



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ARTUR CÂMARA MOREIRA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS VENTOS PARA O PROJETO DE UMA  
ESTRUTURA SUSTENTÁVEL NO PECÉM-CE**

**FORTALEZA**

2016

**ARTUR CÂMARA MOREIRA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS VENTOS PARA O PROJETO DE UMA  
ESTRUTURA SUSTENTÁVEL NO PECÉM-CE**

Trabalho do Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Graduação em  
Engenharia Mecânica da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial para a  
obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa  
Rocha

**FORTALEZA**

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M836a Moreira, Artur Câmara.

Análise do comportamento dos ventos para o projeto de uma estrutura sustentável no Pecém-CE / Artur Câmara Moreira. – 2016.

50 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

1. Arquitetura. 2. Ansys-CFX. 3. Mecânica dos Fluidos. 4. Sustentabilidade. I. Título.

CDD 620.1

---

**ARTUR CÂMARA MOREIRA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS VENTOS PARA O PROJETO DE UMA  
ESTRUTURA SUSTENTÁVEL NO PECÉM-CE**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Graduação em  
Engenharia Mecânica da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial para a  
obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Claus Franz Wehmann  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. André Valente Bueno  
Universidade Federal do Ceará (UFC)



A Deus,

Aos meus avós, meus pais e meu irmão.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família, pelo investimento não só na minha instrução acadêmica como também na minha educação moral. Obrigado pelo apoio e incentivo em todas as escolhas e oportunidade que se apresentaram.

Aos meus pais Paulo e Suyanne e meu irmão Bruno por sempre me apoiarem em todas as fases da minha vida.

Ao Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha, pela indicação à bolsa que deu início a esse trabalho, pelo apoio e excelente orientação durante todo o trabalho.

Aos professores participantes da banca Prof. Dr. Claus Franz Wehmann e Prof. Dr. André Valente Bueno pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Especialmente aos professores Paulo Alexandre, André Bueno, Roberto Bezerra, Clodoaldo Carvalho e Luis Soares por terem papéis fundamentais na minha formação como engenheiro.

Aos secretários do departamento e da coordenação, Hélio e Fernando pela grande ajuda na parte burocrática durante todo o curso.

A todos os meus colegas de turma de graduação, por terem me acompanhado nesta longa jornada que é um curso de engenharia.

À equipe de arquitetura Natasha, Karoline, Bruno, Nayana e Aderson pelo profissionalismo e apoio para a realização desse trabalho.

Ao Gabriel Ribeiro e o time da Energia Pecém por tornar esse trabalho possível.

*“A diferença entre o ordinário e o  
extraordinário é um pequeno extra”  
(Jimmy Johnson)*

## RESUMO

Em uma sociedade cada vez mais preocupada com a sustentabilidade e com a minimização de impactos no meio ambiente, torna-se atraente o projeto de uma estrutura sustentável, com a maximização de iluminação natural e otimização do uso dos ventos abundantes da região. Em parceria com o Departamento de Arquitetura de Urbanismo da UFC e a Fundação ASTEF para realizar um trabalho de pesquisa relacionada à empresa Energia Pecém, empregou-se conhecimento de Engenharia Mecânica e Dinâmica dos Fluidos para realizar simulações computacionais de ventos em edificações. Com a potencialização do fluxo natural de ventos na estrutura ocorre a diminuição da necessidade de utilização de equipamentos de refrigeração ambiente, diminuindo o consumo de energia elétrica e tornando a estrutura sustentável. Visto isso, foi utilizado o software Ansys – CFX para realizar simulações computacionais prevendo o comportamento dos ventos na estrutura proposta. Foi utilizado, também, softwares de modelagem 2D, AutoCAD, e de modelagem 3D, SolidWorks, para adaptar os modelos para a simulação. Foram utilizados dados da direção e da velocidade dos ventos da região para tornar as simulações computacionais o mais condizente possível com a realidade. Foram realizadas simulações preliminares do terreno, de elementos estruturais específicos e simulações e estrutura propostas para concluir o cálculo da velocidade média de escoamento dos ventos na estrutura em estudo.

**Palavras-chave:** Arquitetura; Ansys-CFX; Mecânica dos Fluidos; Sustentabilidade.

## **ABSTRACT**

In a society increasingly concerned with sustainability and the minimization of impacts on the environment, it becomes attractive the design of a sustainable structure, maximizing natural lighting and optimizing the use of abundant winds of the region. In partnership with the UFC's Architecture and Urbanism Department and ASTEF Foundation to conduct research related to the Energia Pecém it became necessary the knowledge of Mechanical Engineering and Fluid Dynamics to perform computer fluid simulations on the wind. Enhancing natural flow of winds in the structure decreases the need of environment refrigeration, reducing the consumption of electricity and turning it a sustainable structure. It was used the Ansys-CFX software to perform computer simulations predicting the behaviour of winds in the proposed structure. It was also used 2D and 3D modelling software, AutoCAD and SolidWorks, to adapt the models for simulation. Data on the direction and speed of the region's winds were used to make computer simulations as possible consistent with reality. Preliminary simulations were performed on the land, specific structural elements and simulations on complete structures to finish with the calculation for the average speed for the wind flow in the proposed structure.

**Key-words:** Architecture; Ansys-CFX; Fluid Mechanics; Sustainability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: <i>WORKBECH</i> DO ANSYS .....	17
FIGURA 2: <i>DESIGN MODELER</i> DO ANSYS.....	18
FIGURA 3: <i>MESHING</i> DO ANSYS.....	19
FIGURA 4: CFX – PRE DO ANSYS.....	21
FIGURA 5: CONFIGURAÇÃO DO <i>SOLVER - ANSYS</i> .....	23
FIGURA 6: MONITOR DO <i>SOLVER - ANSYS</i> .....	23
FIGURA 7: CFX – POST DO ANSYS.....	24
FIGURA 8: SENTIDO DOS VENTOS NO ESTADO DO CEARÁ.....	26
FIGURA 9: FOTO TIRADA POR SATÉLITES DA REGIÃO DO PORTO DO PECÉM.....	27
FIGURA 10: ROSA DOS VENTOS DE PECÉM - CE .....	28
FIGURA 11: PLANTA BAIXA TERRENO COMPLETO PELO AUTOCAD .....	29
FIGURA 12: SESSÃO RETIRADA DO TERRENO RETIRADA A PARTIR DA PLANTA BAIXA .....	30
FIGURA 13: SIMULAÇÃO PRELIMINAR INDICANDO VETORES DA VELOCIDADE A 2M DE ALTURA DO TERRENO .....	32
FIGURA 14: SIMULAÇÃO PRELIMINAR INDICANDO VELOCIDADE A UM PLANO A 2M DE ALTURA DO TERRENO .....	32
FIGURA 15: SESSÃO MAIOR DO TERRENO RETIRADA A PARTIR DA PLANTA BAIXA. ....	33
FIGURA 16: SIMULAÇÃO COM ESTRUTURAS DAS REDONDEZAS INDICANDO A VELOCIDADE A UM PLANO A 2M DE ALTURA DO TERRENO .....	34
FIGURA 17: SIMULAÇÃO COM ESTRUTURAS DAS REDONDEZAS INDICANDO VETORES DE VELOCIDADE A UM PLANO A 2M DE ALTURA DO TERRENO .....	35
FIGURA 18: SIMULAÇÃO PRELIMINAR REFINADA INDICANDO VETORES DE VELOCIDADE A UM PLANO A 2M DE ALTURA DO TERRENO .....	36
FIGURA 19: SIMULAÇÃO PRELIMINAR REFINADA INDICANDO VETORES DE VELOCIDADE A UM PLANO A 2M DE ALTURA DO TERRENO .....	36
FIGURA 20: SIMULAÇÃO PRELIMINAR DOS ANTEPAROS INDICANDO A VELOCIDADE A UM PLANO A 2M DE ALTURA DO TERRENO .....	38
FIGURA 21: SIMULAÇÃO PRELIMINAR DOS ANTEPAROS INDICANDO VETORES DE VELOCIDADE A UM PLANO A 2M DE ALTURA DO TERRENO.....	38
FIGURA 22: IDENTIFICAÇÃO DO ÂNGULO ÓTIMO DE ENTRADA DO VENTO. ....	39

FIGURA 23: SEGUNDA SIMULAÇÃO DOS ANTEPAROS INDICANDO A VELOCIDADE A UM PLANO A 2M DE ALTURA DO TERRENO .....	40
FIGURA 24: SIMULAÇÃO COM OS VOLUMES INTERNOS INDICANDO A VELOCIDADE A UM PLANO A 2M DE ALTURA DO TERRENO .....	41
FIGURA 25: ESTRUTURA 3D DA COBERTA COM OS ANTEPAROS.....	43
FIGURA 26: SIMULAÇÃO COM OS VOLUMES INTERNOS INDICANDO A VELOCIDADE A UM PLANO A 2M DE ALTURA DO TERRENO .....	43
FIGURA 27: FEIXE DE TIJOLOS PARAMÉTRICOS .....	45
FIGURA 28: SIMULAÇÃO FINAL DA VELOCIDADE DO VENTO EM UM PLANO A 2M DE ALTURA DO TERRENO .....	46
FIGURA 29: ÁREA DE ESTAGNAÇÃO DE AR – SEM AMBIENTES INTERNOS .....	47
FIGURA 30: ÁREA DE ESTAGNAÇÃO DE AR – COM AMBIENTES INTERNOS .....	48
FIGURA 31: PLANO DE CÁLCULO DA VELOCIDADE DO VENTO .....	48

## TABELAS

TABELA 1: SOFTWARES E OBJETIVOS DAS SESSÕES DO ANSYS UTILIZADOS.....	17
TABELA 2: CONFIGURAÇÕES DE MALHA UTILIZADAS NA ÚLTIMA SIMULAÇÃO NO <i>MESHING</i> ....	20
TABELA 3: VALORES DE VELOCIDADE ENCONTRADOS NA ÚLTIMA SIMULAÇÃO. ....	49



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	14
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	15
2.1 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS – CFD .....	15
2.2 DEFINIÇÃO DO VOLUME DE CONTROLE .....	15
2.3 DISCRETIZAÇÃO E MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS.....	16
2.4 CONVERGÊNCIA DE RESULTADOS .....	16
2.5 FERRAMENTAS .....	16
2.5.1 ANSYS – CFX .....	16
2.5.2 SOLIDWORKS.....	25
2.5.3 AUTOCAD .....	25
3 METODOLOGIA .....	26
3.1 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	26
3.1.1 SENTIDO E VELOCIDADE DO VENTO .....	26
3.1.2 PERFIL DE VELOCIDADE DO VENTO.....	29
3.2 SIMULAÇÕES DO TERRENO .....	29
3.2.1 SIMULAÇÃO PRELIMINAR.....	30
3.2.2 SIMULAÇÃO COM ESTRUTURAS DAS REDONDEZAS .....	33
3.2.3 SIMULAÇÃO PRELIMINAR REFINADA.....	35
3.3 ELEMENTOS ESTRUTURAIS.....	37
3.3.1 ANTEPAROS DE VENTO: SIMULAÇÃO PRELIMINAR .....	37
3.2.2 ANTEPAROS DE VENTO: SIMULAÇÃO ADAPTADA .....	39
3.2.3 VOLUMES INTERNOS .....	41
3.4 ESTRUTURAS COMPLETAS.....	42
3.4.1 COBERTA ABERTA .....	42

3.4.2 COBERTA FECHADA .....	44
4 RESULTADOS .....	46
5 CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS.....	51

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Nesse projeto, tem-se como objetivo a criação de simulações de ventos utilizando o software *Ansys-CFX* para entender o seu comportamento e maximizar o conforto térmico decorrente da ventilação natural. Com a maximização do fluxo natural dos ventos, a necessidade de áreas climatizadas diminui, contribuindo diretamente para a redução do consumo de energia elétrica.

A estrutura servirá como um escritório, com empregados trabalhando em horário comercial. Com isso em vista, é colocado em foco a diminuição do consumo de energia elétrica, sem prejudicar o desempenho dos funcionários presentes.

A região designada para receber esse escritório fica no Pecém, litoral do estado do Ceará. Região conhecida pela alta intensidade de ventos e iluminação solar abundante. Com a localização próxima da linha do equador, é observada uma certa consistência nas características do clima local ao decorrer do ano. Sem estações do ano bem definidas, é seguro partir da consideração inicial que os dados climáticos levantados não sofrem mudanças muito significativas ao decorrer do ano.

Com um projeto que aproveita a iluminação natural e estimula a circulação natural dos ventos, pode-se aproveitar os recursos da região para diminuir a necessidade de uso de lâmpadas elétricas e de ambientes climatizados.

Com o ponto de vista da circulação de ventos sendo o foco, é muito interessante a realização de simulações computacionais. Com um custo reduzido, é possível gerar uma representação extremamente precisa do comportamento do fluido em estudo. Conhecimentos de design 3D, fundamentos de Cálculo Numérico e Mecânica dos Fluidos são necessários para operar adequadamente o *Ansys-CFX*, o software foco do projeto.

Como proposta do projeto arquitetônico, será utilizada uma cobertura com diversos ambientes climatizados independentes no seu interior e deve-se utilizar uma cerca viva para impedir a passagem do pó abundante no ar local para dentro da estrutura.

Baseado nisso, presente trabalho foca-se na análise qualitativa da velocidade dos ventos dentro das estruturas propostas pelo departamento de arquitetura do projeto.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Simular o comportamento dos ventos no terreno;
- Simular o comportamento de ventos em elementos individuais da estrutura;
- Realizar simulações computacionais para comprovar a viabilidade de projeto no ponto de vista da circulação de ventos na estrutura proposta;
- Estimar uma velocidade média de escoamento do vento pela estrutura.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a realização desse trabalho, foram utilizados conhecimentos de Mecânica dos Fluidos e de análise computacional, incluindo fundamentos de Cálculo Numérico e conhecimento na utilização de softwares de cunho profissional.

### 2.1 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS – CFD

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) é uma ramificação da área de Mecânica dos Fluidos que utiliza análises numéricas e algoritmos de forma computacional para analisar e resolver problemas de escoamentos de fluidos.

Ele é baseado no método de volumes finitos em um dado volume de controle analisado.

### 2.2 DEFINIÇÃO DO VOLUME DE CONTROLE

Volume de controle é um espaço arbitrário em que ocorre o escoamento do fluido. Ele pode ser delimitado por fronteiras reais ou imaginárias, que são denominadas superfícies de controle.

O volume de controle utilizado nas simulações é o domínio em que o ar está contido. Ou seja, todo o volume acima da área do terreno em destaque retirando-se as estruturas.

## 2.3 DISCRETIZAÇÃO E MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

A discretização é o processo de transformar uma equação diferencial em um sistema de equações algébricas. É assim denominada pois cria um modelo discreto aproximado a partir do modelo contínuo original.

A formulação utilizando o método dos volumes finitos é utilizada por garantir um sentido físico à solução. Este método evoluiu das diferenças finitas, outro método de resolução de equações diferenciais, e não apresenta problemas de instabilidade ou convergência, por garantir que, em cada volume discretizado, a propriedade em questão (por exemplo, quantidade de movimento) obedece à lei da conservação.

## 2.4 CONVERGÊNCIA DE RESULTADOS

Para as simulações realizadas, foi utilizado como o principal critério de convergência o RMS. Para isso, foi colocado o tempo limite e simulação muito alta, forçando o RMS como o critério primário de convergência.

O RMS (Root Mean Square) é definido como a média residual de todos os volumes de controle, ou seja, o quanto um resultado se aproxima da próxima iteração.

Valores aceitáveis de RMS estão em torno de  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$ , mas para esse trabalho foi usado  $10^{-5}$  como critério de convergência do RMS.

## 2.5 FERRAMENTAS

### 2.5.1 Ansys – CFX

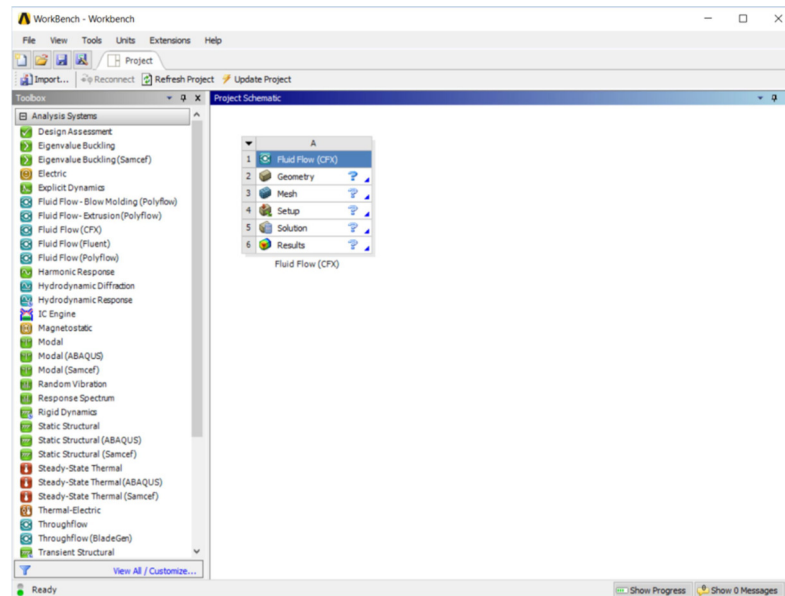
Como apresentado previamente, o *Ansys* funciona com base em diversos módulos, cada um funcionando como um software independente.

A parte utilizada do *Ansys* para esse projeto é o *CFX*. Módulo de simulações de fluidos extremamente poderoso e robusto, sendo capaz de realizar funcionalidades diversas para todo o modelamento e resolução do problema.

### a) *Workbench*

Plataforma de integração entre os diversos softwares do pacote *Ansys* com propósitos diferentes.

**Figura 1: *Workbench* do *Ansys***



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a implementação de módulos independentes para cada etapa do desenvolvimento do problema, torna-se muito mais fluida a integração entre esses softwares de propósitos muito diferentes. Cada sessão apresentada na Figura 1 foi correlacionada com o software e a sua utilização correspondente na Tabela 1.

**Tabela 1: Softwares e Objetivos das sessões do *Ansys* utilizados.**

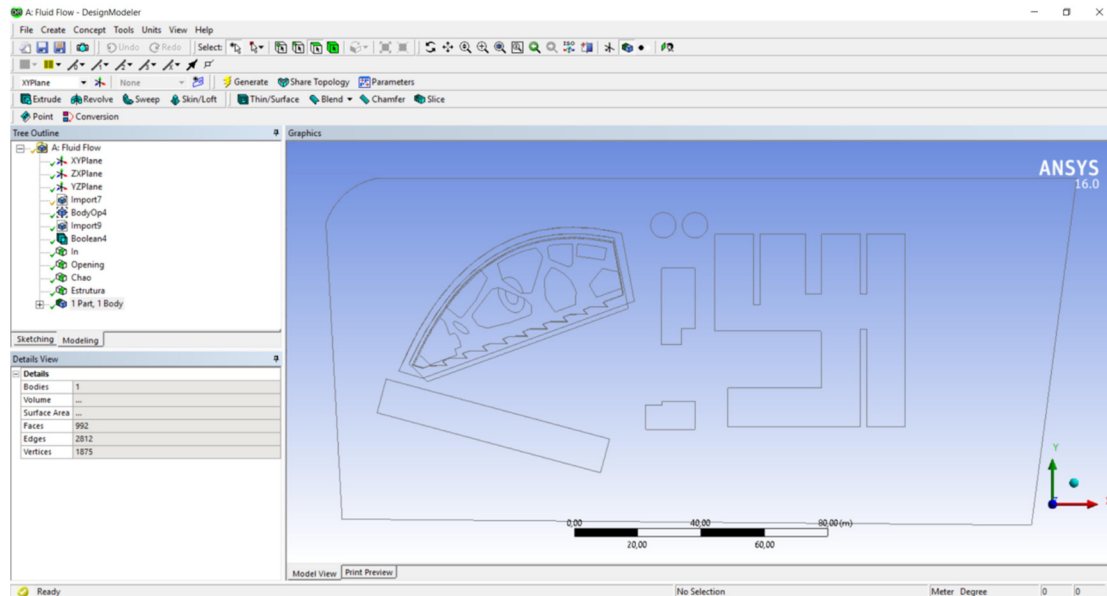
Sessão	Software	Objetivo
Geometry	<i>Design Modeler</i>	Modelamento 3D da geometria;
Mesh	<i>Meshing</i>	Criação de malhas para a simulação;
Setup	<i>CFX – Pre</i>	Definição das condições de contorno e configurações da simulação;
Solution	<i>Solver</i>	Realizar a simulação computacional, acompanhando o seu andamento;
Results	<i>CFX – Post</i>	Expor as informações obtidas na simulação de forma coerente.

Fonte: Elaborado pelo autor.

## b) Design Modeler

Como fase inicial do modelamento do problema, usou-se o módulo do *Design Modeler*, responsável pela modelagem 3D da geometria como observado na Figura 2.

**Figura 2: Design Modeler do Ansys.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para esse projeto, sempre foram importados arquivos de geometria de outros softwares, como o *SolidWorks* e o *Rhinoceros*, e utilizadas ferramentas do *Design Modeler* para tornar tais geometrias adequadas para a simulação.

**Boolean:** Ferramenta de para unir ou remover a intercessão de múltiplas geometrias. Para esse trabalho, foi amplamente utilizada para retirar o volume referente da geometria da estrutura estudada do volume de controle, tendo em vista que o ar não flui através de suas paredes. Com a importação do terreno como *Frozen* e da estrutura como *Add Material*, utiliza-se a opção *Subtract*.

**Knit:** Ferramenta de união de superfícies. Principalmente utilizada em geometrias exportadas do *Rhinoceros* que, por sua alta complexidade, muitas vezes acabam sendo exportadas como superfícies e não como uma geometria sólida. Essa ferramenta une as superfícies para que depois possa ser utilizada a ferramenta *Boolean*.

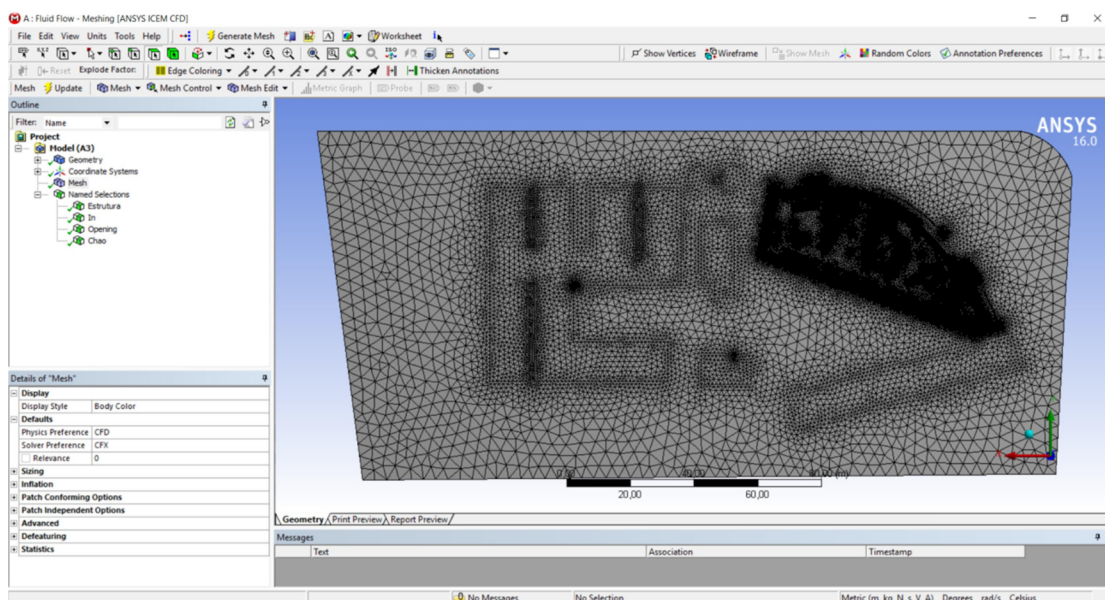
Nesse ponto do trabalho, deve-se também nomear os conjuntos de faces de cada propósito. Por exemplo, as faces do volume de controle que o vento entra foram nomeadas como “Inlet”. Isso facilita a definição das condições de contorno mais a frente.

No geral, o *Design Modeler* mostra-se um pouco limitado comparando a softwares especializados da área. Isso tornou muito atrativo a utilização do *SolidWorks* para a geração e edição de geometrias. Com exceção das funções mencionadas anteriormente, todas as geometrias utilizadas são provenientes do *SolidWorks* ou do *Rhinoceros*.

### c) Meshing

Em seguida, com a utilização do *Meshing* cria-se a malha para que o volume de controle torne-se discretizado. Cada volume presente na malha representa um ponto de cálculo que o software realiza usando como base os volumes adjacentes.

**Figura 3: Meshing do Ansys.**



Fonte: Elaborado pelo autor.



Foram criadas malhas tetraédricas, como observado na Figura 3, baseadas no método de Volumes Finitos. Todas as simulações utilizaram a predefinição “Fine” e como função avançada da malha como “Proximity and Curvature”.

Segue na tabela 2 um exemplo de configuração de malha utilizada para a última simulação.

**Tabela 2: Configurações de malha utilizadas na última simulação no *Meshing*.**

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
<b>Display</b>	
Display Style	Body Color
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
Relevance	0
<b>Sizing</b>	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
Num Cells Across Gap	Default (3)
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges
Min Size	Default (3,8542e-002 m)
Proximity Min Size	Default (3,8542e-002 m)
Max Face Size	Default (3,85420 m)
Max Size	Default (7,70850 m)
Growth Rate	Default (1,20 )
Minimum Edge Length	3,501e-004 m
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Inflation	All Faces in Chosen Named Selection
Named Selection	Estrutura
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,77
Maximum Layers	3
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre

View Advanced Options	No
<b>Patch Conforming Options</b>	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
<b>Patch Independent Options</b>	
Topology Checking	No
<b>Advanced</b>	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Shape Checking	CFD
Element Midside Nodes	Dropped
Straight Sided Elements	
Number of Retries	0
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
<b>Defeaturing</b>	
Pinch Tolerance	Default (3,4688e-002 m)
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default (1,9271e-002 m)
<b>Statistics</b>	
Nodes	3124340
Elements	12348339
Mesh Metric	None

Fonte: Elaborado pelo autor.

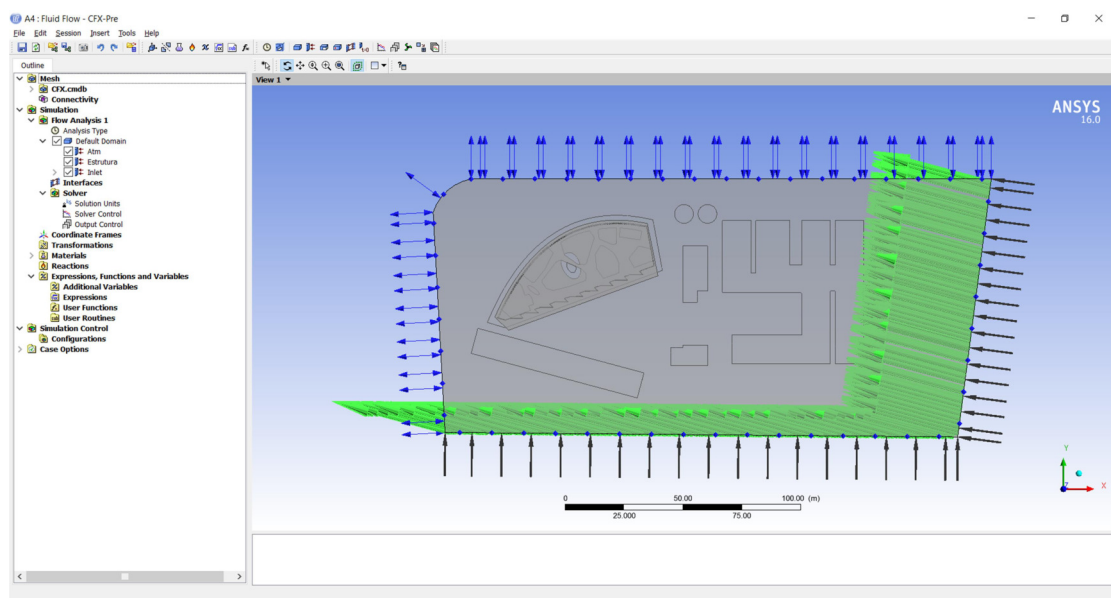
Com essa malha complexa sendo adotada, pode-se prever que uma grande carga computacional será demandada. Isso é comprovado pelo número de nós e elementos na malha, 3 124 340 nós e 12 348 339 elementos.

Uma configuração que deve ser destacada é a *Inflation*. Essa ferramenta gera camadas de malhas paralelas a uma superfície escolhida, sendo extremamente útil para obter uma maior definição dos resultados em uma área específica. A forma que a *Inflation* foi utilizada foi utilizando seu maior valor possível para as paredes da estrutura, experimentando a geração da malha, que nesse caso foram 3 camadas. Em outras simulações, como da Preliminar Refinada, o número máximo aceito para *Inflation* chegou a 15 camadas. Em geral, esse valor máximo foi obtido por tentativa e erro, tendo que gerar a malha e alterar o valor da *Inflation* até encontrar seu valor máximo.

#### d) CFX – Pre

Para a definição dos parâmetros da simulação usa-se o *CFX-Pre*. Esses parâmetros consistem inicialmente no tipo de escoamento, no caso regime permanente, e definição de condições de contorno. O *CFX-Pre* é visto na Figura 4.

Figura 4: CFX – Pre do Ansys



Fonte: Elaborado pelo autor.

Indicando desde o fluido de escoamento – no caso ar a 25 °C, até o modelo de turbulência adotado – k-Epsilon, o foco principal dessa etapa do trabalho é a definição das condições de contorno. Essas condições definem como a simulação irá se comportar. As periferias do volume de controle (superfícies de controle) devem ter condições de contorno atreladas a elas, e as utilizadas foram:

**Inlet:** Entrada do fluido no volume de controle.

**Outlet:** Saída do fluido do volume de controle.

**Opening:** Área “aberta” do volume de controle. Essa área possui condições de contorno, que no caso foi de pressão atmosférica, e pode ser entrada ou saída de fluidos. Essa flexibilidade maior dessa área é fundamental para que pequenas recirculações de ar sejam detectadas.

**No-slip Wall:** Paredes sem deslizamento. Regiões do volume de controle que o fluido não escoar, como as paredes da estrutura em estudo.

Com as definições da simulação propriamente implementadas, o próximo passo é a definição dos parâmetros de convergência. Não apenas esses parâmetros, como definições de forma de salvamento de dados, tornam-se essenciais para o projeto em longo prazo.

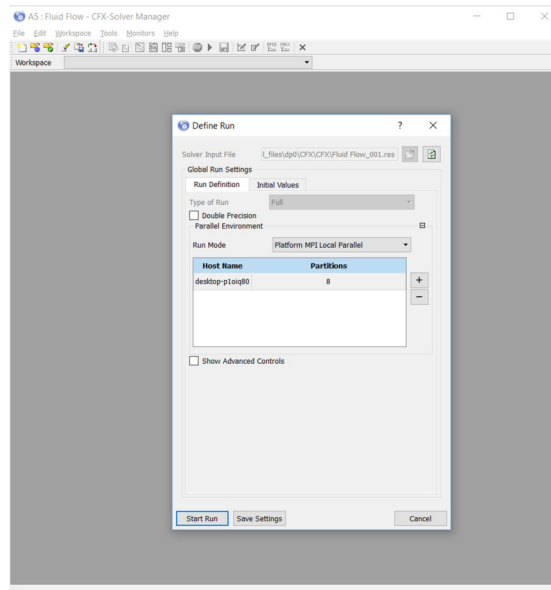
Como configurações do Solver, foram utilizadas a opção de *High Resolution* com critério de convergência o RMS de  $10^{-5}$ .

#### **e) Solver**

No Solver, não são necessários muitos ajustes. Essa parte foca principalmente no monitoramento da simulação, checando se ela está convergindo.

A principal escolha inicial é como a simulação será executada, se em “Serial”, utilizando apenas um processador do computador ou em “Parallel”, utilizando-se de múltiplos processadores. Existe também a opção da utilização de múltiplos computadores, mas isso não foi necessário. Essas configurações são aplicadas no Solver apresentado na Figura 5.

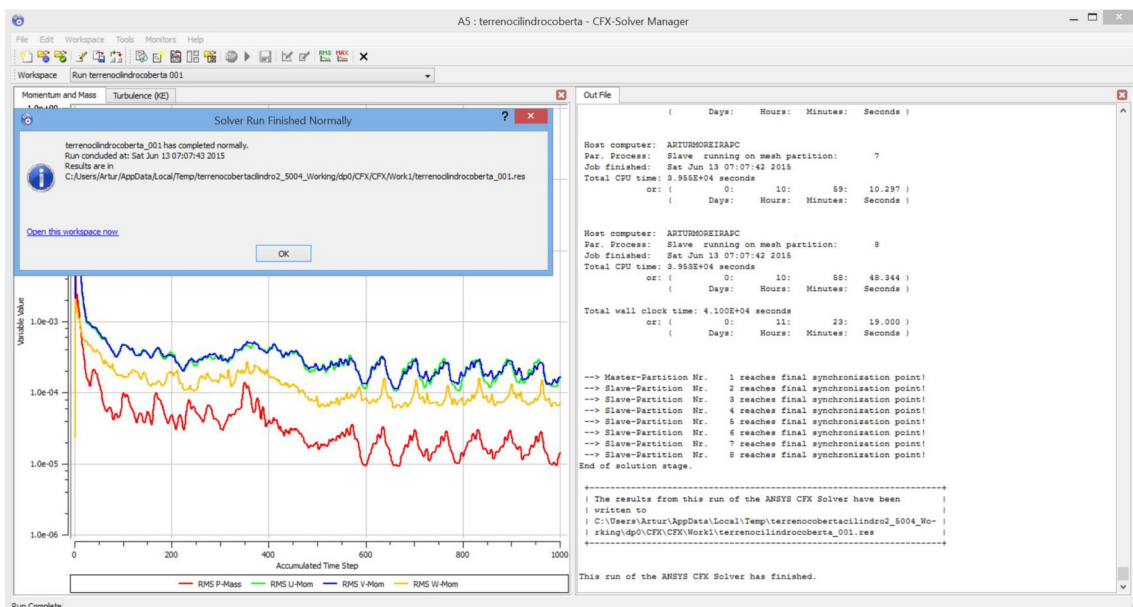
**Figura 5: Configuração do Solver - Ansys**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as simulações realizadas foram feitas em Local Parallel, com tempo de duração variando entre uma hora e meia até três dias. A convergência do RMS é monitorada através da tela apresentada na Figura 6.

**Figura 6: Monitor do Solver - Ansys**



Fonte: Elaborado pelo autor.

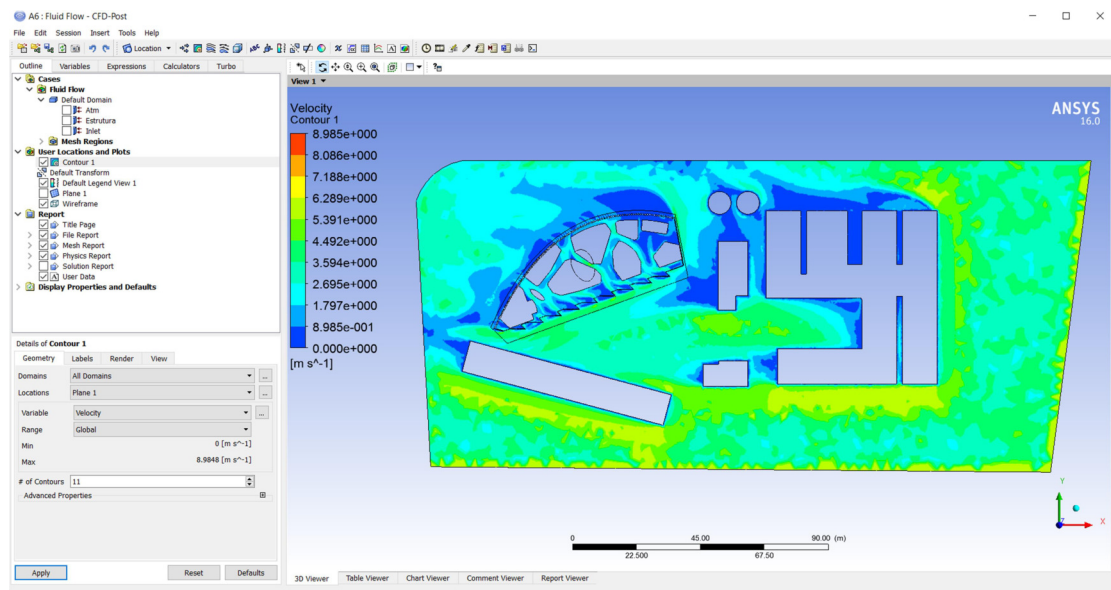
Como dito anteriormente, o critério de convergência foi utilizado principalmente o RMS do “Momentum and Mass” tendo em vista que o aspecto estudado é a velocidade do vento. RMS é definido como a média residual de todos os volumes de controle, ou seja, o quanto um resultado se aproxima da próxima iteração.

Para o estudo apresentado, foi utilizado apenas o RMS de  $10^{-5}$  como um critério de convergência, deixando o tempo de simulação muito alto.

### f) CFX – Post

Como parte final do uso com *Ansys – CFX*, usa-se o *CFX – Post* para utilizar as informações obtidas na simulação do Solver, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7: CFX – Post do Ansys



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nessa etapa utilizaram-se algumas de suas ferramentas para extrair essas informações de forma coerente, como:

**Plane:** Criação de um plano na geometria. Esse plano pode servir como um domínio para alguma outra ferramenta ou pode ser atrelada a uma propriedade e

mudar a sua cor em função dela, por exemplo. Para o estudo, todos os planos gerados se localizam a 2m de altura do chão (2m no eixo z).

**Contour:** Delimita áreas de propriedades semelhantes e cria uma zona de mesma cor. Muito útil para delimitar zonas de estagnação de ar na estrutura, por exemplo.

**Vectors:** Utilização de vetores para caracterizar a direção e o sentido dos ventos, por exemplo, além de poder ter a sua cor mudada a partir da velocidade escalar do local.

**Streamlines:** Linhas de possível trajetória que prevê comportamento do fluido em um determinado domínio. Fortemente utilizado quando delimitado em um plano, por exemplo.

**Function Calculator:** Calcula uma propriedade em um domínio definido, como um plano ou um volume. No caso, foi utilizado um plano para o cálculo da velocidade.

### **2.5.2 SolidWorks**

Software de geração e edição de geometrias 3D. Possui uma enorme vantagem com relação ao *Design Modeler* por ter mais funções e ser mais intuitivo para o uso. Possui ferramentas robustas e uma grande facilidade de gerar formas 3D a partir de desenhos 2D. Essa funcionalidade foi muito interessante para o trabalho, pela necessidade do uso de plantas baixas desenhadas no *AutoCAD*.

Ferramentas fortes de importação de geometrias e de desenhos 2D juntamente a ferramentas como o Extrude (ressalto corpo extrudado) para gerar volumes de controle em 3D foram muito utilizados nesse software.

### **2.5.3 AutoCAD**

Utilização do AutoCAD nesse projeto deu-se principalmente por conta da natureza dos arquivos de planta baixa do terreno e suas redondezas.

Foram utilizadas ferramentas como o Scale, utilizada para aumentar ou diminuir o desenho de forma homogênea. Isso foi necessário principalmente por um problema de unidades no arquivo da planta baixa.

Outras ferramentas bastante utilizadas foram comandos relativos a Layers. *LayerOn* e *LayerOff* facilitaram o isolamento das partes necessárias do

desenho, facilitando na simplificação de detalhes necessária para a simulação computacional. O arquivo desse desenho simplificado é então exportado para o *SolidWorks* para servir como base da geometria 3D do volume de controle usado na simulação.

#### **2.5.4 Rhinoceros**

Software de projeto estrutural muito utilizado pela área de arquitetura. Foi o software base para o modelamento da cobertura e da estrutura pela equipe de arquitetura.

### **3 METODOLOGIA**

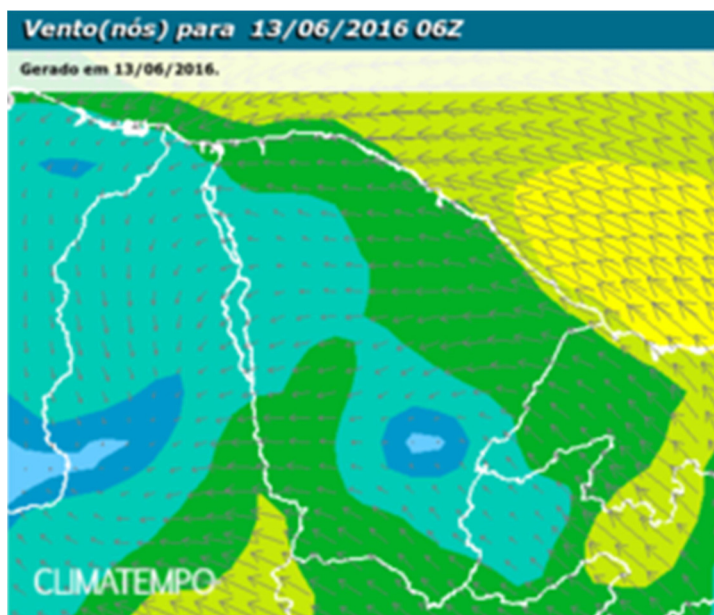
#### **3.1 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO**

Para a solução do problema, torna-se necessário definir certa quantidade de restrições para a situação possa ser abordada de forma eficiente e realista.

##### **3.1.1 Sentido e velocidade do vento**

Para a definição do sentido dos ventos, primeiramente foi verificado por um site de previsão do tempo, como pode ser observado na Figura 8:

**Figura 8: Sentido dos ventos no Estado do Ceará**



Fonte: Climatempo.



Com a análise da figura 8, pode-se constatar facilmente que o vento flui na direção Noroeste, mas é necessária a obtenção de um ângulo mais preciso para o seu uso nas simulações computacionais.

Com a utilização de fotos tiradas por satélites da região, torna-se claro o sentido de formação das dunas, evidenciando o sentido de escoamento dos ventos locais como visto na Figura 9.

**Figura 9: Foto tirada por satélites da região do Porto do Pecém.**



Fonte: Google mapas e modificado pelo autor.

Com a identificação da direção das dunas de areia, torna-se possível desenhar três triângulos retângulos para, através da medição do tamanho de seus catetos, encontrar o valor do ângulo.

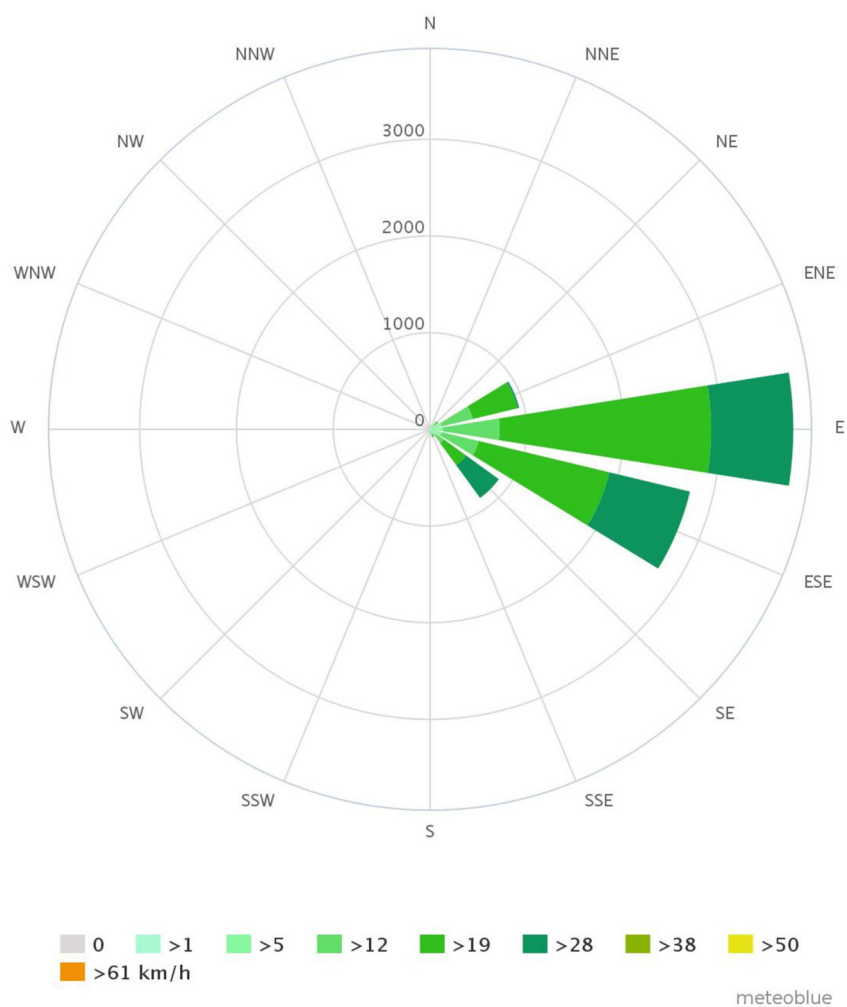
Os ângulos de  $14,9^\circ$ ;  $11,4^\circ$  e  $19,5^\circ$  respectivo aos ângulos agudos dos triângulos presentes na Figura 9 foram obtidos dessa forma. Calculando a sua média



aritmética, encontra-se o valor de  $15,2^\circ$ . Utilizou-se o ângulo como  $15^\circ$  com o sentido Leste – Oeste em direção ao Noroeste.

Com relação à velocidade do vento local, foi adotado arbitrariamente valor de 20 km/h para as simulações.

**Figura 10: Rosa dos Ventos de Pecém - CE**



Fonte: Meteoblue.

A partir dessa Rosa do Ventos relativa à região do Porto do Pecém, observada na Figura 10, validam-se tanto o sentido quanto a velocidade adotados.

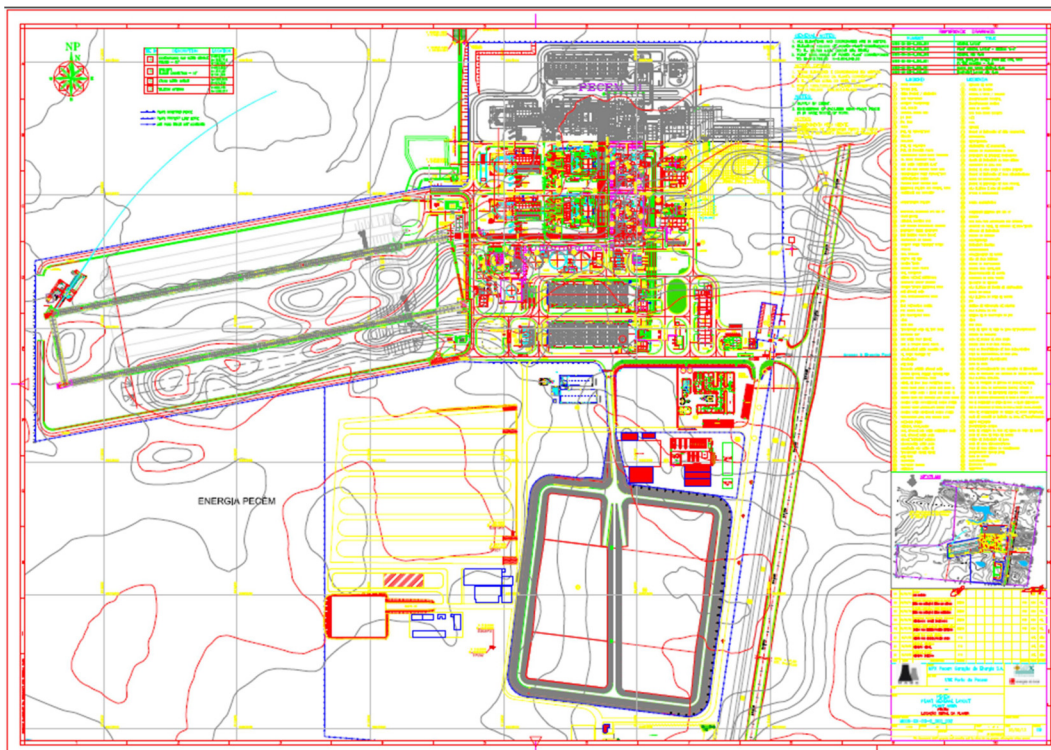
### 3.1.2 Perfil de Velocidade do Vento

Com a altura reduzida das estruturas presentes (apenas um pavimento), torna-se irrelevante a utilização de um perfil de velocidades para o vento, com isso usou-se a velocidade de escoamento do vento na entrada do volume de controle como constante.

## 3.2 SIMULAÇÕES DO TERRENO

Nessa parte inicial do projeto, foi dado um enfoque maior em simulações prévias do terreno e de estruturas básicas. Com o entendimento de como o vento está se comportando, torna-se mais fácil tomar decisões de projeto como a localização da estrutura e a sua orientação. A planta baixa de toda a região é apresentada na Figura 11.

**Figura 11: Planta Baixa terreno completo pelo AutoCAD**

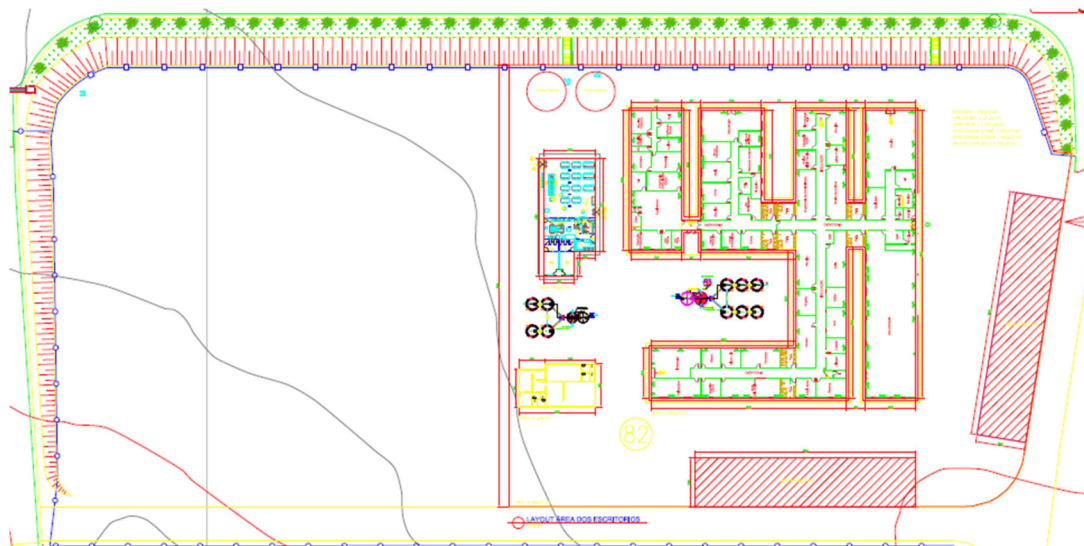


Fonte: Arquivos técnicos da empresa Energia Pecém LTDA.

### 3.2.1 SIMULAÇÃO PRELIMINAR

Primeiramente, através de fotos do local e um arquivo de *AutoCAD* com a planta baixa do terreno todo, foi identificada a parte alvo do terreno. Essa parte foi isolada, simplificada ao máximo para diminuir a carga computacional - retirando detalhes e mantendo apenas as dimensões das estruturas existentes e do terreno focado. O resultado dessa etapa inicial foi um arquivo de *AutoCAD* 2D pronto para ser utilizado em outro programa. A parte escolhida do terreno está indicada na Figura 12, ainda presente de detalhes desnecessários.

**Figura 12: Sessão do terreno retirada a partir da planta baixa**



Fonte: Arquivos técnicos da empresa Energia Pecém LTDA.

Com a utilização do programa *SolidWorks*, o arquivo do terreno simplificado foi importado na forma de sketch 2D criando a facilidade de gerar um sólido correspondente ao volume de controle do fluido em destaque: o ar. Com a definição da altura das estruturas, 3 metros para as construções e 7,5 metros para

as caixas d'água, define-se a altura do sólido referente ao volume de controle, pois ela deve ser cerca de 5 vezes maior que a maior estrutura presente, com um valor exato não sendo relevante para o resultado final da simulação.

Um ponto de atenção observado ocorreu na importação do arquivo do *AutoCAD* para o *SolidWorks*, por conta da unidade. O arquivo da planta baixa estava em unidades imperiais, utilizando pés e polegadas. Já no *SolidWorks* foi necessária a utilização da ferramenta *Scale* para aumentar homogeneamente todo o desenho para a unidade correta do SI, metro no caso.

Já no *Ansys-CFX*, utilizando a ferramenta *Desing Modeler* no *Workbench*, foi importada a geometria resultante do *SolidWorks*, realizando os ajustes finais na geometria. Foi, também, definida a geometria como fluido, pois, até então, ela tinha sido modelada como um sólido.

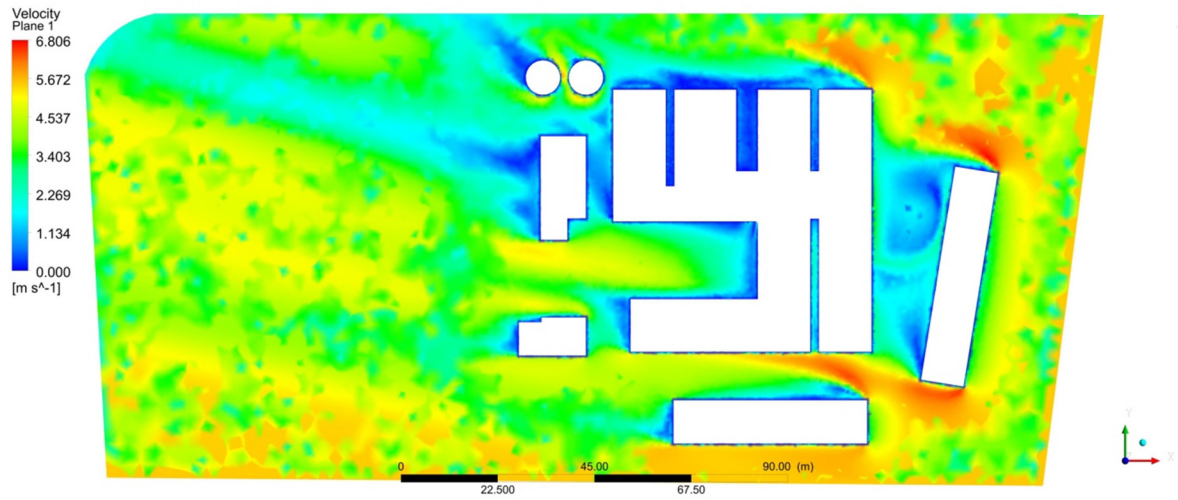
Novamente através do *Workbench*, foi acessada a ferramenta *Meshing* para criar e configurar a malha necessária para a simulação. Com a malha refinada (Fine), tudo estava pronto para definir os parâmetros da simulação no *CFX-Pre*.

As condições de contorno foram definidas pelo *CFX-Pre* como: paredes e chão como sem deslizamento; saída como *Opening*; entradas com o vento de 20 km/h com 15° com relação ao eixo X, sentido Noroeste, indicados pelas componentes  $V = -19,3185$  km/h e  $U = 5,17638$  km/h.

Com todos os parâmetros corretamente implementados, o *Solver* foi iniciado com o resultado convergindo corretamente.

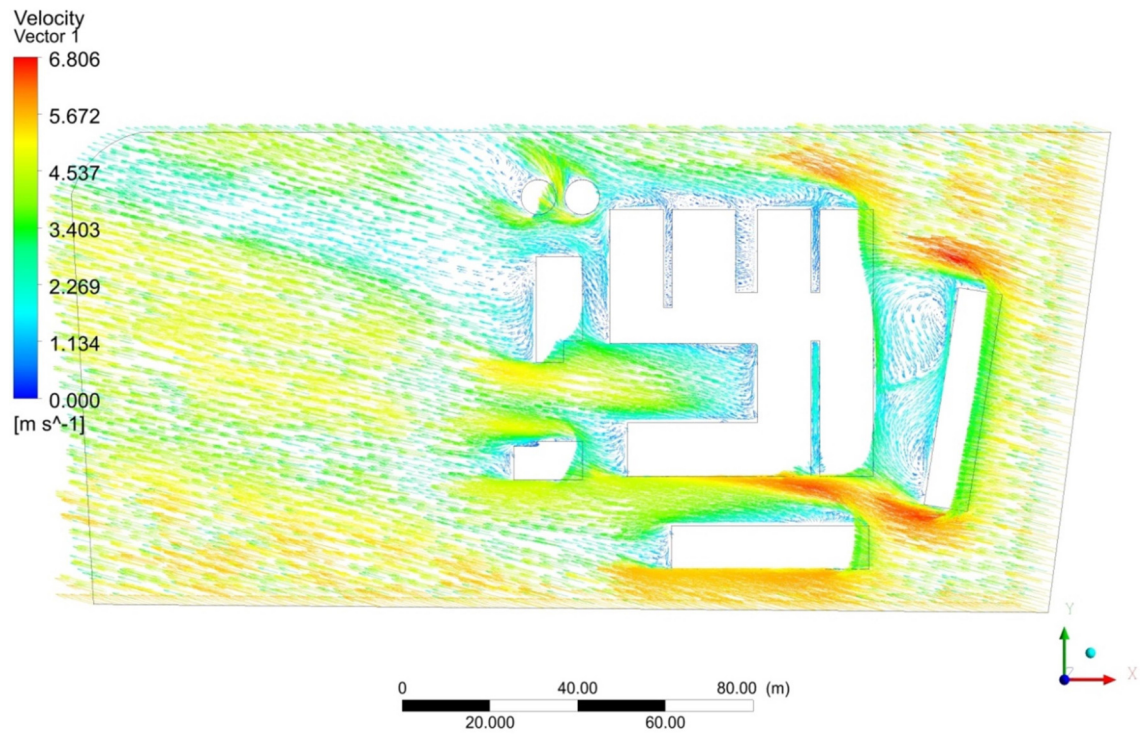
Foi necessária a utilização do *CFX-Post* para visualizar os resultados de uma forma adequada. Primeiramente inserindo *Streamlines* para ver o fluxo do ar. Logo foi possível observar que a forma mais didática de apresentar os resultados de fluxo de ar era através de vetores de cor variável com a velocidade do vento, como indicado na Figura 13. Foi efetiva, também, a utilização de planos com manchas de cores correspondentes às velocidades locais dos ventos, como observado na Figura 14.

**Figura 13: Simulação Preliminar indicando vetores da velocidade a 2m de altura do terreno**



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 14: Simulação Preliminar indicando velocidade a um plano a 2m de altura do terreno**



Fonte: Elaborado pelo autor

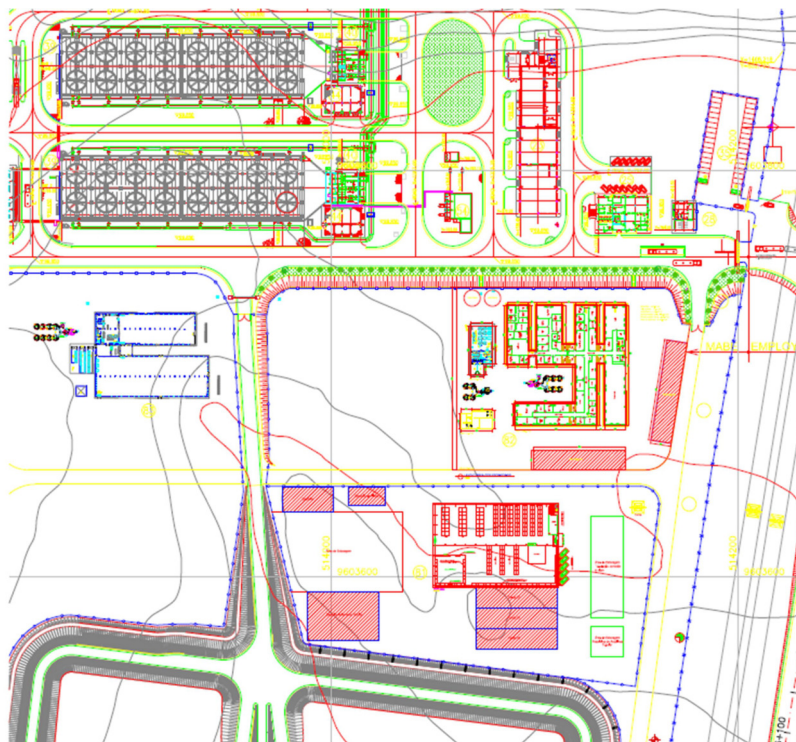


Com a análise das Figuras 13 e 14, torna-se claro que a segunda imagem tem a vantagem de mostrar o sentido e a direção dos ventos, enquanto a primeira imagem tem a vantagem de exibir melhor os setores de velocidades dos ventos.

### 3.2.2 SIMULAÇÃO COM ESTRUTURAS DAS REDONDEZAS

A segunda simulação foi realizada utilizando uma maior porção do terreno para poder analisar todo o contexto do comportamento dos ventos na área e checar se os mesmos chegariam de forma homogênea como foi suposto na primeira simulação. Para isso, foi retirada a estrutura da simulação anterior (que supostamente seria demolida) e foram consideradas as estruturas e construções vizinhas. Essa sessão maior de terreno está presente na Figura 15.

**Figura 15: Sessão maior do terreno retirada a partir da planta baixa.**



Fonte: Arquivos técnicos da empresa Energia Pecém LTDA.

Novamente, pelo AutoCAD foi possível simplificar a planta para facilitar a simulação e diminuir a carga computacional. Criando uma nova *layer* e desenhando apenas as estruturas relevantes por cima, ocultando a *layer* e excluindo a planta

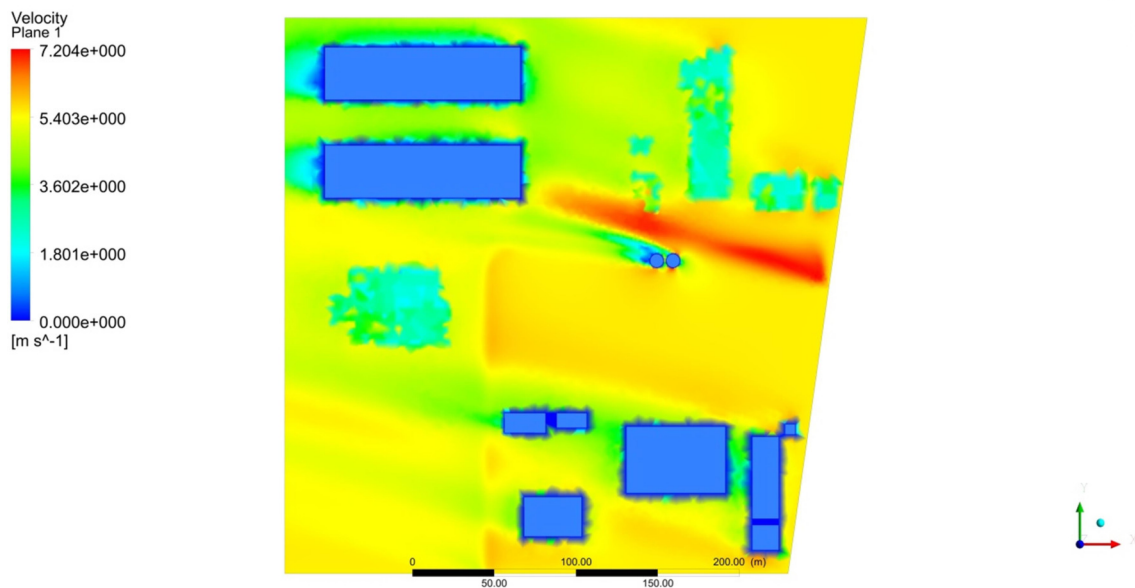
original, foi possível ter um desenho simplificado da planta baixa do terreno, facilitando muito o trabalho. Para isso foram utilizados os comandos do *AutoCAD*: *LayerISO* para isolar uma *layer*; *LayerOFF* para ocultar uma *layer* e *LayerON* para exibir todas as *layers*.

No *SolidWorks*, foi observado o mesmo ponto de atenção da simulação anterior: o uso da unidade imperial proveniente do arquivo de planta baixa do *AutoCAD*. A unidade foi alterada da mesma forma: usando o comando *Scale*.

Os passos seguintes foram realizados da mesma forma da simulação anterior: *Extrude* no *SolidWorks*; *Design Modeler* para retocar e transformar em fluido. A diferença foi na parte da geração da malha.

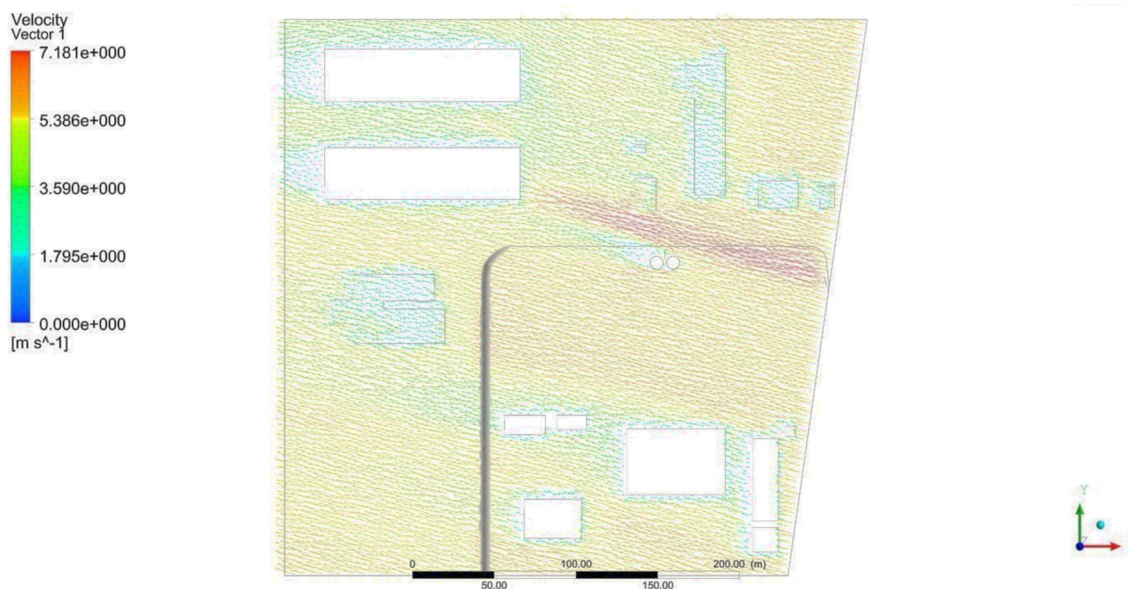
Foi utilizada a função *Inflation* na criação da malha, tentando deixar o maior número possível para uma melhor observação do fluxo de ar com mais detalhes, resultando nas Figuras 16 e 17.

**Figura 16: Simulação com estruturas das redondezas indicando a velocidade a um plano a 2m de altura do terreno**



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 17: Simulação com estruturas das redondezas indicando vetores de velocidade a um plano a 2m de altura do terreno**



Fonte: Elaborado pelo autor

Com a análise das imagens resultantes da simulação, é possível perceber que a porção do terreno destinado para a construção (terreno da primeira simulação) permaneceu totalmente da mesma cor. Isso indica que a velocidade dos ventos nessa área é constante. Com isso é confirmada a hipótese da primeira simulação em que os ventos eram constantes e divididos homogeneamente.

É clara a grande melhoria de detalhamento nas manchas de velocidade em comparação à primeira simulação, o que incentivou o seu retrabalho.

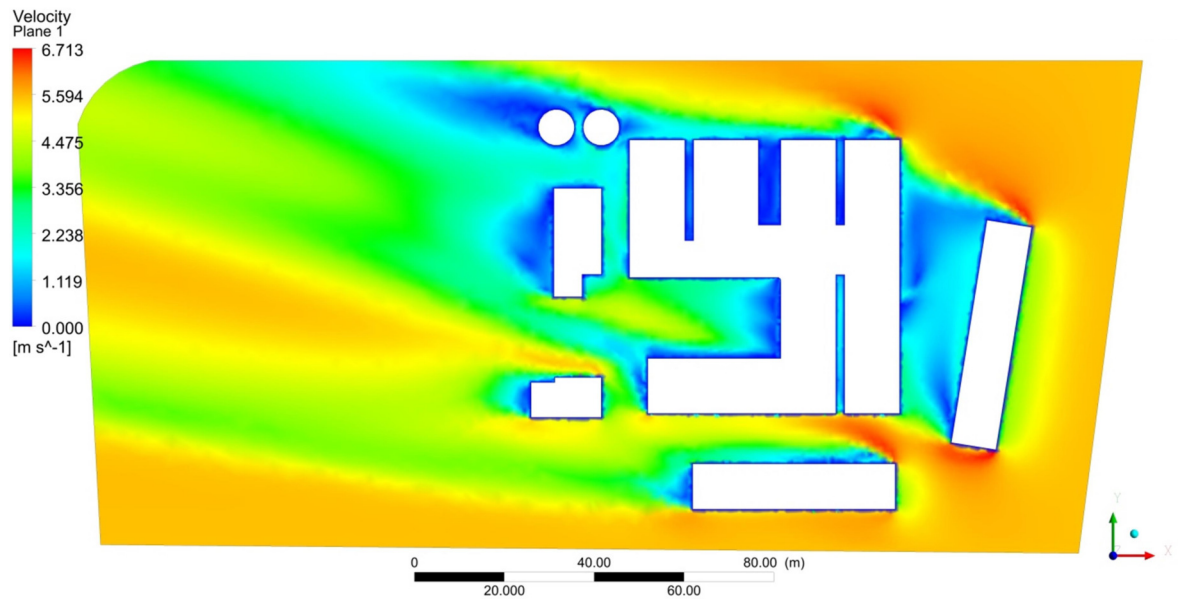
### **3.2.3 SIMULAÇÃO PRELIMINAR REFINADA**

Com as configurações da primeira simulação sendo revisitadas, não houve grandes mudanças. A única mudança significativa foi o uso da opção de *Inflation*. Foi testado manualmente o maior valor de *Inflation* possível, que no caso foi 15 camadas.

Com relação à convergência da simulação, foi mudado o número máximo de iterações para um valor praticamente inatingível. Isso forçou a simulação a continuar rodando até que convergisse a um valor final, com o erro pequeno de  $10^{-5}$  RMS.

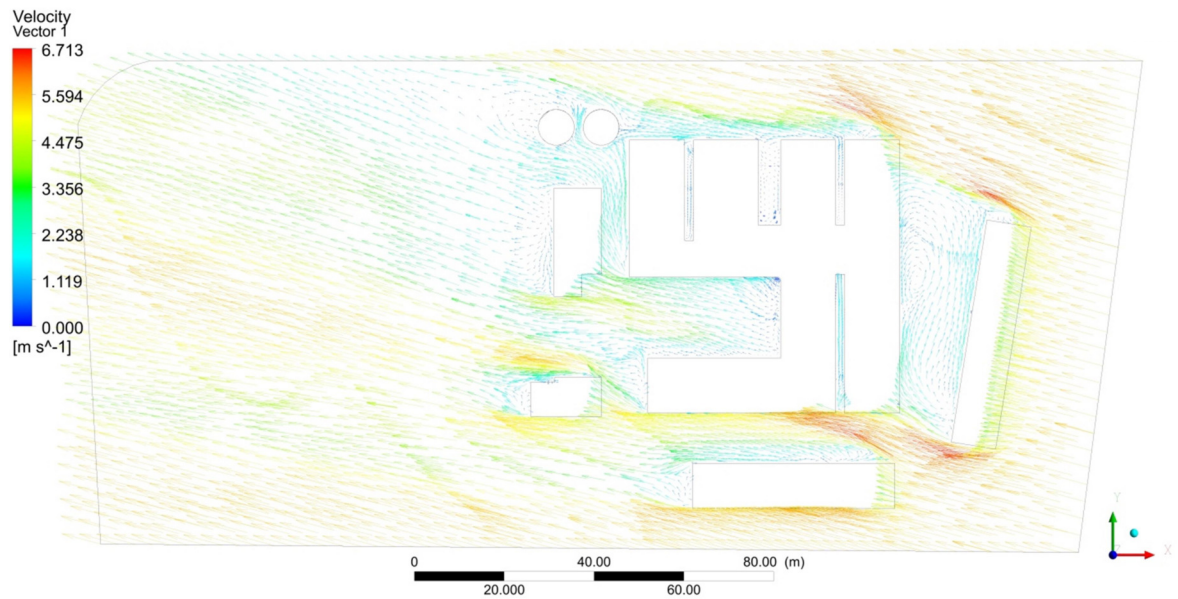


**Figura 18: Simulação Preliminar Refinada indicando vetores de velocidade a um plano a 2m de altura do terreno**



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 19: Simulação Preliminar Refinada indicando vetores de velocidade a um plano a 2m de altura do terreno**



Fonte: Elaborado pelo autor

Com uma breve comparação entre a Figura 13 da Simulação Preliminar com a Figura 18 da Simulação Preliminar Refinada, é notável a grande evolução no detalhamento dos escoamentos resultantes. Os limites do escoamento do ar estão muito mais bem definidos na Figura 18. É notável a melhoria no detalhamento também na Figura 19 comparada a Figura 14.

### 3.3 ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Nessa sessão, é abordado o comportamento dos ventos em diversos elementos estruturais que foram utilizados para fazer o projeto da estrutura. Tendo em vista a otimização do uso de cada elemento estrutural individualmente, foi possível o aperfeiçoamento do projeto como um todo.

#### 3.3.1 Anteparos de Vento: Simulação Preliminar

A primeira estrutura que foi proposta é uma série de paredes anguladas de tal forma que sirvam como anteparos para maximizar a captação de vento para dentro da estrutura. A primeira simulação serviu como uma análise prévia de como os ventos vão se comportar em pequeno, médio e longo termos.

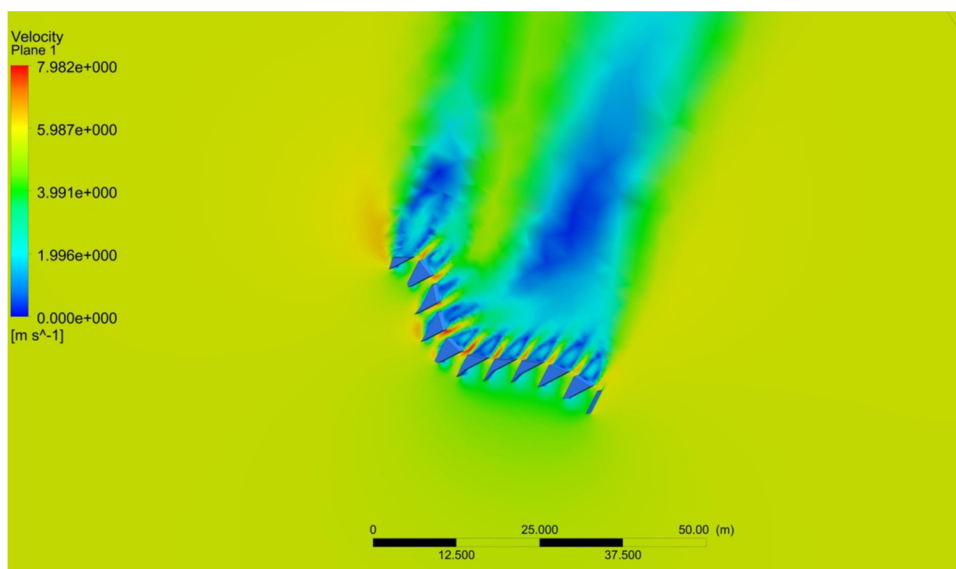
Um feixe de paredes foi desenhado pelo software de arquitetura *Rhinoceros* e retrabalhado no *SolidWorks*. Uma série de arquivos de diversos formatos foram gerados para serem testados no *SolidWorks*, mas a estrutura acabou sendo importada como um desenho em 2D, para ser simplificado e poder gerar o volume de controle.

O mesmo processo de modelagem do problema foi utilizado no *Ansys*: transformação do volume de controle em fluido no *Design Modeler*, criação da malha no *Meshing*, na configuração fine e utilizando o *Inflation* com o maior valor possível.

No *CFX-Pre*, foi utilizado inicialmente o vento a 45 graus, com o componente U (correspondente ao eixo X) e o componente V (correspondente ao eixo Y) com o mesmo valor.

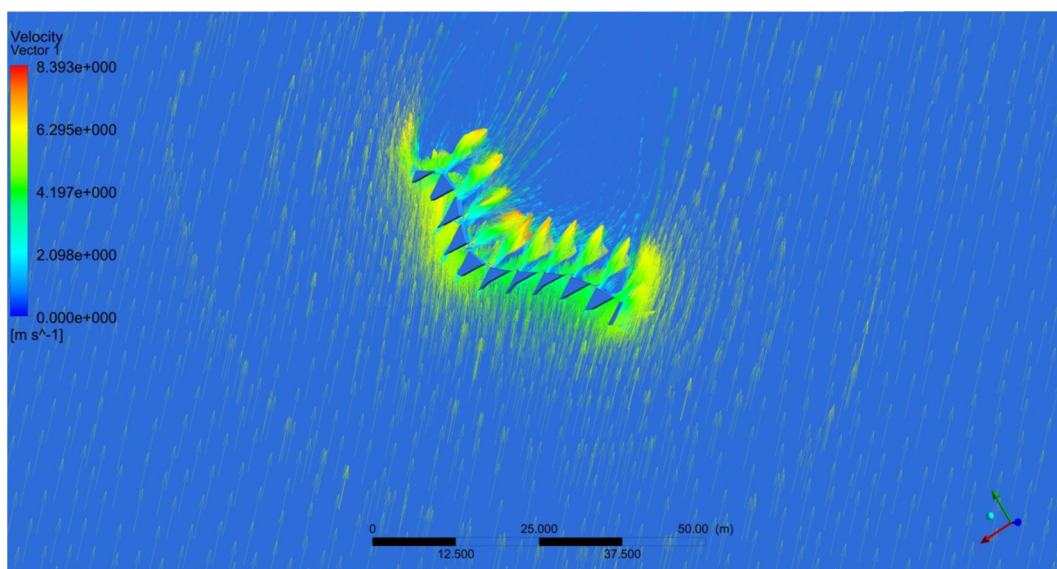
No *Solver*, novamente tomou-se o cuidado de aumentar o número máximo de iterações para que a solução pudesse convergir adequadamente a tempo.

**Figura 20: Simulação Preliminar dos Anteparos indicando a velocidade a um plano a 2m de altura do terreno**



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 21: Simulação Preliminar dos Anteparos indicando vetores de velocidade a um plano a 2m de altura do terreno**



Fonte: Elaborado pelo autor

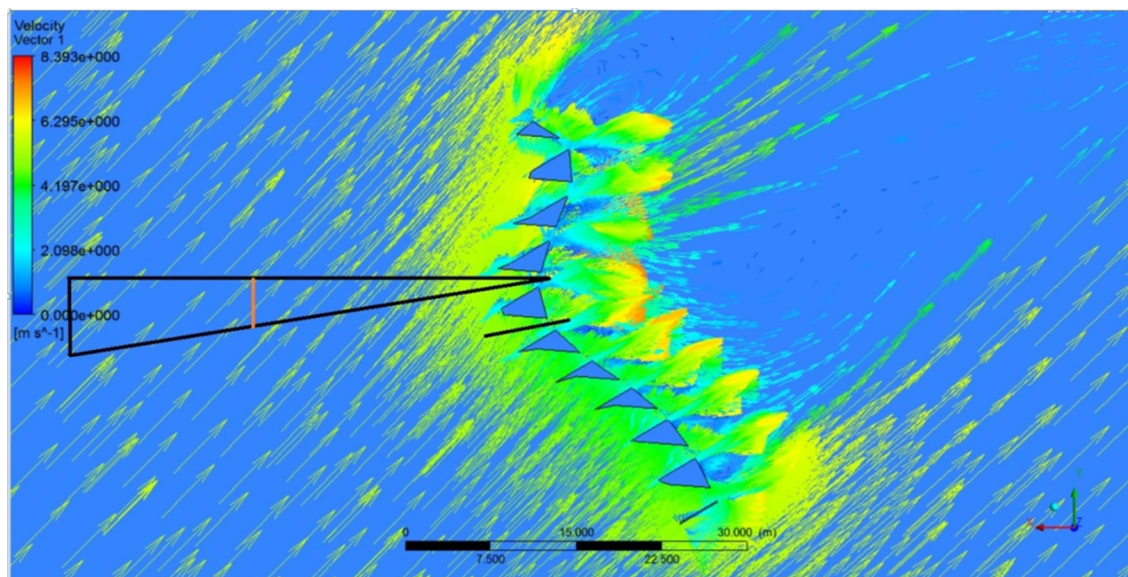
Com a análise das imagens geradas é verificado que na Figura 20, com a cor variando com a velocidade escalar do vento em cada ponto, existe uma grande área de ar estagnado, indicado pela mancha de cor azul. Com a observação da

Figura 21, percebe-se a partir dos vetores do vento que a angulação do anteparo está criando um efeito negativo para a circulação natural do vento.

### 3.2.2 Anteparos de Vento: Simulação Adaptada

Como foi identificado que o problema da simulação anterior era o ângulo de entrada no vento com o anteparo, para melhor entender-se o comportamento do vento, foi necessário mudar esse ângulo de entrada. Para isso, primeiramente teve-se que identificar o ângulo ótimo para a entrada do vento no anteparo.

**Figura 22: Identificação do ângulo ótimo de entrada do vento.**



Fonte: Elaborado pelo autor

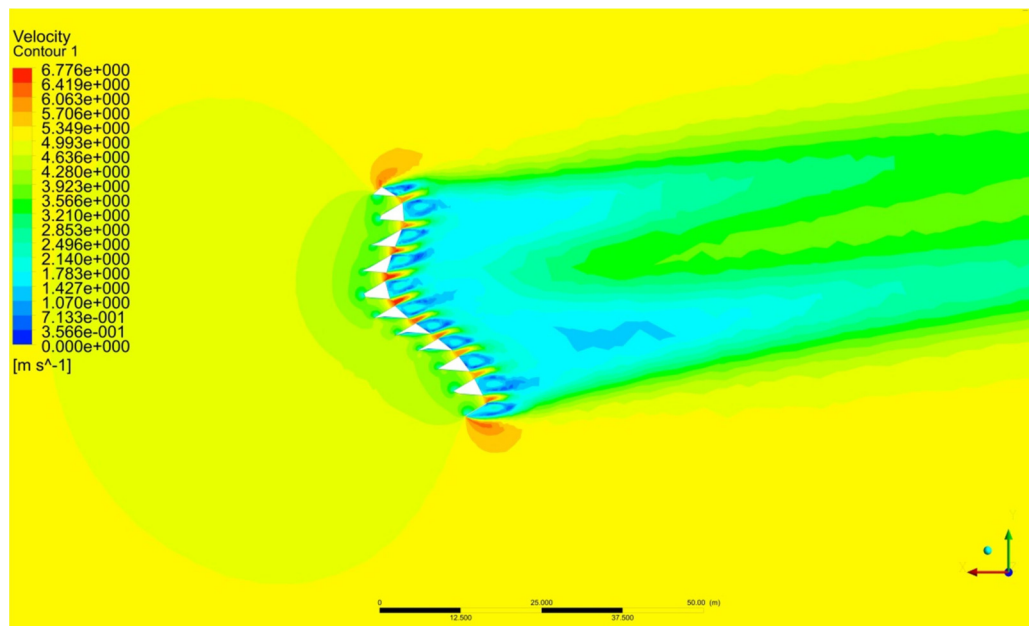
Foi traçada uma reta mediana exatamente no ângulo do anteparo, e traçando uma reta horizontal e uma vertical (como foi indicado na Figura 22) e com os seus comprimentos foi possível descobrir o ângulo ótimo.

A partir das medições, foi calculado o ângulo ótimo, aproximadamente 11,9166 graus. Com isso, para o vento ter velocidade de 5m/s, ele apresentou as componentes vertical  $V$  de 4,89224m/s e horizontal  $U$  de 11.9166m/s.



A simulação anterior foi refeita, substituindo os valores dos componentes dos ventos pelos valores encontrados anteriormente.

**Figura 23: Segunda Simulação dos Anteparos indicando a velocidade a um plano a 2m de altura do terreno**



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 23 resultante ficou um pouco diferente por conta do uso da ferramenta *Contour*. Isso cria contornos delimitando zonas com a mesma propriedade (no caso velocidade) e com base da legenda fica mais fácil a identificação das zonas com diferentes velocidades.

Comparando a Figura 22 com a Figura 23, pode-se perceber que a Figura 22 tem grandes zonas de estagnação do ar, enquanto que a Figura 23 possui zonas com velocidade baixa, porém a melhoria na movimentação no vento é clara.

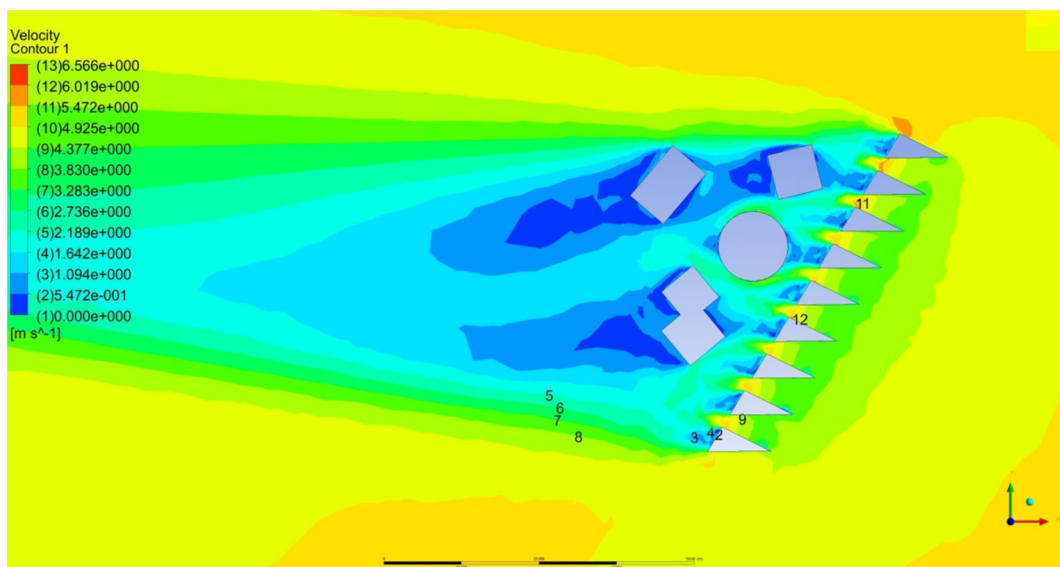
É possível perceber, também, que o ganho na velocidade do vento é muito contido à parte interna imediatamente depois dos anteparos e que a perda de velocidade dos ventos é bem perceptível a médio e longo prazos.

### 3.2.3 Volumes Internos

O próximo passo foi a análise de como o vento iria se comportar com vários obstáculos internos. Esses obstáculos estão representando os ambientes internos que existirão embaixo da cobertura.

Com a utilização dos anteparos com o ângulo do vento ajustado corretamente, foram adicionados diversos sólidos de formatos diferentes, a fim de entender o comportamento dos ventos e projetar a planta baixa da estrutura final.

**Figura 24: Simulação com os volumes internos indicando a velocidade a um plano a 2m de altura do terreno**



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da Figura 24, pode-se ver que por trás dos volumes internos ocorre muita estagnação de ar, logo deve-se distribuí-las de forma estratégica pela estrutura. Por trás de regiões mais arredondadas, é evidente uma menor área de estagnação de ar, representada pelas manchas azuis.

### 3.4 ESTRUTURAS COMPLETAS

Nessa última sessão do trabalho, foram realizadas simulações contendo todos elementos das simulações anteriores. Foi utilizado o posicionamento encontrado nas simulações de terreno e foram aplicados os conhecimentos do comportamento dos ventos nos elementos estruturais. Com isso, foi possível realizar simulações mais complexas, chegando no real objetivo do trabalho.

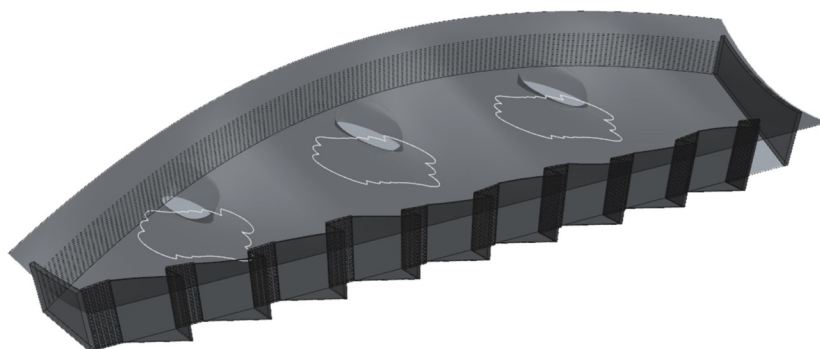
#### 3.4.1 Coberta aberta

Até esse momento do projeto, todas as geometrias das simulações foram obtidas praticamente da mesma forma: um arquivo de desenho 2D importado pelo *SolidWorks* sendo trabalhado para transformar em uma estrutura 3D do volume de controle final. Nas próximas simulações essa forma de criar a geometria não é possível por conta de sua complexidade.

Para juntar-se estrutura com o terreno (utilizado na primeira simulação preliminar) tentou-se de várias maneiras diferentes, mas a que se demonstrou mais efetiva foi a utilização da ferramenta *Boolean* no *Design Modeler* do *Ansys*.

O arquivo de geometria do volume de controle do terreno (usado na primeira simulação) foi adicionado como *Frozen*, enquanto que a nova geometria que está sendo estudada foi como adicionada como *Add Material*. A partir da ferramenta *Boolean* na configuração de *Subtract*, retirou-se o volume correspondente à estrutura que será construída (a que se está estudando) criando um espaço vazio que indica onde o vento não flui (paredes e cobertura). Com isso é possível prever os seus padrões de circulação de ventos no volume de controle resultante.

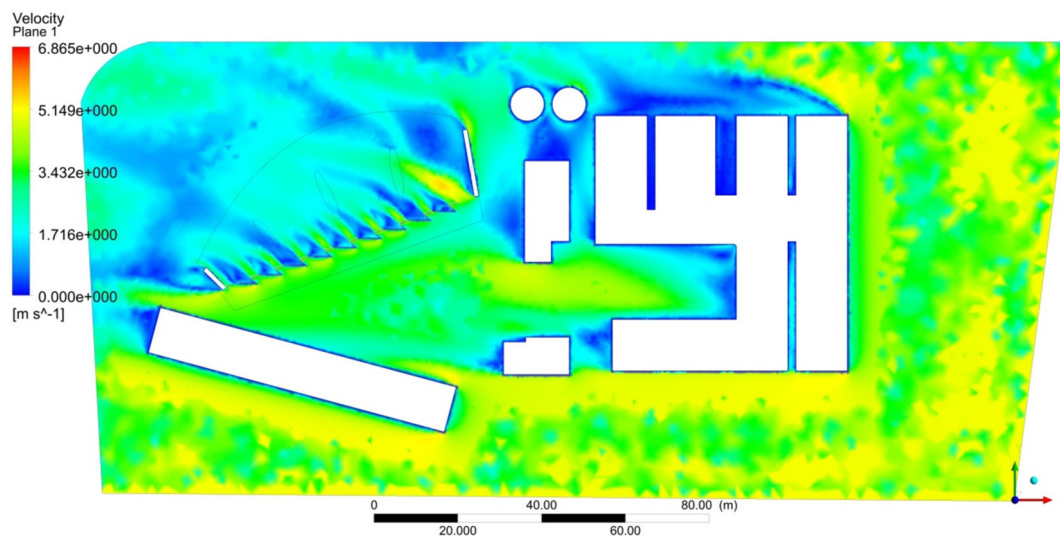
**Figura 25: Estrutura 3D da cobertura com os anteparos**



Fonte: Elaborado pela equipe de Arquitetura.

A partir da Figura 25 nota-se que a parte da entrada do vento é constituída de uma série de anteparos que foram estudados anteriormente.

**Figura 26: Simulação com os volumes internos indicando a velocidade a um plano a 2m de altura do terreno**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os paralelepípedos referentes aos estacionamentos foram removidos e foi adicionada outra estrutura em forma de paralelepípedo como observado na



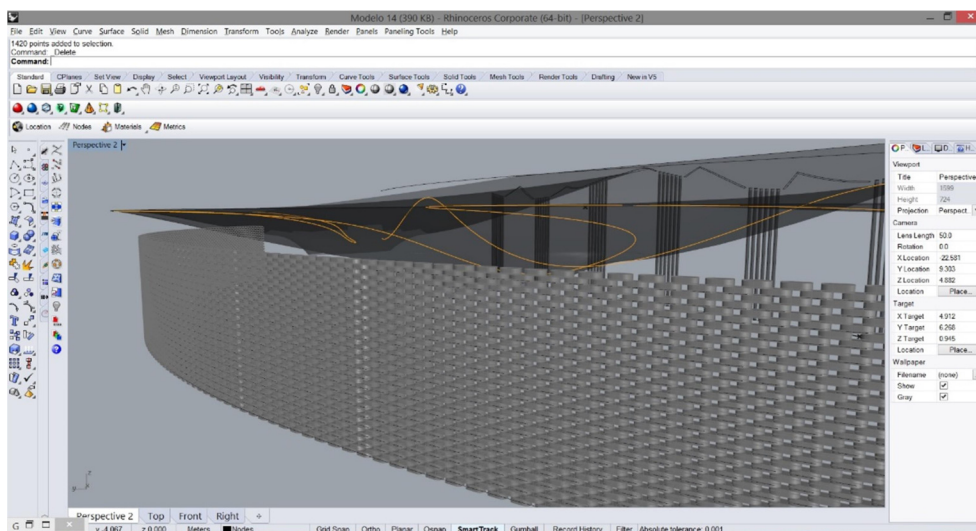
Figura 26. Essa estrutura foi posicionada a uma angulação de 15 graus, referente ao ângulo da incidência do vento. Essa configuração de posicionamento da estrutura deve minimizar os impactos da diminuição do fluxo de vento na estrutura estudada.

Essa simulação demandou um poder computacional muito maior que as outras, totalizando mais de doze horas ininterruptas de simulação. Mesmo com o valor da *Inflation* o maior possível, é perceptível uma falta de refinamento caracterizada pelas manchas amarelas e verdes onde, logicamente, deveria ser uma cor sólida. Isso se assemelha muito com a primeira simulação anterior, que demonstrou o mesmo efeito que dificulta a análise dos limites das zonas de estagnação de ar e zonas de alta velocidade de ventos por exemplo.

### **3.4.2 Coberta Fechada**

Na simulação anterior, as entradas e a saída de vento estavam totalmente abertas para a passagem de vento, mas isso não ocorrerá na realidade. Entre os anteparos da entrada de vento haverá uma cerca viva, permitindo a passagem de vento, porém impedindo que a poeira passe. Essa cerca será feita por plantas, para servir como uma espécie de filtro para que a poeira – abundante na região – fique presa sem impedir a circulação de ventos. Já na saída da estrutura, haverá uma parede com tijolos espaçados de uma forma tal para permitir a passagem de vento, como visto na Figura 27.

**Figura 27: Feixe de Tijolos Paramétricos**



Fonte: Elaborado pela equipe de Arquitetura.

Esses tijolos foram projetados especialmente para esse projeto pela equipe de arquitetura através do software *Rhinoceros*. Com eles, é possível a fácil circulação de ventos na estrutura.

Esses obstáculos na entrada e saída de ar seriam muito difíceis de serem retratados exatamente em uma simulação computacional como essa, logo elas foram simplificadas como feixe de cilindros. Com o feixe de cilindros, pode-se ajustar a distância entre eles influenciando diretamente a dificuldade do fluxo de vento, além de diminuir a carga computacional.

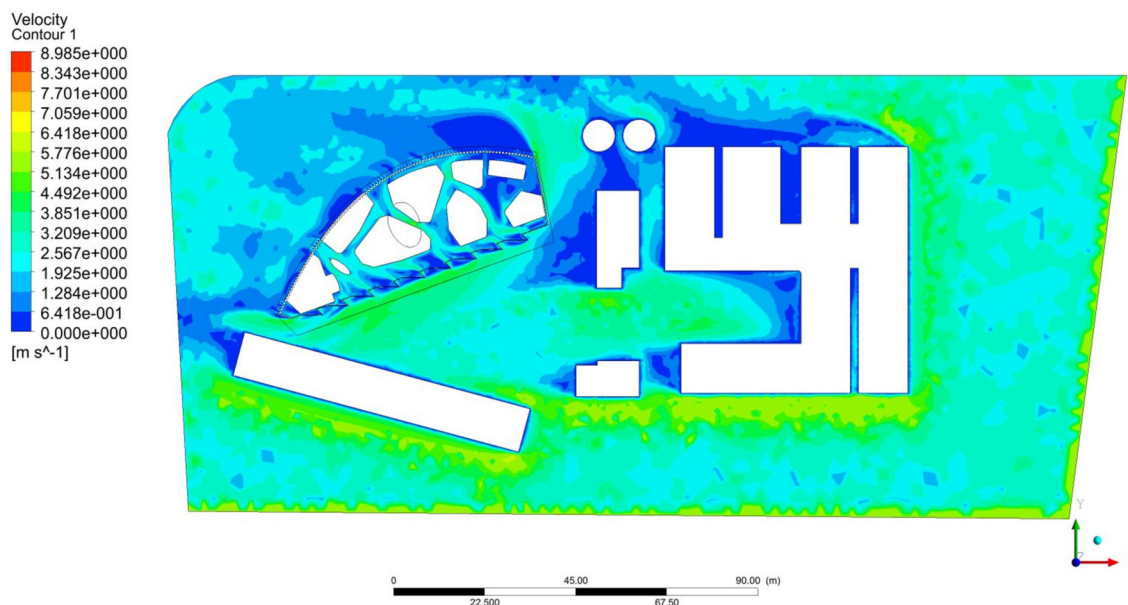
Essa simulação teve, também, os volumes internos referentes às estruturas internas da coberta.

Teoricamente, a forma de modelar a geometria deveria ser da mesma forma que a simulação anterior, mas isso não aconteceu. Com a geometria mais complexa, o *Rhinoceros* acabou exportando a geometria como diversas superfícies, sem formar um sólido maciço.

Por fim para resolver isso, foi utilizado o comando *Knit* no *Design Modeler* do *Ansys*. Esse comando junta diversas superfícies e tenta formar um sólido. Inicialmente, houve diversos erros, mas ao identificar-se uma superfície

problemática, ela foi redesenhada no *Rhinceros* e a ferramenta *Knit* funcionou perfeitamente. O resultado apresenta-se na Figura 28.

**Figura 28: Simulação Final da velocidade do vento em um plano a 2m de altura do terreno**



Fonte: Elaborado pelo autor.

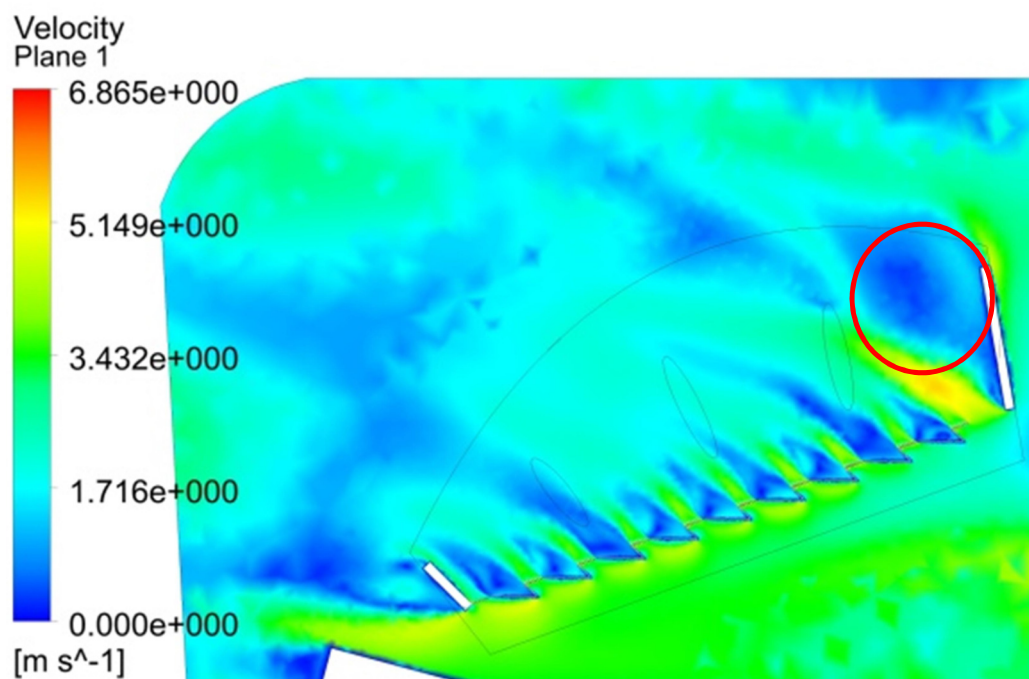
Com a adição de ambientes separados por baixo da cobertura, claramente visível na Figura 28, é possível observar claramente o fluxo de vento por dentro da estrutura, passando pelos corredores e áreas comuns, com apenas uma área de estagnação de ar claramente definida na ponta direita da estrutura.

#### 4 RESULTADOS

Com a realização de análises principalmente nas simulações finais, observou-se que existem zonas de estagnação de vento em locais específicos da estrutura.

Primeiramente, analisando a simulação que a estrutura não apresenta os ambientes internos separados, observa-se uma grande área de baixa velocidade de ventos na ponta superior direita, indicado na Figura 29.

**Figura 29: Área de estagnação de ar – SEM ambientes internos**



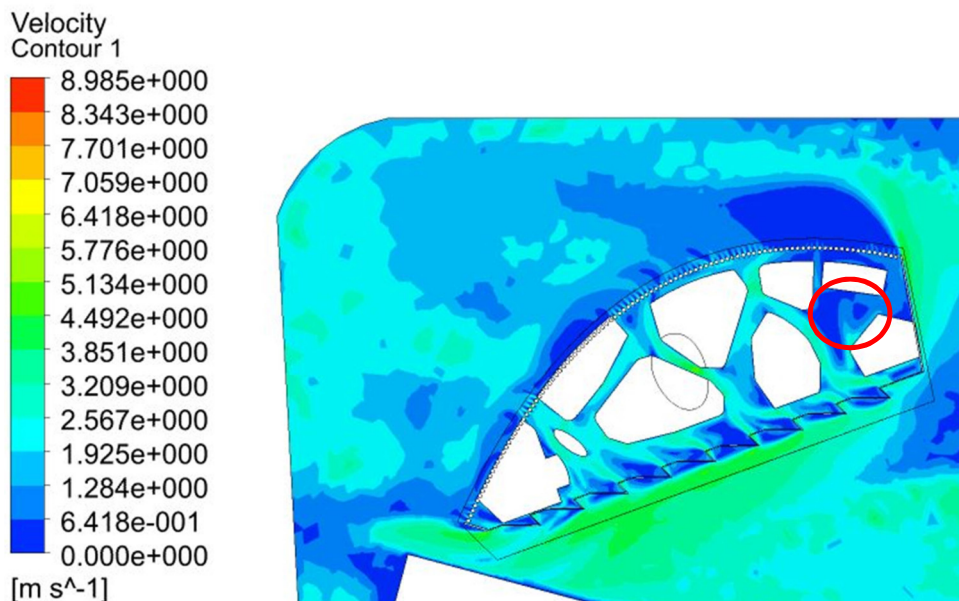
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar, também, que a presença dos anteparos simulados nas sessões 3.2.1 e 3.2.2 transformaram a distribuição dos ventos em uma forma mais heterogênea, criando zonas de baixa velocidade de ventos e zonas com velocidades maiores.

Vale ressaltar que os cilindros distribuídos na entrada de ar acabam por criar uma resistência aos ventos também, sendo esse o seu objetivo, substituindo estruturas mais complexas e reduzindo a carga computacional.

Já na simulação final que possui os volumes internos, observa-se uma área de estagnação de ar entre os volumes na ponta superior direita da estrutura, indicado na Figura 30.

**Figura 30: Área de estagnação de ar – COM ambientes internos**

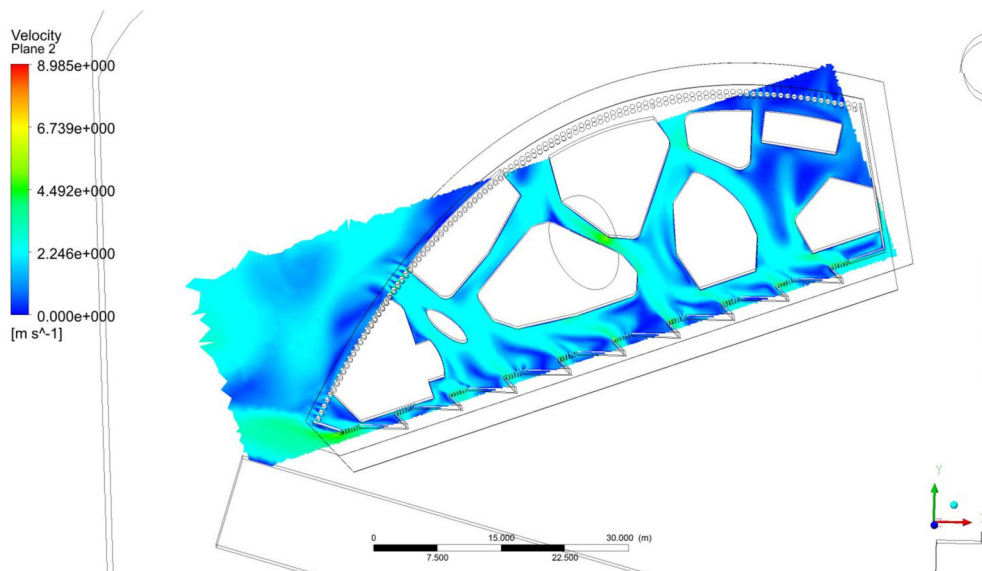


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a avaliação quantitativa da velocidade do escoamento dentro da estrutura, foram utilizadas outras ferramentas do CFX-Post.

Primeiramente, foi gerado um novo plano seguindo o padrão das simulações realizadas no trabalho (plano a 2m de altura do terreno) para delimitar a área da estrutura, como pode ser visto na Figura 31.

**Figura 31: Plano de cálculo da velocidade do vento**



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir desse plano delimitado, utilizou-se a função *Function Calculation* para encontrar os valores da Tabela 3.

**Tabela 3: Valores de Velocidade encontrados na última simulação.**

<b>Medida</b>	<b>Valor</b>
Velocidade Média	1.83929 [m/s]
Velocidade Mínima	0.00939903 [m/s]
Velocidade Máxima	5.62582 [m/s]

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os valores encontrados, tem-se a velocidade mínima que é referente às manchas azuis indicadas na Figura 30, que o ar está se movimentando muito lentamente, praticamente estagnado.

Já a velocidade máxima indicada na Tabela 3 pode ser associada à Figura 23, lembrando que existe uma pequena zona de alta velocidade de escoamento exatamente depois dos anteparos de entrada.

Por fim, a velocidade média dentro do volume gerado é o valor mais condizente com o comportamento do vento dentro da estrutura e pode ser considerado como o resultado final da simulação.

Para a contextualização do número encontrado, ele deve ser comparado à velocidade de escoamento do vento inicialmente, para serem computadas as perdas. A velocidade inicial de entrada do vento é de 20 km/h ou, convertendo para a mesma unidade, 5,5556 m/s.

Ao realizar uma breve comparação entre o valor da velocidade média na estrutura com o valor inicial da velocidade de escoamento dos ventos considerado, tem-se 33,1072% desse valor, uma parcela considerável do vento da região.

## 5 CONCLUSÃO

Com o estudo, pôde-se inicialmente definir a velocidade, a direção e o sentido dos ventos da região.

Com o uso dessas informações, através do *Ansys-CFX* foi possível realizar simulações nos terrenos, levando em conta os impactos das estruturas das redondezas e simular o comportamento em estruturas propostas, como os anteparos de entrada de ventos e os volumes internos da estrutura, que representam ambientes separados.

Foram realizadas simulações finais com a estrutura proposta. A primeira simulação, utilizando o resultado das simulações dos anteparos e das simulações de terrenos, enquanto que na simulação final foram adicionados os ambientes internos.

A partir dos resultados, foi realizada uma análise qualitativa na velocidade de escoamento dos ventos, identificando áreas de estagnação do ar presentes na região nordeste da estrutura.

Por fim, foi realizada uma análise quantitativa na velocidade de escoamento dos ventos. Com ventos de velocidade máxima de 5.62582 m/s na estrutura em pontos muito específicos. Em outros pontos, o ar fica praticamente parado, chegando a velocidade mínima de 0.00939903 m/s, principalmente na área nordeste da estrutura. Em termos gerais, a velocidade média de escoamento do vento na estrutura foi de 1.83929 m/s, 33,1072% do valor da velocidade local dos ventos, uma parcela considerável do vento da região.

Como melhorias para o projeto, pode-se considerar uma mudança na configuração dos ambientes internos da área nordeste da estrutura, de forma a melhorar a circulação de ar na região. Outra possibilidade de melhoria seria o estudo da parte térmica da estrutura, levando em consideração a maior troca de calor das áreas climatizadas causada pela alta convecção da circulação dos ventos.

O *Ansys-CFX* é uma ferramenta extremamente complexa e necessita um vasto conhecimento para ser operado de forma eficiente. Essa eficiência na resolução de problemas foi evidente durante o trabalho.

## REFERÊNCIAS

PATANKAR, S. V.; **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. Taylor & Francis Group, 1980;

VERSTEEG, H. K, MALALASEKERA, W.; **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**; Segunda Edição, Pearson Prentice Hall, 2007.

FOX R.W., MCDONALD A.T., PRITCHARD P.J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 5ª ed, School of Mechanical Engineering Purdue University: Livro Técnico e Científicos Editora S.A, 2001.

Ansys Workbench Help versão 12.1: Help Topics. (s.d.).

Ansys Workbench Help versão 16.1: Help Topics. (s.d.).

Rosa dos Ventos do Porto do Pecém. Disponível em:

[https://www.meteoblue.com/en/weather/forecast/modelclimate/pec%C3%A9m\\_brazil\\_3392693](https://www.meteoblue.com/en/weather/forecast/modelclimate/pec%C3%A9m_brazil_3392693), visitado em 14/06/2016 às 19:23h.

CFD online. **Finite volume**. disponível em: [http://www.cfd-online.com/Wiki/Finite\\_volume](http://www.cfd-online.com/Wiki/Finite_volume) visitado em 21/06/2016 às 16:13h.

Direção e Intensidade do Vento para Pecém - CE disponível em <http://www.climatempo.com.br/>, visitado em 13/06/2016 às 14:48h.

Fotografia de satélite da região em estudo. Disponível em:

<https://www.google.com.br/maps/preview?hl=pt-BR>, visitado em 13/06/2016 às 18:20h.