



AeroSim

Apresentação técnica e institucional

CNPJ: 41.534.456-0001/19

Eng. Aron Letchacovski Zavelinski

Diretor de Engenharia

CREA/PR 226481/D

aron@aerosim.io

Waine Oliveira Junior

Diretor Executivo

waine@aerosim.io



Alameda Cabral, 475 - São Francisco, Curitiba - PR, 80410-210



consultoria@aerosim.io



aerosim.io



SUMÁRIO

A AeroSim.....	3
Associações.....	3
Equipe Técnica.....	4
Serviços e clientes.....	5
Parcerias Acadêmicas.....	6
Uso de CFD em engenharia de vento.....	7
Software.....	8
Validações.....	10
Camada limite atmosférica.....	11
Efeito topográfico.....	13
Edificações horizontais.....	15
Edificações altas.....	17
Conforto de pedestres.....	22
Anexo A - Uso de CFD em engenharia de vento.....	24
Anexo B - Publicações Acadêmicas.....	29
Revistas internacionais.....	29
Artigos em congressos.....	29





A AeroSim

A AeroSim foi fundada em 2021, após a experiência do time fundador em P&D envolvendo projetos de fluidodinâmica computacional (CFD) para a indústria de óleo e gás. Desde então a empresa adquiriu expertise na execução de estudos avançados de ventos para estruturas, tendo atendido mais de 70 projetos, não se restringindo ao mercado nacional brasileiro, mas também às construções na América Latina, Europa e Ásia.

Também desenvolveu parceria com grandes escritórios, construtoras e calculistas de edifícios altos e galpões, com destaque para Vendramini Engenharia, Precisão Estrutural, Estrutural Engenharia, Codeme, o calculista Sérgio Stolovas e o calculista italiano Andrea Imbrenda.

Tais trabalhos só foram possíveis pelo desenvolvimento de um software próprio de fluidodinâmica computacional focado em engenharia de vento, que demonstrou precisão e desempenho muito superiores a alternativas de mercado, demonstrando pelo extenso [portfólio de validação](#), com mais de 90 comparações com túnel de vento. A partir disso foram desenvolvidas séries de guidelines para as simulações e parâmetros de qualidade que são constantemente aprimorados pela equipe da AeroSim.

Atualmente o software é disponibilizado para parceiros acadêmicos, com a qualidade do software e de nossas guidelines sendo demonstradas de maneira independente também.

Associações

Somos associados à ABECE e integrante do programa Nvidia Inception. Desde 2021 incubada na Incubadora CELTA, da Fundação CERTI, uma instituição voltada à inovação e ao desenvolvimento tecnológico, promovendo soluções para a indústria e a sociedade. Além disso, é membro residente do Accelera Hub, um hub de inovação localizado em Curitiba com foco na construção civil e no urbanismo, que reúne startups, construtoras, incorporadoras, fornecedores e investidores, favorecendo conexões estratégicas para o negócio.

A parceria com laboratórios e instituições de pesquisa é um ponto chave na estratégia da empresa, para validação de tecnologias e desenvolvimento colaborativo. No Brasil, colabora com o IPT e com a UTFPR, com acesso ao laboratório de fluidodinâmica computacional por meio do CERNN (Centro de Pesquisa em Reologia e Fluidos Não Newtonianos). Internacionalmente, possui parcerias com a Nova Fluid Mechanics, a Universidade de Bristol e a Universidade de Concordia, que além de





colaborarem em pesquisas, oferecem infraestrutura com túneis de vento físicos para validações experimentais.

A Empresa já participou de diferentes editais e programas de fomento à inovação e obteve os aportes para apoiar seu desenvolvimento, tais como o Sebrae Catalisa ICT, Centelha II – Fundação Araucária, Oracle for Startups, Nvidia Inception Program e Finep Inovacred.

Equipe Técnica

A AeroSim conta com uma equipe técnica experiente e de perfil multidisciplinar, reunindo as competências essenciais para o desenvolvimento do negócio. Hoje a equipe é liderada pelo engenheiro Aron Letchacovski Zavelinski, formado em engenharia mecânica pela UTFPR, com mais de oito anos de experiência em fluidodinâmica computacional (CFD), atuando tanto na área acadêmica quanto profissional. Desde 2021, tem direcionado seu trabalho para a engenharia de vento, desenvolvendo metodologias para o uso de CFD em estudos de vento aplicados a estruturas como edifícios e galpões, com foco especial em cargas de vento. Atualmente, é diretor de engenharia na AeroSim e mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Materiais PPGEM-CT, UTFPR, com pesquisa voltada à engenharia de vento. Seu currículo Lattes pode ser acessado via: lattes.cnpq.br/2743293930062251.





Serviços e clientes

A empresa vem atuando desde 2021 fornecendo informações que qualificam a tomada de decisão relacionadas aos efeitos do vento sobre projetos de construção civil. Através da aplicação de métodos de fluidodinâmica computacional transientes de alta fidelidade somos capazes de demonstrar como a combinação entre terreno, as construções e o vento afetam os principais parâmetros do projeto.

Nossa atuação nessa trajetória foi bastante ampla em escopo, envolvendo serviços como estimativa de efeitos topográficos, pressões externas e internas, forças sobre elementos selecionados, efeitos dinâmicos e avaliação de conforto de pedestres. Atuamos, também, em múltiplos mercados de Arquitetura, Engenharia e Construção, incluindo o projeto de galpões logísticos, edificações industriais, hangares, portos e edifícios.

Em nossos projetos já trabalhamos com algumas das maiores gestoras de ativos imobiliários, incorporadoras, gerenciadoras, construtoras e fornecedoras, tais como: Brookfield, Cy.capital, GLP, Prologis, Golgi, Fullwood, Moura Dubeux, Monto, Libercon, JLC, Ribeiro Caram, Codeme, entre outros. Atuamos, também, com alguns dos principais projetistas do país, tais como Estrutural Engenharia, Vendramini Engenharia, Precisão Estrutural, AS Estruturas, Kalkulo Projetos Estruturais, entre outros.

Além disso, tivemos trabalhos com parcerias internacionais, tais como com a Tian Building Engineering, empresa de Singapura especializada em estudos computacionais para estruturas, Proges Engineering, escritório de consultores estruturais italiano e Grupo Petra, construtora e incorporadora paraguaia.





Parcerias Acadêmicas

Desde sua fundação, a empresa tem buscado construir uma rede sólida de parcerias técnico-científicas e comerciais.

Em 2025, tivemos um trabalho desenvolvido por um parceiro da University of Bristol, utilizando nossa tecnologia, apresentado no 15th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, na Croácia.

Também destaca-se a colaboração com a TU Dortmund University, em um estudo de benchmark com dados de simulação fornecidos por nossa equipe e atualmente em revisão para publicação, além de contatos com a University of La Coruña, na Espanha, com interesse em futuras pesquisas sobre escoamentos transientes em edifícios. Avançamos também com a Concordia University, no Canadá, com possibilidade de utilização de seu túnel de vento para validações experimentais, ampliando nossa rede de parcerias acadêmicas.

No Brasil, consolidamos parceria com o CERNN (UTFPR), que tem proporcionado acesso à infraestrutura de pesquisa e suporte técnico, resultando em publicações conjuntas em eventos como o ICWE. Outro marco é a colaboração com o CRIACIV, da Itália, um dos principais centros de engenharia do vento da Europa, com quem já realizamos testes cegos de validação. Além disso, a AeroSim é uma empresa associada à ABECE (Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural) e participou dos comitês mais recentes de revisão da norma NBR 6123.

Publicações acadêmicas dos membros da AeroSim são apresentados no Anexo B.





Uso de CFD em engenharia de vento

O posicionamento da AeroSim quanto ao uso de métodos computacionais para a determinação de cargas de vento e seus efeitos dinâmicos está em consonância com o consenso da comunidade acadêmica e com o estado da arte. Nossa visão é pautada nos seguintes princípios:

- O ensaio em túnel de vento físico permanece como o método mais preciso e confiável para a determinação de cargas aerodinâmicas, com exceção apenas de medições de campo, que por sua natureza não se aplicam a estruturas em fase de projeto. Portanto, para projetos de alta complexidade, tradicionalmente sujeitos a ensaios obrigatórios em túnel de vento, não consideramos o CFD como substituto nem concorrente viável, considerando o atual nível de maturidade da tecnologia.
- Para projetos nos quais o dimensionamento aerodinâmico seria feito exclusivamente por métodos analíticos, o uso de CFD pode representar um avanço substancial, ao reduzir incertezas e oferecer alto nível de detalhamento sobre os campos de pressão, padrões de escoamento e combinação de cargas.
- A simulação numérica (CFD) pode ser empregada em fases conceituais do projeto, contribuindo para acelerar o ciclo de desenvolvimento e reduzir o número de iterações em túnel de vento, otimizando o processo de tomada de decisão.
- Não endossamos o uso irrestrito ou desqualificado de CFD para fins de projeto executivo, tampouco apoiamos a inclusão desse tipo de posicionamento em normas técnicas. Defendemos, ao contrário, a exigência do uso de modelos transientes de alta fidelidade, com validação explícita dos procedimentos utilizados, por meio de comparação com dados experimentais representativos - provenientes de geometrias e condições análogas às do projeto em análise.
- Encorajamos, ainda, a inclusão em normas técnicas de critérios de desempenho bem definidos, que todo método de determinação de cargas de vento - seja experimental ou numérico - deve ser capaz de reproduzir, garantindo rastreabilidade, confiabilidade e coerência nos resultados utilizados para fins de dimensionamento estrutural.

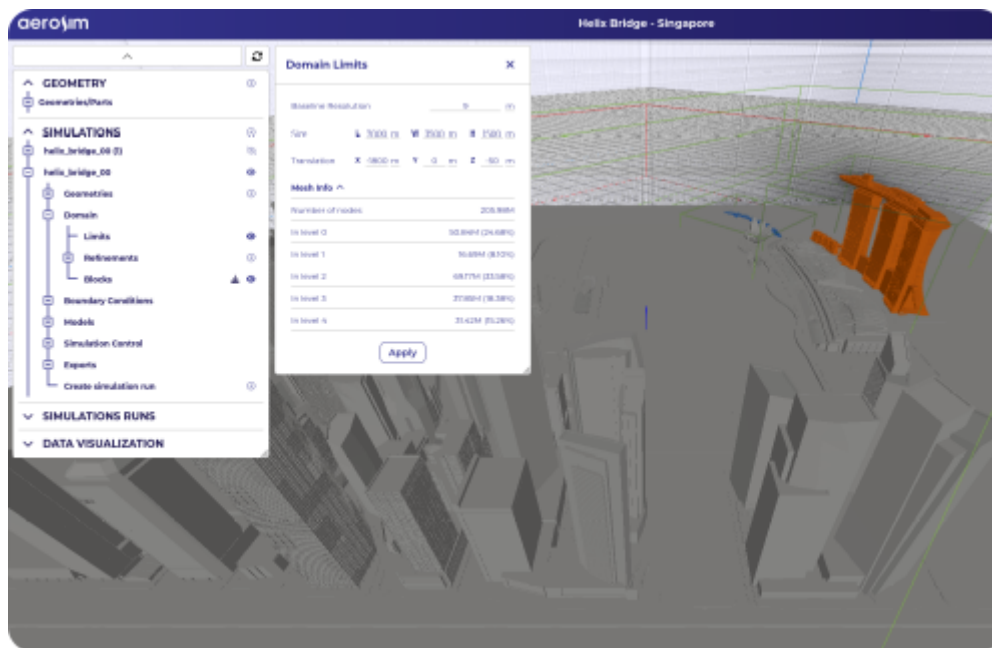
O anexo A apresenta uma revisão bibliográfica do posicionamento acadêmico e normativo pelo mundo, o que utilizamos como base para nosso posicionamento.





Software

A tecnologia desenvolvida pela AeroSim envolve um alto grau de complexidade técnica, tanto na modelagem física quanto na sua arquitetura computacional. Trata-se de uma solução baseada no método Lattice Boltzmann (LBM), uma abordagem alternativa em fluidodinâmica computacional (CFD), fundamentada na equação de Boltzmann da teoria cinética dos gases.



Diferentemente das formulações clássicas baseadas nas equações de Navier-Stokes, que descrevem o escoamento de forma determinística em escala macroscópica, o LBM adota uma perspectiva estatística, representando o comportamento do fluido por meio da evolução de distribuições de partículas em escala mesoscópica. Embora o método LBM tenha sido originalmente desenvolvido no final da década de 1980, seu uso só se tornou mais popularizado recentemente, impulsionado pelos avanços em capacidade de processamento e memória das unidades de processamento gráfico (GPUs).

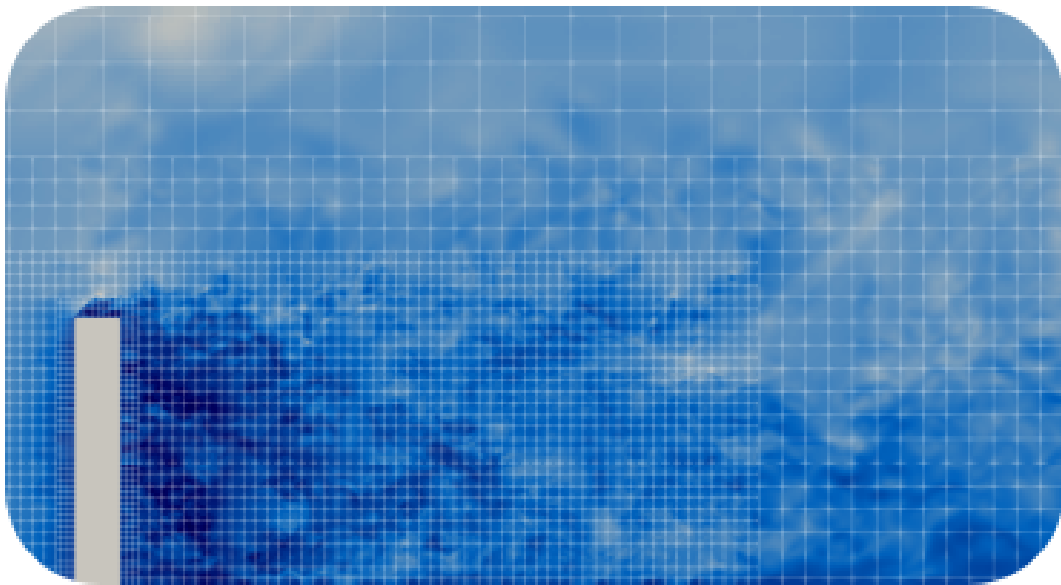
Um dos principais atrativos do LBM é sua estrutura algorítmica em que a maior parte das operações pode ser realizada localmente, ou seja, sem a necessidade de comunicação entre nós adjacentes. Tal característica torna o LBM especialmente adequado para execução paralela em GPUs. Esse perfil naturalmente paralelo renovou o interesse em otimizar o LBM para





ambientes de alto desempenho, sobretudo no contexto de aplicações científicas e industriais.

O diferencial computacional do software é expressivo: a solução atual permite a simulação de um caso típico em cerca de 12 horas, enquanto ferramentas convencionais da indústria (baseadas em LES) levam aproximadamente 5 dias para entregar resultados equivalentes. Essa performance só é possível graças a um domínio técnico que combina a compreensão da física envolvida com habilidades avançadas em paralelização e programação para GPU. Esse conjunto de requisitos torna o desafio de materializar a solução particularmente complexo.



No entanto, a experiência consolidada da equipe executora, aliada a parcerias estratégicas já estabelecidas e à futura integração de profissionais-chave, são fatores determinantes para viabilizar a execução bem-sucedida do projeto. A trajetória da equipe reflete uma sólida base técnica, construída ao longo de anos de atuação em pesquisa aplicada e desenvolvimento de soluções computacionais. Desde a modelagem física de fenômenos complexos até a implementação de códigos de alto desempenho, os integrantes acumulam experiências que vão da academia à indústria. Esse histórico foi determinante para que a empresa enxergasse a viabilidade de criar um software nacional de alta eficiência, explorando o método Lattice Boltzmann (LBM) para aplicações práticas em engenharia do vento.





Validações

Todo método ou ferramenta que se propõe a informar decisões de engenharia deve necessariamente justificar suas bases epistêmicas; no contexto de métodos numéricos, tal exigência corresponde ao arcabouço clássico de verificação (correção matemática e numérica da implementação) e validação (demonstração de que o modelo reproduz fenômenos físicos observáveis dentro do domínio de aplicação). Em engenharia de vento, o núcleo físico é dado pelas equações de Navier–Stokes, cuja validade enquanto modelo de escoamentos atmosféricos é amplamente estabelecida, diferentemente de contextos multi físicos fortemente dependentes de leis constitutivas empíricas interdependentes. Assim, o foco epistêmico desloca-se para a capacidade do método computacional de reproduzir, com acurácia estatística, as grandezas relevantes ao projeto estrutural: campos transientes de pressão e força, espectros de potência, correlações espaço-temporais e estatísticas associadas à cauda das distribuições (eventos extremos). Tais requisitos implicam alto custo computacional e, em geral, restringem a aplicação a métodos transientes de elevada fidelidade.

A cada atualização do núcleo físico do software é executada uma bateria sistemática de testes de verificação, com o objetivo de assegurar que propriedades fundamentais de escoamentos laminares e turbulentos sejam corretamente reproduzidas. Esses testes incluem casos canônicos, tais como escoamento em canal plano e em duto circular, bem como escoamento externo em torno de esfera, cilindro e cubo apoiado sobre o solo. Tais configurações possuem soluções analíticas, semi-analíticas ou dados experimentais consolidados, permitindo a identificação imediata de inconsistências numéricas ou desvios físicos significativos, de modo a impedir que erros estruturais se propaguem para versões estáveis da aplicação.

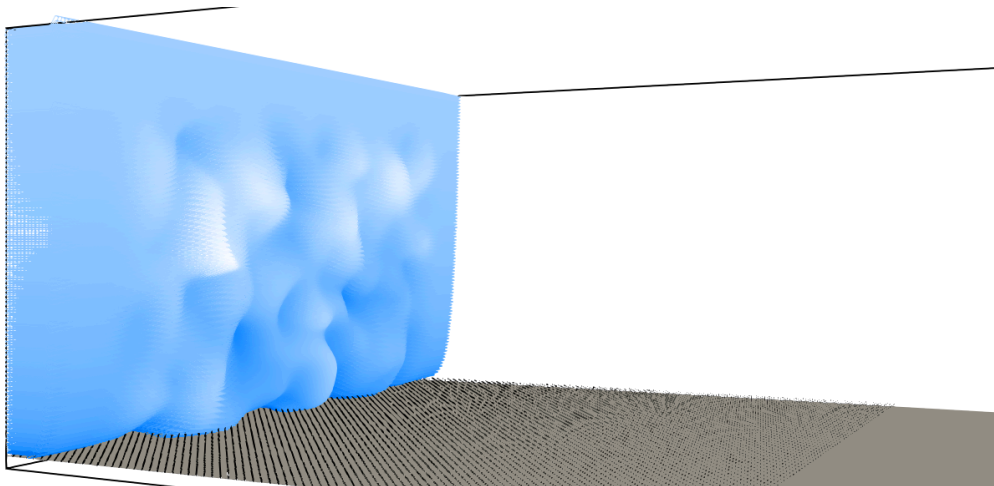
Nesta seção são apresentadas exclusivamente as validações com maior direcionamento e relevância para aplicações em engenharia de vento, abrangendo tanto o software quanto os procedimentos de pré- e pós-processamento empregados. Detalhamentos completos dos casos aqui mencionados encontram-se disponíveis em nosso portfólio público, atualizado periodicamente, no qual as campanhas de validação conduzidas são documentadas de forma sistemática: portfolio.aerosim.io.





Camada limite atmosférica

A camada limite atmosférica (ABL, do inglês *Atmospheric Boundary Layer*) é a porção mais baixa da atmosfera, diretamente influenciada pelo atrito com a superfície, estratificação térmica e características do terreno. Dentro dessa camada, a velocidade do vento, a intensidade da turbulência e as escalas de comprimento variam significativamente com a altura e com as características da superfície. Para aplicações em engenharia de ventos, a ABL é o regime de fluxo relevante, pois governa as cargas e respostas experimentadas por estruturas, pedestres e infraestrutura expostos a ventos naturais. Sua correta replicação é essencial para que todas as demais aplicações em engenharia de vento sejam adequadamente realizadas.

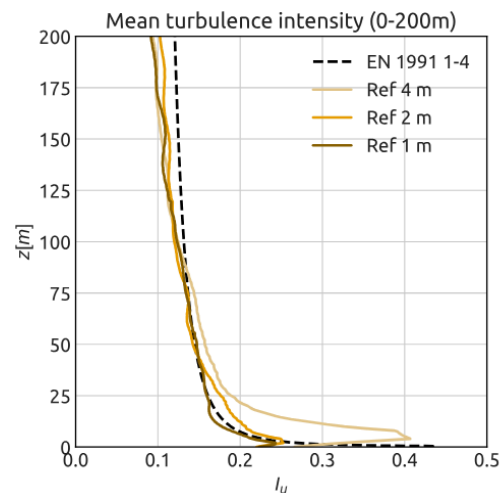
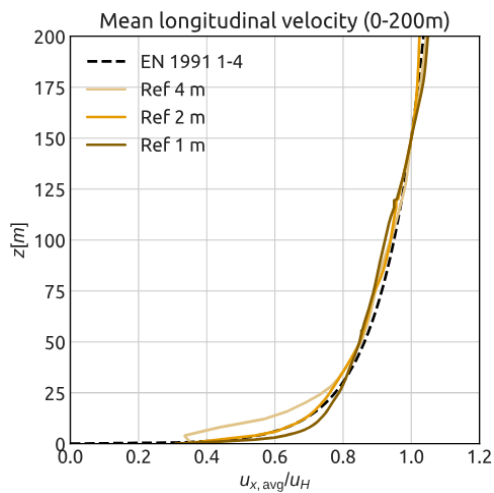


Para a geração do perfil da camada limite atmosférica é empregado um gerador de turbulência sintética baseado no Synthetic Eddy Method (SEM), em conjunto com elementos de rugosidade distribuídos ao longo de um comprimento de desenvolvimento. O objetivo é promover a transição do campo imposto na entrada para um estado estatisticamente estacionário compatível com a camada limite atmosférica, permitindo o ajuste do conteúdo espectral por meio do mecanismo de cascata energética descrito por Kolmogorov. Após esse comprimento estabelece-se a região útil do domínio, na qual edificações podem ser inseridas e onde são verificadas as propriedades estatísticas efetivas do escoamento.





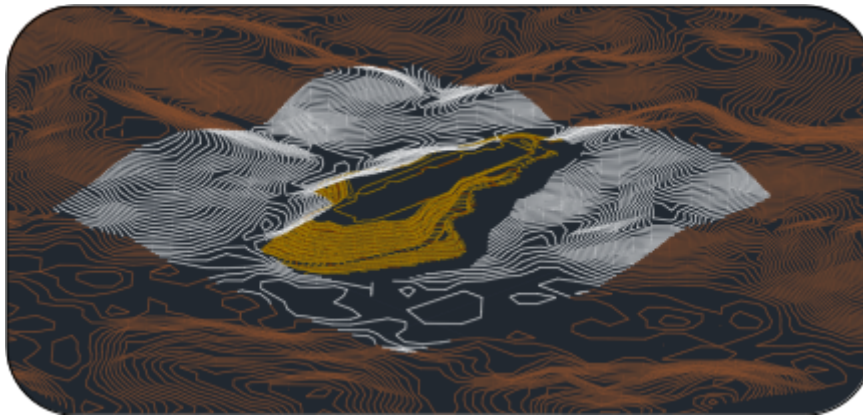
As figuras a seguir apresentam os perfis de velocidade média longitudinal e de intensidade turbulenta correspondentes à categoria de rugosidade de campo aberto (Categoria II) conforme a EN 1991-1-4, para três níveis de refinamento de malha. A partir dessas e outras comparações realiza-se o ajuste sistemático do refinamento espacial e da configuração dos elementos de rugosidade, de modo a reproduzir os perfis médios e as estatísticas turbulentas de referência dentro de tolerâncias previamente estabelecidas.





Efeito topográfico

A topografia introduz modificações espacialmente variáveis na camada limite atmosférica ao induzir aceleração, desaceleração, separação e aumento de turbulência do escoamento sobre colinas, cristas, escarpas e vales. Em condições reais, esses efeitos são inerentemente tridimensionais: a interação entre feições do terreno em diferentes direções gera padrões complexos de escoamento, incluindo canalização, interferência de esteiras e circulações secundárias. Como resultado, a estrutura da camada limite afasta-se significativamente das hipóteses de terreno plano, com alterações localizadas na velocidade média, no cisalhamento e nas características turbulentas.

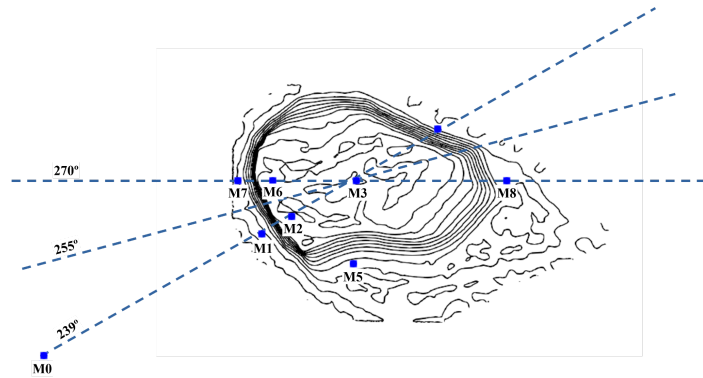
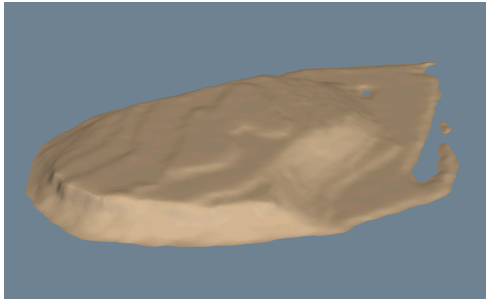


Como as pressões induzidas pelo vento escalam quadraticamente com a velocidade local do vento, mesmo amplificações relativamente pequenas de velocidade decorrentes da topografia podem produzir aumentos substanciais nas pressões e nas ações estruturais. Essa sensibilidade não linear é ainda agravada por interações tridimensionais do terreno, nas quais efeitos de aceleração associados a feições individuais não podem ser superpostos de forma linear ou independente.

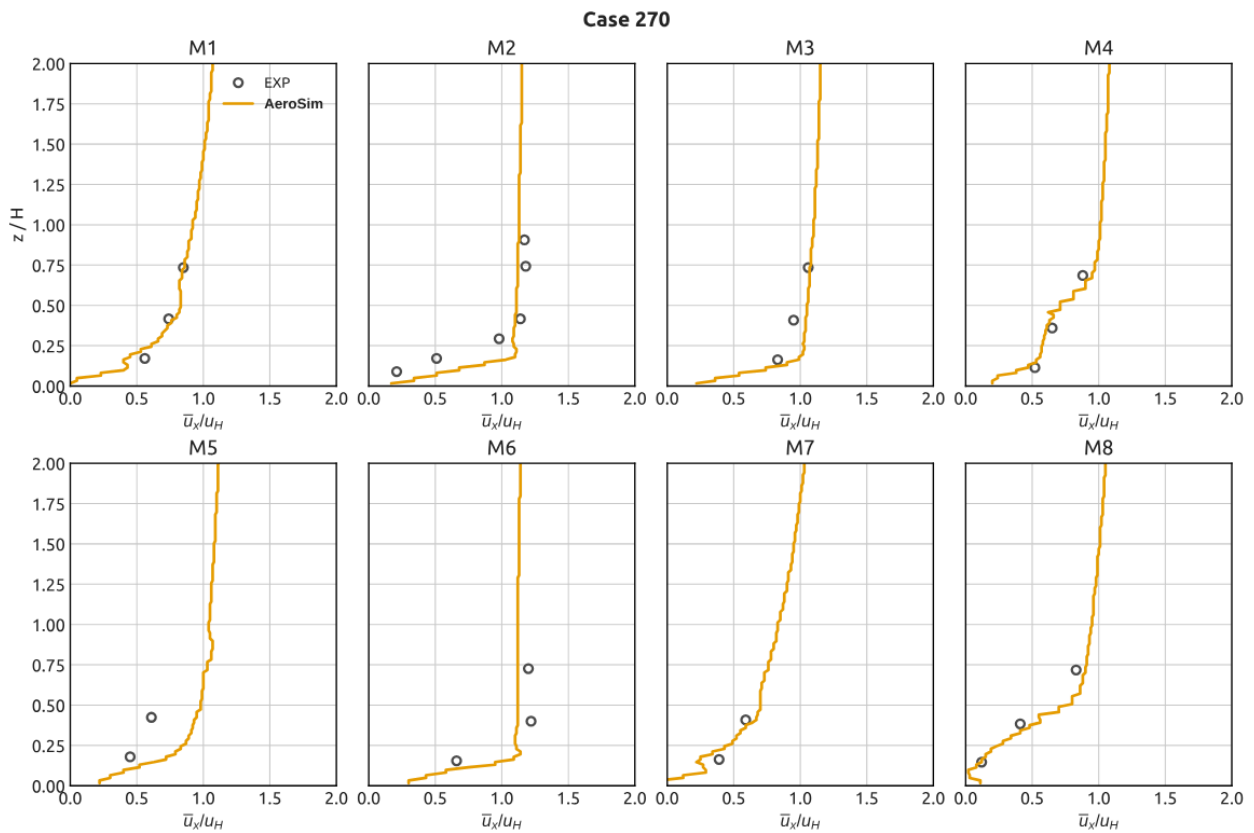




As figuras abaixo ilustram a topografia de Bolund, uma ilha de 12m de altura situada em Roskilde Fjord, Dinamarca, assim como o posicionamento dos mastros com anemômetros em diferentes alturas.



A imagem abaixo apresenta o comparativo entre o fator topográfico medido experimentalmente em campo e obtido via simulação numérica para a incidência de vento de 270°.

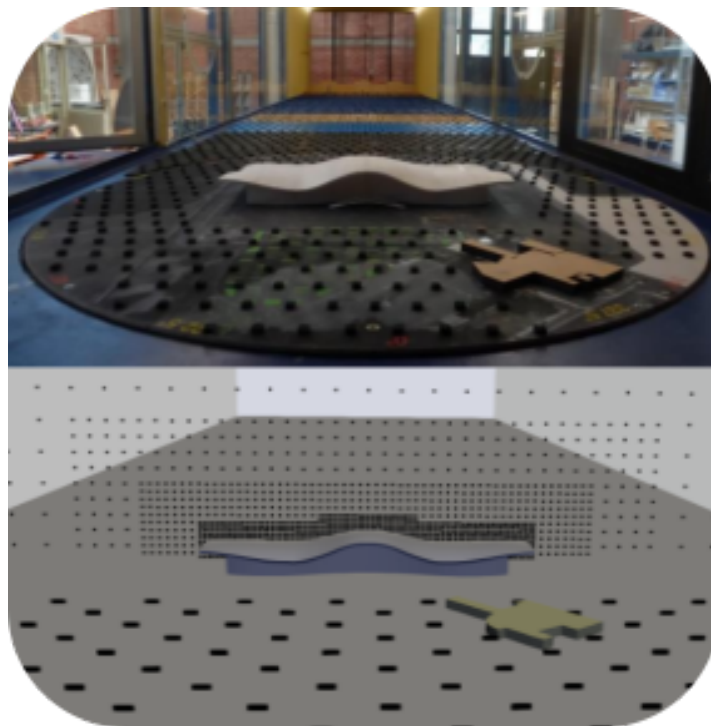




Edificações horizontais

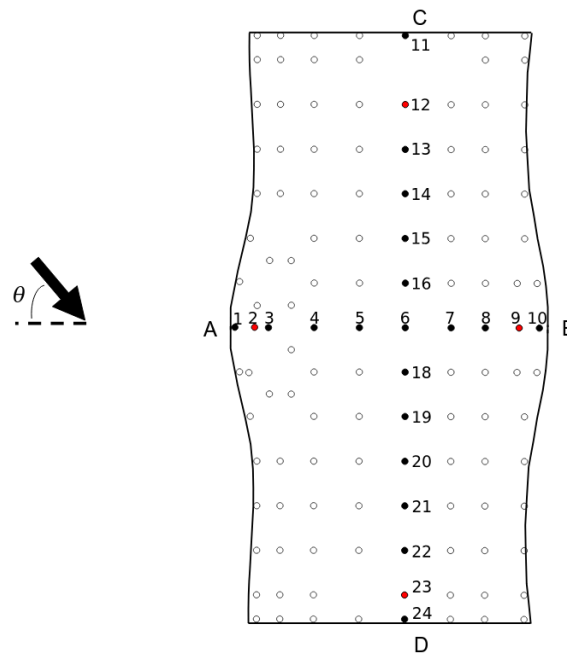
A medição de pressões de vento em edificações de baixa altura, como instalações industriais e galpões, apresenta desafios específicos. Elementos como marquises, beirais e lanternins introduzem arestas vivas, separação do escoamento e zonas de recolamento que geram campos de pressão altamente localizados. Esses efeitos não são adequadamente capturados por modelos simplificados de carregamento e, portanto, requerem medições detalhadas para resolver sua variabilidade espacial. A reprodução acurada de pressões de pico é particularmente crítica em edificações de baixa altura, pois falhas estruturais e de vedação são frequentemente governadas por sucções extremas de curta duração, e não por cargas médias. Esses picos são fortemente influenciados pela correlação temporal e espacial do escoamento. Assim, a medição adequada deve preservar não apenas as pressões médias e valores RMS corretos, mas também a coerência e simultaneidade das flutuações de pressão entre diferentes superfícies, que afetam diretamente as forças resultantes e as combinações de carga.

A figura abaixo apresenta a comparação entre a configuração experimental em túnel de vento e sua correspondente replicação numérica, considerando o escoamento sobre um aeroporto internacional com cobertura de geometria orgânica.

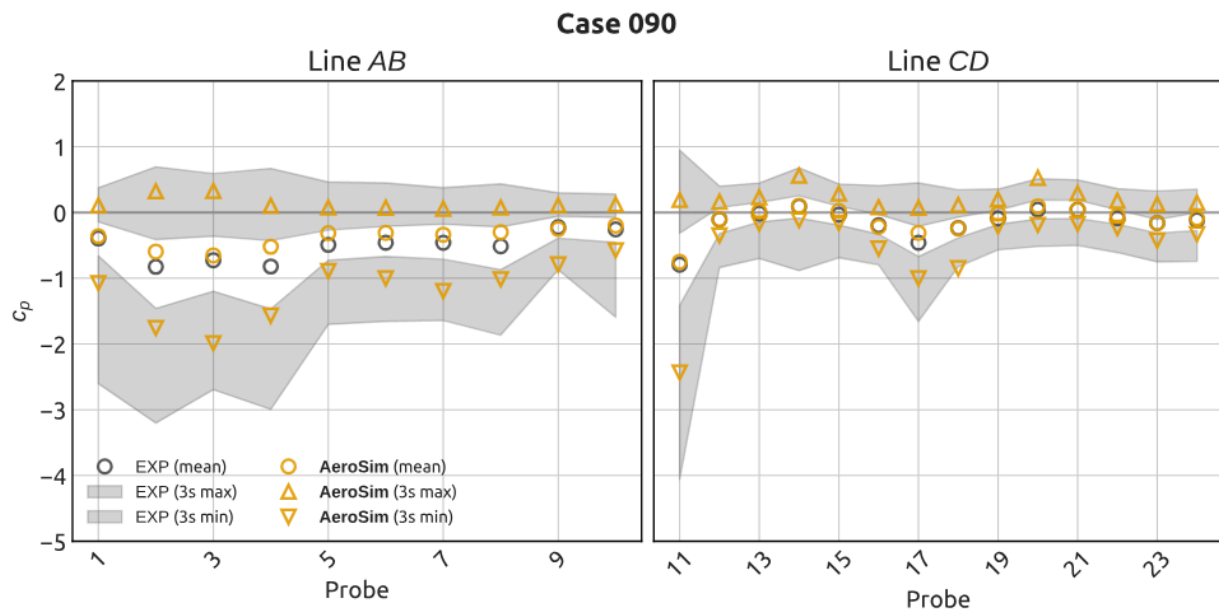




A figura abaixo apresenta a distribuição de sensores de pressão e o sistema de orientação das incidências de vento.



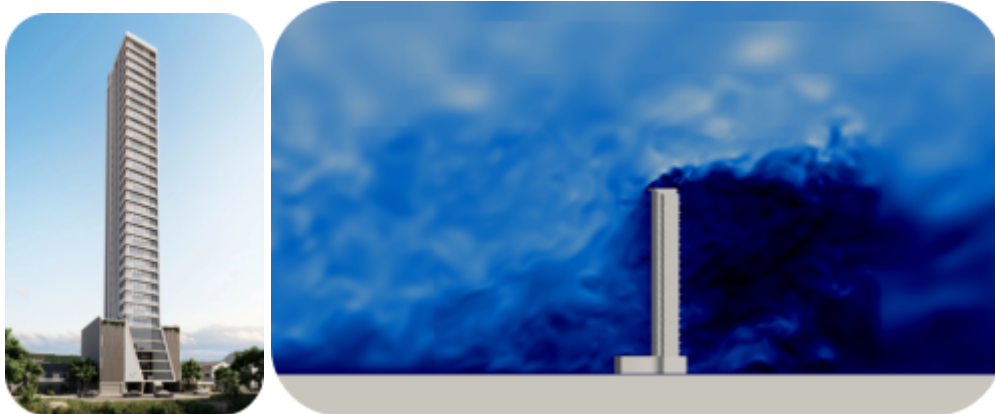
As figuras abaixo apresentam as estatísticas de coeficiente de pressão mínima, média e máxima, para a incidência de vento de 90° .





Edificações altas

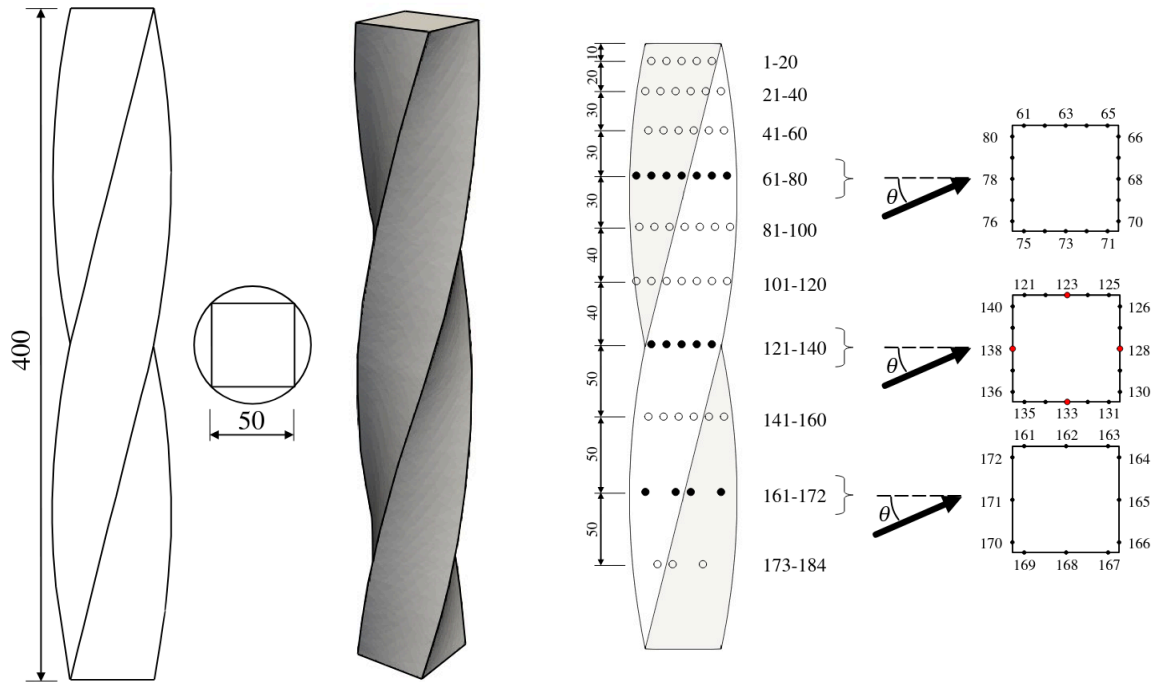
Para edifícios altos, medições de pressão do vento constituem insumo fundamental para o dimensionamento de elementos de fachada, como sistemas de envidraçamento, montantes, painéis de revestimento e componentes de ancoragem. Esses elementos são tipicamente governados por pressões locais de pico e não pelas ações estruturais globais, tornando essenciais dados de pressão detalhados e espacialmente resolvidos para garantir segurança e desempenho em serviço.



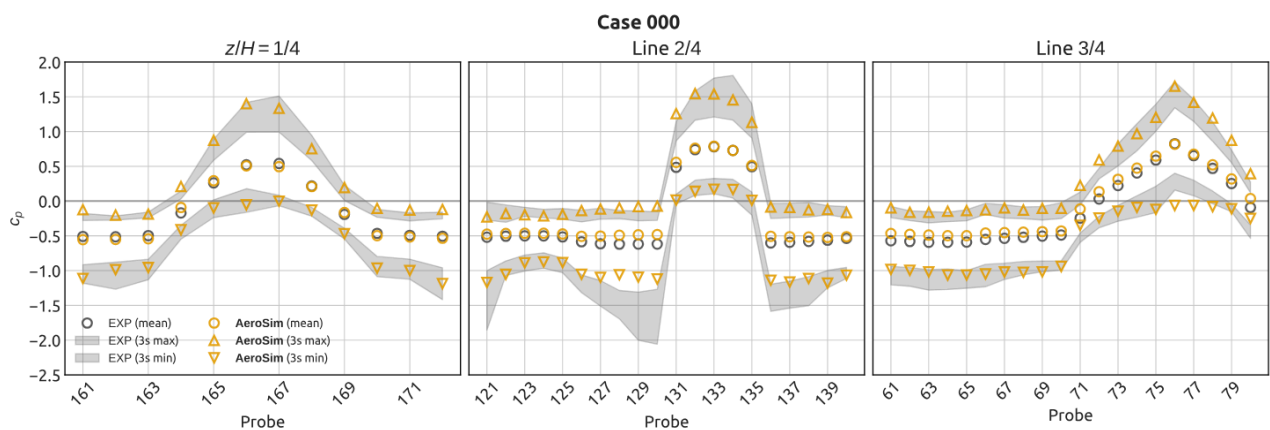
Do ponto de vista estrutural, a integração das forças de vento por pavimento é requisito central para o dimensionamento do sistema resistente principal. Efeitos na direção do vento, transversal ao vento e torcionais devem ser derivados de históricos temporais de forças. A resposta dinâmica dessas estruturas requer ainda a reprodução das correlações temporais e espaciais do campo de vento, pois efeitos ressonantes e quase-ressonantes dependem diretamente da coerência das flutuações de pressão ao longo da altura e na planta da edificação.



Para se avaliar os efeitos do vento sobre uma edificação isolada de **forma complexa**, será utilizado o estudo sobre uma edificação helicoidal realizado na Universidade Politécnica de Tóquio. As figuras abaixo apresentam a forma e distribuição de sensores de pressão utilizados.

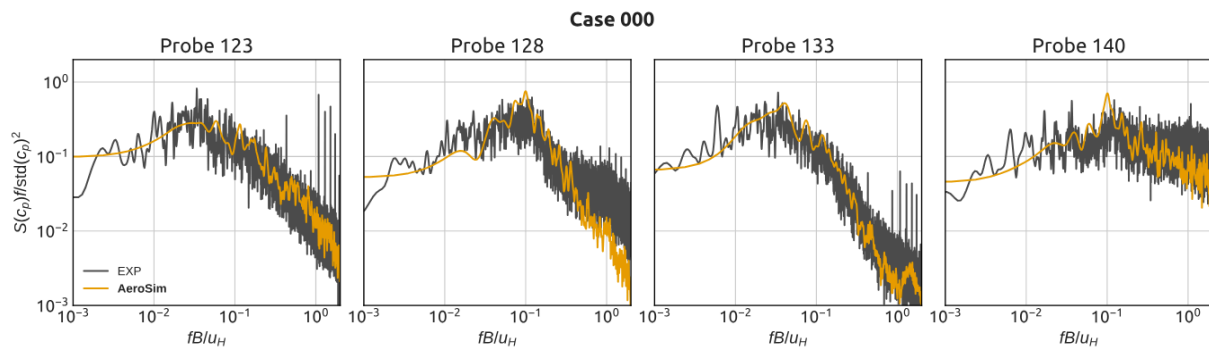


A figura abaixo apresenta o comparativo dos coeficientes de pressão mínimos, médios e máximos para as linhas de sensores posicionadas a 25%, 50% e 75% da altura total do edifício, para incidência de vento de 0° .

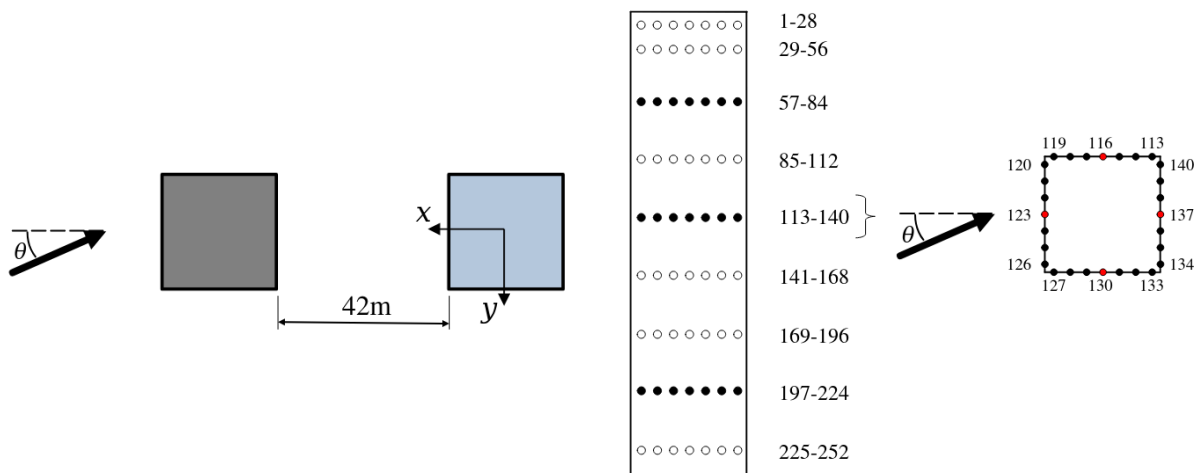




Abaixo vê-se, também, os espectros de coeficiente de pressão em probes selecionados, utilizando-se a mesma incidência de vento.

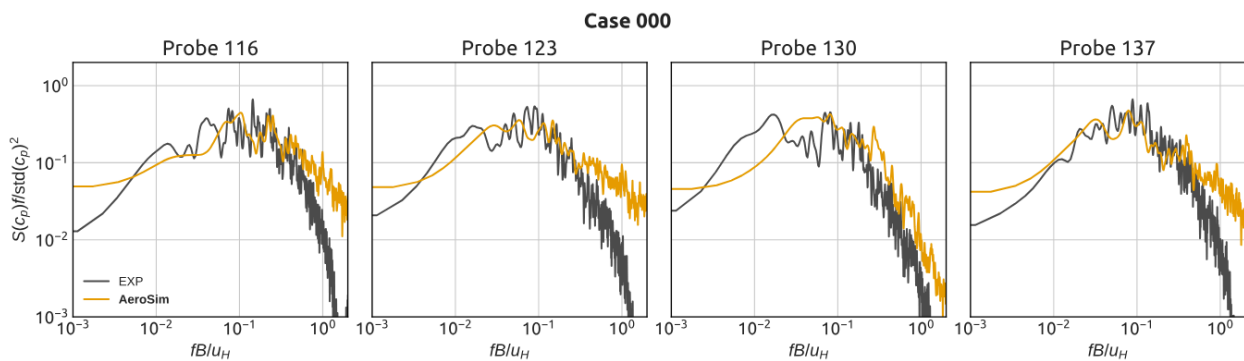
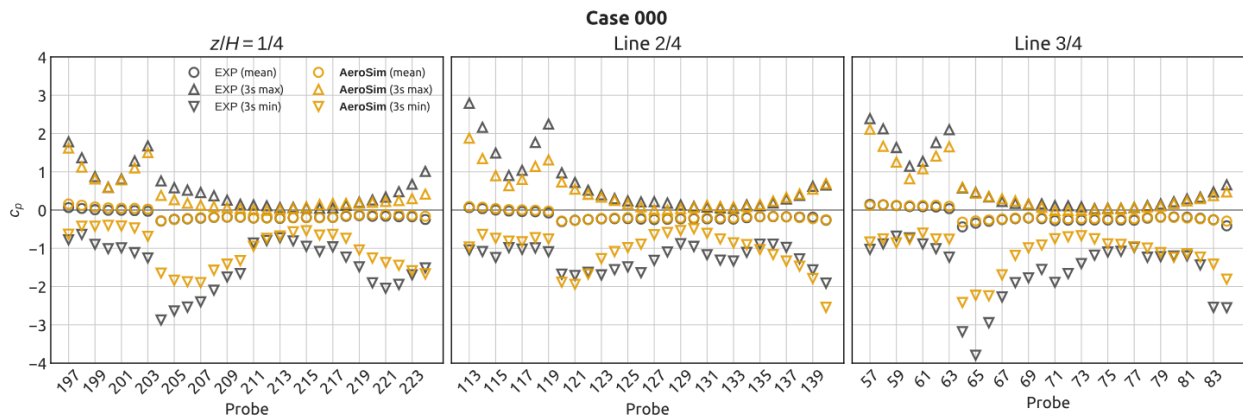


Para se avaliar os **efeitos de vizinhança** utiliza-se outro caso realizado na Universidade Politécnica de Tóquio, em que dois edifícios de forma plana são posicionados em diferentes arranjos relativos. As figuras abaixo apresentam o posicionamento de vizinhança e a distribuição dos sensores de pressão.



As figuras abaixo apresentam as pressões mínima, média e máxima sobre as diferentes alturas da edificação, para a incidência de 0°, em que o edifício principal se encontra completamente submergido na esteira de seu vizinho. Apresenta-se, também, os espectros de pressão em sensores selecionados.



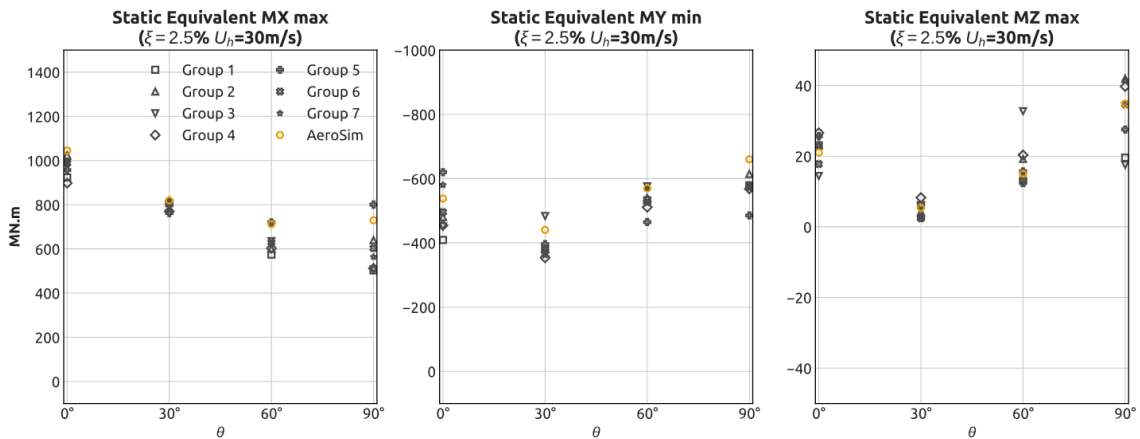


Para se avaliar as **cargas dinâmicas** será utilizado o resultado de um comparativo internacional entre múltiplos túneis de vento sobre um edifício retangular padronizado (edifício CAARC). A figura abaixo ilustra a forma da edificação e alguns dos vórtices gerados pela interação com o vento.

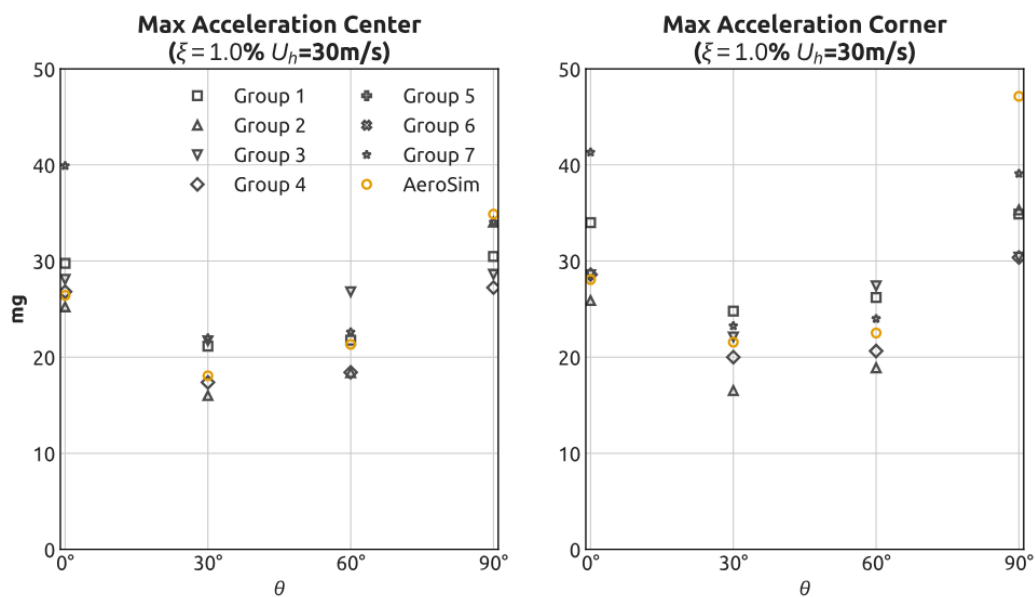




As figuras abaixo apresentam o comparativo dos momentos de flexão e torção sobre a base, para diferentes incidências de vento e dissipação de 2,5%. Os efeitos são convertidos da resposta dinâmica para seus equivalentes estáticos para serem utilizados em cálculo estrutural.



A figura abaixo mostra a aceleração obtida para o mesmo caso e dissipação de 1%.



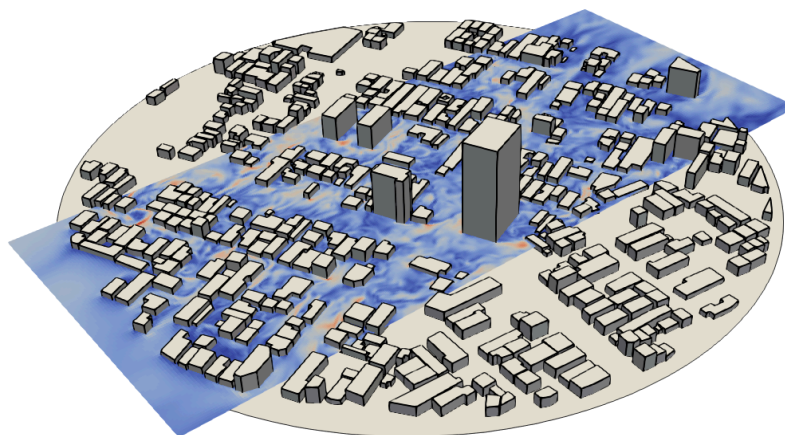


Conforto de pedestres

O escoamento do vento em ambientes urbanos é determinado por uma combinação de velocidade média, intensidade de turbulência, rajadas, direcionalidade e ocorrência estatística de eventos de excedência na altura do pedestre. Essas características resultam da interação entre a camada limite atmosférica e o ambiente construído e variam significativamente em escalas espaciais e temporais reduzidas. As condições de escoamento resultantes impactam diretamente o conforto dos pedestres, pois governam tanto as forças físicas experimentadas pelos indivíduos quanto sua percepção subjetiva do ambiente externo.

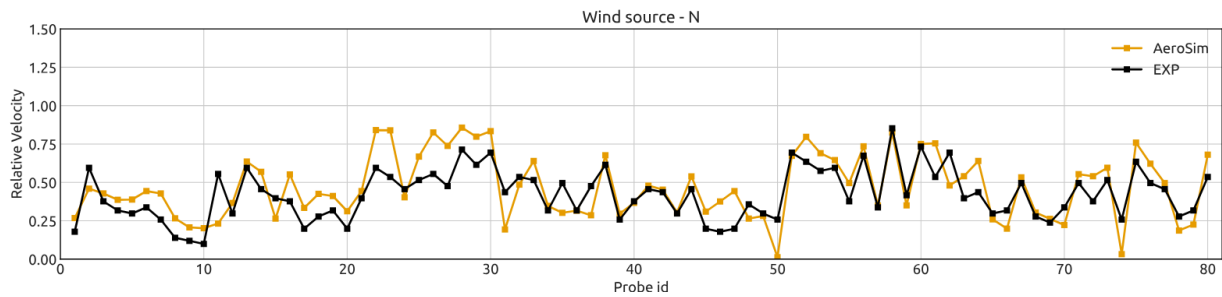
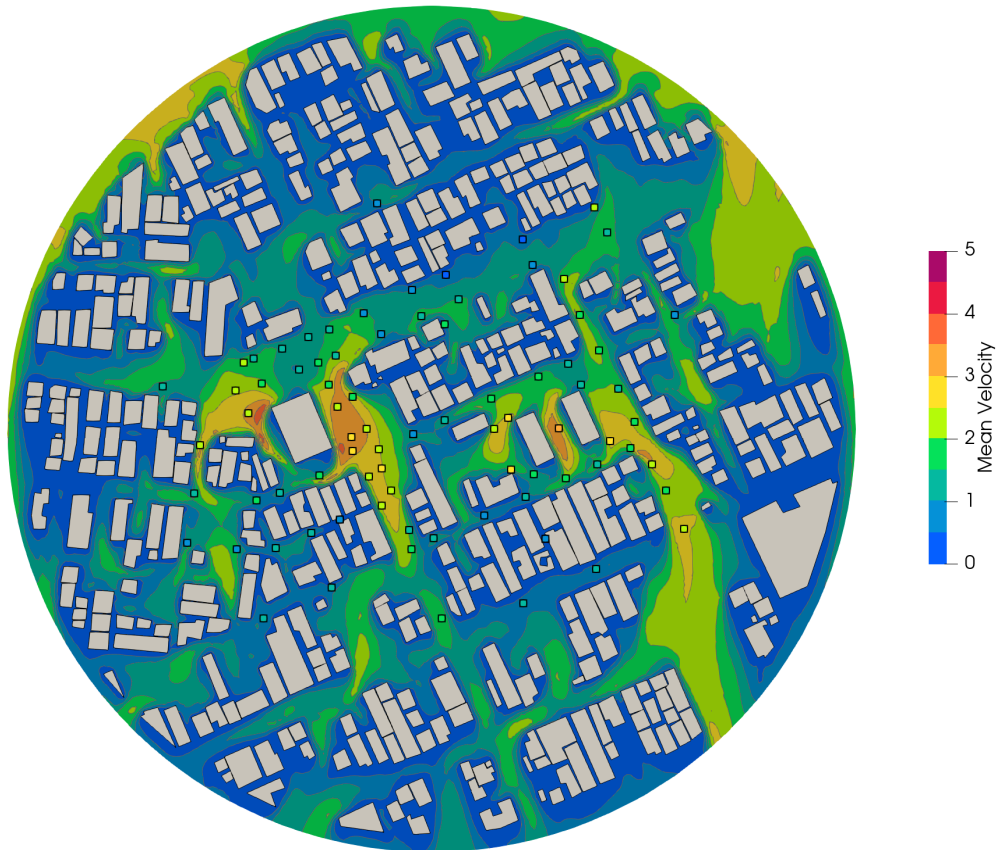
Diferentes atividades urbanas, como caminhar, permanecer em pé, sentar-se ou realizar atividades de lazer ao ar livre, estão associadas a diferentes níveis de tolerância à exposição ao vento, usualmente definidos por critérios de conforto que relacionam características do escoamento a condições aceitáveis de uso. Edifícios altos podem modificar significativamente o escoamento próximo ao solo ao defletir ar de alto momento ao longo de suas fachadas, resultando em acelerações localizadas e aumento de turbulência. Em contextos urbanos densos, a interação entre fachadas, cânions de rua e espaços abertos gera um campo de escoamento tridimensional complexo, que não pode ser previsto de forma confiável por métodos analíticos.

Para validar a aplicação para o conforto de pedestres utilizou-se o caso do Instituto de Arquitetura do Japão, envolvendo o escoamento na cidade de Niigata. A figura abaixo ilustra o escoamento e o arranjo de edifícios.





As figuras abaixo mostram o padrão de escoamento resultante da incidência de vento norte e seu comparativo com as mensurações experimentais.





Anexo A - Uso de CFD em engenharia de vento

Posicionamento dos especialistas e estado da arte

No contexto do dimensionamento estrutural - tanto em análises estáticas quanto dinâmicas - as estatísticas de maior relevância são os valores extremos, definidos com base nas propriedades estatísticas do escoamento e na probabilidade de excedência admissível segundo os critérios de projeto. Em função disso, os métodos computacionais adotados devem ser capazes de simular o escoamento em regime transiente, com elevada resolução espacial e temporal, de modo a capturar adequadamente as escalas turbulentas até o limite do intervalo inercial (Durbin e Reif, 2011).

A representação realista dessas estruturas turbulentas exige o emprego de abordagens de alta fidelidade, como DNS (Direct Numerical Simulation), LES (Large Eddy Simulation), DES (Detached Eddy Simulation) e SAS (Scale-Adaptive Simulation), cujo custo computacional é substancial. Essa elevada demanda computacional faz com que o avanço da performance computacional seja uma condição necessária para a viabilidade do uso do CFD no cálculo de cargas de vento para fins de projeto estrutural. Em decorrência dessas exigências, estudos voltados à validação da aplicação de CFD para a estimativa de cargas de vento em edifícios altos - por meio de comparações sistemáticas entre resultados numéricos e experimentais - passaram a emergir de forma mais consolidada apenas a partir de 2010 (Potsis, Tominaga e Stathopoulos, 2023), quando o emprego de métodos numéricos de alta fidelidade, aliados a malhas adequadamente refinadas, tornou-se viável.

Uma lista não exaustiva de estudos realizados nesse período são: Dagnev e Bitsuamlak (2010), Huang, Li, e Li (2013), Bruno et al. (2014), Dagnev e Bitsuamlak (2014), Xie (2014), Aboshosha, Elshaer, Bitsuamlak e El Damatty (2015), Bernardini et al. (2015), Nozu et al. (2015), Tamura et al. (2015), Zhang, Habashi e Khurram (2015), Elshaer et al. (2016a,b), Liu e Niu (2016), Elshaer et al. (2017a,b), Yu, Yang e Xie (2018). Algumas revisões abordando o estado da arte e avaliando alguns dos artigos citados anteriormente são: Dagnev e Bitsuamlak (2013), Hou e Jafari (2020), Daniels e Xie (2022) e Potsis, Tominaga e Stathopoulos (2023). A partir do corpo de resultados coletado até o momento é possível se chegar a algumas conclusões gerais, tais como:

- Confirma-se de forma definitiva a necessidade do uso de métodos numéricos transientes de alta fidelidade para a obtenção acurada de cargas de vento aplicáveis ao dimensionamento estrutural. Adicionalmente, foi evidenciada a sensibilidade dos resultados em relação ao refino espacial da malha e à discretização temporal, o que impõe restrições rigorosas à possibilidade de redução de custo computacional sem comprometimento da qualidade dos dados gerados.
- A reprodução fiel da ABL é crítica, exigindo não apenas perfis corretos de velocidade e intensidade turbulenta, mas também seus espectros e correlações espaciais. Por isso, grande parte da pesquisa atual foca nas condições de contorno de entrada (inlet). Muitas vezes, é preciso adaptar para o ambiente computacional as técnicas usadas em túneis de vento físicos para simular a ABL.
- A realização de simulações em CWE exige competências técnico-científicas interdisciplinares, tanto em CFD quanto em Engenharia de Vento, além de experiência profissional consolidada. Isso é necessário para garantir o controle adequado das condições de contorno, da modelagem computacional e da interpretação dos resultados, de forma análoga ao que se exige de um responsável por ensaios em túnel de vento. A mera disponibilidade de softwares CFD/CWE ou familiaridade com suas interfaces gráficas não habilita um profissional para essa função. O responsável devidamente capacitado é denominado Especialista em CWE.
- Não é possível estabelecer, de forma universal, a aplicabilidade do CFD sem a identificação prévia da classe de problema à qual a aplicação está associada. A aplicação do CFD deve ser precedida pela definição da classe de problema, uma análise que considere múltiplos fatores: o comportamento aerodinâmico da estrutura (incluindo acoplamento e separação de escoamento), sua tipologia, o objetivo específico da análise e o estágio do projeto. Sem essa etapa, não há diretriz universal válida.

Posicionamento das normas e guidelines oficiais pelo mundo

No que diz respeito ao enquadramento normativo do uso de CFD para o cálculo de cargas de vento e a estimativa das respostas dinâmicas de estruturas, observa-se uma considerável heterogeneidade de posicionamentos entre os diferentes códigos internacionais. Alguns regulamentos não fazem menção explícita ao CFD, outros proíbem ou autorizam formalmente seu uso, enquanto há





também normas que adotam uma abordagem informativa baseada em critérios de desempenho, sem vetar ou endossar diretamente a técnica.

O código norte-americano **ASCE 7** – Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, que regula a determinação das cargas de vento nos Capítulos 26 a 30, passou a abordar explicitamente o uso de simulações numéricas na edição de 2022, por meio de inclusões no Capítulo 31 – Wind Tunnel Procedure. Nesse capítulo, é admitido o uso de resultados provenientes de “túnel de vento digital” (CFD), desde que os procedimentos adotados sejam verificáveis e validados frente a dados de túneis de vento físicos e que o estudo esteja submetido à revisão técnica independente por pares.

O código atualmente em vigor na União Europeia para o cálculo das ações do vento sobre estruturas, a **EN 1991-1-4:2005**, foi publicado em 2005, com a adição do A1 em 2010 e correções editoriais em 2009 e 2010. Embora uma nova versão, intitulada prEN 1991-1-4:2021, esteja em processo de revisão - com o encerramento da votação previsto para julho de 2024 -, este documento ainda não foi publicado como norma consolidada e permanece na condição de esboço.

A versão atualmente válida estabelece, na Cláusula 1.5 – Design assisted by testing and measurements, que:

“In supplement to calculations wind tunnel tests and proven and/or properly validated numerical methods may be used to obtain load and response information, using appropriate models of the structure and of the natural wind.”

e complementa com a nota “*The National Annex may give guidance on design assisted by testing and measurements.*”

Entre os Anexos Nacionais do Eurocode, apenas os da Itália (**CNR-DT R1-207/2018**) e da França (**NF EN 1991-1-4/NA:2008-03**) fazem referência explícita ao uso de CFD (Computational Fluid Dynamics) para a determinação de cargas de vento. Os demais Anexos Nacionais concentram-se exclusivamente em parâmetros aplicáveis a túneis de vento físicos ou métodos analíticos, sem mencionar o CFD como técnica permitida, proibida ou regulamentada.

No caso francês, o trecho correspondente à cláusula 1.5 do Anexo Nacional (NF EN 1991-1-4/NA:2008-03) é relativamente conciso, e está transcrito integralmente a seguir (tradução livre do original em francês):

“As técnicas de simulação numérica dos escoamentos têm avançado rapidamente. As equações (Navier-Stokes e conservação da massa) são bem conhecidas, e existem métodos capazes de gerar, nas fronteiras do domínio espacial considerado, campos de velocidades instantâneas coerentes com as características estatísticas do vento natural turbulento (gradiente vertical da velocidade média, intensidade, escalas e distribuição espectral da turbulência).

A resolução numérica direta dessas equações baseia-se em uma discretização extremamente refinada do espaço e do tempo, e, por esse motivo, ainda permanece amplamente fora do alcance dos recursos computacionais atuais quando se trata de problemas da engenharia civil (como construções de grande escala).

A modelagem estatística, que está no cerne dos modelos de cálculo atualmente utilizados para aplicações em engenharia civil:

- A operação de média temporal introduz novas incógnitas que exigem, para que o sistema seja solucionável, a introdução de dados complementares, sob a forma de modelos físicos, dos quais existe uma certa variedade (relações de fechamento). A qualidade das simulações realizadas depende, portanto, da profunda expertise dos operadores, tanto em métodos numéricos quanto na física dos fenômenos modelados;
- Por construção, a modelagem estatística busca valores médios das pressões, enquanto o dimensionamento das construções depende de seus valores extremos. Assim, essas simulações enfrentam as limitações já mencionadas anteriormente a esse respeito.

A simulação de “grandes escalas” (LES – Large Eddy Simulation) representa um compromisso entre a simulação direta e a modelagem estatística. As equações de Navier-Stokes são resolvidas completamente, passo a passo no tempo, para as grandes estruturas turbulentas (os vórtices com tamanho superior ao das malhas); as pequenas escalas não são simuladas diretamente, mas são levadas em conta por meio de modelos estatísticos sub-malha. Dessa forma, torna-se possível buscar os valores extremos das pressões nas séries temporais geradas. Os desenvolvimentos dessa abordagem são bastante promissores.”

O Anexo Italiano (CNR-DT R1-207/2018), inclui um Anexo T por conta dos esforços do grupo ANIV-CWE, que apresenta de forma detalhada os procedimentos adequados para a configuração correta de simulações e a incorporação do uso de CFD (Computational Fluid Dynamics) na determinação de cargas de vento no processo de projeto de edificações. Esse mesmo conteúdo foi incorporado como o Anexo K na versão em revisão do Eurocode 1 (prEN 1991-1-4:2021). Esses anexos informativos têm como objetivo central garantir uma transferência de tecnologia correta, segura e atualizada entre a comunidade científica de CWE (Computational Wind Engineering) e os engenheiros projetistas. Em essência, eles foram concebidos para: (i) facilitar a compreensão, por parte dos projetistas estruturais, dos princípios fundamentais da CWE; (ii) codificar boas práticas baseadas em critérios de desempenho para o uso de métodos computacionais; (iii) alertar contra usos inadequados ou interpretações equivocadas dessas técnicas.





Esse anexo especifica com bom nível de detalhamento os princípios fundamentais da simulação numérica de fluidos e sua aplicação na engenharia de vento, as hipóteses e simplificações adotadas nos modelos geométricos e esquemas numéricos, as restrições em termos de dimensões do modelo computacional, a malha computacional e as condições de contorno a serem utilizadas.

Em sua cláusula T.5 (Ambitos de Aplicação da CWE), o anexo faz as seguintes considerações a respeito da aplicação de métodos computacionais para a engenharia de vento (tradução livre do italiano):

“Em geral, a CWE é potencialmente aplicável a uma ampla gama de classes de problemas e em diferentes fases do projeto. Por outro lado, os componentes do modelo computacional não são universais, e a precisão geral da simulação computacional varia significativamente em função da abordagem de modelagem e dos métodos numéricos adotados

A aplicação da CWE no projeto, portanto, é admitida com um papel variável, dependendo da abordagem computacional utilizada, da classe de problema investigada e das fases do projeto. De modo geral, a definição desse papel está condicionada à validação da abordagem computacional para cada classe de problema, e depende do estado da arte na CWE, que ainda está em rápida evolução científica e técnica. No entanto, esta Apêndice propõe na Tabela T.I, a título indicativo e sintético, uma avaliação de ordem geral do grau de confiabilidade esperado das simulações CWE.

Os indicadores qualitativos do grau de confiabilidade apresentados são propostos em função da abordagem computacional, simplificada apenas pelo tipo de abordagem à turbulência (resolução de escalas ou não), da classe de problema definida somente pelo efeito do vento esperado, e das fases do projeto, limitadas às etapas preliminar e definitiva. O grau estimado de confiabilidade também é ponderado considerando os efeitos que eventuais imprecisões possam ter sobre o Estado Limite da obra (Último e/ou de Serviço).

Vale observar que uma confiabilidade alta, estendida a todas as classes de problema, é reconhecida exclusivamente à abordagem Scale Resolving na fase de projeto preliminar.

É importante lembrar que a avaliação proposta pressupõe, em todo caso, que as simulações CWE sejam conduzidas conforme o estado da arte e não sejam afetadas por erros humanos de implementação e/ou uso do software CFD/CWE.”

A tabela T.I citada indica o grau de confiabilidade de diferentes abordagens numéricas para diferentes aplicações em projeto. A tabela apresentada abaixo é equivalente à contida no anexo, mas foi traduzida para o Inglês por Bruno et al. (2023):

Table 2 Reliability of the results obtained by CWE simulation according to the purpose of the analysis. SLS denotes Serviceability Limit States, ULS denotes Ultimate Limit States [H: High, M: Medium, L: Low, D: Discouraged, -: not envisaged].

PROBLEM CLASS	Approach to turbulence	Scale-resolving				Non scale-resolving			
	Design Stage	Preliminary		Detailed		Preliminary		Detailed	
	Limit State	SLS	ULS	SLS	ULS	SLS	ULS	SLS	ULS
Forces on Buildings		H	H	H	M	L	D	D	D
Forces on bridge decks		H	H	H	M	M	M	M	L
Local pressures		H	H	H	M	D	D	D	D
Vortex shedding		H	H	M	M	M	L	L	D
Galloping		H	H	M	L	M	L	L	L
Flutter		-	H	-	L	-	H	-	L
Comfort		H	-	H	-	M	-	M	-

Por sua vez, a norma japonesa AIJ – Recommendations for Loads on Buildings (**AIJ-RLB-2015**) reconhece explicitamente o CFD como uma ferramenta válida para a estimativa de cargas de vento. Em sua cláusula 6.1.2 (Estimation Principle), item (14), o código estabelece (já em inglês no original):

“When the computational fluid dynamics (CFD) technique is applied to the evaluation of the wind loads, it is necessary to obtain sufficient accuracy for the numerical results based on A6.11.”

e ainda em (16):

“When the wind load shielding effects by surrounding topographies or buildings are considered, the future changes shall be confirmed, and the shielding effect shall be investigated through the appropriate wind tunnel test, CFD, or other suitable verification methods.”.

O anexo A6.11 mencionado indica:





“A6.11 Wind Loads Estimation using CFD

For CFD applied to the wind load estimation, the required physical quantities are the wind velocity, velocity fluctuation, and time histories of the wind pressure or wind force. Then, the governing equations for computation should be constructed for an incompressible viscous fluid, and can express the solution as unsteady flows and wind pressures based on the engineering scale of the buildings and their surroundings. Because the wind is a turbulent flow, it cannot be obtained through an analytical solution. To obtain a numerical solution with sufficient accuracy, a discrete approximate solver and turbulent modeling should be selected appropriately.”

Entre as normas que explicitamente proíbem o uso de CFD para o dimensionamento de estruturas frente à ação do vento está a **ISO 4354:2009**. Embora reconheça o CFD como uma ferramenta promissora, a norma afirma que, “com o atual estado de desenvolvimento das técnicas de CFD, tais métodos não são capazes de reproduzir integralmente as características flutuantes do escoamento, necessárias para se obter o fractil adequado da distribuição de valores extremos dos coeficientes de pressão, tampouco as correlações corretas entre os coeficientes de pressão flutuantes sobre a superfície, indispensáveis à determinação de coeficientes de força ou momento em grandes áreas (ou globais)”. Dessa forma, a norma não recomenda o uso de CFD para a obtenção de forças e coeficientes de pressão. Contudo, ressalta que, caso o CFD seja empregado com tal finalidade, sua aplicação deve atender aos mesmos critérios exigidos para ensaios em túnel de vento físico, especialmente no que diz respeito à reprodução fidedigna do ambiente de vento e às técnicas de análise dos resultados.

Possivelmente um dos códigos recentes mais explícitos em relação à proibição do uso de CFD é o código canadense National Building Code of Canada (**NBCC**), com sua última revisão tendo sido feita em 2020. O código afirma em sua divisão B:

“A-4.1.7.1.(6) Computational Fluid Dynamics (CFD). It is not currently possible to verify the reliability and accuracy of CFD and no standards address it; as such, this method is not permitted to be used to determine specified wind loads.”

Dentro desse cenário internacional, o código brasileiro para determinação das forças devidas ao vento em edificações, **NBR 6123** se configura em uma exceção, pois não faz qualquer menção ao assunto em todo o corpo do texto. O único paralelo indireto que se poderia traçar se encontra na revisão de 2023, cláusula 1, Nota 4, em que se indica:

“No caso de estruturas de formas e dimensões ou condições de vizinhança não contempladas nessa Norma, a determinação das forças devidas ao vento e seus efeitos é realizada com o auxílio de estudos especiais, envolvendo conhecimentos técnico-científicos e normativos consolidados e/ou ensaios de modelos físicos reduzidos em túnel de vento, com simulação das principais características do vento natural.”

Referências

Aboshosha, H., Elshaer, A., Bitsuamlak, G. T., & El Damatty, A. (2015). **Consistent inflow turbulence generator for LES evaluation of wind-induced responses for tall buildings**. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 142, 198–216.

Bernardini, E., Spence, S.M., Wei, D., Kareem, A., 2015. **Aerodynamic shape optimization of civil structures: a CFD-enabled Kriging-based approach**. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*

Braun, A. L., & Awruch, A. M. (2009b). **Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation**. *Computers & Structures*, 87(9–10), 564–581.

Blocken B. **50 years of computational wind engineering: past, present and future**. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2014 Jun 1;129:69-102.

Bruno, L, Coste, N, Mannini C, Mariotti A, Patruno, L, Schito, P Vairo, G. **Codes and standards on computational wind engineering for structural design: State of art and recent trends**. *Wind and Structures*. 2023;37:133-51.

Bruno, L., Salvetti, M.V., Ricciardelli, F., 2014. **Benchmark on the Aerodynamics of a Rectangular 5:1 Cylinder: an overview after the first four years of activity**. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 126, 87-106

Dagnew, A.K., Bitsuamlak, G.T., 2014. **Computational evaluation of wind loads on a standard tall building using LES**. *Wind Struct.* 18 (5), 567–598.

Dagnew, A. K., & Bitsuamlak, G. T. (2010). **LES evaluation of wind pressures on a standard tall building with and without a neighboring building**. 5th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010).

Dagnew, A. K., & Bitsuamlak, G. T. (2013). **Computational evaluation of wind loads on buildings: A review**. 16.

Daniels SJ, Xie ZT. **Overview of large-eddy simulation for wind loading on slender structures**. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering and Computational Mechanics*. 2022 Jun;175(2):41-71.

Durbin PA, Reif BP. **Statistical theory and modeling for turbulent flows**. John Wiley & Sons; 2011 Jun 28.

Elshaer, A., Bitsuamlak, G., Damatty, A.E., 2016a. **Aerodynamic shape optimization of tall buildings using twisting and corner modifications**. In: 8th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA8). Boston, Massachusetts, USA.

Elshaer, A., Bitsuamlak, G., Damatty, A.E., 2017a. **Enhancing wind performance of tall buildings using corner aerodynamic optimization**. *Eng. Struct.* 136, 133–148.





Elshaer, A., Gairola, A., Adamek, K., & Bitsuamlak, G. (2017b). **Variations in wind load on tall buildings due to urban development.** *Sustainable Cities and Society*, 34, 264–277.

Elshaer, A., Aboshosha, H., Bitsuamlak, G.T., Damatty, A.E., Dagneu, A., 2016b. **LES evaluation of wind-induced responses for an isolated and a surrounded tall building.** *Eng. Struct.* 115, 179–195.

Elshaer, A., Aboshosha, H., Bitsuamlak, G., El Damatty, A., & Dagneu, A. (2016). **LES evaluation of wind-induced responses for an isolated and a surrounded tall building.** *Engineering Structures*, 115, 179–195.

Hou, F., Jafari, M. **Investigation approaches to quantify wind-induced load and response of tall buildings: A review.** *Sustainable Cities and Society*. 2020 Nov 1;62:102376.

Huang, S., Li, R., & Li, Q. (2013). **Numerical simulation on fluid-structure interaction of wind around super-tall building at high Reynolds number conditions.** *Structural Engineering and Mechanics*, 46(2), 197–212.

Liu, J., & Niu, J. (2016). **CFD simulation of the wind environment around an isolated high-rise building: An evaluation of SRANS, LES and DES models.** *Building and Environment*, 96, 91–106.

Nozu, T., Tamura, T., Takeshi, K., Akira, K., 2015. **Mesh-adaptive LES for wind load estimation of a high-rise building in a city.** *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 144, 62–69.

Potsis, T., Tominaga, Y., Stathopoulos, T. **Computational wind engineering: 30 years of research progress in building structures and environment.** *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023 Mar 1;234:105346.

Tamura, T., Kawai, H., Bale, R., Onishi, K., Tsubokura, M., Kondo, K., Nozu, T., 2015. **Analysis of wind turbulence in canopy layer at large urban area using HPC database.** In: 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9). Toulouse, France.

Thordal, M.S., Bennetsen, J.C., Koss, H.H. **Review for practical application of CFD for the determination of wind load on high-rise buildings.** *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2019 Mar 1;186:155–68.

Xie, J., 2014. **Aerodynamic optimization of super-tall buildings and its effectiveness assessment.** *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 130, 88–98.

Yu, Y., Yang, Y., & Xie, Z. (2018). **A new inflow turbulence generator for large eddy simulation evaluation of wind effects on a standard high-rise building.** *Building and Environment*, 138, 300–313.

Zhang, Y., Habashi, W. G., & Khurram, R. A. (2015). **Predicting wind-induced vibrations of high-rise buildings using unsteady CFD and modal analysis.** *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 136, 165–179.





Anexo B - Publicações Acadêmicas

Revistas internacionais

Breitkopf, S. et al. Bluff Body Benchmark Consortium - Initial results of international wind tunnel and CFD study for structural design. Under Review, 2025.

Oliveira Jr, W. B. ; Romanus, R. S. ; Lugarini, A. . Nassu: A high performance LES solver for computational wind engineering. Under Review, 2025.

Ferrari, M. A. ; Oliveira Jr, W. B. ; Lugarini, A. ; Franco, A. T. ; Hegele Jr, L. A. . A graphic processing unit implementation for the moment representation of the lattice Boltzmann method. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 95(7), 1076-1089, 2023.

Lugarini, A. ; Franco, A. T. ; Philippi, P. C. . Lattice Boltzmann method for viscoplastic fluid flow based on regularization of ghost moments. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 286, p. 104413, 2020.

Romanus, R. S. ; Lugarini, A. ; Franco, A. T. . An immersed boundary-lattice Boltzmann framework for fully resolved simulations of non-spherical particle settling in unbounded domain. Computers & Mathematics With Applications, v. 102, p. 206-219, 2021.

Romanus, R. S. ; Lugarini, A. ; Franco, A. T. . Fully-resolved simulations of an ellipsoidal particle settling in a Bingham fluid. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 301, p. 104745, 2022.

Artigos em congressos

Zavelinski, A. ; Romanus, R. S. ; Lugarini, A. ; Franco, A. T. . Estudo Comparativo de Carregamento Quasi-Estático de Vento Sobre a Cobertura de um Galpão Através de Método Transiente de Fluidodinâmica Computacional. 9o Congresso da Construção Metálica, São Paulo, 2023.

Zavelinski, A. ; Lugarini, A. ; Franco, A. T. . Utilização de fluidodinâmica computacional para calcular o fator topográfico de aceleração do vento. XIV Congresso brasileiro de pontes e estruturas, Rio de Janeiro, 2023.

Romanus, R. S. ; Lugarini, A. ; Oliveira Jr, W. B. ; Franco, A. T. . A viable framework for wind pressure assessments with large eddy simulations. 16th International conference on wind engineering, Florença, Itália, 2023.

Romanus, R. S. ; Zavelinski, A. ; Lugarini, A. . Estudo comparativo de carregamento dinâmico de vento em edifício alto através de método transiente de fluidodinâmica computacional. 64o Congresso brasileiro do concreto, 2023.

Lugarini, A. ; Romanus, R. S. ; Oliveira Jr, W. B. . Large Eddy simulations of complex shaped high-rise buildings. 9th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications, Birmingham, Reino Unido, 2024.

Zavelinski, A. ; Romanus, R. S. ; Lugarini, A. ; Franco, A. T. . Estudo comparativo de carregamento dinâmico de vento em edifício alto através de método transiente de fluidodinâmica computacional. 65o Congresso brasileiro do concreto, 2024.

Oliveira Jr, W. B. ; Romanus, R. S. ; Penas, P. . Normalização de Densidade em Condições de Contorno do LBM e Seu Efeito no Domínio da Frequência. IV Congresso Brasileiro de Fluidodinâmica Computacional, Vitória, 2024.

Zavelinski, A. ; Penas, P. ; Romanus, R. S. ; Lugarini, A. ; Vendramini, J. A. . Utilização de CFD para Cálculo de Pressões de Vento em Galpões sobre Taludes. XVI Congresso brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, 2025.





Oliveira Jr., W. B. ; Lugarini, A. ; Franco, A. T. . Performance analysis of the lattice Boltzmann method implementation on GPU. In: XL Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2019, Natal, RN. Proceedings of the XL CILAMCE, 2019.

Romanus, R. S. ; Lugarini, A. ; Franco, A. T. . Numerical investigation of uniform flow past stationary sphere using immersed boundary-lattice Boltzmann method. In: XL Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2019, Natal, RN. Proceeding of the XL CILAMCE, 2019.

Romanus, R. S. ; Lugarini, A. ; Franco, A. T. . Direct Numerical Simulation of non-Spherical Rodrigo Saldanha Romanus - rodrigo@aerosim.io

Particle Movement in an Infinite Domain Filled with Viscoplastic Fluid. In: 18th International Congress on Rheology, 2020, Rio de Janeiro, Brazil. Proceedings of 18th ICR, 2020.



Alameda Cabral, 475 - São
Francisco, Curitiba - PR, 80410-210



consultoria@aerosim.io



aerosim.io