

## COMPARAÇÃO DE AÇÕES DINÂMICAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFÍCIOS COM DIFERENTES MODELOS NUMÉRICOS

### *DYNAMIC WIND ACTIONS COMPARISON BETWEEN DIFFERENT NUMERICAL MODELS*

*Carlos E. A. Oliveira Filho (1)*

*Valério S. Almeida (2)*

*Fernando A. Kurokawa (3)*

*Douglas P. Agnelo (4)*

**Resumo:** O objetivo do trabalho é realizar a comparação de deslocamentos e esforços em edifícios de concreto armado decorrentes de duas abordagens distintas. Por um lado, obter esses resultados advindos da simulação numérica da vento-estrutura por meio do acoplamento fraco entre a dinâmica dos fluidos computacional e a estrutura. Por outro lado, empregar um procedimento simplificado denominado de vento sintético que realiza o cálculo das forças da superfície da estrutura em função do tempo a partir dos parâmetros das características do vento e da estrutura, conforme a norma NBR 6123/88, da frequência ressonante e de seus múltiplos, para criar as cargas permanentes e as cargas flutuantes de vento. Ambas as avaliações devem ser empregadas com o uso do método dos elementos finitos para a análise do edifício em regime linear elástico e em regime transiente com a resolução da equação de movimento dada pelo método implícito de Houbolt de integração direta.

**Palavras-chaves:** dinâmica; vento; CFD; estrutura; NBR 6123

**Abstract:** *The objective of this work is to compare the displacements and forces in reinforced concrete buildings resulting from two different approaches. At first, obtaining these results from the wind-structure numerical simulation through the weak coupling between the computational fluid dynamics and the structure. On the other hand, employ a simplified procedure called direct along-wind that calculates the surface forces of the structure as a time function from the parameters of wind and structure characteristics, according to the NBR 6123/88 standard, of the resonant frequency and its multiples, to create permanent loads and floating wind loads. Both evaluations must be applied using the finite element method for the analysis of the building in linear elastic regime and in transient regime with the resolution of the motion equation given by the Houbolt method of implicit direct integration.*

**Keywords:** *dynamics; wind; CFD; structure; NBR 6123.*

## 1. Introdução

O vento sobre as estruturas

Sabe-se que a ação do vento depende de fatores meteorológicos e aerodinâmicos, os quais são os responsáveis pela velocidade do vento, e esta é avaliada a partir do local da

---

(1) e (4) Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

(2) e (3) Professor Doutor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

edificação, do tipo do terreno, da altura da edificação, da rugosidade do terreno e do tipo da edificação, bem como suas dimensões. Outro fator importante é a própria aleatoriedade do vento, pois a partir das leituras feitas por instrumentos adequados, devem ser feitas simplificações e a elaboração de velocidades médias.

Um dos fatores supracitados mais importantes é a variação do vento em função da altura. Por esta razão, (DAVENPORT, 1963) propôs uma variação exponencial para terrenos com poucos obstáculos, como campos abertos ou costas, com obstáculos uniformes, como cidades pequenas e subúrbios, e de grandes obstruções, como centros de grandes cidades.

Ao mesmo tempo, a forma da edificação tem papel importante, nos fatores aerodinâmicos da estrutura. A incidência do vento, as diferenças de pressões e as velocidades atingidas dependem da geometria das faces laterais e superiores, das aberturas da edificação, do ângulo de incidência, dentre muitos outros aspectos.

Nessa linha, a NBR 6123/88 Errata 2 tem por objetivo fixar “as condições exigíveis na consideração das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento, para efeitos de cálculos de edificações.” As principais contribuições para a elaboração desta norma vêm das isopletras de Ivo Padaratz, e dos estudos de Joaquim Blessmann, baseados pelos espectros de Davenport e de Von Kármán e de experiências em túnel de vento.

Além da velocidade deste vento, o parâmetro mais conhecido, é importante ter controle sobre outros aspectos que influenciam estes ventos, como a rugosidade do terreno, a altura em relação ao nível do solo e, como as rajadas impactam sobre as estruturas. Por estes esforços serem de natureza estocástica, estes ventos causam vibrações sobre a estrutura e, conforme o escoamento, causam acelerações em pontos da estrutura. Em edifícios altos, que basicamente têm frequências naturais baixas, os pavimentos vibram, se deslocam e aceleram com muita facilidade, e a fim de verificar o comportamento da estrutura, devem ser analisados não só as solicitações sobre os elementos, mas também as ações que influem sobre o conforto de seus ocupantes. Edifícios que vibram muito podem trazer enjoos e náuseas a seus ocupantes, sem que muitas vezes eles vejam a edificação se deformando.

### Dinâmica dos fluidos computacional (CFD)

A dinâmica dos Fluidos Computacional, do inglês, Computational Fluid Dynamics, comumente referenciada como CFD, é baseada em equações da dinâmica de Navier-Stokes, úteis para examinar os fluxos de fluidos monofásicos. Embora existam registros destas equações e estudos tendo sido desenvolvidos no século XIX, apenas com o advento dos computadores foi possível aplicar estas de maneira eficiente, uma vez que estas dependem de grande número de iterações envolvendo diversas variáveis.

A partir de 1930, foram feitas as primeiras aplicações envolvendo problemas em duas dimensões, com diversas simplificações e feitas à mão. Em 1967, começou-se a empregar programação para resolver estes problemas. Em 1973, pesquisadores criam o primeiro programa capaz de prever fluxos de cisalhamento simples e fluxos de jatos livres e confinados, com a finalidade de estudar estes fluxos em aerofólios de aeronaves. Ainda neste ano, desenvolveu-se o algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations), este algoritmo, por empregar as variáveis essenciais para resolver estes problemas, que são as velocidades e pressões, foi capaz de resolver as Equações de Momento de Navier-Stokes diretamente.

---

Ainda nesta década, foi criado o primeiro modelo que poderia representar escoamentos turbulentos com alto número de Reynolds. Este modelo, conhecido como  $\kappa - \epsilon$ , é usado até hoje, com pequenas variações. (ANDERSON & WENDT, 1995)

A popularização do CFD na academia e indústria, principalmente nas últimas décadas, abriu o leque para muitas outras aplicações do CFD, e entre elas, em edifícios na engenharia civil. O CFD tem sido viabilizado como ferramenta de avaliação e previsão de conforto em edifícios, tanto no tocante da vibração e ressonância das estruturas, como na circulação e ar e temperatura nestes espaços.

Do mesmo modo que o CFD na engenharia vêm se tornando usual, destaca-se a comum desvantagem da compatibilidade e similaridade entre testes de escala reduzida. O problema ocorre quando as informações que alimentam os programas são muito simplificadas em comparação com outras ferramentas comumente empregadas, como os túneis de vento.

As simulações CFD podem fornecer, dependendo da modelagem, informações que seriam impossíveis de serem obtidas em outros métodos de laboratório, como por exemplo, a visualização de vórtices de altíssima velocidade em regiões de difícil acesso de instrumentos. Estas informações detalhadas sobre os fluxos de fluido em todo o espaço virtual de análise, com variáveis bem controladas (em uma análise CFD, o vento pode apresentar uma exata velocidade constante, conforme seja programada), têm sua precisão extremamente dependente do refinamento de malhas e incrementos do problema. O grande cuidado na arte de modelar um problema em CFD é escolher a melhor malha para geometria, o melhor intervalo de tempo, o maior refinamento do fluxo, ao mesmo tempo que o custo computacional seja plausível. Uma simulação ainda pode durar algumas semanas, com bons computadores, porém o custo destes equipamentos e energia deve compensar a economia de materiais e energia do projeto. O objetivo deste trabalho, e de muitos outros, é determinar com mais precisão, as ações que atuam sobre um edifício, uma vez que os valores obtidos de maneira empírica tendem a ser demasiadamente conservadores, o que leva a maior consumo de aço e concreto nas estruturas civis.

### Análise estrutural

Com a evolução da informática, e das estruturas no que se refere aos materiais empregados e otimização das geometrias, é fundamental adotar modelos que também contemplem comportamentos dinâmicos da estrutura.

Devido às exigências econômicas, arquitetônicas e mesmo estruturais, as estruturas foram tornando-se cada vez mais esbeltas. E com isso, estão mais sujeitas às ações dinâmicas advindas de ventos, terremotos, maquinários, entre outras. Deste modo, as estruturas, cada vez mais flexíveis, passaram a apresentar maiores deslocamentos e acelerações, e o estudo do comportamento sob estas ações acabou se tornando mais relevante.

Na análise e dimensionamento de estruturas civis, torna-se cada vez mais relevante o estudo do comportamento destas sob solicitações variáveis com o tempo, determinadas como ações dinâmicas. Entre estas ações, podem ser incluídas aquelas referentes a vibrações de componentes mecânicos, ventos, sismos, explosões e choques.

As ações de vento, apesar de sua natureza dinâmica e aleatória, acabam sendo consideradas, de acordo com a norma de vento, simplificadas para um modelo de carregamentos estáticos. Esta simplificação facilita consideravelmente a análise do modelo estrutural. Porém, como em toda simplificação, as margens de segurança devem cobrir as probabilidades de falha

ao máximo, e apresentam por fim um carregamento maior do que pode vir a ocorrer na vida útil da estrutura, além de se mostrar restrita a apenas algumas tipologias de construções.

Para edificações de formas complexas e grandes dimensões, a própria norma NBR 6123:88 (ABNT, 2013) recomenda o cálculo mediante modelos que contam com carregamentos dinâmicos, que apresentam resultados mais realistas dos que os estáticos. Grandes obras também podem contar com simulações do comportamento estrutural em túneis de vento.

Dentre os métodos de análise modal de estruturas, destaca-se o método do vento sintético (FRANCO, 1993). Esse baseia-se em separar uma parcela que atua estaticamente, em um período de rajada longa, e outra de rajadas curtas, apresentando carregamentos e excitações ocasionadas pelo vento, através da determinação de harmônicos que se correlacionam com o espectro de vento.

Uma abordagem experimental pode também ser empregada para o estudo do comportamento dinâmico em edifícios, com o uso de túneis de vento, que é a metodologia de análise mais comum e se baseia na modelagem do edifício e de seu entorno em escala sobre uma base que gira em 360° com o edifício a ser estudado no centro. Um fluxo de ar escoar pelo túnel e, para cada grau rotacionado da base, medem-se as reações deste edifício sobre a base, e a partir destas leituras, é possível regredí-las para obter os esforços que atuaram sobre a estrutura e também sua frequência natural, as formas modais, amortecimento, rigidez e massa. Porém, na investigação experimental envolvendo túneis de vento, apesar das análises em modelos em escala reduzida ou em escala real apresentarem resultados confiáveis, sua realização é de alto custo e demanda muito tempo.

Além disso, com modelos de hierarquia cada vez maiores, tanto na estrutura, no solo e nos escoamentos de vento, os métodos para obtenções de resultados analíticos, se tornam inviáveis.

Mas, com o grande avanço da tecnologia computacional e das técnicas numéricas tornaram-se possíveis a modelagem e simulação de inúmeros problemas complexos em diversas áreas da engenharia. A dinâmica dos fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics - CFD) é uma dessas áreas, que emprega métodos numéricos para obtenção da solução das equações que governam a dinâmica dos fluidos (FORTUNA, 2012). Os resultados oferecidos pela solução numérica das equações são os campos de velocidade e pressão do escoamento em todo o domínio do espaço e do tempo.

Uma importante vantagem proveniente da análise numérica em relação aos ensaios em túneis de vento é pelo fato de uma maior flexibilidade e versatilidade para obtenção dos resultados. Isso permite uma imediata alteração de qualquer parâmetro físico e geométrico, proporcionando o dinamismo e rapidez necessários ao desenvolvimento das pesquisas e com custo muito inferior de recursos financeiros.

Os softwares de CFD vêm sendo utilizados para estudar diversos fenômenos relacionados ao escoamento do vento, principalmente nas etapas iniciais de elaboração das edificações. Neste trabalho, para investigar o escoamento do vento em torno da estrutura será utilizada uma ferramenta de modelagem chamada OpenFoam®, na qual permite a elaboração de modelos complexos e a simulação baseada na técnica de CFD.

## 2. Modelo de vento sintético

Para se determinar  $\{R\}$ , que são os harmônicos atuantes sobre a estrutura, será utilizado o método do vento sintético, utilizando o espectro de frequência do vento.

As análises modais serão utilizadas para a consideração das excitações causadas pelo vento através do método do vento sintético. Este método trabalha com a separação do carregamento em uma parcela flutuante e uma parcela média, esta aplicada estaticamente sobre a estrutura. Quanto à parcela flutuante de carregamento, é feita a divisão desta em uma série de 11 harmônicos de fases aleatórias, das quais um deles é ressonante com a estrutura. O método elaborado por (FRANCO, 1993) recebeu atualizações e foi assunto de diversos estudos.

Conforme publicação de 2014 sobre novas considerações sobre o método, o número de harmônicos a serem analisados aumentou graças às melhorias nas análises assistidas por computador, e conseqüentemente novas ponderações foram feitas para os coeficientes de cálculo. Ainda assim, pouco se altera em função dos resultados finais (FRANCO e MEDEIROS, 2014).

Segundo a NBR 6123, a razão entre as pressões da parcela estática, de  $t=10$  minutos, e a flutuante, de  $t=3$  segundos, é de 48%, o que significa que esta porcentagem da pressão total é constante e estática, e 52% deste carregamento é devido à parcela flutuante.

Para o carregamento, o vento será determinado em conformidade com a NBR 6123/88 (ABNT, 2013), em função dos parâmetros:  $V_0$ , fator S1, fator S3, coeficiente de arrasto CA e fator S2 conforme categoria apropriada, para os ventos de pico (3 segundos) e estático (600 segundos).

Para determinados intervalos de frequência  $n$  e cota de altura  $z$ , a potência do vento  $W$  é uma função destes.

$$dW = S(z, n) dn \quad (1)$$

Esta função rege o espectro de potência de velocidades do vento. Os primeiros autores que iniciaram as medições deste espectro não consideraram a dependência em função da altura  $z$ . Diversas funções empíricas foram propostas para a determinação de um espectro reduzido em função da frequência da rajada  $n$  e da velocidade média  $U_0$  para o intervalo de 10 minutos a dez metros de altura, em terreno aberto (BRASIL e SILVA, 2015)

$$U_0 = 0,69 V_0 \quad (2)$$

Onde  $V_0$  é a velocidade característica do vento de acordo com as isopletras de velocidade da NBR 6123.

Reduzindo a função  $S(z, n)$  em uma escala logarítmica de representação, é possível obter a função do espectro reduzido:

$$S_r(z, n) = \frac{n S(z, n)}{u_*^2} \quad (3)$$

Onde  $u_*^2$  é a velocidade de fricção, que é função da rugosidade do terreno.

O espectro reduzido utilizado no modelo de vento sintético é o de Davenport, por trazer valores de espectro maiores que o de outros autores, e pelo National Building Code of Canada empregar uma função pouco modificada.

$$\frac{n S(z, n)}{u_*^2} = 4 \frac{x^2}{(1 + x^2)^{\frac{4}{3}}} \quad (4)$$

$$\text{Com } x = \frac{1220n}{U_0}$$

Após conversão do espectro de velocidades em espectro de pressões, e decompondo as pressões flutuantes, (FRANCO, 1993) simplificou o problema adotando 11 funções harmônicas, na qual a quarta contém frequência igual à do primeiro modo de vibração e as outras são múltiplos desta em um fator 2 (multiplicando para a terceira e anteriores, e dividindo para a quinta e posteriores).

Com um fator  $C_k$ , calculado a partir da integração da função de densidade espectral no intervalo de frequências  $m$  escolhido.

$$C_k = \sqrt{2 * \frac{n S(z, n)}{u_*^2}} \quad (5)$$

O fator  $C_k$  sofre uma correção, na qual o valor da quarta frequência é dividido pela metade, e esta metade é somada à terceira e quinta frequências, sendo assim:

$$\begin{aligned} C_4^* &= C_4/2 \\ C_3^* &= C_3 + \frac{C_4}{4} \\ C_5^* &= C_5 + \frac{C_4}{4} \end{aligned} \quad (6)$$

Ao realizar a correlação espacial de velocidades, a altura de rajadas equivalentes deve ser determinada para em seguida determinar o centro de rajada.

$$z_{ok} = \frac{U_0}{7 n_k} \quad (7)$$

Onde  $n_k$  é a frequência da rajada considerada, e  $U_0$  é a velocidade média obtida em (2).

De acordo com o tamanho de  $z_{ok}$ , é possível determinar a distribuição vertical das pressões de vento no centro de rajada, onde neste centro, impõe-se um triângulo de altura 1 e base  $2 * z_{ok}$ . Em função da discretização vertical da estrutura, estabelece-se a correlação espacial da pressão em cada diferencial para cada rajada, das mais concentradas até as mais abertas. Para determinar o centro de rajada do edifício, pode-se assumir que as rajadas são estacionárias e aplicá-las no ponto onde a resposta da estrutura é maior. Com o arranjo desta correlação, tem-se os harmônicos desta excitação causada pelo vento.

Após a realização do procedimento para a obtenção das excitações causadas pelo vento a partir do método do vento sintético, é obtido um carregamento quase estático, que atuará frequentemente sobre a estrutura, e uma pressão flutuante, que é a diferença entre o carregamento estático e o de rajada. Na parcela flutuante estará considerada a ampliação dinâmica.

Para os modos da estrutura e os 11 harmônicos, devem ser extraídos os respectivos vetores de carregamento das parcelas de vento estático e vento flutuante.

O carregamento harmônico da parcela flutuante do vento seguirá a função:

$$R_{pf}(t) = q_{pf} \sin(\omega_i t) \quad (8)$$

Onde  $q_{pf}$  é o vetor de cargas da parcela flutuante,  $\omega_i$  é a frequência do modo  $i$  e  $t$  é o instante que varia ao longo da análise dinâmica integrada no tempo.

Assim sendo, o vetor de forças totais atuantes sobre o edifício, a cada instante  $t$ , é a soma das cargas permanentes, da parcela estática do vento e da parcela flutuante do vento naquele instante  $t$ .

$$\hat{F}(t) = q_{perm} + q_{vento,pe} + R_{pf}(t) \quad (9)$$

Algoritmo em passos:

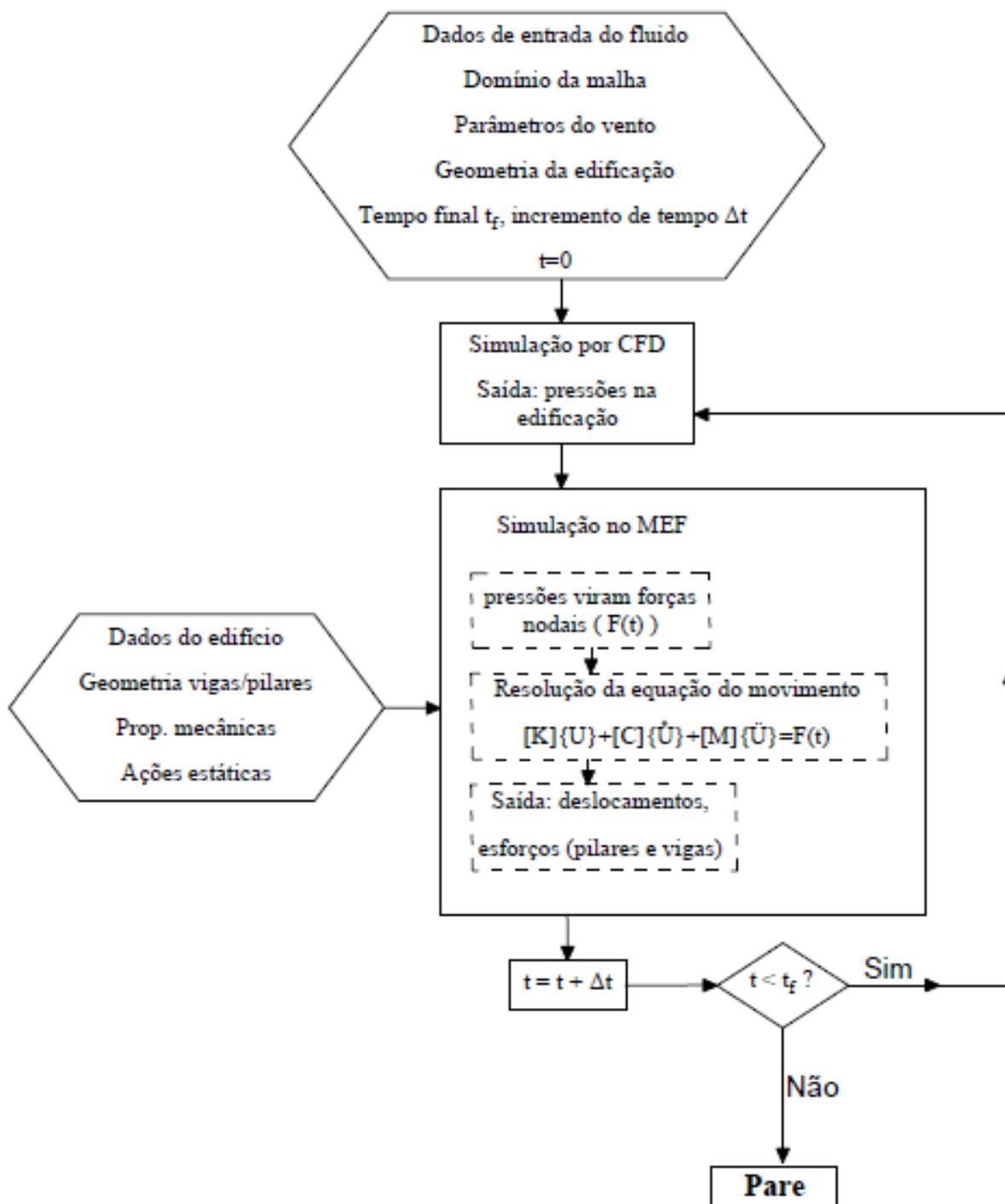
- Modela-se o edifício
- Estabelecem-se os parâmetros do vento sintético (velocidade, fatores S, Ca)
- Montam-se as matrizes de rigidez, e massa da estrutura
- Em seguida, é feita uma análise modal da estrutura, a fim de determinar suas frequências naturais
- Com a rigidez e a massa, calculam-se os coeficientes de Rayleigh e determina-se a matriz de amortecimento.
- Em seguida, determinam-se as forças do vento de acordo com o procedimento do vento sintético.
- Utilizando a menor frequência natural da estrutura, desenvolvem-se 11 harmônicos das forças
- As parcelas de forças do vento são divididas em flutuantes e estáticas
- A parcela estática é somada com o carregamento estático do edifício, enquanto a flutuante segue uma função senoidal ao longo do tempo
- Com a análise dinâmica pelo método de Houbolt, são utilizadas as características de rigidez, massa e amortecimento da estrutura, e as forças naquele instante t, em função da parcela flutuante e das estáticas.
- A cada passo, são determinados os deslocamentos, velocidades e acelerações na estrutura, o que segue para o próximo passo de tempo.
- A análise segue até concluir o time history desejado.

### 3. Modelo de CFD e MEF acoplados

Para verificar os resultados obtidos pelo método do vento sintético, será feita comparação com resultados obtidos por uma análise realizada por uma ferramenta CFD.

Neste trabalho foi feita a simulação em um ambiente CFD com o software OpenFoam®, que visava determinar os coeficientes de pressão que agiam em cada ponto da superfície do edifício. Neste mesmo modelo, com estes coeficientes e com dados referentes ao fluido da análise, no caso, a densidade do ar e a velocidade deste escoamento, se torna possível determinar as pressões atuantes em cada ponto da superfície do edifício. Com estas pressões, é possível conhecer as ações do vento sobre a edificação, as quais foram transformadas em forças nodais nos nós do edifício e que em conjunto com as ações estáticas, pode-se resolver a equação de movimento do problema. No presente trabalho, usou-se o método de integração direta implícito de Houbolt para tal, e determinou-se, para cada passo de tempo as deformações, deslocamentos e as solicitações atuantes em todos os elementos no edifício, neste caso, as vigas e pilares.

Dessa forma, desenvolveu-se um modelo computacional que acoplou a simulação de CFD com o Método dos Elementos Finitos (MEF), onde na Figura 1 apresenta-se sucintamente o que fora realizado.

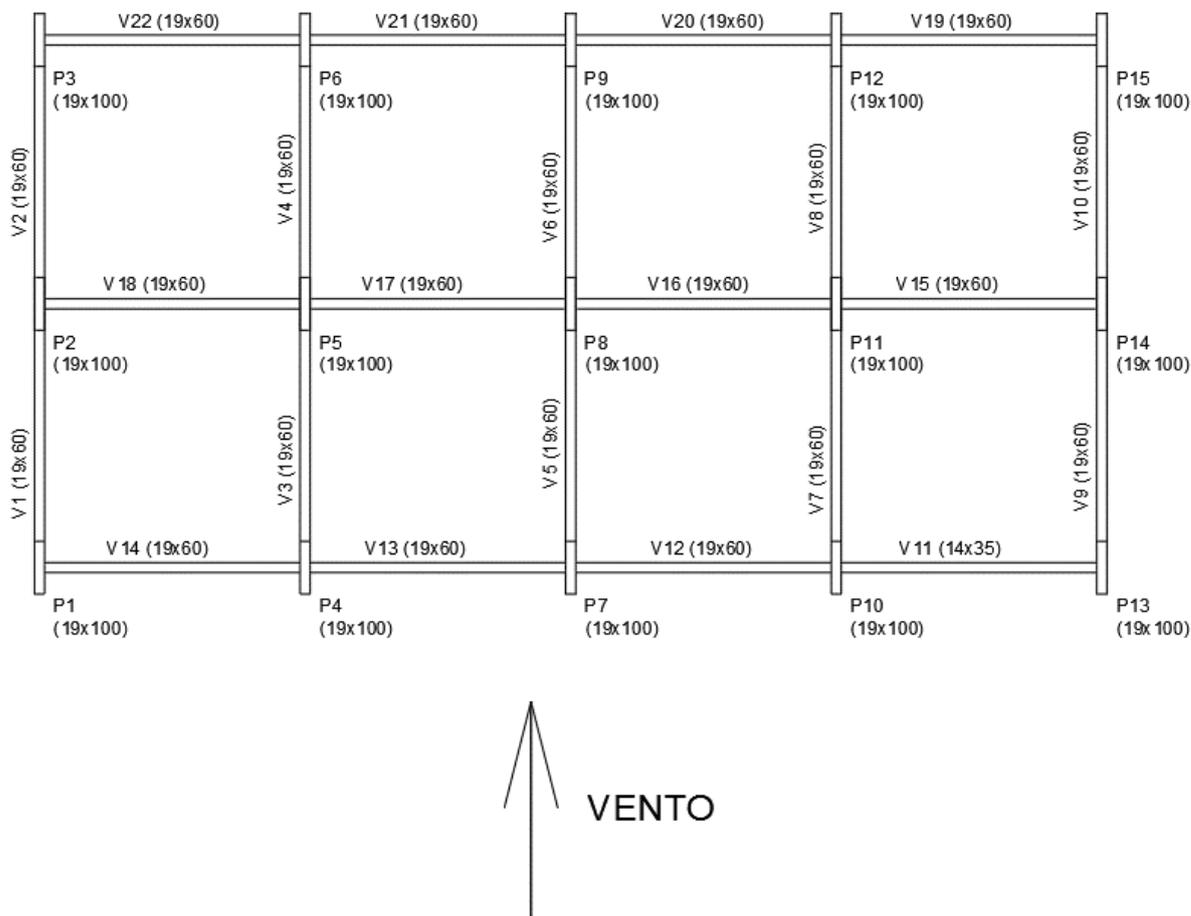


**Figura 1** - Fluxograma representativo do processo de análise dinâmica

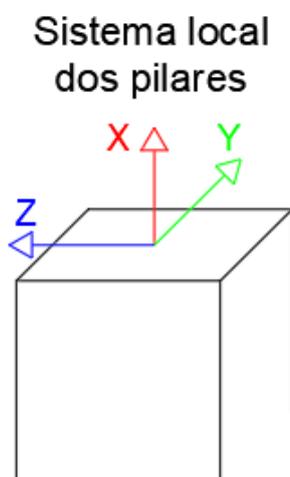
#### 4. Exemplo Numérico

Para o presente estudo, apresenta-se um exemplo numérico hipotético, que deve ser usado para comparar as diferentes modelos de análise de vento, a saber: (i) NBR6123; (ii) acoplamento CFD com o MEF; (iii) modelo de Vento sintético. Assim, considerou-se um edifício de dimensões de 20m de largura, 10m de comprimento e 30m de altura, com 10

pavimentos de 3m de pé direito. A planta tipo segue na Figura 2. O sentido local para as leituras de momento fletor são apontados na Figura 3.



**Figura 2** - Planta do pavimento tipo do edifício de 10 pavimentos



**Figura 3** - Sistema local de coordenadas dos pilares, para esforços normais e fletores

Neste modelo, as vigas foram carregadas com uma carga uniformemente distribuída de 10kN/m na vertical e, quanto às cargas laterais, foi implementado um vento com incidência em relação ao eixo Y, carregado por pavimento conforme procedimento do Vento Sintético, explicado mais adiante. A matriz de amortecimento é a de Rayleigh com a consideração de um fator de 2% sobre a matriz de rigidez. O material do edifício é concreto armado, tem densidade de 2500kg/m<sup>3</sup> e módulo de Young de 28 gigapascal.

Após a consideração destas premissas, o software OpenFOAM® calcula as pressões atuantes nas faces deste sólido que representa o edifício. Através do método dos volumes finitos (MVF), o programa resolve as equações com base nos princípios de conservação de massa, movimento e energia.

Paralelamente, no outro caso, a rotina do Vento Sintético calcula, com base nos parâmetros de norma, os vetores de carga permanente e flutuante, para então carregar a estrutura em cada instante  $t$  da análise, conforme o procedimento descrito em 2.1

4.1 Comparação dos resultados do Vento Sintético com da análise CFD e com resultados da norma

Após a obtenção das pressões atuantes em cada ponto da superfície do volume do edifício em cada instante de tempo, estas pressões foram integradas na área de influência de cada nó do edifício, foram gerados vetores de carregamento  $\hat{F}(t)$  para cada instante da análise, e os deslocamentos, deformações e solicitações em determinados elementos foram obtidos pelo programa de análise dinâmica por Houbolt. O tempo da análise foi de 120 segundos, com passos de tempo de 1 segundo.

Simultaneamente, foi realizada uma análise estática, conforme a NBR 6123/88 (ABNT, 2013), e uma por Vento Sintético, com os seguintes parâmetros:  $v_0 = 40 \text{ m/s}$ ,  $S_1 = 1$ , categoria IV, classe B,  $z$  calculado a cada 3m,  $S_3 = 1$  e  $C_a = 1,34$ . O vento atua na direção Y, de baixo para cima, conforme a Figura 2.

Além disso, como parâmetros do vento sintético, constam o pavimento do centro de rajada como sendo o 9º andar, parâmetro  $S_2$  para 3 segundos e 600 segundos. Será utilizando o 4º harmônico (o ressonante) para as forças. Com uma frequência natural de 6,55 rad/s, ou seja, um período de 0,95s, este edifício se mostra muito próximo do adequado a receber uma análise dinâmica de acordo com o item 9.1 da NBR 6123 (ABNT, 1988). O tempo da análise também foi de 120 segundos, com passos de tempo iguais a 1 segundo.

Com base nestes parâmetros, é obtida uma velocidade  $v_k$  para cada pavimento do edifício e, conseqüentemente, um carregamento  $q$  para cada pavimento.

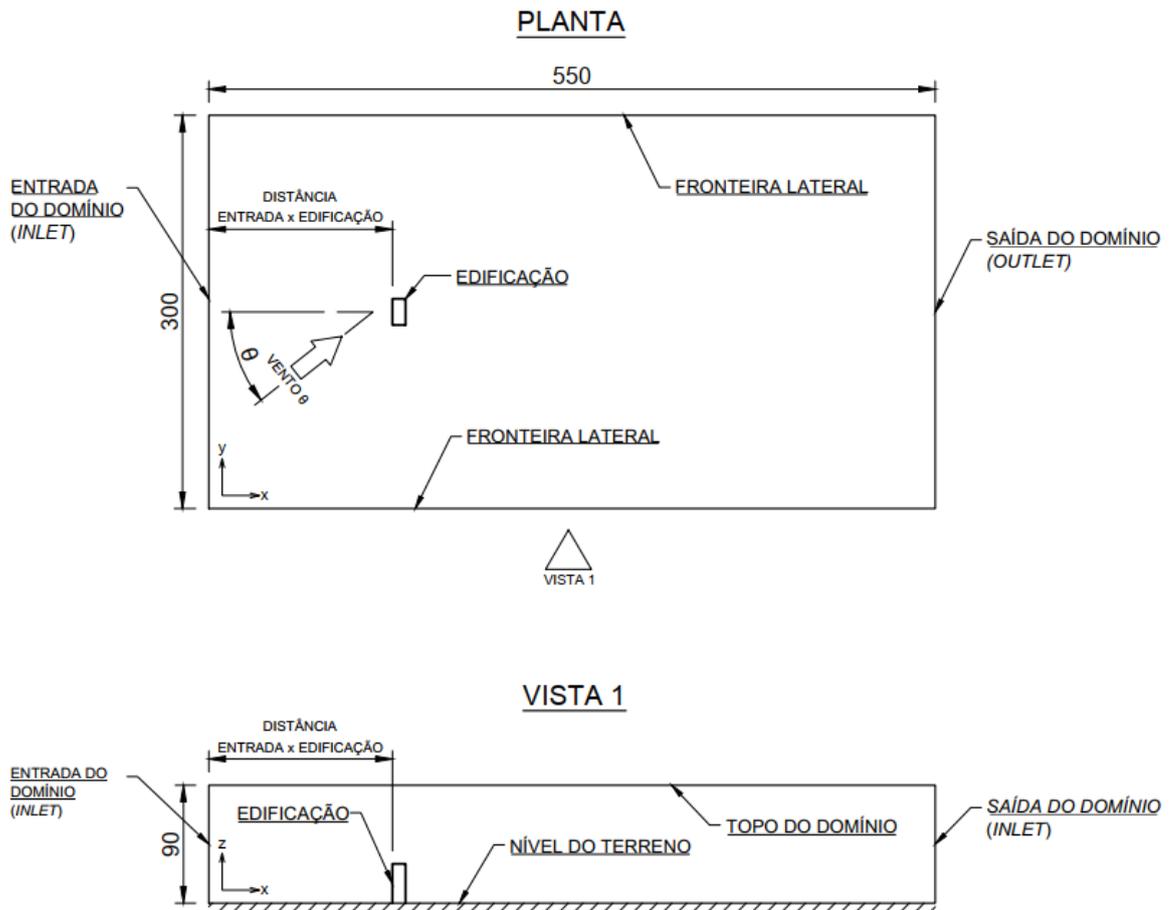
$$v_k = v_0 * S_1 * S_2 * S_3 \quad (10)$$

$$q = 0,613 v_k \quad (11)$$

Esta carga  $q$ , em função da área de influência de cada pavimento, é concentrada nos nós do edifício conforme sua área de influência, para que o programa MEF realize a análise estrutural estática.

$$F = q * A_{infl} * C_a \quad (12)$$

Na análise dinâmica realizada no OpenFOAM, a edificação apresenta-se em um domínio de dimensão longitudinal 27,5 vezes superior à dimensão de referência da edificação. A dimensão transversal do domínio é quinze vezes superior à dimensão de referência da edificação, e a altura do domínio é três vezes superior à altura da edificação conforme Figura 4. Consecutivamente aos testes de convergência, foi adotada uma malha de  $3 \times 10^6$  elementos.

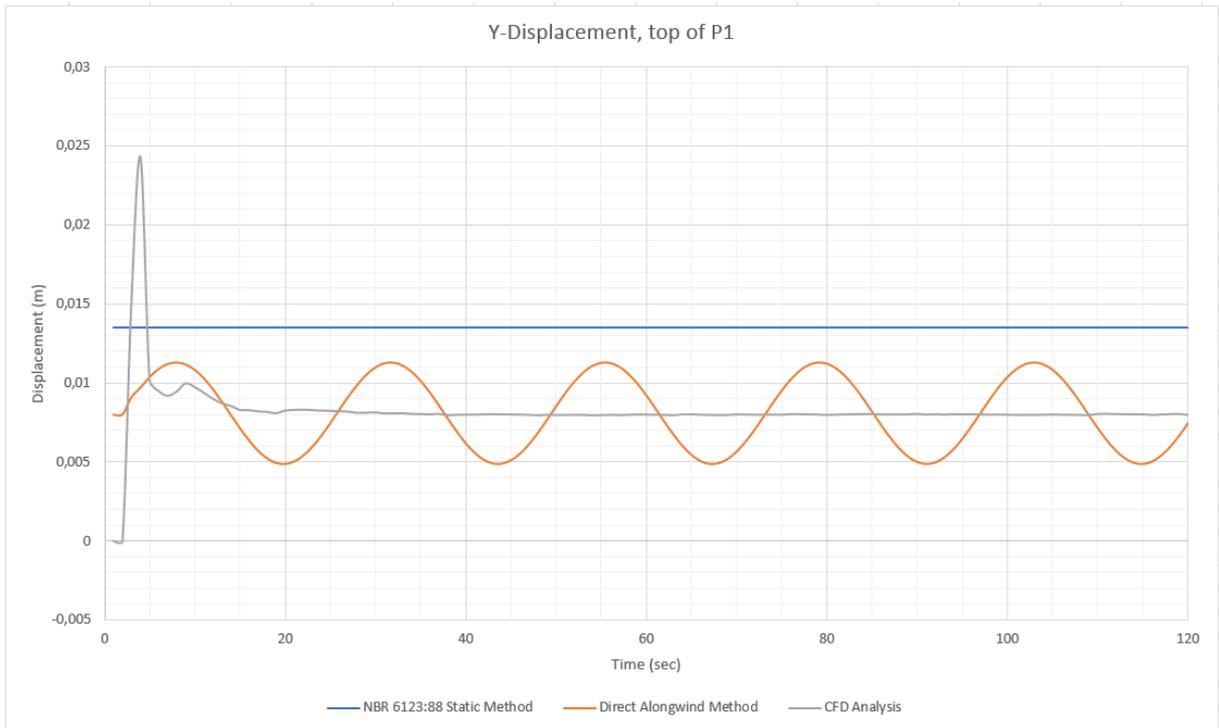


**Figura 4 – Domínio da análise CFD no OpenFOAM**

Após a análise CFD e a análise estática conforme a norma, foram comparados os valores dos deslocamentos do topo do edifício, e os esforços normais e momentos fletores de determinado pilar.

#### 4.2 Primeira comparação: Deslocamento do topo do P1

Em uma primeira verificação, será feita a comparação do deslocamento de topo do pilar P1 causado pelas pressões oriundas do CFD e pelas forças do Vento Sintético e da norma NBR 6123/88 (ABNT, 2013).



**Figura 5** - Deslocamentos no topo do pilar P1 - Fonte: Autor

**Tabela 1** – Deslocamentos absolutos do topo do pilar P1 - Fonte: Autor

<b>Deslocamento em Y</b>	<b>Modelo Estático – NBR 6123 (cm)</b>	<b>Modelo CFD – OpenFoam (cm)</b>	<b>Modelo Vento Sintético (cm)</b>
Topo do P1	1,35	0,8	1,1

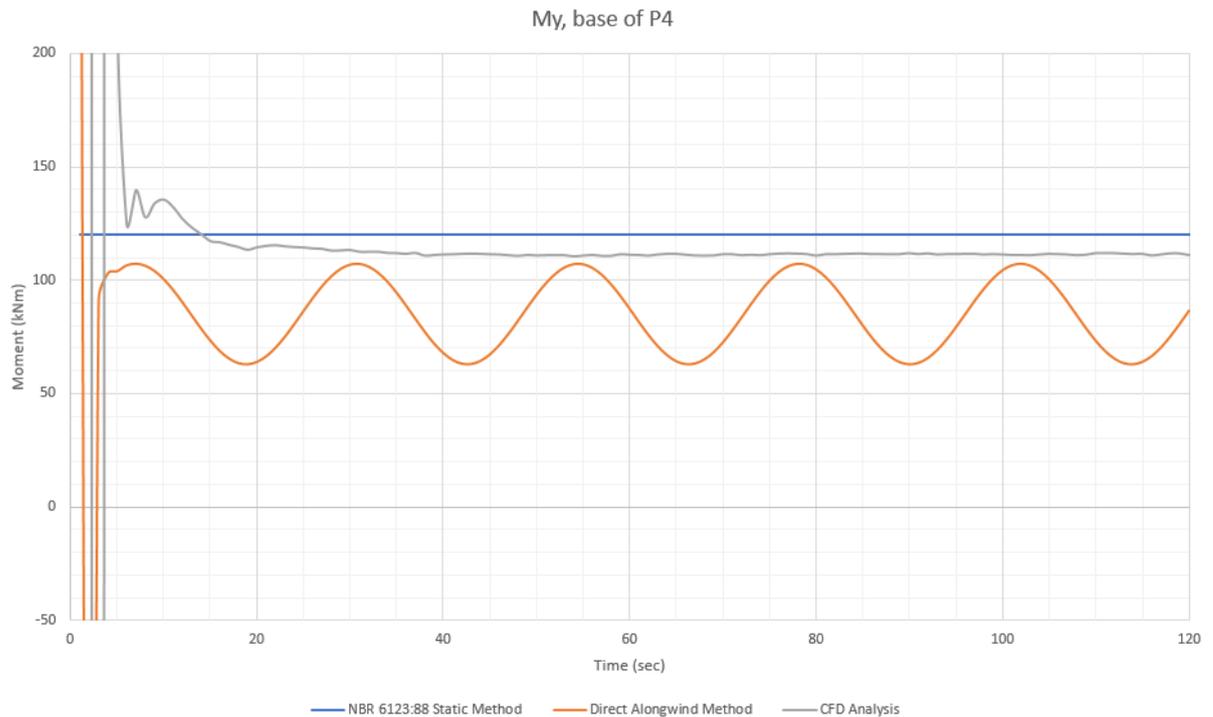
**Tabela 2** - Diferença relativa entre os deslocamentos do topo do pilar P1 - Fonte: Autor

<b>Diferenças relativas</b>	<b>Estático X CFD (%)</b>	<b>Estático X Vento Sintético (%)</b>	<b>Vento Sintético X CFD (%)</b>
Topo do P1	40,7	18,5	27

Na análise estática conforme NBR 6123:88, o deslocamento de topo na direção Y foi igual a 1,35 cm, enquanto na análise dinâmica, o deslocamento estabilizou-se em 1,1 cm no Vento sintético e 0,8cm no CFD em OpenFoam. Além das mesmas constatações sobre convergência do exemplo anterior se aplicarem, observa-se que este edifício é consideravelmente mais rígido que o anterior, uma vez que mesmo no método estático, ele passa na tolerância da NBR 6118, pois seu deslocamento máximo é inferior a  $H/1700$ . É possível notar também que, mesmo com a oscilação de deslocamentos causada pelo vento sintético, que atua baseada em uma função senoidal, sua variabilidade de deslocamento, que ficou entre 1,1cm e 0,5cm ainda condiz com a estabilizada de 0,8 pelo CFD.

#### 4.3 Segunda comparação: Momento fletor da base do P4

Em uma segunda verificação, será feita a comparação do momento fletor na base do pilar P4 causado pelas pressões oriundas do CFD, Vento Sintético e pelas forças da norma NBR 6123/88 (ABNT, 2013).



**Figura 6** - Esforço normal na base do pilar P4 (sistema local) - Fonte: Autor

**Tabela 3** – Momentos fletores absolutos na base do pilar P4 - Fonte: Autor

<b>Momento fletor médio em y local</b>	<b>Modelo Estático – NBR 6123 (kNm)</b>	<b>Modelo CFD – OpenFoam (kNm)</b>	<b>Modelo Vento Sintético (kNm)</b>
Base do P4	120	111	107

**Tabela 4** - Diferença relativa entre os momentos fletores da base do pilar P4 - Fonte: Autor

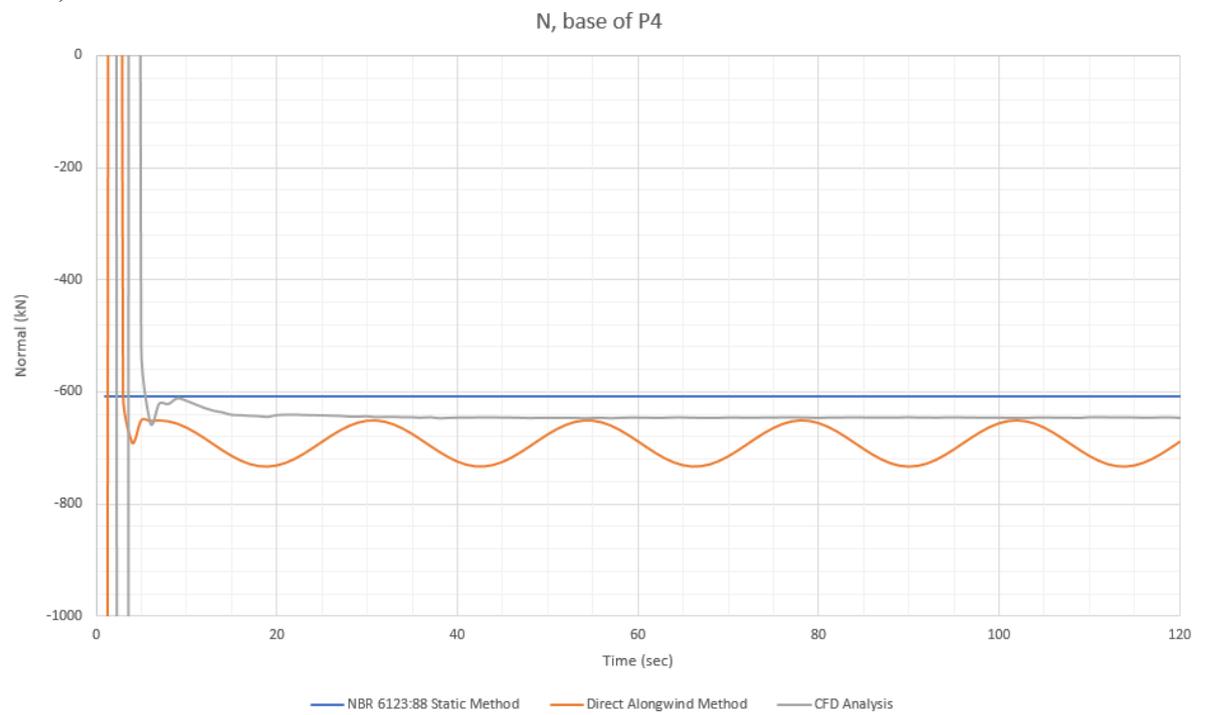
<b>Diferenças relativas</b>	<b>Estático X CFD (%)</b>	<b>Estático X Vento Sintético (%)</b>	<b>Vento Sintético X CFD (%)</b>
Base do P4	7,5	10,8	3,6

Fonte: Autor

Na análise estática conforme NBR 6123:88, o momento fletor foi igual a 120 kNm, enquanto na análise dinâmica, tende a estabilizar-se em 111 kNm no CFD e 107 kNm no Vento Sintético. Nesta análise, os esforços de momento fletor pelo Vento sintético acabaram sendo menores do que os apresentados no CFD, porém, uma diferença tão pequena como esta, inferior a 4%, é facilmente corrigida na fase de dimensionamento dos elementos, devido aos critérios majoradores de esforços de cálculo.

#### 4.4 Terceira comparação: Esforço normal da base do P4

Em uma terceira verificação, será feita a comparação do esforço normal na base do pilar P4 causado pelas pressões oriundas do CFD, Vento sintético e da norma NBR 6123/88 (ABNT, 2013).



**Figura 7** – Esforço normal na base do P4 (sistema local) - Fonte: Autor

**Tabela 5** – Esforços normais absolutos na base do pilar P4 - Fonte: Autor

<b>Esforço normal médio em x local (Esforços de compressão)</b>	<b>Modelo Estático – NBR 6123 (kN)</b>	<b>Modelo CFD – OpenFoam (kN)</b>	<b>Modelo Vento Sintético (kN)</b>
Base do P4	608	646	733

Na análise estática conforme NBR 6123:88, o esforço normal foi igual a 608 kNm, enquanto na análise dinâmica, o esforço normal converge em 646kN no CFD e 733kN no Vento

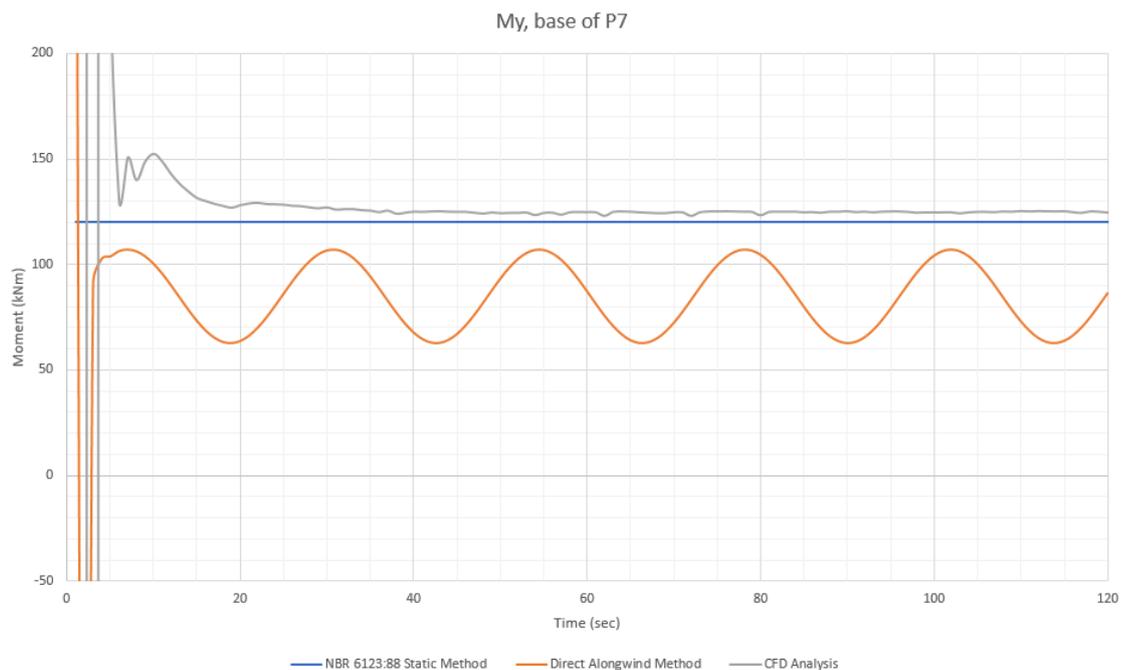
Sintético. Os esforços normais ficam consideravelmente maiores nos instantes em que o deslocamento foi menor, pois é quando a ação em barlavento é menor.

**Tabela 6** - Diferença relativa entre os esforços normais da base do pilar P4 - Fonte: Autor

Diferenças relativas	Estático X CFD (%)	Estático X Vento Sintético (%)	Vento Sintético X CFD (%)
Base do P4	6,25	20,5	13,5

#### 4.5 Quarta comparação: Momento fletor da base do P7

Em uma quarta verificação, será feita a comparação do momento fletor na base do pilar P7 causado pelas pressões oriundas do CFD, Vento Sintético e pelas forças da norma NBR 6123:88.



**Figura 8** - Esforço normal na base do pilar P7 (sistema local) - Fonte: Autor

Na análise estática conforme NBR 6123:88, o momento fletor foi igual a 120 kNm, enquanto na análise dinâmica, tende a estabilizar-se em 125 kNm no CFD e 107 kNm no Vento Sintético. É possível observar que, para este pilar que se localiza no meio do edifício, os esforços oriundos do CFD atuam de maneira mais intensa do que até mesmo no método estático. Referente à diferença entre estático e Vento Sintético, a mesma diferença é apresentada, o que ainda é uma diferença pequena diante das majorações realizadas em projeto.

**Tabela 7 – Momentos fletores absolutos na base do pilar P7 - Fonte: Autor**

Momento fletor médio em y local	Modelo Estático – NBR 6123 (kNm)	Modelo CFD – OpenFoam (kNm)	Modelo Vento Sintético (kNm)
Base do P7	120	125	107

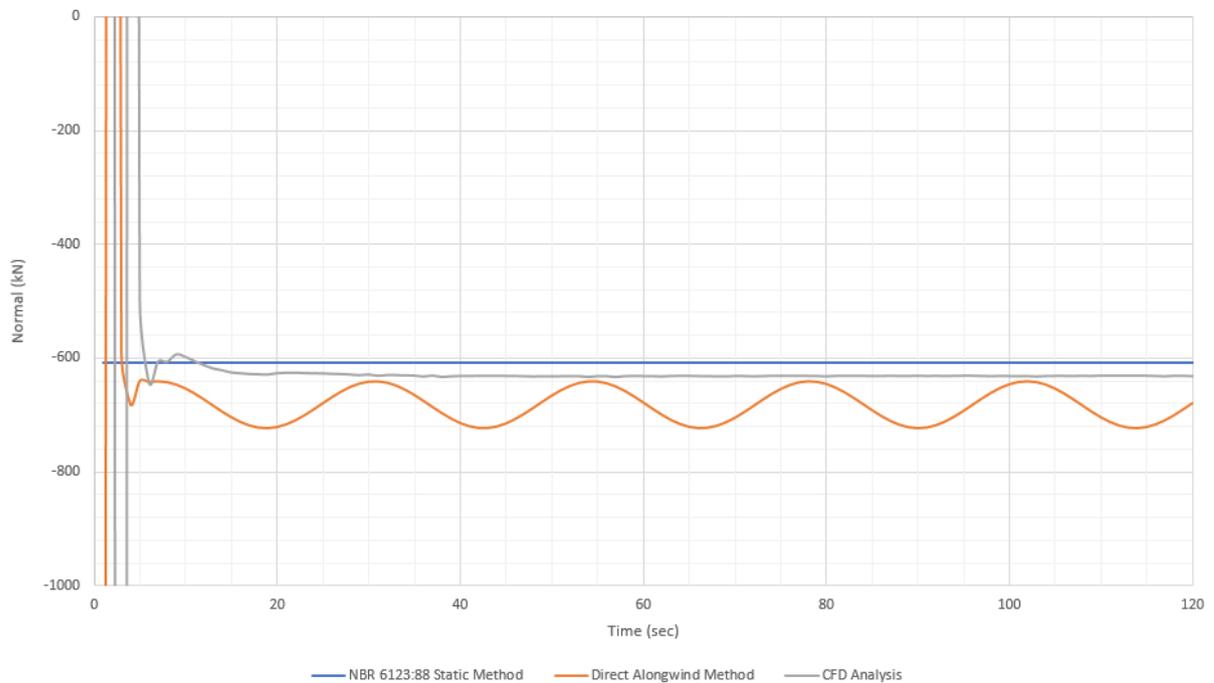
**Tabela 8 - Diferença relativa entre os momentos fletores da base do pilar P7 - Fonte: Autor**

Diferenças relativas	Estático X CFD (%)	Estático X Vento Sintético (%)	Vento Sintético X CFD (%)
Base do P7	4,1	10,8	14,4

4.6 Quinta comparação: Esforço normal da base do P7

Em uma quinta verificação, será feita a comparação do esforço normal na base do pilar P7 causado pelas pressões oriundas do CFD, Vento sintético e da norma NBR 6123:88.

N, base of P7



**Figura 9 – Esforço normal na base do P7 (sistema local) - Fonte: Autor**

**Tabela 9 – Esforços normais absolutos na base do pilar P4 - Fonte: Autor**

<b>Esforço normal médio em x local (Esforços de compressão)</b>	<b>Modelo Estático – NBR 6123 (kN)</b>	<b>Modelo CFD – OpenFoam (kN)</b>	<b>Modelo Vento Sintético (kN)</b>
Base do P7	608	632	709

**Tabela 10** - Diferença relativa entre os esforços normais da base do pilar P4 - Fonte: Autor

<b>Diferenças relativas</b>	<b>Estático X CFD (%)</b>	<b>Estático X Vento Sintético (%)</b>	<b>Vento Sintético X CFD (%)</b>
Base do P7	3,9	16,6	12,2

Na análise estática conforme NBR 6123:88, o esforço normal foi igual a 608 kNm, enquanto na análise dinâmica, o esforço normal converge em 632kN no CFD e 709kN no Vento Sintético. Os esforços normais ficam, de mesmo modo, consideravelmente maiores nos instantes em que o deslocamento foi menor, pois é quando a ação em barlavento é menor.

## 5. Conclusões

É possível concluir que, o carregamento atuante na estrutura ao longo do tempo pelo vento sintético é semelhante ao obtido pela ferramenta OpenFoam®. Por um lado, o método de (FRANCO, 1993) é consideravelmente mais barato computacionalmente que a ferramenta CFD. Embora a análise CFD tenha confiabilidade maior e permite analisar diversas estruturas de formas muito mais complexas sob carregamentos que atuam de maneiras distintas, o método do vento sintético funciona bem em estruturas como as de edifícios e torres.

Outro aspecto importante é que, pelo fato de usar os parâmetros da NBR 6123:88, o método do vento sintético ainda assim apontou carregamentos por pavimento muito semelhantes aos da análise CFD.

Com o método do vento sintético apresentando resultados adequados para uma análise que considere apenas a superestrutura, assim como é feito comumente na engenharia civil, permite-se dizer que o método ainda seja eficiente para os estudos com interação solo-estrutura.

## 6. Agradecimentos

Os autores são gratos pelo apoio financeiro da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e a Universidade de São Paulo, referente ao Programa Jovens Pesquisadores da Reserva Técnica para Infraestrutura Institucional de Pesquisa de 2017 e 2018.

## 7. Referências

ABNT. NBR 6123/1988 - Forças devidas ao vento em edificações. [S.l.]: [s.n.], 1988.

AGNELO, D. P.; KUROKAWA, F. A.; ALMEIDA, V. D. S. Aplicação de CFD para cálculo das pressões dinâmicas em edificações. **XIII Simmec**, Vitória, 29 Outubro 2018. 13.

BRASIL, R. M. L. R. F.; SILVA, M. A. **Introdução À Dinâmica das Estruturas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.

DAVENPORT, A. G. The relationship of wind structure to wind loading. **Wind effects on buildings and structures 16**, Teddington, 1963. 53-102.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos**: conceitos básicos e aplicações. 2ª. ed. São Paulo: EDUSP, 2012.

FRANCO, M. Direct Along Wind Dynamic Analysis of Tall Structures. **International Conference on Tall Buildings, Proceedings**, Rio de Janeiro, 1993.

FRANCO, M.; MEDEIROS, S. Método do Vento Sintético: novas considerações. **Revista Concreto & Construções**, São Paulo, v. 76, p. 78-91, Dezembro 2014.

GONÇALVES, R. M. et al. **Ação do vento nas edificações**: teoria e exemplos. 2ª. ed. São Carlos: EESC - USP, 2007.