UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

JONATAN ALVES DOS SANTOS

VENTILAÇÃO NATURAL EM MODELOS SIMPLIFICADOS DE MORADIAS: ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

CARUARU (PE)

2018

JONATAN ALVES DOS SANTOS

VENTILAÇÃO NATURAL EM MODELOS SIMPLIFICADOS DE MORADIAS: ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Pernambuco Campus Acadêmico do Agreste para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Gustavo Bono

CARUARU (PE)

2018

Catalogação na fonte:

Bibliotecária – Simone Xavier CRB/4-1242

S237v Santos, Jonatan Alves dos.

Ventilação natural em modelos simplificados de moradias: análise numérica da influência de parâmetros geométricos. / Jonatan Alves dos Santos. – 2018.

61f. ; il. : 30 cm.

Orientador: Gustavo Bono.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2018.

Inclui Referências.

1. Dinâmica dos fluidos. 2. Ventilação natural. 3. Ventilação - Edifícios. I. Bono, Gustavo (Orientador). II. Título.

620 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2018-151)

JONATAN ALVES DOS SANTOS

VENTILAÇÃO NATURAL EM MODELOS SIMPLIFICADOS DE MORADIAS: ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso a ser apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil Área de concentração: Estruturas

Data da Aprovação: Caruaru (PE), ___ de _____ de _____.

_____
Gustavo Bono, Dr.
(Orientador - Universidade Federal de Pernambuco - UFPE)

_____
Alessandro Romário E. A., Dr.
(Membro 1 - Universidade Federal de Pernambuco - UFPE)

_____
Mariana Fernandes dos Santos Vilella, Dra.
(Membro 2 - Universidade Federal de Pernambuco - UFPE)

_____
Clessio Leão Silva Lima, Dr.
(Coordenador da Disciplina - Universidade Federal de Pernambuco – UFPE)

AGRADECIMENTOS

A estes, os meus mais puros e sinceros agradecimentos:

Primordialmente a Deus, por ter me guiado toda a minha vida, me dando todas as ferramentas necessárias ao longo da jornada.

Aos meus pais, Josildo e Maria Rejane e a meu irmão Jefferson Alves por toda a força, amor e ensinamentos. A eles devo todas as minhas conquistas.

Ao professor orientador Gustavo Bono pela oportunidade concedida, pela paciência, ensinamentos e conselho que me permitiram desenvolver um trabalho em uma área que até então não conhecia.

A todos os meus colegas da universidade, não só pelas parcerias profissionais, mas principalmente pelos laços de amizade construídos que me fizeram crescer e me tornar uma pessoa melhor. Não irei citar todos os nomes, mas tenho a agradecer por todos os momentos compartilhados.

A todos que de forma direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho e pela conquista honrosa de concluir minha graduação pela Universidade Federal de Pernambuco - Centro Acadêmico do Agreste.

Os que são loucos o suficiente
para pensarem que podem mudar o mundo,
são os que o fazem.

Steve Jobs

RESUMO

Em regiões de condições climáticas extremas, com intenso calor, o resfriamento dos ambientes internos das edificações passa a ter um caráter primordial para a habitação dessas áreas. A ventilação natural, aliada a outros fatores como o design arquitetônico do edifício, condições do entorno, materiais usados na construção, etc. pode ser uma solução para a manutenção do ar fresco e de qualidade dentro do ambiente tendo como consequência um resfriamento interno com baixo uso de energia. O presente trabalho visa estudar como os parâmetros geométricos (inclinação do terreno e separação entre as edificações) influência à ventilação natural em modelos simplificados de moradias. Para isso, se fará uso dos conceitos da Engenharia do Vento Computacional, utilizando-se de um programa computacional para avaliar diferentes geometrias e disposições das edificações. Através dos exemplos analisados, será possível determinar os principais fenômenos aerodinâmicos que se originam devido às edificações. O conhecimento desses fenômenos é fundamental para analisar a eficiência do uso de ventilação natural e avaliar o conforto dos pedestres, além de possibilitar a determinação das cargas para o dimensionamento da estrutura, entre outras características.

Palavras-chave: Engenharia do Vento. Ventilação Natural. Dinâmica dos Fluidos Computacional.

ABSTRACT

In regions of extreme climatic conditions, with intense heat, the cooling of the internal environments of the buildings has a primordial character for the buildings of these areas. Natural ventilation, combined with other factors such as the architectural design of the building, surrounding conditions, materials used in construction, etc. may be the best solution for keeping fresh air and quality inside the environment resulting in low energy internal cooling. The present work aims to study how the slope of the terrain influences the natural ventilation in simplified housing models. To do so, we will use the concepts of Wind Computer Engineering, using a computer program to evaluate different geometries and layout of buildings. Through the examples analyzed, it will be possible to determine the main aerodynamic phenomena that originate due to the buildings. The knowledge of these phenomena is fundamental to analyze the efficiency of the use of natural ventilation and to evaluate the comfort of the pedestrians besides determining the loads for the dimensioning of the structure, among other characteristics.

Keywords: Wind Engineering. Natural Ventilation. Computational Fluid Dynamics.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
1.1 Contextualização do problema 12
1.2 Modelagem Computacional 13
1.3 Justificativa 14
1.4 Motivação 15
1.5 Objetivos gerais e específicos 15
1.5.1 Objetivos gerais 15
1.5.2 Objetivos específicos 16
2 REFERENCIAL TEÓRICO 17
2.1 Escoamento do vento 17
2.2 Escoamento ao redor de edifícios 20
2.3 Carga do vento sobre as estruturas 21
2.4 Ventilação Natural 23
2.5 Influência das Aberturas 27
2.6 Vazão do ar através das aberturas 29
2.6.1 Equações de Frota (2001) 29
2.6.2 Equações da ASHRAE (2001) 30
2.6.3 Equações de Silvani (2005) 31
2.7 Critérios para avaliação da ventilação natural 31
2.8 Ventilação Natural como estratégia de climatização no Agreste Pernambucano 33
2.9 Dinâmica dos Fluidos Computacional 34
3 METODOLOGIA 37
3.1 Avaliação da eficiência da ventilação natural 39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 41
4.1 Inclinação do terreno de 0 41
4.1.1 Distância 1d 41
4.1.2 Distância 2d 43
4.2 Inclinação do terreno de 1/10 46
4.2.1 Distância 1d 46
4.2.2 Distância 2d 48

4.3 Inclinação do terreno de 2/10 50
4.3.1 Distância 1d 50
4.3.2 Distância 2d 52
4.4 Comparação dos resultados de vazão entre os diferentes métodos 55
5 CONCLUSÕES 56
5.1 Sugestões de trabalhos futuros 57
REFERÊNCIAS 58

1. INTRODUÇÃO

O estudo da natureza e suas ações tem um papel fundamental nas engenharias, pois através dele pode-se extrair elementos fundamentais para a humanidade, fazendo-se uso dos recursos naturais para trazer benefícios a diversos segmentos da sociedade. Assim, a análise dos efeitos do vento nas construções fornece um conjunto de dados que auxiliam engenheiros e arquitetos ainda na etapa de projeto tanto em relação a segurança das edificações e eficiência energética das mesmas.

A ventilação natural nas edificações pode ser utilizada para alcançar o conforto térmico. Além disso, a qualidade do ar interior pode ser melhorada através de uma otimização do fluxo de ar pelo ambiente, estas condições podem levar a níveis adequados de concentração de oxigênio, que contribuem para a promoção de uma boa saúde e um ambiente de vida agradável para os habitantes (STAVRIDOU, 2015). Assim, é preciso alinhar o projeto arquitetônico do espaço, com o uso de alta tecnologia e conhecimentos técnicos para alcançar uma atmosfera interior de alta qualidade.

Da declaração acima temos que a ventilação natural fornece ar fresco em edificações e dá suporte a respiração saudável dos habitantes da edificação e, além disso, fornece oxigênio e remove contaminantes do ar, promovendo assim uma boa qualidade do ar interior. De acordo com estudo do *World Business Council for Sustainable Development* (2010), os edifícios consomem aproximadamente 40% de toda a energia produzida no mundo, mais do que os setores de transportes e indústria por exemplo, sendo a maior parte deste consumo com a finalidade de alcançar o conforto térmico (refrigeração ou aquecimento) dentro das unidades. Por exemplo, as emissões de carbono e o consumo de energia de uma casa com ar condicionado são de aproximadamente 66% maiores do que uma casa naturalmente ventilada.

A ventilação natural é a melhor técnica para atingir temperaturas confortáveis dentro dos edifícios. No entanto, para obter a máxima eficiência, também são necessárias outras estratégias para controlar a temperatura ambiente. Em outras palavras, a ventilação natural pode melhorar o resfriamento de forma significativa, mas somente quando foi dada a devida atenção nos estágios primários do projeto de construção para minimizar a absorção de calor do ambiente circundante. Um design adequado e uma localização precisa das aberturas, juntamente com o tamanho das mesmas, são fatores fundamentais na produção do movimento de ar necessário para o conforto térmico. (AFLAKI et al., 2015).

Assim, mesmo nos casos onde não seja possível a utilização da ventilação do ambiente como solução única, uma combinação de sistemas de resfriamento ativo e soluções de

ventilação natural passiva tem o potencial de oferecer uma melhora em termos de níveis de temperatura e consequentemente reduzindo os custos relacionados com o consumo energético (TALEB, 2015).

A norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2005) apresenta recomendações quanto ao desempenho térmico de unidades habitacionais de interesse social aplicáveis na fase de projeto. Em regiões com condições climáticas como a encontrada no Agreste Pernambucano, especialmente na cidade de Caruaru a ventilação natural pode ser usada para gerar um maior conforto térmico nos ambientes internos.

Nos últimos anos a cidade de Caruaru, vem sofrendo um crescimento acelerado devido à interiorização das universidades e consolidação dos polos de moda e industrial, além do seu crescimento demográfico. O aumento da concentração da população demanda cada vez mais uma criteriosa avaliação das condições do meio, de forma que possam ser reforçadas as características do desenho da edificação permitindo atingir ou chegar próximo a uma condição de melhor e maior ventilação, tanto nos espaços internos como nos externos.

A eficiência da ventilação natural também é altamente dependente das edificações vizinhas, sendo que a análise quantitativa da ventilação natural em configurações de vários edifícios geralmente não é avaliada, devido à falta de procedimentos analíticos e numéricos simples.

A completa análise da ventilação natural também deve levar em consideração a inclinação do terreno e as demais condições do entorno, uma vez que esses parâmetros afetam o escoamento natural. No Brasil especificamente, esse ponto ganha importância pois com o grande crescimento dos centros urbanos e a limitação dos espaços disponíveis para construção, é frequente a mobilização das comunidades mais carentes para a periferia, ocupando terrenos por vezes com acentuadas inclinações como morros e encostas.

Outro aspecto que também precisa ser considerado é o estrutural, pois torna-se fundamental conhecer a ação do vento sobre as construções, facilitando o processo de decisão durante a fase de concepção da edificação. Nos últimos anos, arquitetos e engenheiros têm mostrado uma crescente preocupação na definição das formas de edificações e seus efeitos aerodinâmicos, reduzindo os custos de construção e custos colaterais durante a vida útil dos edifícios.

Assim, torna-se muito importante o conhecimento das pressões exercidas pelo vento nas edificações a fim de evitar que ocorram acidentes como a quebra de vidro ou desprendimento de elementos, como acontece em cobertas, colocando em perigo a vida de usuários e de pedestres. Está analise, além de ser fundamental no dimensionamento estrutural,

também, permite avaliar o conforto dos pedestres ao redor da edificação e a eficiência do uso de ventilação natural, etc.

Diante desta realidade podemos verificar a relevante importância de estudos como o apresentado no presente Trabalho de Conclusão de Curso. Investimentos na área de Engenharia do Vento sem dúvidas proporcionariam melhorias na engenharia de uma forma geral.

1.1. Contextualização do problema

O vento é gerado por diferenças de temperatura e pressão de massa de ar na atmosfera, trata-se de um processo de redistribuição da energia solar através dos movimentos da atmosfera. Também a diferença entre as superfícies, a evaporação da água, precipitação e rotação da Terra afetam as massas de ar que originam o vento.

Quando o vento atinge uma edificação, origina pressões estáticas nas superfícies externas da edificação. Estas pressões dependem principalmente da direção e velocidade do vento, densidade do ar, orientação da superfície e características do entorno. Uma edificação com uma geometria típica, apresenta pressão positiva à barlavento e negativa a sotavento. Sendo que, barlavento corresponde à região onde sopra o vento, em relação à edificação, e sotavento é aquela oposta de onde sopra o vento. Porém, essas pressões podem ser negativas ou positivas, dependendo da direção do vento e forma da edificação (Figura 1).

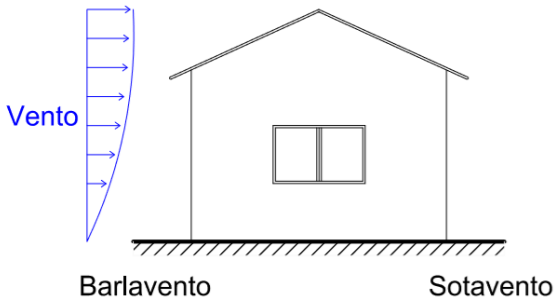

Figura 1 - Escoamento de vento sobre uma edificação simples. Fonte: Autor (2018).

O vento, geralmente, não provoca grandes problemas em construções baixas, robustas, com paredes grossas e coberta plana, porém tem maior impacto em estruturas esbeltas ou de paredes finas, tornando-se uma das ações mais importantes a ser estudada em projetos estruturais. A determinação das cargas aerodinâmicas em estruturas reais apresenta um elevado grau de dificuldade, pois estas são dependentes de diversas variáveis as quais são difíceis de serem calculadas. A norma brasileira NBR 6123/1988

"Forças Devida ao Vento em Edificações", fornece aos engenheiros uma forma direta de calcular os valores de cargas aerodinâmicas que devem ser consideradas no dimensionamento estrutural da edificação. Porém, algumas situações encontradas nas construções atuais, não são contempladas na norma, sendo necessário utilizar outros métodos, onde podemos citar as simulações computacionais.

1.2. Modelagem Computacional

O estudo de problemas envolvendo a ação do vento sobre estruturas tem sido tradicionalmente realizado por meio de técnicas experimentais desenvolvidas em túneis de vento. No entanto, com o crescente avanço na capacidade de processamento e armazenamento de dados dos computadores atuais, modelos numéricos cada vez mais complexos e eficientes têm sido elaborados e aplicados nesta área, conferindo à simulação numérica um alto grau de confiabilidade (MALISKA, 2013). Problemas que levavam anos para ser resolvidos a meio século atrás, hoje podem ser resolvidos em segundos com o auxílio de métodos computacionais. Porém quanto mais complexa a análise, maior a demanda por uma capacidade de processamento mais poderosa dos computadores e os cálculos podem levar mais tempo, sendo necessário o uso de máquinas cada vez mais sofisticadas para resolver os problemas da engenharia moderna (PLETCHER et al., 2013).

Assim, define-se Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) como um conjunto de metodologias aplicáveis a nível computacional que provê uma solução numérica para a simulação de um escoamento de um fluido (HIRSCH, 2007). A DFC é hoje uma poderosa alternativa aos métodos experimentais e ensaios em túneis de vento para obter informação detalhada das variáveis do escoamento em todo o domínio analisado. (BLOCKEN, 2015).

A DFC utiliza-se das técnicas numéricas disponíveis para a obtenção da solução das equações que governam a Dinâmica dos Fluidos, sendo obtidos como resultados as principais variáveis (velocidade, pressão, etc.) do escoamento nos domínios do espaço e do tempo. As equações de Navier-Stokes modelam os fenômenos relacionados à mecânica dos fluidos, sendo aplicáveis tanto a escoamento turbulento quanto laminar, sendo, no primeiro caso mais difíceis de serem resolvidas. Com relação as edificações, o escoamento geralmente é turbulento.

Neste trabalho, o escoamento é governado pelas equações de Navier-Stokes e pela equação de conservação de massa, considerando-se a hipótese de pseudo-compressibilidade para problemas isotérmicos. Será empregado o Método dos Elementos Finitos (MEF) para a

discretização espacial do domínio de análise. O programa HEXAFEM_3D_IFF emprega o esquema explícito de dois passos de Taylor-Galerkin, (BONO, 2011).

Algumas das principais vantagens da aplicação de um método numérico para fazer esse tipo de estudo é seu menor custo com relação aos métodos experimentais (geralmente com maiores custos), além de demandar um menor tempo total de análise e a possibilidade de uma maior variabilidade no uso de parâmetros físicos e geométricos e consequentemente sua maior versatilidade para a obtenção de resultados, já que, em algumas instancias, experimentos são impossíveis de serem conduzidos (LOHNER, 2008). As principais desvantagens dos modelos numéricos são as limitações computacionais para o caso da simulação de escoamentos turbulentos e os erros associados aos modelos numéricos. No trabalho de Franke et al. (2007), estabelece-se algumas orientações para discretização do domínio computacional no que diz respeito à Engenharia do Vento Computacional, a fim, de obter resultados de boa qualidade.

1.3. Justificativa

Nas últimas décadas, observou-se um crescimento importante na industrialização e construção civil no Brasil, proporcionando um aumento do número de edificações. O crescimento urbano sem planejamento, pode ocasionar problemas ligados à Engenharia do Vento, que são muito desafiadores em decorrência da complexidade dos fenômenos envolvidos, tais como: presença de recirculação, escoamentos turbulentos, interações entre fluido e estrutura, etc. Esses fenômenos podem provocar o desconforto para o usuários e pedestres ou até mesmo o colapso da estrutura. O vento exerce pressões e sucções nas edificações, de forma variada, contínua ou intermitente, causando muitas vezes efeitos indesejáveis, tais como arrancamento de telhas, desconforto aos pedestres e usuários das áreas em comum, entre outros. Ao entrar em contato com a superfície de um objeto qualquer, o vento tende a movimenta-lo juntamente com ele, podendo provocar a ruína total ou parcial da edificação.

O aumento da densidade populacional, maior número de edificações nas cidades, faz com que a interação do escoamento com as diferentes edificações seja complexa. O escoamento ao redor de uma edificação isolada pode sofrer alterações quando existe outra edificação próxima, modificando as distribuições de pressões e, portanto, a aerodinâmica da construção.

O estudo da interação do escoamento entre as diferentes edificações é fundamental já que através do mesmo podem-se detectar regiões nas quais: (a) a distribuição de pressão não favorece a ventilação natural, (b) o conforto dos pedestres resulta afetado por altas velocidades, (c) a estrutura precisa ser reforçada para suportar as forças devido ao vento, etc.

1.4. Motivação

A construção de vivendas adequadas as características (clima, topografia, etc.) da região pode resultar num consumo de energia substancialmente menor. Cabe salientar que é na fase de projeto da edificação onde são tomadas as decisões mais importantes associadas ao consumo futuro de energia. Sendo assim, a ventilação natural se constitui no principal recurso passivo para obtenção do conforto térmico, além de promover a redução do consumo energético com condicionamento artificial (ventilação mecânica e ar condicionado). Entretanto, existem restrições ao seu uso por parte dos engenheiros e arquitetos por não haver garantias de que ela possa resolver os problemas de conforto térmico, quando comparada aos sistemas artificiais. Nesse sentido, constata-se a importância de investigar formas de prever o comportamento da ventilação natural visando auxiliar a decisão no projeto.

A literatura indica um grande número de métodos que tem sido usado para estudar a performance da ventilação natural. Os programas de simulação numérica baseados na Dinâmica dos Fluidos Computacional são uma das ferramentas disponíveis para esses estudos. A simulação da ventilação permite mostrar o desempenho da edificação mesmo antes de ser construída. Sendo assim, a simulação é uma ferramenta de auxilio e suporte na tomada de decisões desde o momento da elaboração do projeto. Portanto, a utilização da DFC torna-se fundamental nos primeiros estágios de projeto, ou seja, na fase de concepção do edifício. Mesmo, em vivendas já construídas sempre é possível estudar e propor modificações arquitetônicas a fim de reduzir o consumo de energia através da ventilação natural.

Desse modo, o estudo dos efeitos aerodinâmicos do vento se reveste de imensa importância na concepção das edificações. Sendo este conhecimento indispensável para que o aluno de graduação em Engenharia Civil possa avaliar esses efeitos e elaborar critérios de projeto, afim de favorecer a ventilação natural, dimensionar com segurança os elementos estruturais, e proporcionar conforto aos pedestres e usuários da edificação.

1.5. Objetivos gerais e específicos

1.5.1. Objetivos gerais

Aplicar os conceitos da Engenharia do Vento Computacional para avaliar como a aerodinâmica de modelos simplificados de edificações é afetada pela modificação dos principais parâmetros geométricos.

1.5.2. Objetivos específicos

(a) modelar e simular através da DFC a aerodinâmica e a ventilação natural de modelos simplificados de vivendas populares, a fim de analisar o desempenho aerodinâmico e o conforto térmico das moradias frente a diferentes configurações geométricas;

(b) estudar como a inclinação do terreno e a separação entre as edificações afeta a ventilação natural.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Escoamento do vento

Um fluido pode ser definido como uma substância que se deforma continuamente, quando submetido a uma força tangencial constante qualquer (BRUNETTI, 2008). Para existir uma tensão de cisalhamento o fluido deve ser viscoso, o que é verdade para todos os fluidos reais. Porém, em alguns casos, é possível fazer uma aproximação definindo um fluido como não viscoso e, portanto, nenhuma tensão de cisalhamento pode existir no escoamento.

Um fluido é considerado incompressível se ao ser aplicada uma força sobre ele tendendo a comprimi-lo a variação da sua densidade é desprezível. Gases em escoamento isotérmico são considerados incompressíveis se a pressão dinâmica for pequena comparada a pressão atmosférica, e normalmente gases são também considerados incompressíveis se a velocidade do escoamento é menor que 100 m/s (SCHLICHTING, 1979). O escoamento ao redor de edifícios pode ser considerado incompressível.

Um escoamento de um fluido consiste em um grande número de partículas se movendo em uma direção preferencial. No escoamento laminar as partículas do fluido movem-se ao longo de trajetórias bem definidas, ocorrendo geralmente a baixas velocidades e em fluidos que apresentam grande viscosidade. No escoamento turbulento as partículas descrevem trajetórias irregulares, com movimento aleatório e caótico (Figura 2). Em geral, o vento ao redor das edificações é turbulento.

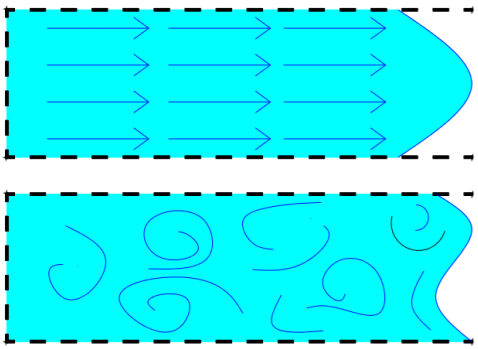

Figura 2 - Escoamento laminar vs escoamento turbulento. Fonte: Autor (2018).

A diferença no comportamento está associada com as forças que atuam no elemento de fluido. No caso do vento, as forças de gravidade podem ser desprezadas, onde o equilíbrio deve se estabelecer entre as forças de viscosidade, pressão e de inércia. O número de Reynolds (Re) pode ser interpretado como uma relação entre as forças de inércia e as forças de

viscosidade. A pressão pode ser considerada uma reação passiva, que está ligada às outras duas forças através do equilíbrio mútuo (BLESSMANN, 2011).

De uma forma geral, a transição de um escoamento laminar ordenado para um turbulento depende da razão entre as forças inerciais e viscosas a que o fluido está submetido. Essa razão é caracterizada pelo número de Reynolds e calculada da seguinte forma:

$$Re = \frac{\rho\, u\, l}{\mu} \tag{2.1}$$

onde ρ é a densidade do fluido, u a velocidade, l o comprimento característico (comprimento do corpo na direção do escoamento) e μ a viscosidade dinâmica.

O número de Reynolds é um exemplo de número adimensional (um número desprovido de qualquer unidade física que o defina). Números de Reynolds muito baixos indicam que as forças de viscosidade são extremamente grandes em presença das forças de inércia, podendo-se desprezar estas últimas. Por outro lado, números de Reynolds muito altos não indicam que as forças de viscosidade possam ser desprezadas (BLESSMANN, 2011).

Nos escoamentos newtonianos a tensão cisalhante e o gradiente de velocidade do fluido são proporcionais, sendo a constante de proporcionalidade chamada de viscosidade dinâmica. A lei de Newton da viscosidade, pode ser representada pela relação:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial m} \tag{2.2}$$

onde τ é a tensão cisalhante, μ a viscosidade dinâmica que varia de acordo com o fluido e a temperatura e $\frac{\partial u}{\partial m}$ é o gradiente da velocidade.

A viscosidade é um fator fundamental na determinação da separação do escoamento. Entretanto, em corpos angulosos ou corpos não aerodinâmicos (como edifícios), a separação acontece em uma aresta independentemente do número de Reynolds. Para uma edificação a separação se dá sempre em arestas, independentemente da velocidade do vento (BLESSMANN, 2011).

Na Figura 3, mostra-se o escoamento ao redor de uma edificação, observando-se que o escoamento de fluido irá acelerar do ponto de estagnação para as laterais. Por trás do obstáculo, região de sotavento, o movimento do ar é turbulento e a pressão estática é sempre menor do que a do escoamento livre.

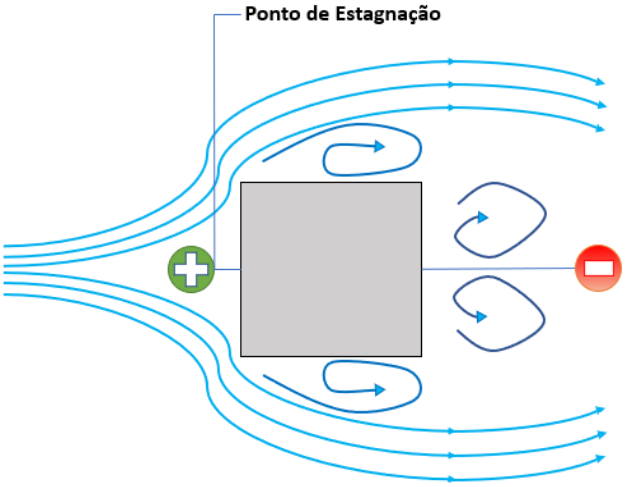

Figura 3 – Ponto de estagnação. Fonte: Autor (2018).

Devido a viscosidade do fluido, forças de fricção surgem entre as camadas nas vizinhanças do obstáculo (exceto para um baixo número de Reynolds, onde esta influência se faz sentir em uma região maior), e a velocidade vai decrescendo à zero do escoamento livre até a superfície de contato, de acordo com o princípio da aderência completa (partículas fluidas em contato com superfícies sólidas adquirem a mesma velocidade dos pontos da superfície sólida com as quais estabelecem contato). A região onde acontece este fenômeno denomina-se camada limite, e caracteriza-se por um gradiente de velocidade muito intenso (Figura 4).

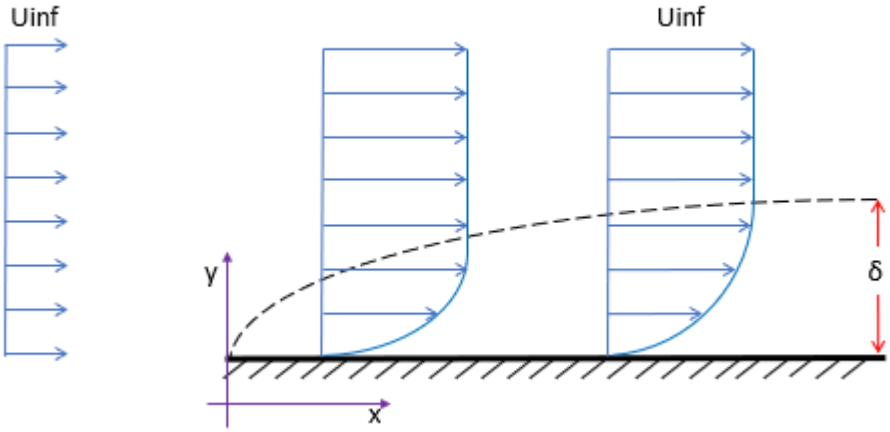

Figura 4 – Camada Limite. Fonte: Autor (2018).

A camada limite atmosférica (CLA) é a porção mais baixa da troposfera, sendo diretamente influenciada pela temperatura, hora do dia, relevos terrestres (prédios, casas, montanhas, etc.), poluentes, e os demais componentes que compõem a superfície terrestre, tornando-a normalmente turbulenta (MALHEIROS e DIAS, 2004). Tais aspectos conferem a

CLA uma espessura variável que pode ir das centenas de metros a alguns quilômetros. A camada de ar acima da camada limite chama-se atmosfera livre.

O estudo do escoamento é baseado nas leis de conservação. De modo geral, pode-se definir a lei de conservação para uma quantidade *U* da seguinte forma: "A variação da quantidade da variável *U* dentro de um dado domínio é igual ao balanço entre a quantidade desta variável entrando e saindo do domínio considerado, mais as contribuições de eventuais fontes geradoras de *U*." (HIRSCH, 2007, p.29).

Sabe-se que os princípios que descrevem a evolução do escoamento de um fluido são totalmente definidos pelas leis de conservação das seguintes quantidades:

a) Conservação de massa: a lei da conservação de massa ou equação da continuidade é derivada do princípio que a taxa de variação temporal da massa no interior do volume de controle é igual ao fluxo líquido de massa através da superfície de controle, ou seja, nenhuma massa é destruída ou criada no fluxo através do volume,
b) Conservação de momento: As equações de conservação do momento, ou Navier-Stokes, são derivadas do princípio que a força resultante sobre o volume de controle é igual à taxa de variação temporal da quantidade de movimento no interior do volume de controle mais o fluxo líquido de quantidade de movimento através da superfície de controle,
c) Conservação de energia: A equação de energia é derivada da mesma forma que a equação da continuidade em um volume infinitesimal, e da primeira lei da termodinâmica que diz que o calor transferido para um volume menos o trabalho total realizado sobre o volume, é igual à taxa temporal de variação de energia no interior do volume de controle mais o fluxo líquido de energia através da superfície de controle.

2.2. Escoamento ao redor de edifícios

A camada limite atmosférica é afetada pela presença do edifício, originando um vórtice à barlavento. A separação do escoamento se dá pelas arestas, tanto pelas laterais quanto pela cobertura, gerando zonas de recirculação que se estendem para jusante formando uma esteira. Além disso a distribuição da pressão na fachada do edifício é significativamente modificada. Devido à velocidade do vento ser maior na parte superior do edifício, a pressão correspondente é maior nesta região do que na parte inferior, forçando um fluxo descendente do ar que segue em direção a área de menor pressão, formando um vórtice de base (Figura 5).

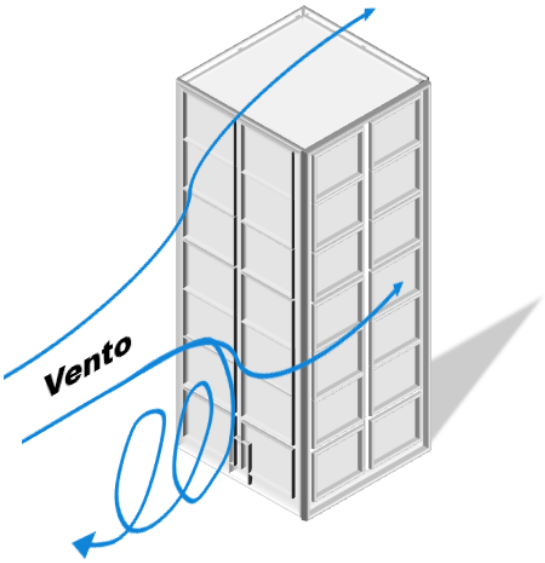

Figura 5 – Vento horizontal atuante em uma estrutura. Fonte: Autor (2018).

Baturin (1972) indica que essa perturbação no escoamento gerada por um edifício de altura H, exerce uma influência significante em um raio de até 5H à sua volta, sendo que na região da esteira (sotavento), essa influência se estende até uma distância de 15H.

O escoamento ao redor de edifícios é um tópico muito importante para a engenharia tanto no campo estrutural quanto com relação à aerodinâmica da edificação. A determinação das cargas do vento em edifícios é fundamental para o cálculo da estabilidade estrutural dos mesmos e para estabelecer e maximizar a ventilação natural e o cálculo da infiltração de ar.

2.3. Carga do vento sobre as estruturas

Ao atuar sobre estruturas, o vento gera pressões e sucções localizadas, as quais podem originar fortes cargas na estrutura. Quando o vento sopra sobre uma superfície existe uma sobrepressão (sinal positivo), porém, em alguns casos pode acontecer o contrário, ou seja, existir depressão (sinal negativo). Para projetar uma estrutura com segurança e economia é importante fazer uma análise da ação deste fenômeno natural sobre ela. A distribuição das pressões sobre o edifício depende da velocidade e direção do vento com relação ao edifício e do fato de estar exposto às correntes de ar ou protegido por outros edifícios ou obstáculos (FROTA e SCHIFFER, 2001).

Através dos coeficientes de pressão pode-se quantificar a ação da carga de vento sobre a estrutura. No Brasil a determinação das forças devidas ao vento deve ser calculada de acordo com a norma NBR 6123/1988 "Forças devidas ao vento em edificações", os coeficientes de pressão levam em consideração as pressões externas e internas.

Apesar de o vento não ter um impacto tão forte em construções baixas e robustas com paredes grossas, em estruturas esbeltas, a carga de vento é uma das ações mais importantes, portanto, precisa ser cuidadosamente avaliada para o cálculo estrutural do edifício.

Resultados numéricos e experimentais, revelam que a pressão a barlavento é independente da razão entre o comprimento e altura da edificação, mas as pressões a sotavento de edificações curtas são menores do que em edifícios de um longo comprimento (BLESSMANN, 2009). Isto é devido a "bolhas de separação" que surgem no telhado e que podem alcançar as laterais à sotavento em prédios curtos (CHU, 2014). Como as forças sobre edificações dependem da diferença de pressão, isto explica porque edificações esbeltas (baixa relação L/H) sofrem mais com o efeito da força do vento sobre a edificação, pois as pressões a sotavento são menores, causando uma maior diferença de pressão e consequentemente uma carga maior na direção do escoamento.

Muitos casos não são considerados dentro da norma NBR 6123, por isso, quando a edificação, seja por suas dimensões ou por sua forma não está contemplada na norma, deve-se recorrer a outros métodos para determinação dos esforços tais como ensaios em túneis de vento. Atualmente, a Dinâmica dos Fluidos Computacional é uma alternativa poderosa e importante para solução desse tipo de problema. Por exemplo, em Santos e Bono (2015) analisou-se edificações com plantas em formato de "U" e de "L" e através deste estudo foram determinados os principais parâmetros físicos do escoamento para este tipo de geometria. Na Figura 6, mostra-se a distribuição de pressão ao redor de edificações com plantas em formato de "L" e "U" do estudo citado acima.

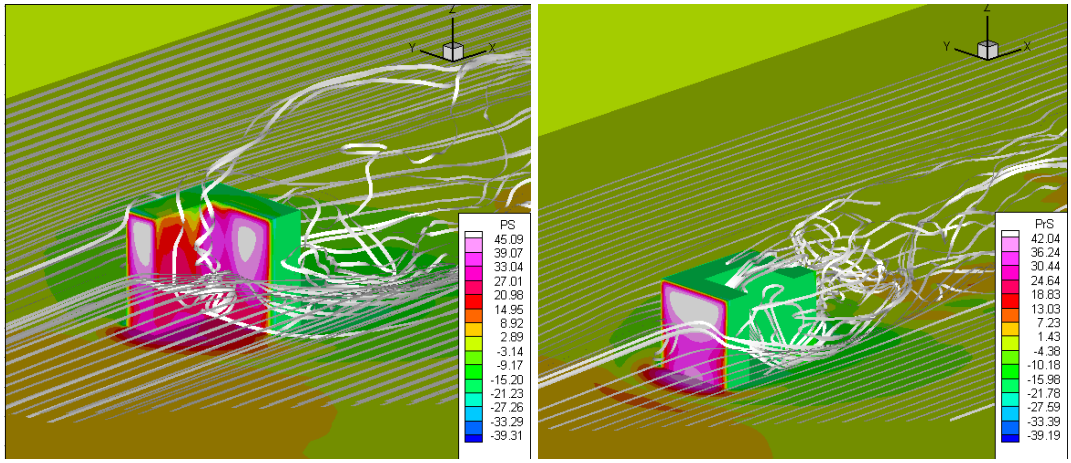

Figura 6 – Resultado de uma simulação numérica para edifícios em formato "L" e "U" respectivamente. Fonte: Santos (2015).

Outro fator a se levar em consideração é que, devido a zona de recirculação gerada na cobertura pelo desprendimento do escoamento, dependendo do comprimento do telhado muitas vezes o escoamento de fluido pode-se aderir novamente à superfície. Esse fenômeno faz com que a pressão externa sobre o telhado diminua, podendo surgir uma força resultante que tenderá a arrancar o telhado, sendo necessários cuidados no cálculo das componentes estruturais para sua sustentação. A maioria dos acidentes ocorre em construções leves, principalmente de grandes vãos livres, tais como coberturas de estádios, ginásios cobertos e etc.

As ações locais mais violentas em telhados correspondem a dois vórtices de topo que aparecem com o vento soprando a 45°, causando uma sucção que é responsável pelo arrancamento dos telhados na região mais solicitada, próximo à quina de barlavento, desenvolvendo-se em forma cônica ao longo das duas arestas do telhado, com seus eixos longitudinais um pouco inclinados em relação a essas arestas. São as sucções causadas por esses vórtices, algumas vezes unidas a uma sobrepressão interna, as responsáveis pelos casos cada vez mais frequentes de arrancamento parcial ou total de cobertas horizontais ou pouco inclinada, plana ou curvas, construídas com materiais leves e sem a consideração desse fenômeno (BLESSMANN, 2011).

2.4. Ventilação Natural

A troca de ar entre o interior e o exterior dos ambientes sem assistência mecânica como ventiladores ou sistemas de refrigeração é conhecida como ventilação natural (OMRANI, 2017). A ventilação proporciona a renovação do ar do ambiente, sendo de grande importância para a higiene em geral e para o conforto térmico em regiões de clima quente e úmido e no verão de regiões de clima temperado.

A evolução dos conceitos de conforto e de conservação de energia nos edifícios conduziu à aplicação de sistemas de utilização racional de energia. A ventilação natural é a principal estratégia de climatização nos climas quentes, tantos secos como úmidos, como também é nos climas frios, já que é necessário proteger-se do vento e controlar as infiltrações (FREIXANET, 2004). Assim, após o sombreamento, é a estratégia passiva mais importante para o Brasil.

Uma ventilação natural efetiva dentro dos edifícios pode significar uma economia de custos e energia comparado aos métodos artificiais devido ao baixo custo de manutenção e consumo de energia elétrica (OMRANI, 2017).

O deslocamento do ar pelo edifício, através de aberturas, umas funcionando como entrada e outras, como saída é o que se chama de ventilação natural. Assim, as aberturas para ventilação deverão estar dimensionadas e posicionadas de modo a proporcionar um fluxo de ar adequado ao recinto. O fluxo de ar que entra ou sai do edifício depende da diferença de pressão do ar entre os ambientes internos e externos, da resistência ao fluxo de ar oferecida pelas aberturas, pelas obstruções internas e de uma série de implicações relativas à incidência do vento e forma do edifício (FROTA e SCHIFFER, 2001).

Um desempenho térmico satisfatório da arquitetura, com a utilização apenas de recursos naturais, pode não ser possível em condições climáticas muito rígidas. Mesmo nesses casos devem-se procurar propostas que maximizem o desempenho térmico natural, pois, assim, pode-se reduzir a potência necessária dos equipamentos de refrigeração ou aquecimento, visto que a quantidade de calor a ser retirada ou fornecida ao ambiente resultará menor.

A diferença de pressões exercidas pelo ar sobre um edifício pode ser causada pelo vento ou pela diferença de densidade do ar interno e externo, ou por ambas as forças agindo simultaneamente. A força dos ventos promove a movimentação do ar através do ambiente, produzindo a ventilação denominada ação dos ventos. O efeito da diferença de densidade provoca o chamado efeito chaminé. Assim, a ventilação natural de edifícios se faz através desses dois mecanismos.

Quando a ventilação natural de um edifício é criteriosamente estudada, verifica-se a conjugação dos dois processos. No entanto, a simultaneidade dos processos pode resultar na soma das forças, ou pode agir em contraposição e prejudicar a ventilação dos ambientes. A identificação de ocorrência de uma ou de outra situação depende da análise de cada caso, especificamente (FROTA e SCHIFFER, 2001).

A ventilação por ação dos ventos se deve a diferença de pressão exercida sobre o edifício. O vento, considerado aqui como o ar que se desloca paralelamente ao solo em movimento laminar, ao encontrar um obstáculo (o edifício) sofre um desvio de seus filetes e, ultrapassando o obstáculo, tende a retomar o regime laminar.

As paredes à barlavento estarão sujeitas a pressões positivas (sobrepressões), enquanto as paredes à sotavento e o teto estarão sujeitos a pressões negativas (subpressões). Essa situação proporciona condições de ventilação do ambiente pela abertura de vãos em paredes sujeitas sobrepressões para entrada de ar e em paredes sujeitas subpressões para saída de ar, conforme esquematizado na Figura 7. Uma vez que, a ventilação cruzada é o fluxo de ar através das aberturas de um mesmo ambiente, ela só pode ocorrer com as condições acima descritas. A

Figura 8 exemplifica a diferença entre a ventilação natura e a ventilação unilateral (onde há apenas uma abertura tanto para a entrada como para a saída do ar).

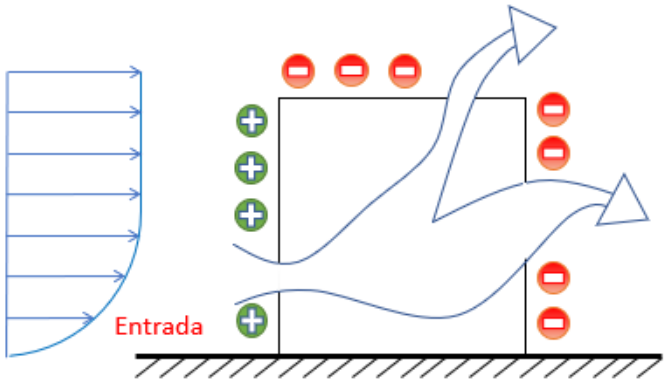

Figura 7– Ventilação por ação dos ventos. Fonte: Autor (2018).

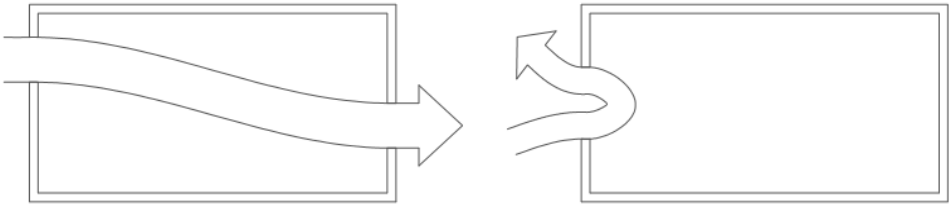

Figura 8– Ventilação cruzada x Ventilação unilateral. Fonte: Autor (2018).

O denominado “efeito chaminé”, baseia-se na diferença entre as temperaturas do ar interior e exterior provocando um deslocamento da massa de ar da zona de maior para a de menor pressão. O ar mais frio, mais denso, exerce pressão positiva, o ar mais quente, por tornar-se menos denso, exerce baixa pressão e tende a subir criando correntes de convecção. Quando, nestas condições existem duas aberturas em diferentes alturas, se estabelece uma circulação de ar da abertura inferior para a superior, caracterizando o efeito chaminé (Figura 9).

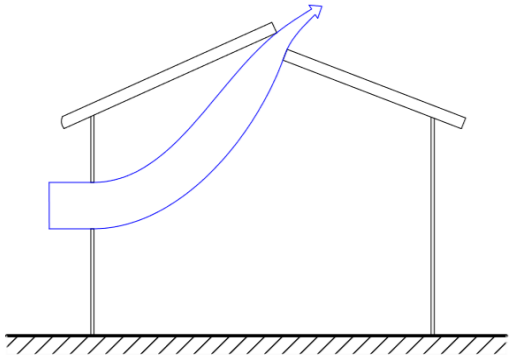

Figura 9 – Efeito Chaminé. Fonte: Autor (2018).

A ocupação dos edifícios por pessoas, máquinas e equipamentos e a exposição à radiação solar é o que pode ocasionar, nos ambientes internos, temperaturas superiores às do ar externo. O efeito chaminé não é muito eficiente em casas térreas pois depende da diferença entre as alturas das janelas. Como depende, também, das diferenças entre a temperatura do ar interior e exterior, para climas quentes, especialmente no verão, esse mecanismo de ventilação não deve ser visto como a forma mais eficiente de gerar conforto térmico e/ou remover o excesso de calor acumulado no interior da edificação. Neste caso, deve-se dar maior importância à ventilação dos ambientes pelo efeito do vento.

É extremamente complexo obter uma eficiente ventilação natural para um conjunto de várias edificações. Elas devem estar dispostas de modo a permitir que a ventilação atinja todos os edifícios e possibilite a ventilação cruzada. Isto significa que o layout arquitetônico deve prever construções alongadas no sentido perpendicular ao vento dominante (FROTA e SCHIFFER, 2001).

Quando se analisa o escoamento em edificações situadas na área urbana, o efeito da ação dos ventos muitas vezes pode ser pequeno em razão da proximidade entre as construções. Outra alteração previsível se refere à direção do vento, que não se mantém a nível intra urbano, tendendo a seguir o traçado viário, pois, os edifícios que estão em paralelo provocam uma interferência sobre as unidades seguintes, que é reforçada pela tendência do vento de se canalizar através dos espaços livres, sem passar pelas edificações posteriores.

No caso de construções espaçadas, o fator preponderante quanto à ação dos ventos é a determinação do sentido do fluxo de ar no interior das edificações. Obstáculos, produzidos por construções vizinhas, muros ou mesmo vegetação, podem inverter este sentido, modificando as pressões do ar sobre as superfícies externas, conforme mostra-se esquematicamente na Figura 10. No projeto de engenharia deve-se ser levada em consideração essas inversões de sentido do fluxo interno, pois as mesmas devem ser administradas para levar odores, vapores, etc. para fora da residência.

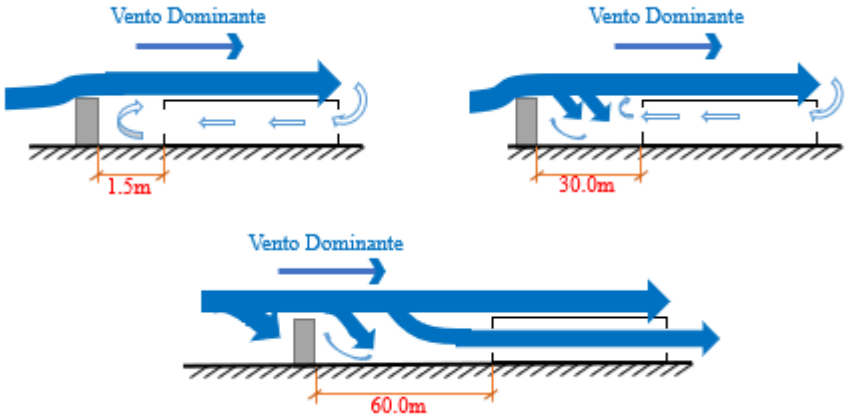

Figura 10– Distância entre obstáculo e edificação com relação ao sentido da ventilação interna. Fonte: Autor (2018)

2.5. Influência das Aberturas

O fluxo de ar é causado pela diferença de pressão entre as aberturas de entrada e saída, assim, qualquer fator que interfira nessas pressões, tais como a localização das aberturas, tem influência marcante no padrão do escoamento.

Além disso, a quantidade de ar que passa por uma abertura de uma edificação, depende diretamente da área da abertura, velocidade do vento, direção do vento com respeito ao plano de abertura, e a relação que existe entre a abertura de entrada e a área da abertura de saída da edificação (FREIXANET, 2004).

Portanto, a posição e as dimensões das janelas exercem uma grande influência na qualidade e na quantidade de ventilação interna, conforme apresenta-se esquematicamente na Figura 11.

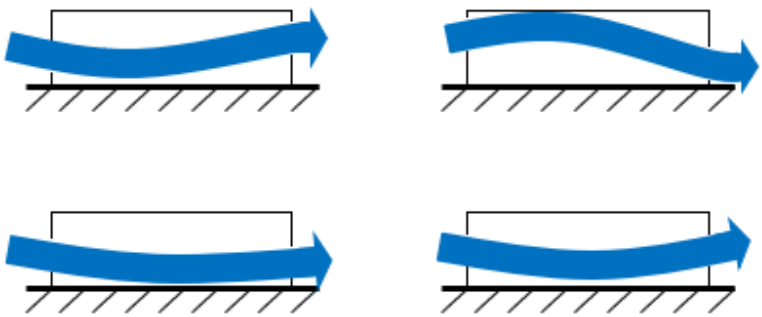

Figura 11 – Exemplos de perfis de fluxo de ar através de ambientes que dispõem de aberturas localizadas em fachadas opostas. Fonte Autor (2018).

Ao ter uma abertura localizada no centro da parede, tem-se uma pressão igual dos dois lados da abertura, e então o vento entrará com um ângulo perpendicular à parede. Porém, se a

abertura não está no centro, a pressão em ambos os lados será desigual, o que originará um fluxo com entrada em diagonal com relação à parede, com o sentido que provoca a maior zona de pressão, conforme mostra a Figura 12.

O ângulo de incidência do vento, portanto, tem uma influência marcante no fluxo interno. A máxima pressão a barlavento acontece quando o fluxo é normal a superfície, já um vento que incide a 45° reduzirá essa pressão em 50%. Porém, com relação a velocidade, estudos mostram que se o vento incidir a 45° a velocidade média do ambiente aumentará.

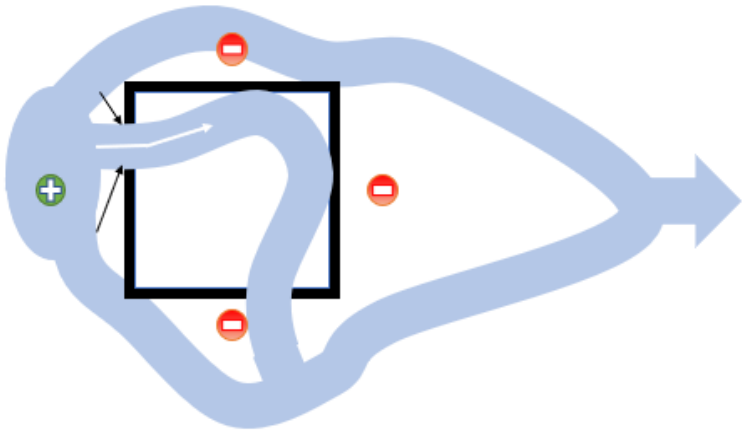

Figura 12 –Influência da posição da abertura no ângulo de entrada do fluxo. Fonte Autor (2018).

O tipo de abertura de entrada também é muito importante, existem muitos tipos de janelas no mercado que usam aberturas para entrada com uma grande variedade de padrões de fluxo de ar. Deve-se conhecer as vantagens e limitações dos diferentes tipos de janelas para poder emprega-las corretamente em cada caso particular. Por exemplo, é necessário considerar que uma tela de mosqueteiro de nylon reduz a velocidade do vento em aproximadamente 30% (FREIXANET, 2004). Uma interpretação incorreta sobre a resistência ao escoamento de uma abertura pode introduzir grandes erros na análise do fluxo e levar a decisões equivocadas a nível de projeto, uma vez que a taxa de fluxo de ar influi na qualidade do ar no ambiente, além de contribuir para o conforto térmico (JONES et al., 2016).

A localização das aberturas de entrada e saída podem influenciar na taxa do fluxo de ar no ambiente. Chu e Chiang (2014) mostrou que a vazão de ar em edifícios retangulares, com aberturas localizadas em vértices opostos nas fachadas de barlavento e sotavento é 15% menor do que a vazão em edifícios com duas aberturas centradas em cada fachada. Outro ponto que impacta a velocidade do escoamento é a relação entre as dimensões das aberturas de entrada e

saída. Quando a abertura de entrada é menor que a de saída a velocidade do fluxo interno é incrementada.

Além disso, para uma mesma área total da parede, duas ou mais aberturas são melhores que uma, e em edifícios pequenos e médios, aberturas mais espaçadas funcionam melhor do que próximas umas das outras (GRAÇA; LINDEN, 2016).

2.6. Vazão do ar através das aberturas

A vazão de ar através das aberturas de um edifício pode ser admitida como um caso particular da vazão através de orifícios existentes em placas finas e interpostas em uma canalização, quando o quociente do diâmetro do orifício pelo diâmetro do tubo é zero (TOLEDO, 1999).

Em termos qualitativos, é relativamente mais simples compreender a ação do vento na renovação do ar interior dos edifícios. No entanto, quando se deseja obter resultados quantitativos, mesmo aproximados, da vazão e da velocidade do ar em um dado ambiente, torna-se necessário admitir algumas hipóteses simplificativas. Os valores estimados servem, apenas, como grandeza e devem sempre ser comparados com os valores medidos em edifícios construídos ou em modelos que tenham características similares.

A seguir, serão apresentados três modelos analíticos de cálculo que se destinam à determinação da vazão da ventilação natural por efeito do vento em edificações.

2.6.1. Equações de Frota (2001)

Para a determinação da vazão de ar por efeito dos ventos, em um caso geral como um edifício com duas aberturas, com quaisquer dimensões, mas com igual coeficiente de descarga, pode-se utilizar a seguinte relação:

$$Q = K\, v\, A_{eq}\, \sqrt{\Delta C_p} \tag{2.3}$$

onde,

Q = vazão de ar pela ação dos ventos [m³/s];

K = coeficiente de descarga;

v = velocidade do vento externo resultante na abertura à barlavento [m/s]. No caso de o vento não ser normal às fachadas pode se usar $v = V \cos\theta$, em V é o módulo da velocidade do vento e θ é o ângulo de incidência do vento em relação à normal da fachada;

ΔC_p = variação entre os coeficientes de pressão nas aberturas de entrada e saída;

A_{eq} = área equivalente das aberturas [m²], calculada da seguinte forma:

$$\frac{1}{A_{eq}^2} = \frac{1}{(\sum A_e)^2} + \frac{1}{(\sum A_s)^2} \tag{2.4}$$

Caso existam portas intermediárias (em série entre a entrada e a saída), deve-se adicionar a parcela $\frac{1}{(\sum A_{porta})^2}$ na equação acima.

onde,

$\sum A_e$ = somatório das áreas de todas as aberturas de entrada.

$\sum A_s$ = somatório das áreas de todas as aberturas de saída.

$\sum A_{porta}$ = somatório das áreas de todas as portas ou aberturas intermediárias, entre a entrada e saída do ambiente.

O coeficiente de descarga *K* é uma medida da eficiência do orifício (abertura), à passagem do ar. Em orifícios com bordas não arredondadas (caso do presente trabalho) o coeficiente de descarga é praticamente independente do número de Reynolds e pode assumir o valor de 0,6 (ETHERIDGE, 2012).

2.6.2. Equações da ASHRAE (2001)

A ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) apresenta a seguinte equação para o cálculo da ventilação por efeito do vento:

$$Q = C_v A v \tag{2.5}$$

sendo,

Q = vazão do ar por efeito do vento [m³/s];

A = área livre da abertura de entrada de ar [m²];

v = velocidade média do vento [m/s];

C_v = efetividade da abertura.

Deve-se destacar que na equação 2.5, C_v pode apresentar valores de 0,5 a 0,6 – para vento perpendicular à abertura, e 0,25 a 0,35 para vento na diagonal. No presente trabalho, será adorado o valor de 0,6.

2.6.3. Equações de Silvani (2005)

SILVANI (2005) empregou para a determinação da vazão de ar nas aberturas de entrada, por efeito do vento, a seguinte equação:

$$Q = 0{,}61\, v \sqrt{\Delta C_p} \sqrt{\frac{A_e^2 . A_s^2}{A_e^2 + A_s^2}} \tag{2.6}$$

onde,

Q = vazão de ar pela ação dos ventos [m³/s];

v = velocidade do vento não perturbado na cota de referência [m/s];

ΔC_p = variação entre os coeficientes de pressão nas aberturas de entrada e saída;

A_e = área das aberturas de entrada do ar [m²];

A_s = área das aberturas de saída do ar [m²];

2.7. Critérios para avaliação da ventilação natural

O primeiro critério de ventilação dos ambientes se baseia nos requisitos básicos de exigências humanas, que são o suprimento de oxigênio e a concentração máxima de gás carbônico no ar, sendo que a diluição da concentração de gás carbônico requer maiores taxas de ventilação que o suprimento do oxigênio. Outra importante função da ventilação é a remoção do excesso de calor dos ambientes. Os excessivos ganhos de calor solar, principalmente no verão, assim como o calor gerado no próprio ambiente, devido à presença de fontes diversas, podem provocar o desconforto térmico. A ventilação desses ambientes pode promover melhorias nas condições termo higrométricas, podendo representar um fator de conforto térmico de verão ao incrementar as trocas de calor por convecção e evaporação entre o corpo e o ar interno do recinto (FROTA e SCHIFFER, 2001).

Localidades onde o valor da temperatura externa média já é superior ao limite do conforto humano, ou seja, 28°C, não é possível garantir, internamente às construções, temperaturas dentro da faixa de conforto apenas utilizando-se recursos naturais. Para os locais onde a temperatura externa média é inferior a 28°C e superior a 18°C, há condições de se obterem internamente às edificações temperaturas dentro dos limites do conforto humano, utilizando-se apenas recursos relativos à climatização natural (FROTA e SCHIFFER, 2001).

O vento pode ser indesejado nas seguintes situações:

a) Quando é muito frio;
b) Quando é muito quente (geralmente com temperatura ambiente maior que 35°C);
c) Quando está contaminado com poluentes;
d) Quando a velocidade é superior a 1,5 m/s.

Para garantir a qualidade do ar em um ambiente, recomenda-se um número mínimo e máximo de trocas de ar por hora. A ASHRAE indica uma séria de relações de espaço ocupado e vazões necessárias para várias situações, segundo critérios sugeridos para projetos gerais de ventilação de ambientes. Chama-se a atenção para o número de trocas de ar indicado para residências: 5-20 [trocas/hora].

O número de trocas de ar por hora para ventilação cruzada é determinado pela equação:

$$N = \frac{Q\ 3600}{V}\ [trocas/hora] \tag{2.7}$$

onde "*V*" é o volume do ambiente ventilado (m³) e "*Q*" é o fluxo de ar (m³/s).

Clezar e Nogueira (1999) também recomendam um número de trocas de ar por ambiente para, dentro de certos limites, controlar a temperatura, a umidade, a velocidade do ar e, principalmente, minimizar a concentração de algum contaminante presente no ar por meio de sua diluição. Para residências o número de trocas de ar indicado é de 1-2 [trocas/hora]. Necessário ressaltar que por ser um método empírico, deve ser utilizado com reservas.

Por fim, a norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005) apresenta o Zoneamento Bioclimático Brasileiro e as Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social. O Brasil foi dividido, segundo a norma, em oitos zonas bioclimáticas. Os parâmetros e diretrizes para cada uma das zonas são:

a) tamanho das aberturas para ventilação (expressas como percentual de área de piso): devem ser entre 15% a 25% da área do piso;
b) proteção das aberturas;
c) vedações externas, parede externa e cobertura, informando o tipo de vedação (leve ou pesada, refletora ou isolada);
d) estratégias de condicionamento térmico passivo.

O objetivo de tais recomendações técnico-construtivas é a otimização do desempenho térmico das edificações, através de sua melhor adequação climática (ABNT, 2005).

2.8. Ventilação Natural como estratégia de climatização no Agreste Pernambucano

O Agreste Pernambucano, possui um clima seco e quente, com diminuição de chuvas no verão, a mínima no verão geralmente fica entre 20 e 25°C e a máxima entre 30 e 35°C, a seca chega a níveis críticos em quase todos os anos, e nesses anos de muita seca, a região passa de 4 meses a 1 ano sem chuva. O índice pluviométrico é sempre inferior a 600 mm acumulado em todos os anos. No Gráfico 1 mostra-se um comparativo entre as temperaturas médias mensais e a zona de conforto para o ser humano.

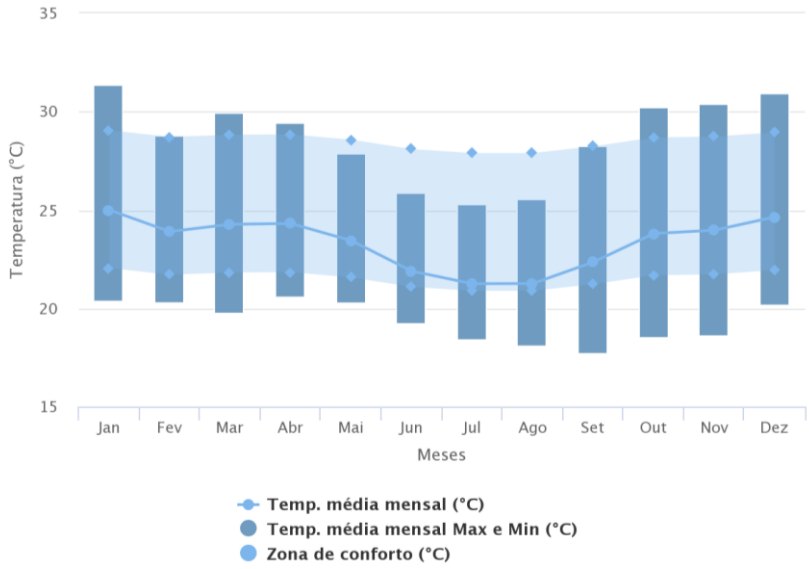

Gráfico 1 Gráfico da temperatura e zona de conforto. Fonte INMET (2016).

Pode-se observar, que principalmente as temperaturas de máxima e mínima em sua grande maioria estão fora da zona de conforto. O conforto térmico pode ser definido como um estado que reflete a satisfação de uma pessoa com o ambiente térmico que a envolve. Se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a temperatura da pele e o suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o homem sente conforto térmico. Em geral define-se a temperatura de conforto aquela que provoca uma sensação térmica neutra.

Idealmente, a arquitetura nestes climas secos e quentes deveria possibilitar, durante o dia, temperaturas internas abaixo das externas e, durante a noite, acima. A ventilação natural, mesmo quando não possa ser usada isoladamente, deve ser levada em consideração nos projetos de climatização para atenuar a quantidade de energia dispendida em sistemas artificiais.

O portal do PROJETEEE indica que em apenas 41% do ano a cidade de Caruaru se encontra em estado de conforto térmico, sendo o desconforto em 44% do tempo causado pelo calor e o restante do tempo pelo frio. A ventilação natural pode não ser uma solução única efetiva, mas pode ser aplicada em conjunto com outras técnicas, com uma eficiência média de cerca de 52% para produção do conforto térmico, principalmente durante o verão e outono, no horário da noite, corroborando as recomendações encontradas em Frota e Schiffer (2001).

2.9. Dinâmica dos Fluidos Computacional

A Dinâmica dos Fluidos Computacional, ou DFC, tem uma ampla disseminação em aplicações industriais e de pesquisa, e tem sido usada para o estudo de problemas complexos de escoamento nas últimas décadas. A DFC evoluiu até ser uma ferramenta efetiva de análise e pode ser uma alternativa para os ensaios experimentais em túneis de vento devido à redução nos tempos e custos. Mesmo com os avanças obtidos no métodos numéricos e computadores, as simulações numéricas ainda precisam das medidas experimentais para validar os resultados obtidos. Muitas fontes de erros podem levar a previsões incorretas, portanto, é muito importante conhecer e mensurar as mesmas para poder empregar a DFC como ferramenta de análise ou de design.

Em função dos estudos conduzidos nos últimos anos, Franke et al. (2007) estabeleceram algumas orientações para aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos através da Engenharia do Vento Computacional.

Diversos estudos vêm sendo conduzidos utilizando-se do DFC para análise da ventilação natural, por exemplo, Baxevanou et al. (2017) utiliza-se da DFC para avaliar a variação do coeficiente de descarga C_d de acordo com diferentes condições geométricas e tamanhos das aberturas em arranhas céus. Song e Meng (2015) fizeram simulações e encontraram como as janelas duplas poderiam melhorar as condições de conforto térmico em um edifício escolar. Azizi e Javanmardi (2017) avaliaram as formas de bloqueio urbano no padrão da ventilação natural e suas implicações na poluição do ar, usando análise de dinâmica computacional de fluidos. Youm et al. (2017) analisa o efeito de variações de layout arquitetônico de edifícios residenciais e a eficiência na ventilação natural. Guo et al. (2015) usa a DFC para otimizar o design arquitetônico de uma galeria para uma maior eficiência na ventilação.

O crescente aumento nas capacidades computacionais (memória e velocidade de processamento) somado à eficiência das diferentes arquiteturas de processamento (escalar, vetorial, paralelo, etc.) e desenvolvimento de algoritmos numéricos tornou possível a resolução das equações de Navier-Stokes sobre configurações tridimensionais reais. Esta evolução foi acompanhada pelo desenvolvimento de novos modelos de turbulência para o fechamento das equações médias espaciais e temporais de Navier-Stokes (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes).

Nos métodos RANS originam-se termos adicionais nas equações do momento conhecidos como tensões de Reynolds que precisam ser modelados e representam os efeitos da variação da turbulência no escoamento. O método emprega-se massivamente para a analise de escoamentos turbulentos na Engenharia do Vento Computacional.

Embora inviáveis para problemas complexos reais (elevado número de Reynolds) devido às atuais limitações computacionais a metodologia de Simulação de Grandes Escalas (LES – Large Eddy Simulation) e a Simulação Numérica Direta (DNS – Direct Numerical Simulation) representam os futuros desafios na simulação de escoamentos turbulentos.

Na metodologia DNS as equações instantâneas de Navier-Stokes são resolvidas diretamente. Para isso, uma malha muita fina é requerida para capturar todas as escalas relativas ao escoamento, até a escala de Kolmogorov (a menor escala que se pode considerar, na qual a efeito da viscosidade sobre a transmissão de energia é desprezível). Como ela demanda um custo computacional muito grande para número de Reynolds tipicamente encontrados na Engenharia do Vento ela não é aplicável para problemas complexos na área.

Na metodologia LES somente as grandes escalas, consideradas como turbilhões de energia, são resolvidas diretamente e as pequenas são removidas das variáveis do fluxo por um filtro espacial das equações de Navier-Stokes. Assim, a demanda computacional pode ser reduzida substancialmente já que as equações dependentes do tempo são resolvidas numa malha mais grosseira, que não captura as pequenas escalas do escoamento. A influência das pequenas escalas então aparece como sub filtros, como tensões nas equações do momento e como termos de contorno. O uso da metodologia LES para a análise do escoamento ao redor de edificações tem se tornado cada vez mais importante, o programa empregado no presente trabalho, HEXAFEM_3D_IFF (BONO, 2011), faz uso desta metodologia.

O tamanho do domínio computacional dependerá da geometria que será representada e das condições de contorno que serão usadas. Para o simples caso de estruturas isoladas, as distâncias laterais e do topo do limite computacional deve estar a *5H* do edifício, onde *H* é a altura do edifício. O limite na saída deve ser posicionado no mínimo à *15H* atrás do edifício

para permitir o desenvolvimento do escoamento. Pela mesma razão este comprimento na saída deve ser aplicada também a áreas urbanas com muitos edifícios, onde *H* é substituído por *Hmax* que é a altura do edifício mais alto. Para prevenir uma aceleração do escoamento sobre o edifício mais alto, o top do domínio computacional deve estar a no mínimo *5Hmax* de distância dele. (FRANKE, 2007).

Com relação à discretização do domínio com a malha de elementos finitos, ela precisa ser feita levando-se em consideração a relação entre custo computacional e qualidade dos resultados esperados. Isto significa que a resolução da malha deve ser boa o suficiente para capturar os principais fenômenos físicos (separação da camada limite, vórtices, etc.) com uma ótima resolução e com um tempo de processamento viável.

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho emprega-se o programa HEXAFEM_3D_IFF (BONO et al., 2012), que faz uso da Dinâmica dos Fluidos Computacional. Resolvem-se as equações de Navier-Stokes e uma equação de conservação de massa considerando a hipótese de pseudo-compressibilidade para problemas isotérmicos. As equações são resolvidas empregando o Método dos Elementos Finitos, usando uma série de Taylor e o clássico método de Bubnov-Galerkin para a discretização do tempo e do espaço, respectivamente. Para a simulação de escoamentos turbulentos, emprega-se a Simulação de Grandes Escalas com o modelo de Smagorinsky clássico para as escalas inferiores à resolução da malha. Para a discretização do domínio espacial utiliza-se o elemento isoparamétrico hexaédrico de oito nós. Mais detalhes sobre este programa podem ser vistos em Bono et al. (2011) e Bono et al. (2012). A validação do programa para exemplos com baixos e moderados números de Reynolds podem ser vistos em Nascimento et al. (2017), Cavalcante et al. (2016), Cabral et al. (2012) e Santos et al. (2016).

Nos problemas aqui abordados foram consideradas malhas de tipo estruturada com elementos hexaédricos em todo o domínio computacional. Todos os exemplos foram modelados como problemas bidimensionais, considerando somente um elemento na espessura. Em todos os casos, considera-se como condição de contorno na entrada do domínio um perfil exponencial de velocidade típico de Camada Limite Atmosférica (HOLMES, 2007) com um ângulo de incidência igual a 0º.

O formato do modelo da edificação é o mesmo analisado experimentalmente por Karava et al. (2011), com largura D = 1 [m], altura H = 0.8 [m] e espessura da parede igual a 0.02[m], conforme mostrado na Figura 14.

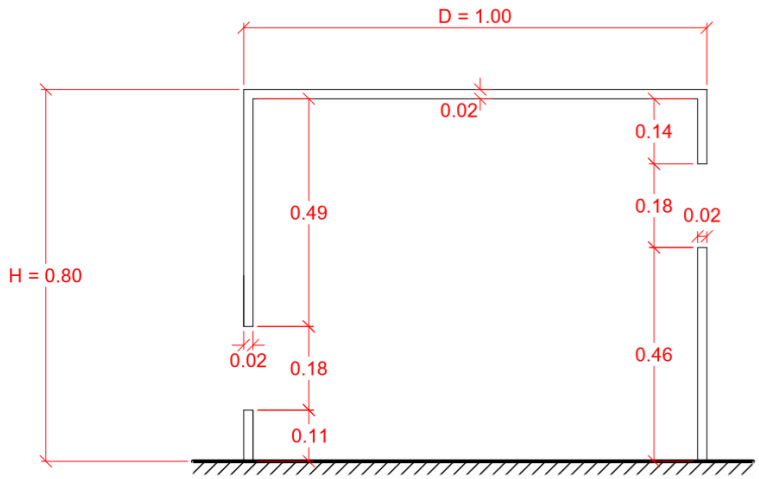

Figura 14 – Geometria das edificações analisadas. Fonte: Autor (2018)

Para os exemplos considera-se um escoamento caracterizado por um número de Reynolds de 557,6 e uma velocidade de entrada equivalente a V_0= 6.97 [m/s], aplicada na face de entrada do domínio computacional a uma altura de referência de 0,8 (altura do modelo de edificação analisado), com um expoente n = 0,11 para o perfil da camada limite.

Nas Figuras 15 e 16, mostram-se as dimensões do domínio computacional empregado, onde H representa a altura do edifício, D sua extensão, e L podendo assumir dois valores: $L = D$ e $L = 2D$. A influência da inclinação do terreno foi analisada com o ângulo ϕ assumindo os seguintes valores na relação altura/comprimento: 0, 1/10 e 2/10. As dimensões apresentadas são válidas para todos os exemplos analisados, observando-se que a altura do domínio resulta diferente conforme muda a inclinação do terreno.

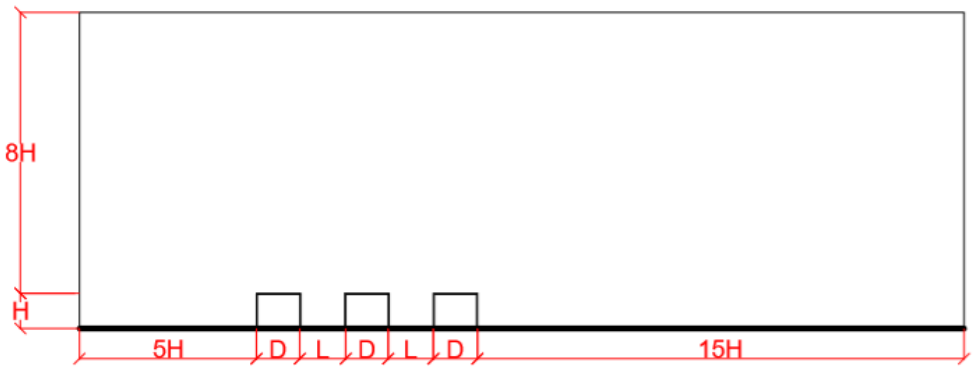

Figura 15 – Domínio computacional para o caso de inclinação 0. Fonte: Autor (2018)

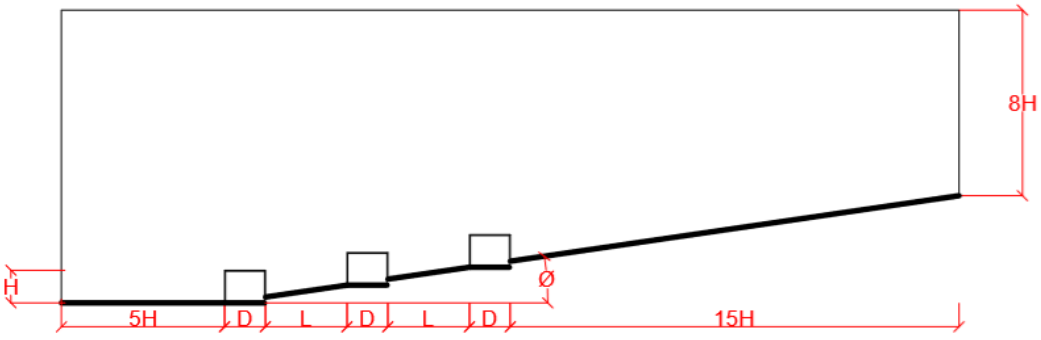

Figura 16 – Domínio computacional para o caso de inclinação variável de acordo com ϕ. Fonte: Autor (2018)

As dimensões do domínio, foram adotadas conforme sugerido por Franke et al. (2007), para um edifício submetido à ação do vento com um perfil típico de velocidade de Camada Limite Atmosférica.

Na Figura 17, mostra-se a malha empregada para o caso da inclinação 1/10 e distância entre edificações de *1d*. Todos os problemas analisados no presente trabalho empregam malhas com características similares.

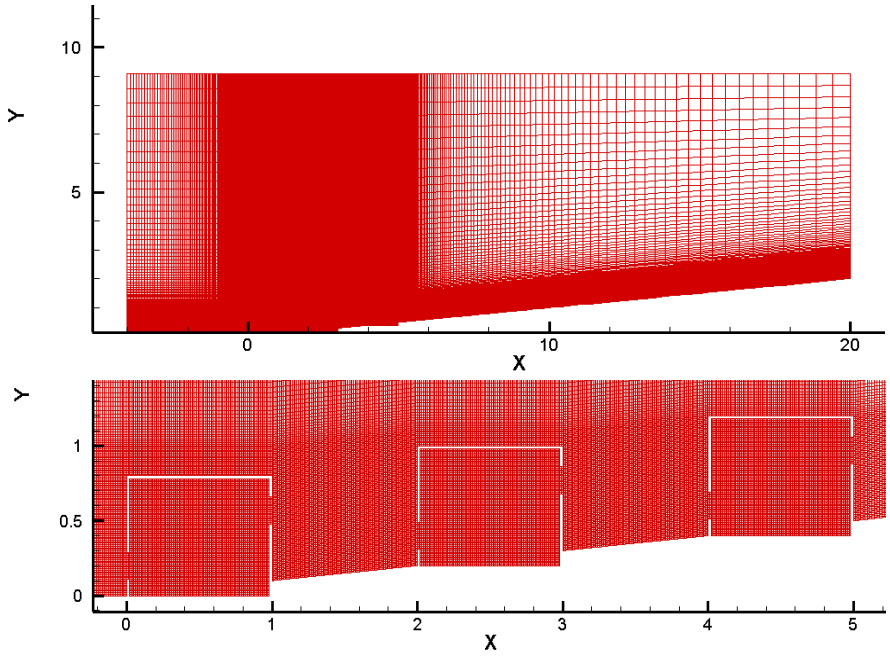

Figura 17 – Visão geral da malha característica de elementos finitos empregada no estudo com inclinação 1/10 e distância *1d* e detalhe com um zoom na região das edificações para a mesma malha. Fonte: Autor (2018)

Na Tabela 1, mostram-se os números de elementos e de nós da malha de elementos finitos para cada um dos casos analisados.

		N elementos		N nós	
		Distância [m]		Distância [m]	
		1d	*2d*	*1d*	*2d*
Inclinação	0	88280	88280	179448	179448
	1/10	101680	125680	206348	254388
	2/10	129080	87280	261168	177348

Tabela 1 – Número de elementos para cada distância e inclinação do terreno utilizada em cada caso estudado. Fonte: Autor (2018)

3.1. Avaliação da eficiência da ventilação natural

Avalia-se a eficiência da ventilação natural em todos os casos analisados através dos três métodos apresentados no item 2.6 do presente trabalho. Em função dos resultados obtidos

(valores médios das variáveis) na simulação numérica é possível utilizar as equações propostas em cada um desses métodos e calcular a vazão em cada uma das residências.

Em seguida, comparam-se os valores obtidos pelas equações aproximadas dos métodos apresentados no item 2.6 com o cálculo numérico da vazão determinada diretamente através da simulação com o programa HEXAFEM_3D_IFF.

Emprega-se o valor da vazão como uma medida da eficiência da ventilação natural dentro da edificação. Assim, foi possível obter um parâmetro da eficiência da ventilação natural para todos os modelos analisados.

Nos próximos itens, para facilitar a leitura, identificam-se os métodos propostos por Frota (2001), ASHRAE (2001) e Silvani (2005) e o cálculo numérico obtido através dos resultados da simulação computacional com a seguinte nomenclatura **Frota**, **ASHRAE**, **Silvani** e **Numérico.**

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para facilitar a análise e comparação dos resultados, os mesmos são apresentados em função da inclinação do terreno, ou seja, para as relações altura/comprimento (*0*, *1/10*, e *2/10*) e para as duas separações (*1d* e *2d*) consideradas entre as edificações.

Com os valores médios de velocidade e pressão obtidos, foi feito o cálculo das vazões em cada ambiente, de acordo com a metodologia apresentada em 3.1. As casas foram numeradas de 1 a 3 da esquerda para a direita, no sentido do escoamento.

Todos os resultados apresentados são baseados na média das variáveis do escoamento.

4.1. Inclinação do terreno de *0*

4.1.1. Distância 1d

Nas Figuras 18 e 19, podem-se observar os campos da componente de velocidade na direção *x* em todo o domínio e nas proximidades dos modelos de vivendas, respectivamente.

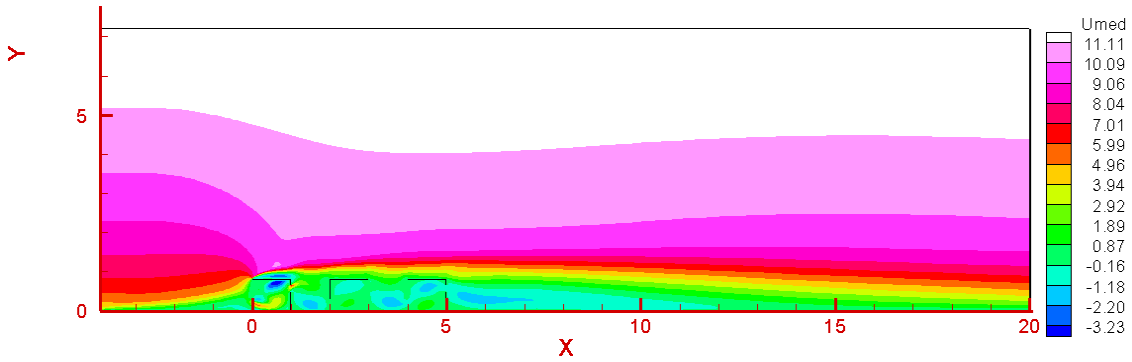

Figura 18 – Campo de velocidades na direção '*x*' para o caso de inclinação *0* e distância *1d*. Fonte: Autor (2018)

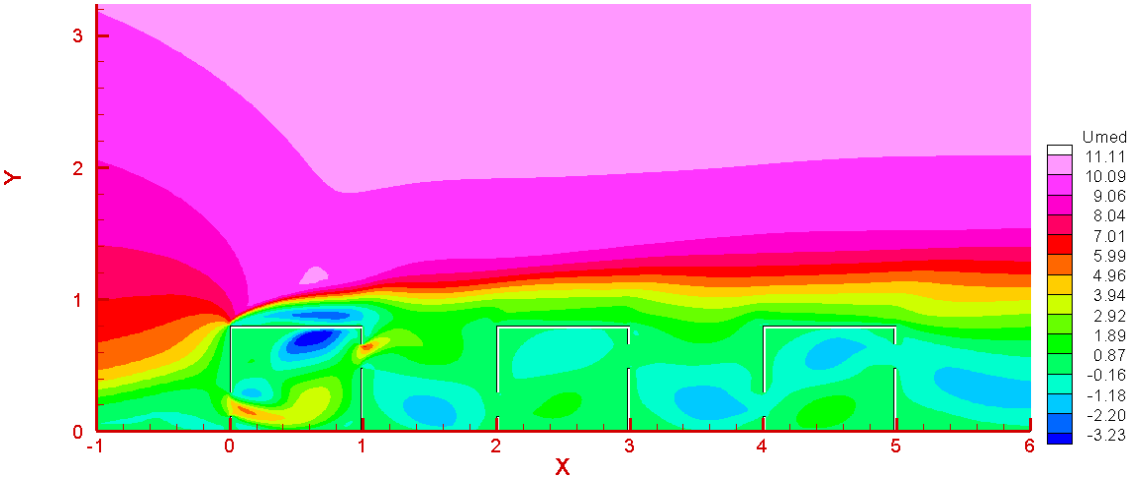

Figura 19 – Campo de velocidades na direção '*x*' para o caso de inclinação *0* e distância *1d*. Vista em detalhe. Fonte: Autor (2018)

Nas Figuras 20 e 21, apresentam-se a distribuição de pressão e as linhas de corrente do escoamento nas proximidades dos modelos de edificações para o primeiro caso analisado.

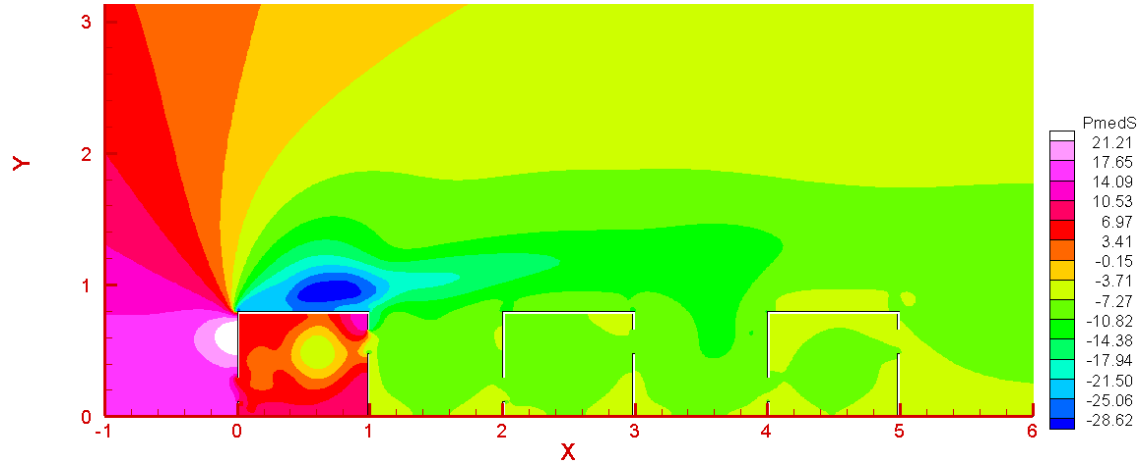

Figura 20 – Distribuição de pressões para o caso de inclinação *0* e distância *1d*. Fonte: Autor (2018)

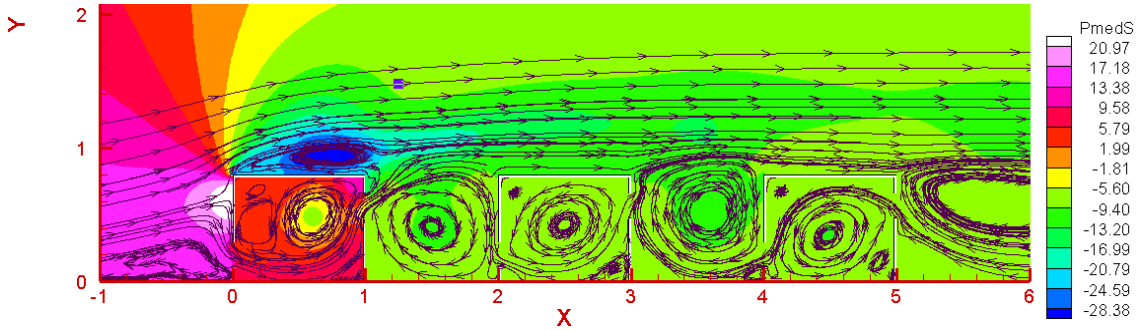

Figura 21 – Linhas de Corrente para o caso de inclinação *0* e distância *1d*. Fonte: Autor (2018)

Na tabela 2, mostram-se os valores das vazões conforme os quatro métodos apresentados para o caso da relação altura/comprimento do terreno igual a *0* e espaçamento entre as edificações igual a L = *1d*.

Vazões			
Método	**Casa 1**	**Casa 2**	**Casa 3**
Frota	1,06	0,01	-0,05
ASHRAE	0,38	0,03	-0,07
Silvani	1,08	0,02	-0,05
Numérico	0,55	0,05	-0,11

Tabela 2 – Vazões nas edificações no caso da inclinação *0* e distância *1d*. Fonte: Autor (2018)

Pode-se observar um forte gradiente de pressão apenas na primeira edificação, enquanto que as outras experimentam uma baixa diferença de pressão entre as aberturas de entrada e saída.

Quanto à distribuição de velocidades, pode-se observar que a primeira edificação bloqueia praticamente todo o escoamento nas edificações vizinhas, com presença de grandes vórtices e zonas de baixa pressão entre cada uma das edificações. Nota-se que o grande vórtice formado a sotavento da segunda casa força o escoamento para cima, passando então pelo topo da última casa até a região de recirculação. Nesta última casa o escoamento interno apresenta sentido inverso ao do escoamento livre, ou seja, da fachada posterior para a frontal. O sentido inverso do escoamento pode ser corroborado através do valor negativo da vazão, conforme mostra-se na Tabela 2.

Analisando os valores das vazões obtidas com todos os métodos, nota-se que o escoamento dentro da segunda e terceira edificações é quase nulo, o que representaria um grande problema devido à baixa eficiência da ventilação natural nesses ambientes em condições normais.

Na última edificação o escoamento interno apresenta sentido contrário ao da corrente livre. Devido ao forte gradiente de pressão na primeira edificação obtêm-se valores de vazão maiores, entretanto, a equação proposta no método da ASHRAE não leva em conta este parâmetro. Os valores obtidos pelo cálculo numérico resultaram em valores mais próximos ao método da ASHRAE.

4.1.2. Distância 2d

Nas Figuras 22 e 23, apresentam-se os campos da componente de velocidade na direção *x* em todo domínio e nas proximidades dos modelos de vivendas, respectivamente.

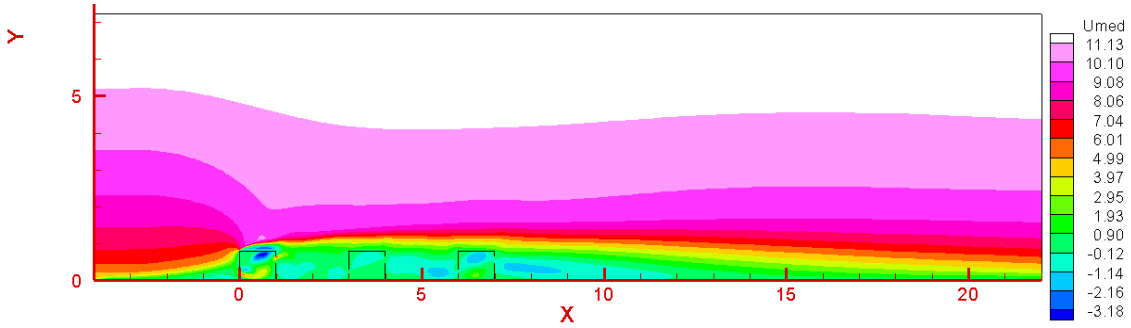

Figura 22 – Campo de velocidades na direção '*x*' para o caso de inclinação *0* e distância *2d*. Fonte: Autor (2018)

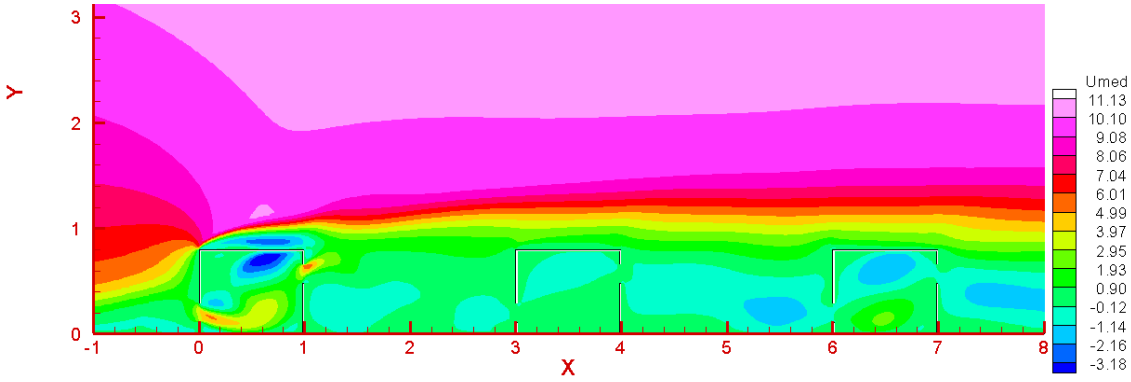

Figura 23 – Campo de velocidades na direção '*x*' para o caso de inclinação *0* e distância *2d*. Vista em detalhe. Fonte: Autor (2018)

Nas Figuras 24 e 25, mostram-se a distribuição de pressão e as linhas de corrente do escoamento nas proximidades dos três modelos de edificações, respectivamente.

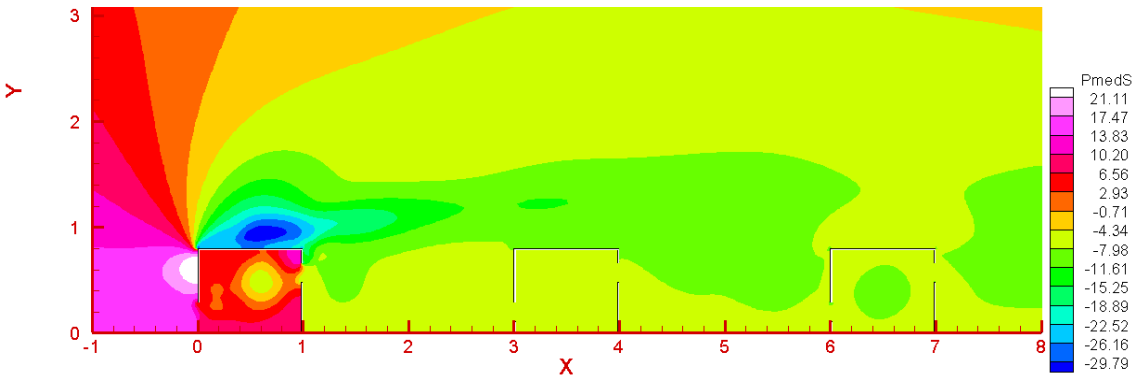

Figura 24 – Distribuição de pressões para o caso de inclinação *0* e distância *2d*. Fonte: Autor (2018)

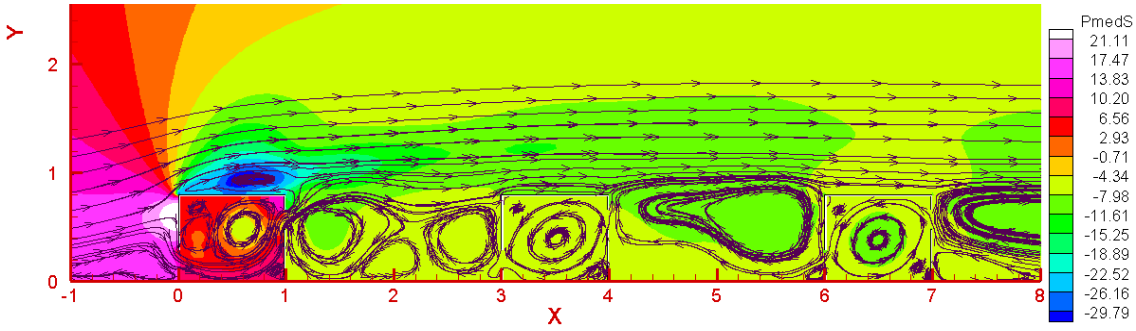

Figura 25 – Linhas de Corrente para o caso de inclinação *0* e distância *2d*. Fonte: Autor (2018)

Na Tabela 3, encontra-se os valores das vazões determinados pelos quatro métodos apresentados para o caso de espaçamento igual a L = *2d*.

Vazões			
Método	**Casa 1**	**Casa 2**	**Casa 3**
Frota	1,04	0,00	0,00
ASHRAE	0,38	0,01	-0,03
Silvani	1,05	0,00	0,00
Numérico	0,55	0,02	-0,03

Tabela 3 - Vazões nas edificações no caso da inclinação *0* e distância *2d*. Fonte: Autor (2018)

Os resultados obtidos mostram semelhança com os apresentados no caso da distância entre as edificações igual a *1d*, ver Tabela 2. Os valores em módulo das vazões calculadas nas três edificações apresentam-se menores no caso L = *2d* em comparação com *1d*. Novamente, observa-se uma vazão próxima de zero nas duas últimas casas, evidenciando a ineficiência da ventilação natural nestes casos.

A direção do escoamento apresenta o mesmo padrão do exemplo anterior, com o sentido do escoamento invertido na última edificação em relação as outras duas. Deve-se ressaltar, que devido à distancia entre as edificações sempre existem dois ou três grandes vórtices entre as mesmas.

Novamente**,** os valores obtidos através da simulação numérica resultaram próximos aos determinados pelo método da ASHRAE para este exemplo.

4.2. Inclinação do terreno de *1/10*

4.2.1. Distância 1d

A distribuição da componente de velocidade na direção *x* em todo domínio e nas proximidades dos modelos das edificações, mostram-se nas Figuras 26 e 27.

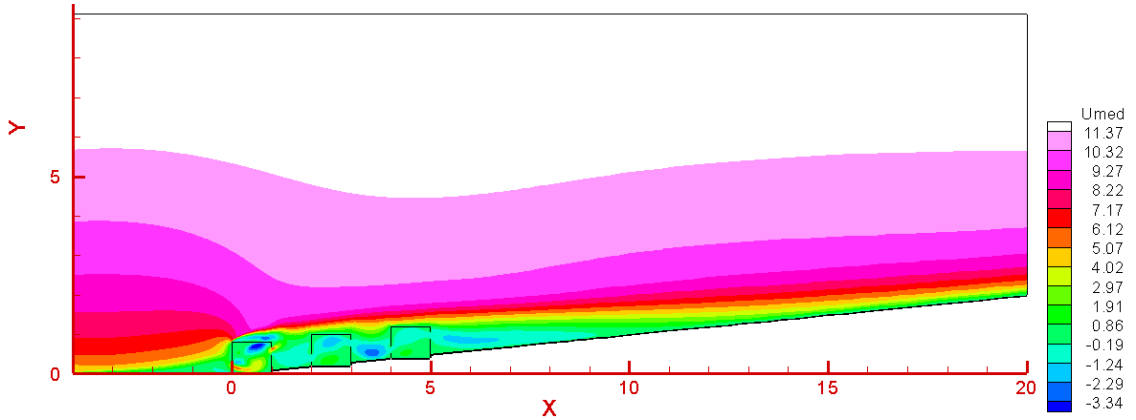

Figura 26 – Campo de velocidades na direção '*x*' para o caso de inclinação *1/10* e distância *1d*. Fonte: Autor (2018)

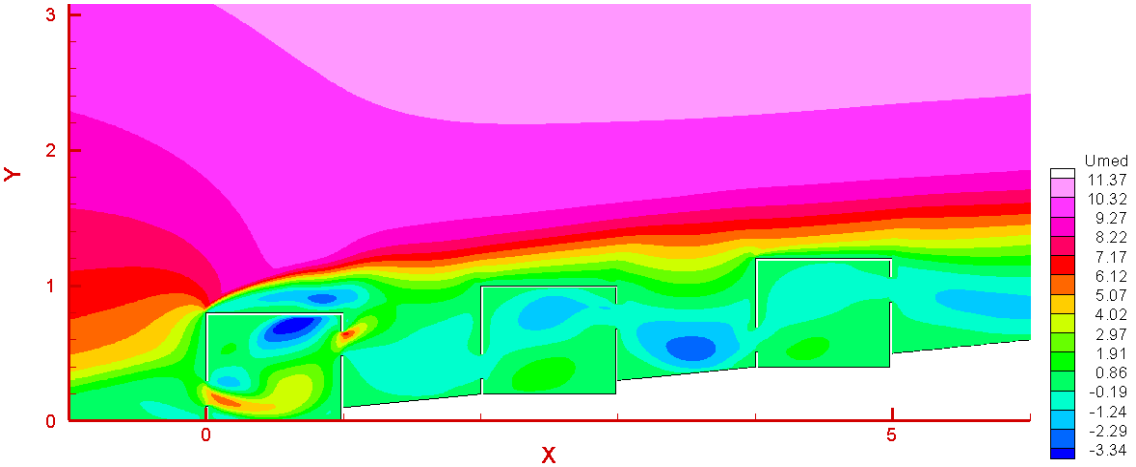

Figura 27 – Campo de velocidades na direção '*x*' para o caso de inclinação *1/10* e distância *1d*. Vista em detalhe. Fonte: Autor (2018)

Nas Figuras 28 e 29, apresenta-se a distribuição de pressão e as linhas de corrente do escoamento nas proximidades das três edificações, respectivamente.

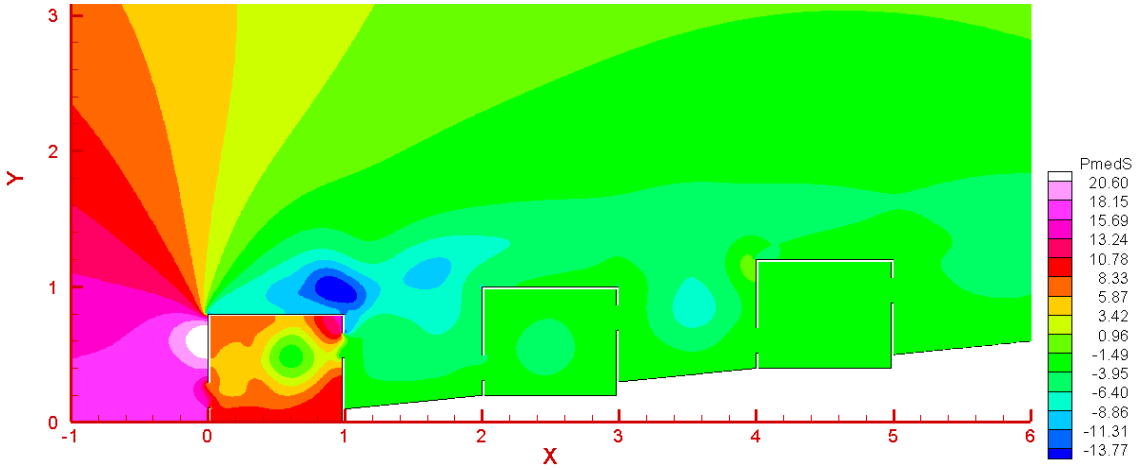

Figura 28 – Distribuição de pressões para o caso de inclinação *1/10* e distância *1d*. Fonte: Autor (2018)

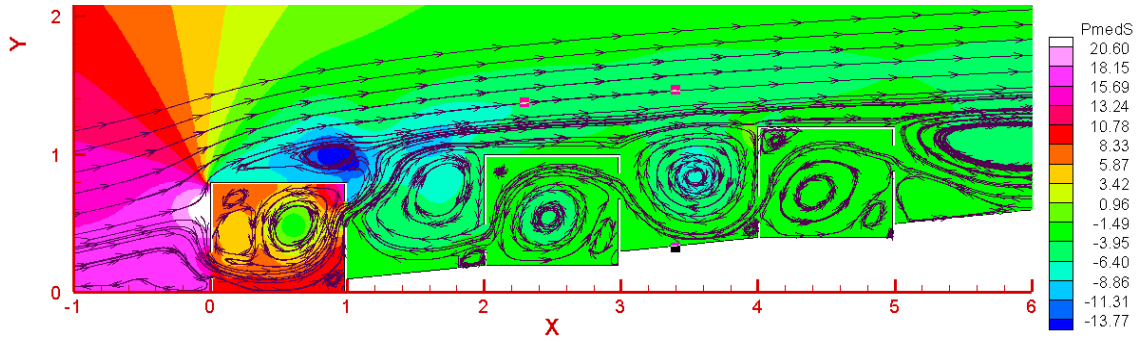

Figura 29 – Linhas de Corrente para o caso de inclinação *1/10* e distância *1d*. Fonte: Autor (2018)

Os valores das vazões determinados pelos quatro métodos apresentados para o caso da relação altura/comprimento do terreno igual a *1/10* e espaçamento entre as edificações igual a L = *1d*, são dados na Tabela 4.

Vazões			
Método	**Casa 1**	**Casa 2**	**Casa 3**
Frota	1,04	-0,06	-0,02
ASHRAE	0,43	-0,09	-0,05
Silvani	1,06	-0,06	-0,02
Numérico	0,59	-0,14	-0,06

Tabela 4 – Vazões nas edificações no caso da inclinação *1/10* e distância *1d*. Fonte: Autor (2018)

Novamente, pode-se observar um forte gradiente de pressão na primeira edificação, enquanto que as outras experimentam baixas pressões. Como aconteceu nos outros exemplos, a primeira edificação bloqueia praticamente todo o escoamento nas outras edificações, apresentando zonas de baixa pressão e um grande vórtice entre cada uma das edificações.

Observa-se, a existência de escoamento no sentido inverso tanto na segunda quanto na terceira edificação independentemente do método de cálculo, evidenciando a influência que a

inclinação do terreno tem na topologia do escoamento. Isso também pode ser verificado observando os valores apresentados na Tabela 4, onde o valor negativo da vazão indica o sentido inverso do escoamento.

Analisando as vazões, percebe-se que as mesmas são praticamente nulas dentro da segunda e terceira edificação, evidenciando o problema destas residências no que diz respeito a ventilação natural.

4.2.2. Distância 2d

Nas Figuras 30 e 31, apresentam-se a distribuição da componente de velocidade na direção *x* em todo domínio e nas proximidades dos modelos simplificados de edificações, respectivamente.

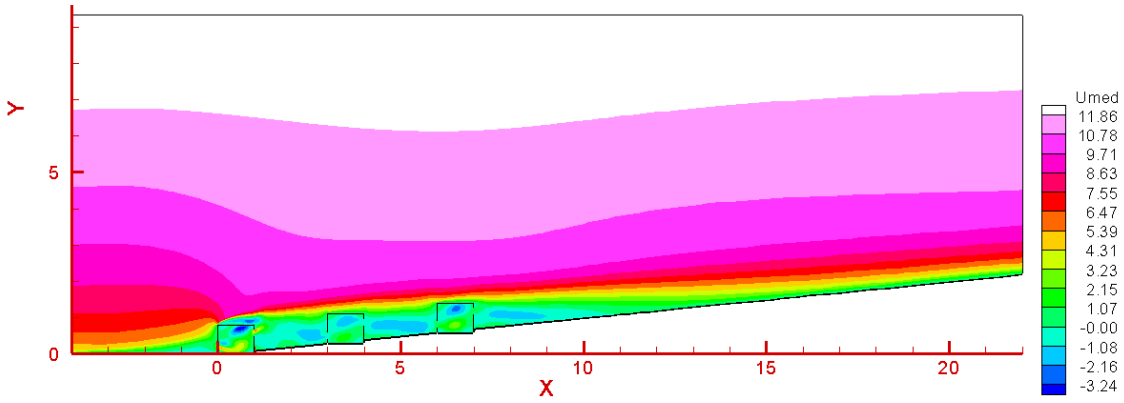

Figura 30 – Campo de velocidades na direção '*x*' para o caso de inclinação *1/10* e distância *2d*. Fonte: Autor (2018)

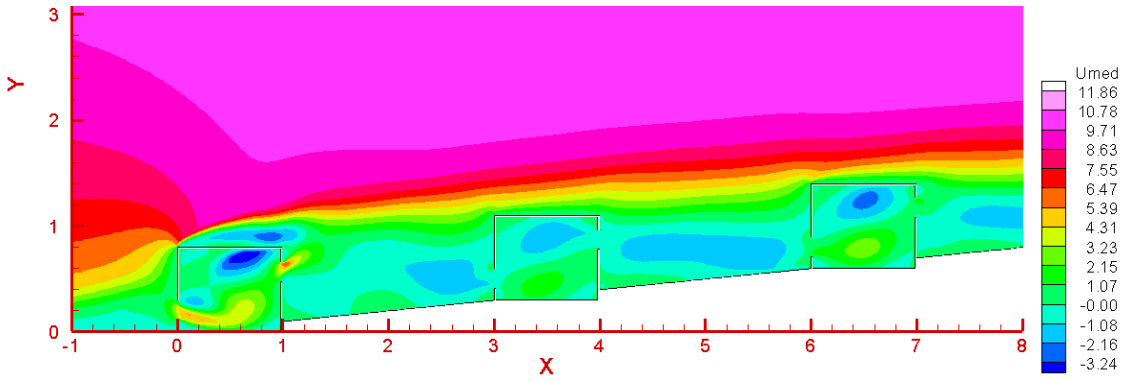

Figura 31 – Campo de velocidades na direção '*x*' para o caso de inclinação *1/10* e distância *2d*. Vista em detalhe. Fonte: Autor (2018)

A distribuição da pressão e as linhas de corrente do escoamento ao redor das edificações são mostradas nas Figuras 32 e 33, respectivamente.

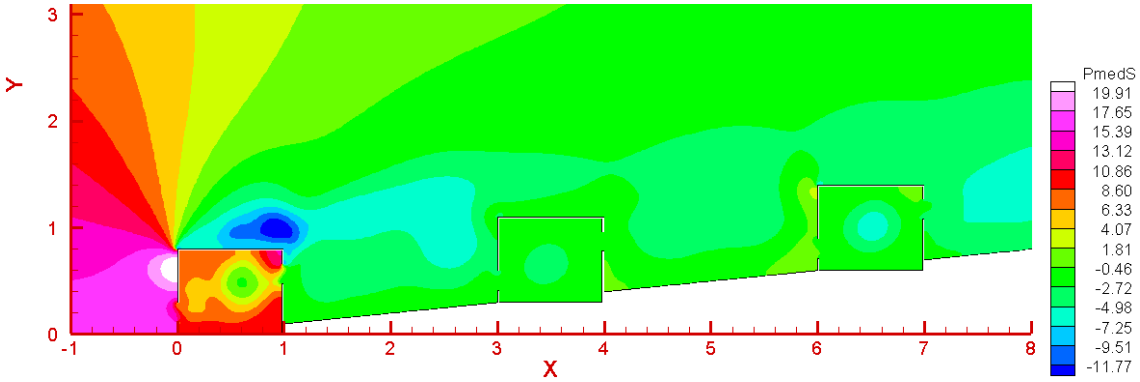

Figura 32 – Distribuição de pressões para o caso de inclinação *1/10* e distância 2*d*. Fonte: Autor (2018)

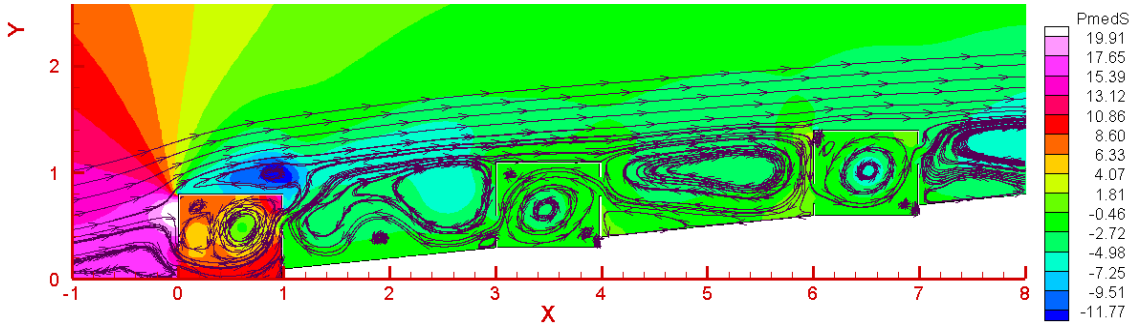

Figura 33 – Linhas de Corrente para o caso de inclinação *1/10* e distância *2d*. Fonte: Autor (2018)

Pode-se observar que existe um forte gradiente de pressão apenas na primeira edificação, enquanto que as outras experimentam valores de pressões inferiores. Como nos outros casos analisados, a primeira edificação bloqueia o escoamento para as edificações vizinhas, apresentando grandes vórtices e zonas de baixa pressão entre cada uma das edificações.

Na Tabela 5, encontra-se os valores das vazões determinados pelos quatro métodos apresentados para o caso da relação altura/comprimento do terreno igual a *1/10* e espaçamento entre as edificações igual a L = *2d*.

Vazões			
Método	**Casa 1**	**Casa 2**	**Casa 3**
Frota	0,95	-0,05	0,07
ASHRAE	0,40	-0,08	0,07
Silvani	0,97	-0,05	0,07
Numérico	0,55	-0,10	0,13

Tabela 5 – Vazões nas edificações no caso da inclinação *1/10* e distância *2d*. Fonte: Autor (2018)

Observa-se que apenas na segunda edificação o escoamento tem sentido inverso, mostrando um padrão diferente de todos os observados anteriormente. Percebe-se a formação

de dois vórtices de diferentes tamanhos a sotavento da segunda edificação, forçando a entrada do escoamento na abertura a sotavento na casa intermediária. Esse comportamento pode ser verificado na Tabela 5, onde o valor negativo da vazão indica o sentido inverso do escoamento no interior do modelo da edificação.

Analisando as vazões obtidas com as equações consideradas nos quatro métodos, observa-se que os valores das vazões na segunda e terceira edificações são pequenos, evidenciando que esta combinação de inclinação de terreno e separação entre as edificações não favorece a ventilação natural. A vazão no primeiro modelo simplificado de edificação resulta levemente inferior ao obtido no caso da relação altura/comprimento do terreno igual a *1/10* e espaçamento entre as edificações igual a L = *1d*.

Assim como nos exemplos com inclinação do terreno igual a *0,* os valores obtidos através do cálculo numérico são mais próximos com os apresentados pelo método ASHRAE.

4.3. Inclinação do terreno de *2/10*

4.3.1. Distância 1d

A distribuição da componente de velocidade na direção *x* em todo domínio e nas proximidades dos modelos das edificações, mostram-se nas Figuras 34 e 35.

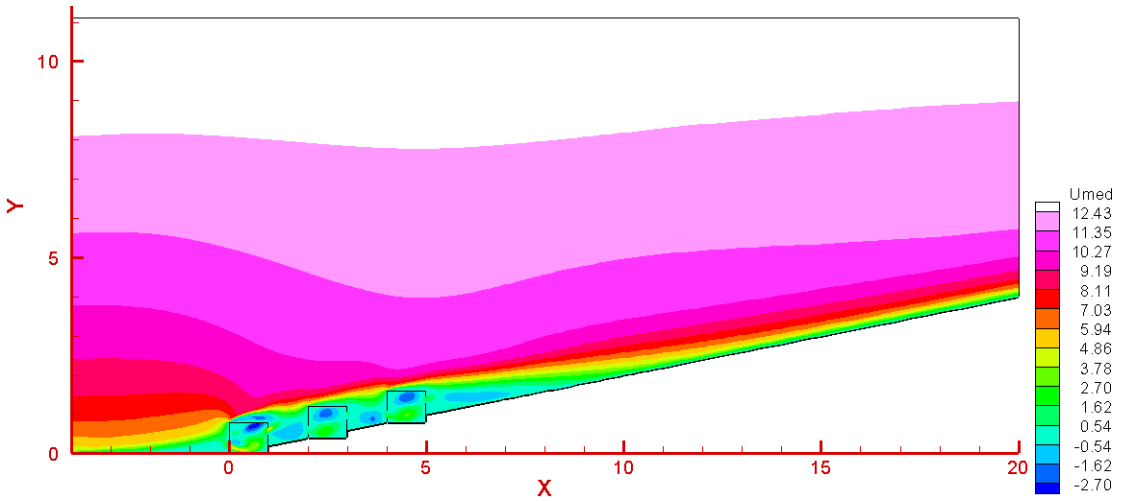

Figura 34 – Campo de velocidades na direção '*x*' para o caso de inclinação *2/10* e distância *1d*. Fonte: Autor (2018)

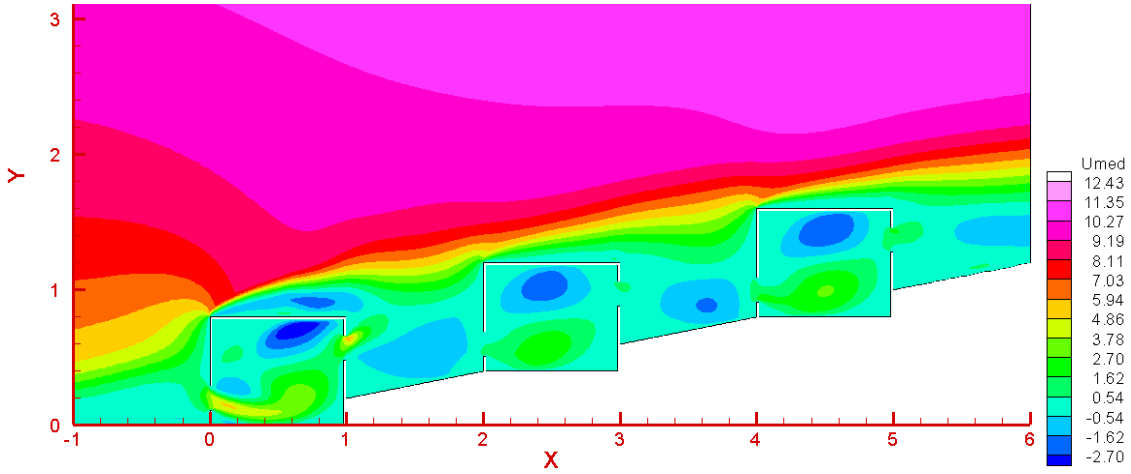

Figura 35 – Campo de velocidades na direção '*x*' para o caso de inclinação *2/10* e distância *1d*. Vista em detalhe. Fonte: Autor (2018)

Nas Figuras 36 e 37, apresenta-se a distribuição de pressão e as linhas de corrente do escoamento nas proximidades das edificações.

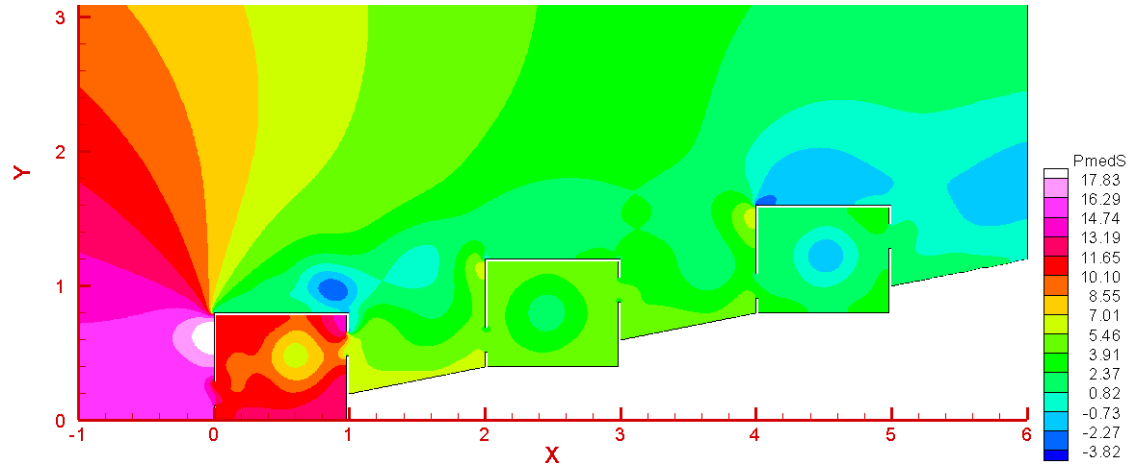

Figura 36 – Distribuição de pressões para o caso de inclinação *2/10* e distância *1d*. Fonte: Autor (2018)

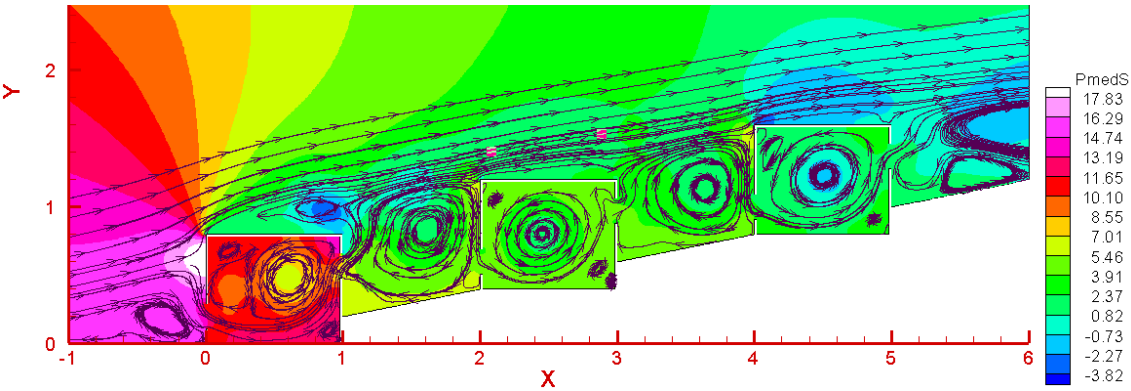

Figura 37 – Linhas de Corrente para o caso de inclinação *2/10* e distância *1d*. Fonte: Autor (2018)

Na Tabela 6, encontra-se os valores das vazões determinados pelos métodos apresentados para o caso da relação altura/comprimento do terreno igual a *2/10* e espaçamento entre as edificações igual a L = *1d.*

Vazões			
Método	**Casa 1**	**Casa 2**	**Casa 3**
Frota	0,66	0,02	0,09
ASHRAE	0,36	0,04	0,11
Silvani	0,67	0,02	0,09
Numérico	0,52	0,08	0,18

Tabela 6 – Vazões nas edificações no caso da inclinação *2/10* e distância *1d*. Fonte: Autor (2018)

A topologia do escoamento, apresenta o mesmo padrão mostrado nos exemplos anteriores, ou seja, um forte gradiente de pressão apenas na primeira edificação. O efeito de bloqueio da primeira edificação é muito forte, afetando o escoamento nas edificações vizinhas. Ao contrário do observado nos casos anteriores, o sentido do escoamento sempre é o mesmo em todas as edificações, em especial nas últimas edificações, onde verifica-se uma grande similaridade na topologia do escoamento.

Analisando as vazões obtidas com os quatro métodos, observa-se que a vazão na primeira residência resulta menor que as observadas nos exemplos anteriores para o caso no qual empregam-se as equações analíticas, indicando uma queda no valor da vazão da primeira residência conforme aumenta a inclinação do terreno, pois o gradiente de pressão nesta residência resulta menor.

Percebe-se que as vazões ~~mesmas~~ são pequenas na segunda e terceira edificação, evidenciando que a ventilação natural resulta comprometida para está disposição de inclinação do terreno e separação entre os modelos de edificações. Embora, os valores das vazões sejam pequenos na terceira edificação os mesmos são aproximadamente entre 15 e 30% do valor obtido na primeira edificação.

Os valores das vazões obtidos com o método ASHRAE nas três edificações apresenta-se como a metodologia com os melhores resultados em comparação com os valores determinados através da simulação numérica.

4.3.2. Distância 2d

Nas Figuras 38 e 39, apresenta-se a distribuição da componente de velocidade na direção *x* em todo domínio e nas proximidades dos modelos das edificações, respectivamente.

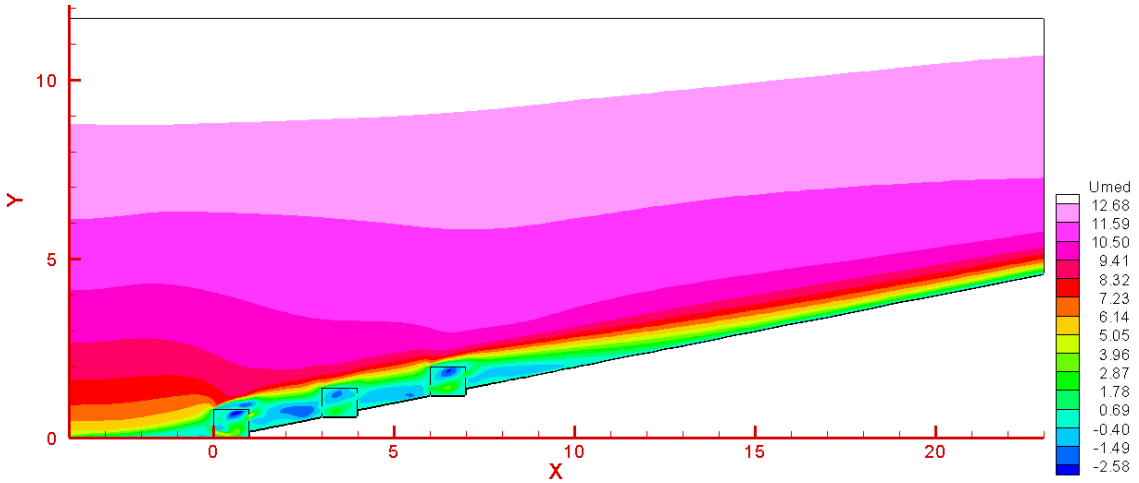

Figura 38 – Campo de velocidades na direção '*x*' para o caso de inclinação *2/10* e distância *2d*. Fonte: Autor (2018)

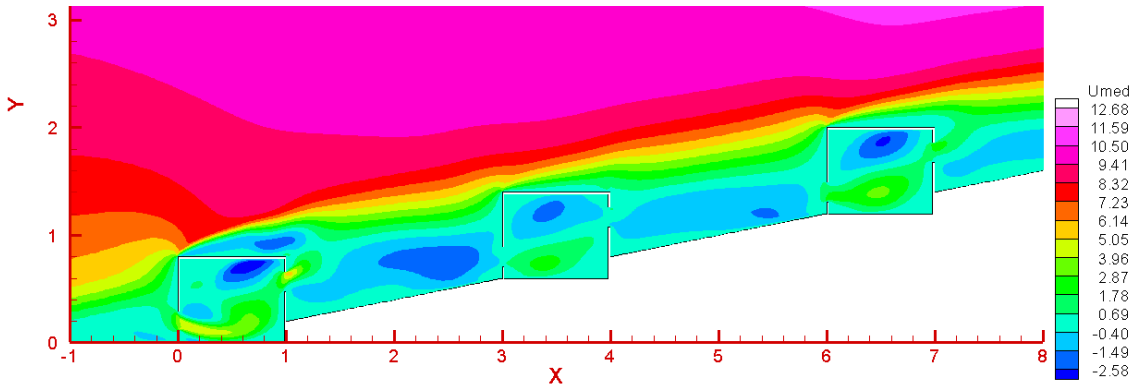

Figura 39 – Campo de velocidades na direção '*x*' para o caso de inclinação *2/10* e distância *2d*. Vista em detalhe. Fonte: Autor (2018)

A distribuição de pressão e as linhas de corrente do escoamento nas proximidades das edificações são mostradas nas Figuras 40 e 41.

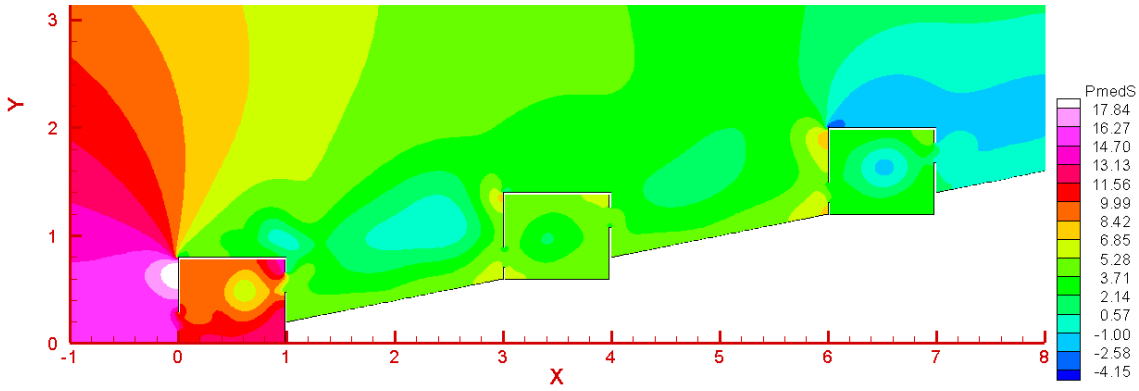

Figura 40 – Distribuição de pressões para o caso de inclinação *2/10* e distância 2*d*. Fonte: Autor (2018)

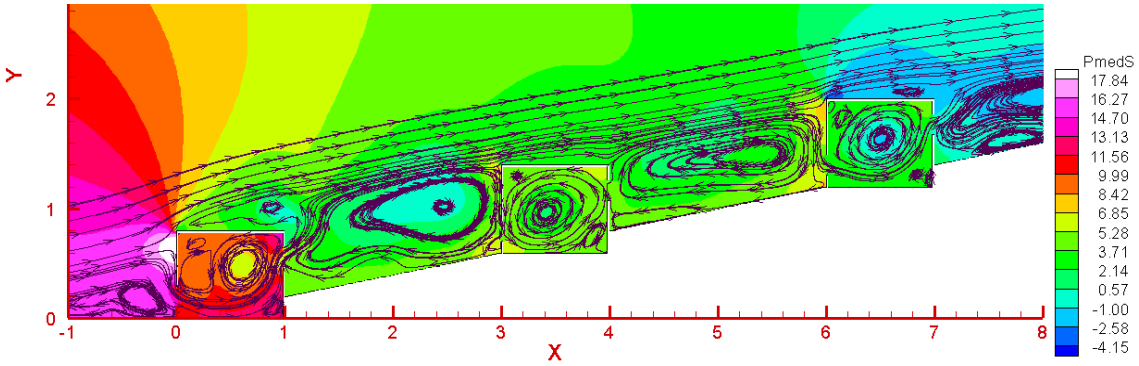

Figura 41 – Linhas de Corrente para o caso de inclinação *2/10* e distância *2d*. Fonte: Autor (2018)

Observa-se que a topologia do escoamento apresenta o mesmo padrão visto nos outros casos, ou seja, a existência de um forte gradiente de pressão apenas na primeira edificação. O escoamento na segunda e terceira edificação são fortemente afetados devido ao bloqueio originado pela primeira edificação.

Os valores das vazões determinados pelos quatro métodos para o caso do terreno com relação altura/comprimento igual a *2/10* e espaçamento entre as edificações igual a L = *2d*, mostram-se na Tabela 7.

Vazões			
Método	**Casa 1**	**Casa 2**	**Casa 3**
Frota	0,69	0,00	0,20
ASHRAE	0,37	-0,01	0,16
Silvani	0,70	0,00	0,21
Numérico	0,53	0,01	0,27

Tabela 7 – Vazões nas edificações no caso da inclinação *2/10* e distância *2d*. Fonte: Autor (2018).

Observa-se que a vazão na primeira residência, assim como no caso anterior, também foi menor do que as encontradas para outras inclinações do terreno, mostrando um padrão de queda no valor da vazão da primeira residência conforme aumenta a inclinação do terreno. Isto justifica-se devido à diminuição do gradiente de pressão na primeira edificação com o aumento da inclinação do terreno.

Percebe-se que o sentido do escoamento no interior da primeira e da terceira edificação é o mesmo, entretanto, a vazão na segunda edificação é praticamente nula variando em torno de zero para os diferentes métodos. Os valores das vazões na terceira edificação variam entre 30 e 50% do valor obtido na primeira edificação.

4.4. Comparação dos resultados de vazão entre os diferentes métodos

Nas Tabelas 8 e 9, mostram-se os resultados obtidos pelos diferentes métodos, para todos os exemplos analisados.

	Distância *1d*								
	Inclinação *0*			**Inclinação *1/10***			**Inclinação *2/10***		
Método	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Frota	1,06	0,01	-0,05	1,04	-0,06	-0,02	0,66	0,02	0,09
ASHRAE	0,38	0,03	-0,07	0,43	-0,09	-0,05	0,36	0,04	0,11
Silvani	1,08	0,02	-0,05	1,06	-0,06	-0,02	0,67	0,02	0,09
Numérico	0,55	0,05	-0,11	0,59	-0,14	-0,06	0,52	0,08	0,18

Tabela 8 – Comparativo entre as vazões nas edificações estudadas para a distância de *1d*. Fonte: Autor (2018)

	Distância *2d*								
	Inclinação *0*			**Inclinação *1/10***			**Inclinação *2/10***		
Método	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Frota	1,04	0,00	0,00	0,95	-0,05	0,07	0,69	0,00	0,20
ASHRAE	0,38	0,01	-0,03	0,40	-0,08	0,07	0,37	-0,01	0,16
Silvani	1,05	0,00	0,00	0,97	-0,05	0,07	0,70	0,00	0,21
Numérico	0,55	0,02	-0,03	0,55	-0,10	0,13	0,53	0,01	0,27

Tabela 9 – Comparativo entre as vazões nas edificações estudadas para a distância de *2d*. Fonte: Autor (2018)

Com relação aos exemplos com inclinação *0*, observa-se uma forte similaridade no escoamento para as duas distancias analisadas entre as edificações. Já para o caso da inclinação *1/10*, para ambas distâncias L percebe-se uma inversão do escoamento interno na segunda edificação e somente na última residência, para o caso da distância *1d*.

Pode-se observar, que os menores valores de vazão foram obtidos para o caso de maior inclinação, sendo que o gradiente de pressão na primeira edificação resultou menor para este caso. Para ambas separações entre as edificações e inclinação do terreno igual a *2/10*, observa-se que as topologias do escoamento são semelhantes. Deve-se ressaltar, que para estas configurações obtêm-se os melhores resultados na ventilação natural em comparação com todos os casos analisados.

De modo geral, os valores das vazões obtidos a partir dos resultados numéricos com o programa HEXAFEM_3D_IFF ficaram mais próximos dos valores calculados com o modelo da ASHRAE com algumas exceções no caso do terreno com maior inclinação.

5. CONCLUSÕES

A análise dos efeitos do vento sobre edificações é hoje um aspecto fundamental na área da Engenharia do Vento, uma vez que se busca cada vez mais um melhor aproveitamento dos materiais e recursos disponíveis para a construção, projetando as estruturas de forma que sejam cada vez mais seguras, econômicas e confortáveis. Torna-se assim necessário um estudo detalhado do impacto do vento na fase de projeto, analisando-se as cargas de vento nas estruturas, a eficiência da ventilação natural e o conforto dos pedestres nas proximidades da edificação em estudo. Além disso, em regiões de clima quente como o Agreste Pernambucano, torna-se conveniente adotar disposições construtivas que possibilitem o uso eficiente do vento através da ventilação cruzada em residência.

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) possibilita uma análise precisa e detalhada do escoamento, sendo, portanto, fundamental na fase de projeto. Nesse contexto, o estudo e desenvolvimento de programas como o HEXAFEM_3D_IFF é importante na formação de um Engenheiro Civil.

No presente trabalho, foram modelados e simulados através da DFC a aerodinâmica e a ventilação natural de três modelos simplificados de vivendas, a fim de analisar como a inclinação do terreno e a separação entre as edificações influencia o desempenho aerodinâmico e o conforto térmico do conjunto habitacional.

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar como a presença da primeira edificação tem forte influência na ventilação das outras edificações. O escoamento é bloqueado parcialmente ou totalmente para as edificações vizinhas, diminuindo significativamente a ventilação cruzada no interior das residências. Observou-se que o escoamento e a vazão no interior das residências resultam profundamente afetado pela inclinação do terreno e a distância entre as mesmas.

Devido ao estudo e análise ser realizado em modelos simplificados de edificações, resulta impossível uma caracterização genérica com recomendações gerais para qualquer tipo de edificação. Ressalta-se assim a importância de sempre realizar um estudo específico para cada problema, levando em consideração as suas particularidades, visando à busca de soluções em nível de projeto de modo a se obter uma maior eficiência no uso da ventilação natural.

Os valores obtidos para as vazões nas três edificações, mostram uma baixa eficiência da ventilação cruzada nas duas últimas edificações, evidenciando a necessidade de introduzir dispositivos para atenuar ou eliminar o bloqueio da primeira edificação. Empregar a ventilação

natural de forma eficiente pode diminuir consideravelmente o consumo de energia para fontes artificiais de climatização do ambiente.

5.1. Sugestões de trabalhos futuros

Destaca-se as limitações do estudo, devido a serem analisados apenas casos bidimensionais de modelos simplificados de edificações. Porém, isso não inválida a importância da análise visto que ela busca apenas uma visão qualitativa dos fenômenos analisados, ficando a análise tridimensional dos exemplos estudados como sugestão para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

AFLAKI, A.; MAHYUDDIN, N.; MAHMOUD, Z.A.C.; BAHARUM, M.R. A review on natural ventilation applications through building facade components and ventilation openings in tropical climates. Energy and Buidings 101. 2015, pp. 153-162.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Handbook Fundamentals. Atlanta: ASHRAE, 2001.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Ais Conditioning Engineers, Inc. Heating, Ventilating, and Air – Conditioning Systems and Equipament. Atlanta: ASHRAE, 2000.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Ais Conditioning Engineers. Handbook Fundamentals. Atlanta: ASHRAE, 4th edition, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças Devidas ao Vento em Edificações. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 66 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 23 p.

AZIZI, M. M.; JAVANMARDI, K. The effects of urban block forms on the patterns of Wind and natural ventilation. Procedia Engineering 180 (2017) 541-549.

BATURIN, V.V. Fundamentals of Industrial Ventilation, 3 ed. Pergamon Press Ltd., 1972. 486 p.

BAXEVANOU, C.; FIDAROS, D.; TSANGRASSOULIS, A. Management of Natural Ventilation in High-Rise Building – a CFD Study. Procedia Enviromental Sciences 38. 2017, pp. 428-435

BLESSMANN, J. Ação do Vento em Telhados. 2. ed. Porto Alegre, RS: Editora da Universidade/UFRGS, 2009. 368 p.

BLESSMANN, J. Aerodinâmica das Construções. 3. ed. Porto Alegre, RS: Editora da Universidade/UFRGS, 2011. 264 p.

BLOCKEN, B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and tem tips and tricks towards accurate and reliable simulations. Building and Environment 91, 2015. pp. 219-245.

BONO, G.; LYRA, P.R.M.; BONO, G.F.F. Simulação Numérica de Grandes Escalas em Escoamentos Incompressíveis através do Método dos Elementos Finitos. Anais Congresso Ibero-Americano em Engenharia Mecânica. 2011, pp. 721-733.

BONO, G.; CABRAL, D.; BONO, G.F.F. Estudo Paramétrico de Dispositivos de Controle Passivo de Vibrações Induzidas por Vórtice. Mecánica Computacional, v. 31, 2012. pp. 69-84.

BRUNETTI, F. Mecânica dos Fluidos. 2. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2008. 425 p.

CABRAL, D.N.; BONO, G.; BONO, G.F.F. Estudo paramétrico de dispositivos de controle passive de vibrações induzidas por vórtices. Associación Argentina de Mecánica Computacional, v. 31, 2012. pp. 69-84.

CAVALCANTE, M.C.A.S.; SILVA, L.L.J; BONO, G.F.F.; BONO, G. Análise numérico de supressores de vórtices tipo “Splitter Plate” e “Fairing”. Associación Argentina de Mecánica Computacional, v. 34, 2016. pp. 3481-3489.

CHU, C.R.; CHIANG, B.F; Wind-driven Cross Ventilation in Long Buildings. Building and Environment, v. 80, 2014. pp. 150-158.

CHU, C.R.; CHIU, Y.H.; TSAI, Y;-T; WU, S.-L. Wind-driven natural ventilation for buildings with two openings on the same external wall. Energy Build, v. 108, 2015. pp. 365-372

CLEZAR, C.A.; NOGUEIRA, C.R. Ventilação industrial. Florianópolis: UFSC, 1999.

ETHERIDGE D. Natural Ventilation of Buildings: Theory and Measurement and Design. Chichester, England: John Wiley and Sons, 2012. 415 p;

FRANKE, J.; HELLSTEN, A.; SCHLÜNZEN, H.; CARISSIMO, B. Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment. University of Hamburg, Germany: Cost Office, 2007.

FREIXANET, V.A.F. Arquitectura Bioclimatica. Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, México: División de Ciencias y Artes para el Diseño, 2004.

FROTA, A.B.; SCHIFFER, S.R. Manual de Conforto Térmico. 5. ed. São Paulo, SP: Studio Nobel, 2001. 243 p.

GRAÇA, G. C.; LINDEN, P. Ten questions about natural ventilation of non-domestic buildings. Building and Environment, v. 107, 2016. pp. 263-273

GUO, W.; LIU, X.; YUAN, X. A Case Study on Opitmization of Building Design Based on CFD Simulation Technology of Wind Environment. Procedia Engineering 121, 2015. pp. 225-231.

HIRSCH, C. Numerical Computation of Internal and External Flows. 2 ed. Burlington, MA: John Wiley e Sons, 2007. 656 p.

HOLMES, J. Wind Loading Structures. 2 ed. Abingdon, OX: Taylor & Francis, 2007. 433 p.

INMET. Arquivos climáticos INMET 2016. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>. Acesso em: 07/02/2018.

JONES, B. M.; COOK, M. J.; FITZGERALD, S.D. A Review of Ventilation Opening Area Terminology. Energy and Buildings, v. 118, 2016, pp. 249-258.

KARAVA, P.; STATHOPOULOS, T.; ATHIENITIS, A. K. Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable façade elements. Building and Environment 46, 2011. pp. 266-279.

KATO, S.; MURAKAMI, S.; TAKAHASHI, T.; GYOBU, T. Chained Analysis of Wind Tunnel Test and CFD on Cross Ventilation of Large-scale Market Building. Journal of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics. v. 67, 1997, pp. 573-587.

LOHNER, R. Applied CFD Techniques: An Introduction based on Finite Element Methods. 2 ed. West Sussex, England: John Wiley e Sons, 2008. 519 p.

MALHEIROS, A. L.; DIAS, N. L. Determinação prática da altura da camada-limite atmosférica para aplicaço em modelos de dispersão de poluentes. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. 2004.

MALISKA, C. R. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional Revisada e aplicada. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ: GEN-Grupo Editorial Nacional, 2013. 453 p.

NASCIMENTO, A.V.; BONO, G.; BONO, G. F. F. Análise numérica dos efeitos geométricos na ventilação natural de edificações de baixa altura. Asociación Argentina de Mecánica Computacional, v. 35, 2017, pp. 1069-1077.

OLGYAY, V. Design with climate. Princeton University, New Jersey, 1963.

OMRANI, S.; GARCIA-HANSEN, V.; CAPRA, B.; DROGEMULLER, R. Natural ventilation in multi-storey buildings: Design process and review of evaluation tools. Building and Environment, v. 116, 2017, pp. 182-194.

PLETCHER, R.H.; TANNEHILL, J. C.; ANDERSON, D. A. Computacional Fluid Mechanics and Heat Transfer. 3 ed. Boca Raton, Florida: Taylor e Francis Group, 2013. 740 p.

PROJETEE. Conheça soluções bioclimáticas para projetar edificações energeticamente eficientes. Disponível em: <http://projeteee.mma.gov.br>. Acesso em: 06 dez. 2017.

SANTOS, J.A.; BONO, G. Ventilação Natural em Unidades Habitacionais de Interesse Social: Estudo Numérico. Anais XXIII Congresso de Iniciação Científica da UFPE. 2015, 4 p.

SANTOS, J.A.; PINHEIRO, R.F.; JÚNIOR, M.A.P.; BONO, G. Estudo dos Efeitos de Interferência Aerodinâmicos Sobre Edificações. Anais I Congresso Brasileiro de Fluidodinâmica Computacional. 2016, 4 p.

SILVANI, M. Subsídios para o Projeto da Ventilação Natural em Pavilhões Industriais. 2005. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2005.

SONG, J.; MENG, X. The Improvement of Ventilation Design in School Buildings Using CFD Simulation. Procedia Engineering 121. 2015, pp. 1475-1481.

STATHOPOULOS, T.; BASKARAN, B. A. Computer Simulation of Wind Environmental Conditions around Buildings. Journal of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics. v. 18, 1996, pp. 876-885.

STAVRIDOU, A.D. Breathing architecture: Conceptual architectural design based on the investigation into the natural ventilation of buildings. Frontiers of Architectural Research. v. 4, 2015. pp. 127-145.

TALEB, H.M. Natural ventilation as energy efficient solution for achieving low-energy houses in Dubai. Energy and Buildings 99, 2015. pp. 284-291.

TOLEDO, E. Ventilação natural das habitações. Edufal, Maceió, 1999.

SCHLICHTING, H. Boundary Layer Theory. McGraw-Hill, New York, 1979.

WBCSD. A call to action – Energy Efficiency in Buildings Magazine. Disponível em: <http://www.wbcsd.org/Projects/Energy-Efficiency-in-Buildings/Resources/A-call-to-action-Energy-Efficiency-in-Buildings-Magazine>. Acesso em: 16/01/2018.

YOUM W.; SHEN, J.; DING, W. Improving Wind Enviroment of Residential Neighborhoods by Understanding the Relationhip between Building Layouts and Ventilation Efficiency. Energy Procedia 105, 2017. pp. 4531-4536.