

# Projeto de NM7131

## (ESTUDO AERODINÂMICO DO CUBO DO ROTOR DE UM GERADOR EÓLICO)

Bruno Itiro Miyata - 12.115.633-5

Juliana Sayuri Inacio – 12.115.317-5

Renato Franzina – 12.215.042-8

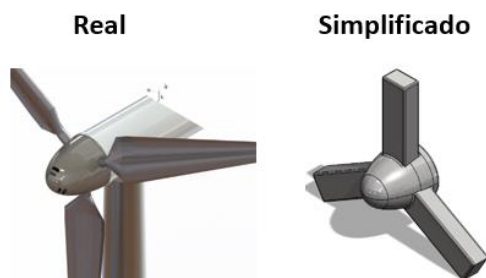
Pablo Ricardo de Abreu - 12.115.069-2

*Este artigo tem como propósito estudar o escoamento do ar em diferentes geometrias do cubo de um rotor eólico afim de avaliarmos sua influência na força de arrasto do conjunto.*

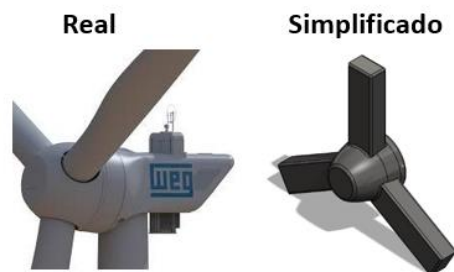
### 1. INTRODUÇÃO

Nesse trabalho foi estudado o comportamento aerodinâmico do cubo de um rotor eólico em função de sua geometria, utilizando dois métodos para a validação do estudo: método computacional e método experimental.

O grupo tomou como base dois parâmetros geométricos, sendo eles: modelo 1 que consiste em um bico mais ovalizado (Figura 1) e modelo 2 contendo no bico uma área de seção transversal plana (Figura 2), gerando a partir de modelos reais, modelos simplificados e em menor escala para viabilizar os ensaios.



*Figura 1 – Modelo 1 para simulação*



*Figura 2 - Modelo 2 para simulação*

Para a validação dos parâmetros simulados, foi confeccionado o sólido em material ABS por meio de manufatura aditiva em uma impressora 3D, sendo ensaiado no túnel de vento afim de se obter os dados experimentais.

O modelo impresso (Figura 3) foi lixado e polido afim de garantir a menor rugosidade possível e eliminar ao máximo as variáveis de erro.



*Figura 3 - Modelo 1 impresso 3D*

2. METODOLOGIA, EXPERIMENTOS E RESULTADOS

2.1 OBJETIVO

Estudar o comportamento aerodinâmico do cubo de um rotor eólico com a finalidade de determinar como a geometria do cubo influencia na força de arrasto, fluxo do escoando do ar no sólido e intensidade da pressão nas pás, através dos métodos computacionais e cálculos aprendidos ao longo do curso juntamente aos recursos disponibilizados pela Universidade conhecidos até o presente momento.

2.2 MEMORIAL DE CALCULOS

As geometrias utilizadas neste estudo buscam representar os modelos convencionais de turbinas eólicas de eixo horizontal já existentes no mercado. Como o estudo foi direcionado ao cubo do rotor, e não às pás (observou-se nas pás apenas a distribuição de velocidade e variação de pressão devido a alteração de forma do cubo do rotor), as pás foram simplificadas por paralelepípedos com a finalidade de não as fraturar no ensaio do túnel de vento, além de facilitar a impressão 3D e também os cálculos para o coeficiente de arrasto, que varia conforme a geometria da pá, que por sua vez varia de acordo com o fabricante. Por conta disso, os cálculos ficam em função da área projetada.

EXPERIMENTO PRÁTICO

Antes de se iniciar as simulações no CFX, foi confeccionado um protótipo em material ABS e acabamento polido através de impressão 3D (e garantido precisão na geometria) no qual a geometria do modelo 1 (Figura 1) foi escolhida para o experimento.

Foi inserido uma haste de 4mm na região inferior do modelo para viabilizar a fixação na célula de carga do túnel de vento, sendo registrados os valores de força de arrasto (Fa) em função da velocidade (V), conforme observado na Figura 4.



Figura 4 - Modelo 1: Ensaio no Túnel de vento

Inicialmente tarou-se a balança para que a haste não influenciasse no ensaio (Figura 5).



Figura 5 - Tara da Balança

Utilizou-se como base para as simulações no ANSYS os dados coletados em relação a velocidade de 23,8 m/s conforme tabela 1 (destacados em vermelho).

Tabela 1 - Dados Coletados (Túnel de Vento)

Aceleração (m/s)	V (m/s)	Fa Modelo 1		Fa Haste	
		[Kg]	[N]	[Kg]	[N]
9,8	23,8	0,105	1,00	0,009	0,088
	21,9	0,088	0,83	0,008	0,078
	19,3	0,072	0,71	0,006	0,059

PROPRIEDADES DO FLUÍDO E CÁLCULOS GERADOS:

Foi determinado as propriedades do fluido a partir de dados coletados do livro *Princípios de Transferência de*

calor(Frank Kreith), porém foi usado na simulação as propriedades à temperatura de 25°C, enquanto a tabela usada está em divisões de 20°C. Com isso os valores foram interpolados com o intuito de chegar aos resultados com maior precisão.

Para a massa específica ( $\rho$ ) foi encontrado os seguintes valores:

- $\rho$  a 20°C:  $1,164 \frac{Kg}{m^3}$ ;
- $\rho$  a 40°C:  $1,092 \frac{Kg}{m^3}$ ;

Ao se fazer a interpolação, é obtido:

$$\frac{1,164 - 1,092}{20 - 40} = \frac{1,164 - \rho}{20 - 25}$$

$$\rho \text{ a } 25^\circ\text{C}: 1,146 \frac{Kg}{m^3}$$

Foi realizado esse mesmo procedimento para ser encontrada a viscosidade cinemática:

- $\nu$  a 20°C:  $15,7 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$ ;
- $\nu$  a 40°C:  $17,6 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$ ;

Ao resultar em  $\nu$  a 25°C =  $16,175 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$

Com isso, foi possível determinar o coeficiente de arrasto, ao utilizar a força de arrasto gerada na simulação CFX e pelo experimento. Porém, foi necessário conhecer se houve o descolamento da camada limite. Para isso, se determinou o N° de Reynolds para garantir as condições impostas:

Para Reynolds, temos:

- $Re_D = \frac{V * D}{\nu}$  (para o rotor);
- $Re_L = \frac{V * L}{\nu}$  (para as pás);

Ao usar o diâmetro D de 31,5mm e espessura L de 10mm(Figura 6) se calculou o Reynolds (foi multiplicado o valor de  $Re_L$  por 3, uma vez que são 3 pás) e obtivemos um valor de  $9,04 * 10^4$ , ou seja, foi garantido o regime laminar.

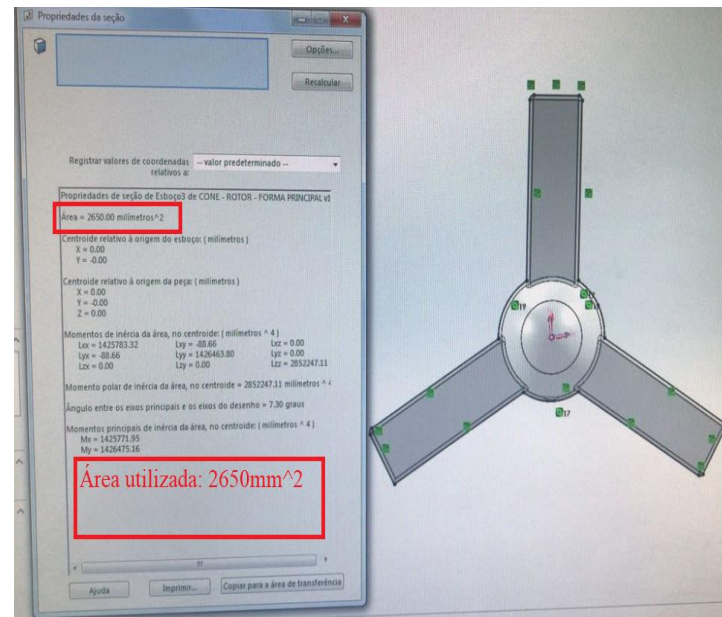


Figura 6- Área projetada

Sabia-se que:

$$Fa = \frac{Ca * \rho * V^2 * A}{2};$$

Se utilizou a área da figura 6 para se determinar os coeficientes, a maior velocidade( 23,8m/s) e o  $\rho_{25^\circ\text{C}}$ ( 1,146Kg/m³):

$$Fa_{CFX} = \frac{Ca_{CFX} * \rho * V^2 * A}{2} \rightarrow Ca_{CFX} = 0,639, \text{ para } Fa_{CFX} = 1,1 ;$$

$$Fa_{Exp} = \frac{Ca_{Exp} * \rho * V^2 * A}{2} \rightarrow Ca_{Exp} = 0,581, \text{ para } Fa_{Exp} = 1,0;$$

Com isso foi encontrado o erro percentual:

$$E\% = \frac{Ca_{CFX} - Ca_{Exp}}{Ca_{CFX}} * 100\% = 9,07\%$$

## SIMULAÇÃO NO CFX-ANSYS: MODELO 1

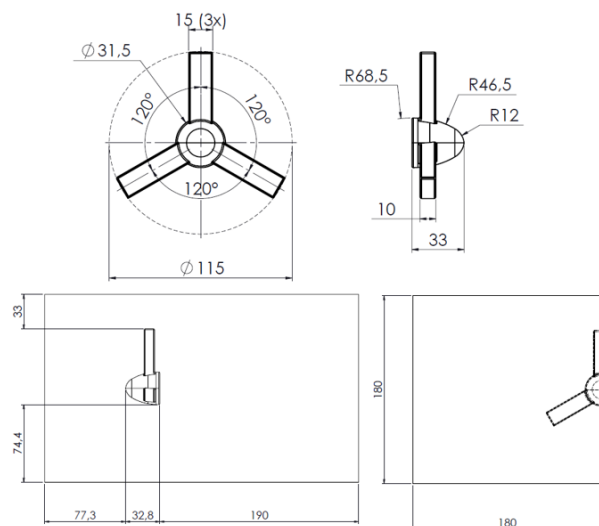


Figura 7- Far Field

## CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para uma simulação concisa foi necessário a definição das condições de contorno, para isso logo a seguir o processo que foi utilizado. A partir da figura 8 até a figura 12 foi definido cada área do sólido e como essa área iria se comportar.

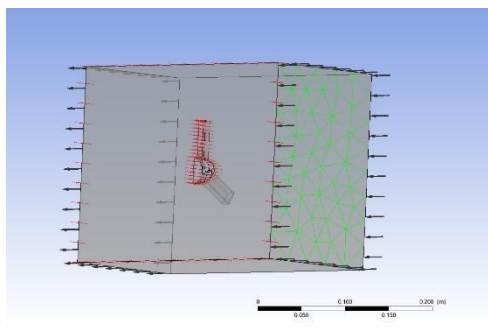


Figura 8 - Face de entrada (velocidade de 23,8m/s)

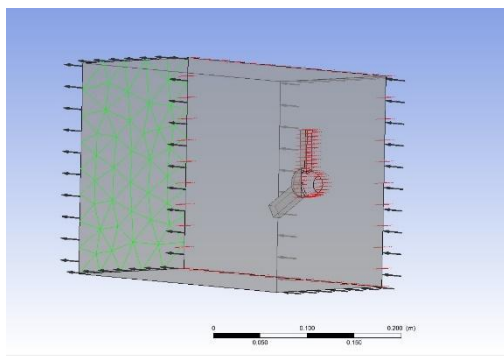


Figura 9- Face de saída (Pressão igual a 0)

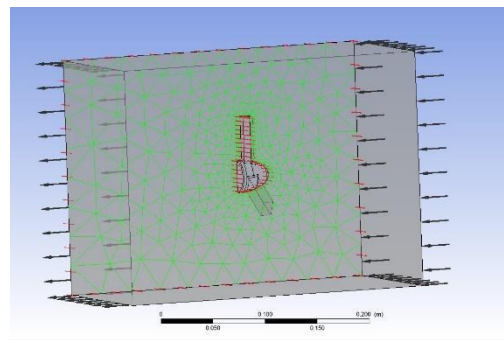


Figura 10 - Face de simetria (face que não influencia nos resultados)

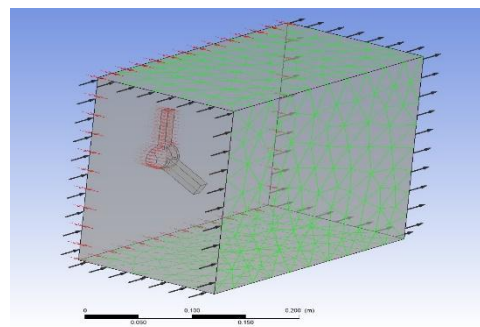


Figura 11 - Faces consideradas como paredes de deslizamento livre

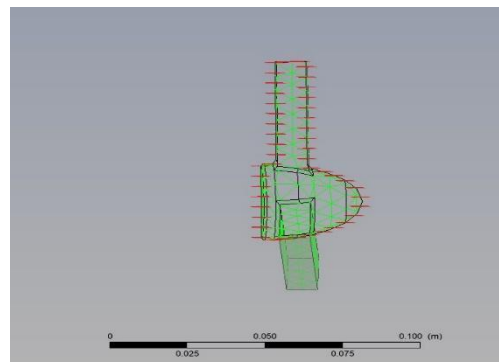


Figura 12 - Faces com paredes aderentes

Após a definição das faces e dos respectivos contornos foi adicionado as propriedades do fluido no caso o ar a 25°C e o conceito de como o software iria realizar os cálculos para obtermos os resultados, entre k-Epsilon e SST foi escolhido um algoritmo que entendemos que chegaria em um valor mais próximo do real ensaiado que foi o modelo SST.

## REFINO DA MALHA

Ao definir os contornos foi feito a simulação para garantir que nos ia gerar os resultados condizentes com o esperado, então foi criado um parâmetro de tamanho de elementos no interno e no externo e ainda relacionando com a quantidade de elementos no sólido ensaiado.



Para a malha mais robusta usamos uma proporção descrita na tabela 2 de 30/6mm (externo/interno), essa relação de 5/1 foi realizada em todos os pontos que do refino da malha. No CFX, para o refino da malha, a simulação foi realizada 6 vezes com o Modelo 1, partindo de um número de elementos X e sendo aumentado este valor em aproximadamente 50% até que fosse obtido uma Força de Arrasto constante (desvio aproximado de 4%), os resultados podem ser observados na Tabela 2 à seguir, além do Gráfico 1 que representa estes dados de um modo simplificado (Força de Arrasto x Número de Elementos), já o histórico das últimas convergências onde o software utiliza o algoritmo matemático escolhido na condição de contorno sendo este SST, pode ser visto na Figura 13.

Tabela 2 - Refino de Malha e seus resultados

Tamanho malha int/ext (mm)	Nº de elementos	Pressão na face (Pa)	Fa(N)
30/6	14616	616,37	0,648
20/5	29067	450,299	0,578
7/1,4	348185	393,445	0,554
5/1	882998	389,22	0,553
4/0,8	1652914	388,81	0,5564
3/0,6	3779611	388,402	0,558

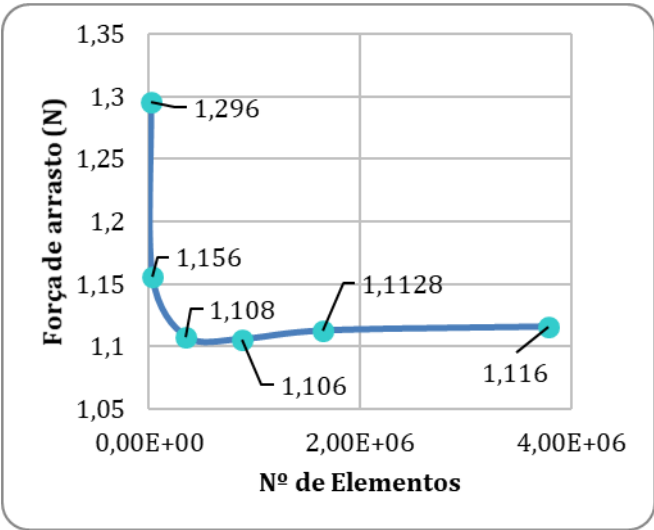


Gráfico 1 – Força de Arrasto x Número de Elementos

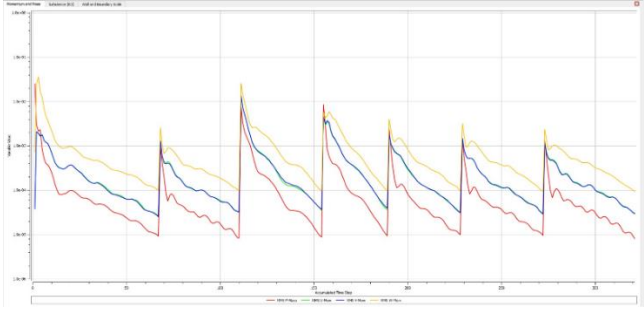


Figura 13- Histórico de cálculo das 3 ultimas convergências

O grupo considerou a última simulação para tomar como base dos valores de Força de arrasto, onde os resultados demonstrados na Figura 15 e Figura 16 à seguir devem ser multiplicados por 2 visto que foi utilizado uma geometria bipartida (simétrica) para otimizar o processamento de dados:

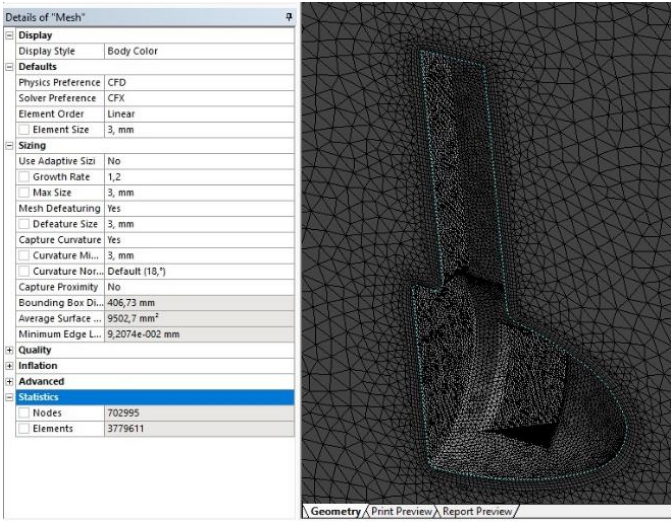


Figura 14- Refino final da malha (nº de elementos=3779611)

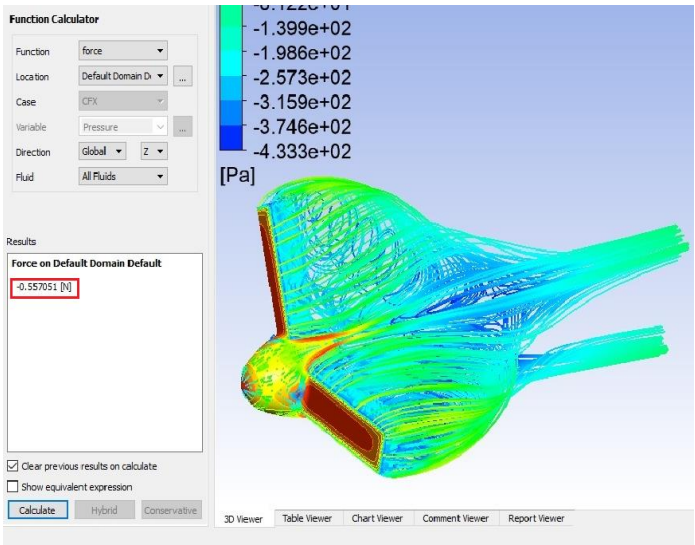


Figura 15 - Simulação Força de Arrasto 0,558 N

Comparando os valores do experimento no Tunel de vento e a Simulação no CFX foi obtido um erro de 10%, conforme pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados experimentais x simulados - Modelo 1

	Fa (N)	v (m/s)	ERRO
EXPERIMENTAL	1	23,8	10%
SIMULAÇÃO CFX	1,1		

Foi registrado também o valor de 776,4Pa (388,2\*2) máximo de pressão principalmente nas pás (Figura 16).

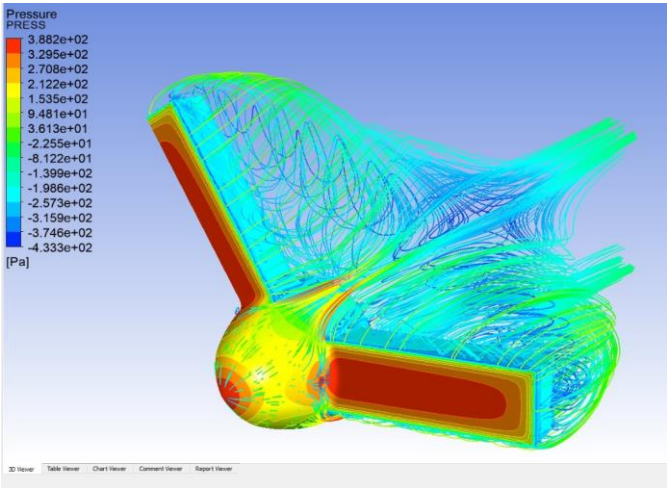


Figura 16– Modelo 1 pressão na face 776,4Pa (388,2\*2)

O erro de 10% foi considerado tolerável em função de algumas variáveis que não foram totalmente eliminadas durante o processo experimental, tais como a posição exata do protótipo no centro do túnel de vento, tamanho do túnel de vento em relação ao teste que é menor, a rugosidade do protótipo em função do simulado, a proporção de refino de malha e o erro gerado também pelo valor da força de arrasto na haste (apesar de pequeno também influencia pois nesta escala os valores decimais de força de arrasto são consideráveis).

### SIMULAÇÃO NO CFX-ANSYS: MODELO 2

Após determinado os parâmetros de entrada e validado o modelo 1, iniciou-se o modelo 2 (figura 2) utilizando os mesmos parâmetros de contorno e malha (figura 17), onde foi obtido os resultados mostrados na figura 18:

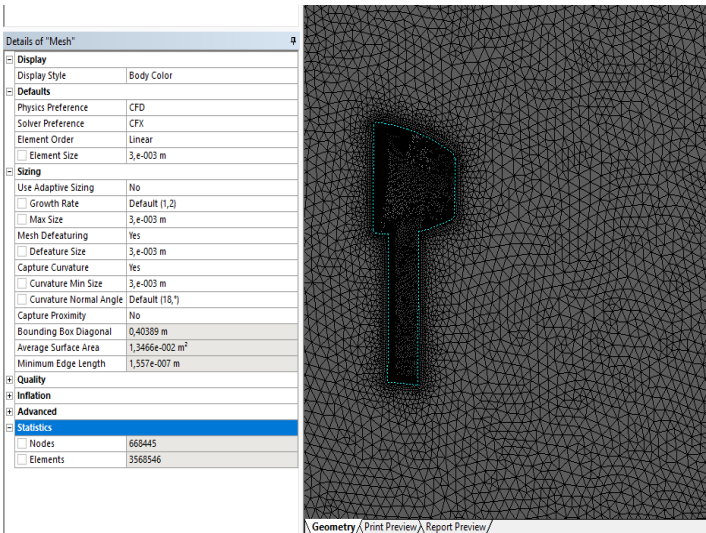


Figura 17- Modelo 2; malha 3/0,6; elementos 3568546

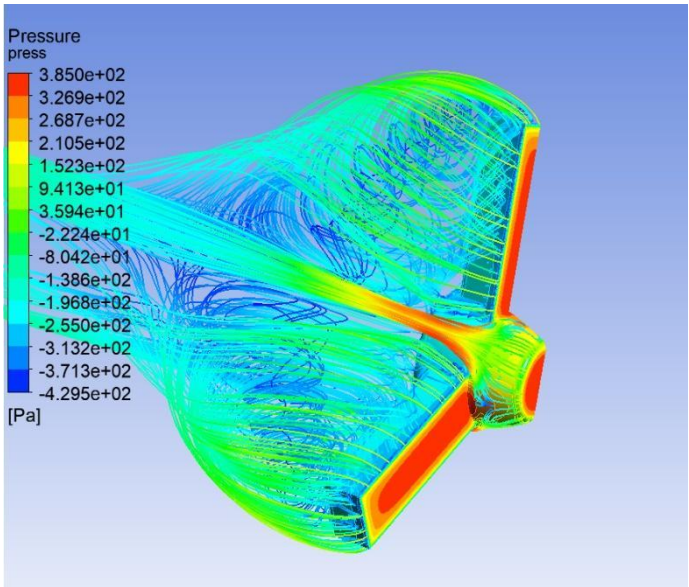


Figura 18 - Modelo 2 pressão na face 770Pa (385\*2)

Ao chegar nesse ponto pode se comparar os valores do modelo 1 sendo 388,2 Pa, ou seja, a pressão em um rotor onde o bico é mais achatado tendo uma área maior dissipa o fluxo de ar diminuindo o escoamento pela superfície do rotor por consequência diminuindo a pressão de ar que chega até as pás, comparando a força de arrasto o modelo 1 apresentou um valor de 0,558N, o modelo 2 apresentou uma Fa de 0, 560N sendo maior do que o modelo anterior foi entendido que não é bom esse aumento pois não proporciona uma melhor eficiência no escoamento do fluido e na pressão nas pás.

## SIMULAÇÃO NO CFX-ANSYS: MODELO 3

Tendo a comparação ente o modelo 1 e o modelo 2 foi pensando no mesmo conceito de formato deixamos a ponta do rotor bem aguda pensando em diminuir essa pressão na estagnação que se encontra no bico confira na figura 19.

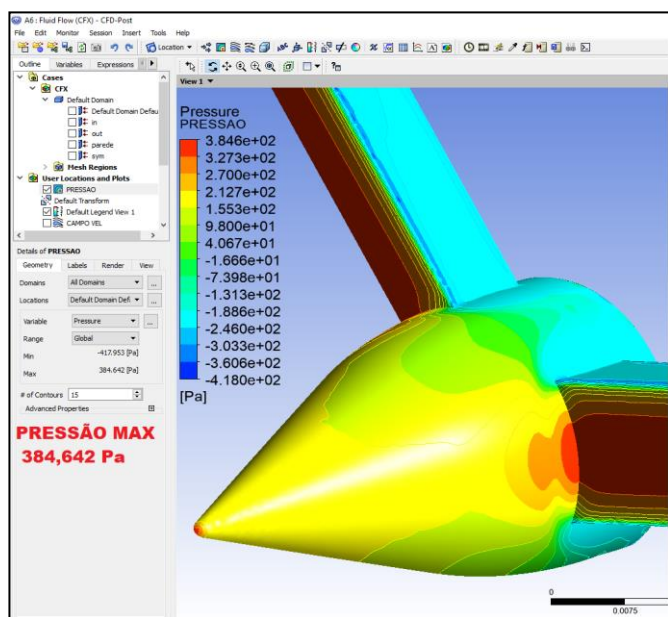


Figura 19 - Modelo 3 pressão na face 769,3 Pa (384,64\*2)

Pensando que esse formato iria alterar todo os parâmetros de comparação imaginamos que a força de arrasto mudaria absurdamente, mas foi quase que irrelevante em comparação com os outros modelos, modelo 2 (0,560N) e modelo 1 (0,558N), veja na figura 20 que ouve uma diminuição tanto na pressão quanto na força.

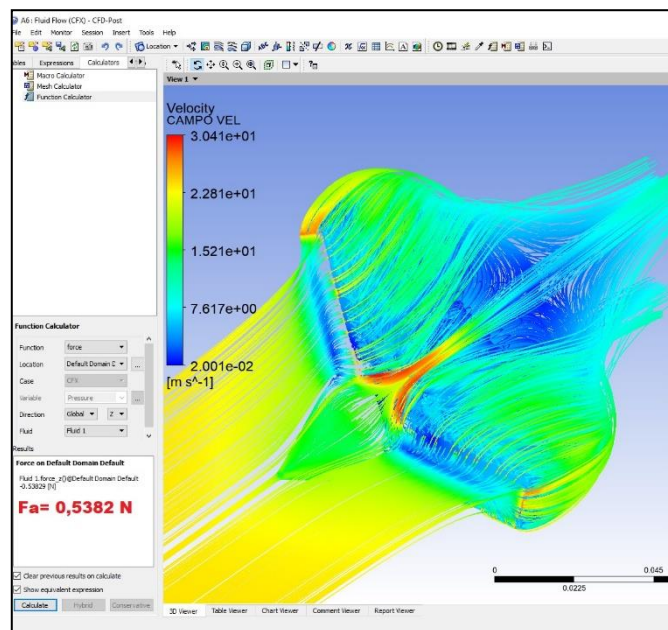


Figura 20 - Modelo 3 Força de arrasto 0,5382 N

## 2.1 CONCLUSÃO

O experimento e ensaios via software foram satisfatórios, obtivemos um erro geral de 10% do teórico (CFX) em função do real, erro aceitável em comparação aos ensaios realizados na disciplina de Mecânica dos Flúidos 2. Foi possível também concluirmos que a parcela de força de arrasto que atua sob o cubo do rotor de um gerador eólico é irrisória perto da força de arrasto que atuam nas pás, nem mesmo a pressão que chegam nas pás são afetadas pela diferença geométrica do cubo, isso analisando em uma escala menos se o parâmetro for feito em uma escala real teríamos uma mudança considerável, digamos que as pressões estejam em uma quantidade 1 KPa por exemplo como ilustração, alterando o formato do rotor e obtemos uma pressão de 1,6 KPa obtivemos um ganho considerável de pressão 600 Pa. Em termos de conversão de energia podemos validar que uma alteração no formato do rotor pode sim melhorar o rendimento do gerador eólico mas temos que levar em consideração nessa mudança construtiva teríamos que viabilizar uma nova estrutura pois mudaria o centro de massa do gerador, a quantidade de matéria prima para construir os componentes e aumentando esse rendimento a concepção de caixa de redução com engrenagens seria mudado para que esse ganho de energia não seja perdido por perdas na redução nem nas transmissões.

## 2.2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Brunetti, Franco, "Mecânica dos flúidos", 2° ed. Ver- São Paulo: Pearson Prentice Hall. 2008, Cap 9.

[2] Kreith, Frank, 1922- Principios de transferência de calor- São Paulo: Pioneira Thomson Learning. 2003 , Tab 27.