Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia de Construção Civil

Trabalho de Formatura - 2013

Estudo da influência da cobertura na ventilação natural nos Módulos do CEPEUSP

Orientador:
Prof. Dra. Brenda Chaves Coelho Leite

Co-orientador:
Prof. Dr. Pedro Wellington Gonçalves do Nascimento Teixeira

Alunos:
Bruno Costa de Albuquerque
Fernando Luz Rodrigues
Luis Gustavo Garcia
Luiz Gustavo de Souza Carvalho
Luiz Henrique Altopiedi

São Paulo
2013

BRUNO COSTA DE ALBUQUERQUE
FERNANDO LUZ RODRIGUES
LUIS GUSTAVO GARCIA
LUIZ GUSTAVO DE SOUZA CARVALHO
LUIZ HENRIQUE ALTOPIEDI

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA COBERTURA NA VENTILAÇÃO NATURAL NOS MÓDULOS DO CEPEUSP

Projeto de Formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, no âmbito do Curso de Engenharia Civil

São Paulo
2013

BRUNO COSTA DE ALBUQUERQUE
FERNANDO LUZ RODRIGUES
LUIS GUSTAVO GARCIA
LUIZ GUSTAVO DE SOUZA CARVALHO
LUIZ HENRIQUE ALTOPIEDI

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA COBERTURA NA VENTILAÇÃO NATURAL NOS MÓDULOS DO CEPEUSP

Projeto de Formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, no âmbito do Curso de Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dra. Brenda Chaves Coelho Leite
Co-orientador: Prof. Dr. Pedro Wellington Gonçalves do Nascimento Teixeira

São Paulo
2013

Rodrigues, Fernando Luz
Estudo da influência da cobertura na ventilação natural nos módulos do CEPEUSP / F.L. Rodrigues, B.C. de Albuquerque, L.G. Garcia, L.G.S. Carvalho, L.H. Altopiedi. -- São Paulo, 2013.
125 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1. Coberturas 2. Ventilação 3. Estruturas metálicas 4. Conforto térmico I. Albuquerque, Bruno Costa de II. Garcia, Luis Gustavo III. Carvalho, Luiz Gustavo de Souza IV. Altopiedi, Luiz Henrique V. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil VI. t.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente aos nossos pais, por nos darem todo o suporte durante a nossa trajetória e pelo incentivo a sempre permanecermos no caminho do bem, da ética e do estudo.

A Deus, pela força nas horas difíceis e inúmeras conquistas e oportunidades que tivemos ao longo de nossas vidas.

À nossa orientadora Profª Dra. Brenda Chaves Coelho Leite, por todo o apoio e acompanhamento no desenvolvimento deste trabalho e por nos disponibilizar o seu precioso tempo para reuniões que foram fundamentais para o direcionamento em alguns estudos.

Ao nosso co-orientador Prof. Dr. Pedro Wellington Gonçalves do Nascimento Teixeira, pela colaboração e auxílio incondicional no esclarecimento de dúvidas sobre projeto estrutural.

Ao Prof. Dr. Racine Tadeu Araujo Prado, pelo incentivo, esclarecimento, correções e valiosas sugestões para o estudo de ventilação e conforto térmico.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, por toda a estrutura, e principalmente ao corpo docente, por todo o conhecimento e desenvolvimento pessoal proporcionado nos últimos anos, que foram essenciais para o nosso crescimento.

RESUMO

Nos últimos anos, o conceito de sustentabilidade tem inundado diversas áreas da engenharia, e decisões tomadas a partir do mesmo ganham cada vez mais respeito na sociedade em geral, além de despertar o interesse de diversos pesquisadores. No âmbito da eficiência energética do edifício, o aproveitamento e favorecimento da ventilação natural são de extrema importância para que sejam reduzidos os gastos com conforto térmico. Assim, este trabalho vem avaliar a situação atual dos módulos do CEPEUSP no que se refere ao conforto térmico e ventilação natural, propor uma nova cobertura que favoreça tais aspectos e elaborar seu projeto básico.

Durante a primeira etapa foram desenvolvidos temas que abordam a ventilação natural, além de características das coberturas sheds. Tais coberturas, concebidas para um melhor aproveitamento da iluminação natural, apresentam também ganhos na ventilação natural em ambientes com ventilação cruzada, além de ser possível a adaptação de sua geometria para que sejam aproveitados ao máximo fatores climáticos locais. Na segunda etapa, desenvolveu-se um estudo que envolve a aplicação do CFD (Computational Fluids Dynamics), as cargas estruturais da nova cobertura proposta e esforços solicitantes presentes.

Os estudos foram realizados a partir de simulações computacionais utilizando-se o software Design Builder e, assim, foram obtidos os resultados da situação atual e da situação com o shed proposto. Foi utilizado o software Design Builder para as simulações em CFD, e o software Ftool para as análises estruturais na nova cobertura.

Palavras-Chave: ventilação natural; módulos; CEPEUSP; cobertura; shed; Design Builder, CFD.

ABSTRACT

In recent years, the concept of sustainability has been present in many areas of engineering, and decisions made from this concept have gained more respect in society in general, also increasing the interest of many researchers. In the scope of building's energy efficiency, the use and the favoring of natural ventilation are of extreme importance when it comes to reduce the spending on thermal comfort. This work evaluates the status of CEPEUSP's modules, in regards to thermal comfort and natural ventilation, and proposes a new coverage that favors such aspects and elaborates its basic design.

During the first stage, themes were developed to address natural ventilation, as well as characteristics of shed roofs. Such roofs, designed to make better use of natural lighting, also present gains in natural ventilation in environments with cross ventilation, besides being able to adapt their geometry so that local climatic factors can be availed to the maximum. In the second stage, a study was developed that involved the application of CFD (Computational Fluids Dynamics) and the structural cargoes of the new coverage proposed and of the sought efforts present.

These studies were performed from computer simulations using the Design Builder software and, thus, the results of the current situation and of the proposed shed were obtained. It was used the software Design Builder for the simulations in CFD, and the software Ftool for the structural analysis of the new roof.

Keywords: natural ventilation; modules; CEPEUSP; roofs; shed; Design Builder, CFD.

SUMÁRIO

1 Introdução 11
2 Justificativa 16
3 Objetivos 17
3.1 Objetivos Gerais 17
3.2 Objetivos Específicos 17
4 Atividades Previstas 18
4.1 1ª Fase: Reunião do material base 18
4.2 2ª Fase: Desenvolvimento e escolha da solução 19
4.3 3ª Fase: Análise computacional e pré-dimensionamento da solução. 20
5 Revisão Bibliográfica 21
5.1 Coberturas *sheds* e a ventilação natural 21
5.2 João Filgueiras Lima (Lelé) 21
5.3 Hospitais da rede Sarah e Lelé 22
5.4 Evolução das coberturas shed da rede Sarah 22
5.5 Resultados de estudos recentes 23
6 Fundamentação Teórica 26
6.1 Ventilação 26
6.2 Efeitos do vento sobre a estrutura 31
6.2.1 Definições 31
6.2.2 Procedimentos para cálculo da ação do vento nas estruturas 31
6.2.3 Determinação dos fatores S1, S2 e S3 32
6.3 Definição dos materiais da nova cobertura 40
6.3.1 Autoportantes metálicas 41
6.3.2 Alumínio 44
6.3.3 Policarbonato 44
6.3.4 Escolha da cobertura 44
6.4 Projeto de estruturas metálicas de edifícios 45
6.4.1 Limites de utilização 46
6.4.2 Carga permanente (g) 46
6.4.3 Carga variáveis (q) 46
6.4.4 Projeto executivo 46
6.4.5 Projeto da cobertura – viga treliçada 46
6.5 Análise sobre o CFD 48
7 Desenvolvimento, Resultados e Discussões 49
7.1 Metodologia 49
7.2 Ferramentas computacionais de simulação de ventilação 52
7.3 Caracterização dos materiais e componentes do ginásio 53
7.4 Modelagem e simulação no software Design Builder 57
7.4.1 Modelagem 57
7.4.2 Simulação com Energy Plus 62
7.4.3 Resultados da simulação com Energy Plus 65
7.4.4 Análise dos resultados do Energy Plus 72
7.4.5 Simulação em CFD 74
7.4.6 Resultados e análises das simulações em CFD 81
8 Concepção da estrutura 101
8.1. Determinação e desenvolvimento do sistema estrutural 101
8.2. Tipo do aço utilizado 105
8.3. Caminhamento e distribuição das cargas - Formas dos perfis adotados 106

8.4. Determinação dos carregamentos 107
8.4.1. Carregamentos considerados no cálculo da estrutura..... 107
8.4.2. Determinação do peso próprio e esforços 108
8.5. Escolha dos perfis 116
8.6. Recomendações para o Dimensionamento 119
9 Conclusões e Recomendações..... 121
10 Referencias Bibliográficas 123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Arena Brusque (Fonte: Rio 2016. Disponível em: <Error! Hyperlink reference not valid.>. Acesso em 10 de junho de 2013). 12
Figura 2: Vista interna Arena Brusque. (Fonte: Rio 2016. Disponível em: <http://www.rio2016.com/pregamestraining/pt/arena-brusque>. Acesso em 10 de junho de 2013). 12
Figura 3: Vista interna estádio do Maracanã. (Fonte: Consórcio Maracanã Rio 2014. Disponível em: <http://www.maracanario2014.com.br>. Acesso em 18 de junho de 2013). 13
Figura 4: Vista externa dos módulos do CEPEUSP, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 14
Figura 5: Interior dos módulos, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 14
Figura 6: Sistema estrutural das vigas e pilares, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 15
Figura 7: Sistema estrutural da cobertura atual, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 15
Figura 8 – Hospitais da rede Sarah (FONTE: CAMARGO, 2011); 22
Figura 9: Modelos de shed aplicados. (Fonte: PERÉN, 2006 e LUKIANTCHUKI, 2010); 23
Figura 10 – Simulação de shed - Sarah Salvador (Fonte: PERÉN, 2007). 24
Figura 11 – Simulação de shed TRE-Bahia (Fonte: PERÉN, 2007).....24
Figura 12: Taxas de ventilação recomendadas.....28
Figura 13 – Isopleta de velocidade básica do vento V_0 (FONTE: NBR:6123/1988) ..32
Figura 14 – Esquema da distribuição proporcional de coeficientes de pressão externo para cada trecho de perímetro nos dois casos de direção do vento – (FONTE:NBR6123); 34
Figura 15 - Tabela que relaciona as dimensões um edifício retangular em planta com os coeficientes de pressão desenvolvidos em cada trecho de seu perímetro conforme a orientação do vento - (FONTE: NBR6123); 35
Figura 16: Coeficientes de pressão externa, FONTE: Autoria do próprio grupo; 35
Figura 17 - Distribuição dos coeficientes de pressão ao longo do perímetro da edificação segundo os dois casos da direção do vento, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 35
Figura 18 - Cobertura em sheds assimétricos sucessivos – (FONTE: NBR6123); ...36
Figura 19- Tabela que relaciona os coeficientes de pressão desenvolvidos em cada uma das faces dos sheds assimétricos para ventos de mesma direção, mas sentidos opostos – (FONTE: NBR6123); 36
Figura 20: Coeficientes de pressão externa para a cobertura, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 37
Figura 21 - Vista em perspectiva do modelo de bloco adotado para o calculo do coeficiente de pressão interna, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 38
Figura 22- VIsta frontal da face fictícia (sotavento) e a abertura do shed maior hachurada, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 38
Figura 23 - Coeficientes de pressão para ventos a 0˚ (FONTE: Autoria do próprio grupo); 39
Figura 24 - Coeficientes de pressão para ventos a 180˚, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 39

Figura 25 - Coeficientes de pressão para ventos a 180˚ (FONTE: Autoria do próprio grupo);.....39
Figura 26 - Coeficientes de pressão para ventos a 0˚(FONTE: Autoria do próprio grupo);.....39
Figura 27 - Representação em corte das diferenças entre coef. externos e internos em cada caso, (FONTE: Autoria do próprio grupo);.....40
Figura 28: Execução das telhas autoportantes, (Fonte MANUAL AÇOPORT) 41
Figura 29: Execução da cobertura com telhas autoportantes (FONTE: Arcotop);.....42
Figura 30: Ligação entre cobertura e estrutura, (FONTE: Arcotop);.....42
Figura 31: Revestimento termoacústico (FONTE: Arcotop); 43
Figura 32: Perfil da telha autoportante, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 43
Figura 33: Tipos de treliças mais comuns (FONTE: FRUCHTENGARTEN, J.) 47
Figura 34: Detalhe de ligação (FONTE: FRUCHTENGARTEN, J.);.....47
Figura 35: modelos de shed analisados (FONTE: PERÉN,2013); 50
Figura 36: Disposição dos pilares, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 51
Figura 38:corte A-A esquemático, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 51
Figura 37: Vista em perfil da edificação proposta com shed, (FONTE: Autoria do próprio grupo);.....51
Figura 39: corte esquemático B-B, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 52
Figura 40: Visão de dentro para fora – dimensão da porta,(FONTE: Autoria do próprio grupo);.....54
Figura 41: Comparação da dimensão da porta com altura de uma pessoa, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 54
Figura 42: Piso de madeira da quadra, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 55
Figura 43: Foco na treliça metálica, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 55
Figura 44: Foco nos travamentos metálicos, (FONTE: Autoria do próprio grupo);....56
Figura 45: Disposição da cobertura atual, (FONTE: Autoria do próprio grupo);.....56
Figura 46: Cobertura em chapas de aço alternadas com telhas transparentes de fibra, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 57
Figura 47: Interface do programa na modelagem (modelo atual), (FONTE: Autoria do próprio grupo);.....58
Figura 48: Definição de parâmetros na aba Activity, (FONTE: Autoria do próprio grupo);.....58
Figura 49: Definição dos materiais na aba Construction, (FONTE: Autoria do próprio grupo);.....59
Figura 50: Porcentagem nula de aberturas na aba Openings, (FONTE: Autoria do próprio grupo);.....60
Figura 51: na aba HVAC, apenas o item "Natural ventilation" está habilitado, (FONTE: Autoria do próprio grupo); 60
Figura 52: Perfis fornecidos por Jorge Isaac Perén (FONTE: Autoria do próprio grupo, embasado nos trabalhos de PEREN);.....61
Figura 53: Proposta de cobertura do tipo shed curvo, (FONTE: Autoria do próprio grupo);.....61
Figura 54: Proposta de cobertura do tipo shed reto, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....62
Figura 55: Dados relativos à localização, FONTE: Autoria do próprio grupo; 62
Figura 56: Planta do CEPEUSP, com orientação da edificação e sentido predominante do vento, FONTE: Feliciano CEPEUSP; 63
Figura 57: Visão renderizada (cobertura atual), FONTE: Autoria do próprio grupo;..64

Figura 58: Visão renderizada (cobertura tipo shed curvo), FONTE: Autoria do próprio grupo; 64
Figura 59: visão renderizada (cobertura do tipo shed reto), FONTE: Autoria do próprio grupo; 64
Figura 60: dados referentes ao arquivo BRA_SAO_PAULO_CONGONHAS_TMY3-837800, FONTE: Autoria do próprio grupo; 65
Figura 61: Temperaturas, absorção de calor e umidade relativa para a CONDIÇÃO ATUAL – VERÃO, FONTE: Autoria do próprio grupo; 66
Figura 62: Ventos (intensidade e direção) e trocas de ar para a CONDIÇÃO ATUAL – VERÃO, FONTE: Autoria do próprio grupo; 66
Figura 63: Temperaturas, absorção de calor e umidade relativa para proposta de SHED RETO – VERÃO, FONTE: Autoria do próprio grupo; 67
Figura 64: Ventos (intensidade e direção) e trocas de ar para proposta de SHED RETO – VERÃO, FONTE: Autoria do próprio grupo; 67
Figura 65: Temperaturas, absorção de calor e umidade relativa para a proposta de SHED CURVO – VERÃO, FONTE: Autoria do próprio grupo; 68
Figura 66: Ventos (intensidade e direção) e trocas de ar para proposta de SHED CURVO – VERÃO, FONTE: Autoria do próprio grupo; 68
Figura 67: Temperaturas, absorção de calor e umidade relativa para a CONDIÇÃO ATUAL – INVERNO, FONTE: Autoria do próprio grupo; 69
Figura 68: Ventos (intensidade e direção) e trocas de ar para a CONDIÇÃO ATUAL – INVERNO, FONTE: Autoria do próprio grupo; 69
Figura 69: Temperaturas, absorção de calor e umidade relativa para a proposta de SHED RETO – INVERNO, FONTE: Autoria do próprio grupo; 70
Figura 70: Ventos (intensidade e direção) e trocas de ar para a proposta de SHED RETO – INVERNO, FONTE: Autoria do próprio grupo; 70
Figura 71: Temperaturas, absorção de calor e umidade relativa para a proposta de SHED CURVO – INVERNO, FONTE: Autoria do próprio grupo; 71
Figura 72: Ventos (intensidade e direção) e trocas de ar para a proposta de SHED CURVO – INVERNO, FONTE: Autoria do próprio grupo; 71
Figura 73: Posição do sol e incidência às 15h do dia 22/01, FONTE: Autoria do próprio grupo; 73
Figura 74: Interface do programa na importação de resultados para a situação atual, FONTE: Autoria do próprio grupo; 75
Figura 75: Interface do programa na importação de resultados para a configuração com Shed, FONTE: Autoria do próprio grupo; 75
Figura 76: Importação de resultados - definição do dia e horário, FONTE: Autoria do próprio grupo; 76
Figura 77: Correção do balanceamento de fluxos de ar para a configuração ATUAL, FONTE: Autoria do próprio grupo; 77
Figura 78: Correção do balanceamento de fluxos ar para o modelo com SHED, FONTE: Autoria do próprio grupo; 77
Figura 79: Fluxos de entrada e saída de ar, balanceados, para a configuração ATUAL, FONTE: Autoria do próprio grupo; 78
Figura 80: Fluxos de entrada e saída de ar, balanceados, para a proposta de SHED, FONTE: Autoria do próprio grupo; 78
Figura 81: Incidência de ventos na fachada dos módulos, para o dia e horário analisados, FONTE: Autoria do próprio grupo; 79
Figura 82: Importação dos valores de temperaturas dos elementos de contorno, FONTE: Autoria do próprio grupo; 80

Figura 83: Importação dos valores de temperatura dos elementos de contorno, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....81
Figura 84: Modelo 3D da configuração atual antes da definição de planos gráficos, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....82
Figura 85: Gráfico CFD com foco na fachada norte (parede 1 - sotavento), FONTE: Autoria do próprio grupo;.....83
Figura 86: Gráfico CFD com foco na fachada norte (sotavento), FONTE: Autoria do próprio grupo;.....83
Figura 87: Gráfico CFD com foco na parede sul (parede 2 - barlavento), FONTE: Autoria do próprio grupo;.....84
Figura 88: Gráfico CFD com foco na parede sul (barlavento), FONTE: Autoria do próprio grupo;.....84
Figura 89: Vista de cima, com foco na parede sul (barlavento), FONTE: Autoria do próprio grupo;.....85
Figura 90: Fluxos de entrada e saída bem caracterizados, em uma das aberturas da fachada norte, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....85
Figura 91: Fluxos de entrada e saída em uma das portas da fachada norte, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....86
Figura 92: CFD em planos paralelos às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....86
Figura 93: CFD em planos paralelos às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....87
Figura 94: Plano CFD ortogonal às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....87
Figura 95: Planos CFD de temperaturas ortogonais às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....88
Figura 96: Planos CFD de temperaturas ortogonais às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....88
Figura 97: Plano CFD de temperatura ortogonal às fachadas N e S, cruzando uma porta de entrada e outra de saída de ar, FONTE: Autoria do próprio grupo; 89
Figura 98: Planos CFD de temperatura paralelos às fachadas N e S, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....89
Figura 99: Modelo 3D da configuração com shed antes da definição de planos gráficos, FONTE: Autoria do próprio grupo; 90
Figura 100: Resultados do CFD em planos paralelos às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....90
Figura 101: Resultados do CFD em planos paralelos às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....91
Figura 102: Entrada de ar - fluxos na fachada sul, FONTE: Autoria do próprio grupo; 91
Figura 103: Entrada de ar - fluxos na fachada norte, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....92
Figura 104: Vista de cima, mostrando bem os fluxos de entrada pelas portas nas fachadas N e S, FONTE: Autoria do próprio grupo; 92
Figura 105: Vista da abertura Shed 2 (190m²), FONTE: Autoria do próprio grupo;...93
Figura 106: Vista da abertura Shed 2 (190m²), FONTE: Autoria do próprio grupo;...93
Figura 107: Fluxo de saída na abertura Shed 3 (150m²), visto em um plano que contém esta abertura, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....94
Figura 108: Fluxo de saída, agora mostrando as 3 aberturas da cobertura proposta, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....94

Figura 109: Temperaturas em planos paralelos às fachadas das portas, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....95
Figura 110: Distribuição de temperaturas em planos paralelos às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....95
Figura 111: Planos ortogonais às fachadas N e S, cruzando entradas ou contendo saídas de ar, combinados com um paralelo, FONTE: Autoria do próprio grupo; 96
Figura 112: Planos gráficos que contém cada um uma das saídas (sheds 1, 2 e 3), FONTE: Autoria do próprio grupo;.....96
Figura 113: Definição de uma nova composição de materiais para a cobertura, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....97
Figura 114: Proposição de brises, para proteção contra radiação solar direta, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....98
Figura 115: Posição do Sol às 15h, na condição mais favorável para incidência direta da radiação, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....98
Figura 116: Resultados do Energy Plus para apenas troca de cobertura, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....99
Figura 117: Resultados do Energy Plus para a combinação das 3 mudanças (cobertura, brises e isolamento térmico), FONTE: Autoria do próprio grupo;.....100
Figura 118: Vista frontal treliça que apoia a cobertura, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....102
Figura 119: Esquema estrutural das treliças apoiadas sobre os pilares, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....102
Figura 120: Esquema estrutural com destaque para a viga metálica, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....102
Figura 121 - Imagem dos travamentos no plano xy em planta.....104
Figura 122 - Diagrama unifilar em 3D da estrutura metálica, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....104
Figura 123 - Disposição dos carregamentos considerados no projeto na treliça maior, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....108
Figura 124 - Planta e corte indicando a abrangência da linha de influência para o subconjunto maior, FONTE: Autoria do próprio grupo; 110
Figura 125 – Áreas de influência, FONTE: Autoria do próprio grupo; 111
Figura 126 - Esquema de barra biapoiada para V1.....111
Figura 127 - Diagrama de momentos fletores para V1.....112
Figura 128 - Diagrama de forças cortantes para V1, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....112
Figura 129 - Esquema de esforços nos banzos da treliça, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....112
Figura 130 - Área de influência para o banzo superior de V1, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....113
Figura 131 - Representação da carga atuante no banzo superior, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....113
Figura 132 - Carregamento no banzo superior, FONTE: Autoria do próprio grupo; 113
Figura 133 - Diagrama de momentos fletores no trecho de banzo entre montantes, FONTE: Autoria do próprio grupo;.....114
Figura 134 - Corte esquemático de um trecho de banzo superior e os carregamentos nele atuantes, FONTE: Autoria do próprio grupo; 114
Figura 135 - Esquema de um painel genérico da treliça e a massa linear de seus elementos, FONTE: Autoria do próprio grupo; 118

LISTA DE TABELAS

Consequências para o ser humano devido a variação da concentração de oxigênio no ar (Fonte: IVN, Conforto térmico em edifícios comerciais e industriais em regiões de clima quente) 27
Valores mínimos para o pé direito dos edifícios (Fonte: IVN, Conforto térmico em edifícios comerciais e industriais em regiões de clima quente) 29
Dimensões da edificação e suas relações 34
Correlação dos coeficientes de pressão interna 38
Características das telhas autoportantes (FONTE: MANUAL AÇOPORT); 44
Pesos e notas para a escolha o material da cobertura (FONTE:MANUAL AÇOPORT) 45
Notas ponderadas e escolha do material da cobertura (FONTE: MANUAL AÇOPORT); 45
- Tipos de aço mais utilizados em estruturas metálicas. Fonte: Apostila de Estrutura Metálicas – PEF2402 105
- Carregamentos adotados para cada cenário 109

1 INTRODUÇÃO

A prática esportiva é um instrumento educacional que visa o desenvolvimento integral das crianças e adolescentes, ensinando-os a lidar melhor com suas necessidades, desejos e expectativas, fazendo com que os jovens desenvolvam competências técnicas, sociais e comunicativas, essenciais para o desenvolvimento individual e social.

O esporte, como instrumento pedagógico, precisa se integrar às finalidades gerais da educação, de desenvolvimento das individualidades, de formação para a cidadania e de orientação para a prática social. O campo pedagógico do Esporte é um campo aberto para a exploração de novos sentidos/significados, ou seja, permite que sejam explorados pela ação dos educandos envolvidos nas diferentes situações. Além de ampliar o campo experimental do indivíduo, cria obrigações, estimula a personalidade intelectual e física e oferece chances reais de integração social. O esporte funciona como um diferencial na formação do cidadão e na construção de uma sociedade mais saudável em todos os sentidos.

Prestes a receber eventos esportivos, como a Copa do Mundo FIFA de Futebol em 2014 e os Jogos Olímpicos de Verão de 2016, o que se percebe no Brasil é a precariedade e até mesmo inexistência de Ginásios e Arenas Esportivas adequadas para a realização dos jogos. A má administração e falta de manutenção das estruturas existentes faz com que espaços de grande porte sejam interditados ao uso esportivo, tornando-se espaços ociosos.

Infelizmente há ainda uma grande falha em estrutura esportiva no Brasil, ginásios que apresentam péssimas condições de uso, e dessa forma acabam sendo interditados, e se tornando espaços ociosos. Temos como exemplo disso algo bem próximo, como o Velódromo e também o ginásio poliesportivo Iervolino Fioravante, que em 2008 com problemas de drenagem acabou sendo interditado e após longos anos uma das instalações acabou pegando fogo, o que torna a sua reforma muito mais cara. Hoje a prefeitura estuda derrubar o ginásio, pois além de custosa a reforma, o ginásio se encontra em um terreno valorizado. Já o velódromo do CEPEUSP foi interditado pelo fato de não apresentar mais segurança estrutural. Diversas patologias foram constatadas em sua estrutura.

A construção de novas Arenas Multiuso ou adequação das instalações existentes tornou-se comum no país nos últimos anos, em decorrência dos grandes eventos que o país sediará, sendo que a maioria das capitais e grandes cidades que possuem um Estádio Olímpico e/ou um Ginásio Poliesportivo têm realizado investimentos em reformas e adaptações nestes prédios com o objetivo de se adequar ao modelo.

No entanto, deve-se atentar também ao seu uso e administração no futuro. Essas Arenas possuem capacidades que vão de cerca de 4.000 (Ginásios Poliesportivos como a Arena Brusque em Santa Catarina, que pode ser vista na Figura 1 e na Figura 2) até aproximadamente 70.000 pessoas (Estádios de Futebol como o Maracanã, no Rio de Janeiro, que pode ser visto na Figura 3) e apresentam alto potencial de rentabilidade por poder abrigar, além das atividades esportivas, shows e espetáculos de alto nível.

Figura 1: Arena Brusque (Fonte: Rio 2016. Disponível em: <**Error! Hyperlink reference not valid.**>. Acesso em 10 de junho de 2013).

Figura 2: Vista interna Arena Brusque. (Fonte: Rio 2016. Disponível em: <http://www.rio2016.com/pregamestraining/pt/arena-brusque>. Acesso em 10 de junho de 2013).

Figura 3: Vista interna estádio do Maracanã. (Fonte: Consórcio Maracanã Rio 2014. Disponível em: <http://www.maracanario2014.com.br>. Acesso em 18 de junho de 2013).

Atrelados à mesma questão estão os custos de operação desses prédios. Uma grande preocupação em relação às Arenas cobertas diz respeito ao conforto térmico dos usuários, tornando necessário o uso de sistemas de ar condicionado e ventilação. Dessa forma, estudos que diminuam gastos energéticos aproveitando-se de características climáticas do local e coberturas que favoreçam a circulação de ar são de grande importância durante a etapa de projeto por poderem representar uma grande economia de energia em sua fase de operação.

Uma alternativa para melhorar significativamente a ventilação dentro do complexo esportivo é a utilização de uma cobertura que favoreça a circulação natural de ar, podendo ser obtida de diversas formas, dentre elas, uma cobertura tipo *shed*, que será um dos focos desse trabalho e será abordado com mais detalhes ao decorrer do texto.

Como objetivo traçado pelo grupo, o tema do trabalho deveria atender aos interesses da comunidade USP, sendo um projeto viável e que melhorasse a qualidade de vida dos frequentadores da Cidade Universitária.

Os módulos do CEPEUSP, que é constituído por um complexo coberto com quatro quadras poliesportivas, um módulo para lutas e outro para ginástica artística, possui uma arquitetura bem simples, tendo um formato de caixote de 90 metros de comprimento, 46 metros de largura e pé direito de aproximadamente 12 metros,. Os apois da cobertura são 16 pilares situados na face de seu comprimento, cinco em sua largura (já contando os pilares que ficam nas extremidades) e mais dois pilares internos nas divisões dos módulos. Na Figura 4 apresenta-se vista da fachada, na Figura 5 a parte interna dos módulos e as próximas duas imagens representam alguns desenhos esquemáticos da situação atual.

Figura 4: Vista externa dos módulos do CEPEUSP, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

Figura 5: Interior dos módulos, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

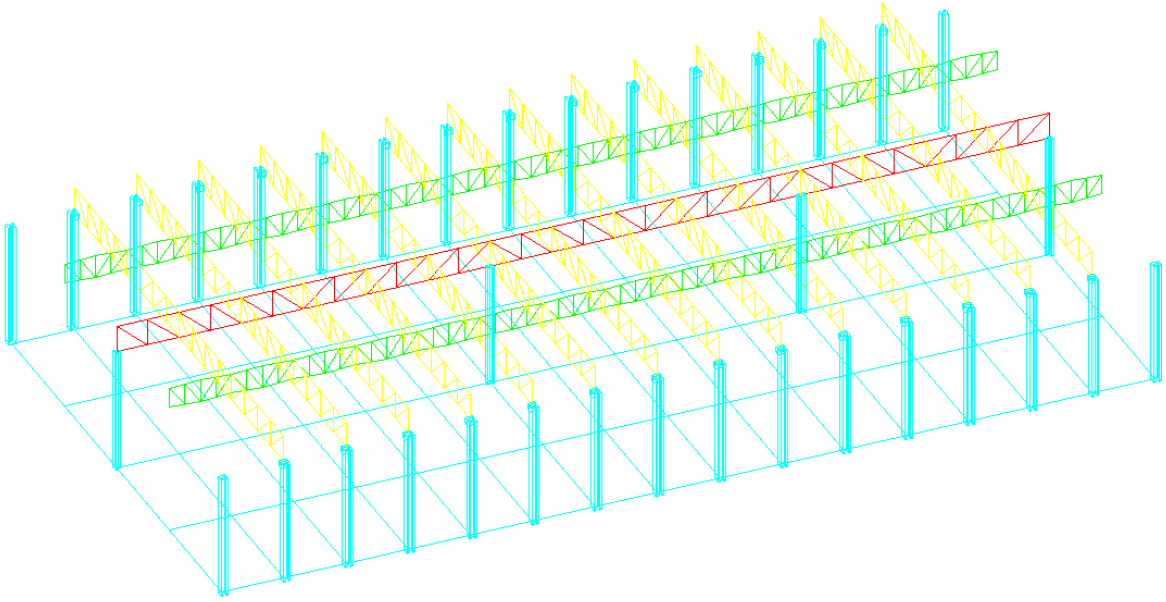


Figura 6: Sistema estrutural das vigas e pilares, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

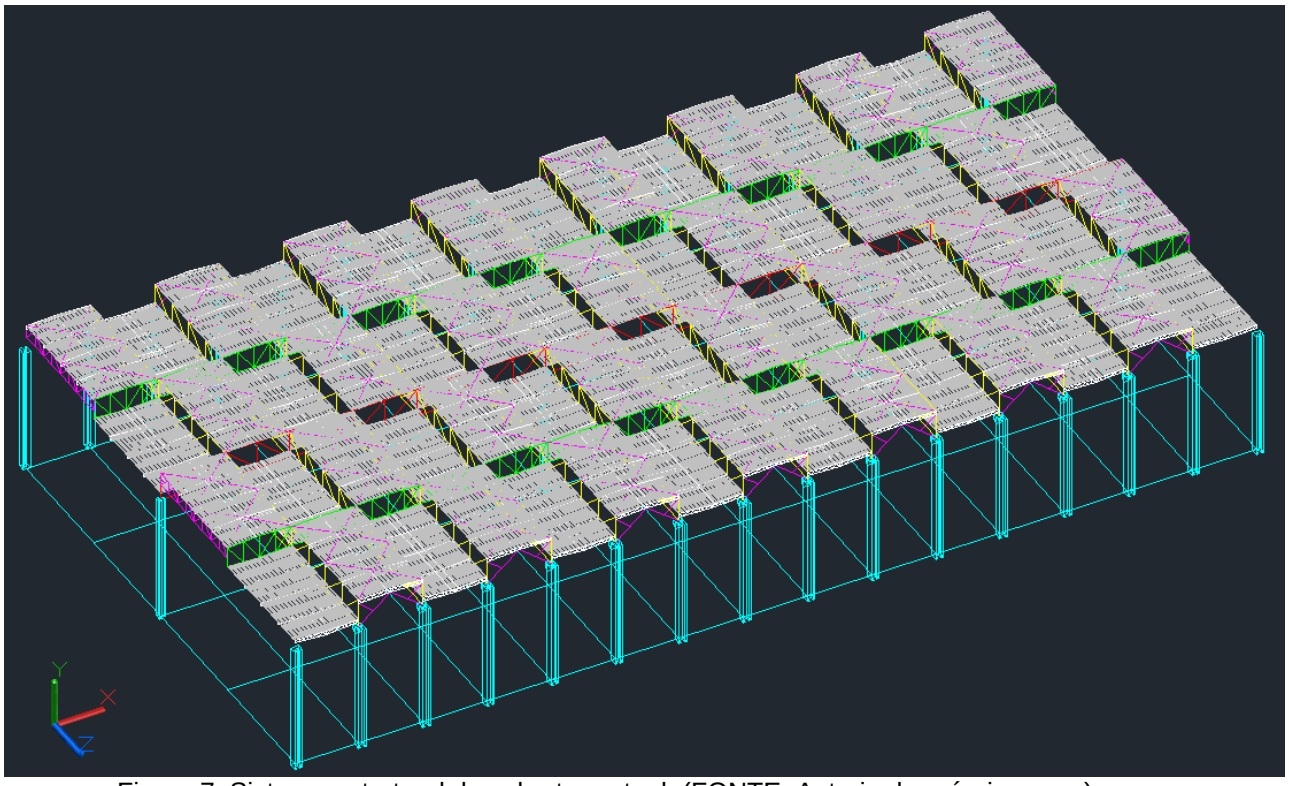


Figura 7: Sistema estrutural da cobertura atual, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

Segundo informações obtidas em entrevista com Antônio Feliciano, assessor de obras e reformas do CEPEUSP, o fluxo diário de pessoas no CEPEUSP varia muito com o clima e época do ano, recebendo, em média, 3.200 pessoas por dia, com picos no começo do ano letivo de 8.000 pessoas por dia.

2 JUSTIFICATIVA

Condições térmicas adversas como calor excessivo e ineficiência na ventilação reduzem o desempenho, causam desconforto e até problemas mais sérios como dor de cabeça, ânsia de vômito e desmaios em praticantes de exercícios físicos em lugares fechados. Um exemplo recente ocorrido no dia 16 de março de 2013, em uma partida da semifinal da Superliga de Vôlei no ginásio do Maracanãzinho na cidade do Rio de Janeiro, um exemplo do efeito das condições ambientes inadequadas da prática de esportes pôde ser observada. Na ocasião, uma das atletas que estava em quadra se sentiu mal devido ao forte calor e baixo índice de renovação do ar, durante a partida, em um dia de verão no horário das 10h da manhã, com o ginásio em plena capacidade (Fonte: http://esporte.uol.com.br/volei/ultimas-noticias/2013/03/16/sassa-passa-mal-durante-semifinal-da-superliga-no-maracanazinho.htm.)

Pé direito alto e ventilação adequada minimizam ou até eliminam esses problemas e suas consequências desagradáveis. No entanto, mesmo nos módulos do CEPEUSP apresentando um elevado pé direito, de aproximadamente 12 metros, a ventilação é deficiente.

Outro ponto importante que delimita a escolha da cobertura a ser adotada é o fato da implantação de novos pilares não ser possível a menos que sejam na periferia da estrutura, pois por se tratar de quadras, a construção de pilares internos torna-se inviável já que mudaria totalmente a funcionalidade da edificação analisada.

Portanto a implantação de uma cobertura tipo shed se justifica para aumentar o desempenho e diminuir o desconforto e as chances de possíveis transtornos dos atletas, torcedores e usuários dos módulos e com os novos materiais disponíveis no mercado, não aumentaria significativamente as cargas devido ao peso da estrutura, podendo gerar esforços devido à carga de ventos, tanto forças de tração nos pilares devido ao fluxo ascendente de ar, quanto a momentos não previstos nos projetos dos pilares originais. Esforços que também serão analisados e ponderados na escolha da melhor solução.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho é avaliar a situação atual dos módulos do CEPEUSP sob o ponto de vista das condições de conforto térmico e ventilação, propor uma nova cobertura que favoreça a ventilação natural e elaborar o projeto básico da cobertura proposta.

3.2 Objetivos Específicos

Para que sejam alcançados os objetivos supracitados, fazem parte do escopo deste trabalho:

- Estabelecimento do cenário atual e definição dos problemas e necessidades envolvidos;
- Definição de características climáticas do local: Definição de parâmetros climáticos que auxiliem no projeto, visando aproveitar características locais (direção e intensidade do vento, dia representativo, insolação, etc.) que auxiliem na simulação da ventilação da nova cobertura;
- Simulação computacional energética: Estudos de modo a melhorar o conforto térmico interno com a melhoria da ventilação natural;
- Análise com o uso de CFD para entendimento do comportamento do ar dentro da edificação estudada;
- Definição do tipo e material da cobertura e envoltória: Será definido o tipo de cobertura e envoltória que favoreça o conforto térmico, assim como materiais de construção para as mesmas que apresentem resultados favoráveis;
- Pré-dimensionamento da estrutura de sustentação da cobertura e elaboração de esquemas estruturais, fornecendo diagramas unifilares, de cargas atuantes e também os diagramas de esforços solicitantes;

4 ATIVIDADES PREVISTAS

O desenvolvimento do trabalho foi planejado em três fases:

4.1 1ª Fase: Reunião do material base

Essa etapa constitui-se em fazer o levantamento dos dados necessários e as pesquisas adequadas para dar-nos base para elaboração do projeto com embasamento teórico e técnico adequado e será aprofundada no capítulo 5, Revisão bibliográfica sendo realizadas as seguintes tarefas:

1. Obtenção de dados técnicos relacionados à situação atual do local estudado por meio de visitas acompanhadas de responsáveis do CEPEUSP;

2. Levantamento de dados relevantes ao projeto como área e volume do prédio, materiais e disposição interna das quadras e outras estruturas internas como localização dos pilares e da arquibancada, portas e janelas;

3. Verificação da situação da estrutura existente, com a verificação de patologias estruturais nas vigas e pilares;

4. Estudo do entorno com possíveis edificações e estruturas adjacentes que podem impedir a incidência do vento na cobertura dos módulos;

5. Obtenção de dados de operação, de demanda e históricos de utilização;

6. Obtenção de dados climáticos da região, obtidos no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP;

7. Reunião de materiais a respeito de coberturas metálicas e tecnologia de coberturas tipo shed já utilizada em concepções arquitetônicas de grandes edifícios (considerando eficiência na iluminação, ventilação e conforto térmico) que possam ser utilizados em ginásios esportivos;

8. Pesquisa de artigos, notícias, material acadêmico e informações sobre ginásios esportivos e como uma ventilação adequada aumenta o desempenho dos atletas;

9. Reunião de materiais e artigos sobre conforto térmico e ventilação em edifícios com formatos parecidos e áreas e volumes da mesma ordem de grandeza dos módulos esportivos do CEPEUSP;

10. Reunião de materiais para o dimensionamento de uma estrutura metálica que dará suporte à nova cobertura e para a análise da estrutura atual e possível reforços estruturais;

11. Consulta a normas diversas como as da ABNT NBR 8800 e NBR 6123

4.2 2ª Fase: Desenvolvimento e escolha da solução

Essa etapa constitui em analisar os dados obtidos na fase anterior e aplica-los no desenvolvimento para encontrar a melhor solução seguindo o roteiro a seguir, que será mais bem explicado com os dados obtidos no capitulo 6, Desenvolvimento:

1. Estabelecimento da situação atual da estrutura, instalações e do entorno, identificando problemas e necessidades. Definição do cenário geral;

2. Definição das premissas que balizarão a concepção da solução;

3. Definição e priorização dos critérios de desempenho que deverão ser atendidos no projeto, com base no que foi estabelecido nos itens 1 e 2 dessa mesma fase, divididos em fatores primários e secundários;

4. Paralelamente às três etapas anteriores será realizado o treinamento com o software de simulação energética de edificações, Design Builder, que tem plugin com o Energy Plus, para aquisição da experiência que será necessária na etapa seguinte em que será simulada a qualidade da solução inicial adotada;

5. Esboço da situação atual, tomando como base parâmetros usuais em projetos de ginásios contendo:

    a. Formato com as dimensões básicas do prédio: altura, largura e comprimento;
    b. Orientação do prédio, geograficamente e em relação aos ventos predominantes;
    c. Área interna e obstáculos;
    d. Materiais básicos utilizados na estrutura;
    e. Formato da cobertura;

6. Simulação da situação atual e análise dos resultados;

7. Simulação das alternativas de coberturas tipo shed, caso a solução não atenda os objetivos mínimos estabelecidos por meio das premissas primárias pontuadas na etapa 3, voltar-se-á à etapa 5 para que a concepção da cobertura seja repensada. Uma nova simulação será então necessária e uma nova análise será feita. Caso os resultados indiquem que a nova solução atenda as premissas primárias, essa concepção será considerada aceitável pelo grupo. Novas concepções serão simuladas até ser encontrada uma boa solução que atenda da melhor forma possível, as premissas previamente estipuladas;

8. Após a obtenção de três boas soluções que atendam todas as premissas, será escolhida, do ponto de vista da ventilação, a melhor entre elas, que será dimensionada na fase seguinte;

4.3 3ª Fase: Análise computacional e pré-dimensionamento da solução.

Essa etapa constitui em propor um projeto básico para a estrutura da nova cobertura que será apresentada nesse semestre e seguirá o seguinte planejamento:

1. Análise mais aprofundada da solução obtida pela de simulação de ventilação.

2. Análise em CFD dos módulos do CEPEUSP, com a nova cobertura proposta. Novamente, fez-se uso do Design Builder para realização dessas novas análises, agora usando o CFD (aba “CFD analysis” do software).

3. Análise dos esforços gerados devido a essa nova cobertura. Estudos preliminares sobre o material que será selecionado para a composição deixam em evidência a carga gerada por conta do peso próprio. Entretanto, nesse estudo percebeu-se que o vento também gera um aumento significativo na carga que essa nova estrutura deverá resistir;

4. Elaboração de diagramas unifilares representativos sobre a estrutura, travamentos e com os resultados obtidos, apresentação dos diagramas de esforços solicitantes;

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dentro dos aspectos fundamentais que norteiam o processo de desenvolvimento de uma solução que atenda aos objetivos estipulados pela equipe, destacam-se a característica arquitetônica das coberturas quanto à sua influência na eficiência das trocas de ar no interior do edifício e as condições ambientais mínimas necessárias à prática de esportes em ambientes fechados. Dessa forma, para solidificar a base de informações necessárias à realização deste trabalho, foi realizada uma série de pesquisas em relação aos aspectos supracitados dentro de uma aplicação atual, cujos resultados serão apresentados a seguir.

5.1 Coberturas *sheds* e a ventilação natural

O aproveitamento de fatores externos como os ventos locais são de suma importância para garantir o conforto térmico interno de maneira sustentável. Assim, a escolha de uma cobertura com arquitetura e materiais que favoreçam a ventilação natural no interior da edificação tem chamado cada vez mais a atenção de arquitetos e projetistas, sendo o foco deste trabalho.

Muito utilizadas nos Hospitais de reabilitação da rede Sarah Kubistchek, as coberturas *sheds*, concebidas primariamente com o intuito de se aproveitar ao máximo a iluminação natural sem a incidência direta de raios solares apresentam também resultados favoráveis em relação ao favorecimento da ventilação vertical. Projetadas pelo arquiteto João Filgueiras Lima, o Lelé, apresentam diversas configurações para se adaptar às condições locais, podendo assumir tanto característica captadora quanto exaustora de ar. A seguir, é apresentado um breve resumo da vida do arquiteto, características das coberturas *shed* dos Hospitais e resultados de estudos recentes.

5.2 João Filgueiras Lima (Lelé)

João Filgueiras Lima, apesar de natural do Rio de Janeiro, viveu a maior parte de sua vida em Brasília e Salvador. Cursou Arquitetura na Universidade Federal do Rio de Janeiro, formando-se em 1956. À época do projeto e construção da nova capital do país, Lelé rumou a Brasília aos 25 anos, primeiro grande momento de sua carreira profissional.

Em razão de limitações construtivas, necessidade de maior racionalização e a introdução de métodos industrializados na construção da cidade, viajou à Europa em 1963 de modo a adquirir o conhecimento na área, amplamente difundida na região, ajudando a introduzir essas tecnologias no Brasil durante a década de 1970 – característica presente até hoje em suas obras.

A preocupação com ventilação e iluminação também é uma característica marcante em suas obras, sendo sempre explorados os ventos locais e direção dos raios solares para um maior aproveitamento dos fatores climáticos. Desenvolveu vários estudos na área durante diversas obras, como ventilação cruzada, *sheds* em Y e a partir da década de 1980 os *sheds* em arcos, como os utilizados nos hospitais Sarah, e também disposições que favoreçam, além da ventilação, a iluminação natural. Ao longo do tempo, foram sendo incorporados às suas obras jardins,

espelhos d'agua, *sheds* com pé direito maior, e até mesmo pinturas diferenciadas em casos de maior insolação, aumentando o conforto interno das edificações, sendo nos hospitais da rede Sarah obtidos os melhores resultados.

5.3 Hospitais da rede Sarah e Lelé

A fundação da rede Sarah Kubitschek remonta ao ano de 1960, com inauguração do Centro de Reabilitação Sarah Kubitschek na cidade de Brasília, atualmente apelidado de "Sarinha". Após um acidente de carro em 1964, Lelé conheceu o Dr. Aloysio Campos da Paz Junior, que anos depois assumiria a Presidência e Direção do Centro de Reabilitação, criando a Rede de Hospitais de Reabilitação Sarah Kubitschek. A rede entrou em expansão com a inauguração de uma nova unidade em Brasília em 1980 e em outras capitais a partir de 1993, todas contando com Lelé como arquiteto e mostradas na figura a seguir.

Figura 8 – Hospitais da rede Sarah (FONTE: CAMARGO, 2011);

Estabelecido o conceito de estimular a locomoção e autonomia do paciente e assim acelerar o restabelecimento de seus movimentos, os hospitais apresentam em geral uma forma horizontalizada, ou seja, um único andar, sem degraus para facilitar a circulação dos pacientes e a ventilação natural, a circulação de pacientes e uma maior interação dos mesmos com o meio interno e externo. Assim, é também de grande importância a manutenção de parâmetros hospitalares nos ambientes internos, como circulação de ar e iluminação interna. Coberturas *sheds* apresentam melhores resultados nestes aspectos se comparadas às coberturas convencionais, fator que fez com que se tornassem outra marca estética das edificações.

As contribuições de Lelé à rede Sarah não se restringem apenas à arquitetura e urbanismo dos centros, tendo desenvolvido inclusive aparelhos hospitalares de modo a facilitar a locomoção e tratamento dos pacientes.

5.4 Evolução das coberturas shed da rede Sarah

As diversas unidades inauguradas a partir de 1980 têm em comum a ênfase em soluções arquitetônicas que favoreçam a ventilação e iluminação naturais, entre elas

as coberturas *sheds*. Sua geometria além de adaptar-se para melhor aproveitamento de características climáticas locais, também é influenciada por estudos que visam otimizar os aspectos supra citados. As figuras a seguir, extraídas de PERÉN (2006) e adaptada por LUKIANTCHUKI (2010), mostram a evolução da geometria dos *sheds* utilizados em alguns hospitais da rede Sarah.

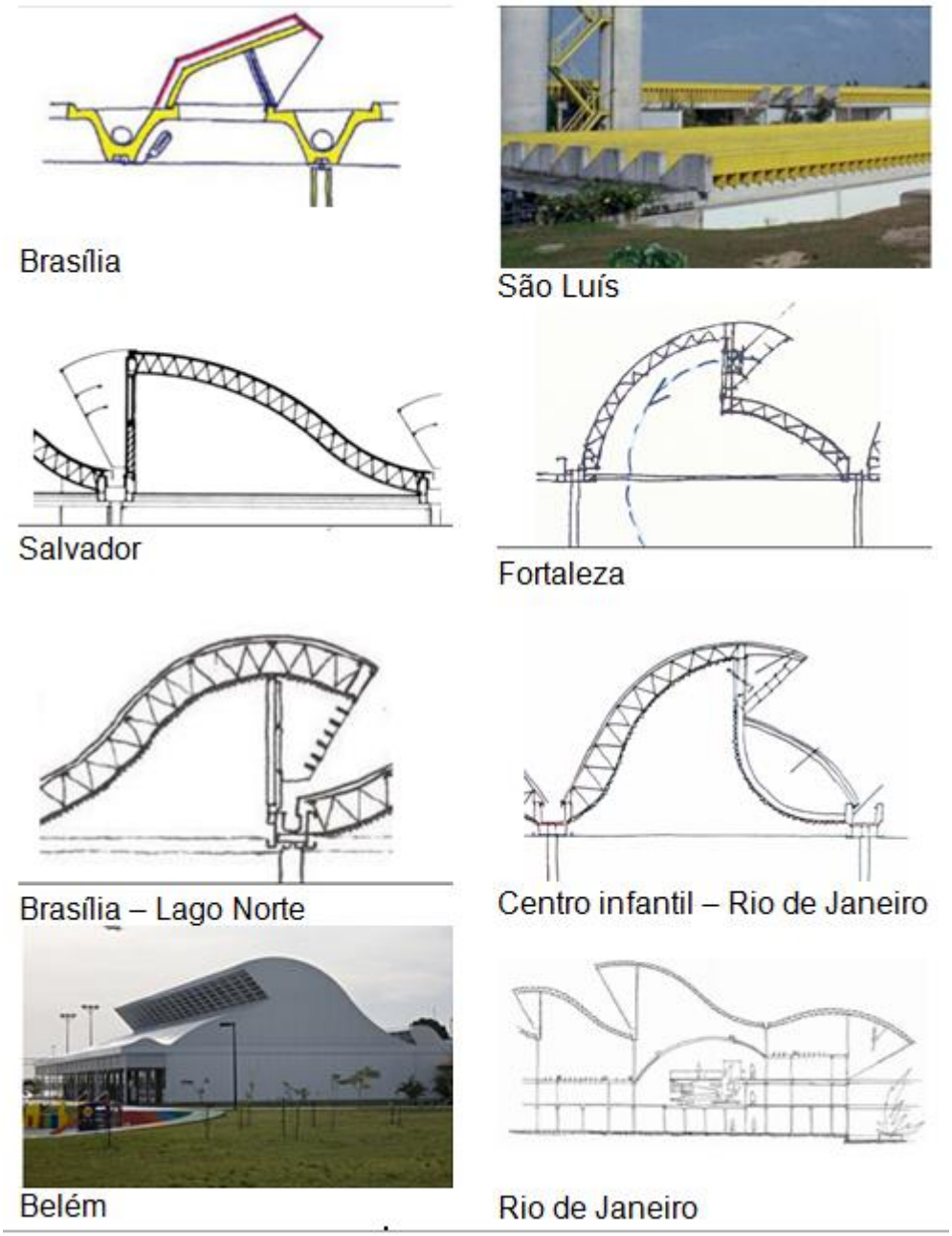


Figura 9: Modelos de shed aplicados. (Fonte: PERÉN, 2006 e LUKIANTCHUKI, 2010);

5.5 Resultados de estudos recentes

A eficiência em relação à ventilação natural devido aos *sheds* utilizados nos hospitais da rede Sarah e em outras obras do arquiteto tem sido alvo de vários estudos recentes, sendo utilizados para isso túneis de vento e também softwares de simulação energética e dinâmica dos fluidos computacional (CFD), que se tornou

comum na área devido à evolução dos softwares disponibilizados, facilidade de uso e baixo custo.

Em PERÉN et. al. (2007) são simulados por CFD duas coberturas tipo *shed* que representam a evolução das obras de Lelé: o hospital Sarah Salvador (1994) e o Tribunal Regional Eleitoral da Bahia (1997). As figuras a seguir, extraídas de obra do autor, são o resultado das simulações, onde são representadas as direções (vetores) e intensidade (cores) da ventilação natural. É possível observar a influência de detalhes como funcionamento do *shed* e sua geometria na velocidade do ar e sentido do fluxo.

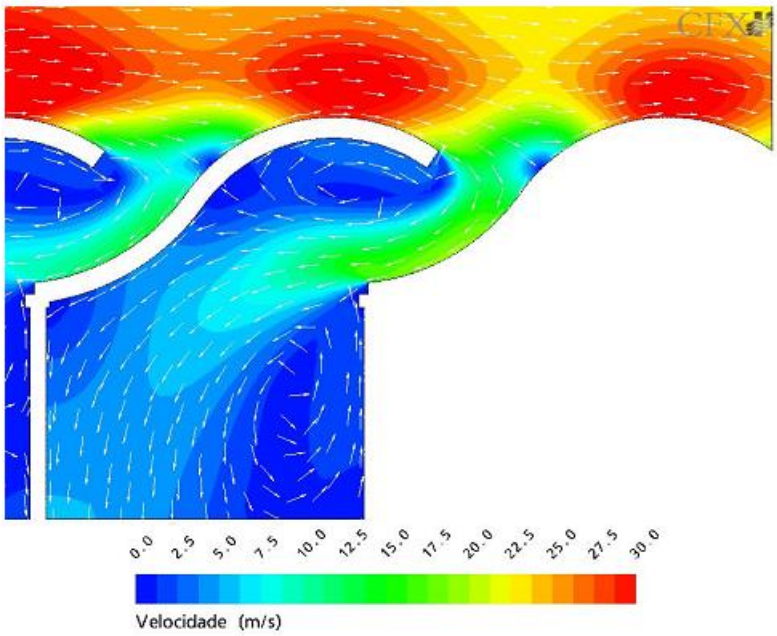


Figura 10 – Simulação de shed - Sarah Salvador (Fonte: PERÉN, 2007).

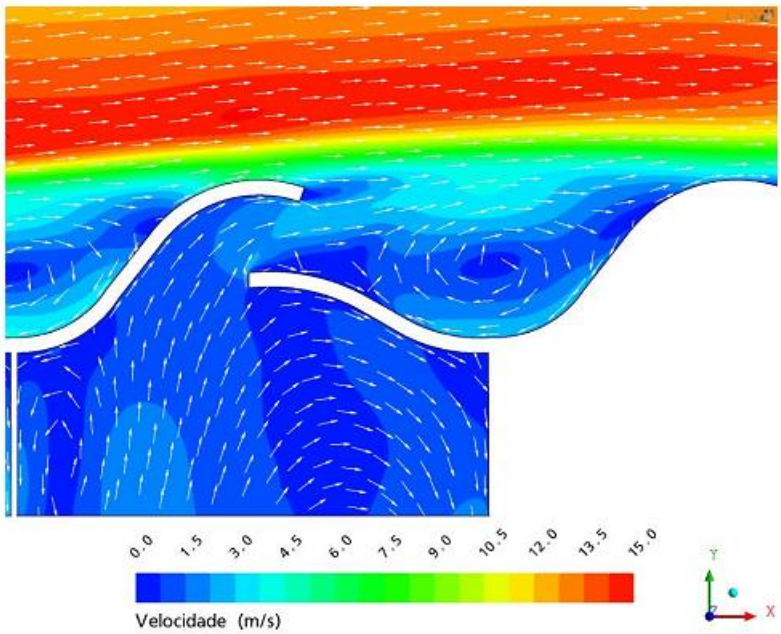


Figura 11 – Simulação de shed TRE-Bahia (Fonte: PERÉN, 2007).

De acordo com os resultados obtidos, em especial o TRE-Bahia (Figura 11) e casos onde o *shed* funciona como exaustor, é prevista a existência de uma força ascensional gerada pelo sentido do deslocamento de ar. Tal comportamento não deve ser ignorado durante a fase de projeto e dimensionamento da estrutura, uma vez que pode gerar esforços de tração ou momento nos pilares e fundações.

Atenta-se ainda ao fato da maior eficiência de sheds que funcionam como extratores frente aos que funcionam como captadores de ar, apresentando respectivamente ganhos de 40% e 15% em ambientes com ventilação cruzada (GANDEMER et. al., 1989 *apud* BITTENCOURT et. al., 2006) devido aos efeitos de chaminé ou sucção (no caso de extratores) proporcionados por essas configurações.

Em MATSUMOTO et.al. (2010), são simulados em túnel de vento modelos reduzidos que representam os hospitais de Belém e de Brasília Lago Norte. Estes hospitais apresentam características bem distintas, como o funcionamento do *shed* como extrator no primeiro caso e captador de ar no segundo. Além disso, Brasília apresenta um clima quente e seco, enquanto em Belém o clima é quente e úmido. A partir dos resultados verifica-se a melhor ventilação interior do sistema extrator de ar de Belém em comparação ao de Brasília (como citado acima). Observa-se também a influência da orientação do edifício, que se posicionado na direção do vento dominante, aumentaria em torno de 22,8% a ventilação natural dentro do edifício.

Vale ressaltar que o posicionamento do shed em relação à direção do vento dominantes e em muitos casos sua natureza exaustora ou captadora de ar é definida a priori pela direção dos raios solares, para que se atinjam bons níveis de iluminação natural sem a incidência direta do sol.

6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para uma melhor fundamentação teórica do objeto de estudos, o trabalho foi dividido em cinco grandes análises sobre: a ventilação, efeitos do vento sobre a estrutura, materiais da cobertura, concepção da estrutura e modelagem computacional.

6.1 Ventilação

Outro aspecto fundamental que baliza o processo de desenvolvimento de uma solução é relacionar as características arquitetônicas das coberturas com a sua influência na eficiência das trocas de ar no interior do edifício e as condições ambientes mínimas necessárias à prática de esportes em ambientes fechados. Dessa forma, para solidificar a base de informações necessárias à realização deste trabalho, foi realizada uma série de pesquisas em relação aos aspectos supracitados dentro de uma aplicação atual, cujos resultados serão apresentados a seguir.

O Brasil, país predominantemente quente, com temperaturas altas na maior parte do ano, encontra-se na região tropical do globo terrestre, compreendida entre a linha do Equador e o paralelo 30º Sul.

Devemos sempre usar a natureza em nosso favor, ou seja, usar os recursos fornecidos naturalmente para benefício próprio sem gastar desnecessariamente com fontes alternativas e externas para nos prover conforto. Em países com as características do Brasil, onde há grande incidência da luz e calor e a energia solar é abundante, o uso de sistemas construtivos que permitam a troca de ar pelo processo da convecção natural, processo no qual o fluido, nesse caso, o ar, se movimenta sem influência de forças externas como bombas ou ventiladores, se mostram bastante viáveis e eficientes do ponto de vista do conforto térmico provido pela ventilação natural e, sobretudo do ponto de vista da sustentabilidade.

Na convecção natural, o fluido mais quente sobe e o mais frio desce, isso porque o segundo é mais pesado que o primeiro. Esse processo faz o ar interno circular, transferindo a energia térmica para a parte de cima da edificação, que se tiver um sistema planejado para esse efeito, consegue realizar o processo de renovação de ar com bastante eficiência.
Ventilação natural é definida como o deslocamento de ar dentro do edifício através de aberturas que funcionam como entradas e saídas causando um fluxo que dependem da diferença de pressão entre o ambiente interno e o ambiente externo ao prédio, além de outros fatores que serão posteriormente enunciados.

Basicamente, a ventilação natural se dá através de dois modos, por ação do vento e por efeito chaminé. Ambos, basicamente, trabalham com diferenças de pressão. Quanto maior for o módulo da diferença entre sobrepressão e subpressão, melhor será o fluxo no interior do prédio.
Pela ação do vento, as paredes onde o vento incide estão sujeitas a uma sobrepressão ou pressão positiva, por onde o ar entrará no edifício, enquanto as paredes não expostas estão sujeitas a subpressões ou pressões negativas, por onde o ar sairá do edifício.

Pelo efeito chaminé, as diferenças de pressões consideradas são entre o ar interno e o externo do edifício. Seguindo o conceito já citado de convecção natural, o ar quente sobe e escapa pelas saídas de ar superiores e o ar frio novo entra pelas aberturas inferiores, renovando e resfriando o ar interno.
Vale lembrar que esses efeitos podem ocorrer simultaneamente, aumentando o fluxo de ar em caso dos efeitos concordarem em sentido ou diminuírem em caso contrário.

Uma boa ventilação natural em um edifício proporciona além do conforto térmico, a redução dos agentes poluidores, recomposição constante dos níveis adequados de oxigênio e controle da umidade do ar com grau de pureza do ar compatível com as exigências fisiológicas do ser humano e o seu bem estar, promovendo a renovação do ar do ambiente.

Há alguns critérios na ventilação dos ambientes que devem ser obrigatoriamente atingidos. Seguramente, o primeiro deles é suprir a demanda de oxigênio das pessoas dentro do edifício, mantendo níveis aceitáveis de concentração de oxigênio no seu interior. Níveis que, quando caem dos parâmetros normais do ar atmosférico, podem causar diversas consequências desagradáveis e indesejáveis para o praticante da atividade física ou mesmo para um usuário comum do prédio. Estas consequências estão resumidas na tabela abaixo.

Tabela 1: Consequências para o ser humano devido a variação da concentração de oxigênio no ar (Fonte: IVN, Conforto térmico em edifícios comerciais e industriais em regiões de clima quente)

Porcentagem de oxigênio no ar em volume	Consequências
Entre 18% e 21%	Sem alteração
Entre 16% e 18%	Dificuldade para respirar
Entre 11% e 16%	Dor de cabeça
Entre 8% e 11%	Ânsia de vômito e desmaio

O segundo critério obrigatório é evitar que sejam atingidas quantidades inaceitáveis de gás carbônico no ar, seguido pela necessidade de dissipar os odores corporais.

A Figura 12, apresenta o gráfico, fornecido pela ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) e pela ASHRAE- American Society of Heating Refrigerating and Air Condictioning Engineers, que relaciona o fluxo de ar requerido por hora, por pessoa, em função da provisão de oxigênio, da diluição da concentração do gás carbônico e da dissipação de odores corporais, em atividades sedentárias (FROTA, 1987).

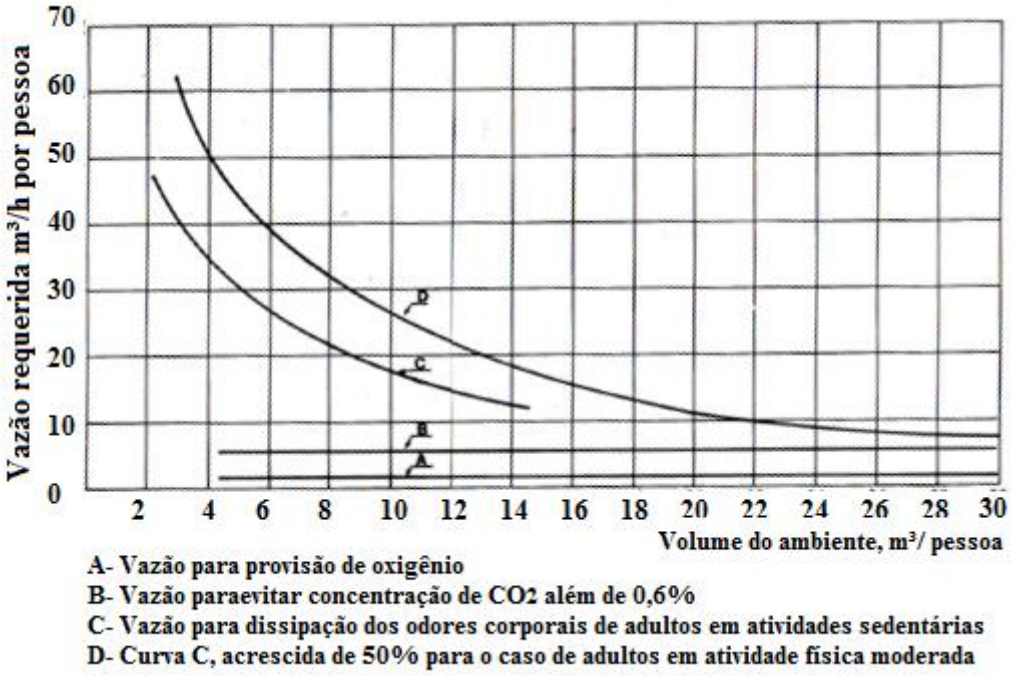


Figura 12: Taxas de ventilação recomendadas

Outra importante função da ventilação é a retirada do excesso de calor, principalmente em lugares de clima quente como o Brasil. Essa ventilação melhora as condições internas e aumenta o nível de conforto térmico dos usuários.

É importante pontuar que o conforto térmico percebido pelo ser humano está intimamente relacionado com a ventilação, a qual é responsável direta pelo aumento dos processos físicos de transferência de calor do homem para o meio, que se dá fundamentalmente por cinco processos de trocas térmicas os quais são divididos em dois tipos, de naturezas distintas, denominados de trocas térmicas secas e trocas térmicas úmidas.

Os processos de convecção, radiação e condução são classificados como trocas térmicas secas, caracterizando-se apenas por variações de temperatura, enquanto os processos de condensação e evaporação são classificados como trocas térmicas úmidas, pois derivam da mudança do estado líquido da água para o estado de vapor ou vice-versa.

A convecção é o mecanismo de troca de calor entre um sólido e um fluido, seja ele líquido ou, no caso do ar, um gás, e é ativado pela velocidade do ar de encontro com o sólido.

A radiação é o mecanismo de troca de calor entre corpos que não se tocam, através da emissão e absorção de energia térmica e deriva da natureza eletromagnética dessa energia.

Já condução é o mecanismo de troca de calor entre corpos que se tocam ou até mesmo partes de um mesmo corpo com temperaturas diferentes

A evaporação é definida pela mudança do estado liquido para o gasoso, enquanto a condensação é o oposto, a mudança do estado gasoso do vapor d´agua para o estado líquido.

Novamente, de acordo com a ASHRAE – American Society of Heating Refrigerating and Air Condictioning Engineers, a eficiência de uma pessoa cai 1,8% para cada grau que a temperatura ambiente subir acima de 27º C. Por essa razão, é de extrema importância que atletas de alto rendimento pratiquem suas habilidades em espaços que dêem a eles a maior eficiência e maior rendimento possível, ou seja, em ambientes com temperaturas inferiores a 27ºC.

A altura do pé direito é um dos fatores que contribuem para o conforto térmico dentro de uma edificação. A convecção no interior do edifício gera uma ventilação natural que é diretamente proporcional à altura do prédio, ou seja, quanto maior o pé direito, maior a ventilação.

O livro IVN – Índice de Ventilação Natural – Conforto Térmico em Edifícios Comerciais e Industriais em Regiões de Clima Quente, de Sérgio Schigliano e Vilson Hollo, traz uma tabela, com dados obtidos por observação em campo, que relaciona o comprimento e a largura do edifício com o pé direito mínimo para um conforto térmico aceitável pelos usuários. Com essa tabela e as dimensões dos módulos, foi observado que o pé direito mínimo para o edifício seria de aproximadamente 7 metros, já que os módulos têm dimensões na ordem de 90 metros de comprimento por 45 de largura. Foi constatado no local que o pé direito atual supera muito essa altura mínima, com um pé direito na ordem de 12 metros.

Abaixo está reproduzida a tabela que relaciona as dimensões do edifício com o pé direito mínimo.

Tabela 2: Valores mínimos para o pé direito dos edifícios (Fonte: IVN, Conforto térmico em edifícios comerciais e industriais em regiões de clima quente)

Largura do	Comprimento do Edifício												
Edifício	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210
‘30	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
45	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
60	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
75	7	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
90	7	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
105	7	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
120	7	7	8	9	10	10	11	11	11	11	11	11	11
135	7	7	8	9	10	10	11	11	11	11	11	11	11
150	7	7	8	9	10	10	11	11	12	12	12	12	12
165	7	7	8	9	10	10	11	11	12	12	12	12	12
180	7	7	8	9	10	10	11	11	12	12	13	13	13
195	7	7	8	9	10	10	11	11	12	12	13	13	13
210	7	7	8	9	10	10	11	11	12	12	13	13	14

Para que o edifício tenha uma boa ventilação natural, não basta contar com uma cobertura que facilite a saída de ar quente, é necessário também pensar e executar aberturas na parte inferior para a entrada do ar mais frio. Assim, o projeto das

aberturas para entrada de ar frio acaba sendo tão importante quanto o projeto das aberturas na cobertura para a saída do ar quente, pois a ventilação natural nada mais é que o fluxo dentre a edificação e não adianta nada trocar a cobertura se as entradas de ar estiverem todas vedadas.

Para dimensionar adequadamente as aberturas de ar frio, seis características principais devem ser observadas: localização, uniformidade de distribuição, área total, área efetiva, distância entre os elementos que formam os canais e direcionamento do fluxo de ar.

Como já dito previamente, a localização ideal para a entrada do ar frio é pelas aberturas localizadas na parte inferior do edifício.

Quanto à uniformidade da distribuição, uma boa configuração se dá com espaçamentos adequados entre aberturas e evitar grandes comprimentos sem aberturas.

Já a área total das aberturas está relacionada com o tamanho da edificação e sua finalidade, bem como a arquitetura proposta para tal.

A área efetiva é a que realmente impõe qual será o fluxo de ar para dentro do prédio, está relacionada com a área total e reduz a área disponível para a entrada de ar dependendo das dimensões, obstáculos como aletas e defletores e outros fatores que dificultam a entrada direta do ar, mas tem o objetivo de também evitar a entrada de poeira, insetos e água de chuva.

Ainda, deve-se citar que a distância entre os elementos que formam os canais é a abertura por onde o ar passa, sendo que quanto maior for esse canal, maior será o fluxo de ar. Entretanto canais muito grandes podem permitir entrada de animais voadores, o que é indesejável para a aplicação da edificação que é a prática esportiva.

Finalmente, o direcionamento do fluxo durante a passagem pela entrada de ar deve ser observado já que entradas e também saídas de ar mais livres favorecem a troca de ar enquanto se uma delas o ar tiver que fazer muitas curvas e entroncamentos para entrar ou sair, o fluxo de todo o sistema fica comprometido.

A cobertura é o elemento mais exposto às condições ambientais externas, sendo que cerca de 70% da quantidade de calor que uma edificação de apenas um pavimento absorve ocorre pela cobertura, e 30% pelas fachadas. mas não são apenas fatores externos que influenciam a temperatura interna de uma edificação. Cargas internas, dentre elas as atividades humanas (no caso dos módulos, atividade física intensa), iluminação artificial e equipamentos existentes tem uma grande influência e, portanto, devem ser considerados.

Tendo em vista essas condições, foram estudadas algumas propostas de novas coberturas, buscando melhor conforto térmico e a otimização do consumo energético.

6.2 Efeitos do vento sobre a estrutura

6.2.1 Definições

Primeiramente, definem-se as regiões de barlavento e sotavento, caracterizadas pelo sentido do vento. Barlavento é definido como a região em relação à edificação de onde sopra o evento, e sotavento a região oposta, ou seja, para a qual o vento se encaminha. Ex.: Se o vento possui sentido de A para B passando pela edificação, define-se como barlavento o lado da edificação próximo ao ponto A e sotavento o próximo ao ponto B.

Define-se como vento básico aquele que ocorre em determinada região com velocidade básica V_o. Esta, por sua vez, corresponde à velocidade de uma rajada de três segundos, excedida em média uma vez cada 50 anos, 10m acima do terreno em campo aberto e plano. Seu valor é encontrado na isopleta de ventos apresentada na norma.

Para que uma edificação esteja sujeita a ventos de alta turbulência, ela deve possuir até 2 vezes a altura média das edificações vizinhas situadas na mesma direção e sentido do vento incidente, a uma distância de:

- 500m para edificações até 40m de altura
- 1000m para edificações até 55m de altura
- 2000m para edificações até 70m de altura
- 3000m para edificações até 80m de altura

Estão sujeitas a ventos de baixa turbulência edificações que não se encaixam no casos acima.

As zonas de pressão geradas pela circulação de ar e incidência de ventos podem ser de dois tipos: zonas de sobrepressão, onde a pressão é maior que a pressão atmosférica de referência (pressão relativa com sinal positivo), e sucção, quando a pressão se torna menor que a pressão atmosférica de referência (pressão relativa com sinal negativo).

Por último, define-se como superfície frontal a superfície definida pela projeção ortogonal da edificação no plano perpendicular à direção do que vento que nela incide.

6.2.2 Procedimentos para cálculo da ação do vento nas estruturas

O roteiro de cálculo a seguir foi feito com base na Norma NBR 6123:1998 – Forças devidas ao vento nas edificações. Os valores de coeficientes e equações a serem utilizadas estão presentes na mesma.

Para o cálculo das forças devidas à ação do vento, deve-se estudar separadamente o seu efeito para três casos distintos: elementos de vedação e suas fixações, partes da estrutura, e a estrutura como um todo.

A velocidade básica do vento (V_0) é obtida a partir da isopleta de velocidade básica, apresentada a seguir:

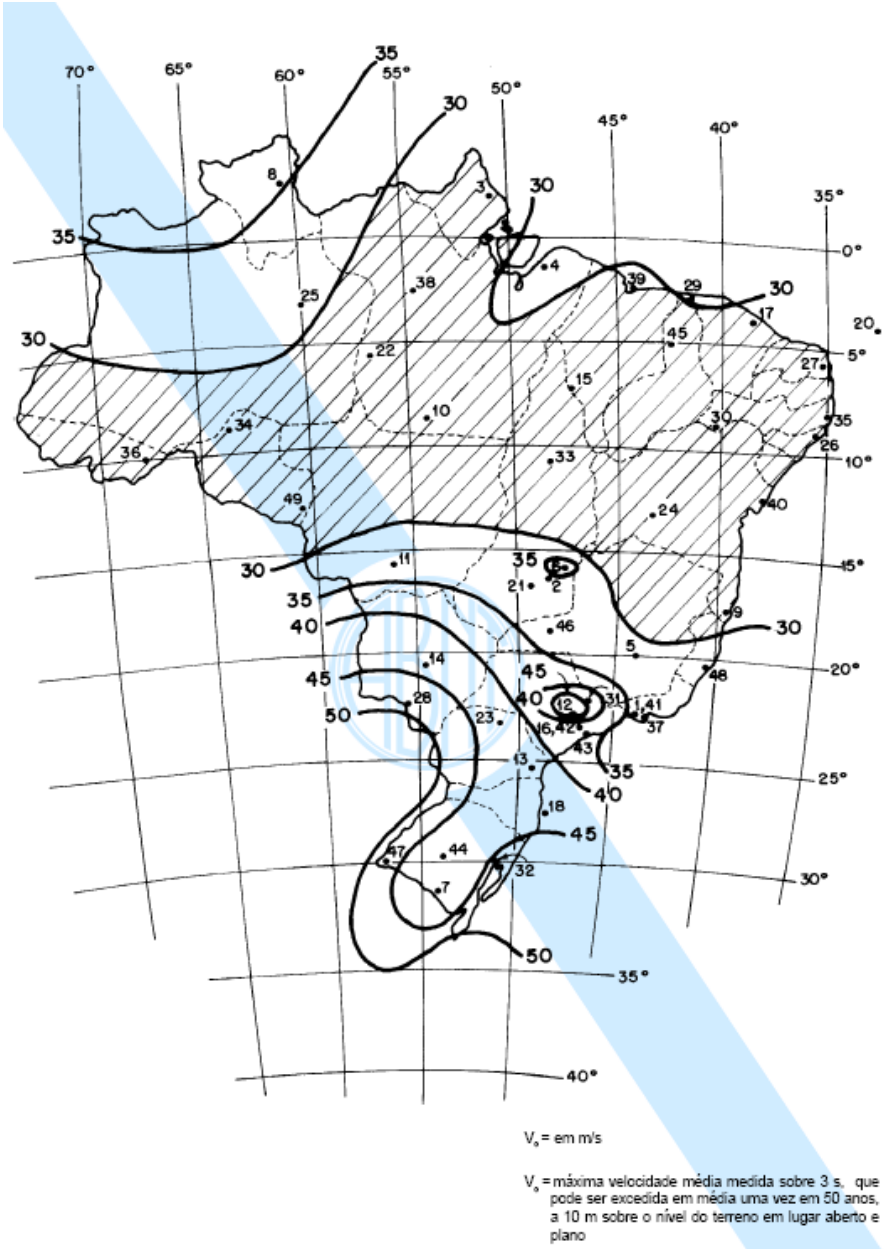


Figura 13 – Isopleta de velocidade básica do vento V_0 (FONTE: NBR:6123/1988)

Para o caso da cidade de São Paulo, este valor corresponde a 42 m/s.

6.2.3 Determinação dos fatores S1, S2 e S3

Fator topográfico (S_1)

O fator topográfico está relacionado às variações de relevo da região, como áreas planas ou região com montanhas ou acidentadas. Seu valor para terrenos planos ou pouco acidentados, como o observado na região de estudo, é igual a 1.

Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S_2)

Este fator combina três características:

- Rugosidade do terreno: o terreno pode ser classificado em cinco categorias: grandes superfícies lisas, como mares e lagoas (I); terreno com poucos obstáculos ou isolados e de pequena dimensão (II); terrenos planos ou ondulados (III); terrenos coberto por obstáculos, como árvores ou pequenas áreas urbanizadas (IV); e terrenos cobertos por grandes obstáculos, como florestas de com árvores de grande por ou grandes centros urbanos (IV).
- Dimensões da edificação: a classe da estrutura é determinada a partir da maior dimensão horizontal ou vertical: menor que 20m (A), entre 20 e 50m (B) e maior que 50m (C).
- Altura da edificação em relação ao terreno.

O fator S_2 é calculado em função da altura do terreno, utilizando-se coeficientes pré-determinados para cada categoria e classe.

A estrutura em questão pertence à categoria III e classe B. Foi considerada ainda altura em relação ao solo igual a 16m, resultando em um fator S_2 = 0,97.

Fator estatístico (S_3)

Neste caso, leva-se em consideração a vida útil da estrutura e o grau de segurança requerido. Seu valor varia de 0,83 para estruturas provisórias a 1,10 no caso de estruturas que possam servir de abrigo no caso de acidentes naturais.

Por não ser uma edificação que ponha em risco a segurança e o atendimento de pessoas em caso de emergências, e possui, normalmente, baixa ocupação, foi considerado um fatos S_3 = 0,88, correspondente a elementos de vedações.

Cálculo da pressão dinâmica

Velocidade caraterística (V_k) e determinação da pressão dinâmica (q)

A partir dos valores obtidos nos itens anteriores, calcula-se V_k, a velocidade característica para o caso em estudo, através da equação:

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \text{ [m/s]}$$

Onde para esse caso, temos um valor de V_k = 35,77 m/s

A pressão dinâmica na estrutura corresponde a

$$q = 0{,}613 \cdot {V_k}^2 \; q = 0{,}0625 \cdot {V_k}^2 \text{ [kgf/m}^2\text{]}$$

E foi obtido um valor de q = 80kgf/m²

Força estática equivalente do vento

A força estática equivalente do vento na estrutura será:

$$F = (C_e - C_i) \cdot q \cdot A \text{ [kgf]}$$

C_e = Coeficiente de forma externo
C_i = Coeficiente de forma interno
q = Pressão dinâmica
A = Área do elemento considerado

Os coeficientes de forma interno e externo, definidos em função das características da estrutura e sentido do vento, possuem valores positivos, caso gerem sobrepressões, e negativos no caso de sucção. Já valores positivos de F indicam que a força atua para o interior da estrutura, ou para o exterior, se negativo.

Coeficientes de pressão externa

Os coeficientes de pressão externa são função do desenvolvimento da geometria da envoltória da edificação e sua interação com os ventos, de sorte que seu valor pode variar significativamente em uma mesma edificação quanto maior for a diferença entre as superfícies da envoltória. Desta maneira, serão desenvolvidas duas análises, sendo uma específica para as paredes e outra específica para a cobertura.

No caso das paredes, estuda-se a influência do formato em planta da edificação no desenvolvimento das pressões externas, sendo que o edifício estudado apresenta as seguintes relações:

Tabela 3: Dimensões da edificação e suas relações

Dimensões	Relações
h = 12m	h/b = 0,27
b = 45m	b/a = 2
a = 90m	

A norma ainda recomenda o estudo dos coeficientes desenvolvidos para os casos de ventos perpendiculares e paralelos às faces menores, atribuindo, para ambos os casos, coeficientes específicos para cada trecho do perímetro da edificação, conforme visto no esquema abaixo:

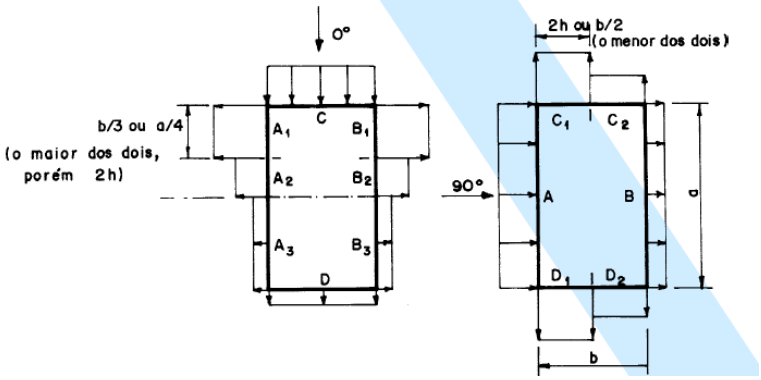


Figura 14 – Esquema da distribuição proporcional de coeficientes de pressão externo para cada trecho de perímetro nos dois casos de direção do vento – (FONTE:NBR6123);

Os coeficientes são tabelados para edificações de planta retangular segundo cada configuração da relação largura/comprimento e altura/largura.

Altura relativa		Valores de C_e para								c_{pe} médio
		α = 0°				α = 90°				
		A_1 e B_1	A_2 e B_2	C	D	A	B	C_1 e D_1	C_2 e D_2	
0,2 b ou h (o menor dos dois) $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	- 0,8	- 0,5	+ 0,7	- 0,4	+ 0,7	- 0,4	- 0,8	- 0,4	- 0,9
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 0,8	- 0,4	+ 0,7	- 0,3	+ 0,7	- 0,5	- 0,9	- 0,5	- 1,0
$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	- 0,9	- 0,5	+ 0,7	- 0,5	+ 0,7	- 0,5	- 0,9	- 0,5	- 1,1
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 0,9	- 0,4	+ 0,7	- 0,3	+ 0,7	- 0,6	- 0,9	- 0,5	- 1,1
$\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	- 1,0	- 0,6	+ 0,8	- 0,6	+ 0,8	- 0,6	- 1,0	- 0,6	- 1,2
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 1,0	- 0,5	+ 0,8	- 0,3	+ 0,8	- 0,6	- 1,0	- 0,6	- 1,2

Figura 15 - Tabela que relaciona as dimensões um edifício retangular em planta com os coeficientes de pressão desenvolvidos em cada trecho de seu perímetro conforme a orientação do vento - (FONTE: NBR6123);

Para o caso estudado são extraídos os seguintes valores:

Incidência a 0°

A1 e B1	A2 e B2	A3	C	D
-0,8	-0,4	-0,2	0,7	-0,3

Incidência a 90°

A	B	C1 e D1	C2 e D2
0,7	-0,5	-0,9	-0,5

Figura 16: Coeficientes de pressão externa, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Resulta-se, então, as seguintes distribuições ao longo do perímetro:

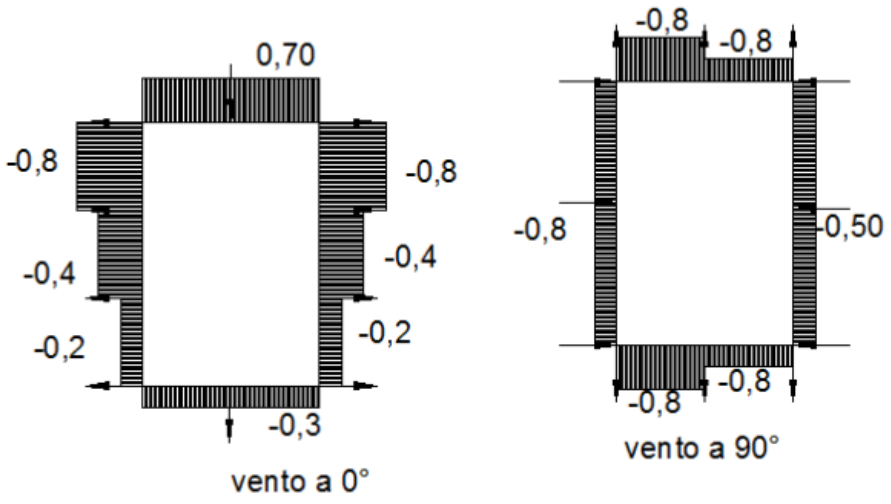


Figura 17 - Distribuição dos coeficientes de pressão ao longo do perímetro da edificação segundo os dois casos da direção do vento, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

A determinação dos coeficientes de pressão externa para a cobertura, de maneira semelhante à análise para as paredes, estabelece coeficientes específicos para cada trecho da superfície que apresentar variações significativas no desenvolvimento da geometria. A norma padroniza a análise somente para os tipos mais comuns de cobertura sendo que coberturas em geometrias especiais necessitariam de um estudo mais sofisticado. Entretanto, devido às semelhanças entre a cobertura proposta neste trabalho e a cobertura em sheds sucessivos assimétricos, tratada pela norma, serão adotados os coeficientes relativos a este tipo de cobertura.

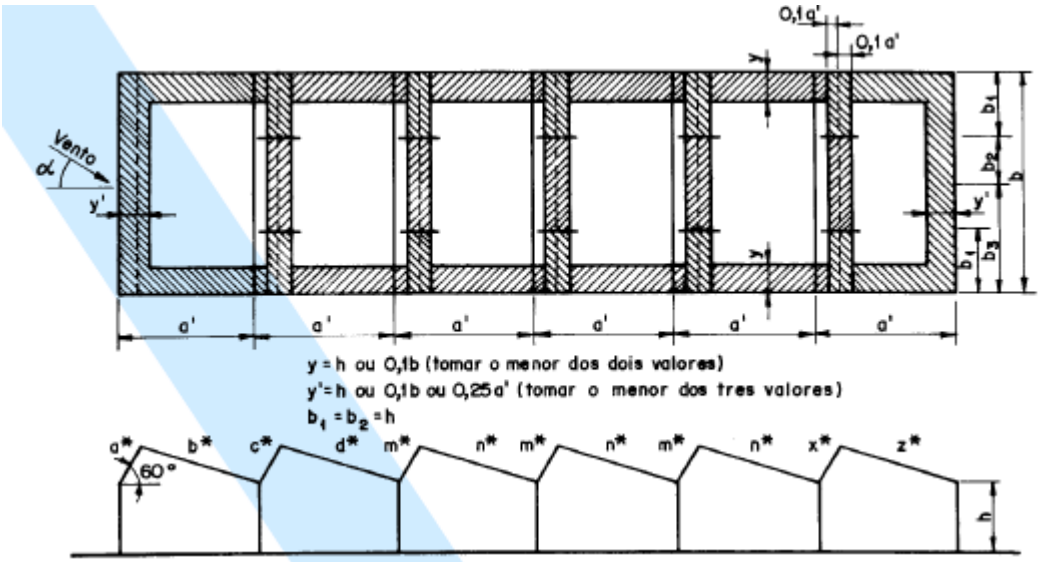


Figura 18 - Cobertura em sheds assimétricos sucessivos – (FONTE: NBR6123);

Novamente, da mesma forma como para as paredes, foram considerados coeficientes para os casos do vento perpendiculares e paralelos à largura em planta da edificação, os quais são tabelados.

Ângulo de incidência do vento	C_e								c_{pe} médio	
	Primeiro tramo		Primeiro tramo intermediário		Demais tramos intermediários		Último tramo			
α	a*	b*	c*	d*	m*	n*	x*	z*		
0°	+0,6	-0,7	-0,7	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0,3	-2,0	-1,5
180°	-0,5	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,6	-0,6	-0,1		

Figura 19- Tabela que relaciona os coeficientes de pressão desenvolvidos em cada uma das faces dos sheds assimétricos para ventos de mesma direção, mas sentidos opostos – (FONTE: NBR6123);

Nota-se que o modelo apresentado pela norma trata de um caso geral para inúmeros sheds. Para o presente caso, são consideradas somente 6 faces, adotando-se os coeficientes relativos aos segmentos inicial, intermediário e final do modelo. Para o caso das coberturas, será analisada somente as ações do vento segundo a direção perpendicular à largura da edificação em planta, já que é o caso mais crítico para a estrutura considerando as características da geometria proposta, que intensifica propositadamente o fluxo de ar no mesmo sentido. Foram obtidos então os seguintes valores:

Incidência à 180°						Incidência à 0°					
a*	b*	c*	d*	e*	f*	a*	b*	c*	d*	e*	f*
-0,5	-0,3	-0,3	-0,3	-0,6	-0,1	0,6	-0,7	-0,7	-0,4	-0,1	-0,3

Figura 20: Coeficientes de pressão externa para a cobertura, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

Coeficientes de pressão interna

Os coeficientes de pressão interna relacionam-se à permeabilidade ao vento das faces da estrutura e, portanto, sua determinação está atrelada à configuração dos fluxos de ar que podem ocorrer dentro da edificação, bem como sua intensidade. Os fluxos de ar dependem, por sua vez, do número de faces consideradas permeáveis ao vento e sua disposição na estrutura.

A norma de ventos NBR6123 classifica três configurações para edificações de planta retangular: a) faces igualmente permeáveis; b) duas faces permeáveis opostas e as outras duas impermeáveis; e c) o caso de uma abertura predominante em uma face sendo as outras de igual permeabilidade entre si.

O caso da abertura dominante refere-se a uma abertura cuja área seja maior ou igual á soma das demais aberturas que constituem a área permeável das demais faces.

A cobertura em sheds proposta, no entanto, possui três grandes aberturas, representando, á princípio, um caso peculiar, não tratado pela norma. Para a determinação dos coeficientes de pressão interna seria, então, necessário um estudo mais aprofundado e mais detalhado, por meio de modelos físicos reduzidos embasados na dinâmica dos fluidos, o que foge do escopo deste presente estudo.

As características da circulação de ar no interior da edificação, visualizadas por meio das simulações em CFD no software Design Builder, revelam, no entanto, que há uma separação da massa de ar interior logo no espaço abaixo dos dois vales da cobertura. Nota-se que a massa de ar abaixo do maior shed tende a ser direcionada para a respectiva abertura logo acima. O mesmo acontece para o shed central e para o shed menor e suas respectivas massas de ar abaixo de suas projeções em planta. Conclui-se que a circulação de ar no interior da edificação pode ser representada, de maneira simplificada, por três blocos com características quase independentes já que se desenvolvem três fluxos de ar bem definidos em cada bloco e que pouco se misturam. Cada bloco é alimentado exclusivamente por um par de portas. Ainda, existe o efeito das lonas que permanecem boa parte do tempo em uso, dividindo os módulos em zonas ainda mais definidas e independentes.

Dessa forma, será adotado um modelo de bloco independente, referente ao shed maior, pois devido à maior área das telhas de cobertura deverá desenvolver maiores esforços na estrutura quando solicitado pelo vento de projeto. O modelo considera a face fictícia como impermeável, dadas as características da circulação de ar interna descritas acima. Na mesma face, no entanto, está a abertura do shed maior, a qual será considerada dominante em relação às demais áreas de aberturas das outras faces (Aabertura = 360m²).

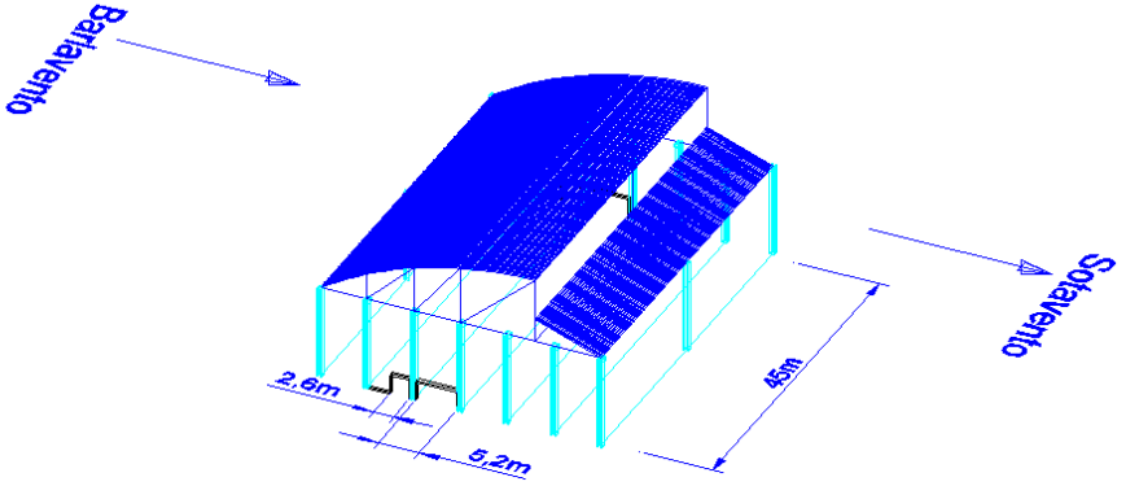


Figura 21 - Vista em perspectiva do modelo de bloco adotado para o calculo do coeficiente de pressão interna, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

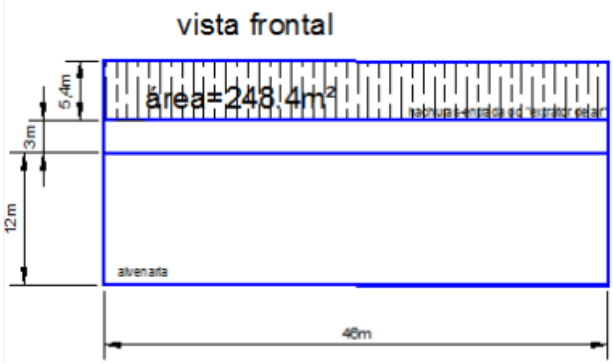


Figura 22- VIsta frontal da face fictícia (sotavento) e a abertura do shed maior hachurada, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

As faces laterais e a face á barlavento são consideradas de mesma permeabilidade, pois possuem aberturas com dimensões totais aproximadas. As faces laterais possuem duas portas que totalizam, em cada face, 20 m² e a face a barlavento possui blocos vazados que totalizam cerca de 18 m². Percebe-se que a relação entre as áreas é de 3,9.

Voltando às recomendações da norma NBR6123, o bloco se encaixa na definição c), o da abertura predominante. É fornecida uma tabela que correlaciona o coeficiente de pressão interna à relação entre a área da abertura dominante e a somatória da área total das aberturas das demais faces, para o caso da face dominante posicionada a barlavento:

Tabela 4: Correlação dos coeficientes de pressão interna

1	$c_{pi} = +0,1$
1,5	$c_{pi} = +0,3$
2	$c_{pi} = +0,5$
3	$c_{pi} = +0,6$
6 ou mais	$c_{pi} = +0,8$

Tira-se daí o valor de Cpi = 0,6 para o caso do vento incidindo perpendicularmente à largura em planta da edificação.
Para o caso do vento incidindo em sentido contrário, face dominante à sotavento, a norma recomenda a adoção do coeficiente de pressão externa relativo á face de sotavento, no caso Cpi= - 0,3.

Análise Final

Para a análise final, deverão ser combinados os cenários determinados anteriormente, de forma á obter as situações mais críticas de carregamento para a cobertura.
Assim, temos dois casos para a cobertura (vento a 0˚ e vento a180˚) e dois casos para as paredes (vento a 0˚ e vento a 90˚), resultando nas seguintes configurações:
Coeficientes de pressão para a cobertura

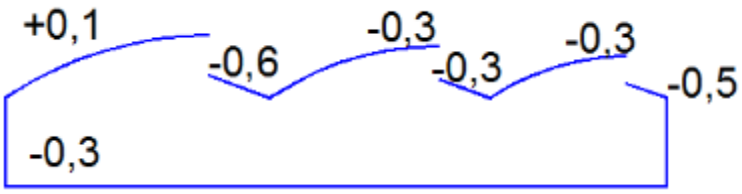


Figura 23 - Coeficientes de pressão para ventos a 0˚ (FONTE: Autoria do próprio grupo);

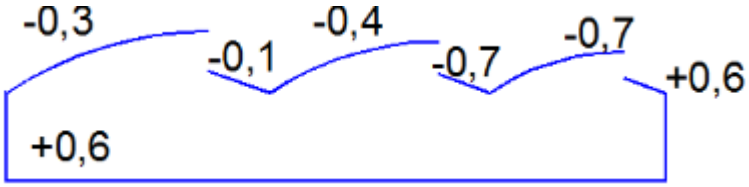


Figura 24 - Coeficientes de pressão para ventos a 180˚, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

Coeficientes de pressão para as paredes

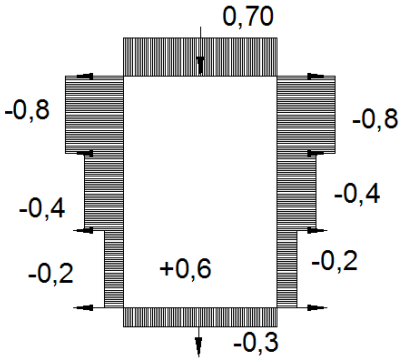


Figura 25 - Coeficientes de pressão para ventos a 180˚ (FONTE: Autoria do próprio grupo);

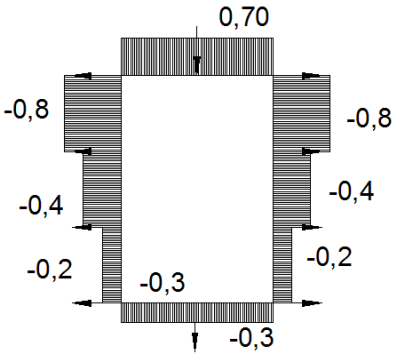


Figura 26 - Coeficientes de pressão para ventos a 0˚(FONTE: Autoria do próprio grupo);

De posse das combinações de coeficientes, é possível determinar os carregamentos nas seções transversais:

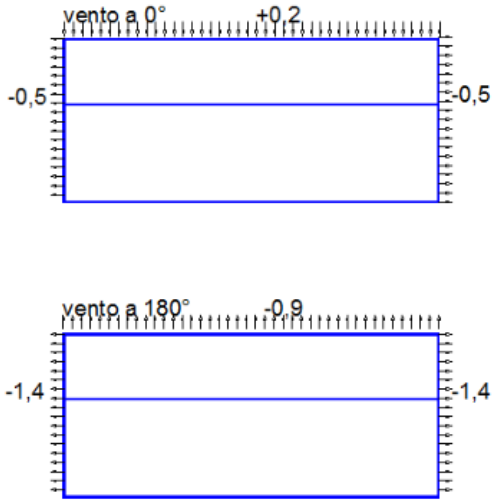


Figura 27 - Representação em corte das diferenças entre coef. externos e internos em cada caso, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

Multiplicando-se pelas pressões dinâmicas obtém-se os carregamentos críticos:

Carga na cobertura

$w_0 = 0{,}2 \times 79{,}97 = 16\ kgf/m^2$

$w_{180} = -0{,}7 \times 79{,}97 = -56\ kgf/m^2$

6.3 Definição dos materiais da nova cobertura

Para a escolha dos materiais que serão utilizadas na nova cobertura, deve-se analisar o que há disponível no mercado considerando como fatores importantes a serem avaliados:

- Formas e dimensões
- Estanqueidade
- Resistência
- Peso
- Isolamento térmico e acústico
- Facilidade de instalação
- Moldabilidade
- Durabilidade
- Custos
- Manutenção

Após averiguar o que há no mercado, alguns materiais, tais como telhas cerâmicas convencionais e coberturas vegetais foram eliminados por não atenderem aos requisitos mínimos para a execução da cobertura tipo Shed, que se trata de uma cobertura não convencional e com curvatura variável que pode chegar a grandes inclinações e grandes variações de inclinação ao longo de seu comprimento.

Os materiais que serão analisados com maior profundidade para a escolha do melhor material para a nova cobertura serão as telhas:

- Autoportantes metálicas
- Alumínio
- Policarbonato

6.3.1 Autoportantes metálicas

Coberturas autoportantes consistem em telhas em arco produzidas na própria obra a partir de bobinas de aço galvanizado estrutural, que passam por uma maquina onde são perfiladas, calandradas e cortadas exatamente com as dimensões necessária para o projeto, reduzindo a quase zero as perdas (conforme imagem abaixo). Quando cortadas, as telhas sofrem uma dobra proposital de 90º em suas extremidades, essa dobra serve como uma pingadeira, garantindo que não haverá retorno de águas pluviais e consequentemente, assegurar a estanqueidade ao sistema.

Figura 28: Execução das telhas autoportantes, (Fonte MANUAL AÇOPORT)

Depois de produzidas, as telhas são içadas até as vigas de sustentação, onde podem ser parafusadas ou chumbadas quimicamente nas extremidades, nas calhas. Para aumentar a rigidez e estanqueidade do sistema, também há uma junção entre as telhas, que são zipadas ou parafusadas entre si, através de capa enrijecedora.

Figura 29: Execução da cobertura com telhas autoportantes (FONTE: Arcotop);

Figura 30: Ligação entre cobertura e estrutura, (FONTE: Arcotop);

Para uma melhor desempenho termoacústico, as telhas podem ser revestidos por uma camada de espuma de poliuretano, isolamento cerâmico com resina acrílica ou ainda uma telha sanduiche com duas telhas autoportantes separadas por um miolo isolante. Como valor fornecido pelo fabricante, a condutibilidade térmica do aço zincado sem isolamento é de 39,4 kcal/mhºC

Figura 31: Revestimento termoacústico (FONTE: Arcotop);

Entre outras vantagens desse sistema, podemos citar: a velocidade de produção, que pode chegar a 800 m² de cobertura por dia, possibilidade de vencer vãos de até 40 metros sem a necessidade de apoios intermediários, grandes flechas, que podem ir de 20% a 50% do vão, tudo isso com um peso na ordem de 20kg/m² e espessura na ordem de 1,5mm para os maiores vãos.

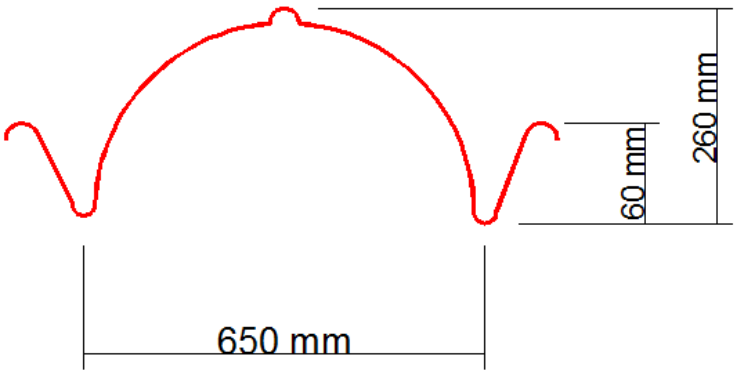


Figura 32: Perfil da telha autoportante, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

Tabela 5: Características das telhas autoportantes (FONTE: MANUAL AÇOPORT);

Espessura (mm)	Vão Máximo (m)	Flecha Máxima (m)	Peso (kg/m²)	Inércia (m^4)
0,95	14,00	0,12	11,9	796
1,11	17,50	0,35	14,2	930
1,25	23,00	1,00	15,8	1048
1,55	40,00	5,50	19,8	1299

6.3.2 Alumínio

Em comparação com as telhas de aço, as telhas de alumínio se mostraram melhores para o uso em uma estrutura com as características dos módulos, portanto só ela será analisada no nicho de telhas metálicas convencionais.

Alguns fatores mostram esse melhor desempenho, como por exemplo a manutenção que em uma cobertura de aço deve acontecer, em média, a cada 10 anos, para estruturas de alumínio esse tempo pode chegar a 50 anos. Também pode-se citar o fato do alumínio ser mais leve, cerca de um terço da densidade do aço, diminuindo a necessidade de estruturas de apoio, o que vem a ser uma vantagem, pois estruturas de apoio são de difícil instalação já que só há dois pilares dentro da edificação e não pode ser realizada a construção de novos pilares. Outro ponto fundamental é a alta reflexão da radiação solar do alumínio, comparado com as telhas de aço comum, entretanto, sua condutibilidade térmica é maior, 172,8 kcal/mhºC.

6.3.3 Policarbonato

No mercado, há três tipos de telhas de policarbonato, as compactas, alveolares e os refletivos, que por ter uma melhor eficiência térmica, será o objeto de estudos nesse item.

Policarbonato é um material a base de resina e é considerado o plástico da engenharia, pois oferece alta resistência, além de ser leve e nos casos das telhas, pode ser translúcidas para melhorar a iluminação natural.

Além do bloqueio de 100% da radiação U.V, as telhas de policarbonato refletivas apresentam alta resistência mecânica, fácil manipulação e instalação, leveza e pode ser fixado em estruturas metálicas com perfeita interação entre os dois materiais.

6.3.4 Escolha da cobertura

Após a análise das características dos três materiais distintos, foi atribuído um peso para cada aspecto importante na escolha e uma nota para cada item para tomar a melhor decisão na escolha da cobertura. Tanto para os pesos, quanto para as notas foram atribuídos valores inteiros entre 1 e 5, onde 1 é menos relevante e 5 mais

relevante nos pesos e 1 baixo desempenho no item e 5 alto desempenho no item nas notas.

Tabela 6: Pesos e notas para a escolha o material da cobertura (FONTE:MANUAL AÇOPORT)

Fatores	Pesos	Materiais		
		Autoportante	Alumínio	Policarbonato
Formas e dimensões	1	5	3	5
Estrutura da cobertura	3	5	3	3
Estanqueidade	5	5	4	4
Resistência	3	5	3	3
Peso	1	1	4	5
Isolamento térmico	4	3	4	2
Isolamento acústico	2	3	2	1
Facilidade de instalação	3	3	4	4
Moldabilidade	4	5	3	5
Durabilidade	3	4	3	3
Custos	4	2	3	3
Manutenção	4	4	3	5

Tabela 7: Notas ponderadas e escolha do material da cobertura (FONTE: MANUAL AÇOPORT);

Fatores	Materiais		
	Autoportante	Alumínio	Policarbonato
Formas e dimensões	**5**	3	5
Estrutura da cobertura	**15**	9	9
Estanqueidade	**25**	20	20
Resistência	**15**	9	9
Peso	**1**	4	5
Isolamento térmico	**12**	16	8
Isolamento acústico	**6**	4	2
Facilidade de instalação	**9**	12	12
Moldabilidade	**20**	12	20
Durabilidade	**12**	9	9
Custos	**8**	12	12
Manutenção	**16**	12	20
TOTAL	**144**	122	131

Depois das atribuições dos pesos e notas, concluiu-se que a melhor opção é a execução da nova cobertura com uso de telhas autoportantes.

6.4 Projeto de estruturas metálicas de edifícios

Para o projeto de estruturas, deve-se definir, após a escolha do sistema estrutural e dos materiais a serem utilizados, os limites de utilização e a carga atuante na estrutura.

6.4.1 Limites de utilização

A seguir são descritos aspectos que a estrutura, uma vez dimensionada, deve respeitar:

- Deformações excessivas (elásticas ou não) resultantes da utilização da estrutura;
- Deslocamentos excessivos que podem causar desconforto no usuário, como trincas, flechas em vigas, etc;
- Vibrações excessivas ocasionadas por carregamentos dinâmicos, limitando o deslocamento em casos de vibrações.
- Danos ao material: deve-se adotar materiais com espessuras mínimas ou tratamentos que protejam de ações do tempo, evitando a diminuição da área da seção da peça.

A carga na estrutura resulta da combinação mais desfavorável de dois tipos de carregamento, descritos a seguir.

6.4.2 Carga permanente (g)

A carga permanente é o peso próprio da estrutura somado a outros elementos que compõem a mesma, como pisos, coberturas, equipamentos fixos etc. É, em primeira instância, estimada a partir de casos semelhantes, devendo ser verificada após o primeiro dimensionado das peças.

6.4.3 Carga variáveis (q)

São cargas que podem atuar ou não na estrutura, variando sua magnitude ou tempo de atuação. É composta por:

- Cargas de ocupação: definida para diferentes tipos de uso (escolas, teatros, bibliotecas, etc);
- Ação do vento: Determinada a partir da norma NBR:6123/1988, de acordo com aspectos físicos da região e da estrutura. Pode ainda ser considerado um carregamento dinâmico, a depender da estrutura e região analisada.

6.4.4 Projeto executivo

Nesta fase são definidas todas as dimensões das peças que compõem a estrutura. Inicia-se com um pré-dimensionamento, calculando-se os esforços e em seguida as dimensões dos perfis. A solução é então verificada em termos de carga e rigidez relativa, tornando-se um processo iterativo. Ao final é apresentado um diagrama unifilar da estrutura, juntamente com as cargas atuantes e as dimensões das peças e detalhamento de ligações.

6.4.5 Projeto da cobertura – viga treliçada

As vigas treliçadas são comumente usadas em coberturas devido à sua economia de peso, principalmente em casos onde a altura de viga necessária é grande. A forma e disposição dos elementos que a constituem podem variar por influência de aspectos estruturais, estéticos, funcionais, econômicos ou mesmo preferência do projetista responsável. A seguir são apresentados os tipos mais comuns de vigas treliçadas.

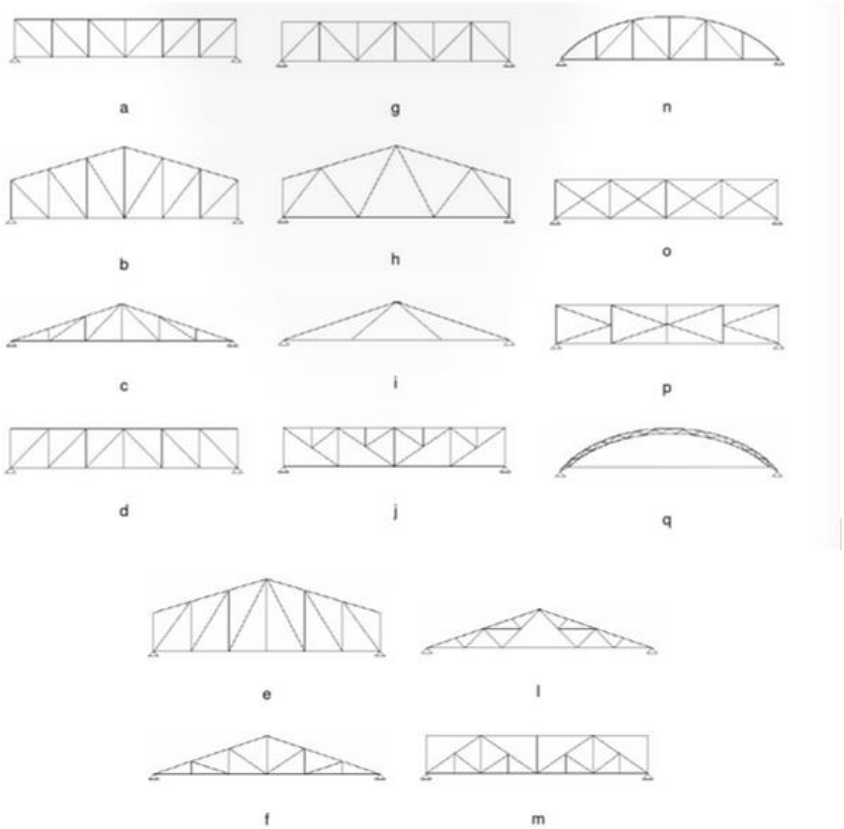


Figura 33: Tipos de treliças mais comuns (FONTE: FRUCHTENGARTEN, J.)

Durante o cálculo, considera-se que todos os elementos são barras biarticuladas e os carregamento aplicados apenas nos nós, de modo que estejam submetidos apenas a esforços normais. O dimensionamento das peças é feito somente após definida a disposição das mesmas e dos travamentos presentes, obtendo-se os respectivos comprimentos de flambagem e índices de esbeltez.

Outro aspecto relevante em treliças de grandes dimensões é a construção dos nós, uma vez que a solda inviabiliza o transporte de grandes peças. Usualmente, os nós ou emendas são compostos por chapas de ligação (gussets) e parafusos, de modo a transmitir de maneira eficaz os esforços nos nós como mostra a figura abaixo.

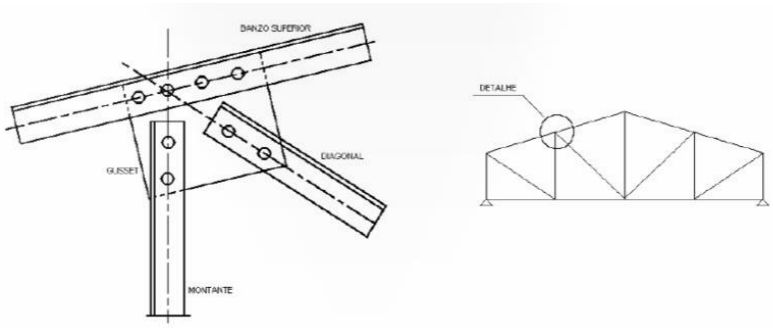


Figura 34: Detalhe de ligação (FONTE: FRUCHTENGARTEN, J.);

6.5 Análise sobre o CFD

A Sigla de Computational Fluids Dinamics, CFD ou Dinâmica dos Fluidos Computacional é o nome dado à área da mecânica dos fluidos que estuda o escoamento de fluidos utilizando ferramentais computacionais e métodos numéricos. Com o avanço da computação e dos softwares relacionados nos últimos anos, tornou-se um método de simulação de baixo custo, principalmente se comparado à simulação em túnel de vento, além do rápido processamento e qualidade dos resultados.

O CFD baseia-se nos princípios de conservação de massa, energia e quantidade de movimento, no domínio do espaço e do tempo.

De modo a estudar a ventilação natural nos módulos, optou-se por este método pela necessidade de se visualizar e verificar a ventilação em caráter volumétrico, obtendo vetores de intensidade no interior do edifiício e campos de velocidade, pressões e temperaturas. Através do plugin CFD do software Design Builder, pode-se facilmente inserir a edificação em questão e as condições de contorno para o cálculo.

7 DESENVOLVIMENTO, RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Após o levantamento de dados e pesquisas realizadas, foi iniciado o processo de desenvolvimento do trabalho. Para gerar uma solução que se mostre adequada, foi usado uma ferramenta computacional que simulará as condições climáticas externas (na primeira etapa), e movimento das massas de ar no interior dos módulos, nessa segunda etapa. Tal ferramenta forneceu resultados que depois de obtidos, e posteriormente avaliados, para verificação de coerência. De nada vale o auxilio de ferramentas avançadas se a interpretação dos dados for equivocada.

7.1 Metodologia

O processo de desenvolvimento da primeira etapa do trabalho consistiu, a intensa reunião de informações, em que se identificou a necessidade da realização de visitas de campo para conhecer a fundo o objeto do estudo.

Nas primeiras visitas procurou-se levantar os principais problemas relacionados aos aspectos funcionais da edificação de forma a nortear um plano de necessidades a serem satisfeitas como objetivo deste trabalho. Foram aferidos, então, problemas com a temperatura interna alta em dias quentes e em dias de plena utilização das dependências, problemas referentes à estanqueidade da cobertura existente, resultando infiltrações, e os tipos de atividades mais frequentes no ambiente. Logo foi possível notar que a cobertura, possivelmente, poderia representar significativa influência nas condições lá verificadas, tanto devido ao material de que é feita quanto à sua conformação volumétrica, permitindo então tomá-la como objeto de estudo.

Para uma primeira análise, foi realizada uma série de pesquisas, já detalhadas no tópico anterior, com o objetivo de fundamentar qualquer conclusão resultante da investigação do problema. Como resultado, foi possível restringir a esfera de possibilidades ao que se constitui no foco deste trabalho, o estudo da influência da cobertura na ventilação dos módulos. No entanto, logo foi constatada a necessidade de geração de dados próprios para comprovar as hipóteses levantadas na investigação do problema, dados esses que poderiam ser produzidos por meio de simulações computacionais em softwares específicos. Para tanto, foi adotado o software Desgn Builder, desenvolvido pela empresa de mesmo nome, que é capaz de fornecer resultados a respeito do fluxo de ar e da distribuição de temperatura no interior da edificação.

A aquisição do software não é livre, porém o acesso a essa ferramenta foi possível devido ao internédio com a professora orientadora que forneceu o acesso ao seu laboratório, no qual foi possível fazer uso de computadores com o programa instalado.

Uma das exigências do software como dados de entrada é um modelo 3D do edifício, contendo todas suas peculiaridades arquitetônicas e informações a respeito das materiais do qual é composto. Novamente, recorreu-se a visitas ao objeto de estudo, dessa vez, no entanto, para realizar um levantamento de todas as

dimensões do prédio, seus detalhes arquitetônicos de e todos os materiais componentes.

Ainda, o software exige informações a respeito das características da insolação na região, altitude, solo local e ventos típicos, porém, disponibiliza em seu banco de dados um conjunto de parâmetros relativos a diversas localidades no mundo, entre elas, a cidade de São Paulo. Em face à dificuldade de obtenção das informações supracitadas, optou-se por utilizar o próprio banco de dados do programa. Como o objetivo era somente a simulação do comportamento da estrutura atual em relação à ventilação interna, para efeitos de estudo e não de projeto, julgou-se suficiente a utilização dos dados já contidos no programa, pois admitiu-se que o vento crítico para a ventilação era o de mais baixa velocidade e esse já estaria inserido no banco de dados sem maiores riscos de erros grosseiros. É importante salientar que o banco de dados trabalha com dados relativos ao posto meteorológico de Congonhas, na zona sul.

A partir das informações sobre as dimensões dos módulos foi possível construir um modelo digital do edifício o qual foi inserido no software e testado. As simulações foram realizadas e aprimoradas até que se chegasse a um nível de refinamento considerado satisfatório pelo grupo.

Para o desenvolvimento desses modelos tridimensionais, principalmente para o desenvolvimento do modelo com o *shed*, foi necessário já ter medidas como parâmetro para o desenvolvimento deste. Como padrão de medida, adotaram-se valores conforme apresentados em PERÉN.

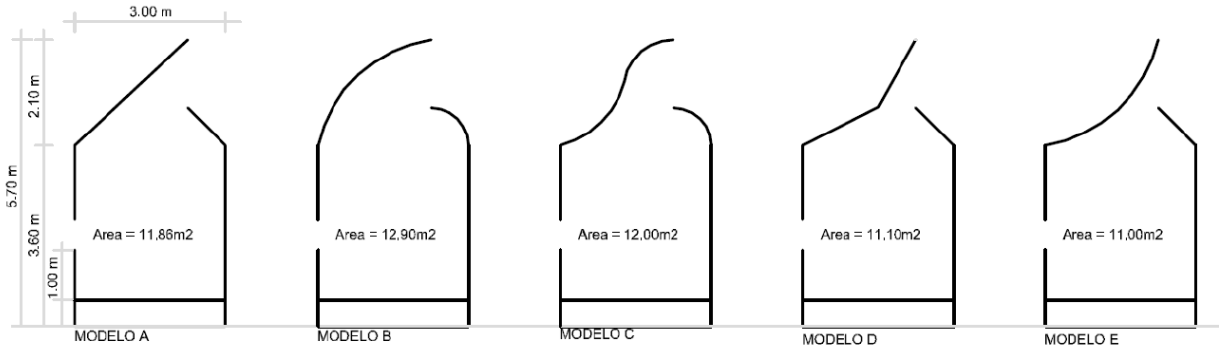


Figura 35: modelos de shed analisados (FONTE: PERÉN,2013);

Tais dimensões propostas foram inicialmente seguidas, contudo, devido á disposição dos pilares centrais já existentes, o anseio por conservá-los, e também, sem poder criar nenhum pilar novo, teve-se de alterar algumas das dimensões em perfil.

As proporções foram alteradas, entretanto, manteve-se a geometria da cobertura proposta. Percebe-se proporção entre os valores propostos de comprimento e altura. Entretanto, devido ás variações presentes na edificação estudada, como a distância horizontal entre os pilares (primeiro á 36m, segundo á 30m do primeiro e o terceiro á 24m do segundo, conforme desenho apresentado a seguir), alterou-se e de certa forma, perdeu-se um pouco da proporção proposta por PERÉN 2012.

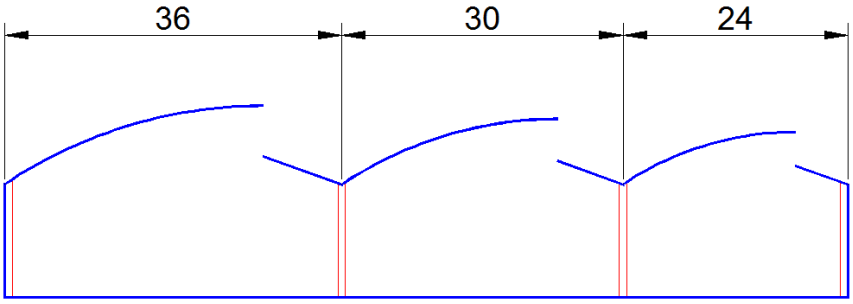


Figura 36: Disposição dos pilares, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

Conforme dispostos os pilares, e com pequenas alterações na geometria da cobertura, chegou-se inicialmente ao seguinte modelo:

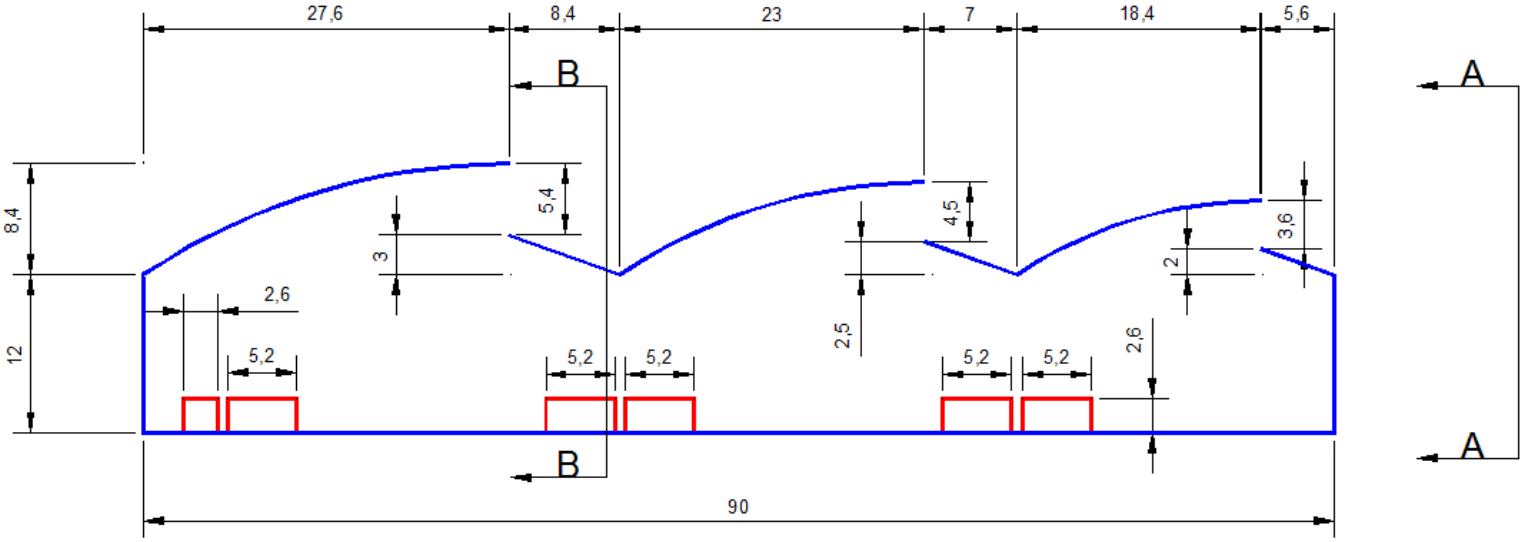
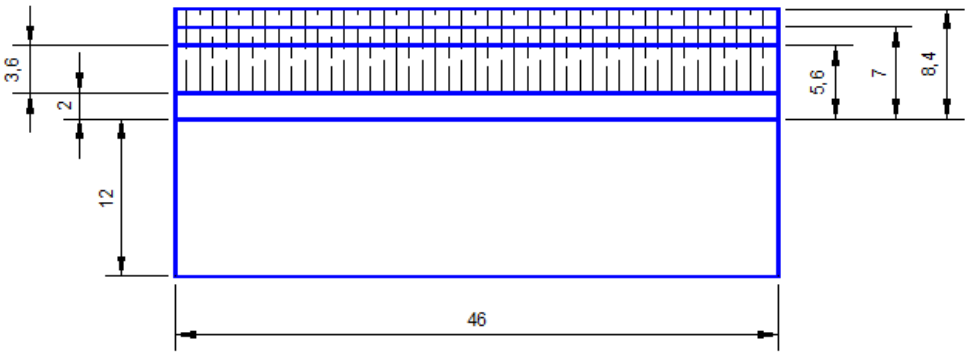


Figura 37: Vista em perfil da edificação proposta com shed, (FONTE: Autoria do próprio grupo);



CORTE A-A

Figura 38:corte A-A esquemático, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

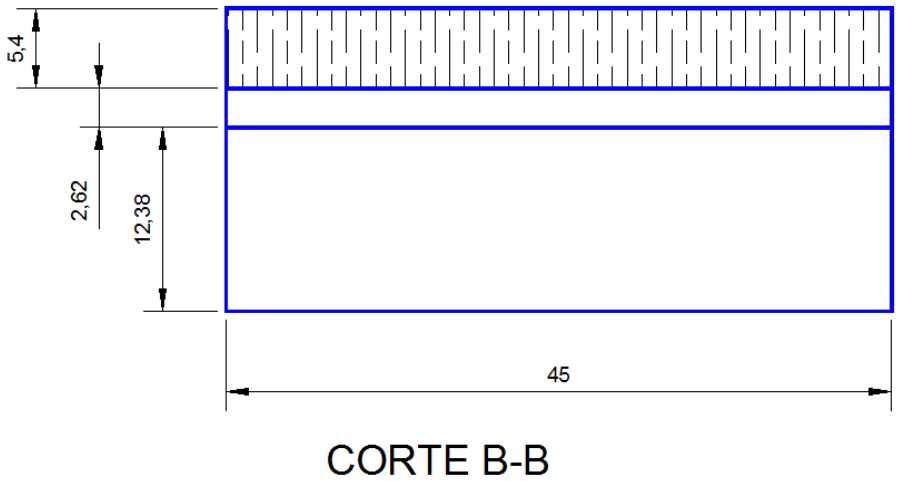


Figura 39: corte esquemático B-B, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

Terminado o modelo geométrico tridimensional, partiu-se para as simulações de ventilação, CFD e também estruturais (carregamentos devido á nova cobertura e carregamentos gerados por conta das ações do vento).

Obtidos os dados a partir da simulação de ventilação, e feito também o modelo digital tridimensional do ginásio, partiu-se então para a simulação CFD, desenvolvida por meio do mesmo software. Deste, buscou-se entender o comportamento do ar dentro da edificação, descobrir se os resultados seriam compatíveis com os resultados esperados e já comentados pela orientadora.

7.2 Ferramentas computacionais de simulação de ventilação

Atualmente existe uma grande quantidade de ferramentas de simulação na área de desempenhos térmico, energético e ventilação em edificações. Entretanto, tendo em vista tantas ferramentas, é de grande importância que o usuário saiba analisar quais são as informações que o programa solicita como entrada e de que forma esses dados são processados. Assim, pode-se selecionar a ferramenta mais adequada para que as simulações permitam a obtenção de informações que mais se aproximem da realidade. Vale lembrar também a importância de se introduzir de maneira correta as condições de contorno do problema, pois a inserção de informações incoerentes resulta em inconsistências que podem ser fatais, dependendo do tipo de projeto, se o usuário não fizer uma interpretação crítica dos resultados.

De acordo com DE BENETTO, "*apesar da quantidade de programas disponíveis hoje, existe a dificuldade de acesso a informações sobre eles, principalmente devido à falta de padronização dos materiais de divulgação, quanto à linguagem internacional que permita uma comparação técnica, ou por não utilizarem uma linguagem internacional que permita uma comparação técnica, ou por não utilizarem uma linguagem comum com os jargões mais utilizados pela comunidade mundial de simulação"* (2006).

No caso desse trabalho, desde o início do projeto, ainda na fase de definição dos objetivos, o grupo foi orientado a utilizar o software Design Builder, ferramenta utilizada no processo conhecido como BIM (Building Information Modeling). Esse software tem como plug-in o programa Energy Plus. Além do fato de ter sido uma sugestão da orientadora, optou-se pela utilização desse software também pela proximidade de pessoas que estão mais familiarizadas com ele, e também porque já havia um computador do laboratório com esse programa já instalado.

Na etapa inicial deste projeto, o grupo buscou se familiarizar com o software e até mesmo fazer algumas modelagens iniciais, como um treinamento para o desenvolvimento dessas análises para a próxima etapa do trabalho de formatura.

De acordo com o DOE/USA (Departamento de Energia dos Estados, Estados Unidos da América), o *Energy Plus* permite a identificação das parcelas de carga térmica referente a envolventes transparentes e opacas e a quantificação da carga térmica a ser removida do ambiente pelo sistema de ar condicionado.

O programa também é capaz de realizar simulações em CFD (Computational Fluid Dynamics). O programa é capaz de fornecer dados gráficos tridimensionais, que permitem a visualização interativa das direções de deslocamentos das massas de ar, temperaturas (em qualquer plano selecionado, em qualquer direção), pressão e intensidade (sendo essa simulação, um dos alvos dessa segunda etapa de apresentação do projeto).

7.3 Caracterização dos materiais e componentes do ginásio

Nesse ginásio, as principais características dos componentes e materiais, para uma simulação inicial, são descritas a seguir, e também suas respectivas figuras (Figura 40 e Figura 41):

- Duas portas menores de 2,6m x 2,45m com a camada externa de metal, faixa interna e acabamento de madeira, para o interior do ginásio;

- Seis portas maiores, de 5,2m x 2,45m, com as mesmas camadas descritas anteriormente;

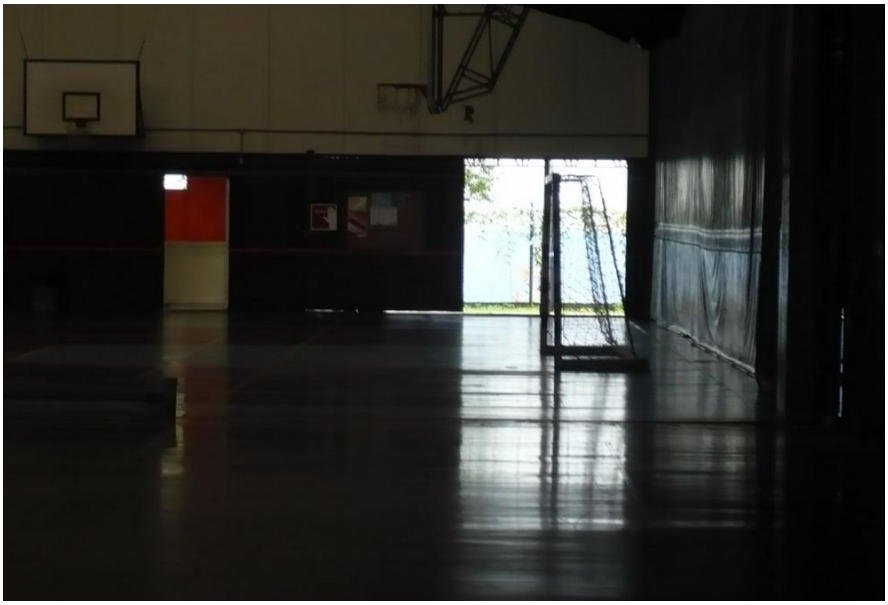


Figura 40: Visão de dentro para fora – dimensão da porta,(FONTE: Autoria do próprio grupo);

Figura 41: Comparação da dimensão da porta com altura de uma pessoa, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

- Piso de madeira – assoalho (Figura 42):

Figura 42: Piso de madeira da quadra, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

- Paredes de alvenaria.
- Cobertura atual em estrutura metálica – treliças metálicas (Figura 43 e Figura 44)

Figura 43: Foco na treliça metálica, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

Figura 44: Foco nos travamentos metálicos, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

- Cobertura em telhas metálicas (Figura 45).

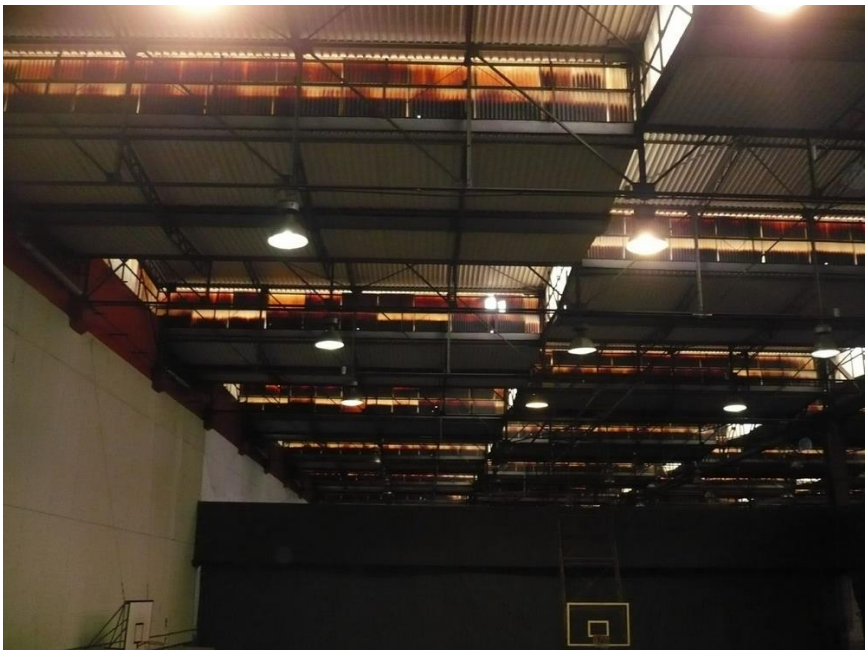


Figura 45: Disposição da cobertura atual, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

7.4 Modelagem e simulação no software Design Builder

7.4.1 Modelagem

É de fundamental importância a definição correta dos parâmetros de entrada na utilização de qualquer software. Como em toda modelagem, é possível se fazer simplificações e hipóteses, desde que de forma coerente, com bom senso, para que se tornem mais simples tanto as simulações do programa quanto a própria interpretação dos seus resultados.

O programa possui uma biblioteca muito grande de informações relativas aos materiais de construção. Dados relativos à edificação alvo desse trabalho, as quadras cobertas do CEPEUSP (mais conhecidas como os Módulos do CEPEUSP) possuem paredes de alvenaria, cobertura metálica com treliças metálicas.

Esta cobertura é composta por telhas metálicas em desníveis alternados de aproximadamente 1,50 metros, que acompanham em suas laterais fechamentos verticais de telhas transparentes de fibra, como pode ser visto na figura a seguir:

Figura 46: Cobertura em chapas de aço alternadas com telhas transparentes de fibra, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

Abaixo é possível ver a interface do programa, com uma modelagem que caracteriza o atual módulo do CEPEUSP, com a cobertura em forma de “xadrez”:

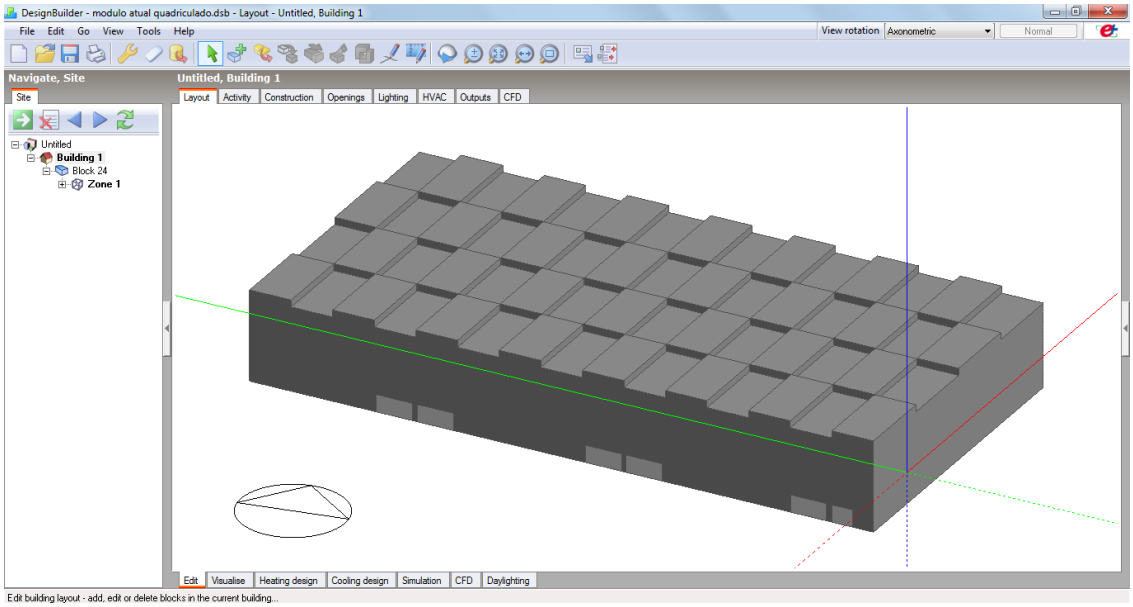


Figura 47: Interface do programa na modelagem (modelo atual), (FONTE: Autoria do próprio grupo);

Durante a modelagem, esta é a interface para a geração do modelo em três dimensões. Nas abas superiores, em *Activity* (Figura 48) é possível definir as características das atividades desenvolvidas no interior da edificação. Assim, por se tratar de uma arena esportiva, definiu-se o local de atividade como *Dry Sports Hall*. Além disso, nesta aba também são definidos outros parâmetros como, por exemplo, o tipo de atividade (no caso, *Exercise/sport*) e quantidade de pessoas por unidade de área.

Para esse início, adotou-se o período de funcionamento das 8h da manhã às 22h da noite. Portanto 14 horas diárias (60% do dia) com as portas com cerca de 60% de área aberta;

Outra consideração foi a operação durante todo o período letivo, somando fins de semana e férias escolares. Subtraíram-se os feriados prolongados.

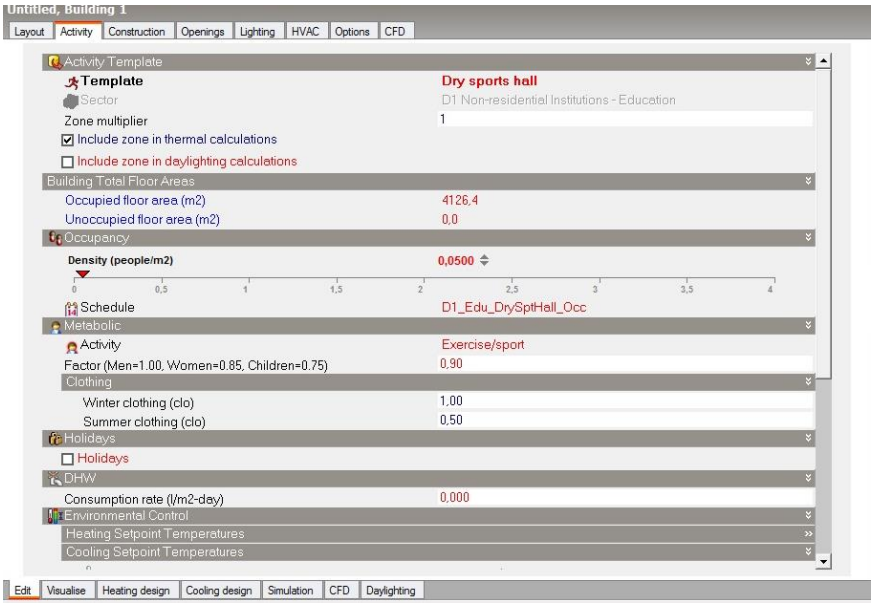


Figura 48: Definição de parâmetros na aba Activity, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

Na aba *Construction* (Figura 49), são definidos os materiais que compõem a edificação. Assim, para efeitos de simulação, foram adotadas as seguintes composições para os elementos:

- Paredes de alvenaria, formada por três camadas: interna de revestimento de argamassa – 2 cm; intermediária de bloco de concreto – 20 cm; externa de cerâmica – 10 cm.

- Cobertura com as características gerais de uma placa de aço.

Adotou-se, para simplificação da modelagem da cobertura, chapas de aço de 5 milímetros de espessura tanto para as telhas metálicas alternadas horizontalmente quanto para os fechamentos em telha de fibra.

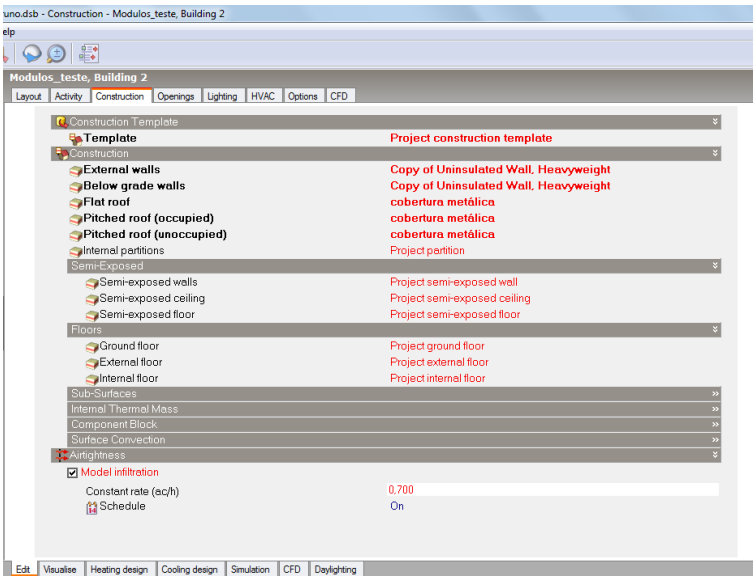


Figura 49: Definição dos materiais na aba Construction, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

Em *Openings*, é possível definir as dimensões e porcentagem de aberturas (janelas, portas, claraboias) em relação à área de determinado componente da edificação, de forma que facilite a introdução desses elementos em paredes e tetos uniformemente. Como pode ser visto na figura a seguir, foi fixada porcentagem nula de aberturas nesta aba, pois a introdução de portas e outras aberturas nos modelos foi feita manualmente para cada elemento da fachada.

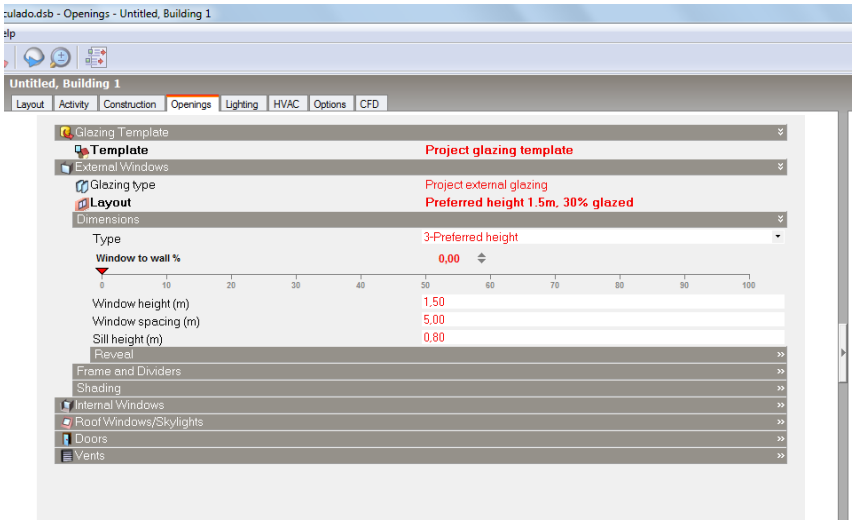


Figura 50: Porcentagem nula de aberturas na aba Openings, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

Nas abas *Lighting e HVAC,* os alvos principais são os quesitos de iluminação artificial e ar condicionado. Como o objetivo deste projeto é o estudo da influência da cobertura na ventilação natural da edificação, foram desabilitados todos os outros itens como, por exemplo, aqueles respectivos à ventilação mecânica, aquecimento/resfriamento artificiais, consumo de energia para fornecimento de água quente, entre outros. Dessa forma, apenas a o item *Natural ventilation* ficou ativado, como pode ser visto a seguir:

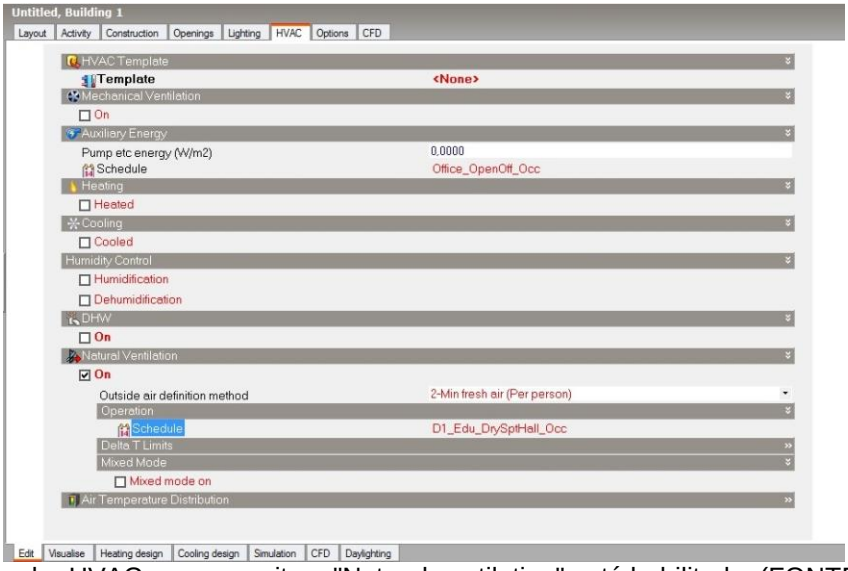


Figura 51: na aba HVAC, apenas o item "Natural ventilation" está habilitado, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

E por último, a aba *CFD,* onde são definidos os parâmetros de temperatura para a simulação em CFD, que será desenvolvida na seção 7.4.5.

Nesta etapa de desenvolvimento do projeto, foram criados três modelos. O primeiro corresponde à condição atual, com a cobertura “xadrez”, que já foi mostrada anteriormente. Os outros dois modelos são as propostas de coberturas do tipo shed. Foram sugeridos alguns perfis inspirados nas obras do arquiteto Lelé, com medidas que foram proporcionalmente ajustadas para as dimensões dos módulos do CEPEUSP. Os dois perfis são mostrados nas figuras abaixo:

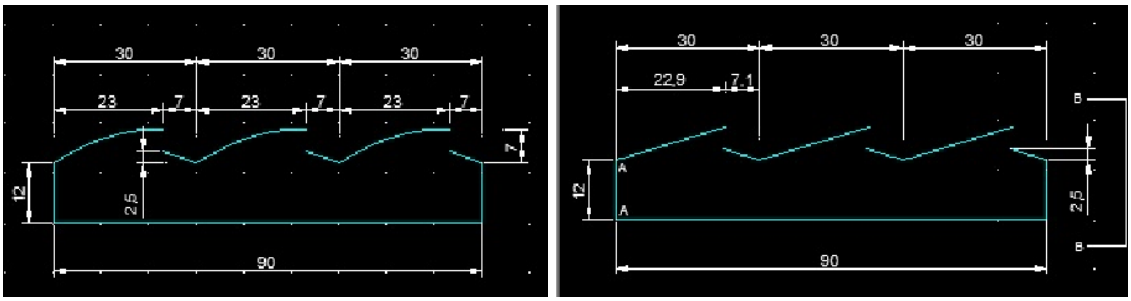


Figura 52: Perfis fornecidos por Jorge Isaac Perén (FONTE: Autoria do próprio grupo, embasado nos trabalhos de PEREN);

Esses modelos apresentados na **Figura 52** foram determinados com base nas proporções sugeridas. Entretanto, a estrutura de base presente (neste caso, pilares internos), faz com que sejam necessários alguns ajustes nessa geometria, de modo a compatibilizar a estrutura da cobertura com a posição desses pilares.

Após a definição dos perfis, foram feitas as modelagens tridimensionais, no Design Builder, que serão estudadas e comparadas entre si e com o modelo da cobertura atual. Eles foram gerados e configurados da mesma maneira que o modelo da condição atual. Ou seja, são as mesmas atividades, as mesmas condições de operação e os mesmos materiais, de forma que a única diferença entre os três é a volumetria da cobertura. Nas duas figuras a seguir são apresentadas estas duas propostas de sheds:

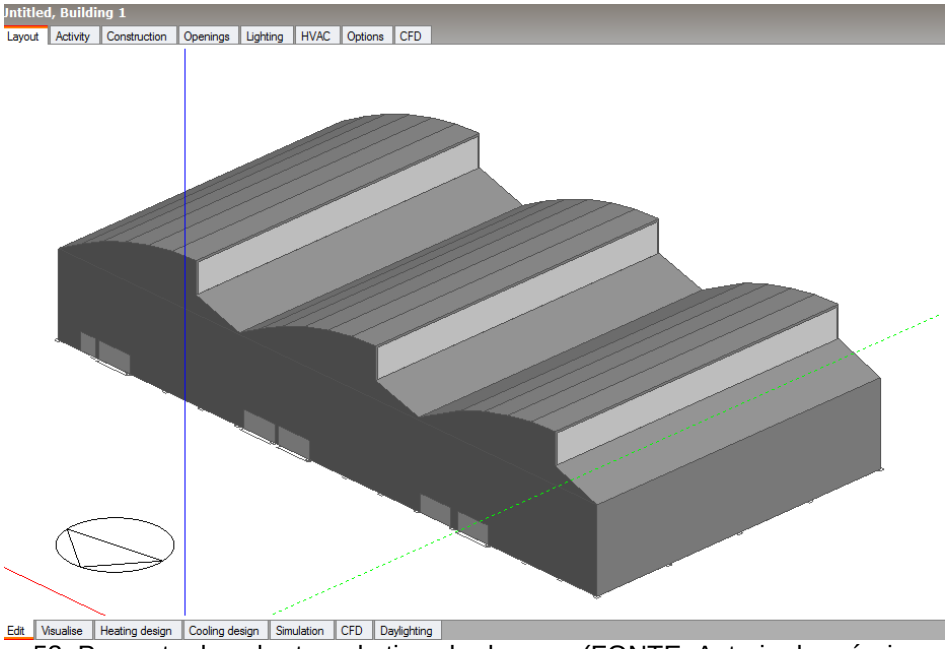


Figura 53: Proposta de cobertura do tipo shed curvo, (FONTE: Autoria do próprio grupo);

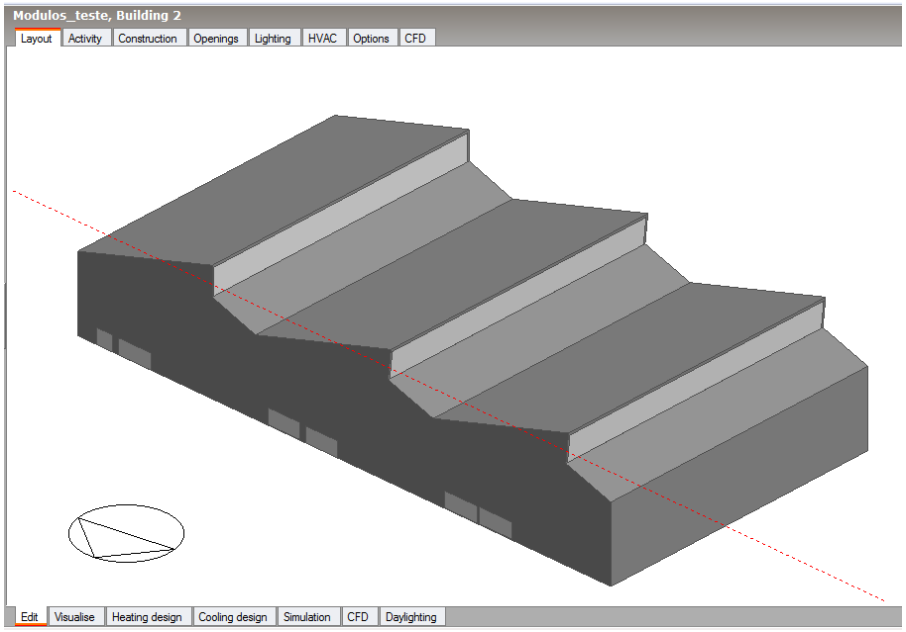


Figura 54: Proposta de cobertura do tipo shed reto, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Na modelagem das propostas de sheds, para o programa entender que a cobertura possui saídas de ar de 4,5 m de altura, foram introduzidas 3 aberturas (*Holes)* no modelo. A partir daí, prossegue-se com as configurações para a etapa de simulação.

7.4.2 Simulação com Energy Plus

Após o término da modelagem, devem ser configurados os parâmetros corretos para gerar as simulações. Portanto, foi necessário alterar algumas entradas no programa, relativos à localização e orientação da edificação, como é mostrado na figura abaixo:

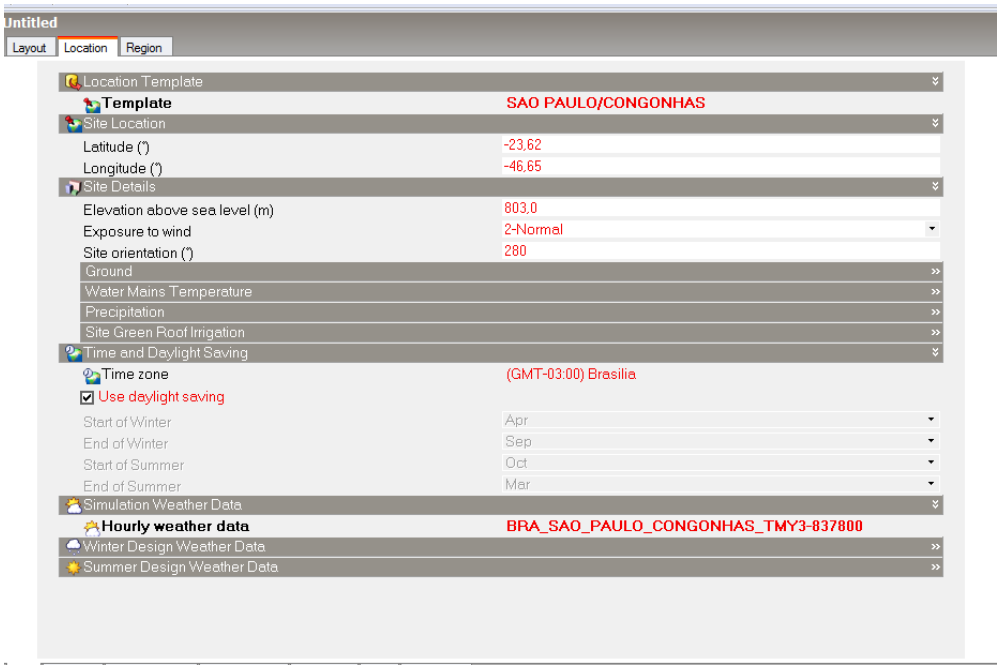


Figura 55: Dados relativos à localização, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Na aba *Location*, como pode ser visto na figura anterior, existe um banco de dados do programa que permite escolher qual é a região de localização da edificação, sendo que, a partir daí, os dados geográficos, climáticos e meteorológicos referentes a este local já são descarregados automaticamente no modelo. Assim, foi escolhido o *template* de SÃO PAULO/CONGONHAS no item *Location Template* e, no item, *Simulation Weather Data*, foi escolhido BRA_SAO_PAULO_CONGONHAS_TMY3-837800. Este último é um arquivo que contém todos os dados necessários para a simulação do modelo, com relação às velocidades de ventos, temperaturas, latitude e longitude do local (para a correta caracterização das estações do ano), entre outros parâmetros importantes.

A determinação da orientação da edificação no modelo foi feita com base na planta apresentada a seguir, que foi adquirida na fase de coleta de dados sobre o CEPEUSP. Com base neste desenho, foi possível concluir que a edificação é orientada a 80º no sentido anti-horário em relação ao norte e que os ventos predominantes estão a 45º no mesmo sentido.

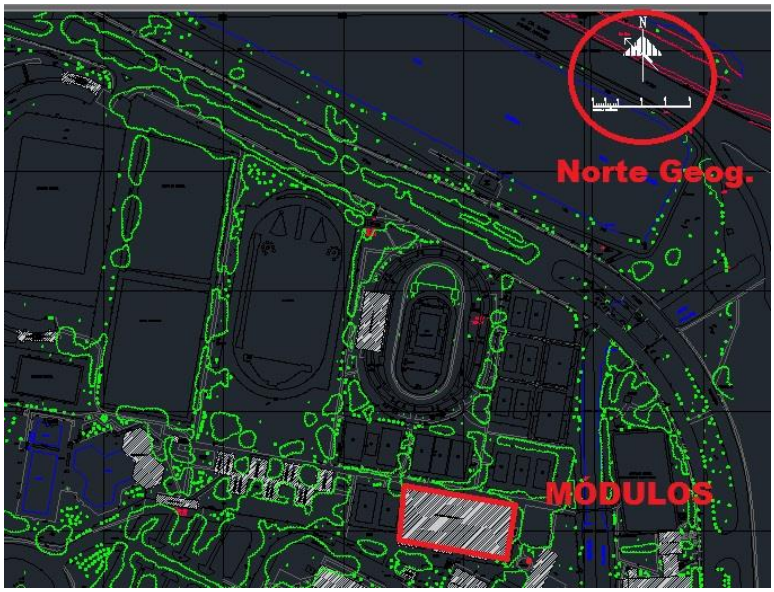


Figura 56: Planta do CEPEUSP, com orientação da edificação e sentido predominante do vento, FONTE: Feliciano CEPEUSP;

O conhecimento do sentido do vento predominantes foi essencial para a determinação da orientação do shed, de modo a se obter a melhor eficiência possível, ou seja, posicionando as aberturas de saída à sotavento, para que se formem ali zonas de subpressão, resultando numa maior troca de ar.
Voltando para a interface de edição do modelo, na aba *Visualise* é gerada uma visão tridimensional renderizada (processo pelo qual se pode obter o produto final de um processamento digital qualquer, muito comum em programas de modelagem 2D e 3D) da edificação.

Uma restrição de modelagem do programa é que ele não aceita superfícies curvas. Com isso, ao se tentar desenhar uma superfície curva para uma cobertura do tipo shed, tentando melhor aproximá-la do formato curvilíneo, no desenho, aproximou-se por pequenos segmentos de reta, e assim, extrudando-os, obteve-se uma forma aproximada da superfície estudada.

As renderizações dos modelos atual e com propostas de novas coberturas do tipo shed são apresentadas abaixo:

Figura 57: Visão renderizada (cobertura atual), FONTE: Autoria do próprio grupo;

Figura 58: Visão renderizada (cobertura tipo shed curvo), FONTE: Autoria do próprio grupo;

Figura 59: visão renderizada (cobertura do tipo shed reto), FONTE: Autoria do próprio grupo;

7.4.3 Resultados da simulação com Energy Plus

Após a inserção de dados no software, realizou-se a análise da ventilação e do comportamento térmico do ambiente interno à edificação. Para isso, foi necessária a caracterização da região de São Paulo, que já está cadastrada no banco de dados, por meio do arquivo de dados. Ainda assim, foram comparados alguns valores com os presentes na literatura, para saber se havia semelhança entre os mesmos.
Foi estabelecido, no decorrer do desenvolvimento do projeto, que se fizesse as simulações horárias para dois dias representativos de um determinado ano característico: dia representativo de verão (Summer typical Day) e dia representativo de inverno (Winter typical Day).

De acordo com os dados do arquivo usado, mostrados na Figura 60, que indicam as semanas típicas e extremas de inverno e verão, foram adotadas, para fins de simulação, as seguintes datas:

- Dia representativo de verão: 22 de janeiro
- Dia representativo de inverno: 30 de julho

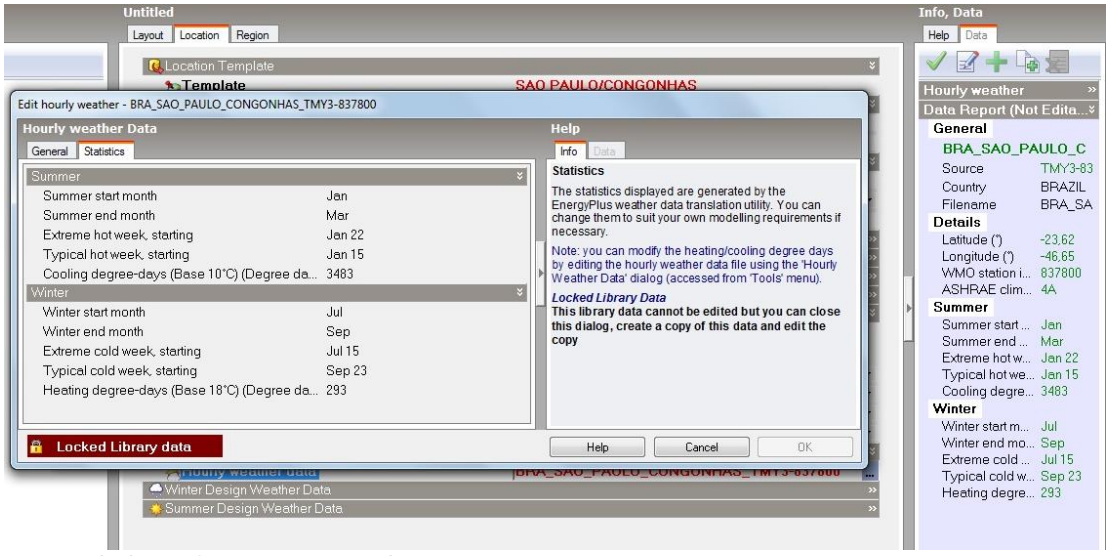
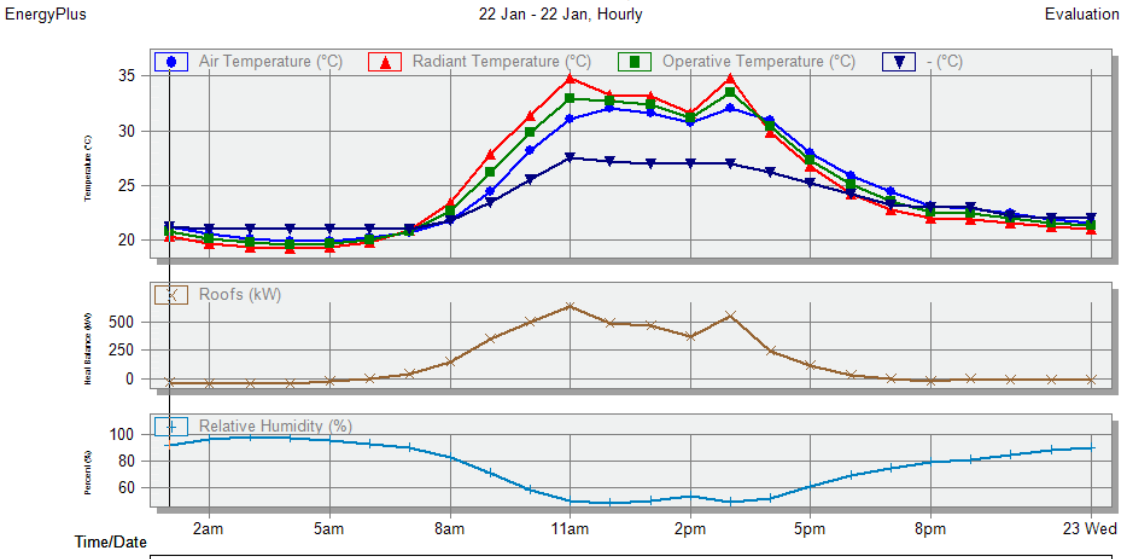


Figura 60: dados referentes ao arquivo BRA_SAO_PAULO_CONGONHAS_TMY3-837800, FONTE: Autoria do próprio grupo;

As simulações foram feitas para a condição de cobertura atual, em desníveis alternados, e para as duas propostas de shed, com todas as premissas já adotadas e configurações de simulação estabelecidas, que são as mesmas nos três casos. Foram obtidos resultados para temperaturas, absorção de calor, umidade relativa, ventos (intensidade e direção) e ventilação. Os gráficos são mostrados a seguir:

Dia representativo de verão: 22 de janeiro

Módulo com cobertura atual



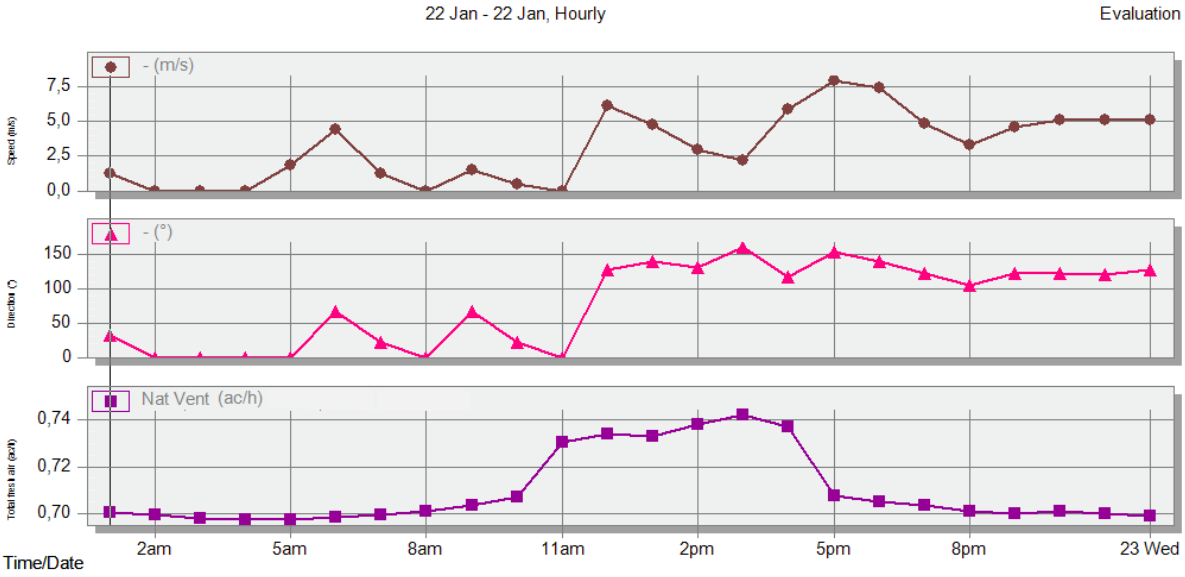
	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	23 Wed
Air Temperature (°C)	21,26	20,53	20,16	19,94	19,97	20,28	20,74	21,82
Radiant Temperature (°C)	20,38	19,73	19,42	19,21	19,40	19,82	20,87	23,44
Operative Temperature (°C)	20,82	20,13	19,79	19,58	19,69	20,05	20,80	22,63
- (°C)	21,25	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,75
Roofs (kW)	-27,07	-45,01	-44,24	-43,11	-24,17	1,54	41,89	151,56
Relative Humidity (%)	91,76	96,28	97,73	96,72	94,98	92,57	89,41	82,87

	11am	2pm	5pm	8pm	23 Wed
Air Temperature (°C)	24,49	28,19	31,06	32,08	31,56
Radiant Temperature (°C)	27,82	31,43	34,86	33,26	33,12
Operative Temperature (°C)	26,16	29,81	32,96	32,67	32,34
- (°C)	23,50	25,50	27,50	27,25	27,00
Roofs (kW)	353,05	500,30	640,44	492,81	469,48
Relative Humidity (%)	71,12	57,96	50,06	48,22	50,26

	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	23 Wed
Air Temperature (°C)	30,71	32,10	30,98	27,98	25,92	24,39	23,13	22,87
Radiant Temperature (°C)	31,59	34,84	29,83	26,71	24,19	22,82	22,05	21,95
Operative Temperature (°C)	31,15	33,47	30,40	27,35	25,05	23,61	22,59	22,41
- (°C)	27,00	27,00	26,25	25,25	24,25	23,25	23,00	23,00
Roofs (kW)	372,28	556,31	239,40	117,58	34,42	-1,35	-17,22	-4,46
Relative Humidity (%)	53,23	49,15	52,02	61,14	68,59	74,30	79,10	80,80

	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	23 Wed
Air Temperature (°C)	22,41	21,86	21,63					
Radiant Temperature (°C)	21,58	21,22	21,04					
Operative Temperature (°C)	22,00	21,54	21,33					
- (°C)	22,25	22,00	22,00					
Roofs (kW)	-8,84	-10,11	-6,04					
Relative Humidity (%)	84,05	87,83	89,56					

Figura 61: Temperaturas, absorção de calor e umidade relativa para a CONDIÇÃO ATUAL – VERÃO, FONTE: Autoria do próprio grupo;



	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	23 Wed
Wind Speed - (m/s)	1,27	0,00	0,00	0,00	1,88	4,45	1,27	0,00
Wind Direction - (°)	32,50	0,00	0,00	0,00	0,00	67,50	22,50	0,00
Nat Vent (ac/h)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70

	11am	2pm	5pm	8pm	23 Wed
Wind Speed - (m/s)	1,50	0,50	0,00	6,15	4,75
Wind Direction - (°)	67,50	22,50	0,00	127,50	140,00
Nat Vent (ac/h)	0,70	0,71	0,73	0,73	0,73

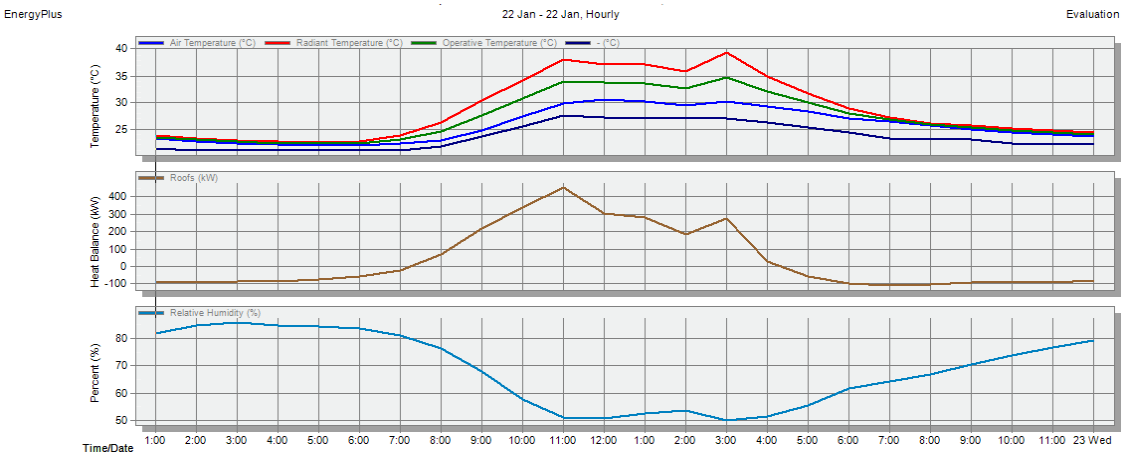
	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	23 Wed
Wind Speed - (m/s)	3,00	2,20	5,90	7,95	7,45	4,88	3,28	4,57
Wind Direction - (°)	130,00	160,00	117,50	152,50	140,00	122,50	105,00	122,50
Nat Vent (ac/h)	0,74	0,74	0,74	0,71	0,70	0,70	0,70	0,70

	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	23 Wed
Wind Speed - (m/s)	5,10	5,10	5,10					
Wind Direction - (°)	122,50	120,00	127,50					
Nat Vent (ac/h)	0,70	0,70	0,70					

Figura 62: Ventos (intensidade e direção) e trocas de ar para a CONDIÇÃO ATUAL – VERÃO, FONTE: Autoria do próprio grupo;

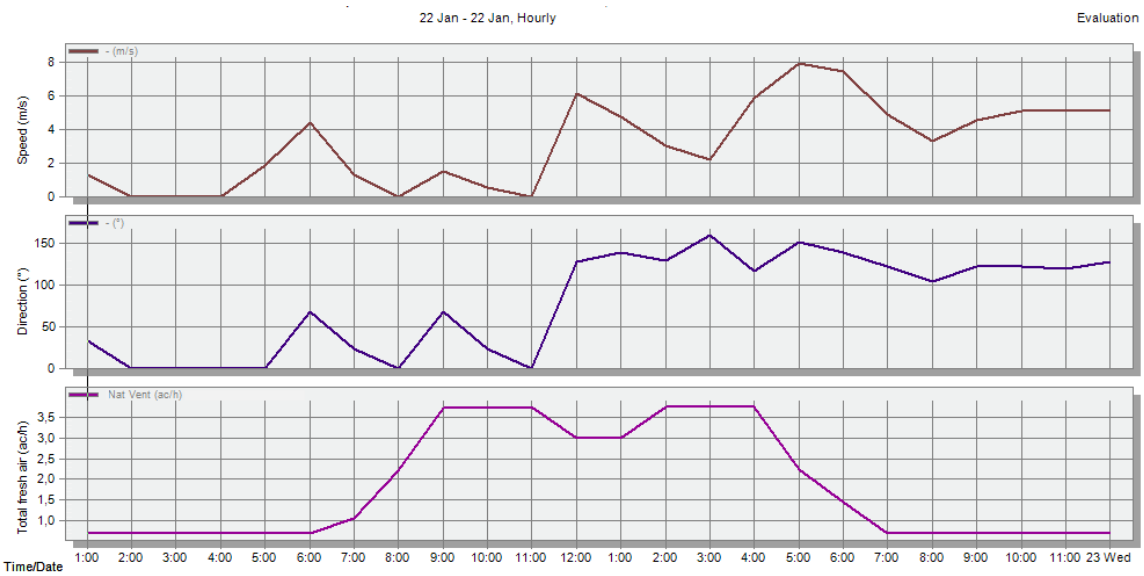
Dia representativo de verão: 22 de janeiro

Módulo com shed reto



Time/Date	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	23 Wed
Air Temperature (°C)	23,15	22,60	22,29	22,06	21,92	21,91	22,21	22,79	24,63	27,30	29,92	30,52	30,14	29,49	30,24	29,37	28,36	27,04	26,37	25,63	24,89	24,42	23,91	23,55
Radiant Temperature (°C)	23,79	23,29	22,90	22,60	22,49	22,61	23,70	26,26	30,48	34,29	38,16	37,18	37,23	35,94	39,44	35,05	31,77	28,84	27,12	26,11	25,73	25,13	24,63	24,32
Operative Temperature (°C)	23,47	22,95	22,60	22,33	22,20	22,26	22,95	24,52	27,55	30,80	34,04	33,85	33,68	32,72	34,84	32,21	30,07	27,94	26,75	25,87	25,31	24,78	24,27	23,93
- (°C)	21,25	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,75	23,50	25,50	27,50	27,25	27,00	27,00	27,00	26,25	25,25	24,25	23,25	23,00	23,00	22,25	22,00	22,00
Roofs (kW)	-89,06	-90,96	-87,83	-85,19	-75,25	-60,23	-20,37	71,09	216,13	338,31	451,70	306,17	280,55	181,69	274,12	28,41	-57,77	-96,61	-107,35	-105,42	-90,20	-92,45	-91,73	-83,22
Relative Humidity (%)	81,66	84,77	85,73	84,85	84,27	83,74	81,28	76,30	67,82	57,65	51,12	50,85	52,63	53,72	50,10	51,40	55,43	61,65	64,12	66,91	70,56	73,94	76,81	79,28

Figura 63: Temperaturas, absorção de calor e umidade relativa para proposta de SHED RETO – VERÃO, FONTE: Autoria do próprio grupo;

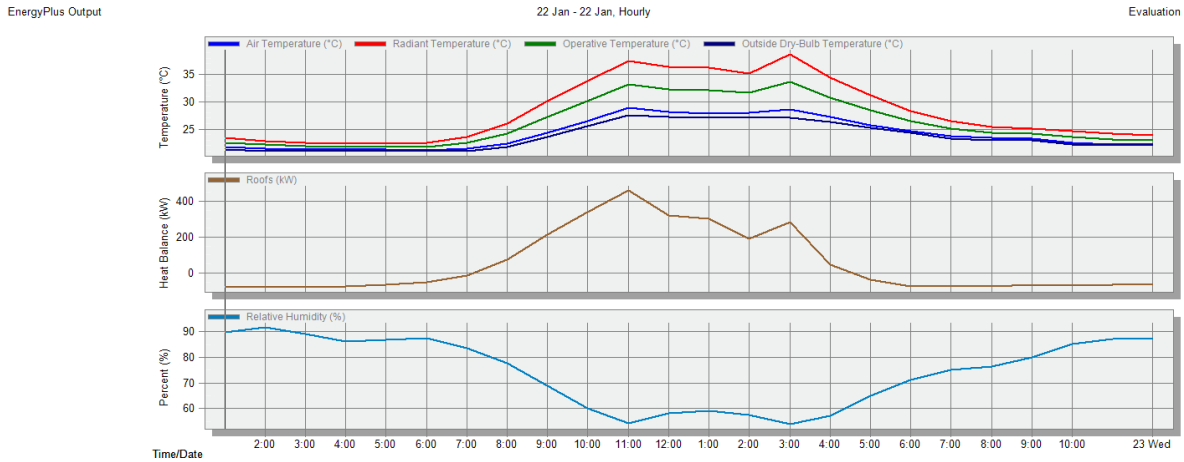


Time/Date	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	23 Wed
Wind Speed - (m/s)	1,27	0,00	0,00	0,00	1,88	4,45	1,27	0,00	1,50	0,50	0,00	6,15	4,75	3,00	2,20	5,90	7,95	7,45	4,88	3,28	4,57	5,10	5,10	5,10
Wind Direction - (°)	32,50	0,00	0,00	0,00	0,00	67,50	22,50	0,00	67,50	22,50	0,00	127,50	140,00	130,00	160,00	117,50	152,50	140,00	122,50	105,00	122,50	122,50	120,00	127,50
Nat Vent (ac/h)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	1,08	2,21	3,72	3,73	3,74	2,99	2,98	3,73	3,74	3,74	2,23	1,47	0,71	0,71	0,70	0,71	0,70	0,70

Figura 64: Ventos (intensidade e direção) e trocas de ar para proposta de SHED RETO – VERÃO, FONTE: Autoria do próprio grupo;

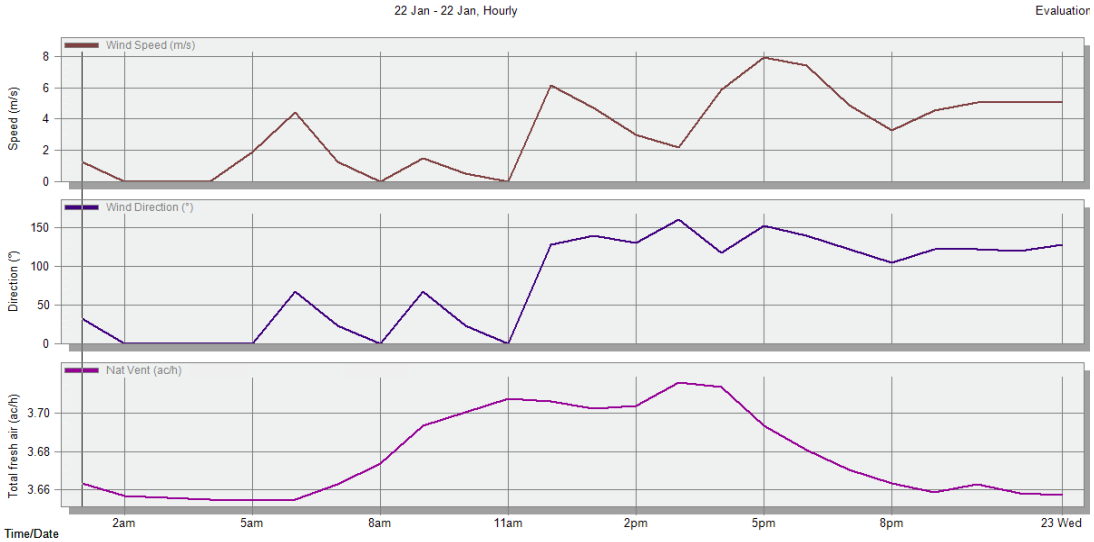
Dia representativo de verão: 22 de janeiro

Módulo com shed curvo



Time/Date	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	23 Wed
Air Temperature (°C)	21.70	21.42	21.29	21.29	21.24	21.12	21.35	22.30	24.26	26.53	28.85	28.15	27.90	28.04	28.59	27.21	25.72	24.60	23.68	23.36	23.25	22.54	22.19	22.17
Radiant Temperature (°C)	23.36	22.82	22.52	22.28	22.27	22.44	23.49	25.99	30.16	33.86	37.54	36.44	36.31	35.18	38.65	34.35	31.16	28.24	26.46	25.40	25.12	24.61	24.11	23.87
Operative Temperature (°C)	22.53	22.12	21.90	21.79	21.75	21.78	22.42	24.14	27.21	30.20	33.20	32.30	32.11	31.61	33.62	30.78	28.44	26.42	25.07	24.38	24.18	23.57	23.15	23.02
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	21.25	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.75	23.50	25.50	27.50	27.25	27.00	27.00	27.00	26.25	25.25	24.25	23.25	23.00	23.00	22.25	22.00	22.00
Roofs (kW)	-73.99	-78.63	-78.85	-77.16	-67.57	-52.91	-16.74	72.62	214.97	340.28	459.24	322.77	300.71	190.56	281.43	44.38	-39.91	-74.83	-77.40	-75.49	-65.74	-69.69	-67.26	-63.16
Relative Humidity (%)	89.85	91.60	89.21	86.24	86.71	87.36	83.57	77.74	68.90	59.94	54.20	57.99	59.03	57.54	54.00	57.31	65.06	71.23	75.09	76.28	79.89	85.18	87.00	87.09

Figura 65: Temperaturas, absorção de calor e umidade relativa para a proposta de SHED CURVO – VERÃO, FONTE: Autoria do próprio grupo;



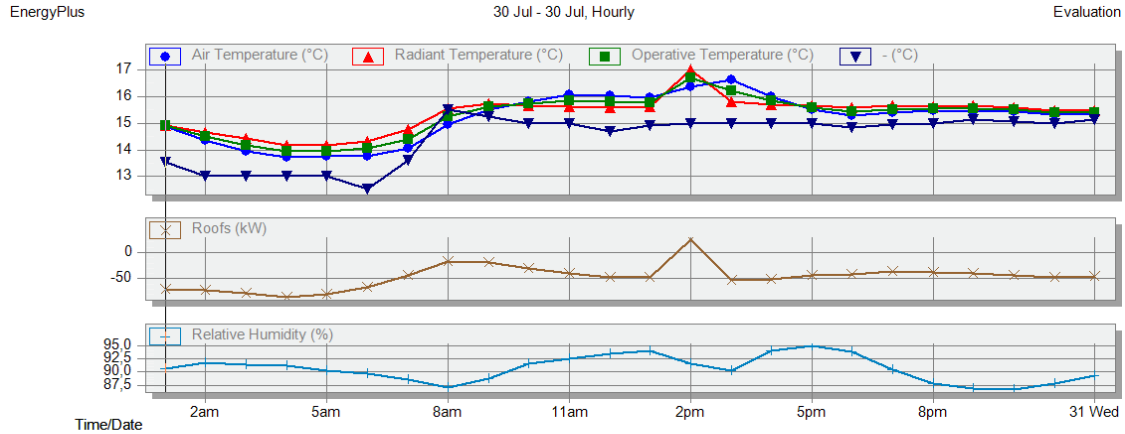
Time/Date	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	23 Wed
Wind Speed (m/s)	1.27	0.00	0.00	0.00	1.88	4.45	1.27	0.00
Wind Direction (°)	32.50	0.00	0.00	0.00	0.00	67.50	22.50	0.00
Nat Vent (ac/h)	3.66	3.66	3.66	3.65	3.65	3.65	3.66	3.67

Time/Date	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	23 Wed
Wind Speed (m/s)	1.50	0.50	0.00	6.15	4.75	3.00	2.20	5.90	7.95	7.45	4.88	3.28	4.57	5.10	5.10	5.10						
Wind Direction (°)	67.50	22.50	0.00	127.50	140.00	130.00	160.00	117.50	152.50	140.00	122.50	105.00	122.50	122.50	120.00	127.50						
Nat Vent (ac/h)	3.69	3.70	3.71	3.71	3.70	3.70	3.72	3.71	3.69	3.68	3.67	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66						

Figura 66: Ventos (intensidade e direção) e trocas de ar para proposta de SHED CURVO – VERÃO, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Dia representativo de inverno: 30 de julho

Módulo com cobertura atual

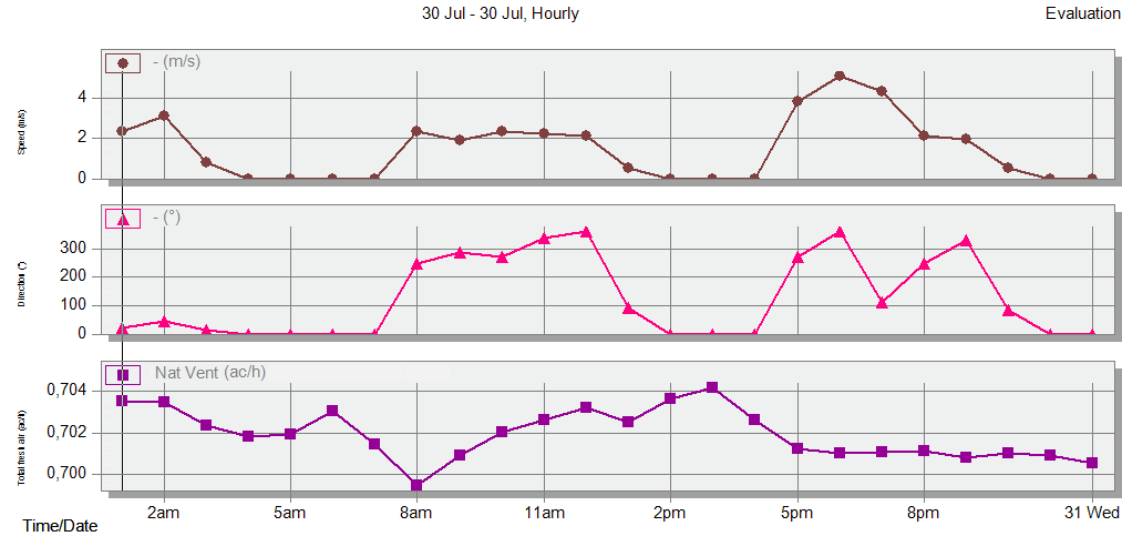


Time/Date	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	31 Wed
Air Temperature (°C)	14,89	14,34	13,95	13,72	13,75	13,76	14,05	14,96
Radiant Temperature (°C)	14,92	14,64	14,42	14,17	14,16	14,33	14,75	15,54
Operative Temperature (°C)	14,90	14,49	14,19	13,95	13,96	14,05	14,40	15,25
- (°C)	13,55	13,00	13,00	13,00	13,00	12,55	13,60	15,50
Roofs (kW)	-69,65	-72,84	-76,65	-84,47	-79,00	-65,75	-44,47	-17,47
Relative Humidity (%)	90,58	91,66	91,43	91,17	90,24	89,71	88,58	87,04

Time/Date	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	31 Wed
Air Temperature (°C)	15,52	15,80	16,07	16,03	15,96	16,37	16,63	15,99
Radiant Temperature (°C)	15,74	15,67	15,61	15,58	15,61	17,01	15,80	15,71
Operative Temperature (°C)	15,63	15,73	15,84	15,80	15,79	16,69	16,21	15,85
- (°C)	15,25	15,00	15,00	14,70	14,90	15,00	15,00	15,00
Roofs (kW)	-19,83	-29,58	-40,36	-47,38	-46,62	23,87	-53,33	-50,91
Relative Humidity (%)	88,75	91,63	92,43	93,45	94,09	91,61	90,21	93,92

Time/Date	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	31 Wed
Air Temperature (°C)	15,52	15,28	15,38	15,46	15,44	15,44	15,32	15,33
Radiant Temperature (°C)	15,65	15,58	15,66	15,63	15,64	15,56	15,48	15,49
Operative Temperature (°C)	15,58	15,43	15,52	15,54	15,54	15,50	15,40	15,41
- (°C)	15,00	14,85	14,95	15,00	15,15	15,05	15,00	15,15
Roofs (kW)	-44,04	-41,81	-35,84	-38,68	-38,97	-42,84	-46,92	-45,02
Relative Humidity (%)	95,01	93,76	90,47	87,85	86,94	86,62	87,89	89,31

Figura 67: Temperaturas, absorção de calor e umidade relativa para a CONDIÇÃO ATUAL – INVERNO, FONTE: Autoria do próprio grupo;



Time/Date	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	31 Wed
- (m/s)	2,33	3,10	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	2,33
- (°)	22,50	45,00	12,50	0,00	0,00	0,00	0,00	247,50
Nat Vent (ac/h)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70

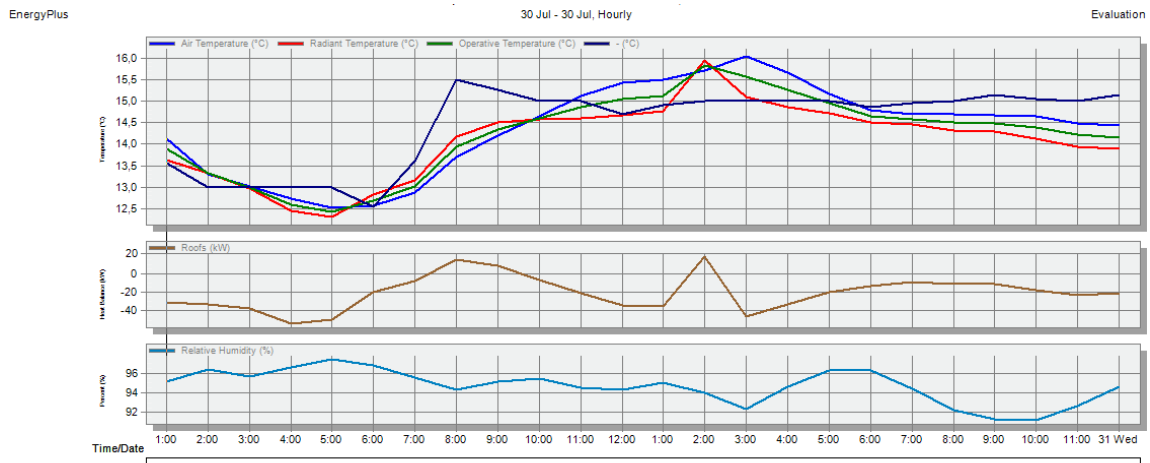
Time/Date	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	31 Wed
- (m/s)	1,90	2,33	2,22	2,10	0,52	0,00	0,00	0,00
- (°)	285,00	270,00	337,50	360,00	90,00	0,00	0,00	0,00
Nat Vent (ac/h)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70

Time/Date	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	31 Wed
- (m/s)	3,83	5,10	4,35	2,15	1,95	0,52	0,00	0,00
- (°)	270,00	360,00	112,50	247,50	327,50	82,50	0,00	0,00
Nat Vent (ac/h)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70

Figura 68: Ventos (intensidade e direção) e trocas de ar para a CONDIÇÃO ATUAL – INVERNO, FONTE: Autoria do próprio grupo;

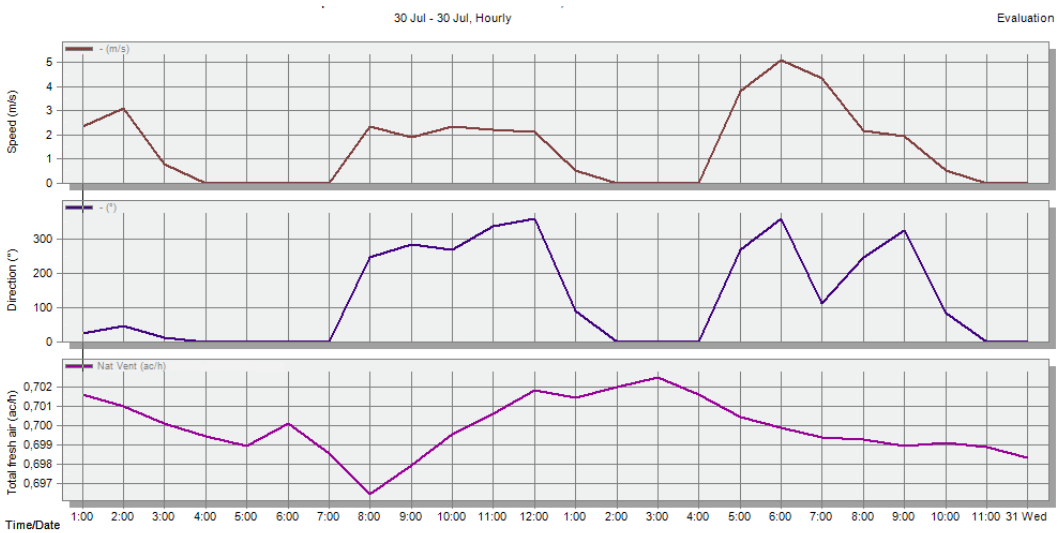
Dia representativo de inverno: 30 de julho

Módulo com shed reto



Time/Date	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	31 Wed
Air Temperature (°C)	14,12	13,31	13,03	12,73	12,52	12,57	12,86	13,70	14,19	14,65	15,12	15,44	15,50	15,72	16,03	15,67	15,17	14,80	14,69	14,69	14,67	14,65	14,49	14,43
Radiant Temperature (°C)	13,63	13,33	12,96	12,45	12,32	12,82	13,16	14,17	14,51	14,57	14,60	14,68	14,76	15,96	15,09	14,86	14,71	14,50	14,45	14,33	14,28	14,12	13,94	13,89
Operative Temperature (°C)	13,88	13,32	12,99	12,59	12,42	12,70	13,01	13,94	14,35	14,61	14,86	15,06	15,13	15,84	15,56	15,27	14,94	14,65	14,57	14,51	14,48	14,38	14,21	14,16
- (°C)	13,55	13,00	13,00	13,00	13,00	12,55	13,60	15,50	15,25	15,00	15,00	14,70	14,90	15,00	15,00	15,00	15,00	14,85	14,95	15,00	15,15	15,05	15,00	15,15
Roofs (kW)	-31,08	-32,55	-37,76	-53,96	-48,95	-19,44	-8,26	15,25	8,71	-7,35	-20,87	-34,64	-35,65	18,44	-45,84	-32,92	-20,45	-13,88	-8,67	-11,61	-11,61	-17,40	-22,71	-20,88
Relative Humidity (%)	95,16	96,41	95,72	96,63	97,48	96,80	95,58	94,36	95,11	95,42	94,55	94,34	95,01	93,98	92,34	94,63	96,32	96,29	94,42	92,22	91,32	91,16	92,67	94,65

Figura 69: Temperaturas, absorção de calor e umidade relativa para a proposta de SHED RETO – INVERNO, FONTE: Autoria do próprio grupo;

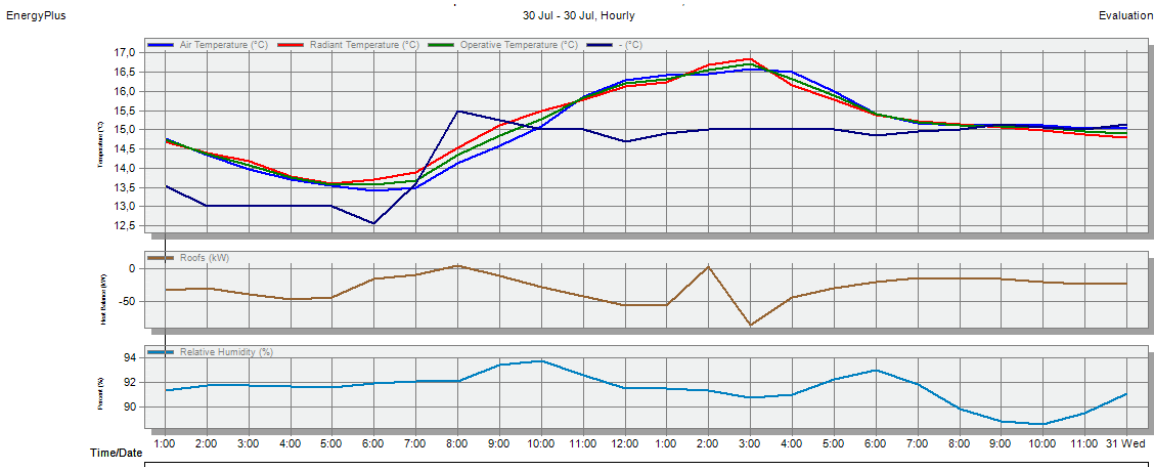


Time/Date	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	31 Wed
- (m/s)	2,33	3,10	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	2,33	1,90	2,33	2,22	2,10	0,52	0,00	0,00	0,00	3,83	5,10	4,35	2,15	1,95	0,52	0,00	0,00
- (°)	22,50	45,00	12,50	0,00	0,00	0,00	0,00	247,50	285,00	270,00	337,50	360,00	90,00	0,00	0,00	0,00	270,00	360,00	112,50	247,50	327,50	82,50	0,00	0,00
Nat Vent (ac/h)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70

Figura 70: Ventos (intensidade e direção) e trocas de ar para a proposta de SHED RETO – INVERNO, FONTE: Autoria do próprio grupo;

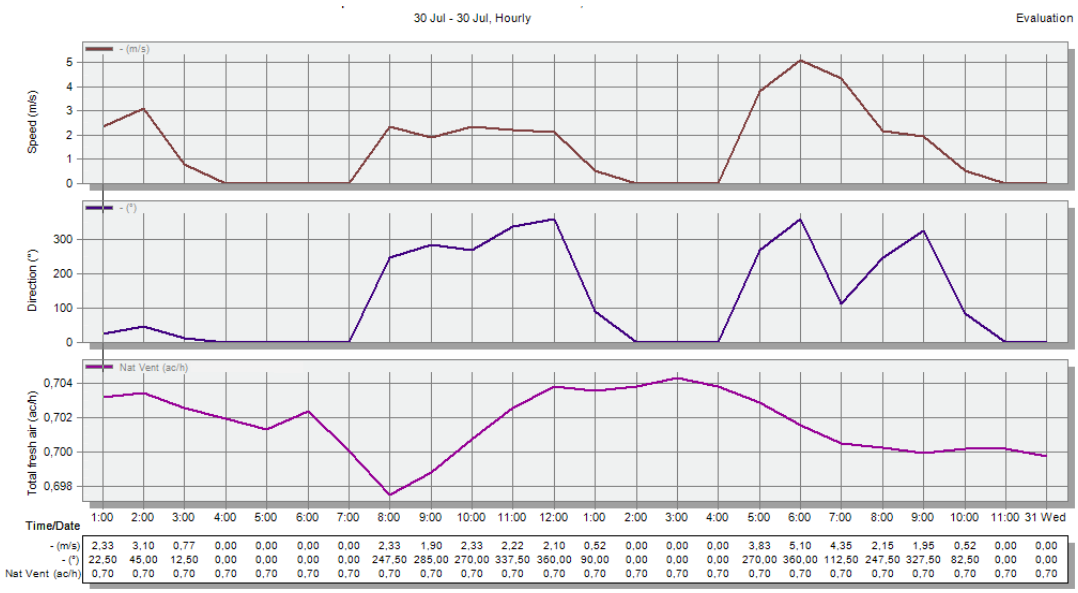
Dia representativo de inverno: 30 de julho

Módulo com shed curvo



Time/Date	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	31 Wed
Air Temperature (°C)	14,77	14,33	13,97	13,71	13,53	13,42	13,49	14,13	14,57	15,08	15,86	16,30	16,41	16,44	16,57	16,49	15,99	15,42	15,17	15,12	15,12	15,11	15,05	15,03
Radiant Temperature (°C)	14,69	14,38	14,18	13,79	13,59	13,70	13,89	14,53	15,11	15,49	15,78	16,12	16,24	16,67	16,85	16,15	15,77	15,37	15,22	15,13	15,07	14,99	14,87	14,80
Operative Temperature (°C)	14,73	14,36	14,07	13,75	13,56	13,56	13,69	14,33	14,84	15,28	15,82	16,21	16,32	16,56	16,71	16,32	15,88	15,39	15,20	15,12	15,09	15,05	14,96	14,91
- (°C)	13,55	13,00	13,00	13,00	13,00	12,55	13,60	15,50	15,25	15,00	15,00	14,70	14,90	15,00	15,00	15,00	15,00	14,85	14,95	15,00	15,15	15,05	15,00	15,15
Roofs (kW)	-32,67	-28,77	-38,93	-46,32	-42,79	-16,16	-9,90	4,27	-11,18	-28,35	-41,64	-55,90	-55,90	2,65	-84,91	-43,52	-30,04	-19,43	-13,44	-15,89	-15,03	-20,06	-23,18	-21,56
Relative Humidity (%)	91,28	91,72	91,73	91,68	91,58	91,93	92,07	92,04	93,40	93,78	92,57	91,51	91,45	91,28	90,72	91,00	92,27	92,97	91,78	89,84	88,82	88,50	89,42	91,03

Figura 71: Temperaturas, absorção de calor e umidade relativa para a proposta de SHED CURVO – INVERNO, FONTE: Autoria do próprio grupo;



Time/Date	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	31 Wed
- (m/s)	2,33	3,10	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	2,33	1,90	2,33	2,22	2,10	0,52	0,00	0,00	0,00	3,83	5,10	4,35	2,15	1,95	0,52	0,00	0,00
- (°)	22,50	45,00	12,50	0,00	0,00	0,00	0,00	247,50	285,00	270,00	337,50	360,00	90,00	0,00	0,00	0,00	270,00	360,00	112,50	247,50	327,50	82,50	0,00	0,00
Nat Vent (ac/h)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70

Figura 72: Ventos (intensidade e direção) e trocas de ar para a proposta de SHED CURVO – INVERNO, FONTE: Autoria do próprio grupo;

7.4.4 Análise dos resultados do Energy Plus

Os gráficos apresentados anteriormente mostram as seguintes grandezas:

- Temperatura de bulbo seco, externa (*Dry-bulb temperature*), em ºC;
- Temperatura do ar (*Air temperature*), em ºC;
- Temperatura radiante (*Radiant temperature*), em ºC;
- Temperatura operativa (*Operative temperature*), em ºC;
- Ganho de calor (*Heat gain*), através de cobertura (*Roof*), em kW;
- Umidade relativa (*Relative Humidity*), em %
- Velocidade do vento (*Speed*), em m/s;
- Direção do vento (*Wind direction*), em º ;
- Troca de ar (*Total Fresh Air*), em ac/h.

Observando os gráficos, é possível perceber que:

T_{op}= 0.5 x (T_a + T_r), onde T_{op} é a temperatura operacional (verde, no gráfico)
T_a é temperatura do ar (azul)
T_r temperatura radiante (vermelho)

Nota-se também que as curvas de temperatura de bulbo seco são exatamente iguais para as três coberturas, pois é a temperatura referente ao ambiente externo, que é a mesma para os três modelos (mesma localização e, portanto, mesmas condições atmosféricas e climáticas).

Além disso, é possível observar que as quatro curvas de temperatura, de um modo geral, atingem os seus máximos no período entre as 10h e as 16h, sendo que é exatamente neste intervalo em que ocorrem as maiores taxas de absorção de calor e as menores umidades relativas, o que está completamente coerente.

Analisando o comportamento dos gráficos relativos à temperatura, para o *dia representativo de verão*, percebe-se que a curva de temperatura radiante tanto do shed reto quanto do curvo tem picos maiores, em aproximadamente 4ºC, do que o da curva para a condição atual. Isto se deve ao fato de que as duas propostas de sheds possuem aberturas para a saída de ar e, através destas aberturas incide uma maior radiação solar, dependendo da posição do sol durante o dia e da orientação do edifício. Nota-se nos gráficos que os picos de temperatura radiante destes dois casos ocorrem às 15h. A figura abaixo ilustra qual é a posição do sol às 15h do dia 22 de janeiro e sua incidência sobre a edificação com a cobertura do tipo shed curvo (igual para o shed reto):

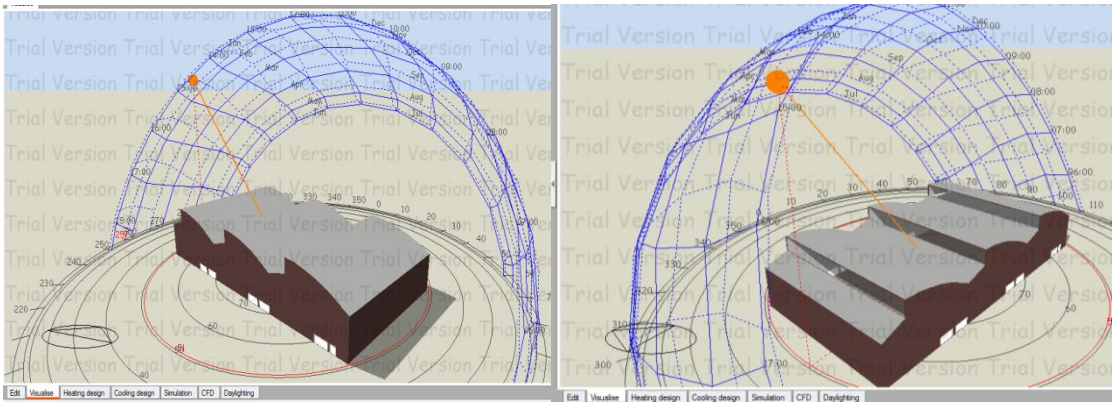


Figura 73: Posição do sol e incidência às 15h do dia 22/01, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Portanto, pode-se dizer então que os picos de temperatura radiante nos módulos com propostas de shed coincidem com os picos de iluminação natural da edificação, já que correspondem ao horário do dia em que se tem a maior área de incidência dos raios solares.

Analisando agora as curvas correspondentes à temperatura do ar no *dia representativo de verão*, nota-se que a condição atual apresenta um pico de 32ºC, enquanto o shed reto, um pico de 30º C, e o shed curvo, um pico de 28,5ºC. Conclui-se então que houve redução de temperatura por conta de uma melhor ventilação do ambiente. Basta comparar os resultados de ventilação nos gráficos respectivos ao período de verão e perceber que a troca de ar, que antes tinha pico de 0,74 ac/h (condição atual), passou a atingir máximos de aproximadamente 3,5 ac/h. Isto certamente foi essencial para as reduções de temperatura do ar. Portanto, podemos concluir, para o verão, que a proposta de shed curvo resulta numa diminuição de 3ºC na temperatura de pico do dia representativo, relacionada a um aumento de mais de 4 vezes nas trocas de ar do ambiente. A proposta de shed reto apresenta resultados ligeiramente inferiores.

Quanto aos resultados das simulações para o *dia representativo de inverno*, a diferença entre as temperaturas externa e interna é menor no caso da cobertura atual quando comparada a esta diferença no pico de temperatura no verão. Ou seja, para a cobertura atual, no período de máximas temperaturas no decorrer do dia representativo de inverno, a temperatura interna é maior do que a externa, mas essa diferença é menor do que a que ocorre no dia representativo de verão.
Além disso, as taxas de troca de ar não diferem em quase nada no inverno, já que o fenômeno da convecção térmica é reduzido, diminuindo a eficiência de uma cobertura do tipo shed.

Desse modo, podemos dizer que a tipologia de coberturas shed tem uma maior influência em períodos do ano em que o gradiente térmico entre o exterior e o interior da edificação é maior, pois assim ocorre uma maior movimentação das massas de ar por convecção e, portanto, será mais fácil a circulação do ar pelo efeito-chaminé.

7.4.5 Simulação em CFD

Anteriormente, foram apresentados os resultados das simulações computacionais realizadas no software DesignBuilder, por meio do plug-in com o Energy Plus. Estes resultados englobam as seguintes grandezas:

- Temperatura de bulbo seco, externa (Dry-bulb temperature), em ºC;
- Temperatura do ar (Air temperature), em ºC;
- Temperatura radiante (Radiant temperature), em ºC;
- Temperatura operativa (Operative temperature), em ºC;
- Ganho de calor (Heat gain), através de cobertura (Roof), em kW;
- Umidade relativa (Relative Humidity), em %
- Velocidade do vento (Speed), em m/s;
- Direção do vento (Wind direction), em º ;
- Troca de ar (Total Fresh Air), em ac/h.

Nesta seção, foi comprovada a eficiência da cobertura shed em termos de conforto térmico e ventilação da edificação, com um aumento das trocar de ar (ac/h) de 0,74 (configuração atual) para 3,72 (shed do tipo curvo) no horário comum de pico de temperatura, às 15 h, para o dia 22 de janeiro, definido como o dia representativo de verão.

A partir destes resultados, foram propostas novas simulações, ainda utilizando o DesignBuilder, mas realizando-as agora com um novo método de cálculo, que determina o comportamento dos fluidos dentro do ambiente analisado, o chamado CFD (Computacional Fluid Dynamics). O DesignBuilder tem sua plataforma integrada a este método.

Para um primeiro estudo do comportamento do shed proposto comparado à cobertura atual, foram feitas simulações em CFD modelando as duas configurações no DesignBuilder com o que o programa chama de *Holes*, que são aberturas que podem ser criadas nos elementos construtivos. A descrição das configurações iniciais apresentada a seguir se dá para os modelos criados com estas aberturas.

7.4.5.1 Definição das condições de contorno

O uso do CFD exige que sejam definidas condições de contorno para o método numérico ser iniciado e, como o DesignBuilder já proporciona o estudo pelo EnergyPlus, que fornece valores para todas estas grandezas descritas acima, foi possível importar os próprios resultados das simulações no Energy Plus como condições de entrada para as simulações em CFD. A seguir é apresentada a interface do programa no momento em que é acessada a janela para importação dos resultados.

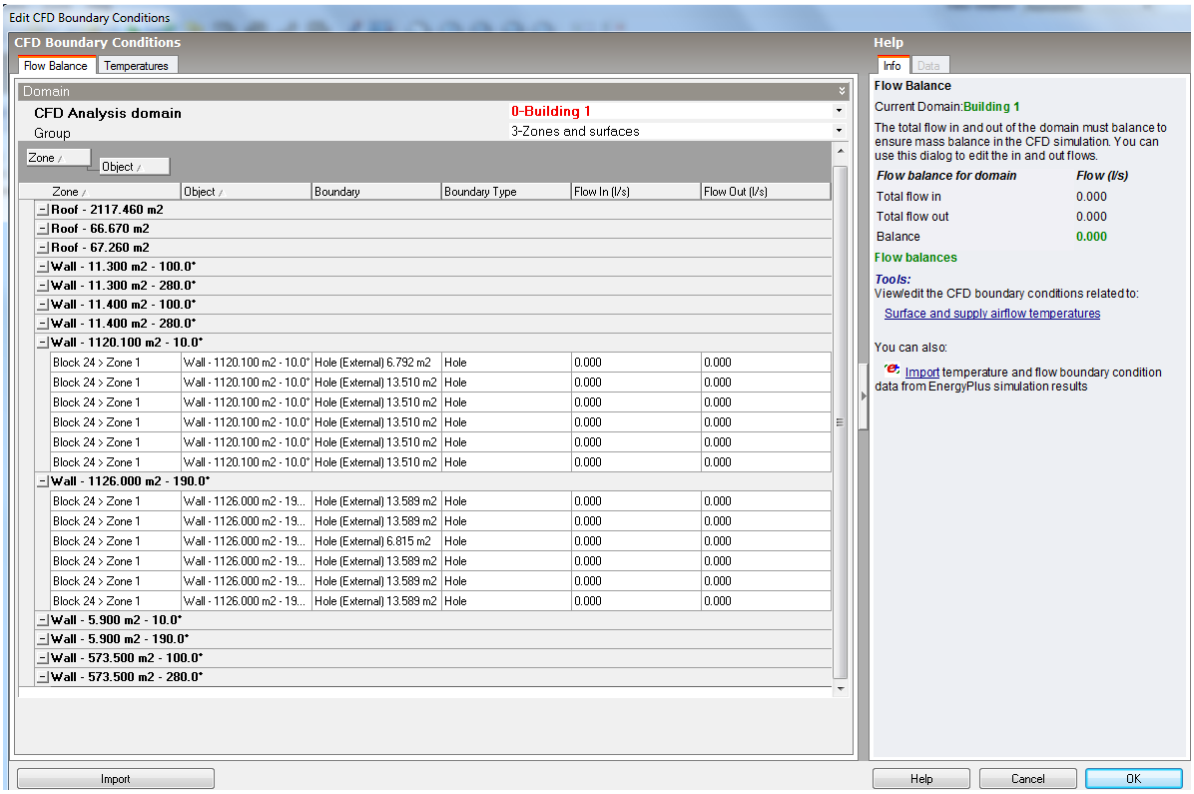


Figura 74: Interface do programa na importação de resultados para a situação atual, FONTE: Autoria do próprio grupo;

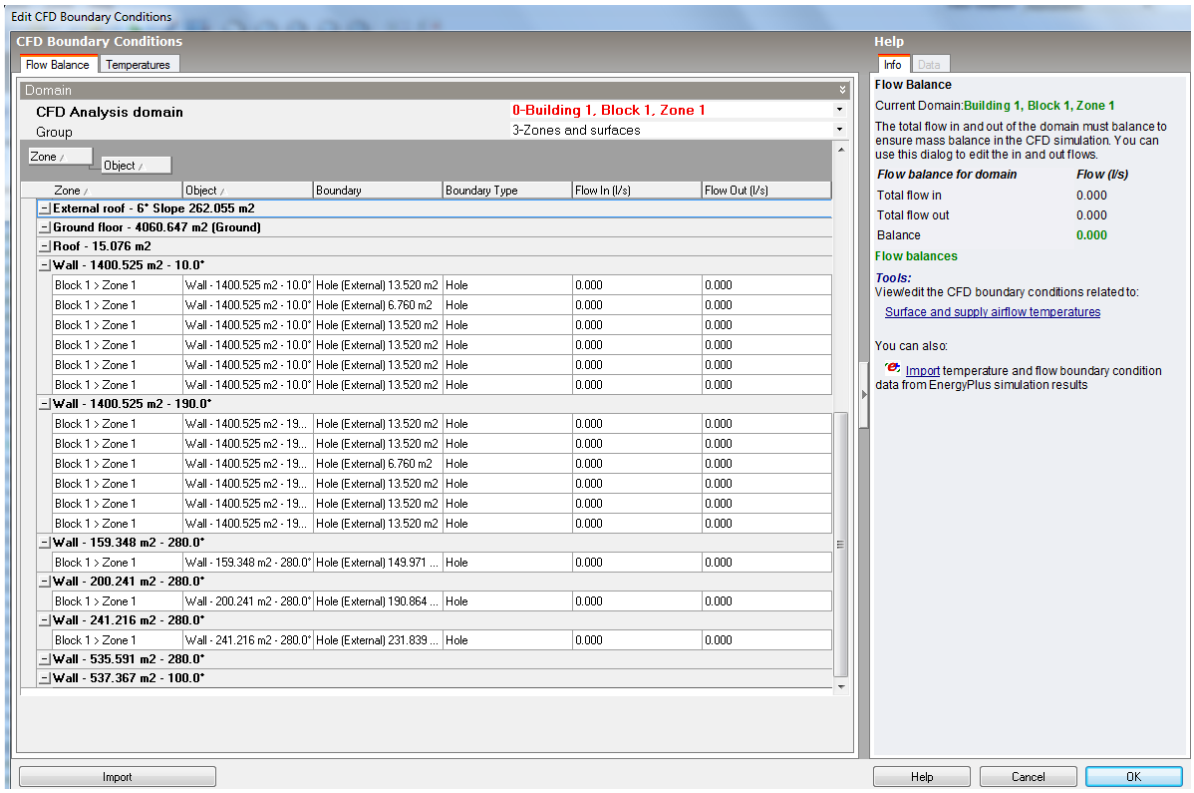


Figura 75: Interface do programa na importação de resultados para a configuração com Shed, FONTE: Autoria do próprio grupo;

A edificação possui 6 aberturas em cada uma das duas paredes laterais. Cada uma das paredes tem cinco portas de 13,5 m² (2,6 m x 5,2 m) e uma porta de 6,8 m² (2,6

m x 2,6 m). Na configuração com shed, existem, além das 12 portas, três aberturas superiores: uma de 150 m² (≈ 3,4 m x 45,5 m); uma de 190 m² (≈ 4,3 m x 45,5 m) e outra de 230 m² (≈ 5,2 m x 45,5 m). Os valores de área mostrados na figura acima são ligeiramente diferentes das áreas reais das aberturas, devido a uma dificuldade em criar estes elementos, com elevada precisão, na modelagem com este software. Mas para efeitos de simulação de conforto térmico e ventilação, certamente esta precisão na modelagem geométrica do edifício já é suficiente.

É possível observar nas figuras anteriores que o programa reconhece as aberturas (*Holes*) que foram alocados na modelagem 3D da edificação na configuração atual (cobertura "xadrez"), com seis portas em cada uma das paredes, e com o shed, que conta com mais três aberturas superiores.

Ao clicar em "Import" (Figura 76), deve-se escolher para qual dia e horário deseja-se fazer a simulação em CFD, sendo que o EnergyPlus deve ter resultados gerados para este mesmo dia e horário. Assim, foi estabelecido que os resultados para as 15h do dia 22 de janeiro eram os mais críticos, já que correspondem aos maiores valores de temperatura (do ar, radiante e operativa) e trocas de ar, tanto para a configuração atual de cobertura quanto para a proposta de shed que vem sendo analisada.

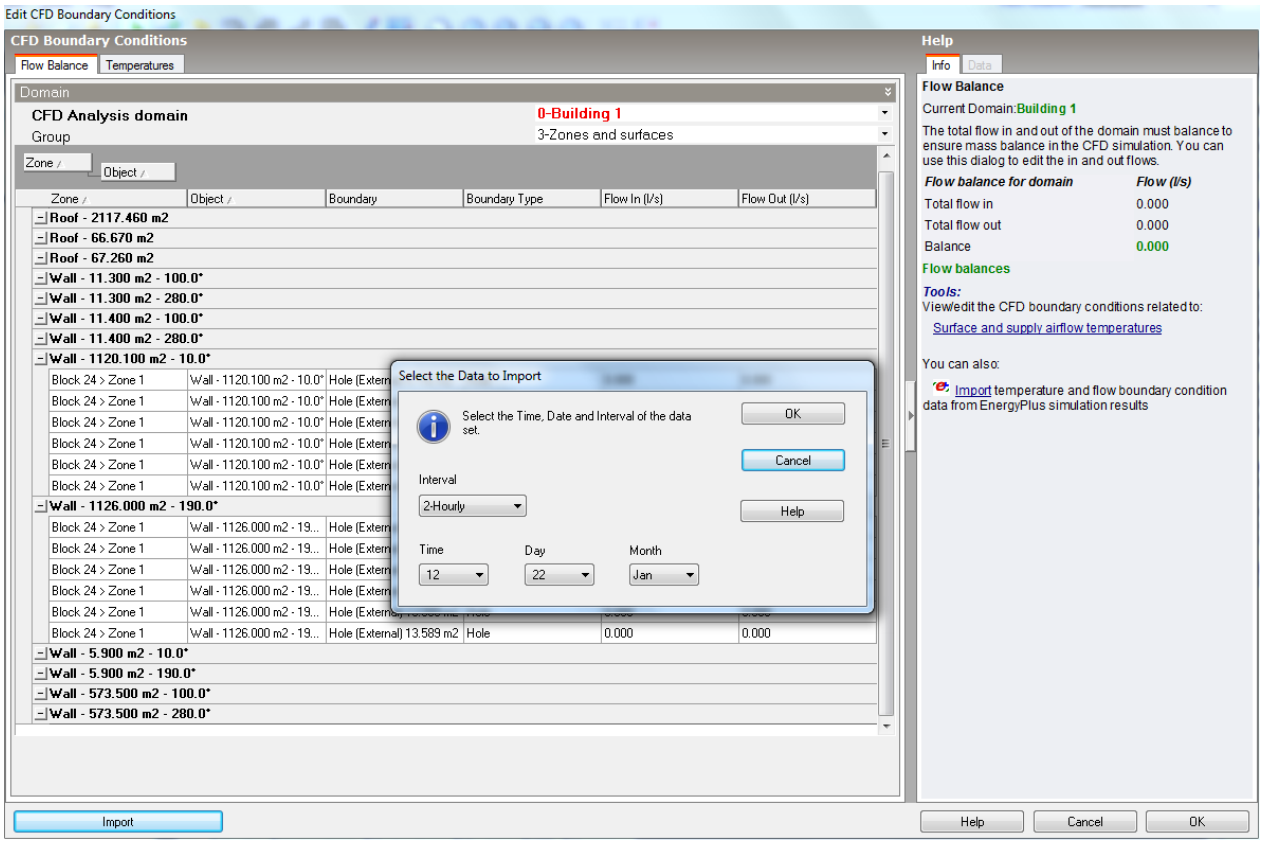


Figura 76: Importação de resultados - definição do dia e horário, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Ao importar estes resultados, o programa não garante perfeitamente o atendimento ao princípio básico da mecânica dos fluidos, o Princípio da Conservação de Massa, que define que o fluxo de entrada deve ser igual ao fluxo de saída. Assim, foi

necessário um pequeno ajuste dos valores, de modo a ocorrer o balanceamento dos fluxos de entrada e saída. A correção foi feita proporcionalmente aos valores iniciais. Na Figura 77 são mostrados os fluxos para a configuração atual, onde ocorreu inicialmente um desbalanceamento de 404,75 L/s (está entrando mais do que está saindo). Assim, decidiu-se aumentar o fluxo de saída deste mesmo valor, distribuindo parcelas, proporcionais aos valores iniciais de fluxo de saída para cada abertura em relação ao fluxo total de saída, igual a 10064,43 L/s, que totalizam 404,75 L/s. Por exemplo, para o fluxo da primeira abertura da parede 1, de 865,79 L/s, foi adicionada uma parcela igual a (865,79 / 10064,43) x 404,75 = 34,82, resultando num fluxo corrigido para esta abertura de 865,79 + 34,82 = 900,61 L/s.

Foi feito isso para todas as aberturas, para os dois modelos, sendo os resultados mostrados nas figuras abaixo.

	Fluxo entrada (L/s)	Fluxo saída (L/s)
Parede 1	58,941	865,787
	117,334	1723,511
	117,334	1723,511
	117,334	1723,511
	117,334	1723,511
	117,334	1723,511
Parede 2	1785,745	105,631
	1785,745	105,631
	894,840	52,932
	1785,745	105,631
	1785,745	105,631
	1785,745	105,631
TOTAL	**10469,175**	**10064,430**
DESBALANCEAMENTO	**404,745**	

⇨

Fluxo entrada (L/s)	Fluxo saída (L/s)
58,941	900,605
117,334	1792,823
117,334	1792,823
117,334	1792,823
117,334	1792,823
117,334	1792,823
1785,745	109,879
1785,745	109,879
894,840	55,061
1785,745	109,879
1785,745	109,879
1785,745	109,879
10469,175	**10469,175**
0,000	

Figura 77: Correção do balanceamento de fluxos de ar para a configuração ATUAL, FONTE: Autoria do próprio grupo;

	Fluxo entrada (L/s)	Fluxo saída (L/s)
Parede 1	5200,586	0,000
	2598,291	0,000
	5200,586	0,000
	5200,586	0,000
	5200,586	0,000
	5200,586	0,000
Parede 2	6720,273	0,000
	6720,273	0,000
	3357,550	0,000
	6720,273	0,000
	6720,273	0,000
	6720,273	0,000
Shed 1	0,000	12045,926
Shed 2	0,000	21636,174
Shed 3	0,000	32002,180
TOTAL	**65560,139**	**65684,281**
DESBALANCEAMENTO	**124,142**	

⇨

Fluxo entrada (L/s)	Fluxo saída (L/s)
5210,434	0,000
2603,211	0,000
5210,434	0,000
5210,434	0,000
5210,434	0,000
5210,434	0,000
6732,999	0,000
6732,999	0,000
3363,908	0,000
6732,999	0,000
6732,999	0,000
6732,999	0,000
0,000	12045,926
0,000	21636,174
0,000	32002,180
65684,281	**65684,281**
0,000	

OBS.: Shed 1, Shed 2 e Shed 3 são as 3 aberturas superiores, na cobertura shed, de 150 m², 190 m² e 230 m², respectivamente.

Figura 78: Correção do balanceamento de fluxos ar para o modelo com SHED, FONTE: Autoria do próprio grupo;

A seguir são mostrados os valores de fluxos de entrada e saída, balanceados no programa, para estas duas configurações (dia representativo de verão – 22 de janeiro, às 15h):

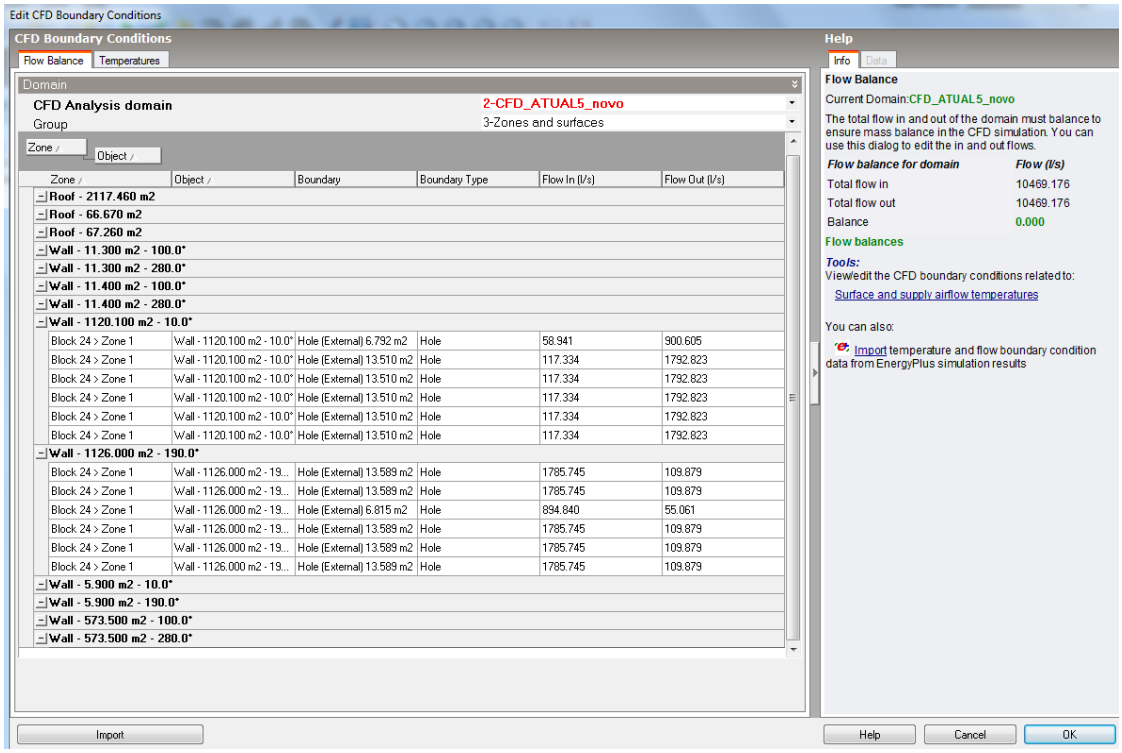


Figura 79: Fluxos de entrada e saída de ar, balanceados, para a configuração ATUAL, FONTE: Autoria do próprio grupo;

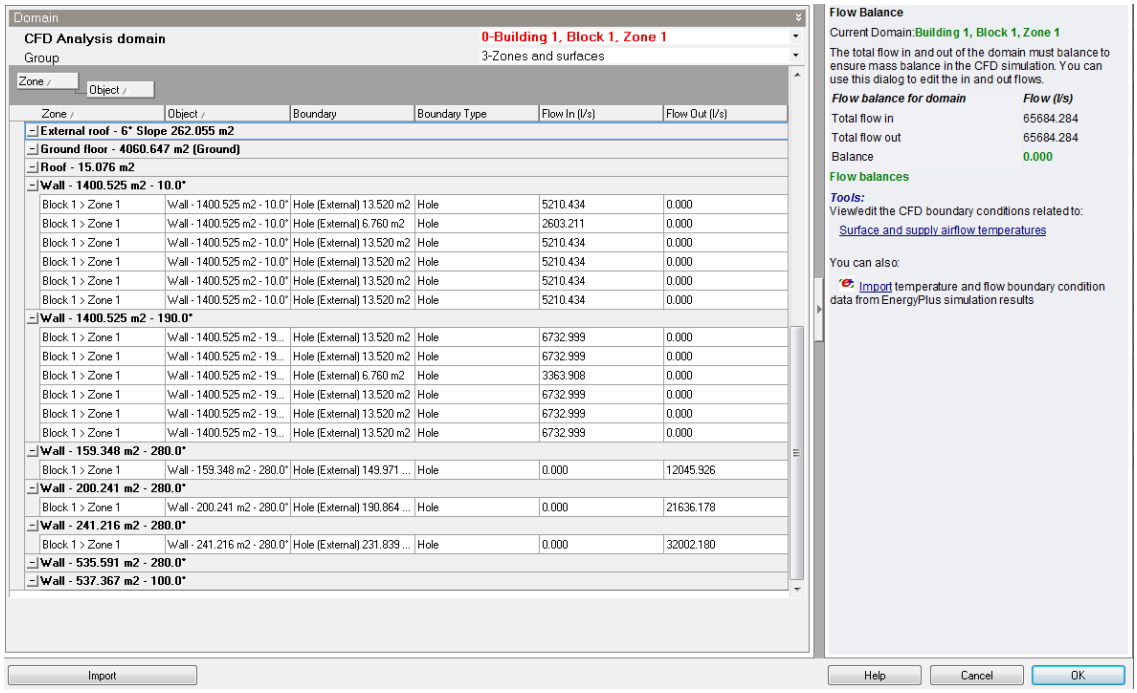


Figura 80: Fluxos de entrada e saída de ar, balanceados, para a proposta de SHED, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Analisando as figuras anteriormente apresentadas, é possível compreender quantitativamente como se estabelecem os fluxos de entrada e saída de ar, de forma a garantir as trocas de ar previstas pela simulação no Energy Plus.

No caso da cobertura atual, o Energy Plus resultou, para as 15h do dia representativo de verão, 0,74 ac/h (*air changes per hour*), sendo que o volume

interno da edificação nesta configuração é de aproximadamente 90 m (comprimento) x 45 m (largura) x 12 m (altura) ≈ 50000 m³. Assim, 0,74 ac/h nos fornece uma estimativa de fluxo de Q = 50000 m³ x 0,74 ac/h ≈ 37000 m³/h ≈ 10,4 m³/s = 10400 L/s. Este fluxo foi aproximadamente o valor que o programa calculou como sendo uma das condições de contorno, sendo que o fluxo de entrada deve ser igual ao fluxo de saída, respeitando o Princípio da Conservação da Massa.

Da mesma maneira, isto pôde ser verificado para o modelo com o shed, cujo resultado de trocas de ar provenientes do Energy Plus, para o mesmo dia e horário descritos, foi de 3,72 ac/h. Como o volume interno da edificação é de aproximadamente 50000 + Volume (SHED) ≈ 63000 m³, obtém-se um fluxo de Q = 63000 m³ x 3,72 ac/h ≈ 235000 m³/h ≈ 65,3 m³/s = 65300 L/s, que é aproximadamente igual fluxo definido pelo programa como condição de contorno, pelo mesmo princípio.

É importante fazer algumas observações sobre os valores de fluxos de ar apresentados anteriormente:

- ATUAL: note que em cada uma das aberturas, correspondentes às portas dos módulos, ocorre tanto fluxo de entrada quanto de saída de ar, com a diferença de que, nas aberturas de um dos lados (parede 1), o fluxo de saída é maior do que o de entrada, enquanto na outra (parede 2) ocorre o contrário, sendo o fluxo de entrada maior do que o de saída. A justificativa para tal fato é que a parede 2 é exatamente a que está a barlavento, ou seja, onde estão incidindo os ventos no dia e horário analisados, vindos de sudeste (ventos SE), o que condiz exatamente com o esperado na figura abaixo

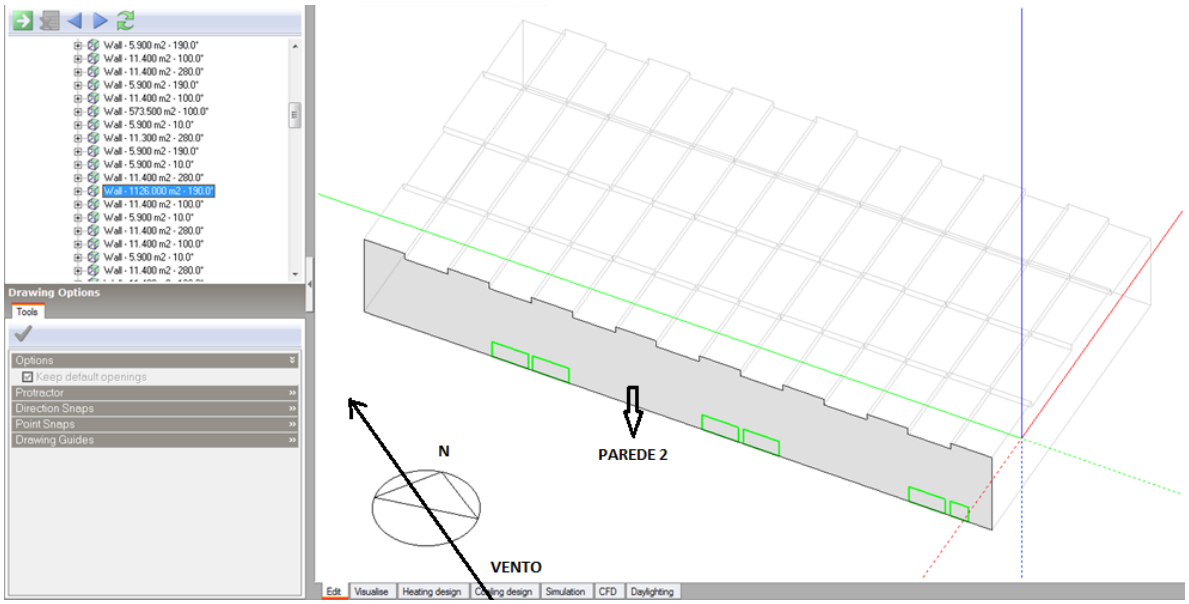


Figura 81: Incidência de ventos na fachada dos módulos, para o dia e horário analisados, FONTE: Autoria do próprio grupo;

- SHED: diferentemente da configuração com a cobertura atual, espera-se que com o shed, ocorra uma ventilação de baixo para cima na edificação, com o ar entrando pelas aberturas das portas e saindo pelas aberturas superiores, na cobertura. E é exatamente isso que pode ser observado ao se analisar os valores dos fluxos na

Figura 78 ou na Figura 80. É possível concluir que o programa interpreta perfeitamente a função da cobertura com as aberturas a serem implantadas, além da posição do edíficio em relação ao vento no dia e horário e considerado. Note que não ocorrem fluxos de saída nas portas (aberturas inferiores), havendo somente entrada de ar, que sai apenas pelas aberturas da cobertura shed, não havendo ali entrada de ar. Além disso, os valores de fluxo de entrada são maiores nas portas da parede 2, a barlavento, pelo mesmo motivo descrito no tópico anterior.

Além da importação dos resultados referentes às trocas de ar, também são trazidas do Energy Plus as informações sobre temperaturas dos elementos que compõem a edificação (*walls, holes, roofs*, etc) para depois ser feito o cálculo iterativo. É a partir destas informações que o programa resolverá as equações para determinar a temperatura em cada elemento finito. A seguir é mostrado o reconhecimento dos elementos construtivos pelo programa e suas respectivas temperaturas, para a configuração atual (Figura 82 e Figura 83):

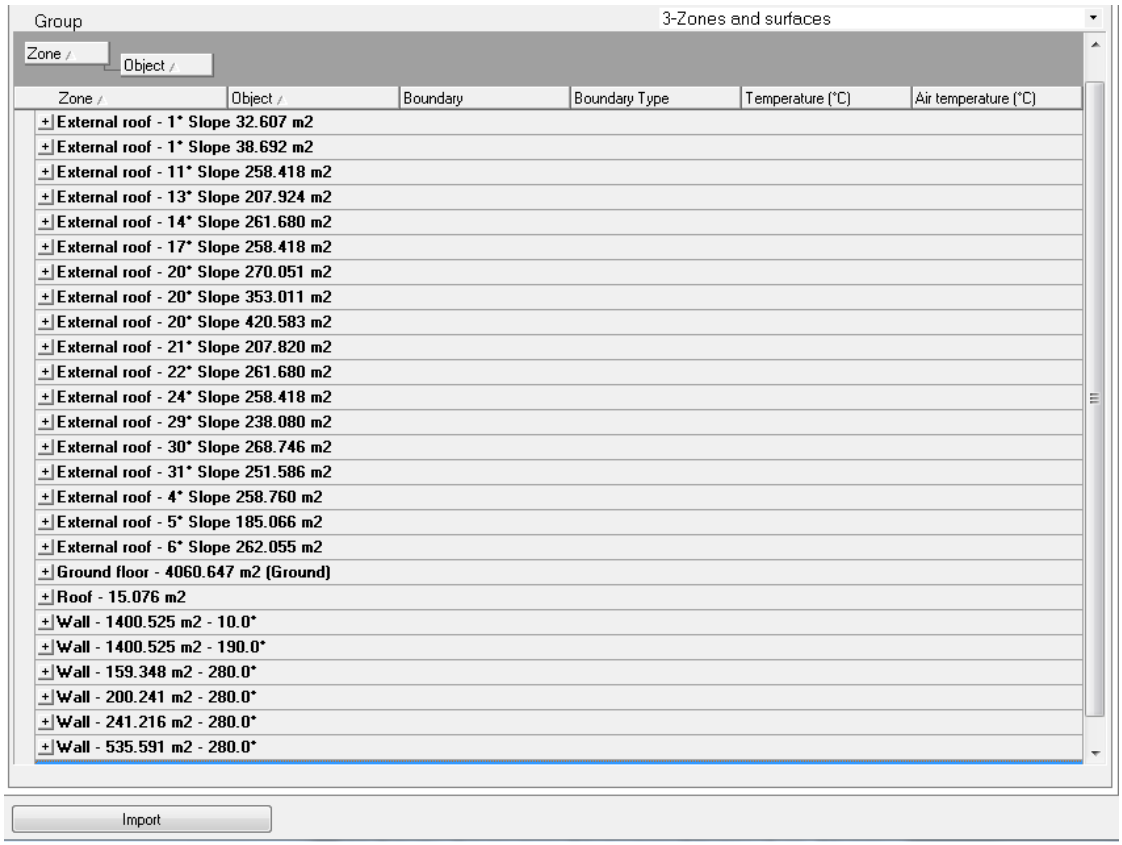


Figura 82: Importação dos valores de temperaturas dos elementos de contorno, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Group 3-Zones and surfaces

Zone / Object /

Zone /	Object /	Boundary	Boundary Type	Temperature (°C)	Air temperature (°C)
Wall - 1400.525 m2 - 10.0°					
Block 1 > Zone 1	Wall - 1400.525 m2 - 10.0°	Hole (External) 13.520 m2	Hole	27.64	27.00
Block 1 > Zone 1	Wall - 1400.525 m2 - 10.0°	Wall - 1400.525 m2 - 10....	Surface	32.40	
Block 1 > Zone 1	Wall - 1400.525 m2 - 10.0°	Hole (External) 6.760 m2	Hole	27.64	27.00
Block 1 > Zone 1	Wall - 1400.525 m2 - 10.0°	Hole (External) 13.520 m2	Hole	27.64	27.00
Block 1 > Zone 1	Wall - 1400.525 m2 - 10.0°	Hole (External) 13.520 m2	Hole	27.64	27.00
Block 1 > Zone 1	Wall - 1400.525 m2 - 10.0°	Hole (External) 13.520 m2	Hole	27.64	27.00
Block 1 > Zone 1	Wall - 1400.525 m2 - 10.0°	Hole (External) 13.520 m2	Hole	27.64	27.00
Wall - 1400.525 m2 - 190.0°					
Block 1 > Zone 1	Wall - 1400.525 m2 - 19...	Hole (External) 13.520 m2	Hole	27.81	27.00
Block 1 > Zone 1	Wall - 1400.525 m2 - 19...	Wall - 1400.525 m2 - 19...	Surface	32.37	
Block 1 > Zone 1	Wall - 1400.525 m2 - 19...	Hole (External) 13.520 m2	Hole	27.81	27.00
Block 1 > Zone 1	Wall - 1400.525 m2 - 19...	Hole (External) 6.760 m2	Hole	27.81	27.00
Block 1 > Zone 1	Wall - 1400.525 m2 - 19...	Hole (External) 13.520 m2	Hole	27.81	27.00
Block 1 > Zone 1	Wall - 1400.525 m2 - 19...	Hole (External) 13.520 m2	Hole	27.81	27.00
Block 1 > Zone 1	Wall - 1400.525 m2 - 19...	Hole (External) 13.520 m2	Hole	27.81	27.00
Wall - 159.348 m2 - 280.0°					
Block 1 > Zone 1	Wall - 159.348 m2 - 280.0°	Wall - 159.348 m2 - 280....	Surface	31.96	
Block 1 > Zone 1	Wall - 159.348 m2 - 280.0°	Hole (External) 149.971 ...	Hole	27.84	27.00
Wall - 200.241 m2 - 280.0°					
Block 1 > Zone 1	Wall - 200.241 m2 - 280.0°	Hole (External) 190.864 ...	Hole	27.82	27.00
Block 1 > Zone 1	Wall - 200.241 m2 - 280.0°	Wall - 200.241 m2 - 280....	Surface	31.96	
Wall - 241.216 m2 - 280.0°					
Block 1 > Zone 1	Wall - 241.216 m2 - 280.0°	Wall - 241.216 m2 - 280....	Surface	31.95	
Block 1 > Zone 1	Wall - 241.216 m2 - 280.0°	Hole (External) 231.839 ...	Hole	27.81	27.00

Import

Figura 83: Importação dos valores de temperatura dos elementos de contorno, FONTE: Autoria do próprio grupo;

7.4.6 Resultados e análises das simulações em CFD

Após serem feitas as configurações iniciais para a simulação, referentes à definição das condições de contorno, parte-se para o início do procedimento numérico, sendo necessário também definir quais são as dimensões dos elementos da malha, ou seja, o programa pede para que sejam definidos em quantos elementos será feita a discretização. Escolheu-se então elementos de 0,5 m, para as três dimensões, e prosseguiu-se com o processamento do computador.

A seguir são apresentados em 3D os resultados da simulação em CFD, para estas configurações apresentadas anteriormente. Estes resultados permitem uma melhor visualização de como se dá a distribuição de temperaturas e deslocamento das massas de ar no ambiente interno à edificação.

Estes resultados certamente devem ser coerentes com a definição das condições de contorno, resumidas a seguir, referentes à ventilação interna:

Dia típico de verão (22 de janeiro) às 15h

ATUAL

	Parede a barlavento						
	Porta 1 (6,8m²)	Porta 2 (13,5m²)	Porta 3 (13,5m²)	Porta 4 (13,5m²)	Porta 5 (13,5m²)	Porta 6 (13,5m²)	TOTAL (L/s)
Fluxo de entrada (L/s)	894,84	1785,745	1785,745	1785,745	1785,745	1785,745	9823,565
Fluxo de saída (L/s)	55,061	109,879	109,879	109,879	109,879	109,879	604,456

	Parede a sotavento						
	Porta 1 (6,8m²)	Porta 2 (13,5m²)	Porta 3 (13,5m²)	Porta 4 (13,5m²)	Porta 5 (13,5m²)	Porta 6 (13,5m²)	TOTAL (L/s)
Fluxo de entrada (L/s)	58,941	117,334	117,334	117,334	117,334	117,334	645,611
Fluxo de saída (L/s)	900,605	1792,823	1792,823	1792,823	1792,823	1792,823	9864,72

SHED

	Parede a barlavento						
	Porta 1 (6,8m²)	Porta 2 (13,5m²)	Porta 3 (13,5m²)	Porta 4 (13,5m²)	Porta 5 (13,5m²)	Porta 6 (13,5m²)	TOTAL (L/s)
Fluxo de entrada (L/s)	3363,908	6732,999	6732,999	6732,999	6732,999	6732,999	37028,903
Fluxo de saída (L/s)	0	0	0	0	0	0	0

	Parede a sotavento						
	Porta 1 (6,8m²)	Porta 2 (13,5m²)	Porta 3 (13,5m²)	Porta 4 (13,5m²)	Porta 5 (13,5m²)	Porta 6 (13,5m²)	TOTAL (L/s)
Fluxo de entrada (L/s)	2603,211	5210,434	5210,434	5210,434	5210,434	5210,434	28655,381
Fluxo de saída (L/s)	0	0	0	0	0	0	0

	Saídas superiores (SHED)			
	Shed 1 (150m²)	Shed 2 (190m²)	Shed 3 (230m²)	TOTAL (L/s)
Fluxo de entrada (L/s)	0	0	0	0
Fluxo de saída (L/s)	12045,926	21636,174	32002,180	65684,280

Ou ainda mais resumidamente:

Dia típico de verão (22 de janeiro) às 15h

ATUAL

	Parede a barlavento	Parede a sotavento
Fluxo de entrada (L/s)	9823,565	645,611
Fluxo de saída (L/s)	604,456	9864,72

SHED

	Parede a barlavento	Parede a sotavento	Saídas superiores
Fluxo de entrada (L/s)	37028,9	28655,38	NÃO TEM
Fluxo de saída (L/s)	NÃO TEM	NÃO TEM	65684,28

7.4.6.1 Modelo com cobertura ATUAL

Após a convergência do método computacional, o programa permite que o usuário escolha a posição e direção dos planos gráficos. A Figura 84 mostra que o modelo geométrico é apresentado apenas com linhas de contorno antes da definição desses planos.

Figura 84: Modelo 3D da configuração atual antes da definição de planos gráficos, FONTE: Autoria do próprio grupo;

- ***ATUAL - Ventilação***

Os resultados gráficos de ventilação da simulação em CFD para os módulos com a cobertura atual foram bastante coerentes com o que era esperado. Existem fluxos de entrada e de saída de ar em todas as aberturas, mas é nas aberturas da parede 2 (a barlavento) que ocorrem os maiores fluxos de entrada, justamente por conta do favorecimento da sua posição em relação à incidência do vento representativo, fazendo com que os fluxos de saída sejam maiores na parte posterior do edifício, na parede 1 (a sotavento), cujos resultados gráficos em CFD são mostrados nas figuras a seguir:

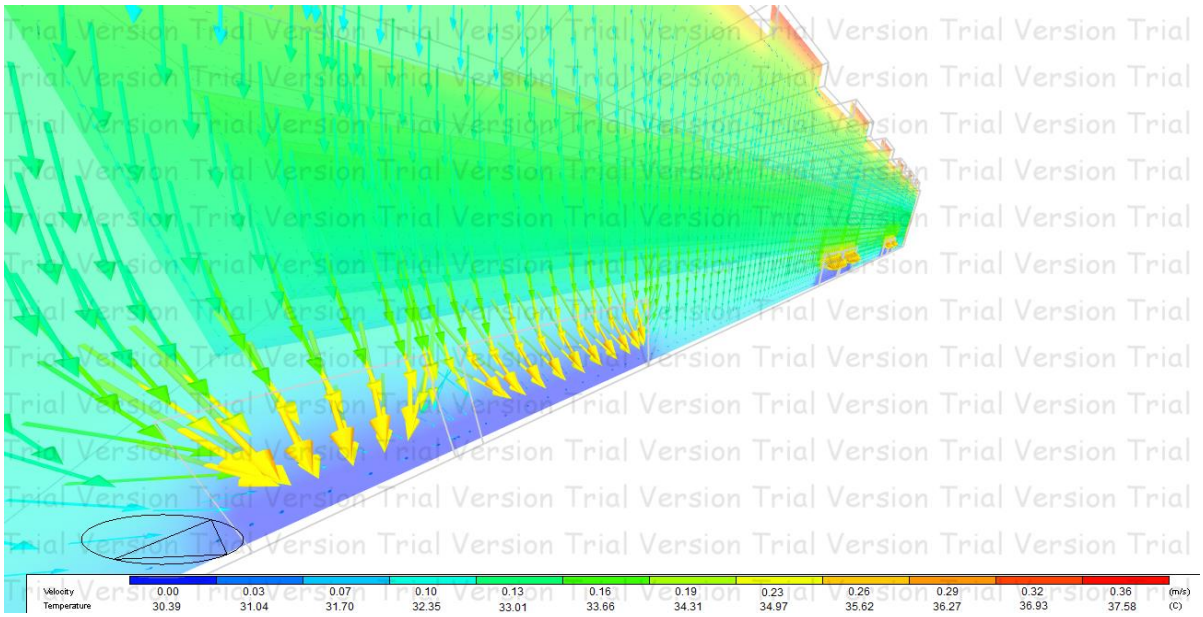


Figura 85: Gráfico CFD com foco na fachada norte (parede 1 - sotavento), FONTE: Autoria do próprio grupo;

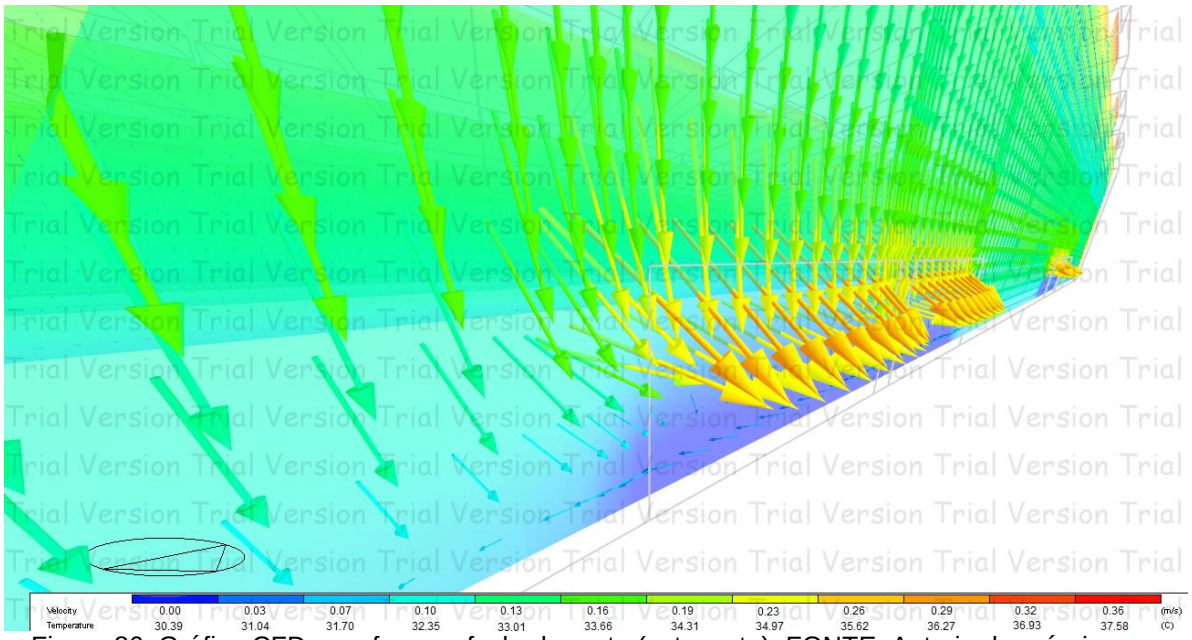


Figura 86: Gráfico CFD com foco na fachada norte (sotavento), FONTE: Autoria do próprio grupo;

Os gráficos acima mostram de forma mais clara como se comportam a ventilação e a temperatura no entorno da parede 1, ou fachada norte (possível notar pela orientação do norte). Como visto nas figuras acima, os maiores fluxos são os de saída, representados por vetores amarelos que, pela escala gráfica, correspondem a uma intensidade de aproximadamente 0,23 m/s, ocupando uma área um pouco maior do que a metade da área de cada porta. Já os fluxos de entrada, representados por vetores azuis, tem uma velocidade de aproximadamente 0,02 m/s, e ocupam o resto desta mesma área. Fazendo-se alguns cálculos para uma das portas de 2,6 m x 5,2 m, para comprovar a consistência destes resultado, obtém-se um fluxo de saída e de entrada nesta porta de:

Q_S = 0,23 m/s x % Área da abertura (m²) = 0,23 m/s x 58% de 13,5 m²
= 0,23 x 0,58 x 13,5 = 1,80 m³/s
= 1800 L/s ≈ 1792,82 L/s → OK!

Q_E = 0,02 m/s x % Área da abertura (m²) = 0,02 m/s x 42% de 13,5 m²
= 0,02 x 0,42 x 13,5 = 0,113 m³/s
= 113 L/s ≈ 117,33 L/s → OK!

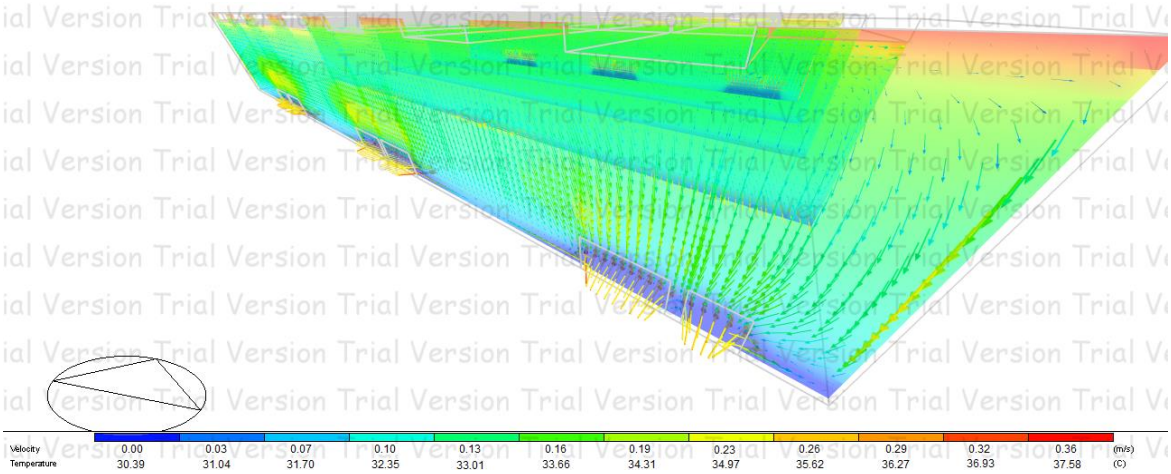


Figura 87: Gráfico CFD com foco na parede sul (parede 2 - barlavento), FONTE: Autoria do próprio grupo;

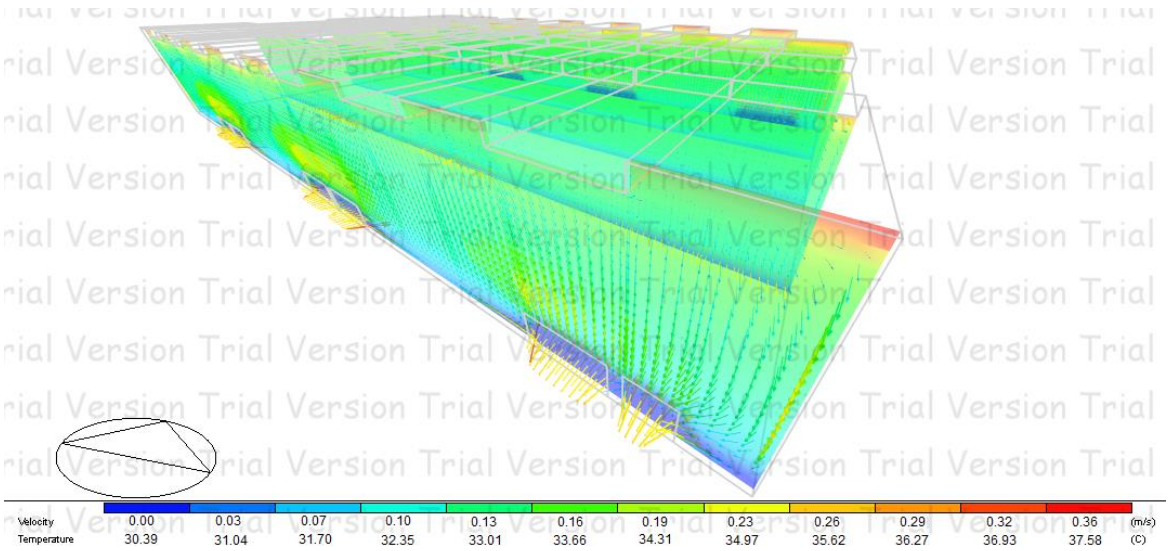


Figura 88: Gráfico CFD com foco na parede sul (barlavento), FONTE: Autoria do próprio grupo;

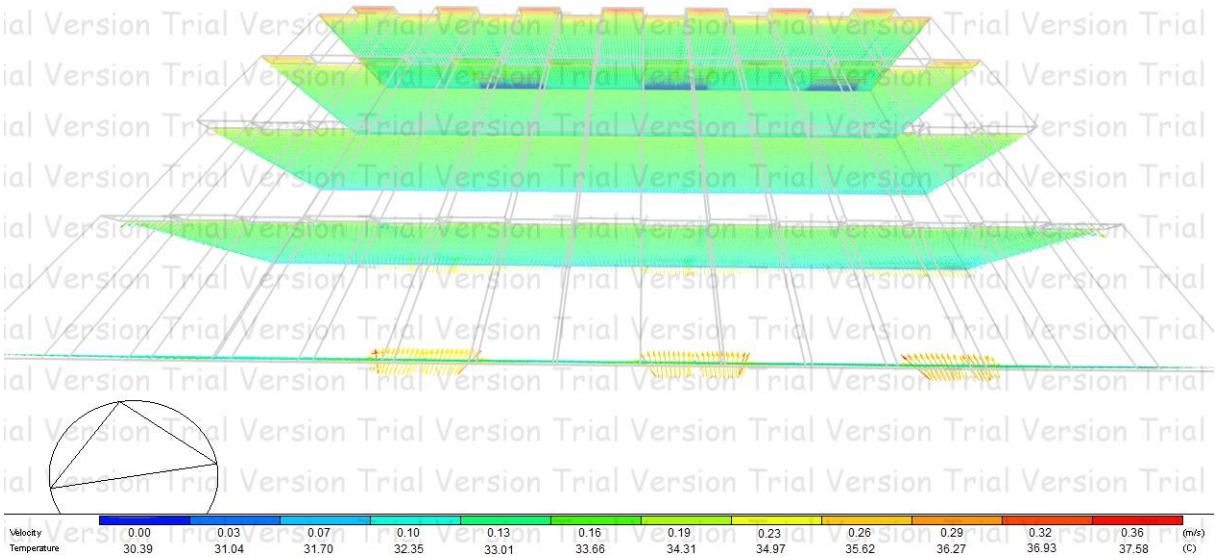


Figura 89: Vista de cima, com foco na parede sul (barlavento), FONTE: Autoria do próprio grupo;

Na parede 2, ou fachada sul (a barlavento), ocorre o oposto. Os gráficos acima mostram de forma mais clara como se comportam a ventilação e a temperatura no entorno desta parede, que é onde ocorrem os maiores fluxos de entrada. Observa-se, pela escala gráfica, que as velocidades dos fluxos de também estão corretas fazendo uma demonstração semelhante à que foi feita anteriormente.

A **Figura 90** mostra como ocorre o fluxo nos 2 sentidos por uma das portas da fachada norte:

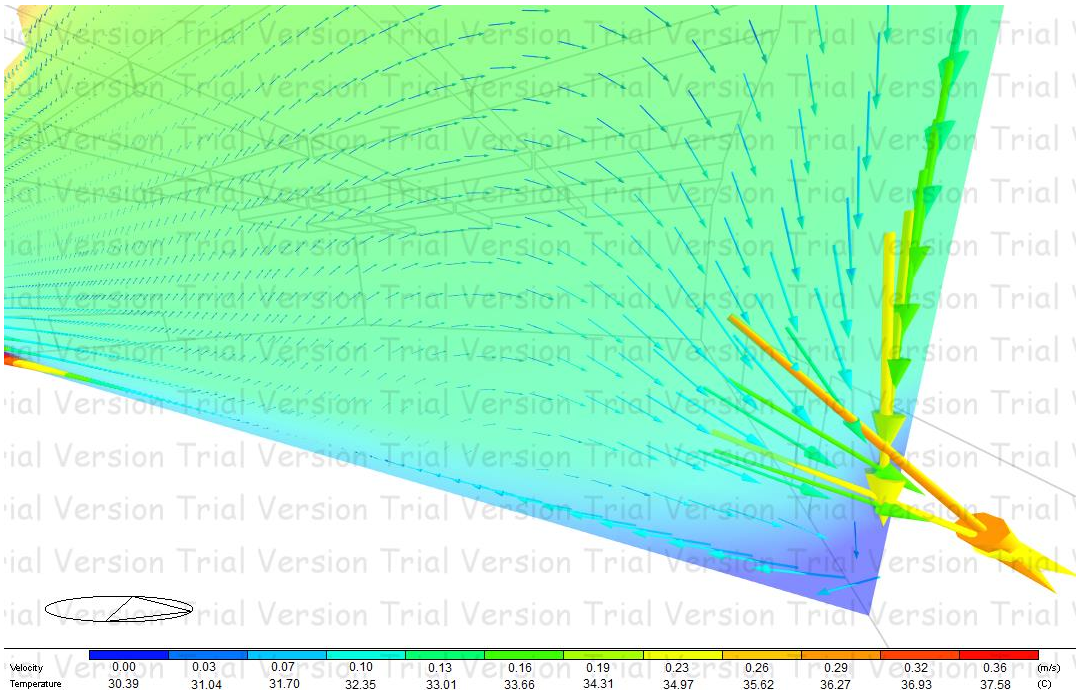


Figura 90: Fluxos de entrada e saída bem caracterizados, em uma das aberturas da fachada norte, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Note que a entrada de ar ocorre pela região inferior da abertura, pois o ar externo está mais fresco (e, portanto, menos denso) que o ar que sai do prédio. Na **Figura 91** são combinados 2 planos de gráficos, sendo um ortogonal à abertura da figura anterior e o outro o plano que contém a mesma, onde é possível ver os vetores azuis, com velocidades menores, entrando por baixo dos amarelos.

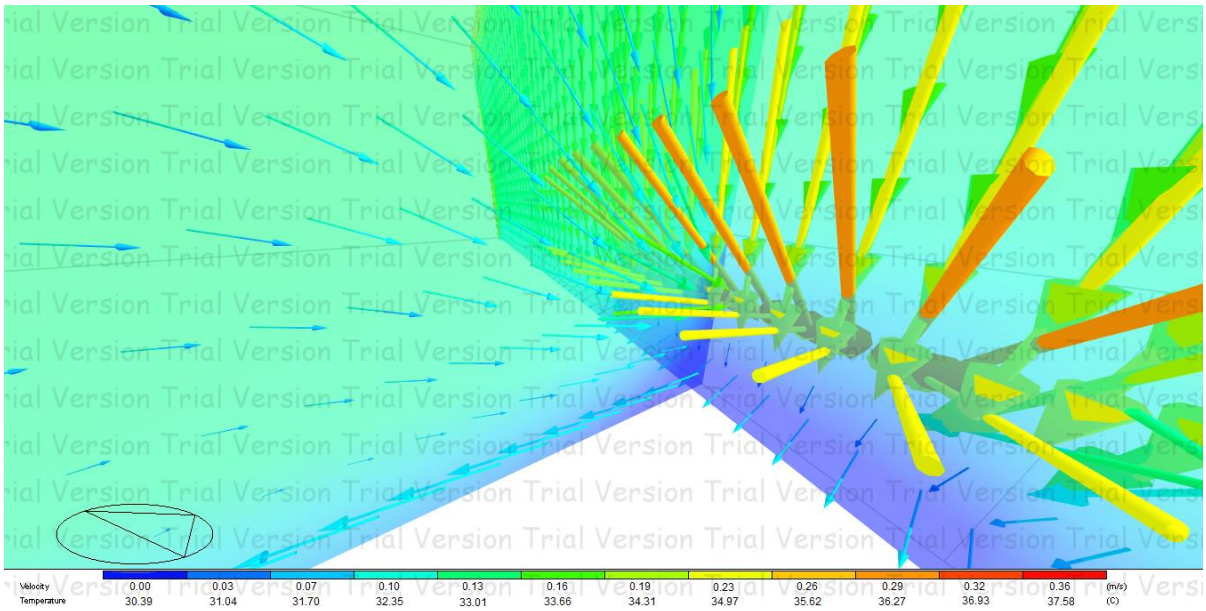


Figura 91: Fluxos de entrada e saída em uma das portas da fachada norte, FONTE: Autoria do próprio grupo;

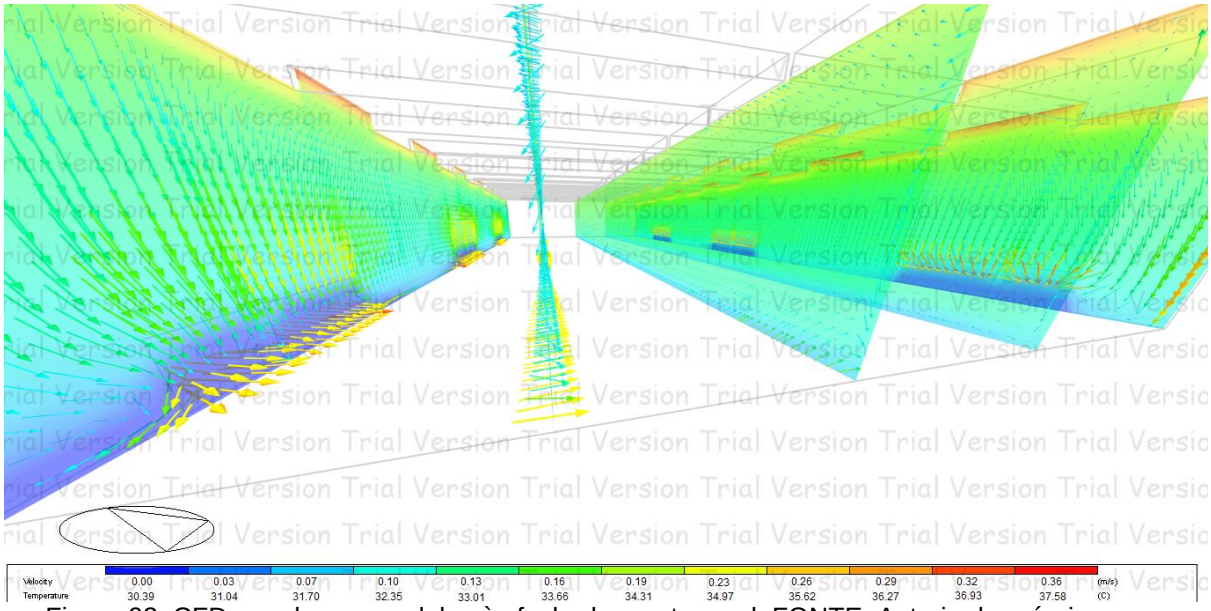


Figura 92: CFD em planos paralelos às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;

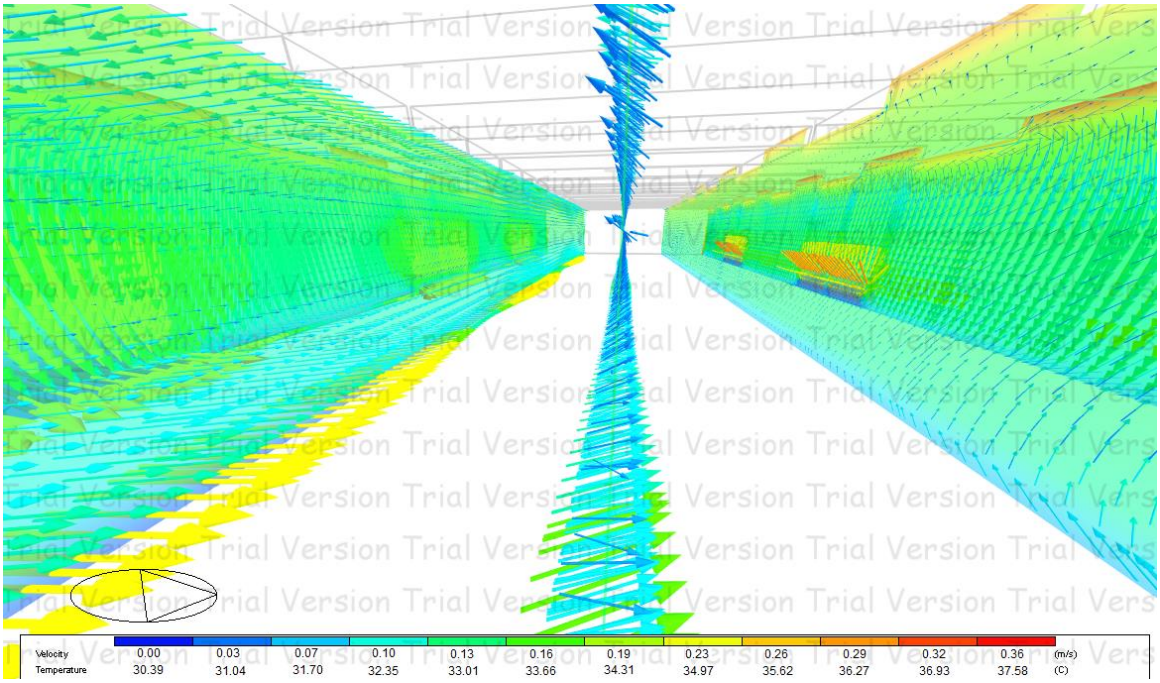


Figura 93: CFD em planos paralelos às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Analisando planos gráficos da simulação paralelos às fachadas norte e sul (**Figura 92** e **Figura 93**), observa-se que a movimentação das massas de ar ocorre basicamente de sul para norte, por baixo, e de norte para sul por cima, de forma a existir uma circulação de ar de um lado para o outro, até que o ar saia por uma das aberturas. Nesse ponto, o shed leva vantagem, pois possibilita uma melhor circulação em todo o volume interno da edificação. Isto será verificado no item onde são apresentados os resultados para o shed.

Criando agora planos ortogonais às fachadas norte e sul, torna-se mais fácil de visualizar esta circulação das massas, que se dá basicamente nesta direção contida no plano, como é visto na **Figura 94**. Foi necessário aumentar o tamanho dos vetores para facilitar a visualização nestes planos, já que as velocidades são muito baixas na região central no edifício. Isso acabou distorcendo os vetores próximos às portas.

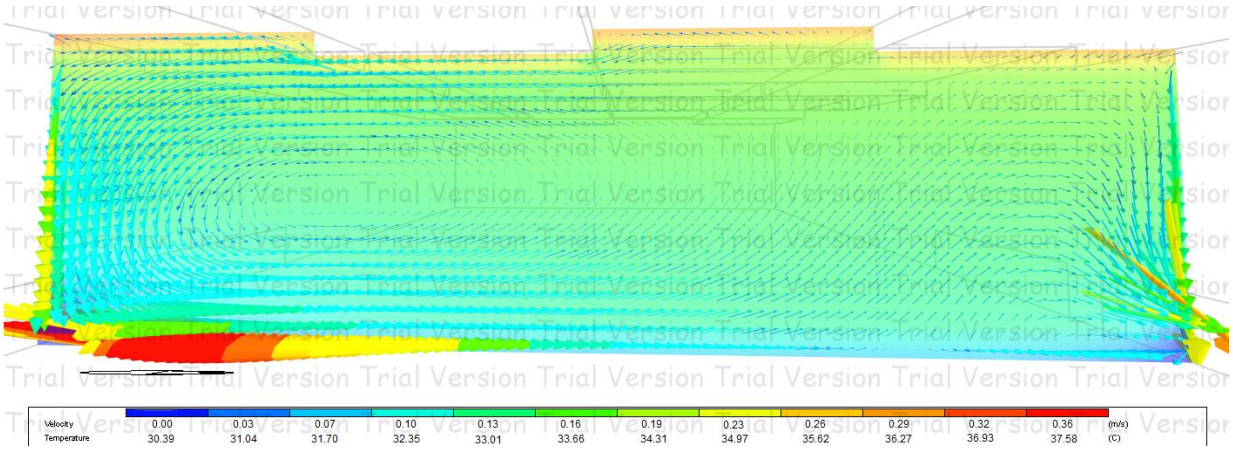


Figura 94: Plano CFD ortogonal às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;

- ***ATUAL - Temperaturas***

Os gráficos de temperatura já foram apresentados nas figuras anteriores, referentes à ventilação, mas para conseguirmos visualizar melhor o comportamento desta grandeza, são mostrados separadamente logo abaixo, com planos parelelos e ortogonais às fachadas norte e sul.

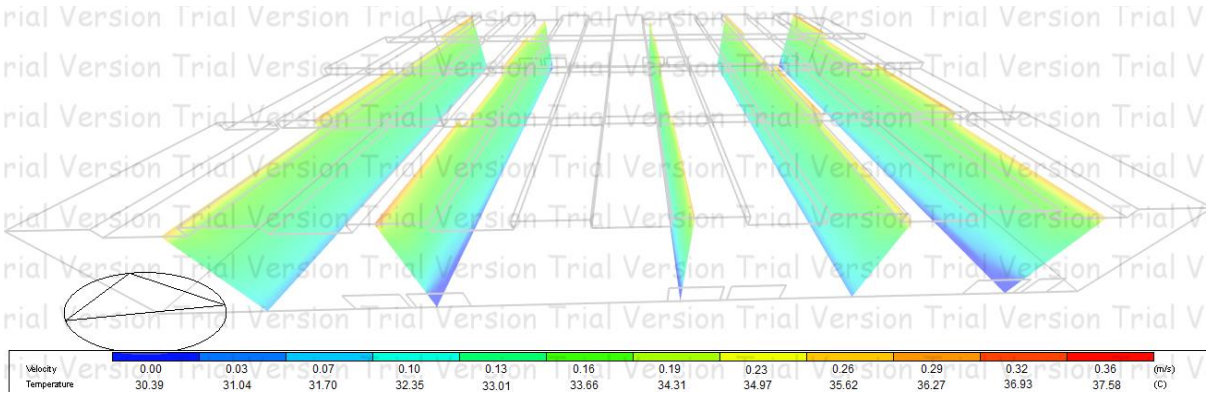


Figura 95: Planos CFD de temperaturas ortogonais às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;

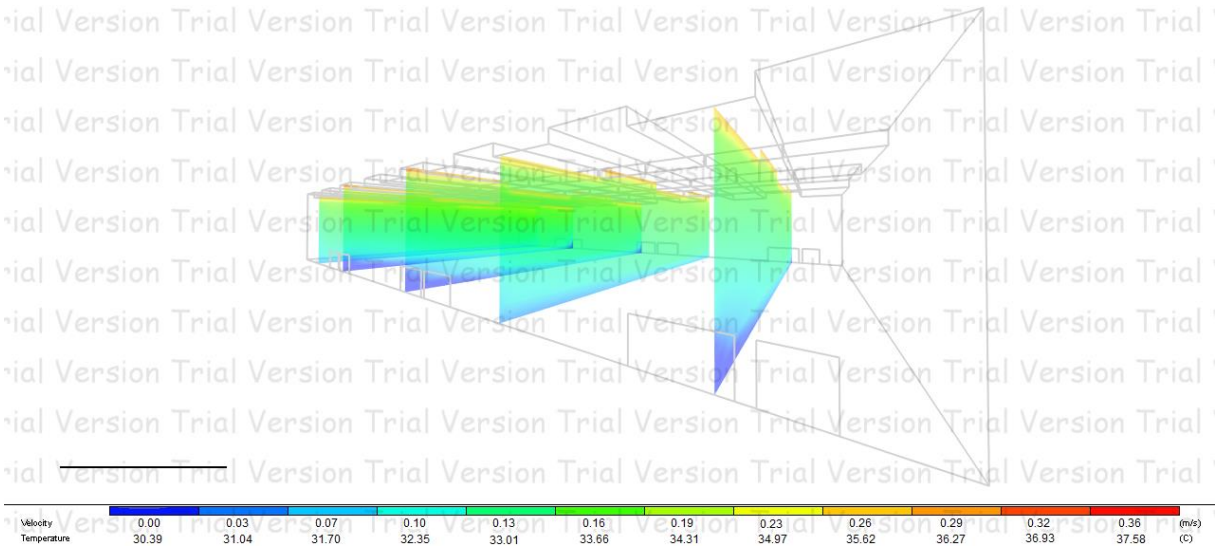


Figura 96: Planos CFD de temperaturas ortogonais às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;

As figuras acima mostram que nas regiões das portas a temperatura é menor do que em outras áreas, sendo que a mancha azul-escura é maior na fachada norte. Pode-se concluir então que isso ocorre por conta da entrada de ar externo mais frio, em maior fluxo na fachada sul, mas também ocorrendo na fachada norte, que apresenta uma menor mancha azul-escura.

Também é muito fácil perceber que as temperaturas vão aumentando de baixo para cima, sendo que a região da cobertura é a mais quente, com aproximadamente 35,5º C, por conta da irradiação pelo material da cobertura (aço), que influencia a temperatura das regiões inferiores.

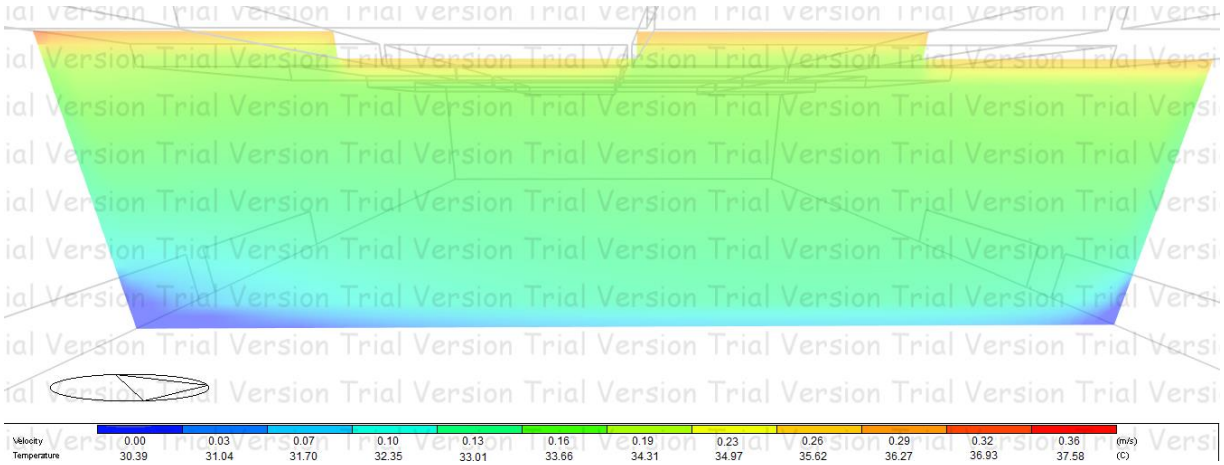


Figura 97: Plano CFD de temperatura ortogonal às fachadas N e S, cruzando uma porta de entrada e outra de saída de ar, FONTE: Autoria do próprio grupo;

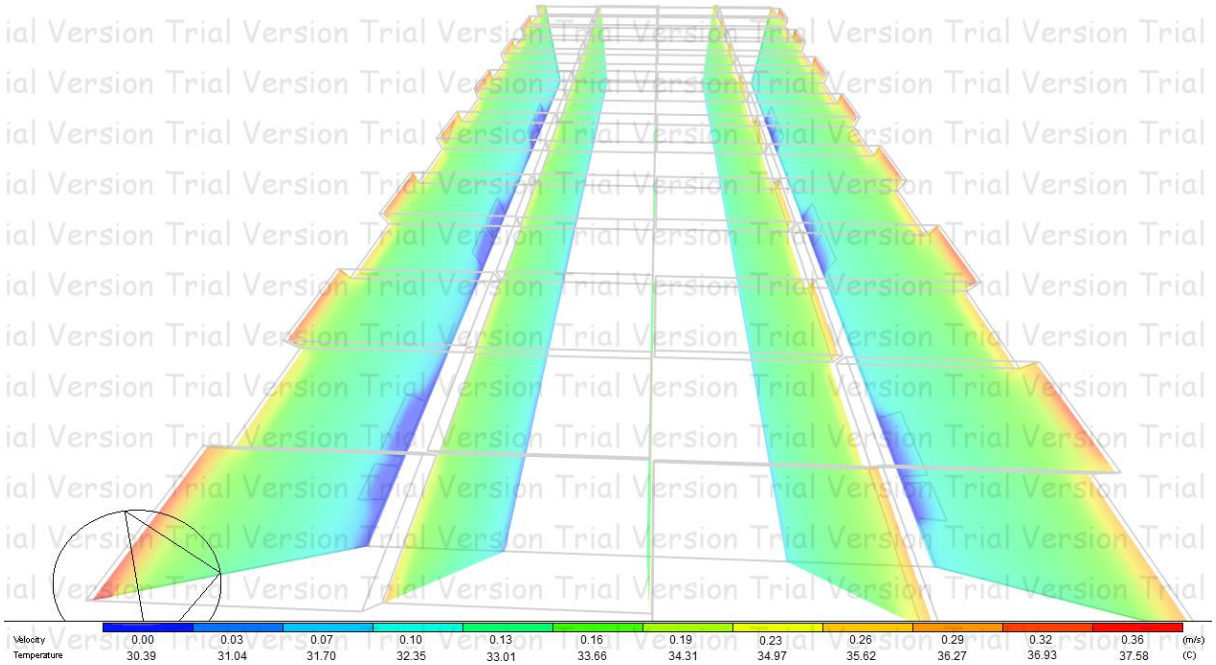


Figura 98: Planos CFD de temperatura paralelos às fachadas N e S, FONTE: Autoria do próprio grupo;

É interessante observar que, na região central do prédio, as temperaturas correspondem a um azul-claro que, pela escala gráfica, indica valores de cerca de 32,35º C. Como foi visto na seção com os resultados do Energy Plus, a temperatura do ar nos módulos, para a configuração com a cobertura atual, às 15h do dia 22 de janeiro, é de 32,1º C. Ou seja, os resultados do EnergyPlus dizem respeito a um ponto médio na volumetria da edificação estudada. Assim, pode-se dizer que as simulações em CFD retornam resultados mais completos e mais visuais, com valores para vários pontos desta volumetria, o que possibilita uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos.

7.4.6.2 Modelo com cobertura SHED

A **Figura 99** mostra o modelo geométrico dos módulos com a proposta de shed apenas com linhas de contorno, antes da definição dos planos gráficos da simulação.

Figura 99: Modelo 3D da configuração com shed antes da definição de planos gráficos, FONTE: Autoria do próprio grupo;

- ***SHED - Ventilação***

Os resultados da simulação do modelo com shed também foram bastante coerentes com o que era esperado. Por exemplo, note na **Figura 100** que pelas aberturas da fachada sul só ocorre entrada de ar, a um fluxo com velocidade correspondente a cor vermelha, que indica um valor de cerca de 0,5 m/s.

Na fachada norte, também só existe fluxo de entrada, mas com uma intensidade menor que a que ocorre nas portas da fachada sul, sendo representadas pela cor amarela, que indica um valor de aproximadamente 0,39 m/s, como é visto na **Figura 101**.

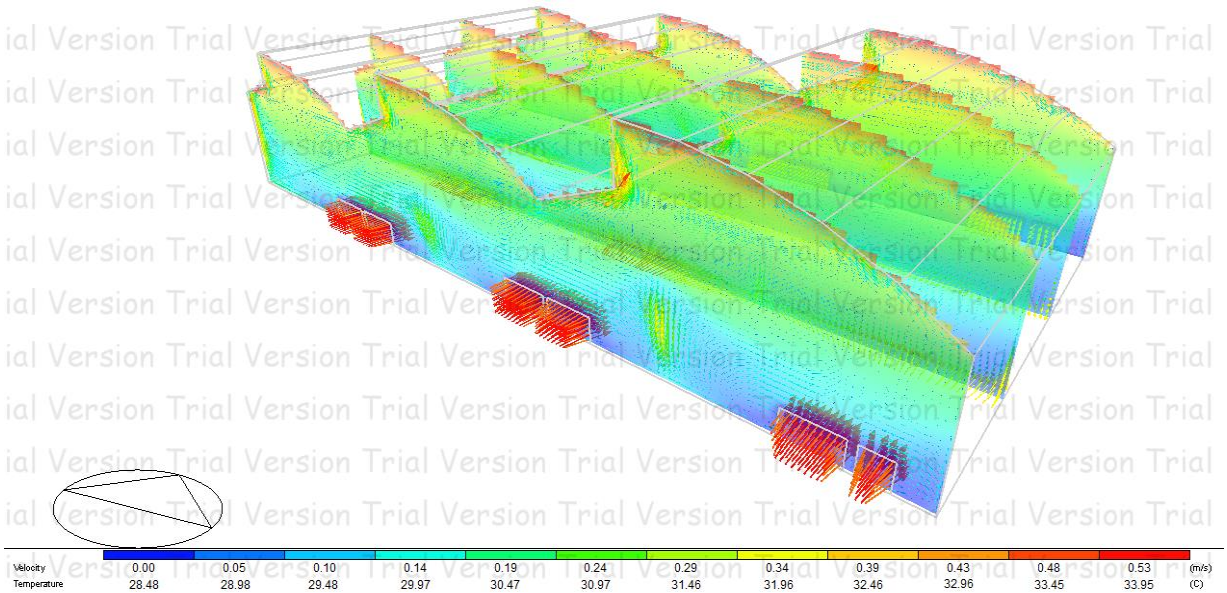


Figura 100: Resultados do CFD em planos paralelos às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;

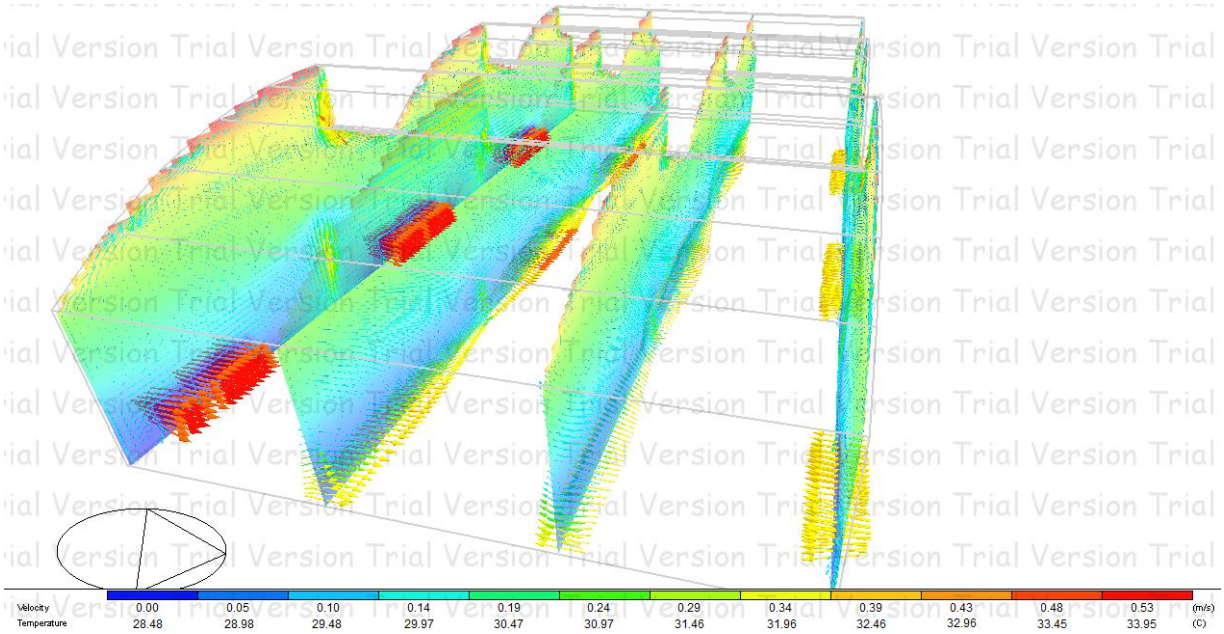


Figura 101: Resultados do CFD em planos paralelos às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Nas figuras a seguir, são mostrados os fluxos de entrada focando melhor nas fachadas que contém as aberturas, havendo somente entrada de ar, sendo que as massas de ar se deslocam numa corrente ascendente após entrarem na edificação, subindo para serem extraídas pelas aberturas do shed. A **Figura 102** tem o foco na fachada sul e a **Figura 103**, na fachada norte.

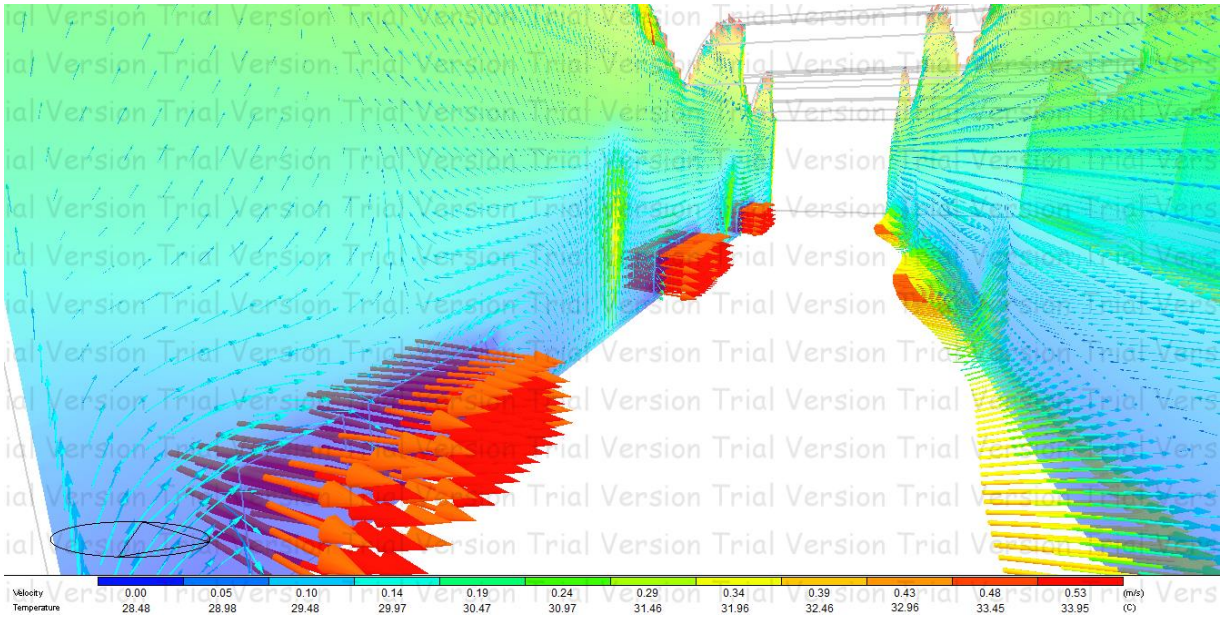


Figura 102: Entrada de ar - fluxos na fachada sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;

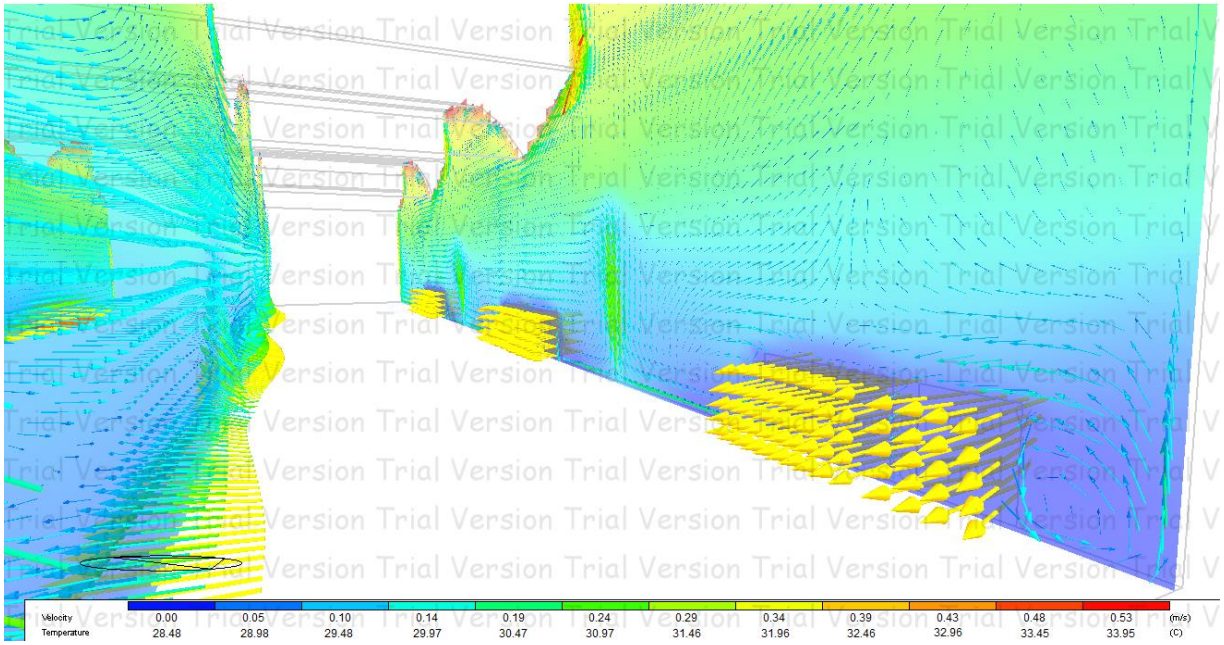


Figura 103: Entrada de ar - fluxos na fachada norte, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Na **Figura 104** fica bem caracterizado como se estabelecem os fluxos na direção ortogonal às fachadas norte e sul:

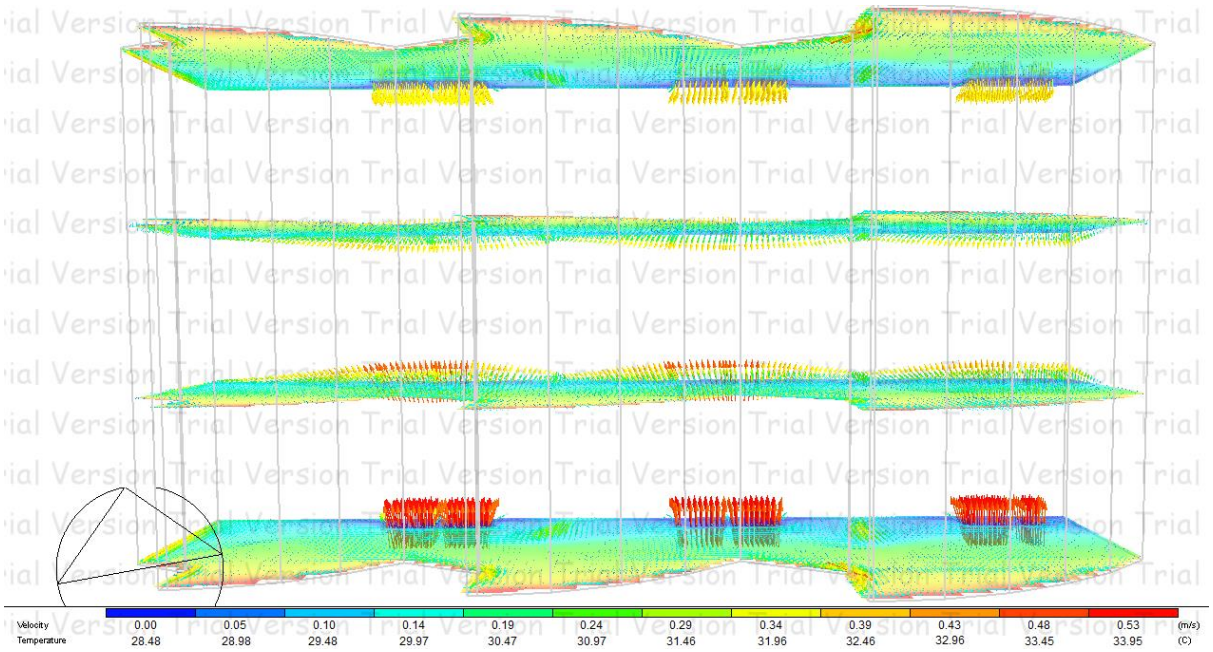


Figura 104: Vista de cima, mostrando bem os fluxos de entrada pelas portas nas fachadas N e **S,** FONTE: Autoria do próprio grupo;

Fazendo o cálculo para uma das aberturas de 2,6 m x 5,2 m, da fachada sul, para comprovar a consistência deste resultado, obtém-se um fluxo nesta abertura de:

Q = 0,5 m/s x Área da abertura (m²) = 0,5 m/s x 13,5 m² = 6,75 m³/s
= 6750 L/s ≈ 6733 L/s → OK!

Repetindo este procedimento para uma das aberturas de mesma área, mas agora da fachada norte, onde os fluxos de entrada são ligeiramente menores, temos que:

Q = 0,39 m/s x Área da abertura (m²) = 0,39 m/s x 13,5 m² = 5,26 m³/s
= 5260 L/s ≈ 5210,43 L/s → OK!

Nas aberturas superiores, na cobertura shed, por onde passam os fluxos de saída de ar, após a convergência das massas de ar, observa-se um fluxo de ar com velocidades próximas a 0,11 m/s (note que o fluxo de saída é representado por vetores azuis, paralelos), como pode ser visto na **Figura 105** e na **Figura 106**, que focam na abertura batizada de Shed 2, de área 190 m².

Assim, temos que:

Q = 0,11 m/s x Área da abertura (m²) = 0,11 m/s x 190 m² = 20,9 m³/s
= 20900 L/s ≈ 21636,2 L/s → OK!

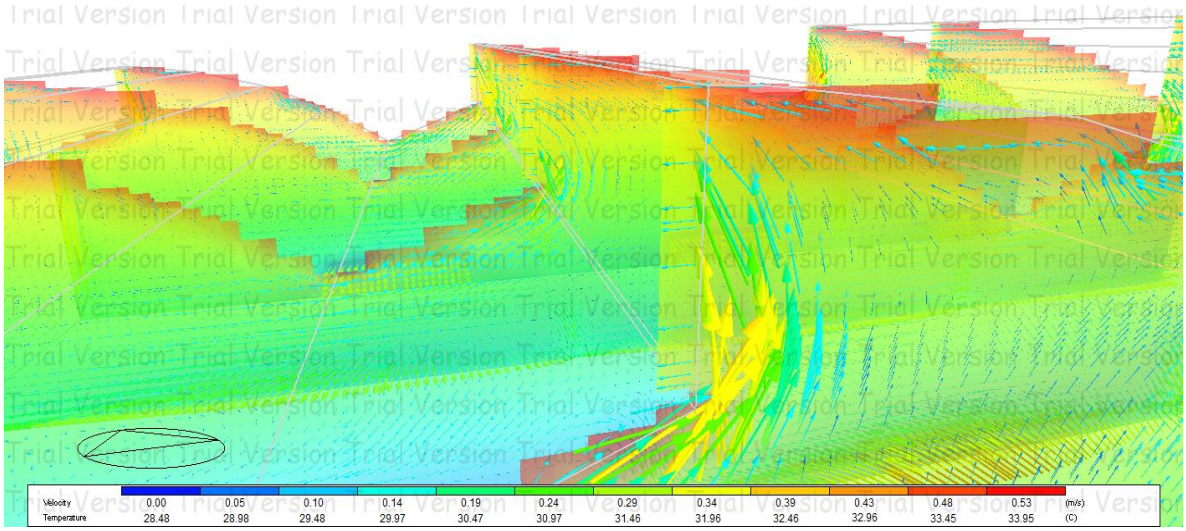


Figura 105: Vista da abertura Shed 2 (190m²), FONTE: Autoria do próprio grupo;

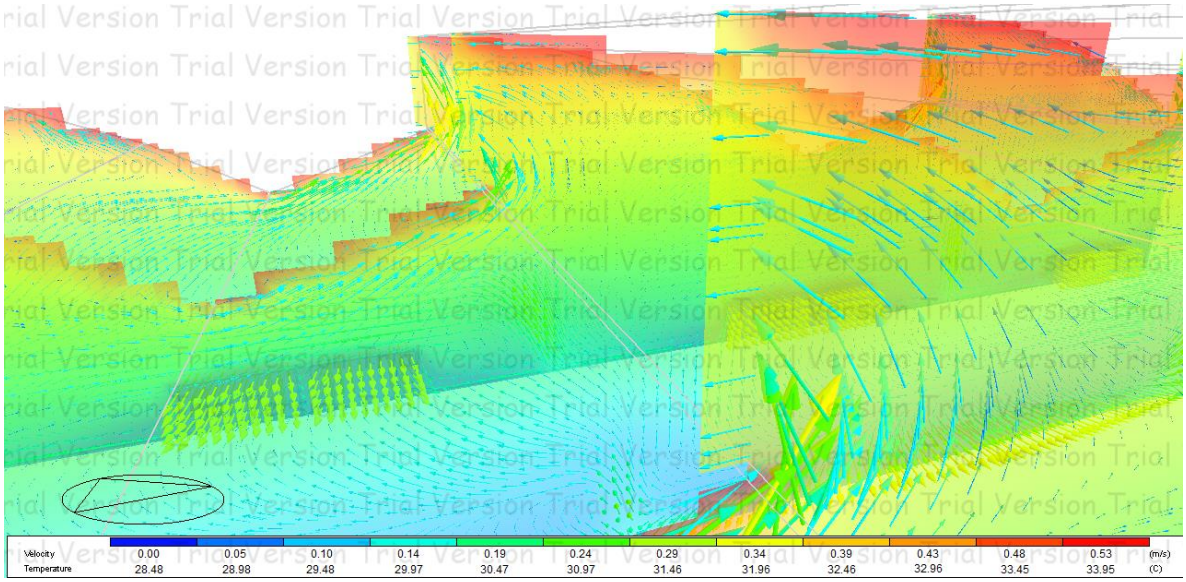


Figura 106: Vista da abertura Shed 2 (190m²), FONTE: Autoria do próprio grupo;

Na **Figura 107** se torna mais fácil a visualização do comportamento do fluxo de saída por uma das aberturas, agora a Shed 1, de área igual a 150 m². Da mesma maneira que foi feita a demonstração anteriormente, pode-se fazer aqui. Observe que a velocidade é exatamente a mesma, de 0,11 m/s, correspondente a cor azul-clara. Os mesmos resultados podem ser vistos, por um outro ângulo, na **Figura 108**.

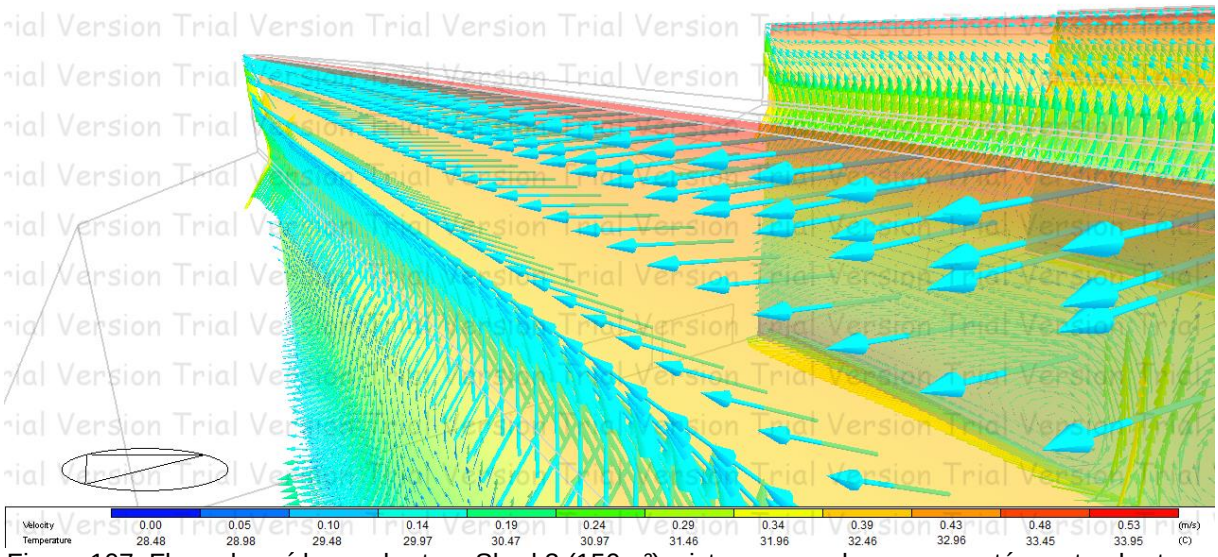


Figura 107: Fluxo de saída na abertura Shed 3 (150m²), visto em um plano que contém esta abertura, FONTE: Autoria do próprio grupo;

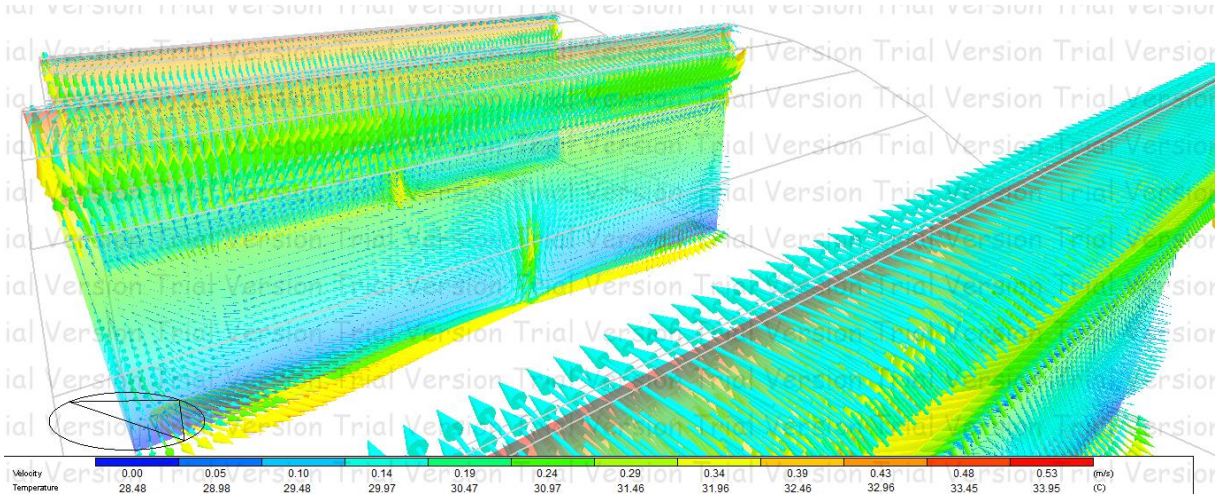


Figura 108: Fluxo de saída, agora mostrando as 3 aberturas da cobertura proposta, FONTE: Autoria do próprio grupo;

- ***SHED - Temperaturas***

Apresentando agora apenas os planos gráficos apenas com a distribuição de temperaturas, é possível perceber que estes resultados se assemelham, de certa forma, com os da simulação para a cobertura atual. Não com relação aos valores absolutos, é claro, mas sim quanto à proporção gráfica dos valores, ou seja, a distribuição de cores nos planos gráficos. Como já foi visto antes, na análise dos resultados do Energy Plus, no modelo com o shed a temperatura do ar interno cai, neste dia e horário (pico), cerca de 3º C, em relação ao modelo com a cobertura

atual. As figuras a seguir mostram como ficou a distribuição de temperaturas para este modelo:

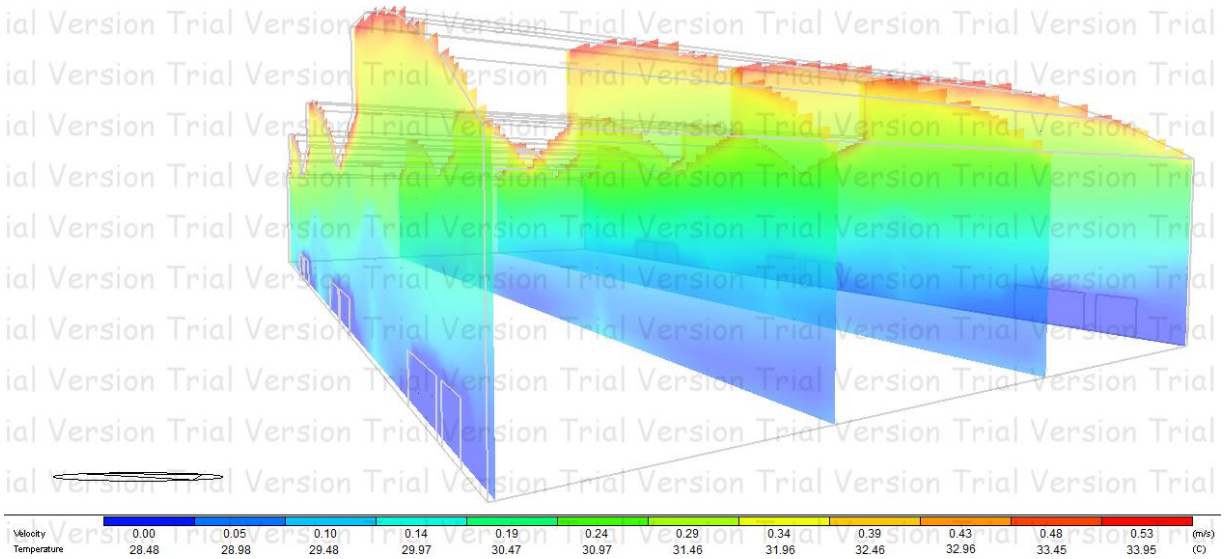


Figura 109: Temperaturas em planos paralelos às fachadas das portas, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Analisando a distribuição de temperaturas, nota-se uma camada laranja, que representa a temperatura de aproximadamente 33,5º C, acompanhando o entorno da superfície superior. Esta região acaba sendo a de maior temperatura do ambiente devido à influência direta da irradiação pela cobertura, que é de telhas de aço, sendo que a temperatura vai diminuindo conforme o decrésimo de altura.

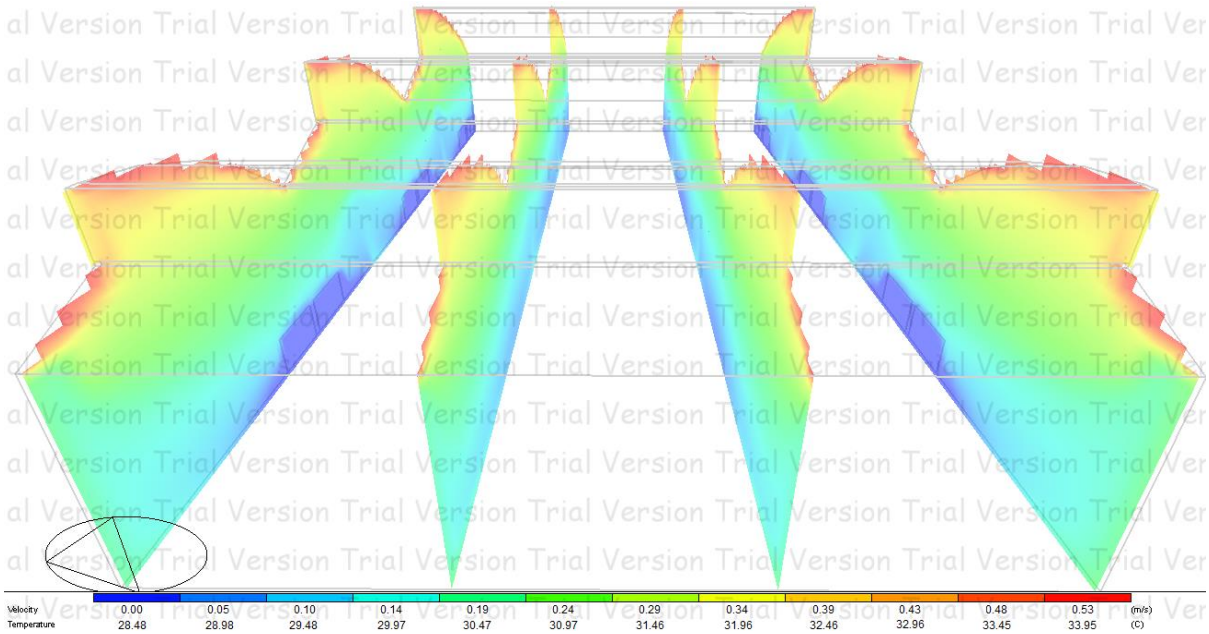


Figura 110: Distribuição de temperaturas em planos paralelos às fachadas norte e sul, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Na **Figura 110** observa-se que as regiões das portas são vistas como sendo as mais amenas, pois são as mais próximas ao ambiente externo à edificação, de onde vem as massas de ar mais frescas que entram no prédio por conta da sucção pelo efeito-chaminé. Assim que o ar mais frio entra, começa a esquentar e a subir cada vez mais, por convecção, potencializando as trocas de ar. A **Figura 111** mostra bem as

temperaturas nas regiões próximas a aberturas de entrada de ar e a sua diferença com relação a locais mais distantes destas aberturas.

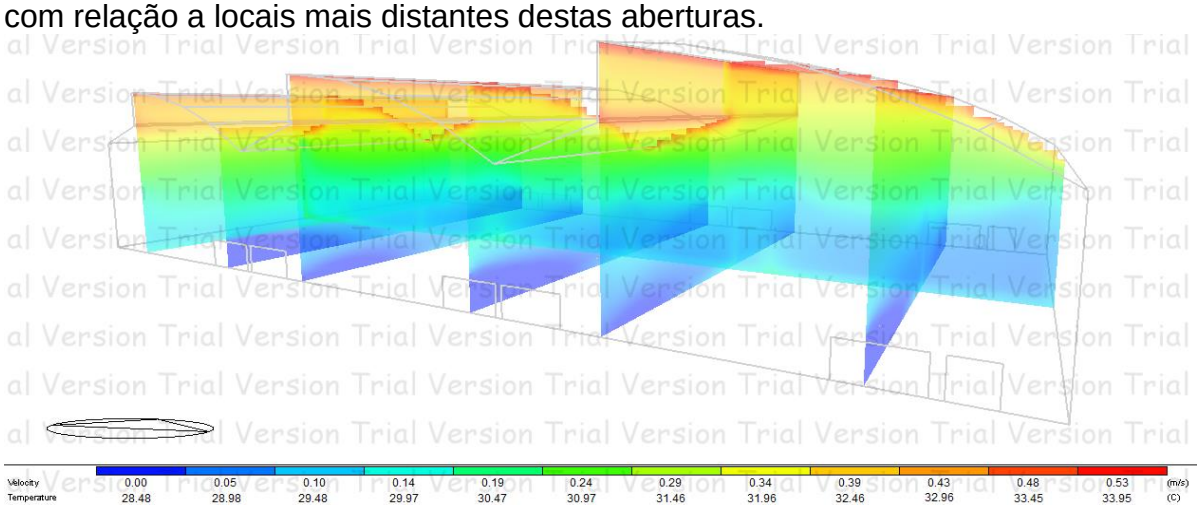


Figura 111: Planos ortogonais às fachadas N e S, cruzando entradas ou contendo saídas de ar, combinados com um paralelo, FONTE: Autoria do próprio grupo;

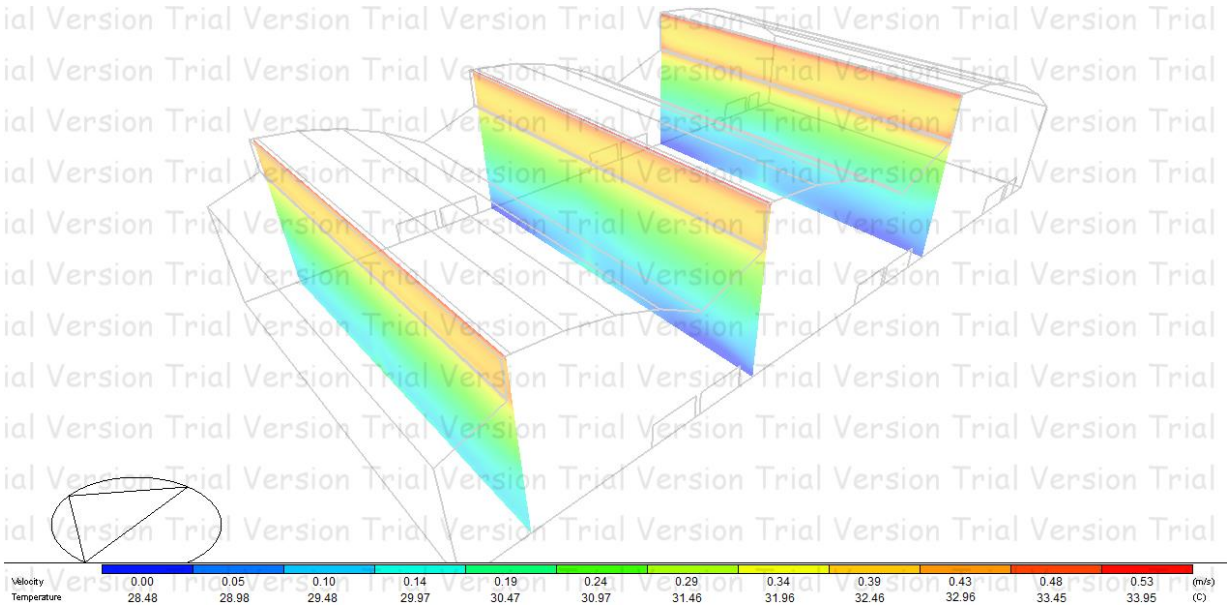


Figura 112: Planos gráficos que contém cada um uma das saídas (sheds 1, 2 e 3), FONTE: Autoria do próprio grupo;

Assim como observado nos resultados do CFD para a cobertura atual, na região central do prédio, as temperaturas correspondem à cor azul, pela escala gráfica, que indica valores de cerca de 29,0º C. Como foi visto na seção com os resultados do Energy Plus, a temperatura do ar nos módulos, para a configuração com o shed proposto aqui, às 15h do dia 22 de janeiro, é de 28,95º C, o que confirma novamente o fato de que os resultados do EnergyPlus dizem respeito a um ponto médio na volumetria da edificação estudada.

- ***SHED – Proposição de melhorias***

Após serem realizadas as simulações no Energy Plus e no CFD, concluímos que os resultados confirmaram o que era inicialmente esperado, cuja teoria foi apresentada nas seções anteriores. Mas ainda assim, mesmo com a troca da cobertura, o que permite um grande aumento da ventilação natural interna no edifício, notou-se até aqui que ainda persiste uma grande incidência de radiação solar dentro do edifício, além de uma grande irradiação de temperatura pelo aço da cobertura.

Pensando nisso então, pode-se propor também uma solução que resulte numa diminuição destes dois fenômenos, o que deve induzir uma queda no pico de temperatura radiante, que influencia diretamente a temperatura do ar interno. Ou seja, combinando a troca da cobertura, para melhoria na ventilação natural, com o uso de elementos e materiais, que favoreçam a redução de temperatura interna, pode-se chegar a uma solução muito mais eficiente em termos de conforto térmico.

O aço tem uma condutividade térmica de 45 W/(m x ºC), que é muito elevada. Considera-se então utilizar uma camada de material isolante na cobertura por baixo das telhas de aço, como, por exemplo, o XPS, que tem uma condutividade bastante baixa, de 0,034 W/(m x ºC).

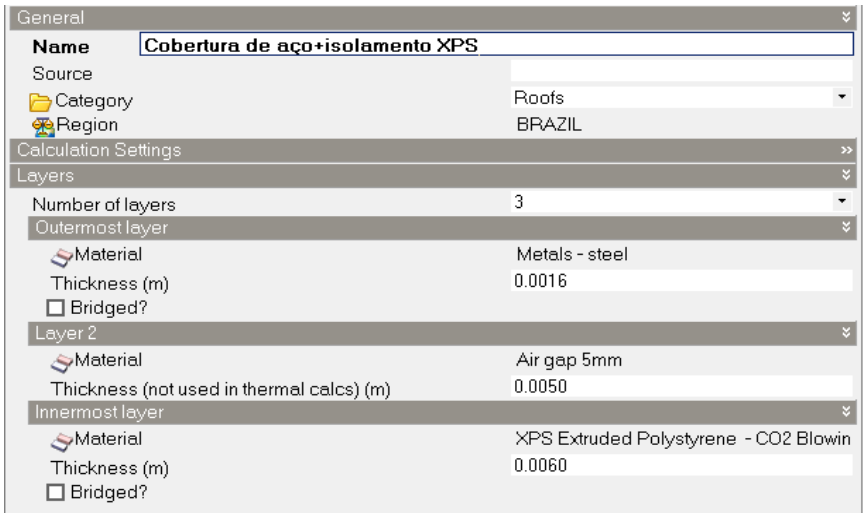


Figura 113: Definição de uma nova composição de materiais para a cobertura, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Assim, foi adotado um isolamento de XPS de 6 cm de espessura (**Figura 113**), com uma camada intermediária de ar, além de brises (Figura 114) nas aberturas superiores, que é por onde os raios solares incidem diretamente no ambiente interno, aumentando a temperatura radiante, como já concluído na seção 7.4.4. Além da função de proteção contra a radiação direta, a escolha do uso de brises também se deve a um fator essencial, que é a proteção do ambiente interno contra chuvas, já que de qualquer forma seria necessário algum elemento que desempenhasse essa função.

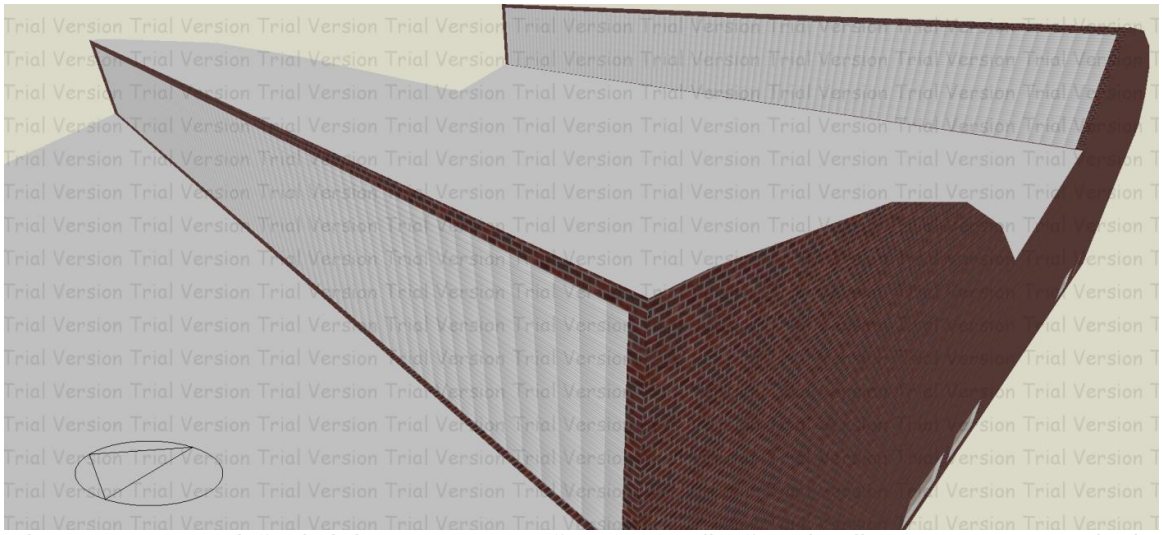


Figura 114: Proposição de brises, para proteção contra radiação solar direta, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Na figura a seguir é mostrado como os brises podem diminuir a incidência dos raios solares:

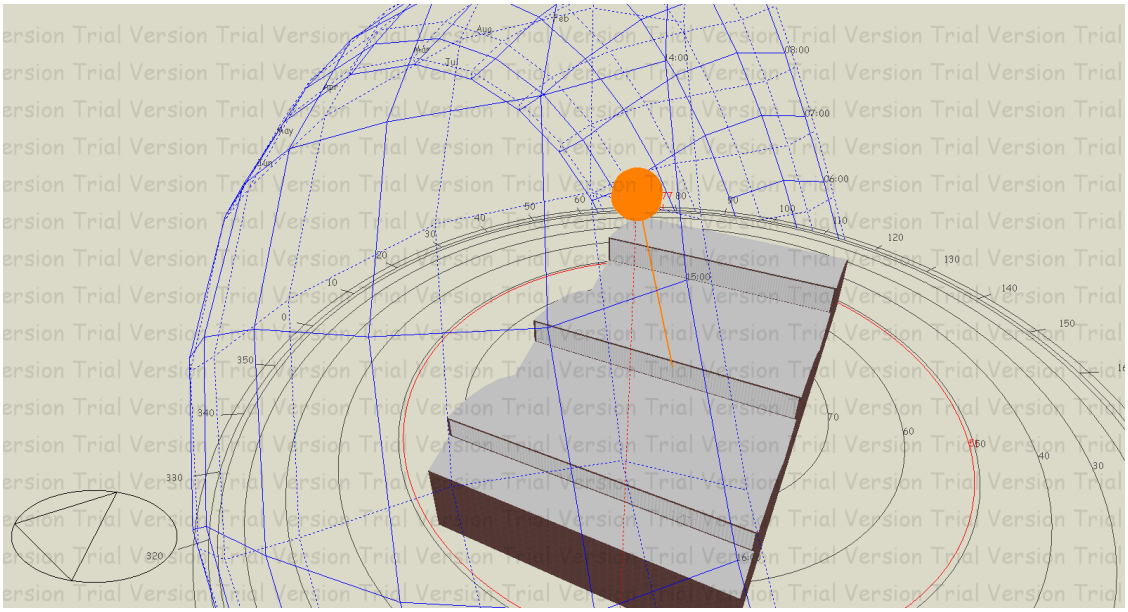
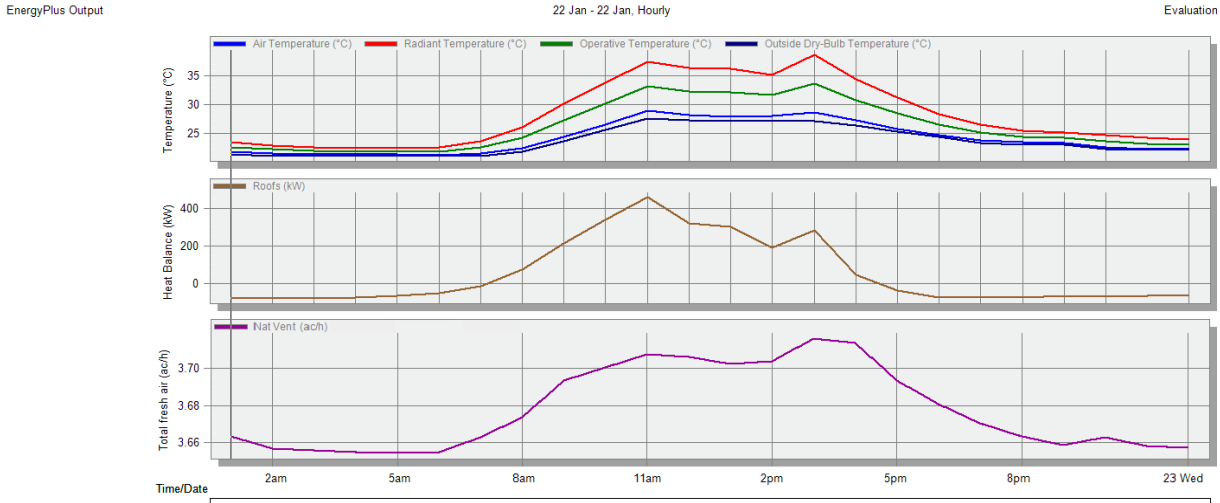


Figura 115: Posição do Sol às 15h, na condição mais favorável para incidência direta da radiação, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Foram feitas novas simulações no Energy Plus para comparar os resultados com aqueles vistos na seção 7.4.3, para o shed curvo. Abaixo são apresentados os resultados, para o dia 22 de janeiro, das grandezas mais relevantes (temperaturas, ganho de calor e trocas de ar) para as seguintes configurações:

A) SHED: apenas mudança da cobertura atual pela proposta de shed, já analisada anteriormente, em Energy Plus e em CFD.
B) SHED + brises + isolamento térmico: combinação entre a cobertura proposta com isolamento térmico de XPS e brises nas aberturas superiores (saídas de ar).



Time/Date	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	23 Wed
Air Temperature (°C)	21.70	21.42	21.29	21.29	21.24	21.12	21.35	22.30
Radiant Temperature (°C)	23.36	22.82	22.52	22.28	22.27	22.44	23.49	25.99
Operative Temperature (°C)	22.53	22.12	21.90	21.79	21.75	21.78	22.42	24.14
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	21.25	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.75
Roofs (kW)	-73.99	-78.63	-78.85	-77.16	-67.57	-52.91	-16.74	72.62
Nat Vent (ac/h)	3.66	3.66	3.66	3.65	3.65	3.65	3.66	3.67

Time/Date	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	23 Wed
Air Temperature (°C)	24.26	26.53	28.85	28.15	27.90	28.04	28.59	27.21
Radiant Temperature (°C)	30.16	33.86	37.54	36.44	36.31	35.18	38.65	34.35
Operative Temperature (°C)	27.21	30.20	33.20	32.30	32.11	31.61	33.62	30.78
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	23.50	25.50	27.50	27.25	27.00	27.00	27.00	26.25
Roofs (kW)	214.97	340.28	459.24	322.77	300.71	190.56	281.43	44.38
Nat Vent (ac/h)	3.69	3.70	3.71	3.71	3.70	3.70	3.72	3.71

Time/Date	2am	5am	8am	11am	2pm	5pm	8pm	23 Wed
Air Temperature (°C)	25.72	24.60	23.68	23.36	23.25	22.54	22.19	22.17
Radiant Temperature (°C)	31.16	28.24	26.46	25.40	25.12	24.61	24.11	23.87
Operative Temperature (°C)	28.44	26.42	25.07	24.38	24.18	23.57	23.15	23.02
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	25.25	24.25	23.25	23.00	23.00	22.25	22.00	22.00
Roofs (kW)	-39.91	-74.83	-77.40	-75.49	-65.74	-69.69	-67.26	-63.16
Nat Vent (ac/h)	3.69	3.68	3.67	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66

Figura 116: Resultados do Energy Plus para apenas troca de cobertura, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Na Figura 116, assim como na Figura 65, na seção 7.4.3, nota-se que os 2 picos das curvas de temperatura ocorrem às 11h e às 15h, sendo o das 15h o maior deles. A temperatura radiante neste horário é de 38,65º C, sendo considerado um valor muito alto.

O que se pretende conseguir com o uso de brises é a diminuição deste segundo pico de temperatura no dia representativo, protegendo o ambiente interno do prédio contra a incidência direta de raios solares. Já o primeiro pico, que ocorre às 11h, pode ser atenuado com a utilização do material isolante, que reduzirá a irradiação da cobertura de aço para dentro do edifício ao longo de todas as horas do dia em que o sol estiver incidindo raios sobre ela.

Abaixo se encontram os resultados para a combinação da cobertura com os brises e o isolamento térmico:

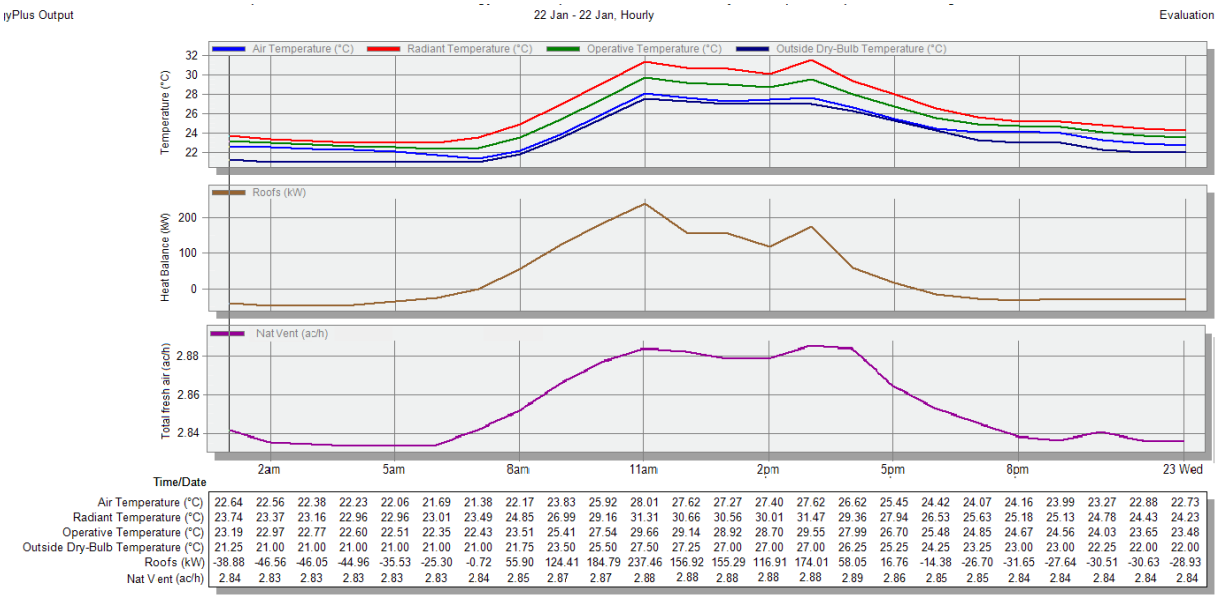


Figura 117: Resultados do Energy Plus para a combinação das 3 mudanças (cobertura, brises e isolamento térmico), FONTE: Autoria do próprio grupo;

Comparando os valores de temperatura radiante, observa-se que houve uma redução bastante significativa. Os picos ainda continuaram sendo às 11h e às 15h, por conta da posição do sol em relação ao prédio, que nesses horários é muito favorável a uma maior irradiação solar, mas os valores passaram de 37,54º C para 31,31º C no primeiro pico (11h) e de 38,65 para 31,47º C no segundo pico (15h).

Note também que a curva de balanço de calor (Heat Balance) diminuiu praticamente pela metade, de um modo geral, indicando que o prédio passou a absorver menos calor pela cobertura, justamente por conta do isolamento térmico.

A instalação de brises acarretou numa diminuição de cerca de 20% nas trocas de ar, passando de um valor na hora-pico (15h) de 3,72 ac/h para 2,89 ac/h. Assim, pode-se concluir que a perda de carga foi de aproximadamente 40%, já que a perda de carga é proporcional ao quadrado da velocidade, (ou fluxo).

$H_1 = (V_1^2/2g)$ e $H_2 = (V_2^2/2g)$
$H_2 = 0,6 \times H_1 \rightarrow (V_2^2/2g) = 0,6 \times (V_1^2/2g) \rightarrow V_2^2 = 0,6 \times V_1^2 \rightarrow V_2 = 0,77 \times V_1$

Não se julgou necessária a simulação em CFD para esta última configuração proposta, em vista dos resultados já apresentados que demostram claramente o comportamento da temperatura e da ventilação natural na edificação com a cobertura proposta, utilizada isoladamente. Estes resultados já são representativos do que também ocorre quando são utilizados brises e materiais isolantes, mudando basicamente apenas as condições de contorno. Assim, decidiu-se que apenas uma nova simulação no Energy Plus fosse capaz de apresentar as diferenças mais relevantes entre os comportamentos nos dois casos, principalmente quanto ao abatimento dos picos de temperatura radiante.

8 CONCEPÇÃO DA ESTRUTURA

8.1. Determinação e desenvolvimento do sistema estrutural

Como visto anteriormente, a cobertura em shed proposta neste estudo apresenta um design não convencional, baseada em conceitos inovadores do arquiteto João Filgueiras Lima. A cobertura possui três cumes, caracterizados por aberturas devidas à descontinuidade do desenho, e dois vales. Do ponto de vista estrutural, sua principal característica é a altura variável, chegando a 12 m em sua parte mais alta, e os grandes vãos transversais (46 m) e longitudinais (36 m, 30 m, 24 m). Nesse contexto, as telhas autoportantes foram escolhidas para o projeto, como visto anteriormente, por serem capazes de vencer vãos de até 45 m, longitudinalmente às nervuras, e vãos ilimitados na direção perpendicular, reduzindo a necessidade de utilização de muitos apoios. Serão ao todo seis jogos de telhas, denominados aqui por coberturas maiores (curvas e mais altas) e coberturas menores (planas inclinadas e mais baixas).

A ancoragem e travamento das telhas é um aspecto fundamental da cobertura, sendo que a estrutura que suporta as telhas deverá prover estabilidade ao conjunto ao mesmo tempo em que sustenta os esforços decorrentes do peso próprio, eventuais sobrecargas e do vento. Para tanto, é necessário que a estrutura escolhida seja suficientemente leve para vencer os vãos supracitados e ainda resistir aos esforços previstos em projeto. Para casos semelhantes, as estruturas metálicas são largamente utilizadas, devido sua flexibilidade no arranjo entre elementos, que permite compor designs diferenciados enquanto vence grandes vãos com leveza e resistência, sendo este o tipo de estrutura aqui adotado.

As estruturas metálicas de cobertura, em geral, fazem uso de inúmeras treliças, devido à economia de peso e principalmente à resistência e eficiência na transmissão dos esforços da cobertura em grandes vãos. Representam, portanto, um ponto chave do sistema estrutural metálico de coberturas, sendo certo que não será diferente para a estrutura metálica da cobertura proposta.

Elementos principais

Inicialmente identifica-se um ponto do conjunto em que a configuração descontínua entre as coberturas maior e menor favorece a adaptação de uma treliça, já que se trata de um ponto onde é necessário que haja um apoio para as telhas. Assim, é possível propor uma treliça que vença o vão de 46m, com a mesma altura da cobertura maior, sendo então obtidas três treliças, cada qual com a altura correspondente à altura da respectiva cobertura maior.

A relação altura-vão de cada uma das três treliças (8,4/46; 7/46; 5,6/46) indica que estão dentro da faixa considerada ideal (de 1/10 a 1/5) que resulta no menor peso obtido para o vão de 46 m, para o caso de treliças retangulares, conforme (PIGNATTA e FRUCHTENGARTEN, 2012).

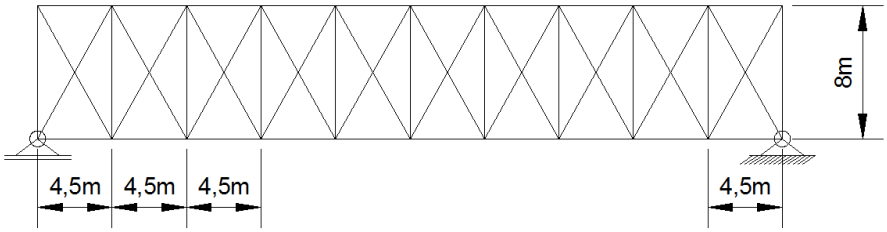


Figura 118: Vista frontal treliça que apoia a cobertura, FONTE: Autoria do próprio grupo;

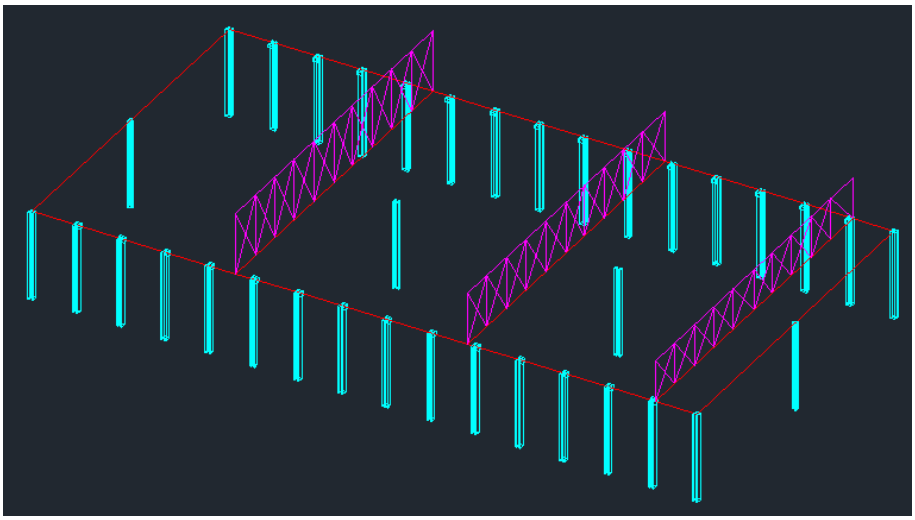


Figura 119: Esquema estrutural das treliças apoiadas sobre os pilares, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Já os vales serão apoiados por uma viga metálica contínua, que se apoia nas paredes laterais e em um dos pilares centrais. Os dois vales devem ser, portanto, alinhados aos pilares centrais para que se possa utilizá-los como apoios para as vigas que suportarão as telhas. Como a viga metálica do vale possui vãos menores devido ao apoio no centro, admite-se que um perfil I talvez seja capaz de suportar os esforços que apareçam decorrentes da ação dos carregamentos que ali atuarão, dispensando a utilização de uma treliça, cuja altura talvez fosse incompatível com a arquitetura proposta.

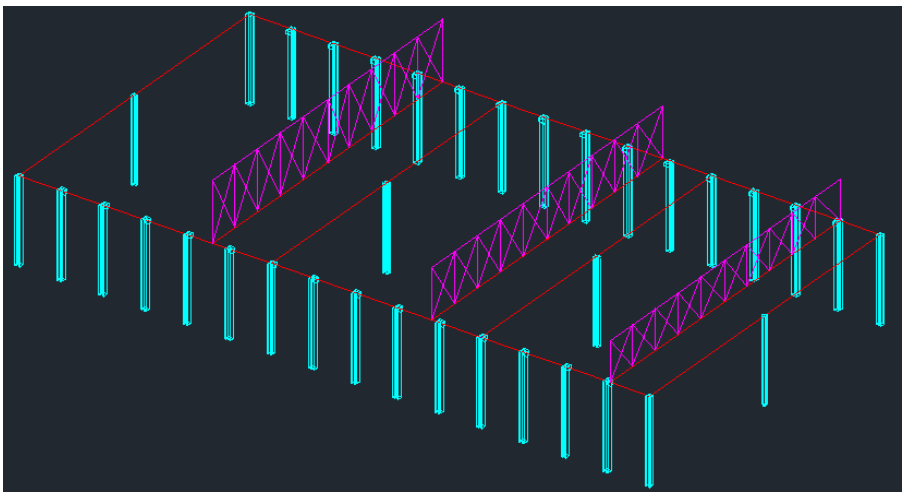


Figura 120: Esquema estrutural com destaque para a viga metálica, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Assim, pode-se assumir que a as coberturas formadas pelas telhas serão biapoiadas em vigas metálicas, com exceção da cobertura maior e menor extremas, que são apoiadas nas vigas de concreto, já existentes.

Travamentos

Devido à grande altura dos cumes e, consequentemente, das treliças metálicas, devem ser previstos ainda travamentos no sentido transversal às treliças (longitudinal ao comprimento do edifício) visando reduzir os deslocamentos do conjunto e conferir estabilidade às treliças. Esses travamentos podem acompanhar a curvatura das coberturas maiores ligando cada extremidade das treliças aos apoios dos pilares de concreto nas laterais. Para tanto, também serão adotadas treliças para este fim, desempenhando a função dos travamentos necessários.

De maneira complementar, serão adotadas treliças menores, triangulares, e também com a função de travamento, que acompanharão o desenvolvimento das telhas que formam as coberturas menores, ligando cada treliça principal à respectiva viga correspondente ao vale seguinte. Para efeito de compatibilização, as treliças triangulares serão apoiadas nos montantes das treliças principais, resultando dessa forma onze treliças triangulares, sendo uma para cada montante da treliça principal.

Muito embora os apoios estejam travados, a treliça principal ainda poderia apresentar instabilidade em seu meio vão, justificando a necessidade de um terceiro travamento acompanhando a cobertura maior, que ligasse essa treliça a um apoio rígido. Será então adotada uma terceira treliça de travamento, semelhante às duas grandes treliças laterais propostas inicialmente, ligando o meio da treliça principal aos apoios das outras extremidades das coberturas maiores.

Essa terceira treliça será importante também para a fase de construção da cobertura, pois permitirá que a estrutura seja montada em etapas. Dessa forma, convém que essa treliça seja, na verdade, um travamento único, sendo biapoiado no pilar central e nas paredes (no caso dos subconjuntos das extremidades) ou biapoiada nos dois pilares centrais (no caso do subconjunto médio). Esse travamento poderia ser montado conjugando-se a treliça de travamento maior, que acompanha a curvatura da cobertura maior, com a treliça de travamento triangular, que acompanha a cobertura menor. Como a treliça principal vence um grande vão sem apoios intermediários seria difícil sustentar o seu peso próprio sem nenhum escoramento enquanto ainda não estivesse montada por completo. Esta treliça de travamento serviria então como um apoio para a metade da treliça principal, viabilizando a sua montagem em duas fases e com painéis menores. Uma vez montada, a mesma não mais apoiaria a treliça principal, eliminando a possibilidade de formação de um efeito grelha e passando a funcionar apenas como travamento.

Finalmente, para completar o travamento da estrutura, mas agora no plano XY, deverão ser previstos travamentos ligando o banzo inferior das treliças principais às vigas correspondentes aos vales, sendo que desta forma a estrutura apresentará um comportamento mais conjunto, tendo seu movimento travado no plano XY reduzindo os deslocamentos diferenciais entre a treliça principal e as treliças triangulares menores para travamento.

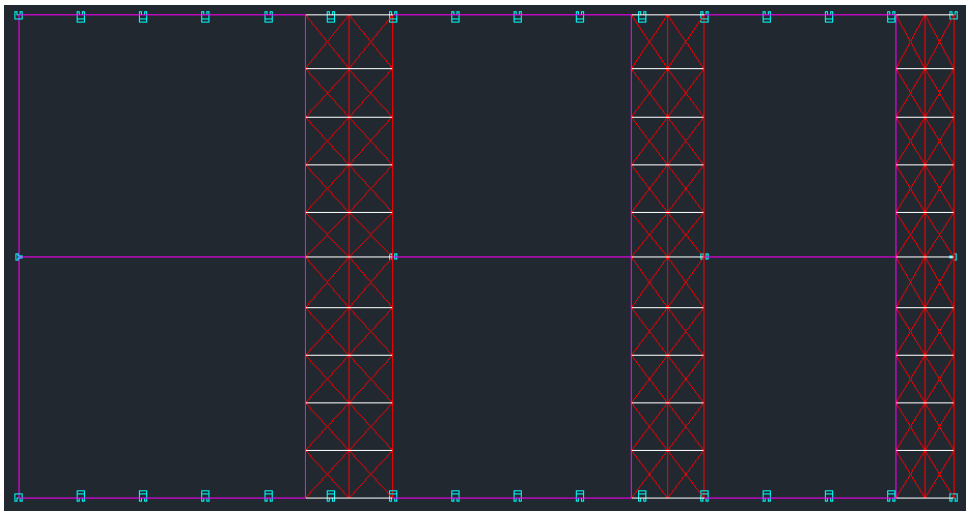


Figura 121 - Imagem dos travamentos no plano xy em planta

Estrutura final

Em resumo a estrutura será composta por:

- Três treliças retangulares principais transversais
- Três treliças longitudinais de travamento acompanhando o desenvolvimento de cada cobertura maior
- 11 treliças longitudinais triangulares de travamento ligadas cada uma a um montante em cada treliça principal
- Travamentos no plano xy entre o banzo inferior da treliça principal e as vigas correspondentes ao apoio das coberturas menores.

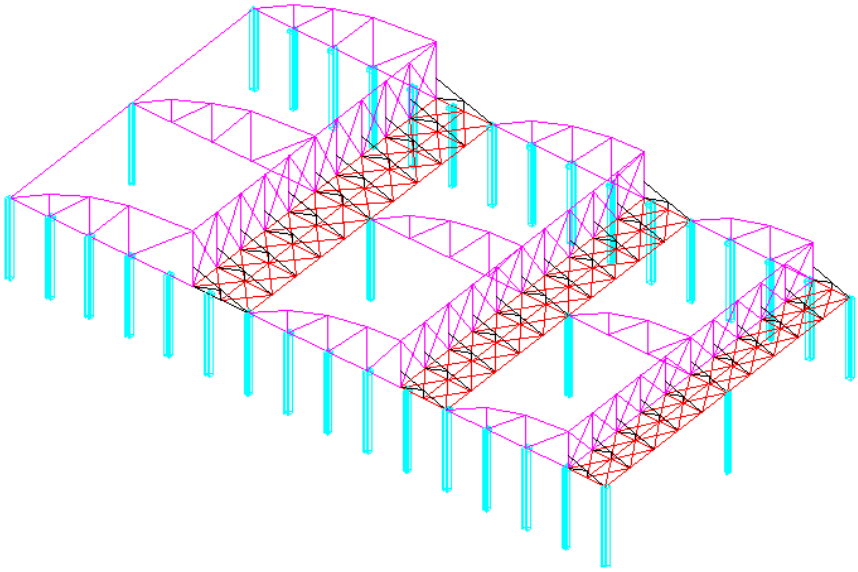


Figura 122 - Diagrama unifilar em 3D da estrutura metálica, FONTE: Autoria do próprio grupo;

A figura acima representa a estrutura em esquema unifilar sob uma vista em perspectiva. Em rosa, é possível ver as três treliças principais e as nove treliças laterais de travamento. Em preto, estão representadas as trinta e três treliças triangulares e em vermelho, os travamentos no plano XY.

As diagonais dos travamentos foram concebidas visando resultar no menor consumo de aço em chapas de ligação. Para tanto se buscou seguir a recomendação da norma NBR8800:2008, que sugere ângulos na faixa de 40˚ a 45˚entre montantes e diagonais. Ângulos muito agudos costumam exigir chapas bastante alongadas para conter todos os parafusos ou área de solda necessária para garantir a efetividade da conexão. Diferentemente das demais peças, as treliças principais obtiveram ângulos em torno de 25˚ devido ao espaçamento adotado para os montantes. Se fossem mais espaçados, o comprimento não travado do banzo superior receberia mais carga distribuída o que implicaria em maiores momentos locais. O aumento dos esforços na seção do banzo poderia levar à necessidade de peças mais rígidas e com áreas maiores, levando a maiores consumos de aço e a maiores custos.

8.2. Tipo do aço utilizado

Os tipos de aço mais utilizados na construção civil de estruturas metálicas são os recomendados pela norma americana ASTM (American Society for Testing and Materials) e brasileira NBR, e possuem propriedades tabeladas. Ambas as normas recomendam aços do tipo aço-carbono, mais especificamente os de baixo teor de carbono, para a utilização em sistemas estruturais em razão de sua elevada resistência.

Tabela 8 - Tipos de aço mais utilizados em estruturas metálicas. Fonte: Apostila de Estrutura Metálicas – PEF2402

Tipo de Aço	f_y (MPa)	f_u (MPa)
ASTM-A36	250	400
ASTM-A570 Gr 36	250	365
ASTM-A572 Gr 50	345	450
NBR 6648/CG-26	255*	410*
	245**	410**
NBR 6650/CF-26	260	410
NBR 7007/MR-250	250	400

* Válido para espessuras t ≤ 16mm ** Válido para espessuras 16mm < t ≤ 40mm

O tipo de aço adotado é função basicamente da finalidade da estrutura e, consequentemente, dos tipos de perfis adotados no projeto. Os quatro tipos mais frequentes em estruturas metálicas são aqueles que se assemelham as letras I, U ou C, H, Z e L (para cantoneiras), os quais podem ser feitos através dos processos de laminação, conformação a frio ou soldagem.

Os perfis soldados, constituídos por chapas de aço estrutural unidas entre si por soldagem a arco elétrico, apresentam, em geral elevada versatilidade de combinações possíveis de altura x largura x espessura, produzindo estruturas mais leves quando comparadas aos perfis laminados nacionais. Perfis laminados, fabricados a quente em usinas siderúrgicas são mais econômicos quando aplicados em sistemas estruturais de edificações, pois dispensam a fabricação elaborada dos perfis soldados. Já os perfis formados a frio são mais utilizados para estruturas leves como elementos de travamentos como cantoneiras e perfis do tipo C, usados como diagonais ou terças, por exemplo.

Nota-se que o perfil do tipo laminado apresenta características mais adequadas à utilização em estruturas de coberturas metálicas de grandes vãos, principalmente devido ao fato de resultar em estruturas mais leves. Tendo em vista as vantagens comparativas do perfil laminado em relação laminados, será esse o tipo de perfil escolhido para os elementos principais da estrutura. Já para os travamentos e para as terças que apoiam as telhas, serão adotados os perfis formados a frio.

Os perfis soldados do tipo I são divididos em duas séries, simétrica e assimétrica. A série simétrica dos perfis I soldados é dividida em:

- Série CS – mais adequada para pilares
- Série CVS – formada por perfis do tipo viga-pilar
- Série VS – mais adequada para vigas
- Série PS

Os aços do tipo ASTM-A36 e NBR6648/CG-26 são os mais utilizados na fabricação de perfis soldados, sendo que será adotado o primeiro.

8.3. Caminhamento e distribuição das cargas - Formas dos perfis adotados

Cada elemento no sistema estrutural proposto está sujeito a uma combinação diferente de esforços, sendo que cada situação exige peças com características diferentes, adequadas a cada caso. Para que seja possível prever qual o tipo de peça mais adequado a cada elemento é necessário primeiramente conhecer quais são e como atuam as ações na estrutura, para que então seja possível compreender como se dá a distribuição de esforços pelo conjunto.

O projeto prevê que a estrutura estará sofrerá majoritariamente esforços verticais decorrentes, entre outros fatores, de seu peso próprio, de eventuais sobrecargas como acúmulo de água e pressão do vento. Entretanto, deve-se considerar que a ação do vento pode gerar esforços horizontais significativos devidos principalmente ao arrasto da cobertura e aos esforços gerados nas conexões. Dessa maneira é possível prever quais solicitações predominarão nas peças componentes da treliça principal e de seus travamentos.

Se fosse uma treliça ideal, seus elementos trabalhariam somente a esforços normais, porém na prática as cargas distribuídas das telhas somadas, o peso próprio e a pressão do vento geram flexão nos banzos, exigindo que sejam capazes de resistir a condições semelhantes às de vigas comuns. Dessa forma um perfil adequado seria um perfil do tipo I, orientado de modo que seu momento de inércia maior contribua com o momento resistente.

Já os montantes, em um modelo teórico, caracterizam-se por receber grandes esforços de compressão, porém, a ligação das treliças triangulares pouco abaixo da meia altura das peças introduz uma carga concentrada excêntrica que solicita os montantes com a carga das telhas da cobertura menor e metade da carga da estrutura abaixo delas. Isso significa que essas peças poderão sofrer flexão associada à compressão exigindo bastante resistência tanto ao escoamento da seção bruta quanto à ocorrência de instabilidades (laterais e de alma/mesa). Desse

modo, justifica-se a adoção de um perfil I para os montantes, cuja inércia e raio de giração, podem contribuir significativamente para a resistência da peça, se o perfil for bem posicionado. Os perfis serão posicionados então com a alma em sentido transversal ao eixo da treliça principal.

As diagonais da treliça foram concebidas para trabalhar somente à tração, de modo que, quando da ocorrência de ações contrárias devidas ao vento, os esforços normais serão transmitidos pelas diagonais contrárias. Um perfil adequado para as diagonais seria um perfil de cantoneiras duplo L simétrico, até mesmo pela conveniência da ligação, considerando que o espaçamento utilizado entre as cantoneiras pode ser a altura do perfil I dos montantes.

As vigas metálicas biapoiadas nos pilares centrais recebem predominantemente cargas verticais devido às telhas das coberturas que nelas se apoiam, além da carga referente ao peso próprio. Por conta das treliças triangulares de travamento e dos travamentos no plano XY pode-se considerar que as vigas não recebem esforços horizontais significativos, podendo ser dimensionadas somente à flexão. O perfil mais adequado para esse caso seria então um perfil tipo I, preferencialmente posicionado com o eixo de maior inércia paralelo ao plano XY para contribuir com o momento resistente à flexão.

As demais diagonais da estrutura foram concebidas para trabalhar somente à flexão, de maneira semelhante às diagonais da treliça principal. Dessa maneira, o perfil mais indicado para o caso seria o mesmo que para o caso das diagonais da treliça principal, um perfil de cantoneiras duplo L simétrico, ou mesmo um perfil L simples, dependendo do caso.

Finalmente, para as terças que apoiam as telhas da cobertura, o perfil mais indicado seria o perfil tipo C, pois se trata de peças leves, cuja principal função é somente apoiar as telhas nas vigas, não desempenhando função estrutural importante no conjunto.

8.4. Determinação dos carregamentos

8.4.1. Carregamentos considerados no cálculo da estrutura

Para o dimensionamento da estrutura de aço, deverão ser considerados o peso próprio das telhas autoportantes, o peso próprio dos elementos da estrutura de aço, uma sobrecarga e os carregamentos devido as ações do vento.

Como já descrito anteriormente, as telhas autoportantes para vencer vãos com as características e dimensões das seções dos módulos resultam um peso próprio entorno de 20 kg/m². Também já mostrado, será adotado um carregamento devido às ações do vento de16 kg/m² para o caso depressões positivas do vento e de 72 kg/m² para pressões negativas.

O peso próprio dos elementos da estrutura será determinado com base em um pré-dimensionamento descrito à frente.

O anexo B, prescrições complementares sobre as ações causadas pelo uso e ocupação, da norma NBR 8800:2008 sobre projetos de estruturas de aço e de

estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, em seu capítulo B.5 - Sobrecargas em Coberturas, diz que em casos especiais como no shed proposto deve-se adotar como valor mínimo uma sobrecarga característica de 25 kg/m², que engloba tanto instalações elétricas, hidráulicas, isolamento termoacústico e peças fixadas, assim como uma lâmina d´água de até 20 cm.

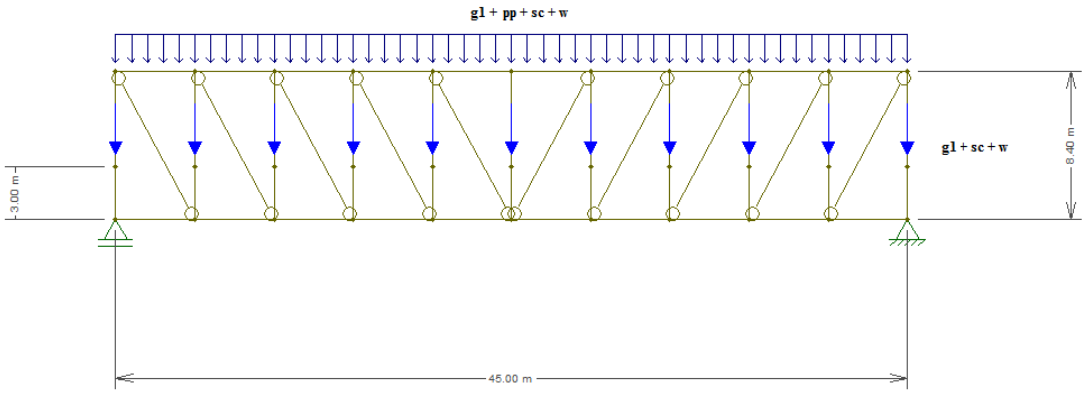


Figura 123 - Disposição dos carregamentos considerados no projeto na treliça maior, FONTE: Autoria do próprio grupo;

O resultado da composição dos carregamentos a serem considerados no projeto pode ser visto na figura acima, onde é representada a treliça maior da estrutura e os carregamentos que nela espera-se que atuem.

8.4.2. Determinação do peso próprio e esforços

Para a determinação do carregamento devido ao peso próprio da estrutura seria necessário o conhecimento do peso linear de todos os seus elementos componentes, porém esse dado somente pode ser obtido após o dimensionamento das peças, que por sua vez, depende dos esforços que aparecem no elemento devido à distribuição do carregamento atuante no conjunto.

Nota-se, assim, uma indefinição que dependerá inicialmente de uma boa estimativa inicial dos prováveis perfis dos elementos para ser resolvida.

Existem na literatura, alguns valores recomendados como uma boa estimativa de peso próprio da estrutura, dependendo da finalidade da mesma. Será adotado, pois, o valor de 20 kgf/m² como estimativa inicial do peso próprio da estrutura, conforme recomendado pela literatura para coberturas metálicas de grandes vãos.

Partindo-se do esquema unifilar resultante da concepção da estrutura é possível estimar a provável distribuição de cargas entre os elementos e prever quais serão as peças mais solicitadas do conjunto. Como visto anteriormente, as três treliças de 46 m foram concebidas para funcionar como os elementos fundamentais da estrutura metálica, sustentado as telhas e transmitindo os esforços verticais para os pilares nas laterais do edifício. É natural, portanto, que recebam as maiores cargas e sejam compostas pelas peças mais resistentes do sistema, sendo responsáveis, assim, pelo maior consumo de aço no conjunto. Dessa forma, espera-se que a maior parte do peso próprio da estrutura seja devido às três treliças.

Para verificar a qualidade da estimativa inicial e para se aproximar do real valor do peso próprio será necessário realizar um pré-dimensionamento da estrutura metálica de modo que seja possível obter melhores informações a respeito da carga relativa ao peso próprio dos elementos, até então desconhecida, para o posterior dimensionamento adequado das peças.

Por se tratar de um pré-dimensionamento, será suficiente analisar somente uma das três treliças, pois se espera que o comportamento da estrutura seja o mesmo nos três subconjuntos de placas, sendo que o estudo de um subconjunto adequado pode fornecer estimativas representativas para toda a estrutura. A análise do caso mais crítico, ou seja, o vão mais solicitado, resultaria em valores maiores do peso próprio deixando a estimativa mais a favor da segurança. Desse modo, a treliça escolhida para a análise foi a de maior altura (8,4mx46m), correspondente ao subconjunto que forma a maior área de placas.

Serão estudados, porém, dois cenários críticos para o pré-dimensionamento devido aos resultados da análise do vento. No primeiro cenário, as pressões positivas do vento nas placas serão combinadas com o peso próprio estimado da estrutura, o peso das telhas e a sobrecarga mínima recomendada pela norma. No segundo cenário, visando uma situação mais crítica, não será considerada a sobrecarga e as pressões negativas do vento serão combinadas somente com o peso próprio estimado da estrutura e o peso das telhas.

Tabela 9- Carregamentos adotados para cada cenário

Cenário 1	
pp	20 kgf/m²
tl	20 kgf/m²
sc	25 kgf/m²
w+	16 kgf/m²
Total	81 kgf/m²

Cenário 2	
pp	20 kgf/m²
tl	20 kgf/m²
w-	-72 kgf/m²
Total	-32 kgf/m²

Para estimar a parcela da carga sustentada pela treliça, utiliza-se o método da área de influência de carregamentos, um procedimento comum entre os projetistas. Sendo a estrutura da cobertura biapoiada na viga de concreto da parede de 46 m e na treliça, considera-se uma área de influência para a treliça traçando-se uma linha imaginária que divide a área em planta da cobertura maior pela metade, assumindo-se, para efeito de simplificação, que metade da carga da cobertura maior seja sustentada pela viga de concreto e a outra metade pela treliça, denominada de viga V1.

De maneira análoga, considera-se que a estrutura da cobertura menor tem o mesmo comportamento, distribuindo as cargas igualmente entre a treliça e a viga de aço V2 que apoia o vale seguinte.

O esquema abaixo ilustra a área de influência resultante para a treliça (V1).

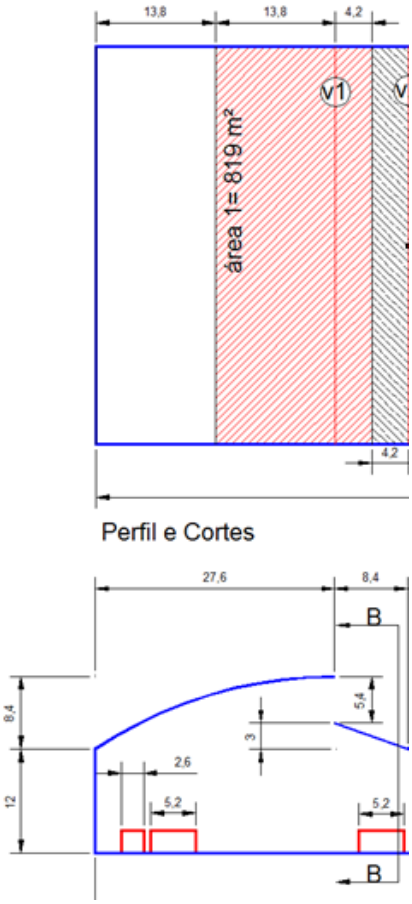


Figura 124 - Planta e corte indicando a abrangência da linha de influência para o subconjunto maior, FONTE: Autoria do próprio grupo;

É importante ressaltar que, a consideração de que a distribuição entre as vigas seja de metade do peso da estrutura implica em uma simplificação, já que na prática o centro de massa da estrutura estaria deslocado para mais próximo de V1 resultando reações maiores. Porém, para efeito de pré-dimensionamento, essa simplificação é considerada adequada, pois qualquer singularidade que, se desprezada ou simplificada eventualmente significasse um erro, este já estaria compensado dentro da estimativa inicial de 20 kgf/m².

Aplicando-se o mesmo método para os outros dois subconjuntos, obtém-se o seguinte esquema:

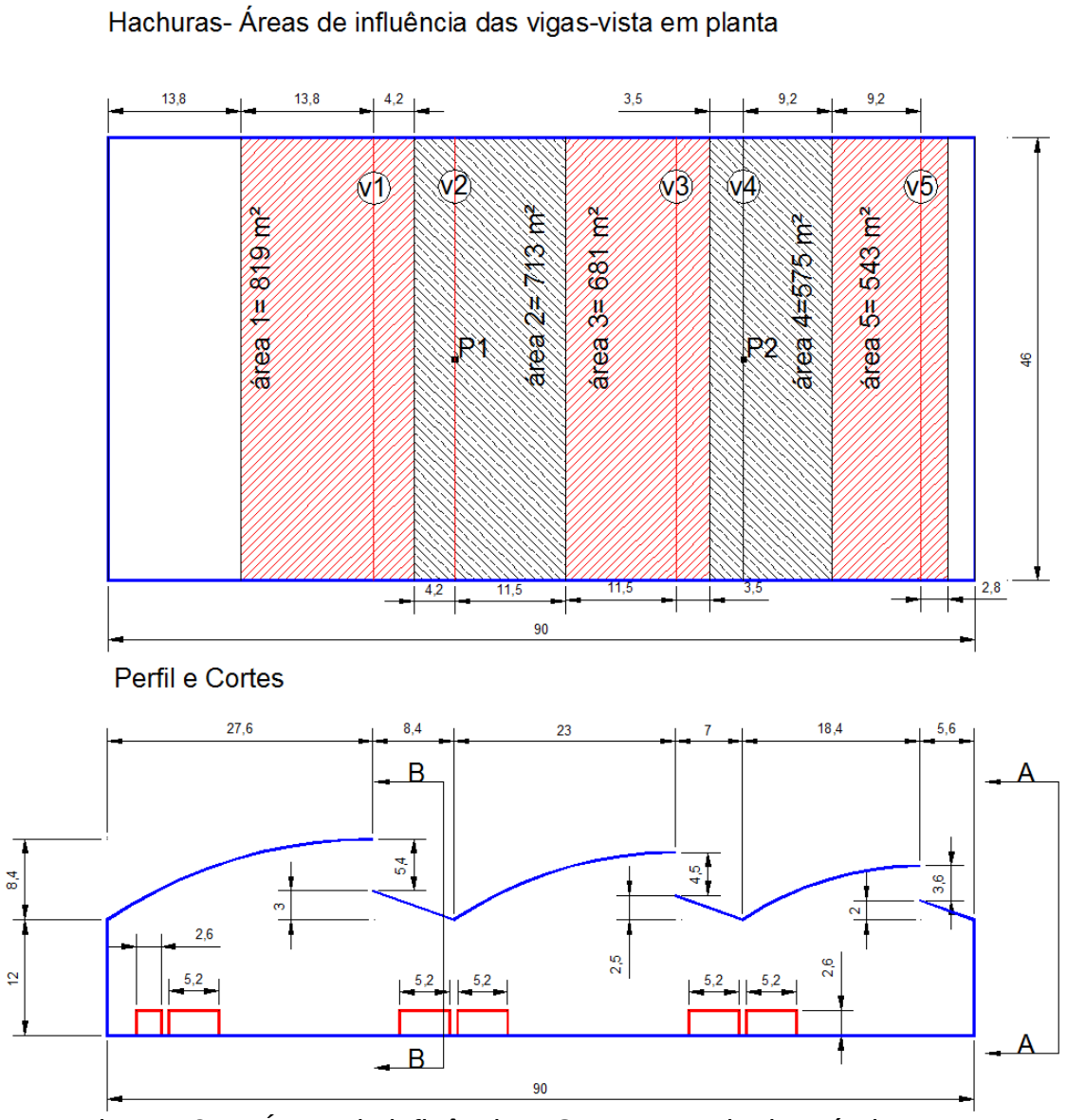


Figura 125 – Áreas de influência, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Considerando o cenário 1 e multiplicando-se a carga total para o mesmo (81 kgf/m²) pela largura da área de influência (18m) de V1 obtém-se o carregamento linear atuante na treliça.

$$P = 81 \times 18 = 1458 \text{ kgf/m}$$

Para estudar o comportamento da treliça, aplica-se esse carregamento a um modelo simples de barra biapoiada:

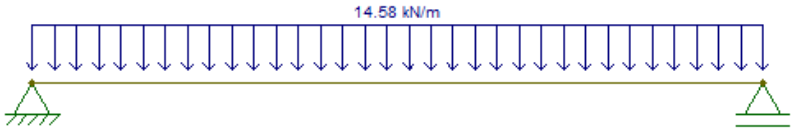


Figura 126 - Esquema de barra biapoiada para V1

Os resultados de momento fletor e força cortante são então facilmente calculados:

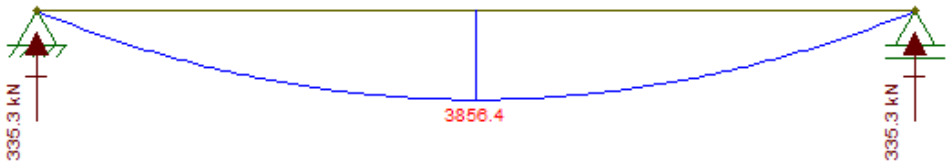


Figura 127 - Diagrama de momentos fletores para V1

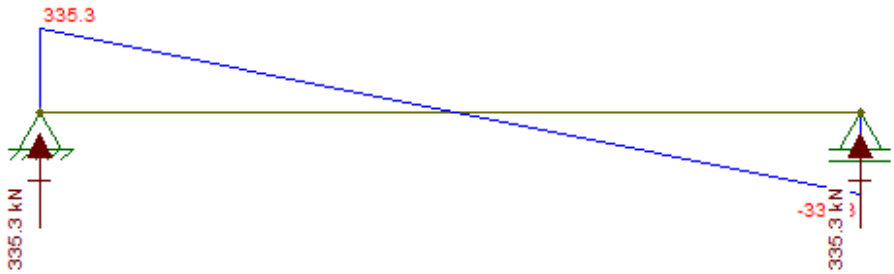


Figura 128 - Diagrama de forças cortantes para V1, FONTE: Autoria do próprio grupo;

O momento máximo ocorre no meio do vão e vale M = 3856,4 kN.m enquanto a força cortante máxima ocorre nos apoios e vale V = 335 kN, conforme visto nas figuras acima. É importante ressaltar que o modelo de barras adotado é puramente hipotético e somente foi utilizado para a investigação do comportamento ideal da treliça.

Dividindo-se o momento máximo pela altura da treliça (braço), obtém-se a força normal que se espera que ocorra nos banzos superior e inferior da treliça. Assim, N = M/b = 459 kN.

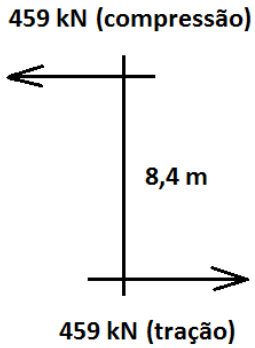


Figura 129 - Esquema de esforços nos banzos da treliça, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Agora, basta verificar a flexão localizada nos 10 trechos de 4,6 m do banzo compreendidos entre os 11 montantes para averiguar se os esforços decorrentes dessa flexão, que a princípio parecem pequenos, deverão ser considerados no cálculo.

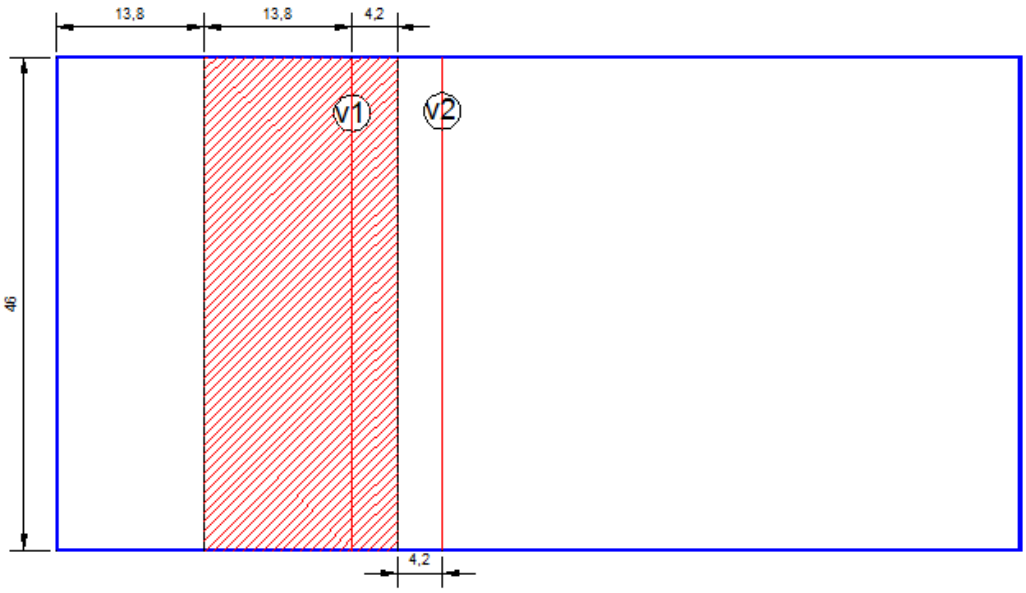


Figura 130 - Área de influência para o banzo superior de V1, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Para isso considera-se novamente uma área de influência, mas dessa vez somente para a cobertura maior do subconjunto, pois apenas o banzo superior recebe sua carga direta. Em seguida, multiplica-se a carga total da estrutura estimada para o cenário 1 (81 kgf/m²) pela largura da área de influência (13,5 m), obtendo-se a carga distribuída no banzo superior. O resultado é um carregamento distribuído p = 10,9 kN/m.

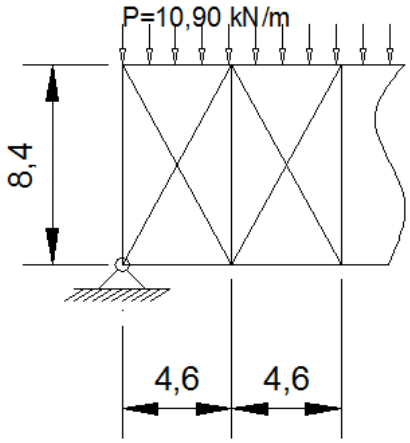


Figura 131 - Representação da carga atuante no banzo superior, FONTE: Autoria do próprio grupo;

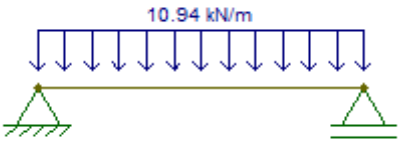


Figura 132 - Carregamento no banzo superior, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Para esse carregamento, o diagrama de momento fletor resultante é o seguinte:

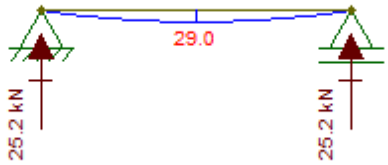


Figura 133 - Diagrama de momentos fletores no trecho de banzo entre montantes, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Observa-se que o momento máximo ocorre no meio do vão e vale M = 29 kN.m. Dessa forma, observa-se que no banzo superior sobrepõe-se os esforços solicitantes de força normal de compressão, no valor de 459 kN, e momento fletor, no valor máximo de 29 kN.m. A figura abaixo representa um corte esquemático do banzo superior e os esforços citados:

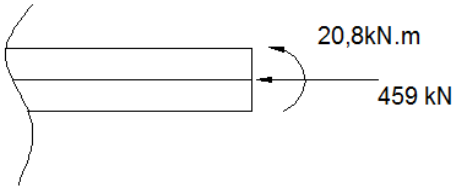


Figura 134 - Corte esquemático de um trecho de banzo superior e os carregamentos nele atuantes, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Embora pequeno, o momento fletor combinado juntamente à força normal de compressão pode representar um acréscimo considerável de compressão na zona comprimida da seção transversal, necessitando, eventualmente, de um dimensionamento à flexo-compressão. Para verificar a influência do momento divide-se M por N para obter-se a excentricidade equivalente da força normal.

$$e = M/N = 0{,}0628 \text{ m} = 6 \text{ cm}$$

O cálculo revela uma excentricidade muito baixa à qual, embora não tenhamos a seção exata do banzo, é possível garantir com segurança que a influência do momento pode ser desprezada nessa etapa de pré-dimensionamento. Dessa maneira, a análise se aproxima de um modelo de treliça ideal, em que somente existe transmissão de esforços por força normal, resultando somente esforços de compressão no banzo superior e tração no banzo inferior.

Para a fase final do pré-dimensionamento, deve-se fixar um tipo de aço para que seja possível determinar as tensões admissíveis de compressão e tração a partir das quais resultarão as áreas mínimas necessárias para o perfil de cada peça.

Para os banzos será adotado inicialmente o aço ASTM-A36, o mais utilizado para a fabricação de perfis soldados e cujas propriedades são as seguintes:

- Fy = 250 MPa
- Fu = 40 MPa

Como nesta fase de pré-dimensionamento o modelo da viga V1 analisado encaixa-se no modelo ideal de treliças, cada peça será pré-dimensionada somente com base nas verificações dos esforços resistentes às forças normais.

Assim, para que a peça analisada seja minimamente segura, deverá atender à seguinte verificação:

$$N_{sd} \leq N_{rd}$$

Sendo N_{rd} o valor da força normal resistente e N_{sd} o valor da força normal solicitante de cálculo.

Assim segue-se com o seguinte desenvolvimento:

$$\gamma_f \,.N_{sk} \leq N_{rd}/\ \gamma_{a,y}$$
$$\gamma_f \,.\ \gamma_{a,y}.N_{sk} \leq N_{rd}$$
$$\gamma_f \,.\ \gamma_{a,y}.N_{sk} \leq f_y.A$$
$$A \geq \gamma_f \,.\ \gamma_{a,y}.N_{sk} \,/\, f_y$$
$$A \geq N_{sk} \,/(\, f_y \,.\ \gamma_f \,.\ \gamma_{a,y})$$

Sendo N_{sk} o valor característico da força normal solicitante, γf o coeficiente majorador de ponderação do esforço solicitante e $\gamma_{a,y}$ o coeficiente minorador do esforço resistente. Os valores usualmente adotados para esses coeficientes variam conforme o tipo da estrutura e o tipo da ação envolvida sendo que para o presente caso, serão adotados os valores de γ_f = 1,4 e $\gamma_{a,y}$ = 1,1, resultando numa constante 0,6 que será multiplicada pela tensão de escoamento fy, resultando em:

$$A \geq N_{sk} \,/(0{,}6.f_y)$$

Esta será a relação utilizada para a determinação da área do perfil de peças tracionadas, levando-se em conta apenas a verificação ao escoamento da seção bruta por se tratar de um processo de pré-dimensionamento.

Para o caso de peças comprimidas a verificação ocorre considerando, além da capacidade resistente do aço ao escoamento, a possibilidade de ocorrência de flambagem. Assim, aplicando-se a mesma verificação anterior, tem-se:

$$N_{sd} \leq N_{rd}$$

Seguindo com o desenvolvimento:

$$\gamma_f \,.N_{sk} \leq N_{rd}/\ \gamma_{a,y}$$
$$\gamma_f \,.\ \gamma_{a,y}.Nsk \leq N_{rd}$$
$$\gamma_f \,.\ \gamma_{a,y}.N_{sk} \leq \chi.Q.A.\ f_y$$
$$A \geq \gamma_f \,.\ \gamma_{a,y}.N_{sk} \,/\, (\chi.Q.f_y)$$
$$A \geq N_{sk} \,/(\chi.Q.f_y \,.\ \ \gamma_f \,.\ \gamma_{a,y})$$

Sendo χ o fator de redução de capacidade resistente devido a imperfeições prevendo-se instabilidades (flambagem teórica) e Q o fator de instabilidade local.

FRUCHTENGARTEN e PIGNATTA (2012) recomendam que uma boa estimativa de valor inicial para χ seja χ = 0,5 e para Q seja Q = 1. Assim, assumindo-se os mesmos valores de γ_f e $\gamma_{a,y}$ utilizados para a verificação à tração, obtém-se a seguinte constante que será multiplicada pela tensão de escoamento:

$$A \geq N_{sk} /(0,33.f_y)$$

Seguindo-se a realização dos cálculos, serão escolhidos os perfis com base nas áreas que resultarem das verificações acima. Serão estudadas as seguintes peças:

- Banzo Superior - Compressão
- Banzo Inferior - Tração
- Diagonais – Tração
- Montantes - Compressão

8.5. Escolha dos perfis

Banzo Superior

$$A \geq 459/(0,33.25)$$
$$A \geq 57,4 \text{ cm}^2$$

O valor da área conduz então a duas opções de perfis dentro dos perfis soldados do tipo VS, (próprios para vigas):

- VS 300 x 46 (A=58,1 cm², massa linear = 45,6 kg/m)
- VS 450 x 51 (A = 65,2 cm², massa linear = 51,2 kg/m)

O perfil escolhido então será o VS 300 x 46, pois possui a menor massa linear.

Banzo Inferior

Supondo que os travamentos em x no plano XY e as treliças verticais triangulares de travamento da cobertura menor estão apoiados nos montantes e estes transmitem as cargas para as diagonais que as descarregam nos pilares, o banzo inferior trabalha, por hipótese, somente à tração. Assim sendo:

$$A \geq 459/(0,6.25)$$
$$A \geq 30,6 \text{ cm}^2$$

O perfil escolhido resultaria em um perfil mais leve e de menor área, porém por razões estéticas e de estabilidade, será adotado o mesmo perfil que para o banzo superior.

O perfil escolhido então será o VS 300 x 46.

Montantes

Por hipótese, considera-se que os demais elementos que se sustentam nos montantes, como os travamentos no plano XY e as treliças triangulares, já estão

considerados dentro da estimativa inicial de peso próprio da estrutura, sendo que os esforços decorrentes dessa solicitação são os mesmos considerados na análise da treliça como viga simples biapoiada. Dessa maneira, tem-se:

$$A \geq 335/(0,6.25)$$
$$A \geq 22,3 \text{ cm}^2$$

Muito embora tenham sido desconsiderados outros esforços nos montantes além da pura compressão, reconhece-se que essas peças podem sofrer com esforços de flexão ou torção e, por isso, um perfil mais adequado para uma estimativa inicial seria o perfil tipo viga-pilar CVS. O valor da área conduz então a seguinte opção de perfil dentro dos perfis possíveis: CVS: CVS 150 x 22 (A=27,6 cm², massa linear = 21,7 kg/m).

Diagonais

Considerando que a treliça foi concebida para resistir a solicitações verticais que podem inverter de sentido devido aos ventos, foram adotados travamentos em x para que o conjunto esteja travado seja qual for o sentido das ações externas resultantes. Dessa forma, considera-se que as diagonais, concebidas para transmitir os esforços por tração na treliça, quando solicitadas em sentido inverso não trabalhem à compressão, sendo que a estabilidade estaria garantida pelas diagonais contrárias. O tipo de perfil mais adequado para as diagonais é o de cantoneiras, sendo o tipo adotado.

As diagonais da treliça fazem um ângulo de 25˚com os montantes sendo que o esforço normal solicitante nas peças é uma parcela da força cortante calculada no modelo de viga biapoiada desenvolvido para a treliça.

Assim:

$$A \geq 335/(\cos 25^{\circ}.0,6.25)$$
$$A \geq 24,6 \text{ cm}^2$$

O valor da área conduz então a duas opções de perfis dentro dos perfis soldados do tipo duplas cantoneiras de abas iguais, (próprios para diagonais de travamentos):

- ┐┌ 76 x 9,5 (A=27,2 cm²; massa linear = 21,4 kg/m)
- ┐┌ 102 x 6,4 (A=25 cm²; massa linear = 19,6 kg/m)

O perfil escolhido então será o ┐┌ 102 x 6,4, pois possui a menor massa linear.

Aplicando as massas para cada elemento de um painel genérico da treliça, é possível obter o peso por painel e assim o peso próprio de toda a treliça. A figura abaixo exemplifica um painel genérico e as respectivas massas de cada elemento.

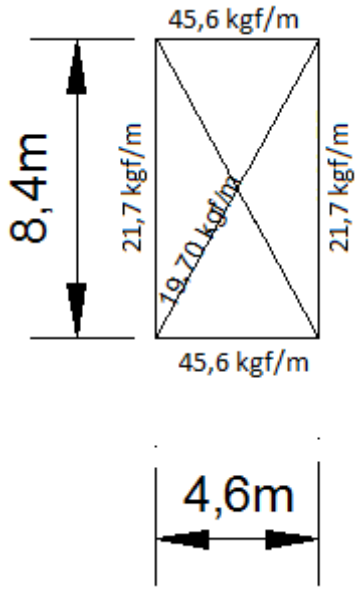


Figura 135 - Esquema de um painel genérico da treliça e a massa linear de seus elementos, FONTE: Autoria do próprio grupo;

Multiplicando-se as massas lineares dos montantes e das diagonais pelos seus respectivos comprimentos obtém-se a o peso das peças, que divididos pela largura do painel (4,6m) resulta no peso da peça por metro de treliça. Somando-se os pesos por metro de montantes e diagonais aos pesos por metro de banzo, que divido pela largura da área de influência (18m) resulta como peso próprio por unidade de área o valor de 12 kgf/m².

A princípio nota-se a nítida diferença entre o valor estimado inicialmente (20 kgf/m²) e o valor resultante da análise após o pré-dimensionamento das peças (12 kgf/m²). Porém, essa diferença pode ser explicada pelo fato de que o valor encontrado pelo pré-dimensionamento diz respeito somente à treliça, sendo que não engloba os demais componentes da estrutura como os travamentos no plano xy ou as treliças triangulares verticais que travam a estrutura longitudinalmente. Portanto, o peso da treliça corresponde a aproximadamente 60% do peso inicialmente estimado para o conjunto de todas as peças que carregam a treliça, incluindo travamentos, chapas de ligação, conexões e a própria treliça.

Conclui-se, portanto, que o valor adotado inicialmente está adequado para os cálculos posteriores relativos ao dimensionamento das peças.

Com relação ao cenário 2, observa-se que o carregamento resultante, em módulo, é menor que o carregamento resultante para o cenário 1, sendo possível concluir que, muito embora os esforços nos banzos se invertam, ou seja, o banzo superior passe a trabalhar a tração e o inferior a compressão, os módulos das forças normais serão menores, o que significa que os perfis necessários serão os mesmos determinados no cenário 1, já que estão pré dimensionados para os esforços mais críticos.

No entanto, é importante ressaltar que se deve prever um reforço nos pilares aos quais será conectada a estrutura metálica, pois como se pôde observar, o efeito da ação do vento inverte o sentido do carregamento, solicitando as conexões, e portanto os pilares, a esforços de tração. Como não foi obtida nenhuma informação

a respeito do dimensionamento original dos pilares de concreto, recomenda-se que os mesmos sejam reforçados prevendo a ocorrência desses eventuais esforços de tração.

8.6. Recomendações para o Dimensionamento

Para o adequado dimensionamento das peças componentes da estrutura, deverá ser adotado, conforme recomendação da norma NBR8800:2008, uma combinação de ações que represente de maneira mais fidedigna à frequência dos carregamentos esperados ao longo da vida útil da cobertura.

A NBR8800:2008 classifica as ações em uma estrutura segundo sua variabilidade no tempo, dispondo-as em três categorias: permanentes, variáveis e excepcionais. Ações permanentes são aquelas cuja ocorrência se dá com valores praticamente constantes, apresentando baixa variabilidade ao longo da vida útil da estrutura. Já, ações variáveis apresentam variações significativas em torno de sua média.

Tendo em vista as definições estabelecidas pela norma, os carregamentos previstos nesta cobertura projetada serão então divididos em:

- Ações Permanentes Diretas: Peso próprio da estrutura e peso próprio da telha;
- Ações Variáveis: Sobrecarga mínima e ação do vento;

Deve-se salientar que em um projeto mais detalhado seriam consideradas também as ações permanentes indiretas, devidas a deslocamentos de apoio e imperfeições geométricas, além de eventualmente as ações excepcionais, decorrentes de perturbações de duração extremamente curta e probabilidade muito baixa de ocorrência. Considera-se como excepcionais as ações resultantes de estímulos como incêndios explosões, choques de veículos, enchentes ou sismos de grande magnitude (nota de rodapé). Entretanto, o objeto deste estudo não se enquadra no perfil de estrutura susceptível à ocorrência de eventos considerados excepcionais, tanto devido à natureza de sua finalidade, cobertura de um ginásio de esportes, como devido às características da região em que está situado. Cada ação dá origem a um respectivo conjunto de esforços solicitantes na estrutura (M_k,N_k,V_k) os quais, obviamente, também estão condicionados à mesma classificação das ações que os originaram e, portanto, terão influência relativizada por meio de ponderações que busquem descrever sua variabilidade.

Para quantificar a representatividade de cada ação na determinação dos esforços de cálculo usados para a verificação do ELU será utilizada a chamada combinação última normal de ações, segundo recomendação da norma NBR8800:2008 para cálculo de estruturas metálicas.

$$F_d = \sum_{i=1}^{m} \gamma_{gi} . F_{Gi,k} \text{"+"} \gamma_q \left(F_{Q1,k} \text{"+"} \sum_{j=2}^{n} \psi_{2j} . F_{Qj,k} \right)$$

Onde:
$F_{G,k}$ é o valor característico da ação permanente;
$F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável principal;

$F_{Q2,k}$ é o valor característico da ação variável secundária que pode atuar concomitantemente à ação variável principal;
γ_{gi} é o valor de cálculo das ações permanentes;
γ_q é o valor de cálculo das ações variáveis;
Ψ_2 é o valor representativo das ações para ELU.

Deverão, portanto, ser definidas as ações primária e secundária para compor a combinação a ser utilizada nos cálculos. Entretanto não se pode determinar com exatidão qual ação representa maior significância para a estrutura, seja devido à recorrência como pela intensidade, tanto da lâmina d'água de 20 cm considerada na sobrecarga, quanto do vento de 42 m/s. Assim, recomenda-se que considere sempre dois cenários a serem comparados. No primeiro cenário, a composição levaria em conta a ação do vento como ação variável primária e a sobrecarga como ação variável secundária. No segundo cenário, a ação variável principal seria a sobrecarga e a secundária, os ventos. A comparação deverá escolher o caso mais desfavorável para que seja utilizado no desenvolvimento dos cálculos.

Outro importante aspecto a ser considerado é o refinamento dos cálculos. A presença de uma viga treliça de travamento que acompanha o sentido longitudinal em planta do edifício pode representar incluir esforços na treliça não considerados na fase de pré-dimensionamento, o que pode, eventualmente, exigir uma análise mais detalhada, provavelmente em modelos computacionais mais precisos, de modo que se possa ter uma ideia mais clara do comportamento do conjunto.

Finalmente, algumas peças, originalmente concebidas somente para trabalhar com esforços normais, como os montantes das treliças principais, certamente receberão esforços cortantes devidos a ligações com outras peças ou mesmo devidos aos esforços do vento. No caso específico dos montantes, haverá eventualmente, na altura da ligação com o perfil C que dá suporte às telhas da cobertura menor, a transmissão de esforços transversais à peça, exigindo que a mesma seja dimensionada considerando a possibilidade da ocorrência de flexo-compressão.

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo realizado neste trabalho, em primeiro lugar, permitiu a compreensão de fenômenos pouco discutidos durante a graduação, porém de extrema relevância para o bom desempenho de uma edificação, qualquer que seja sua função. Por meio do aprofundamento do conhecimento tanto da dinâmica dos fenômenos físicos (energéticos e fluido dinâmicos) que ocorrem no interior de edificações, quanto da relação desses com as características da estrutura que encerra o ambiente interno (arquitetura, volumetria e composição), foi possível traçar hipóteses que orientassem a investigação do problema envolvendo o objeto deste trabalho, os módulos atuais do CEPEUSP. Essas hipóteses envolveram principalmente a influência da cobertura atual no comportamento da ventilação interna e o reflexo disso nas condições de micro-cilma verificadas no interior dos módulos, com vistas a propor soluções para os já conhecidos problemas de conforto térmico lá verificado.

As simulações computacionais por meio do software Design Builder conduziram a investigação ao longo do estudo e forneceram os dados necessários para comprovar as hipóteses ora levantadas. Vale ressaltar que, muito embora tenha sido gasto um bom tempo para a compreensão do funcionamento do software, julgou-se de fundamental importância o adequado entendimento das variáveis de entrada e de contorno, da modelação matemática, dos métodos com os quais realiza os cálculos e das informações retornadas para que fosse possível a análise dos resultados de maneira criteriosa.

Os resultados da análise da estrutura atual vieram a confirmar os problemas já conhecidos de conforto térmico e permitiram melhor entender o desempenho do edifício quanto à ventilação, contudo, ainda não foram suficientes para confirmar que realmente as hipóteses com relação à relevância das características da cobertura para a qualidade do micro-clima interno estavam corretas.

Dessa forma, foram realizadas simulações computacionais para uma nova cobertura, agora do tipo shed, sob as mesmas condições de contorno utilizadas para a simulação da estrutura atual, com o objetivo de verificar uma possível melhora no desempenho com relação à ventilação devida as características dessa nova cobertura e não de outra mudança paralela. Em outras palavras, submetidas à mesma condição climática externa e mesmos materiais na cobertura e no edifício como um todo, procurou-se simular o comportamento das duas estruturas, atual e shed, de forma a tornar evidente a influência somente da característica da cobertura no micro-clima interno. O que os resultados indicam é o que se esperava com base no que já havia sido pesquisado. De fato, a estrutura tipo shed proporcionou melhores números em relação à ventilação, temperatura e umidade, o que abriu margens para a confirmação das hipóteses adotadas, justificando a adoção do tipo de cobertura mais eficiente como solução para o problema.

Como resultado desse estudo, foi possível entender que, de fato, há uma forte relação da estrutura, particularmente a cobertura, com a intensidade e a característica dos fenômenos físicos que acontecem dentro do ambiente do edifício.

Em uma segunda análise, o contato com um novo software, que outrora foi bastante penoso devido ao desconhecimento de suas funções, acabou se tornando bastante

proveitoso, digno de destaque. O Design Builder permitiu a compreensão da dinâmica das trocas de ar e do comportamento térmico envolvido dentro das quadras cobertas do CEPEUSP. No decorrer das simulações, procurou-se manter o foco na relação da cobertura com as condições internas de ventilação verificadas, porém, também foi possível notar a influência de outros parâmetros para o conforto térmico, como a envoltória e suas características (número e posição de aberturas e materiais que a constitui). É importante ressaltar que estes parâmetros, porém, também foram mantidos os mesmos nas duas simulações, juntamente com as condições climáticas externas às quais era submetida a estrutura, variando-se somente a tipologia da cobertura para que fosse clara a influência dessa ultima no micro-clima interno.

10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 6123 - Força devido ao Vento em Edificações

ABNT. NBR 8800 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mista de aço e concreto de edifícios

BARDI, P.M. e Instituto Lina Bo. João Figueiras Lima, Lelé. Série Arquitetos Brasileiros. Lisboa, Portugal, 2000

BERIGO, Simone B. Avaliação de desempenho térmico de coberturas em clima tropical continental. São Paulo, 2008.

BLESSMAN, J - Aerodinâmica das Construções. Universidade federal do Rio Grande do Sul - Rio Grande do Sul, 1983.

BLESSMAN, J - O Vento na Engenharia Estrutural. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 1995.

BLESSMAN, J - Introdução ao Estudo das Ações Dinâmicas do Vento. Universidade federal do Rio Grande do Sul - Rio Grande do Sul, 1998.

CAMARGO, R.M. Estudo da eficiência para ventilação natural dos sheds em hospitais da rede Sarah. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2011

CARAM, R.M; PERÉN, J.I Interação da ventilação natural, mecânica e climatização: Estudo do hospital Sarah Kubitschek Fortaleza, do arquiteto João Filgueiras Lima, Lelé. In: ENCAC 2007-IX Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído, Ouro Preto, 2007. Anais... Ouro Preto:2007.

CARAM, R.M; GRECO, P.; PERÉN, J.I Análise computacional dos sheds da rede de hospitais Sarah Kubitschek utilizando o software Ansys CFX. In: ENCAC 2007-IX Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído, Ouro Preto, 2007. Anais... Ouro Preto:2007.

DE BENETTO, Gisele Saveriano. Avaliação da aplicação de modo misto na redução da carga térmica em edifícios de escritórios nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro. São Paulo: FAU-USP,2007.203 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

DOE / USA – Departamento de Energia dos Estados: Energy Plus. Disponível em: http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus>. Acesso em 15 de junho de 2013.

FROTA, A. B./ SCHIFFER, S. R. - Manual de Conforto Térmico. São Paulo, 1987.

FRUCHTENGARTEN, J – Apostila “Sistema Estruturais de Edifícios”

LIMA, João Figueiras. Arquitetura: uma experiência na área da saúde. São Paulo, 2012

LUKIANTCHUKI, M. A. A evolução das estratégias de conforto térmico e ventilação natural na obra de João Filgueiras Lima, Lelé: Hospitais Sarah de Salvador e do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

MATSUMOTO, et. al Realização de testes para a ventilação natural em túnel de vento para analisar a eficiência dos sheds em hospitais da rede Sarah. In: ENTAC 2010 – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Canelas, 2010. Anais... Canelas: 2010.

PERÉN, Jorge Isaac. Ventilação e iluminação naturais na obra de João Filgueiras Lima, Lelé: estudo dos hospitais da rede Sarah Kubitschek Fortaleza Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado) em Arquitetura e Urbanismo. Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2006.

PERÉN, Jorge Isaac. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo USP, 2007.

PERÉN, Jorge Isaac.; SANTOS, E. T.; LEITE, B. C. C. The influence of the sawtooth roof geometry in building ventilation. Proceedings of URBENVIRON CAIRO 2011. Cairo: HOUSING & BUILDING NATIONAL RESERCH CENTER OF EGYPT - HBRC, 2011. Anais... Cairo and El-Gouna, Egypt: [s.n.]. , Dezembro 2011.

PERÉN, Jorge Isaac.; SANTOS, E. T.; LEITE, B. C. C. Upward-airflow ventilation system: an architectural proposal for tropical weather. Proceedings of Zero Energy Mass Custom Homes - ZEMCH 2012 International Conference. Glasgow: The Glasgow School of Art, 2012. Anais…Glasgow, United Kingdom: [s.n.]. , Agosto 2012.

PEREN, Jorge Isaac.; LEITE, B. C. C. Monografia de qualificação apresentada ao Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Engenharia, GEOMETRIA E VENTILAÇÃO: AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO SHED NA VENTILAÇÃO NATURAL DE EDIFÍCIOS,Universidade de São Paulo, 2012.

SCIGLIANO, S. / HOLLO, V. - IVN – Índice de Ventilação Natural - Conforto Térmico em Edifícios Comerciais e Industriais em Regiões de Clima Quente. São Paulo, 2001.

Portal Metálica, disponível em <www.metalica.com.br>. Acesso em nov/2013

Arcotop, disponível em <www.arcotop.com.br>. Acesso em nov/2013

MANUAL “Telhas de Alumínio BEL METAL”

TISAKA, M. Critérios de Fixação de Preço de Serviços de Engenharia. Editora PINI, São Paulo, 1993..