

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS PELO VENTO EM CHAMINÉS

por

Luan Gasparetto Fontanella

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2015.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS PELO VENTO EM CHAMINÉS

por

Luan Gasparetto Fontanella

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Rogério José Marczak

Co-Orientadora: Prof.^a Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Herbert Martins Gomes

Jakson Manfredini Vassoler

Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, junho de 2015.

AGRADECIMENTOS

Ao meus orientadores Rogério José Marczak e Adriane Prisco Petry, pela dedicação e pelo apoio durante o desenvolvimento do trabalho. Ao engenheiro mecânico Cláudio José Grando da Cunha, meu supervisor durante o estágio realizado na Petrobras, pelo interesse mostrado no trabalho, o acompanhamento do estudo e pela obtenção das informações referentes às chaminés e ao fenômeno observado na refinaria. Aos professores que tive ao longo do curso de graduação e ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS – DEMEC, por terem me fornecido uma ótima formação profissional. À minha família e aos amigos, que sempre me motivaram, acreditaram no meu potencial e estiveram ao meu lado durante a graduação no curso de Engenharia Mecânica da UFRGS.

FONTANELLA, L. G. **Metodologia para Análise de Vibrações Induzidas pelo Vento em Chaminés**. 2015. 21f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

No presente trabalho é realizado um estudo sobre uma chaminé da Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP) da Petrobras que apresentou vibração com grande amplitude de oscilação e trincas de fadiga. O estudo apresenta um caso clássico de vibração induzida pelo vento, em que os vórtices formados em uma chaminé atingem a chaminé à frente e induzem oscilações severas, principalmente quando está apoiada sobre uma base flexível. O trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para análise desse tipo de caso. Conhecido em inglês como *vortex shedding*, o fenômeno é bastante popular na literatura, porém devido à sua complexidade se torna bastante complicado o cálculo dos esforços atuantes sobre as estruturas e conseqüentemente ele é muito pouco explorado. A fim de analisar fielmente o fenômeno observado em campo, três configurações da estrutura são estudadas: original, na qual foi observada vibração excessiva; chaminé com a base reforçada com vigas, na qual se buscou aumentar a rigidez total da estrutura; e chaminé com reforço na base e na região onde apresentou trincas. Para tal, são realizadas análises modais para obter as frequências naturais das diferentes configurações da chaminé, análises harmônicas para obtenção das tensões nas estruturas sob vibração, e simulações em CFD para prever o fenômeno de formação e propagação de vórtices e obter uma comparação com os valores fornecidos na literatura. De modo a obter frequências e probabilidades de indução de vórtices sobre a chaminé, uma análise estatística é realizada sobre os ventos predominantes para a região de Canoas-RS, onde a refinaria se encontra. Finalmente, é estimada a vida em fadiga da chaminé com e sem reforço na região onde foram identificadas as trincas.

PALAVRAS-CHAVE: indução de vórtices, ressonância, chaminés, vibrações, fadiga.

FONTANELLA, L. G. **Analysis Methodology for Wind-Induced Vibrations on Chimneys**. 2015. 21p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

A study is performed on a chimney that is located at Petrobras Alberto Pasqualini refinery (REFAP) in which high oscillatory amplitude vibration and fatigue cracks were observed. The study presents a classic case of wind-induced vibration, where the vortices originated in one chimney strike the following one and induce severe oscillations, specially when it is supported by a flexible base. The objective of this study is to present a methodology for analyzing this type of case. Known as *vortex shedding*, it is a very popular phenomenon in literature, however because of its complexity becomes quite complicated to calculate the loads acting on the structures and therefore it is very little explored. In order to accurately analyze the phenomenon observed in the field, three structure configurations are studied: original, which was observed excessive vibration; chimney with reinforced base, where its total stiffness was increased; and chimney with reinforced both base and zone where the cracks were observed. To achieve that, modal analysis are performed in order to obtain the natural frequencies of different chimneys' configurations, harmonic analysis to obtain stress in the structures due to vibration, and CFD simulations to forecast vortex shedding formation and propagation and compare to the values provided from literature. In order to obtain the frequencies and probabilities of vortex shedding, a statistics analysis of predominant winds in Canoas-RS, where the refinery is located, is performed. Finally, fatigue life is estimated for the chimneys both with and without reinforcement where the cracks were identified.

KEYWORDS: vortex shedding, resonance, chimneys, wind-induced vibration, fatigue.

ÍNDICE

	Pág.
1	INTRODUÇÃO 1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 2
2.1	Vortex shedding..... 2
2.2	Análise numérica de escoamentos turbulentos..... 3
2.3	Função de Weibull para a distribuição dos ventos 4
3	MODELOS NUMÉRICOS 4
3.1	Chaminé original..... 4
3.2	Chaminé com base reforçada..... 5
3.3	Chaminé com base e abertura reforçadas 5
3.4	Dinâmica de Fluidos Computacional - CFD 6
4	RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÕES 7
4.1	Análise modal..... 7
4.2	Análise em CFD 8
4.3	Análise harmônica 9
5	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VENTOS E VIDA EM FADIGA 11
6	CONCLUSÕES 13
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 15

1. INTRODUÇÃO

Em março de 1994 foi constatada a oscilação de grande amplitude da chaminé de um dos fornos (forno B) de destilação atmosférica da Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP) da Petrobras, estimada por engenheiros da refinaria com valor de aproximadamente 80cm pico-a-pico de amplitude no topo na direção N-S, quando um vento leste soprava moderadamente (Figura 1.1). Durante a vibração era possível verificar a torção da estrutura metálica de apoio da chaminé.



Figura 1.1 – Representação da disposição das chaminés e direção de vento.

Em data posterior, sob condições de vento similares, foi constatada oscilação de baixa amplitude da chaminé do forno vizinho (forno A). O conjunto dessa chaminé apresenta maior rigidez, em razão de estar interligada com os dutos de pré-aquecimento de ar e também por apresentar uma estrutura metálica de apoio mais rígida.

Naquela ocasião a estrutura da chaminé do forno B foi reforçada, de forma a apresentar o mesmo número de apoios da chaminé do forno A. Após esta modificação não foi mais observada oscilação de grande amplitude.

Em 2004 as chaminés estavam em fim de vida útil e foram substituídas na parada de manutenção por recomendação de inspeção. Nenhuma avaria havia sido constatada, que não fosse corrosão uniforme e deterioração do refratário interno. Entretanto, em março de 2012, foram observadas trincas (Figura 1.2) na chaminé do forno B na região da abertura retangular, que não existia na configuração original. De modo a impedir um eventual colapso da estrutura, a região recebeu a adição de um reforço por chapas metálicas que foi instalado em operação.



Figura 1.2 – Trincas observadas na chaminé do forno B.

As observações relatadas são típicas do fenômeno de vibração induzida pelo vento através da formação de vórtices. Esse fenômeno é bastante citado na literatura, porém é pouco explorado. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia

para realizar uma análise completa sobre esse tipo de caso, obtendo as frequências naturais das diferentes configurações de chaminés, as suas respostas harmônicas com o carregamento dos vórtices e a caracterização da formação dos vórtices através de simulação em CFD. Posteriormente é realizado um estudo estatístico dos ventos para a região de Canoas-RS, estimando assim a probabilidade de ocorrência de ressonância das chaminés e suas vidas em fadiga.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Vortex Shedding

O vento ao atingir uma dada estrutura apresenta um ponto de descolamento a partir do qual ocorre a formação de uma esteira de vórtices, normalmente alternados de um lado e outro da estrutura (Figura 2.1). Os vórtices ocasionam flutuação de pressão alternadamente sobre as faces perpendiculares à direção do vento. A oscilação resultante é, portanto, perpendicular ao vento e apresenta um pico de ressonância quando a frequência dos vórtices é próxima à frequência natural da estrutura.

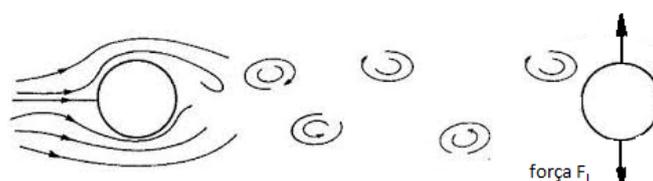


Figura 2.1 – Geração de vórtices induzidos pelo vento.

A força de sustentação por unidade de comprimento gerada por esse fenômeno, conforme Harris, 1977, é dada pela equação abaixo, mas faz a ressalva de que é apenas um valor de referência por não representar integralmente o fenômeno, em função da complexidade do mesmo.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho \cdot D \cdot v^2 \cdot C_L \quad (2.1)$$

onde ρ é a densidade do ar, D o diâmetro da estrutura, v a velocidade do vento e C_L o coeficiente de sustentação.

A frequência dos vórtices é calculada pela equação:

$$f_s = \frac{St \cdot v}{D} \quad (2.2)$$

onde v é velocidade do vento, D o diâmetro da estrutura e St é o número de Strouhal, o qual tipicamente vale 0.2 para estruturas cilíndricas, conforme Figura 2.2, que apresenta o valor de St em função do número de Reynolds [Harris, 1977].

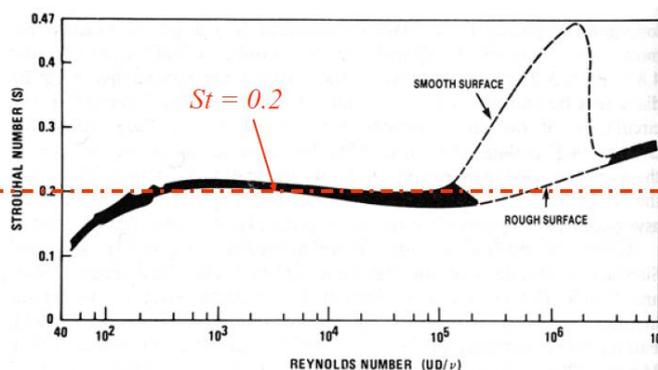


Figura 2.2 – Número de Strouhal em função do número de Reynolds.

Segundo Harris, 1977, quando duas estruturas estão próximas a uma distância menor do que dez vezes o diâmetro, os vórtices formados na primeira estrutura irão excitar a estrutura à frente, induzindo oscilações frequentemente severas quando esta estiver apoiada sobre uma base não muito rígida e apresentar pouco amortecimento estrutural. Ainda o mesmo autor ressalta que o fenômeno pode ser dividido em três faixas de Reynolds: subcrítica para $Re < 3 \times 10^5$, supercrítica para $3 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$ e transcítica se $Re > 3 \times 10^6$. A faixa supercrítica é a que apresenta maior complexidade no mecanismo de formação e propagação de vórtices, uma vez que eles se originam de forma desorganizada.

2.2 Análise numérica de escoamentos turbulentos

Fluidos em escoamentos turbulentos são bastantes comuns e exigem formulações mais complexas para serem resolvidos do que para escoamentos laminares. A análise numérica de escoamentos turbulentos em aplicações industriais é usualmente realizada através da solução das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes). Nessa metodologia o sistema de equações obtido contém mais incógnitas do que equações, necessitando de modelos de turbulência para o fechamento das equações. Dessa forma, foram desenvolvidos vários modelos de turbulência a fim de abranger os diversos fenômenos resultantes desse regime de escoamento [Cable, 2009].

Modelo k- ϵ

Proposto por Harlow e Nakayama em 1972 e implementado por Jones e Launder no mesmo ano, é o modelo mais popular de duas equações. Sua formulação consiste em derivar a equação para a taxa de dissipação da energia cinética ϵ para o fechamento das equações governantes, onde k é a energia cinética por unidade de massa. O modelo não é adequado para regiões próximas à parede e tem performance pobre para escoamentos com forte separação, grandes curvaturas e gradientes de pressão [Freitas Filho, 2012].

Modelo k- ϵ RNG

Variação do modelo k- ϵ foi desenvolvida por Yakhot e Orsag [1986] e utiliza renormalização para modificar a equação da taxa de dissipação da energia cinética, possibilitando assim prever melhor o comportamento do escoamento. Possui as qualidades do modelo tradicional e adicionalmente traz bons resultados para regiões próximas à parede, escoamentos com grande separação, recirculação e baixo Reynolds [Freitas Filho, 2012].

Modelo Realizable k- ϵ

Este modelo satisfaz certas variáveis matemáticas que os dois modelos anteriores não satisfazem, apresentando mais rápida convergência e maior exatidão em escoamentos que possuem grande gradiente adverso de pressão, separação e recirculação [Cable, 2009].

Modelo k- ω

Modelo de turbulência que vem ganhando bastante popularidade por não apresentar termos indefinidos nas paredes, cobrindo assim uma das grandes limitações do modelo k- ϵ . [Wilcox, 1998]. O parâmetro adicional ω é conhecido como dissipação por unidade de energia cinética turbulenta, que possui equacionamento mais robusto, possibilitando a integração até a parede. O modelo k- ω é mais preciso em regiões próximas à parede, porém apresenta falhas em escoamentos com separação [Stangroom, 2004].

Modelo k- ω SST

Talvez o modelo mais utilizado industrialmente, possui funções de mistura que combinam a eficiência do modelo k- ω para regiões próximas à parede com a do modelo k- ϵ para as mais afastadas. Dessa forma, esse modelo cobre uma ampla variedade de casos envolvendo escoamentos turbulentos [Menter *et al.*, 2003].

2.3 Função de Weibull para a distribuição dos ventos

Devido a sua simplicidade e boa conformidade com dados experimentais, a função de Weibull é amplamente utilizada para descrever a probabilidade de ocorrência de vento de diferentes velocidades para uma dada região, conforme equação [Ulgen e Hepbasli, 2002]:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.3)$$

onde $f(v)$ é a densidade de probabilidade de ocorrência de vento com velocidade v , k é o valor adimensional para o fator de forma de Weibull e c é o valor de escala de Weibull, dado na mesma unidade da velocidade do vento.

Perfil do vento em lei da potência de velocidade

A lei da potência de velocidade é utilizada para descrever a variação da velocidade do vento com a altura dentro da camada limite atmosférica. O perfil em lei de potência pode ser expresso pela equação:

$$\frac{v}{v(z_{ref})} = \left(\frac{z - z_d}{z_{ref}}\right)^p \quad (2.4)$$

onde p é um coeficiente que caracteriza o tipo de terreno, podendo variar de 0.11, para superfícies lisas, até 0.34 para cidades densas de prédios altos [Freitas Filho, 2012], v é a velocidade do vento na altura z , $v(z_{ref})$ é a velocidade do vento conhecida em uma altura de referência z_{ref} , e z_d é o deslocamento do plano-zero. De acordo com Loredou-Souza *et al.*, 2004, esta lei é amplamente utilizada, porém apresenta alguns problemas em sua aplicação. Além de não representar fielmente o perfil de velocidades para a região próxima ao solo, ela não identifica o topo da camada limite, pois é válida para qualquer valor de $(z - z_d)$, aumentando indefinidamente.

3. MODELOS NUMÉRICOS

A estrutura da chaminé é de 2.75m de diâmetro e 34.4m de altura. É composta por uma parede de aço com duas espessuras diferentes: 9.5mm para a metade inferior e 6.3mm para a metade superior. O módulo de elasticidade do aço comercial é de 200GPa. Apenas a massa do concreto refratário foi considerada, modificando-se a densidade do aço de modo a compensar o seu valor. A densidade para a metade inferior é de 19,853.46kg/m³ e 25,972.66kg/m³ para a metade superior. O coeficiente de amortecimento global adotado é de 0.03, conforme Karaca *et al.*, 2012. A base da estrutura é composta por vigas de aço, sendo 8 horizontais de comprimento 6.046m e seção H de 250x250x14x9mm, 4 verticais de 6.15m de mesma seção H, e 8 oblíquas de seção tubular de diâmetro 219.1mm e espessura 8.18mm (ver Figura 3.1). As análises estruturais foram realizadas através do software comercial ANSYS APDL 5.3.

3.1 Chaminé original

O modelo da chaminé original é composto por 15023 elementos de casca SHELL63 de 8 nós e 192 elementos de viga BEAM4 de 2 nós na base de aço, conforme Figura 3.1. A parte inferior da base é engastada, pois a estrutura do forno abaixo dela possui rigidez muito superior à rigidez da base de vigas.

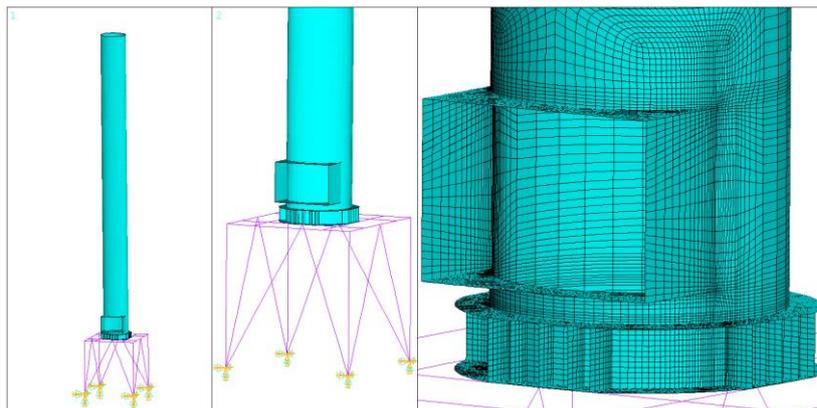


Figura 3.1 – Modelo de elementos finitos com elementos de casca e viga.

3.2 Chaminé com base reforçada

Quatro vigas oblíquas de seção tubular, idênticas às oblíquas já presentes, foram adicionadas à base da estrutura, de modo a aumentar a sua rigidez. O modelo de casca é mantido inalterado, totalizando 15023 elementos de casca e 236 de viga. O reforço da base pode ser conferido na Figura 3.2:

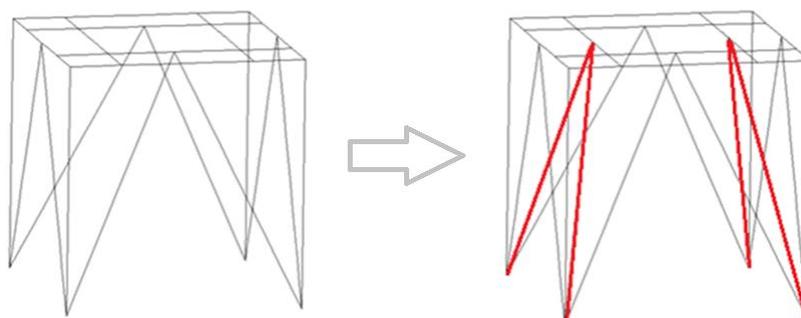


Figura 3.2 – Adição de vigas para o reforço da base.

3.3 Chaminé com base e abertura reforçadas

Com o objetivo de prevenir a propagação das trincas criadas, um reforço estrutural foi adicionado à região da abertura, conforme Figura 3.3. A estrutura da base se mantém com as vigas adicionais, totalizando 17247 elementos de casca e 236 elementos de viga.

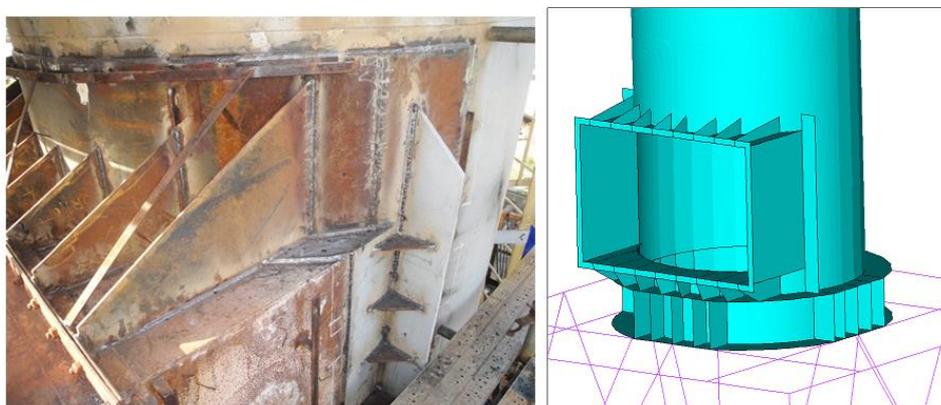


Figura 3.3 – Reforço adicionado na região da abertura.

3.4 Dinâmica de Fluidos Computacional - CFD

A fim de confirmar os coeficientes fornecidos na literatura e obter uma melhor representação do fenômeno estudado, modelos em duas e três dimensões foram analisados por CFD através do software comercial ANSYS FLUENT 15. Em ambos os modelos as chaminés são rígidas, desconsiderando assim os seus deslocamentos por serem pequenos. O modelo de turbulência utilizado é o k- ω SST, o qual é bastante utilizado industrialmente por ser eficiente tanto em regiões próximas à parede quanto distantes.

Inicialmente procurou-se avaliar a necessidade de um modelo 3D da estrutura para estudar a criação e propagação dos vórtices. Para tal, um domínio cilíndrico de raio 82.5m e 54.4m de altura foi utilizado, sendo discretizado em 635,044 volumes finitos hexaédricos, conforme Figura 3.4. As condições de contorno são de não escorregamento nas paredes da chaminé e no solo, simetria nas paredes laterais e no topo, pressão nula à jusante e velocidade de entrada de 5.25m/s na referência de 50m de altura à montante dada pela equação 2.4. A altura de rugosidade é de 1mm referente ao aço corroído. [The Engineering Toolbox, 2015]

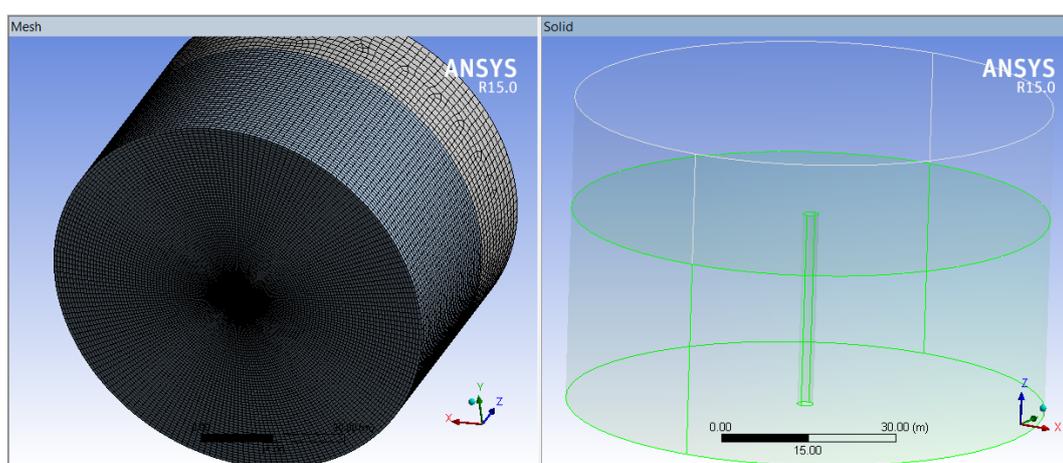


Figura 3.4 – Representação de malha e modelo para simulação em 3D.

Devido ao elevado custo computacional da simulação em 3D, um modelo em 2D foi utilizado para a obtenção de resultados com convergência independente de malha. Possuindo 71m de comprimento e 27.5m de largura, a malha final totaliza 358,066 elementos quadrilaterais, como pode ser visualizado na Figura 3.5. A distância entre o centro das chaminés é de 16m ($L/D = 5.8$). As condições de contorno são as mesmas, com exceção da entrada, na qual possui velocidade constante em todo o seu comprimento, visto que não há variação de altura no plano.

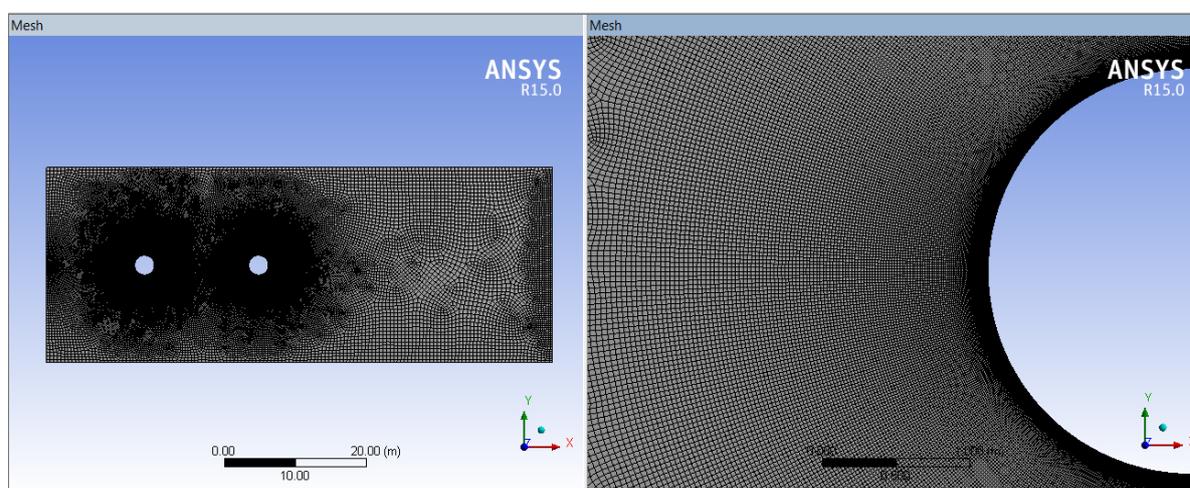


Figura 3.5 – Representação de malha em modelo 2D. Em detalhe a região próxima à chaminé.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise modal

De modo a validar os resultados obtidos nas simulações para as frequências naturais, valores analíticos referentes a vigas engastadas foram calculados, segundo equação [Harris, 1977]:

$$f_n = \frac{\lambda_i}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{ML^3}} \quad (4.1)$$

onde f_n é frequência natural de viga, E é o módulo de elasticidade, I é o momento de inércia de área da seção, M a massa da estrutura e L o comprimento.

Paralelamente foi realizado um estudo da influência da rigidez do refratário sobre a rigidez total da estrutura. O valor do módulo de elasticidade equivalente E_{eq} é calculado pela equação [Maher, A.; Hamada, A.A., 2001]:

$$E_{eq} = \frac{E_{aço} I_{aço} + E_{refr} I_{refr}}{I_{total}} \quad (4.2)$$

onde $E_{aço}$ e E_{refr} são os módulos de elasticidade do aço e do refratário, respectivamente, $I_{aço}$ é o momento de inércia de área da seção referente ao aço, I_{refr} é o momento de inércia de área da seção referente ao refratário, e I_{total} é o momento de inércia de área da seção total. O módulo de elasticidade do refratário em questão é de 30GPa.

Como pode ser conferido na Tabela 4.1, a influência da rigidez do refratário é mínima quando considerada a estrutura da base, sendo assim desprezado nas simulações posteriores e considerado apenas a sua massa. Os valores analíticos foram calculados através da equação 4.1. Embora nas simulações tenham sido utilizadas espessuras diferentes para cada metade da altura, os valores obtidos para as frequências se mantiveram muito próximos dos analíticos.

Tabela 4.1 - Influência da rigidez do refratário na frequência natural da estrutura.

	Analítico - Engastado	Simulado - Engastado	Simulado – Base
El aço	1.51 Hz	1.55 Hz	1.09 Hz
El equivalente	1.94 Hz	2.09 Hz	1.02 Hz

As análises modais para a chaminé com a base reforçada e com ambas a base e a região da abertura reforçadas foram em seguida realizadas. Os resultados para comparação da evolução das frequências estão apresentados na Tabela 4.2, enquanto que a Figura 4.1 mostra o deslocamento associado ao modo de vibração tipo viga na direção N-S.

Tabela 4.2 – Modos de vibração e frequências naturais das configurações da chaminé.

Modo	Original sem reforço		Com reforço estrutural da base		Com reforço da base e da abertura	
	Sentido	f_n (Hz)	Sentido	f_n (Hz)	Sentido	f_n (Hz)
1	N-S	0.382	L-O	0.679	L-O	0.725
2	L-O	0.630	N-S	0.859	N-S	0.910

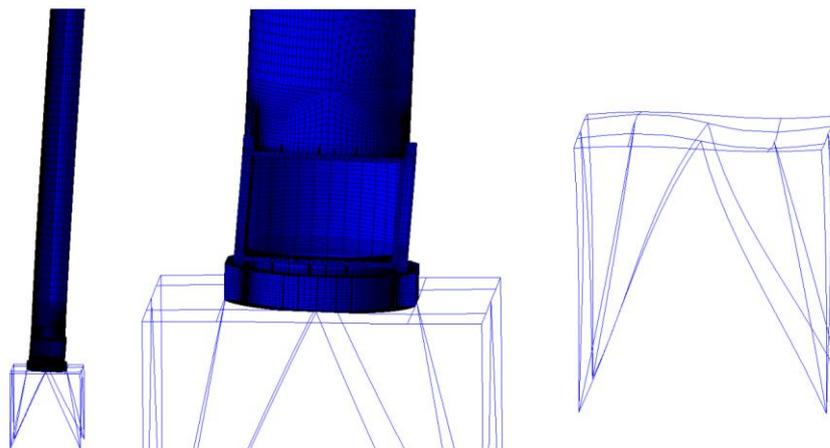


Figura 4.1 – Primeiro modo de vibração, na direção N-S. No detalhe, deformação da base.

A avaliação dos resultados evidencia o efetivo aumento de frequência natural associada ao modo de vibração na direção N-S, que passou de 0.382 Hz na configuração original para 0.910 Hz na configuração final reforçada.

4.2 Análise em CFD

A simulação realizada utilizando três dimensões mostrou-se bastante exigente computacionalmente, problema agravado pelo valor do Reynolds estar compreendido pela faixa supercrítica do escoamento, inviabilizando a convergência independente de malha. No entanto, o perfil de formação de vórtices para planos em diferentes alturas manteve-se o mesmo para diferentes malhas e mostrou-se predominantemente influenciado pela velocidade do vento e pelo descolamento nas extremidades da chaminé. Regido pela equação 2.4, o perfil do vento dentro da camada limite atmosférica possui leve variação ao longo da altura. Dessa forma, como pode ser conferido na Figura 4.2, a formação de vórtices varia muito pouco com a altura da chaminé. Para o caso apresentado, utilizou-se uma velocidade de 5.25m/s (calculada pela equação 2.2 e referente à primeira frequência natural da chaminé original) para a referência de 50m de altura e o expoente p de 0.143 para perfil de terreno com densidade moderada de obstáculos [Kubic *et al.*, 2011].

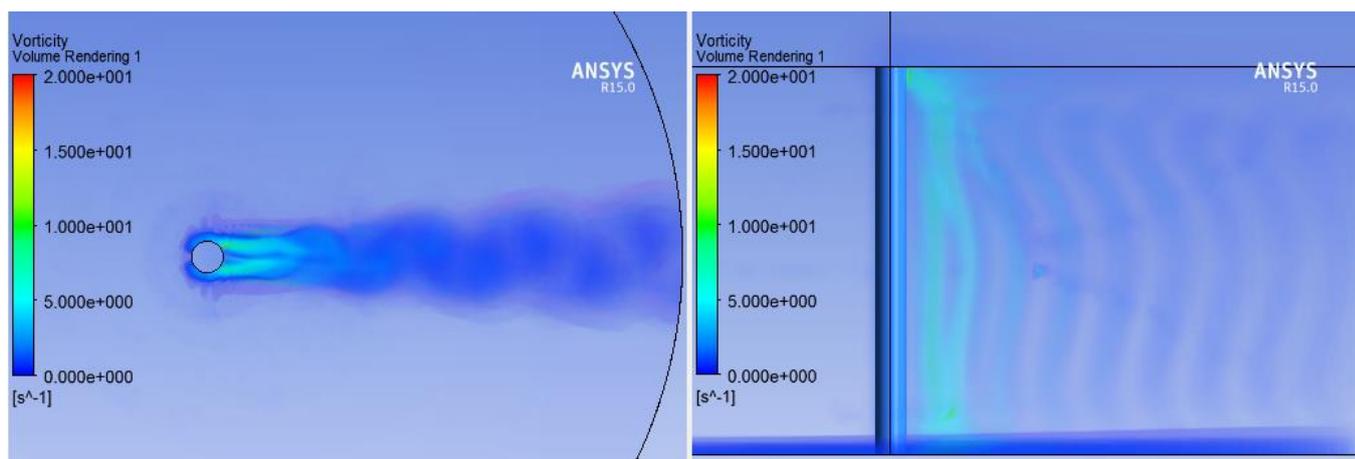


Figura 4.2 – Perfil de propagação de vórtices para o modelo em 3D da chaminé.

Devido à impossibilidade de obter a convergência da solução das equações de turbulência para o modelo em 3D que fosse independente de malha, um modelo em 2D foi utilizado, possibilitando assim realizar a leitura dos resultados e comparar com os valores dos coeficientes fornecidos na literatura. A disposição dos vórtices pode ser observada na Figura 4.3, onde pode ser obtido o ângulo de espalhamento dos vórtices de $\pm 1.5^\circ$ para ser utilizado

posteriormente na análise de vida em fadiga da estrutura. Esse ângulo é obtido traçando-se uma reta entre o centro do vórtice imediatamente antes de colidir com a chaminé à jusante e o centro da chaminé onde os vórtices foram originados, sendo medido a partir da direção colinear das chaminés. É observado também que ele diminui com o aumento da distância entre as chaminés, visto que os vórtices tendem a se propagar na direção paralela à direção do vento.

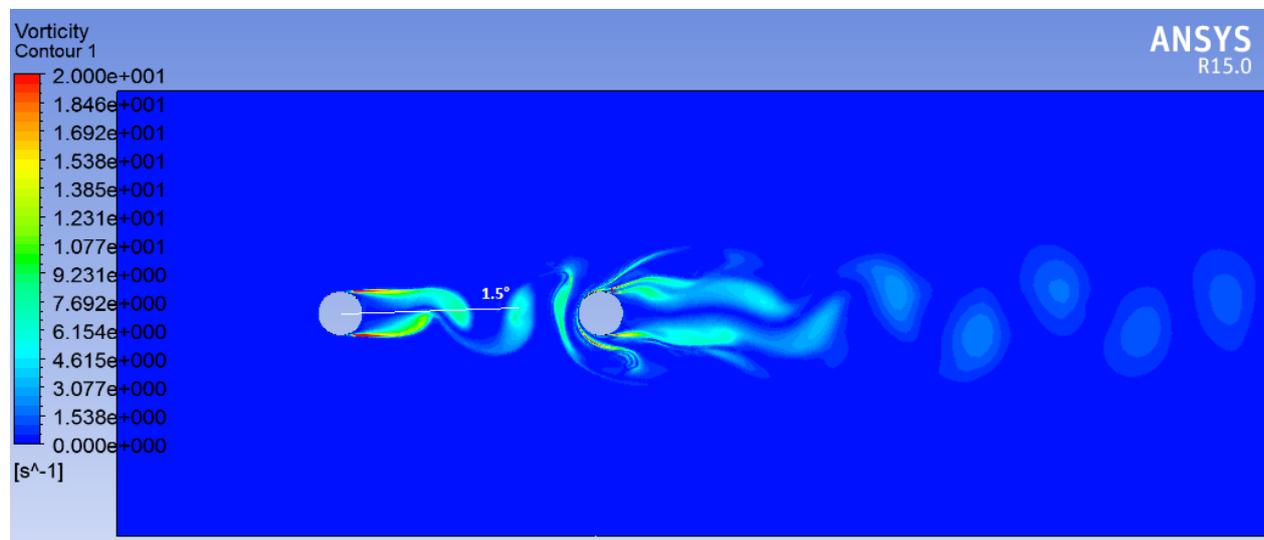


Figura 4.3 – Perfil de propagação de vórtices para o modelo em 2D da chaminé.

A partir da equação 2.2, utilizando o número de Strouhal de 0.20, para uma velocidade de 5.25m/s o valor da frequência de propagação dos vórtices é de 0.382Hz, valor consideravelmente próximo dos 0.480Hz obtidos pela simulação, na qual o Strouhal obtido é de 0.25. Harris, 1977, fornece o valor rms do coeficiente de sustentação de 0.140 para a região supercrítica, enquanto o obtido pelo modelo numérico é de 0.094. Ainda na mesma região, o valor do número de Strouhal apresenta grande variação, assumindo valores de 0.2 para superfícies rugosas até 0.47 para superfícies lisas (Figura 2.2), portanto o valor obtido na simulação está dentro da faixa fornecida na literatura.

A pressão estática que age sobre a chaminé atingida pelos vórtices apresentou valor de mesma ordem de grandeza, porém 47% inferior ao utilizado na análise harmônica para obter um deslocamento de 80cm pico-a-pico. Mantendo esse mesmo parâmetro de avaliação, uma última análise foi realizada aumentando a velocidade do vento em 25%, onde foi observado um aumento de 23.7Pa para 40Pa no valor da pressão estática. Calculando-se através da equação 4.3, o valor da pressão para uma velocidade 25% maior deve ser de 37Pa, verificando assim a possibilidade de sua utilização.

Observa-se também que nessa segunda análise o número de Strouhal se manteve em 0.25, resultado esperado visto que o número de Reynolds se manteve na faixa supercrítica. Um resumo dos resultados obtidos nas simulações comparados aos fornecidos pela literatura pode ser conferido na Tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Comparativo entre valores obtidos por CFD e dados da literatura.

	St	f_s (Hz)	C_L (rms)	p_e (Pa)
Literatura	0.20	0.364	0.140	44.8*
Simulado	0.25	0.480	0.094	23.7

*valor inferido na simulação harmônica para obtenção de 80cm pico-a-pico de deslocamento.

4.3 Análise harmônica

O carregamento dinâmico aplicado na análise harmônica deve ser a força de sustentação F_L sobre um dos lados da chaminé, correspondendo à pressão do vento. Segundo

Harris, 1977, o valor apresentado pela equação 2.1 não representa integralmente o fenômeno em função da sua complexidade. Para contornar esse problema, inicialmente o valor de força aplicada, em forma de pressão, foi ajustado de forma a obter o resultado de deslocamento pico-a-pico igual a 80cm, amplitude observada durante a oscilação da estrutura original. O coeficiente de amortecimento global adotado para o modelo é 0.03, típico de chaminés industriais de aço com refratário interno, conforme Karaka *et al.*, 2012.

Foi assumido que esta oscilação observada ocorreu na condição de ressonância, assim o valor da velocidade do vento correspondente à frequência dos vórtices pode ser calculada através da equação 2.2. Dessa forma, o valor da frequência dos vórtices para situação de ressonância com a configuração original da chaminé deve valer 0.382Hz, representando uma velocidade do vento de 5.25m/s.

A análise harmônica foi executada para a chaminé tanto na condição original como nas condições reforçadas, para as diversas faixas de velocidade do vento. As forças dinâmicas aplicadas foram estimadas proporcionalmente ao quadrado da velocidade do vento, conforme relação apresentada na equação abaixo, onde a pressão p é calculada para uma velocidade do vento v , onde v_0 e p_0 são referentes à configuração original.

$$p = p_0 \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \quad (4.3)$$

O valor obtido para a pressão do vento p_0 que equivale a 80cm de deslocamento pico-a-pico na condição original é de $4.57E-6 \text{kgf/mm}^2$ (44.83Pa). Os resultados para as pressões do vento para as configurações com base reforçada e base e abertura reforçadas são, respectivamente, 226.81Pa e 254.57Pa. A Figura 4.4 apresenta a evolução do deslocamento do topo da chaminé em função da frequência quando se aproxima da frequência natural da estrutura. A região de concentração de tensão pode ser vista na Figura 4.5.

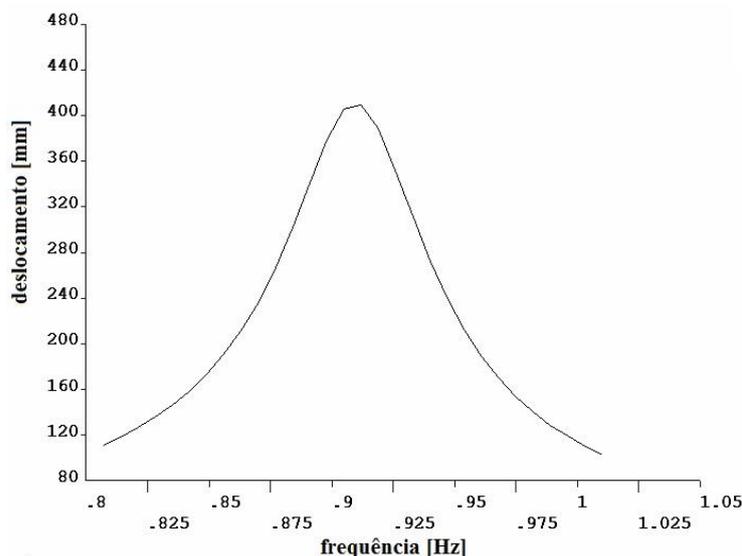


Figura 4.4 – Deslocamento 0-pico do topo da chaminé em condição de ressonância, em [mm]. Valores referentes ao caso com reforço na abertura.

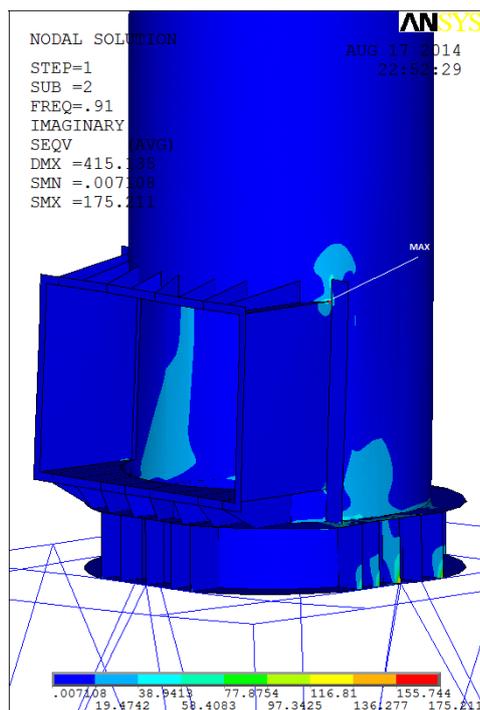


Figura 4.5 – Distribuição de tensões na ressonância (von Mises), em [kgf/mm²]. Valores referentes ao caso com reforço na abertura.

Como a configuração original da chaminé não possuía abertura, essa região concentradora de tensões é eliminada, por esse motivo quando feita a troca da estrutura em 2004 por fim de vida útil não foram constatadas trincas de fadiga, embora tenha sido observada ressonância.

5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VENTOS E VIDA EM FADIGA

De modo a analisar as probabilidades de ocorrência de ventos para avaliação de fadiga, um estudo das velocidades e direções predominantes dos ventos foi realizado. Com auxílio do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul [Camargo, 2002], obtém-se a velocidade média do vento para a região de Canoas-RS e o fator de forma de Weibull. A partir desses dados é possível aproximar o comportamento do vento através da distribuição de Weibull, como pode ser visto na Figura 5.1. Energy Institute, 2008, recomenda manter a velocidade que equivale à frequência natural da estrutura acima de pelo menos 20% da faixa de alta probabilidade de ocorrência na distribuição de Weibull, evitando assim que ocorra amplificação dinâmica.

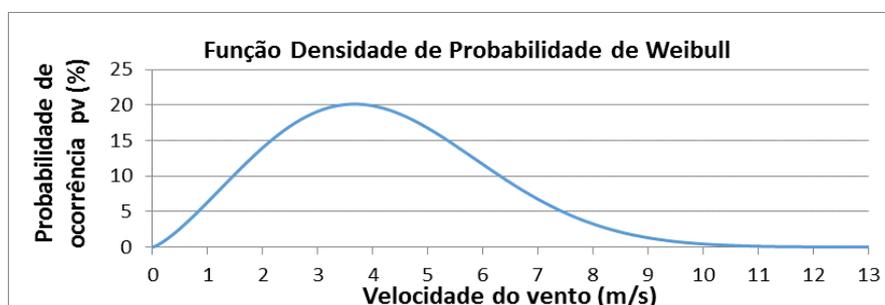


Figura 5.1 – Função densidade de probabilidade de vento na região de Canoas-RS.

Para a análise da direção predominante do vento se utilizou o banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET para o período de 01/2000 a 01/2014, criando-se então o gráfico da probabilidade de ocorrência por direção do vento p_d , onde é indicado o valor de 18.14% para ventos leste, conforme Figura 5.2:

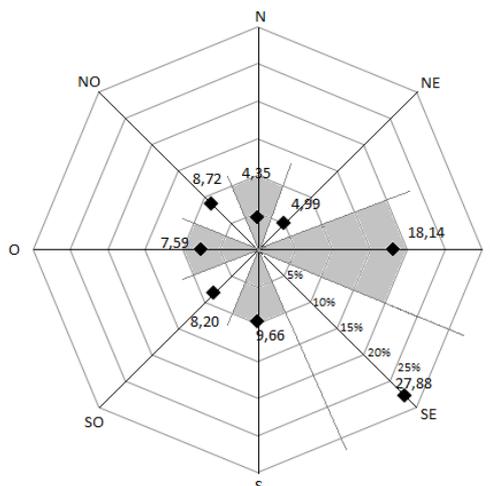


Figura 5.2 – Probabilidade de ocorrência de vento predominante por direção em Canoas-RS.

O valor da probabilidade p_r de ocorrência de vento a uma dada velocidade e direção pode ser calculada simplesmente multiplicando-se os valores de p_d e p_v , conforme equação:

$$p_r = p_d \cdot p_v \quad (5.1)$$

A Tabela 5.1 apresenta o valor da probabilidade de ocorrência combinada de velocidade e direção do vento que causam ressonância na chaminé à jusante. A faixa de velocidade adotada foi de $v \pm 0.5\text{m/s}$, enquanto que a faixa de direção foi adotada como $L \pm 1.5^\circ$, conforme observado no espalhamentos dos vórtices pela análise em CFD. Como a faixa de ventos leste corresponde a $L \pm 22.5^\circ$ (45° por direção, visto que as probabilidades estão distribuídas em 8 direções do vento), a probabilidade p_d é obtida multiplicando-se a probabilidade de vento leste por $1.5^\circ/22.5^\circ$. Os valores da tabela indicam a baixa possibilidade de ressonância da chaminé na condição reforçada.

Tabela 5.1 – Probabilidade de ocorrência de ressonância para cada configuração.

Configuração	v (m/s)	p_v (%)	p_d (%)	p_r (%)
Original	5.25	15.56	1.21	0.18822
Com reforço da base	11.81	0.04	1.21	0.00047
Com reforço da base e da abertura	12.51	0.01	1.21	0.00016

A fim de calcular a vida útil das chaminés, realizou-se a avaliação de fadiga utilizando a regra da fração linear de dano, segundo equação:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} < 1 \quad (5.2)$$

onde:

n_i – número total de oscilações correspondentes à faixa de velocidade do vento i ;

N_i – número admissível de ciclos correspondentes à tensão σ_i causada pela faixa de velocidade do vento i . Obtida da curva 5-110.1 do código ASME VIII div. 2.

Para estimativa de n_i é necessário obter a probabilidade de ocorrência (p_{ri}) do vento i , considerando sua direção e velocidade, conforme equação:

$$n_i = p_{ri} \cdot f_{si} \cdot t \quad (5.3)$$

f_{si} – frequência associada à faixa de velocidade i , em Hz;

p_{ri} – probabilidade acumulada de ocorrência de vento de velocidade i e direção L ;

t – vida útil, em segundos;

O valor de σ_i foi calculado através dos valores de tensão obtidos na análise harmônica, correspondentes ao vento i , multiplicados por um fator de concentração de tensão. As tensões obtidas são de von Mises, conforme solicitado pelo código ASME VIII div. 2.

O fator de concentração de tensão k foi considerado igual a 2 na região da solda, valor obtido através da comparação entre modelo de elementos finitos de casca e modelo sólido com representação da geometria da solda.

O intervalo total de velocidade do vento considerado relevante em termos de probabilidade de ocorrência foi de 0.5m/s a 10.5m/s, conforme avaliação da Figura 5.1. As faixas de velocidade consideradas na análise de fadiga foram discretizadas em intervalos de 1m/s. Os dados resultantes são apresentados na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 – Sumário de cálculo de fadiga.

Chaminé sem reforço na abertura					Chaminé com reforço na abertura				
v_i (m/s)	f_{si} (Hz)	$\sigma_i \cdot k$ (MPa)	p_{ri} (%)	N_i	v_i (m/s)	f_{si} (Hz)	$\sigma_i \cdot k$ (MPa)	p_{ri} (%)	N_i
1.00	0.073	2.25	0.0774	infinito	1.00	0.073	0.81	0.0774	infinito
2.00	0.145	9.20	0.1681	infinito	2.00	0.145	3.27	0.1681	infinito
3.00	0.218	21.42	0.2290	infinito	3.00	0.218	7.62	0.2290	infinito
4.00	0.291	40.06	0.2386	infinito	4.00	0.291	14.26	0.2386	infinito
5.00	0.364	67.12	0.2015	infinito	5.00	0.364	23.91	0.2015	infinito
6.00	0.436	106.00	0.1409	2.77E+05	6.00	0.436	37.21	0.1409	infinito
7.00	0.509	163.47	0.0823	4.59E+04	7.00	0.509	56.18	0.0823	infinito
8.00	0.582	253.21	0.0403	1.12E+04	8.00	0.582	84.22	0.0403	1.55E+06
9.00	0.655	408.42	0.0165	2.56E+03	9.00	0.655	128.38	0.0165	1.30E+05
10.00	0.727	718.25	0.0057	5.12E+02	10.00	0.727	207.65	0.0057	2.19E+04
Vida Útil (anos) = $\sum N_i / f_{si} \cdot p_{ri}$				0.2	Vida Útil (anos) = $\sum N_i / f_{si} \cdot p_{ri}$				11.1

6. CONCLUSÕES

Através das simulações em CFD se buscou prever o comportamento do fenômeno, obtendo valores de coeficiente de sustentação, número de Strouhal, frequência de formação e ângulo de espalhamento dos vórtices, pressão atuante na chaminé e a influência do uso de um modelo 3D em relação ao 2D. Devido à exigência de uma malha bastante refinada se tornou inviável a obtenção de convergência independente de malha para o caso 3D, porém foi possível observar com bastante clareza que o perfil de propagação dos vórtices não varia muito ao longo da altura da chaminé.

A partir da simplificação do modelo para análise em duas dimensões, conseguiu-se obter convergência independente de malha, dessa forma sendo possível fazer uma leitura confiável dos parâmetros a serem avaliados. O valor do número de Strouhal fornecido na literatura, para superfícies rugosas e na região supercrítica, é de 0.20, bastante próximo dos 0.25 obtidos no modelo 2D utilizando a rugosidade de tubos de aço com corrosão moderada. No trabalho o valor de 0.20 foi utilizado, pois a superfície da chaminé apresenta rugosidades adicionais como rebites, parafusos, incrustações, entre outras, sendo difícil fazer uma estimativa ideal do seu valor. Vale ressaltar que essa diferença entre os números de Strouhal que fez com que a frequência de formação de vórtices obtida na análise numérica resultasse superior à calculada para um vento de 5.25m/s.

O coeficiente de sustentação de 0.094 obtido na simulação resultou um pouco abaixo do teórico, que vale 0.140 para escoamentos que se encontram na faixa supercrítica de

Reynolds. Da mesma forma, a pressão de sustentação atuante nas laterais da chaminé à jusante apresentou valor 47% inferior ao utilizado na análise harmônica que provocasse um deslocamento de 80cm pico-a-pico na ressonância. Essa diferença de valores já era esperada e citada na literatura por Harris, 1977, em função da complexidade do fenômeno, que engloba diversos mecanismos que podem interferir no valor do carregamento. Por outro lado, provou-se que um aumento na velocidade do vento tem relação quadrática com a pressão de sustentação, conforme proposto pela equação 4.3.

A partir das análises modais é possível observar a grande influência da adição das vigas de reforço na base da chaminé sobre a frequência natural da estrutura como um todo, aumentando de 0.382 para 0.859, e finalmente para 0.910 com a adição do reforço na região da abertura, onde foram constatadas as trincas. Felizmente a chaminé em sua configuração original não apresentava essa região, eliminando assim pontos de concentração de tensão que vieram a criar trincas após a troca das chaminés em 2004. Ainda que após o reforço da base não tenha sido observada situação de ressonância da estrutura, a mesma apresentou trincas por vibração de baixa amplitude.

Assim como a frequência de oscilação fornecida pela análise modal se mostrou coerente com a observada em campo, a análise harmônica fornece com exatidão o ponto de tensões máximas na estrutura, localizados nos cantos superiores e inferiores da região da abertura e que coincidem com os locais dos pontos de falha observados.

A análise estatística dos ventos mostra a significativa diminuição na probabilidade de ocorrência de vento que cause ressonância da estrutura, visto que é uma combinação da probabilidade de ocorrência de vento leste com baixa tolerância angular, com a de predominância de vento com velocidade próxima à calculada pela equação 2.2. Para a configuração original, onde é necessário um vento de 5.25m/s para a ressonância, a probabilidade de sua ocorrência é de 0.188%. Após o reforço da base metálica, para a velocidade de 11.81m/s, a probabilidade da estrutura entrar em ressonância é de 0.00047%, enquanto que com a região da abertura reforçada é necessário vento com velocidade de 12.51m/s e a probabilidade passa a ser 0.00016%. Apesar de probabilidade praticamente zero de ressonância, o reforço da região da abertura ainda não seria capaz de impedir a falha da estrutura caso a situação ocorresse.

A avaliação de vida em fadiga mostrou a eficiência do reforço na região onde foram constatadas as trincas. O valor calculado de tempo de falha resultou significativamente menor que o observado na prática, indicando que os critérios adotados no estudo são conservadores, portanto a favor da segurança. O valor estimado de dois meses e meio pode não ser muito preciso, visto que os ventos apresentam características sazonais, representando assim diferentes probabilidades de ocorrência em diferentes fases do ano. Esse problema é eliminado para o segundo caso, onde onze anos representa um intervalo bastante coerente para assumir que as probabilidades são constantes ao longo dos anos.

Finalmente, a metodologia proposta no presente trabalho pode ser empregada para analisar situações semelhantes onde é presenciado o fenômeno de vibração induzida por vórtices criados pelo vento. Algumas recomendações podem ser inferidas a partir desse estudo, como:

- respeitar a distância mínima de $10xD$ entre chaminés, permitindo que os vórtices dissipem parte da sua energia antes de colidirem com a chaminé à jusante;
- obter a distribuição de Weibull das velocidades do vento para a região através do Atlas Eólico;
- obter a primeira frequência natural do conjunto chaminé mais estrutura de apoio;
- utilizar a equação 2.2 para prever a velocidade do vento na qual equivale à primeira frequência natural do conjunto e observar se o seu valor se encontra na faixa de alta probabilidade de ocorrência na distribuição de Weibull;

- aumentar a rigidez do conjunto de modo que ao calcular a velocidade do vento a partir da equação 2.2 o seu valor resulte acima de pelo menos 20% da faixa de alta probabilidade de ocorrência na distribuição de Weibull, evitando assim que ocorra amplificação dinâmica;

- reforçar pontos de concentração de tensão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASME, “**Boiler and Pressure Vessel Code**”, American Society of Mechanical Engineers, sec VIII, div II. New York, 2007.

ANSYS., “**UDF Manual V.12**”, [S.1], 2009.

Cable, M., “**An Evaluation of Turbulence Models for the Numerical Study of Forced and Natural Convective Flow in Atria**”, Thesis (Master, Mechanical and Materials Engineering). Queen's University, Canada, 2009.

Camargo, O. A. *et al.*, “**Atlas Eólico: Rio Grande do Sul**”, Secretaria de Energia Minas e Comunicações, Porto Alegre: SEMC, 70p, 2002.

Energy Institute, “**Guidelines for the avoidance of vibration induced fatigue in process pipework**”, 2nd ed., London, 2008.

Freitas Filho, D. G. R., “**Análise da Aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional para Avaliação do Potencial Eólico em Terrenos Complexos**”, 2012. 75p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre.

Harris, C. M., “**Shock and Vibration Handbook**”, 2^a ed. New York: McGraw-Hill, 1977.

INMET, “**Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**”, Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acessado em 15/03/2015.

Karaca, Z. *et al.*, “**Determination and comparison of wind loads for industrial reinforced concrete chimneys**”, The structural design of tall and special buildings, 21, 133-153, 2012.

Kubic, M. L. *et al.*, “**Using meteorological wind data to estimate turbine generation output: a sensitivity analysis**”, World Renewable Energy Congress. Sweden, 2011.

Loredo-Souza, A. *et al.*, “**Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento**”, Turbulência Vol 4, Rio de Janeiro: ABCM, 137-163, 2004.

Maher, A.; Hamada, A.A., “**On The Modelling of Tubes With Composite Coat**”, IMAC XIX - 19th International Modal Analysis Conference. Menoufia University. Al Minufya, 2001.

Menter, F. R. *et al.*, “**Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model**”, Turbulence, Heat and Mass Transfer 4, Begell House, Inc, 2003.

Stangroom, P., “**CFD Modeling of Wind Flow Over Terrain**”, Nottingham – UK, 2004.

The Engineering ToolBox, “**Roughness & Surface Coefficients of Ventilation Ducts**”, disponível em: <http://www.engineeringtoolbox.com/surface-roughness-ventilation-ducts-d_209.html>. Acessado em 10/04/2015.

Ulgen, K.; Hepbasli, A., “**Determination of Weibull parameters for wind energy analysis of Izmir, Turkey**”, International Journal of Energy Research, vol. 26, pp. 495–506, 2002.

Wilcox, D. C., “**Turbulence Modeling for CFD**”, DCW Industries, Anaheim, CA-USA, 1998.