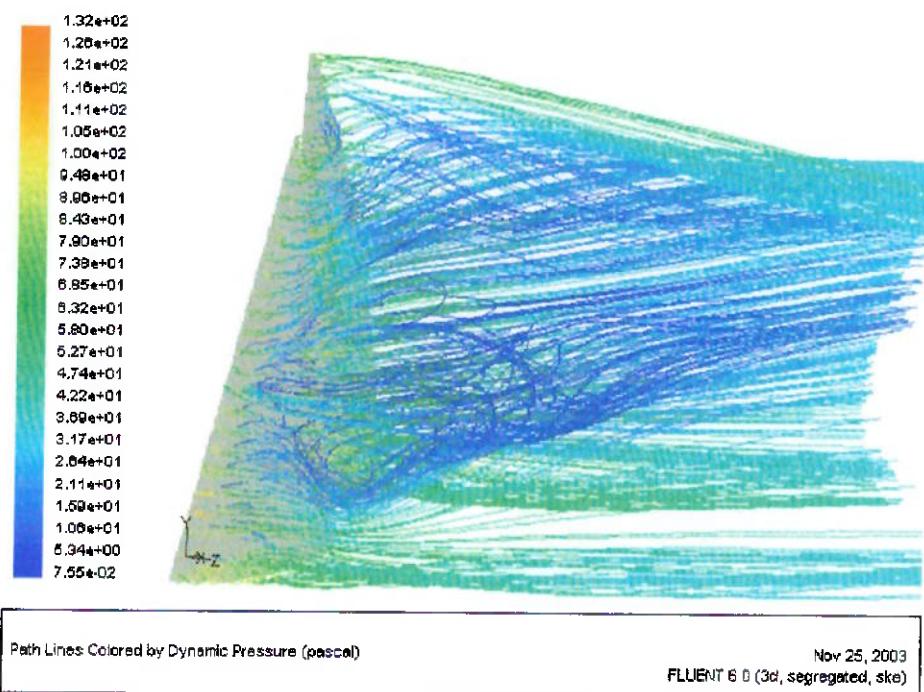
## Linhos de Contorno de Pressão Estática

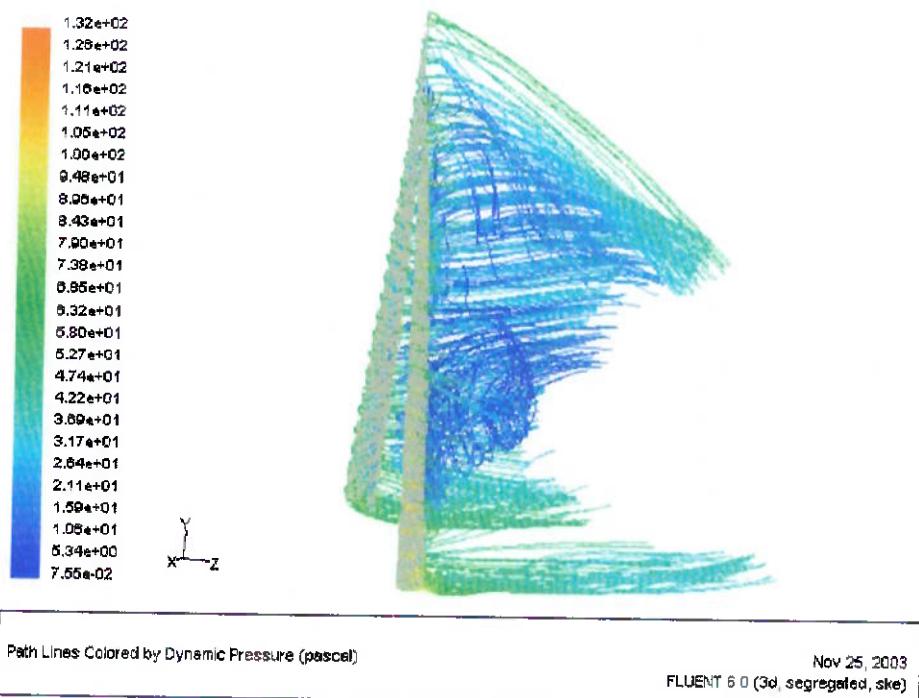




## SIMULAÇÃO 6 – VENTO À 40 GRAUS EM RELAÇÃO À VELA

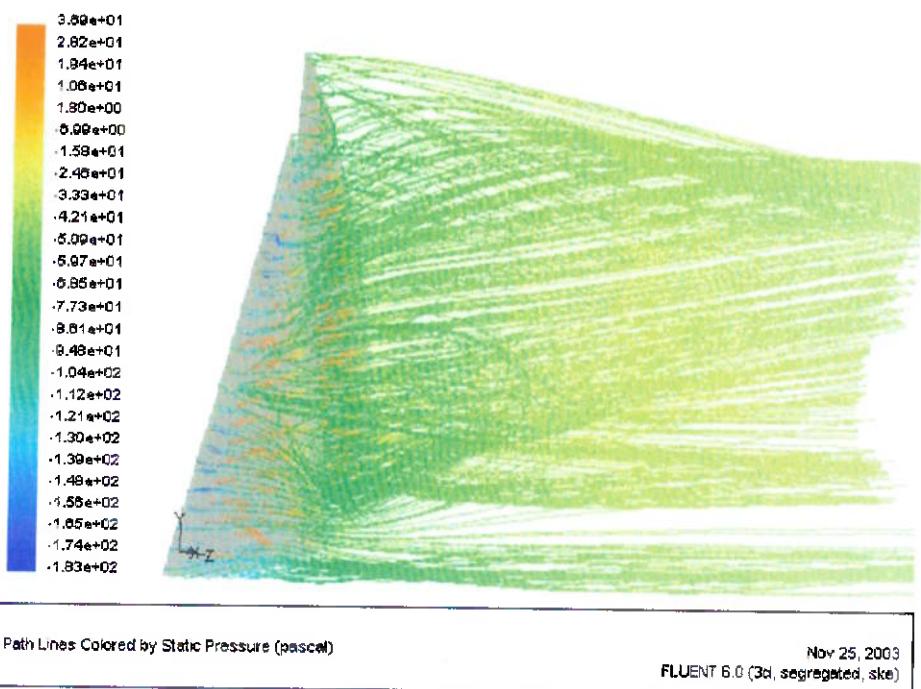
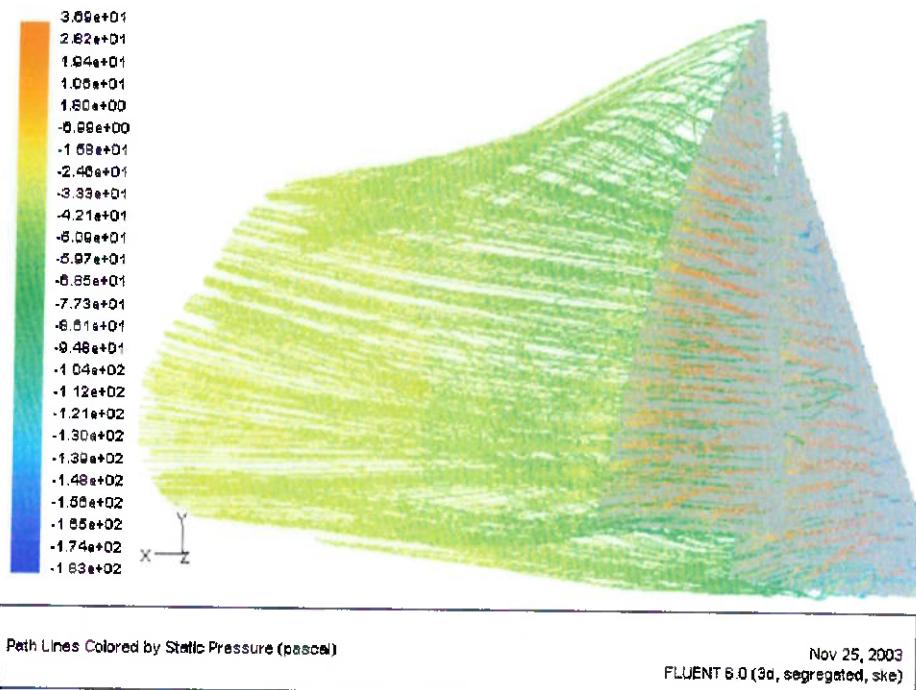
Linhos de escoamento coloridas pelo gradiente de pressão dinâmica.





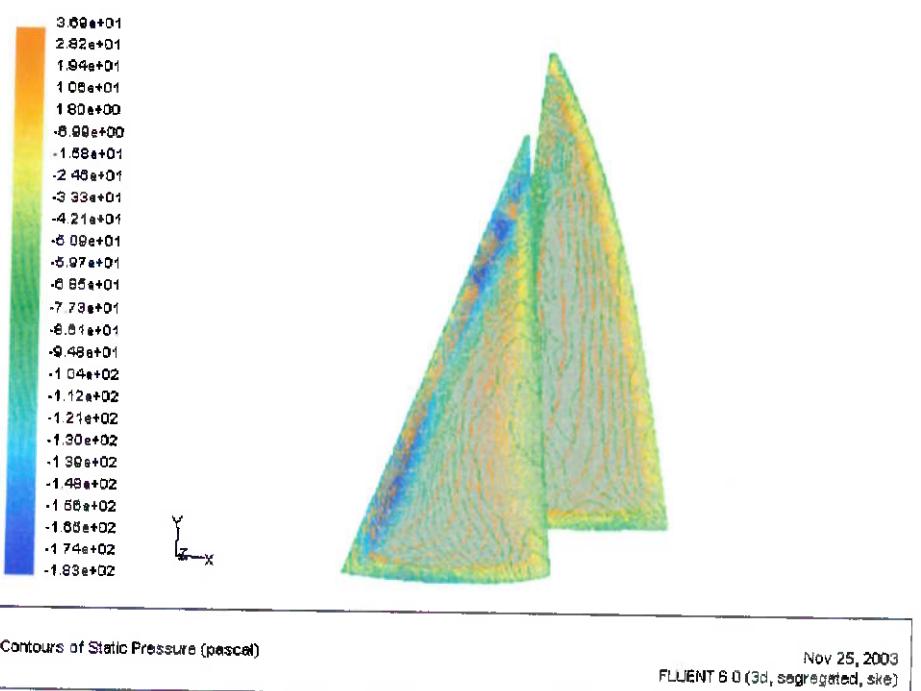
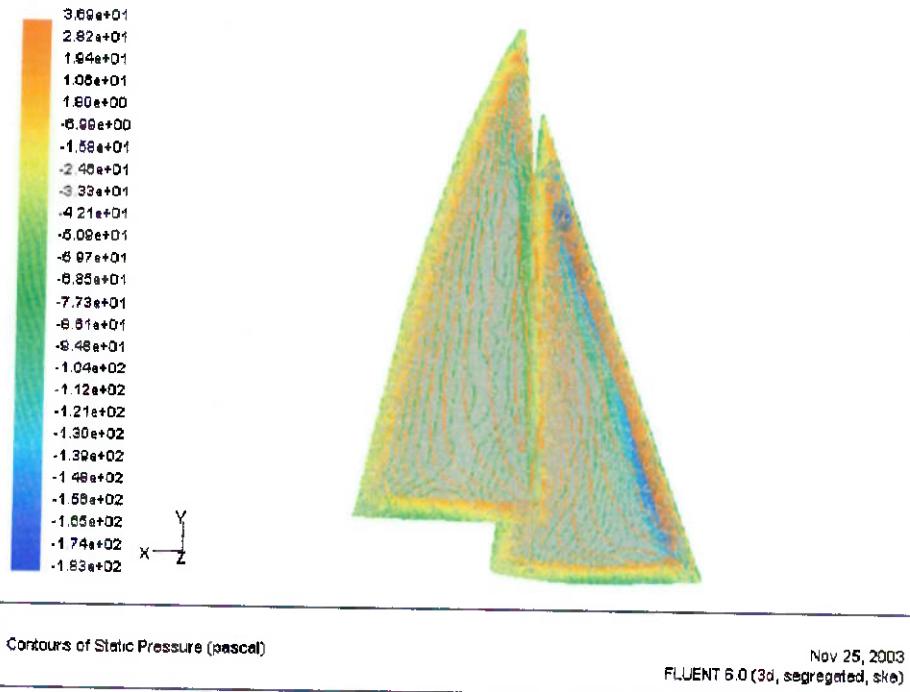


Linhas de escoamento coloridas pelo gradiente de pressão estática.



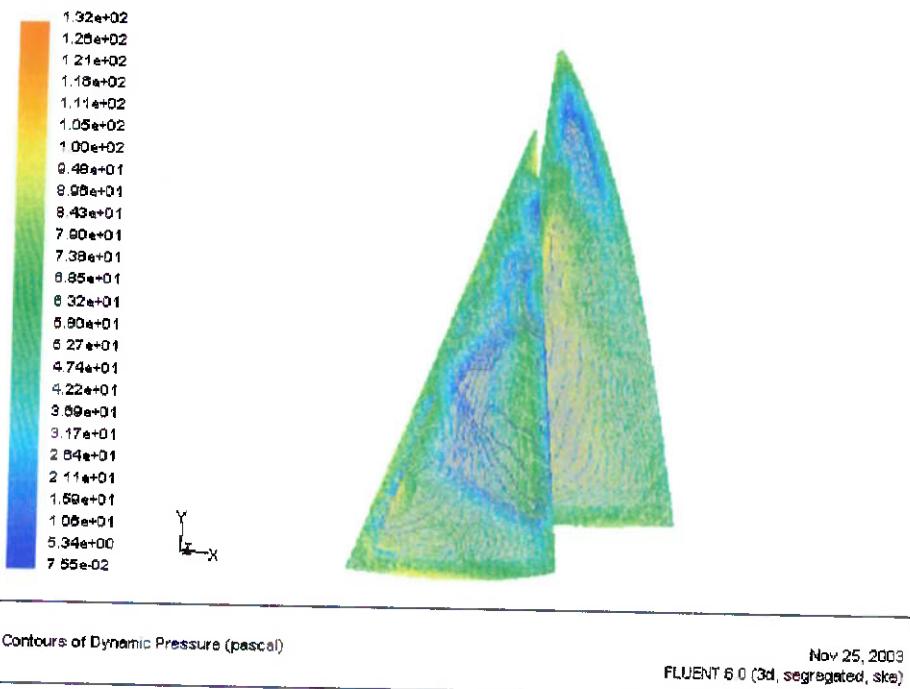
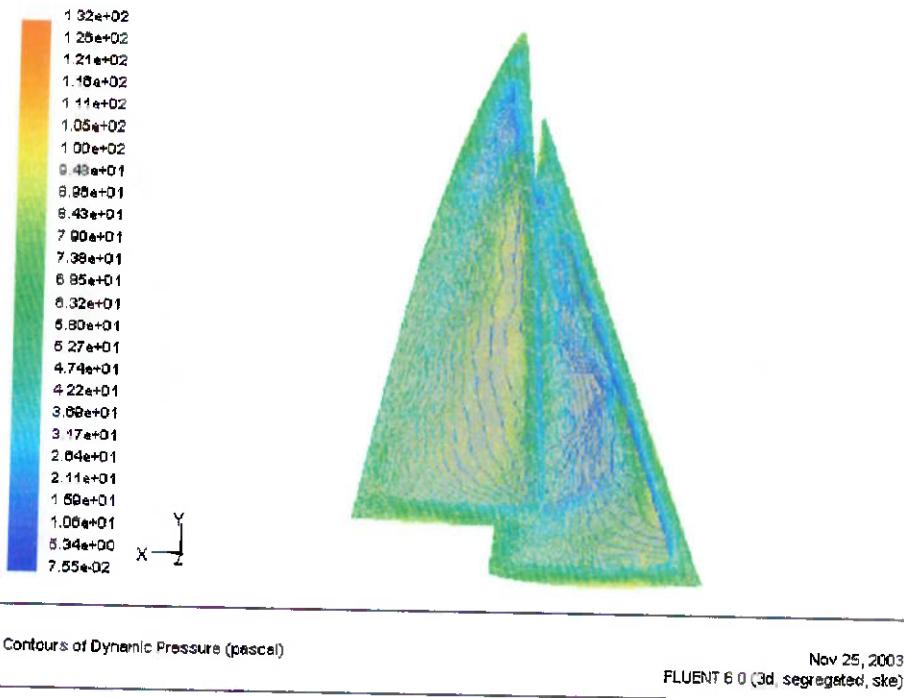


## Linhos de Contorno de Pressão Estática



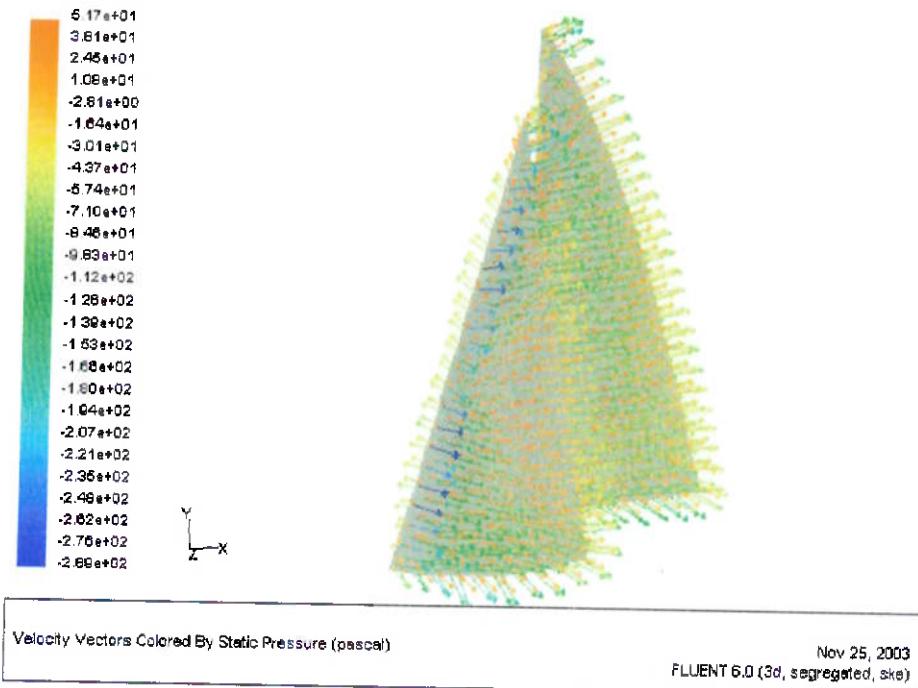
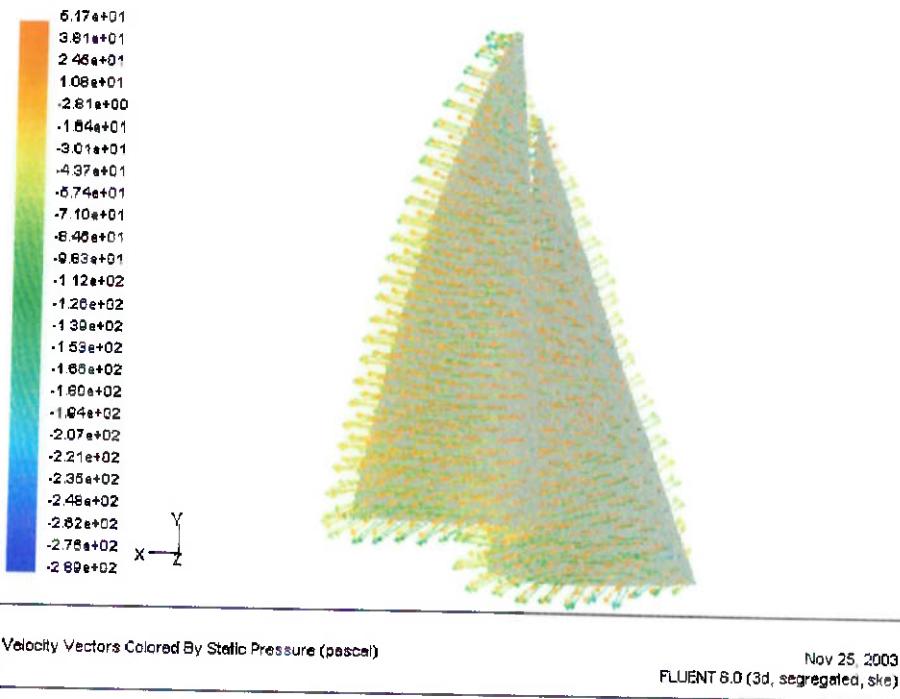


## Linhas de Contorno de Pressão Dinâmica



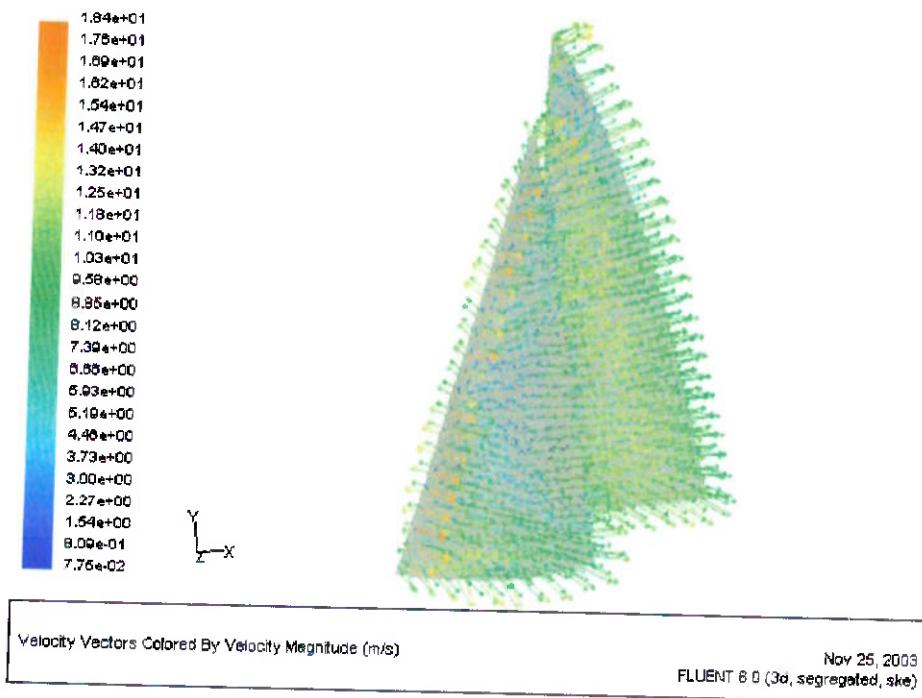
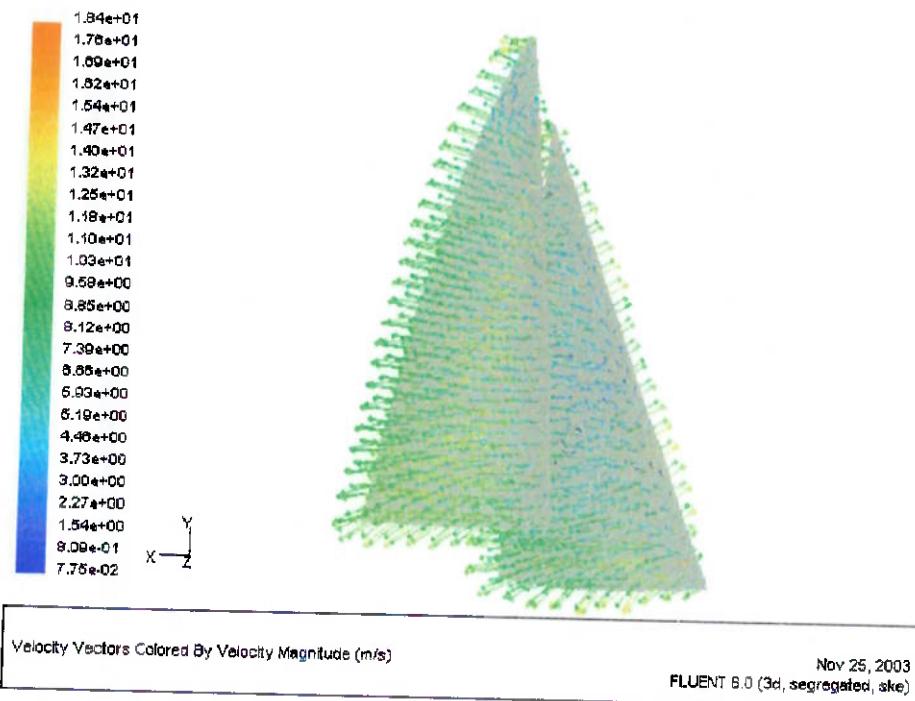


Vetores de velocidade coloridos pelo gradiente de pressão  
estática.



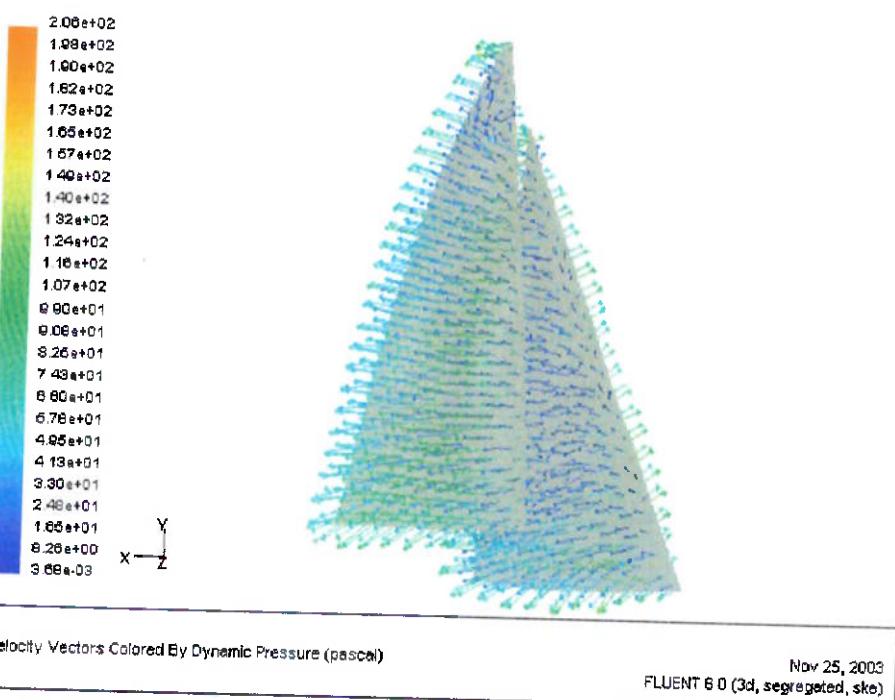
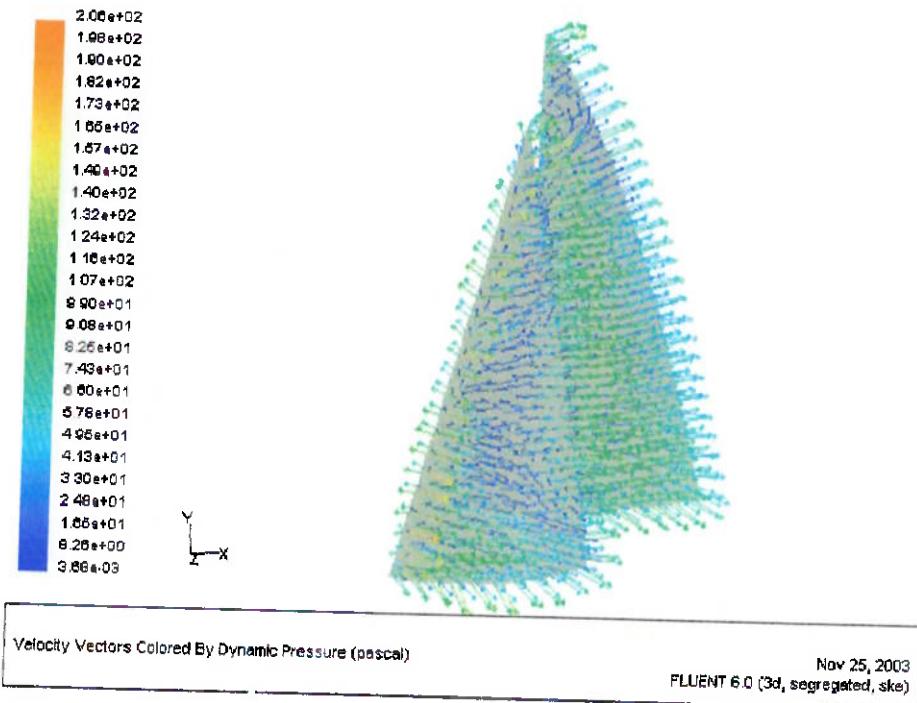


Vetores de velocidade coloridos pela magnitude da velocidade.





Vetores de velocidade coloridos pelo gradiente de pressão dinâmica.





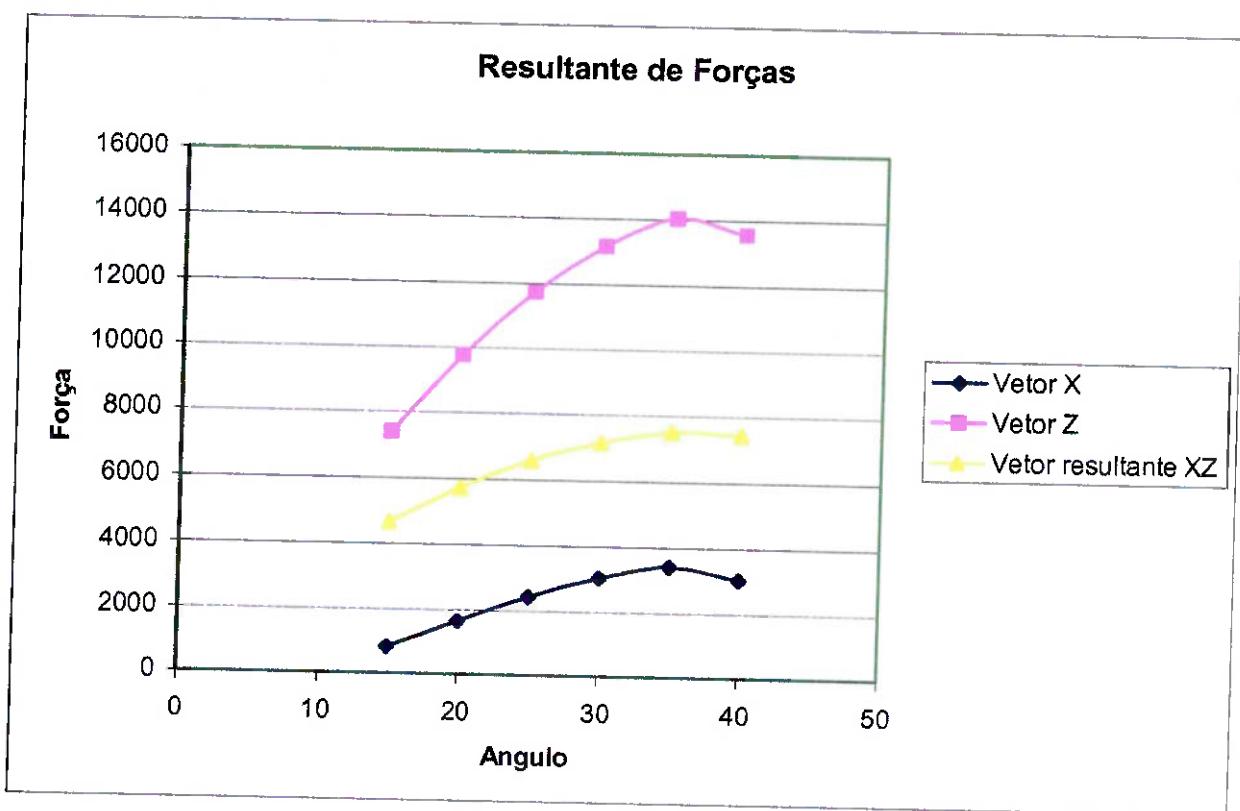
### 13. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após simularmos todas as condições escolhidas, analisamos os resultados obtidos através das figuras representadas na seção anterior.

Verificou-se que a simulação que apresentou resultados mais próximos aos teóricos, também apresentados neste trabalho, é a simulação de vento aparente de 30 graus.

Ainda fazendo uma comparação qualitativa, os recursos do fluent calcularam as integrais das resultantes de forças e obteve-se os resultados mostrados pelo Gráf. 1.

Gráfico 1 – Intensidade das forças de empuxo nas velas (calculado pelo Fluent).





No gráfico, é possível verificar que o ângulo que permite o melhor rendimento da embarcação é aquele em que o vento aparente incide sobre o perfil de vela sob um ângulo de 35 graus. Percebemos que, apesar dessa simulação apresentar as maiores componentes de força na direção do eixo Z, o que faria com que o barco adernasse (inclinasse) bastante, a força paralela ao eixo X é a maior, resultando, assim, em uma maior velocidade do barco.

Comparando com o certificado IMS do barco (anexado no final do trabalho), verificamos que para apresentar os melhores rendimentos, o ângulo da vela em relação ao vento aparente deve permanecer entre 25 e 35 graus, dependendo das condições de vento.

Um fator determinante para este ângulo ser maior ou menor é o “shape” (forma) apresentado pela vela. Quando o formato das velas é mais plano (baixo valor de curvatura), o ângulo em relação ao vento aparente é pequeno. Para o caso oposto, este ângulo é maior.

No caso das simulações apresentadas, pelos resultados obtidos, é possível dizer que este conjunto de perfis de velas possuem uma curvatura elevada (em termos náuticos, velas “barrigudas”). É provável que este conjunto de velas tenha sido projetado para condições de ventos fracos, onde a maior curvatura da vela permite um maior empuxo, mas o ângulo em relação ao vento real é maior.

Fazendo uma analogia com uma aeronave, este conjunto de vela funcionaria como uma asa com flaps abaixados.



## 14. CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentou-se o uso de uma poderosa ferramenta de desenvolvimento que tem inúmeras utilidades no ramo da vela oceânica.

Uma das maiores vantagens de se utilizar um programa como o Fluent para a análise de um perfil de vela é a economia de tempo e dinheiro. O software substitui de forma muito satisfatória as experiências reais realizadas em túneis de vento. O Fluent apresenta ainda outra vantagem, como o recurso de cálculo de forças e esforços. Apesar destes cálculos não serem totalmente confiáveis, eles são muito úteis para a obtenção de resultados qualitativos e para se ter uma idéia da ordem de grandeza dos esforços presentes.

Sendo assim, com o mercado de embarcações com propulsão à vela em ascensão no Brasil, as oportunidades futuras que este trabalho poderá proporcionar aos autores são enormes.

Quanto aos resultados obtidos, foi verificada a eficiência da utilização desta metodologia como forma de estudo do desempenho de perfis de vela, permitindo a comprovação de muitas das teorias apresentadas na parte inicial do trabalho.

As limitações e simplificações que o projeto apresentou existiram apenas para simplificar a utilização do software. A inclusão de inúmeras variáveis traria apenas dificuldades aos autores, tanto na correta inclusão da variável, como na verificação da influência destas no desempenho apresentado pelas velas.

Apesar de obtermos dados para apenas um único conjunto de perfis de vela (uma principal e uma genoa), com a conclusão do trabalho, os alunos participantes estão aptos para trabalhar, tanto com



o software de simulação que foi utilizado, quanto com as teorias de mecânica dos fluidos que regem o comportamento e o desempenho das velas (das embarcações), permitindo, dessa maneira, que outros perfis (ou conjunto de perfis) de vela sejam ensaiados de forma rápida e eficiente no computador, aumentando, assim, a base de dados com que se poderá trabalhar no futuro.



## 15. BIBLIOGRAFIA

- 1 - Fox & McDonald, Introdução à Mecânica dos Fluidos.
- 2 - Streeter, V.L., Mecânica dos Fluidos,
- 3 - Fernandes, O., Prof. Assistente de Mecânica dos Fluidos,  
'Apostila de Mecânica dos Fluidos II – Coletânea de Exercícios',  
EPUSP, Cap.12, 1996.
- 4 - Tutoriais dos softwares Gambit e Fluent.
- 5 - Maliska, Computing Fluent Desing.
- 6 - Claughtow, Wellicome & Shenoi, Sailing Yacht Design – Theory,  
England, 1998
- 7 - Claughtow, Wellicome & Shenoi, Sailing Yacht Design – Practice,  
England, 1998
- 8 - Marchaj, C.A., 'Sail Performance – Techniques to Maximize Sail  
Power', Ed. Internacional Marinew, London, 1996.
- 9 - Site da fabricante de velas North Sails - [www.northsails.com](http://www.northsails.com)
- 10 - Site do projetista de veleiros Soto – [www.sotoacebal.com](http://www.sotoacebal.com)



## GLOSSÁRIO DE PALAVRAS (INGLÊS – PORTUGUÊS)

Above	-	acima
Aspect Ratio	-	proporção de aspecto
Average	-	média
Backwinding	-	panejar, flamular
Boundary layer	-	camada limite
Broad	-	largo, amplo, extenso
Camber	-	curvatura
Chord	-	“corda” (maior comprimento da vela)
Crew	-	tripulação
Close Hauled	-	máximo ângulo de curso navegável contrário ao vento
Course Sailed	-	Curso navegado pela embarcação
Dead air	-	parte do escoamento de fluido que não realiza trabalho
Drag	-	arrasto
Driving	-	empuxo
Effort	-	esforço, empenho
Eventually	-	finalmente, eventualmente
Feet	-	pés



Followed	-	seguido
Forsail	-	genoa
Forward	-	para frente
Gunwale	-	amurada
Heaving	-	movimento da embarcação. Veja Fig. 3.
Heel	-	inclinação
Height	-	altura
Human effectiveness	-	capacidade humana para o trabalho
Knots	-	medida de velocidade náutica
Leading edge	-	borda de ataque
Leech	-	valuma da vela, final da corda do perfil
Leeward side	-	lado oposto à incidência da vela (sotavento)
Luff	-	testa da vela, curvatura frontal do perfil
Mast	-	mastro
Pitching	-	movimento da embarcação. Veja Fig. 3.
Rainbow	-	arco-íris
Required	-	requerido
Rolling	-	movimento da embarcação. Veja Fig. 3.
Sea	-	mar



---

Sleep	-	dormir
Slightly	-	leve, ligeiro, insignificante, superficial
Speed	-	velocidade
Steady Flow	-	fluxo de ar estacionário
Strenuous	-	vigoroso, persistente, árduo, difícil
Suction	-	sucção
Surging	-	movimento da embarcação. Veja Fig. 3.
Swaying	-	movimento da embarcação. Veja Fig. 3.
Thickness	-	espessura
Thwart	-	transversal, transverso
Track	-	trilha, rastro
True	-	verdade, verdadeiro
Useful	-	útil
Undesirable	-	indesejável
Unsteady flow	-	parte do escoamento instável
Wind	-	vento
Windward side	-	lado de incidência do vento na vela (barlavento)
Yacht	-	barco
Yawing	-	movimento da embarcação. Veja Fig. 3.