

## ENSAIOS DE PLATAFORMAS *OFF-SHORE* EM TÚNEL DE VENTO - MEDIÇÕES DE CARREGAMENTOS DO VENTO, QUALIDADE DO ESCOAMENTO E ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DE PLUMAS NO *HELIDECK*

Paulo José Saiz Jabardo<sup>a</sup>, Gilder Nader<sup>a</sup>, Antonio Luiz Pacifico<sup>a</sup>, Marcos Tadeu Pereira<sup>a</sup>,  
Gabriel Borelli Martins<sup>a</sup>, Daniel Carvalho<sup>b</sup> e Paulo Roberto Pagot<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Laboratório de Aerodinâmica Industrial e Engenharia do Vento, Centro de Metrologia de Fluidos,  
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Rua Prof. Almeida Prado, 532,  
05508-901, São Paulo, SP, cmf@ipt.br, <http://www.ipt.br>

<sup>b</sup>CENPES/PDEP/TEO, PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A., pagot@petrobras.com.br,  
<http://www.petrobras.com.br>

**Palavras Chave:** Túnel de vento, Plataformas *off-shore*, Dispersão de contaminantes, Cargas de vento, Turbulência, Helideck.

### Resumo.

Uma única plataformas de petróleo *off-shore* pode demandar todos os tipos de ensaios que podem ser realizados em túnel de vento. Neste trabalho são mostrados três ensaios realizados: cargas do vento, onde são medidas as componentes X,Y e Z das Forças e Momentos; qualidade do escoamento em *helideck* onde são analisados os parâmetros de intensidade de turbulência vertical e horizontal, seguros para pouso e decolagem de helicópteros; e elevação de temperatura de plumas. Os ensaios de cargas de vento e qualidade do escoamento são independentes do número de Reynolds. Porém, os ensaios de elevação de temperatura de plumas exige vários critérios de similaridade do escoamento no modelo e no protótipo, e nesse caso, deve-se manter a igualdade do número de Froude, da flutuação, inércia e conservação da quantidade de movimento dos gases que deixam a chaminé a 450° e 250°.

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos mais completos ensaios realizados em túnel de vento é o de plataformas de petróleo *off-shore*. Pois, para uma única plataforma de petróleo são verificados o carregamento do vento nas estruturas emersas; as forças das correntezas marítimas; são analisados a qualidade do escoamento em *helideck*, tal que sirvam como parâmetro de projeto para que a turbulência e velocidades do ar estejam dentro de parâmetros estabelecidos (CAA, 2008; CAA, 2009); verificam-se também a elevação de temperatura de plumas sobre o *helideck*, visando segurança no pouso e decolagem de helicópteros. Além disso, modela-se a dispersão de contaminantes provenientes de instalações da plataforma, de modo a evitar a contaminação de ambientes fechados, ou melhorar a dispersão de gases ou voláteis em ambientes abertos em caso de vazamento acidental. Há ainda os ensaios dinâmicos realizados em plataformas visando solucionar ou evitar problemas de vibrações induzidas pelo escoamento em estruturas treliçadas, por exemplo.

Neste trabalho serão apresentados e discutidos 3 tipos de ensaios realizados em plataformas de petróleo *off-shore*, que são: carregamento estático do vento na estrutura emersa; qualidade do escoamento no *helideck*; e elevação de temperatura de plumas no *helideck*.

## 2 MODELAGEM

Para realização desses ensaios foi modelada uma plataforma de petróleo *off-shore* na escala 1:200, ver Figura 1. Na Tabela 1 são mostradas as dimensões do protótipo e do modelo ensaiado.



Figura 1: Plataforma de petróleo *off-shore* ensaiada

Tabela 1: Dimensões do protótipo e modelo

	comprimento total ( <i>length overall</i> )	boca ( <i>moulded breadth</i> )	pontal ( <i>moulded depth</i> )
Protótipo	330 m	57,20 m	31,65 m
Modelo	1650 mm	285 mm	155 mm

O vento foi simulado para a escala do modelo, de acordo com as características estabelecidas pela ESDU, 1995, que estabelece:

$$\frac{U(z)}{U_{10}} = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad (1)$$

onde  $U_{10}$  é a velocidade de referência a 10 m de altura acima da linha média d'água;  $U(z)$  é a velocidade à altura  $z$  acima da linha média d'água; e  $\alpha$  é o coeficiente potencial que representa

o vento na região específica, no caso, o mar. Como a altura de referência adotada na escala do protótipo foi de 10 m, nos ensaios do modelo reduzido em túnel de vento essa altura de referência foi de 50 mm.

A Figura 2 mostra os dados experimentais obtidos para os perfis de velocidades juntamente com a curva de ajuste (linhas contínua, em vermelho) correspondente à Equação (1) para os ensaios realizados. O coeficiente potencial obtido foi  $\alpha = 0,12$ , que está de acordo com a bibliografia para perfis de velocidade do vento sobre o mar [Dyrbye e Hansen (1999)].

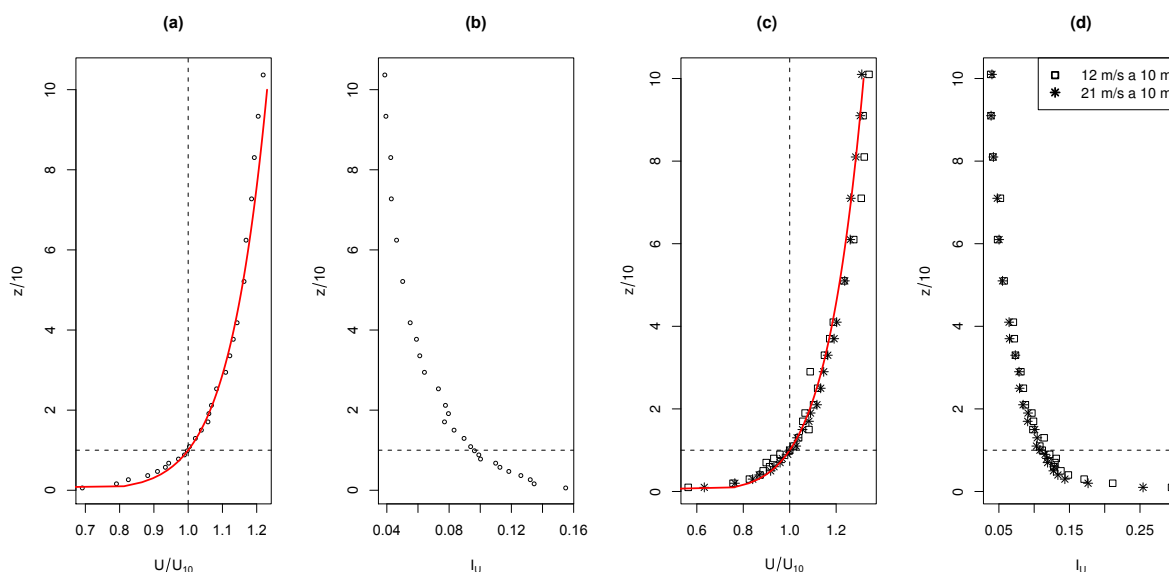


Figura 2: Perfis de velocidade, (a), e de intensidade de turbulência, (b), reproduzidos no TVCLA para representação das condições reais de 12 m/s e 21 m/s à 10 m de altura acima da linha média d'água nas condições do protótipo.

Nas Figuras 2(a) e (b) são mostradas as curva do perfil de velocidades e intensidade de turbulência, respectivamente, obtidas para realização os ensaios de carregamento do vento e de qualidade do escoamento no *helideck*. Esses ensaios de carregamento do vento são realizados considerando a independência do número de Reynolds (ver Seção 3), e os resultados obtidos nos ensaios são adimensionalizados.

Os ensaios de elevação de temperatura de pluma são dependentes do número de Froude (ver Seção 5), e foram realizados para velocidades equivalentes à escala do protótipo de 12 m/s e 21 m/s obtidas nas altura de referência de 10 m. Na escala do modelo, as velocidades dos ensaios, considerando a escala do modelo 1:200, a 50 mm de altura de referência, foram de 0,85 m/s e 1,48 m/s, pois a escala de velocidades é igual à raiz quadrada da escala geométrica (ver Seção 5). Como neste caso a escala geométrica vale 1:200, a escala de velocidades corresponde a aproximadamente 14,14. Nas Figuras 2(c) e (d) são mostradas as curva do perfil de velocidades e intensidade de turbulência, respectivamente, obtidas para realização os ensaios de elevação de temperatura de plumas.

### 3 COEFICIENTES DE FORÇA E MOMENTO

Os valores das forças e momentos devido à ação do vento foram determinados fixando o modelo reduzido da plataforma de petróleo *off-shore* em um balança extensiométrica com seis graus de liberdade (três forças e três momentos). Esse conjunto, balança+modelo foi fixado na mesa giratória do túnel de vento e os ensaios foram realizados de  $0^\circ$  até  $360^\circ$  com passos de

10°. Os ensaios também foram realizados para 3 calados (*draft*) na escala do protótipo: 9,8 m, 15,2 m e 21 m.

A partir dos registros das séries temporais das forças e momentos, foram calculados os coeficientes de força da seguinte forma.

Coeficientes de força,  $CF_i$ :

$$CF_i = \frac{1}{q_{10} \cdot A} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T F_i(t) \cdot dt \quad (2)$$

onde onde  $T$  é o período de aquisição;  $t$  é o tempo;  $F_i$  é a força medida;  $i$  representa a direção no sistema de coordenadas (x, y ou z); e  $A$  é a área de referência.

Coeficientes de momento,  $CM_i$ :

$$CM_i = \frac{1}{q_{10} \cdot A \cdot L} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T M_i(t) \cdot dt \quad (3)$$

onde  $M$  é a momento medido; e  $L$  é um comprimento de referência (braço do momento);  $q_{10}$  é a pressão dinâmica de referência obtida a 50 mm de altura no túnel de vento (equivale a 10 m de altura na escala do protótipo). A pressão dinâmica foi determinada diretamente por meio de um tubo de Pitot instalado no interior do túnel de vento.

A área de referência adotada,  $A$ , foi de 0,4606 m<sup>2</sup> (para o modelo) que corresponde à área do retângulo que inscreve o convés do modelo. No caso específico, esse retângulo possuía comprimento de 1,645 m e largura de 0,28 m. O comprimento de referência adotado,  $L$ , foi a largura do retângulo adotado para a área de referência, ou seja, 0,28 m. Na escala do protótipo os valores da área e comprimento de referência passam a ser, portanto, de 18 424 m<sup>2</sup> e 56 m, respectivamente.

A Figura 3 mostra as convenções adotadas para as forças e momentos. As coordenadas da localização no plano xy da aplicação das forças e momentos (localização da balança) são mostradas na figura. Em relação ao eixo z, o ponto de aplicação das forças (não ilustrado na figura) localiza-se a 17 mm abaixo do nível do convés da embarcação (escala do modelo). As medidas mostradas referem-se ao modelo. Finalmente, cabe indicar que o ângulo de incidência do vento de 0° adotado é aquele alinhado ao eixo longitudinal do modelo e que atinge a sua proa.

A nomenclatura utilizada nos testes está descrita na Tabela 2 e os resultados são mostrados na seção 6.1.

Tabela 2: Nomenclatura das forças e momentos

avanço ( <i>surge</i> )	deriva ( <i>sway</i> )	arfagem ( <i>heave</i> )	balanço ( <i>roll</i> )	caturo ( <i>pitch</i> )	guinada ( <i>yaw</i> )
Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz

#### 4 VENTO NO HELIDECK

A *Civil Aviation Authority*, Inglaterra, define alguns parâmetros de segurança de pouso e decolagem em *helidecks* de plataformas de petróleo *off-shore*. Esses parâmetros são encontrados nos documentos [CAA, 2008](#) e [CAA, 2009](#). Os critérios adotados sobre o *helideck* são: turbulências vertical máxima  $SW = 1,75$  m/s e turbulência horizontal máxima  $SU = 5$  m/s.

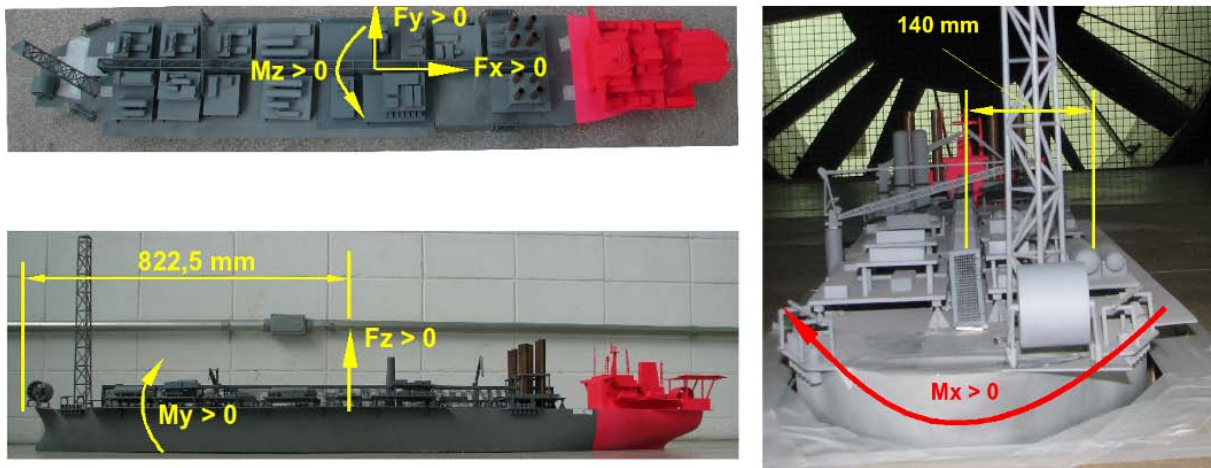


Figura 3: Localização do ponto de medição e convenções de sinais (escala do modelo).

Pelo fato de muitas plataformas de petróleo *off-shore* estarem instaladas no mar do norte, que é um local de ventos muito fortes, o CAA ainda definiu uma velocidade máxima horizontal do vento  $U_{10} = 25$  m/s para que helicópteros possam se locomover. No entanto, no Brasil a velocidade máxima do vento para que helicópteros possam se locomover é  $U_{10} = 15$  m/s. Assim, os resultados apresentados nesse artigo referem-se às velocidades horizontais de 25 m/s e 15 m/s, ambas obtidas a 10 m de altura acima do nível do mar.

As medições foram realizadas no túnel de vento utilizando a técnica de anemometria a fio-quente (CTA). Foi mapeada uma região sobre o *helideck*, que tinha um diâmetro de 24 m, e definindo o seu centro como a coordenada (0,0,0), ver Figura 4. Assim, a coordenada X (longitudinal) foi mapeada desde -10 m até +20 m; a coordenada Y (transversal) foi mapeada desde -35 m até +35 m e a coordenada Z (vertical) foi mapeada desde +5 m até +30 m. O passo do mapeamento foi de 5 m. Deve ser notado ainda na Figura 4 que a região sobre o *helideck* está envolvida com um cilindro. As análises das velocidades e turbulência do vento foram realizadas para essa região, entre as alturas 10 m e 20 m, como indicado no CAA, 2009.

Esses ensaios foram realizados para os ângulos de aproamento  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  e  $30^\circ$ .

## 5 ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DE PLUMAS

Para simular a elevação de temperatura de plumas, diferentes parâmetros de similaridade devem ser levados em conta no modelamento da dispersão de gases na atmosfera (Snyder, 1981, Isyumov e Tanaka, 1979, Poreh e Kacherginsky, 1981 e Snyder, 1972). Estes autores indicam cinco agrupamentos adimensionais que devem ser buscados para que os resultados obtidos em túnel de vento possam ser assumidos como representativos daqueles que se verificariam nas condições do protótipo. Estes cinco agrupamentos são: definição de escala geométrica; igualdade do número de Froude; igualdade das razões de densidade; consistência na escala das principais velocidades envolvidas; e igualdade do número de Reynolds para os gases que deixam a chaminé.

### A) Definição de escala geométrica, $\lambda_L$ :

$$\lambda_L = \frac{L_P}{L_M} \quad (4)$$

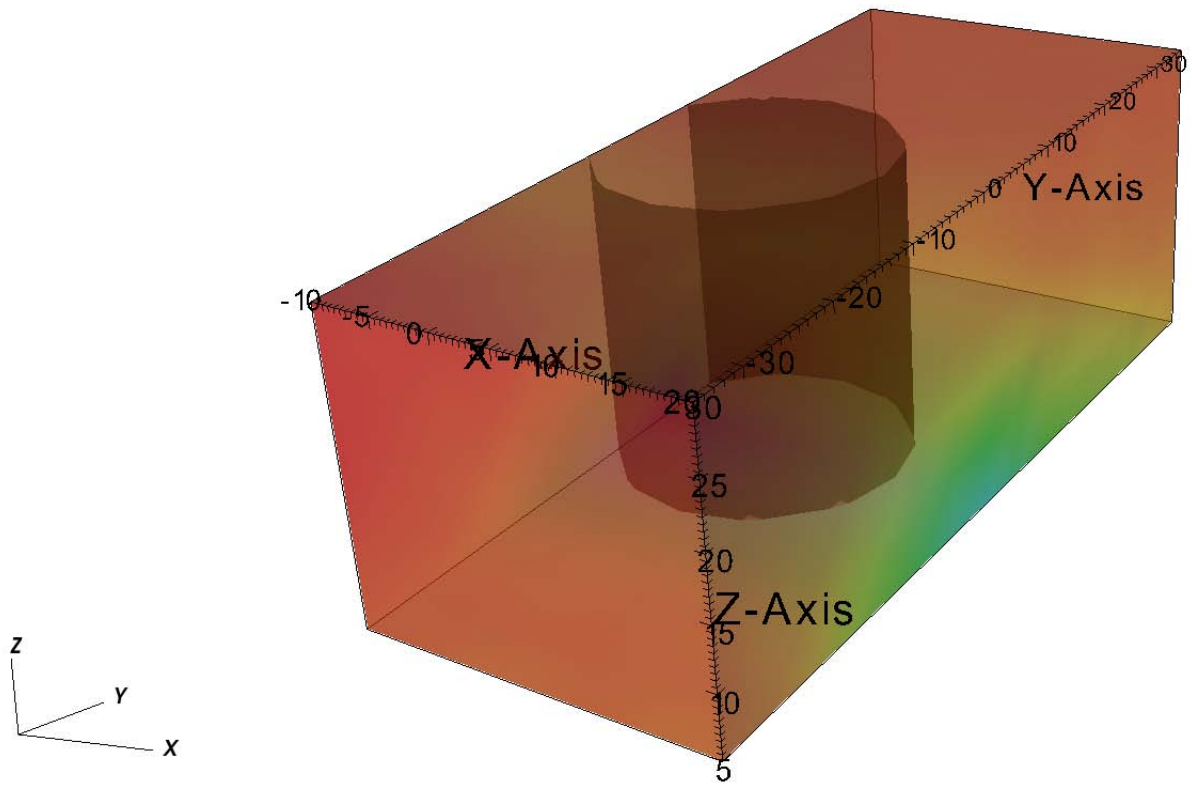


Figura 4: Coordenadas X, Y e Z das medições de velocidade do vento sobre o *helideck*, que tem seu entorno envolvido por um cilindro

onde  $L$  é uma dimensão qualquer (comprimento, largura, diâmetro, etc.); e os subscritos  $M$  e  $P$  designam modelo e protótipo, respectivamente.

**B) Igualdade do número de Froude:**

$$\left(\frac{D \cdot g}{U_a^2}\right)_M = \left(\frac{D \cdot g}{U_a^2}\right)_P \Rightarrow \frac{D_P}{D_M} = \frac{U_{a,P}^2}{U_{a,M}^2} \quad (5)$$

$$\lambda_L = \lambda_U^2 \quad (6)$$

onde  $D$  é o diâmetro interno da chaminé;  $g$  é o módulo da aceleração da gravidade local;  $U_a$  é a velocidade média do vento (ambiente); e  $\lambda_U$  é a escala de velocidade.

**C) Igualdade de razões de densidade:**

$$\left(\frac{\rho_g}{\rho_a}\right)_M = \left(\frac{\rho_g}{\rho_a}\right)_P \quad (7)$$

onde  $\rho$  é a densidade; e os subscritos  $g$  e  $a$  referem-se aos gases que deixam a chaminé e a do ar ambiente, respectivamente.

**D) Consistência na escala das principais velocidades envolvidas:**

$$\left(\frac{U_g}{U_a}\right)_M = \left(\frac{U_g}{U_a}\right)_P \quad (8)$$



onde  $U_g$  é a velocidade média dos gases à saída da chaminé.

**E) Igualdade do número de Reynolds para os gases que deixam a chaminé:**

$$\left( \frac{D \cdot U_g}{\nu_g} \right)_M = \left( \frac{D \cdot U_g}{\nu_g} \right)_P \quad (9)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática.

Dos cinco critérios acima expostos, apenas o último deles (item E) não foi possível manter durante os ensaios específicos deste trabalho. O motivo da diferença entre os números de Reynolds deve-se tanto à escala geométrica quanto à viscosidade dos gases. Com relação à primeira o produto  $D \cdot U_g$  para o protótipo é 2 828 vezes maior que o mesmo produto para o modelo. Com relação ao segundo, a viscosidade cinemática dos gases à saída da chaminé no protótipo é aproximadamente 4 vezes maior que a mesma propriedade nas condições do modelo. Combinadas as diferenças chega-se ao resultado de que, para o modelo em questão e as condições específicas de escoamento tanto no protótipo como no modelo, este número de Reynolds para o protótipo é aproximadamente 700 vezes maior que o número de Reynolds para o modelo.

Mesmo assim, os resultados obtidos no túnel de vento podem ser assumidos como representativos daqueles que se verificariam nas condições do protótipo, uma vez que garantem que os principais fenômenos envolvidos, a saber, flutuação, inércia e conservação da quantidade de movimento dos gases que deixam a chaminé estão corretamente escalonados [Snyder (1981)].

Para a correta representação dos efeitos de flutuação, inércia e quantidade de movimento no túnel de vento, deve-se levar em consideração que no túnel de vento todos os gases estarão à mesma temperatura. Sendo assim, a correta flutuação da pluma é modelada por uma mistura de nitrogênio e propano e hélio. O hélio para simular a elevada temperatura de saída dos gases da chaminé, e a mistura nitrogênio e propano para que o propano possa servir de gás traçador para posterior associação com a elevação da temperatura no local de medição. Modelando como gases perfeitos todos os gases envolvidos, pode-se escrever que:

$$\rho_g = \frac{273.15 + T_a}{273.15 + T_g} \cdot \rho_a \quad (10)$$

$$\chi_{He} = \frac{\rho_a - \rho_g}{\rho_a - \rho_{He}} \quad (11)$$

onde  $\chi_{He}$  é a fração volumétrica de hélio que deve ser utilizada no modelo para obter o mesmo efeito de flutuação que a temperatura alta dos gases causa à saída das chaminés do protótipo; e  $\rho_{He}$  é a densidade do hélio à temperatura e pressão no túnel de vento.

Uma vez estabelecidos os grupos adimensionais que precisam ser mantidos constantes na transposição de escala do protótipo ao modelo, resta esclarecer como é feita a medição da elevação da temperatura a partir da medição da concentração de um gás.

No túnel de vento é muito mais fácil e prático simular a flutuabilidade de um gás quente (nas condições do protótipo) mediante o uso de combinações de gases de diferentes densidades à temperatura e pressão ambiente (temperatura no interior do túnel de vento). Geralmente emprega-se uma mistura de hélio (He) com um hidrocarboneto. Neste caso específico, o hidrocarboneto utilizado foi o propano ( $C_3H_8$ ) balanceado com nitrogênio ( $N_2$ ), a uma concentração inicial de 10 000 ppm. A função do He é a de promover flutuação associada à elevada temperatura de exaustão dos gases e a função do  $C_3H_8$  é a de ser o gás traçador que ao dispersar-se

desde a saída da chaminé fornecerá, mediante a medição da sua concentração volumétrica num ponto à jusante da chaminé, uma medida indireta da temperatura da pluma neste ponto, como é mostrado a seguir. O  $N_2$  atua apenas como elemento de balanço no recipiente que contém o  $C_3H_8$ .

Define-se a elevação da temperatura,  $\Delta T$ , num ponto qualquer à jusante da chaminé por:

$$\Delta T = T_p - T_a \quad (12)$$

onde  $T$  é a temperatura e os subscritos  $p$  e  $a$  referem-se à pluma e ao ambiente, respectivamente.

Tratando os gases envolvidos como gases ideais e considerando que, no caso do protótipo, os gases constituintes da pluma são agentes passivos assim como a temperatura dela, pode-se escrever a seguinte relação linear entre concentrações de propano e temperatura da pluma:

$$\Delta T = \frac{\chi}{\chi_g} \cdot (T_g - T_a) \quad (13)$$

onde  $\chi$  e  $\chi_g$  são as frações volumétricas (molares) de  $C_3H_8$  no ponto de medição e à saída da chaminé.

Estes ensaios foram realizados para as seguintes configurações: ângulos de aproamento:  $0^\circ$  e  $15^\circ$ ; velocidade do vento na escala do protótipo, a 10 m acima da superfície do oceano: 12 m/s e 21 m/s - equivalentes na escala do modelo a 0,85 m/s e 1,45 m/s, respectivamente; combinação de 4 chaminés a  $450^\circ C$ ; e combinação de 4 chaminés a  $250^\circ C$ .

As alturas das chaminés do protótipo são de 63,86 m para as quatro chaminés mais a ré (em direção à popa) que emitem gases a  $450^\circ C$  e de 61,86 m para as quatro chaminés mais à vante (em direção à proa) que emitem gases que passaram pelo sistema de recuperação de calor, e por isso estão a  $250^\circ C$ . Estas alturas estão referenciadas à quilha do navio.

Os mapas de elevação de temperatura são tomados na seção transversal localizada no nariz do *helideck*<sup>1</sup>. A Figura 5(a) representa uma plataforma de petróleo *off-shore* genérica, onde é mostrada uma representação da pluma com um corte transversal na região da medição, e o corte longitudinal A-A na Figura 5(b) indica a região do mapeamento da temperatura, e também a área circular equivalente ao diâmetro do rotor do helicóptero considerado nos testes que nesse caso foi  $D = 16$  m.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Ensaio de carregamento do vento

A Figura 6 mostra os resultados dos coeficientes de força ( $CF_x$ ,  $CF_y$  e  $CF_z$ ) e momento ( $CM_x$ ,  $CM_y$  e  $CM_z$ ) para as três posições de calados ensaiadas: 9,8 m, 15,2 m e 21,0 m, indicadas em cada uma destas figuras.

De maneira geral os resultados apresentam comportamento coerente com a interação entre o escoamento (vento) e forma geométrica da embarcação. Uma vez que a área de referência e o braço (no caso dos momentos) adotados nos cálculos determinam o valor final dos coeficientes e estes podem ser eleitos de modo a situar os valores dos coeficientes dentro de uma faixa (no caso, escolheu-se uma área e um braço de referência de modo a que os coeficientes ficassem na faixa de 0 a 1). Os resultados obtidos não são comentados em termos de valores absolutos encontrados, mas sim em termos de comportamentos qualitativos e possíveis explicações para esses comportamentos. A seguir analisam-se as três direções ensaiadas.

---

<sup>1</sup>Nariz do *helideck* é a aresta mais à vante do *helideck*.



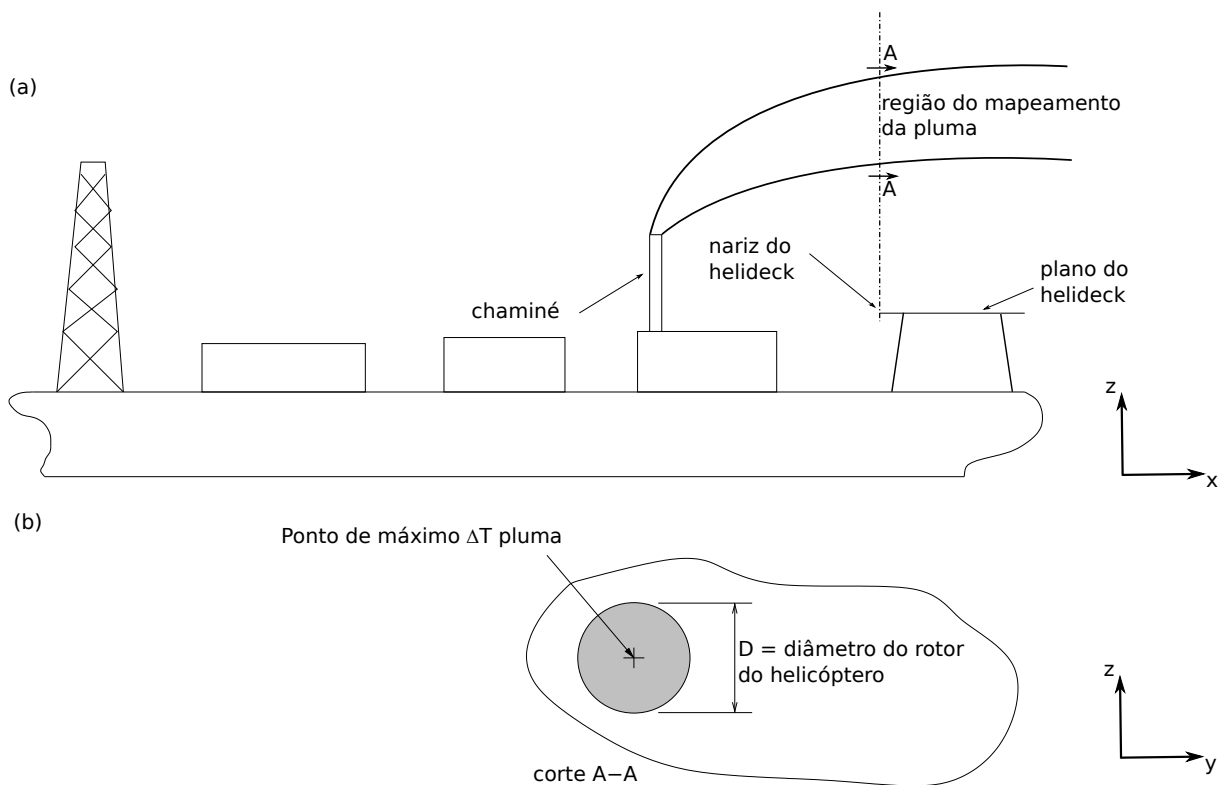


Figura 5: (a) representação de uma plataforma de petróleo *off-shore* genérica; e (b) região do mapeamento da temperatura da pluma.

**CF<sub>x</sub>**: A Figura 6 mostra claramente que para ângulos de aproamento nos intervalos entre 20° e 30°; e 330° e 340° são obtidos os valores máximos (positivos) de CF<sub>x</sub>, enquanto, entre 210° e 220° são obtidos os valores mínimos (negativos). Ambos valores máximos e mínimos estão na mesma ordem de grandeza. A complexidade dos elementos que compõem a superestrutura têm grande influência sobre este comportamento, uma vez que, para um corpo semelhante, mas liso, os valores extremos ocorreriam para os ângulos de 0° e 180°. Outro aspecto que reforça a hipótese de que é a superestrutura que governa os resultados para esta direção x é o fato de que a variação do calado não afetou significativamente nos valores de CF<sub>x</sub>.

**CM<sub>x</sub>**: A variação do momento em torno do eixo x (Figura 6) é fortemente influenciada pelo valor de calado e sempre coerente. Quanto menor o calado, maior a área exposta acima da linha d'água e, portanto, maior o momento em torno do eixo x. Finalmente, este momento é extremo em torno a 90° (mínimo) e 270° (máximo).

**CF<sub>y</sub>**: O coeficiente de força na direção y, Figura 6, é influenciada pelo calado. Pois, quanto maior a área vélica da plataforma de petróleo *off-shore*, maior é o valor de CF<sub>y</sub>. O comportamento de CF<sub>y</sub> é senoidal defasado de CM<sub>x</sub> em praticamente 90°, o que é coerente.

**CM<sub>y</sub>**: O momento em torno ao eixo y, Figura 6, é bastante complexo, porém qualitativamente repetitivo para os três calados ensaiados. Apresenta dois picos positivos, em torno a 60° e 300°, e dois negativos de menor intensidade em torno a 120° e 240°. Provavelmente, a superestrutura seja responsável por esse comportamento.

**CF<sub>z</sub>**: Os valores dos coeficientes de força na direção z foram sempre positivos, verticais ascendentes, como mostra a Figura 6. Chama a atenção os elevados valores para ângulos em torno de 90° e 270°, posições estas onde o vento atinge a embarcação a bombordo e boreste, respectivamente. A presença da embarcação comprime as linhas de corrente causando uma re-

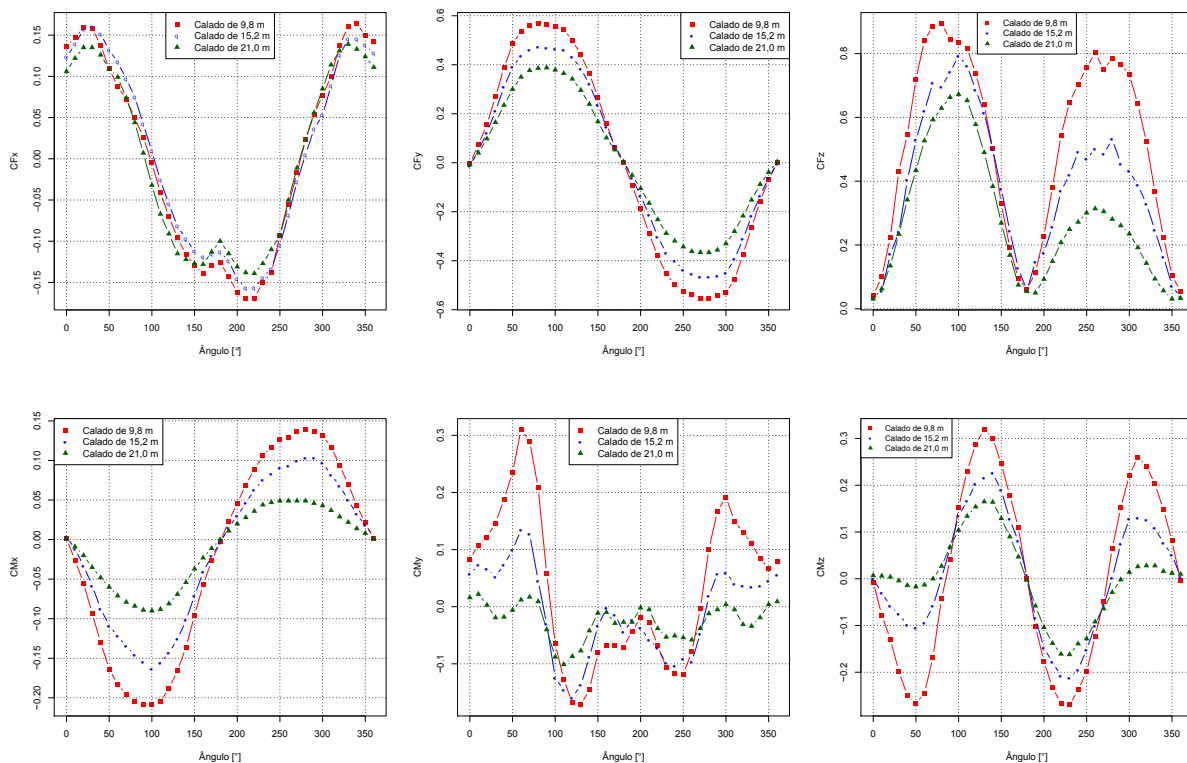


Figura 6: Resultados dos coeficientes de força (acima:  $CF_x$ ,  $CF_y$  e  $CF_z$ , respectivamente) e momento (abaixo:  $CM_x$ ,  $CM_y$  e  $CM_z$ , respectivamente) para os três calados ensaiados

dução de pressão na parte superior da embarcação. É bom lembrar que o vento incidindo na lateral da embarcação sofre separação, havendo a formação de uma camada de cisalhamento sobre a embarcação. Acima desta camada de cisalhamento as linhas de corrente são comprimidas mas abaixo a pressão é bem uniforme e baixa, correspondendo, aproximadamente, à pressão na esteira da embarcação. Outro fato a ser destacado, e consistente com as observações anteriores, diz respeito ao aumento da força nesta direção com o aumento da área vélica (diminuição do calado).

**CMz:** Quanto ao momento na direção z, Figura 6, os resultados apresentam grandes variações, embora cíclicas, no intervalo de ângulos de aproamento ensaiados. Novamente a influência do calado é significativa,  $CM_z$  aumenta com à medida que a área vélica também aumenta. Os valores de máximos ocorreram para ângulos de  $130^\circ$  e  $310^\circ$ , enquanto os mínimos para  $50^\circ$  e  $220^\circ$ , aproximadamente.

### 6.1.1 Resultados do vento no helideck

Na Figura 7 são mostradas os resultados de mapeamento de velocidade do escoamento e intensidade de turbulência obtidos com a técnica de anemometria a fio-quente, considerando a velocidade de referência  $U_{10} = 25$  m/s a 10 m de altura acima da superfície da água. As flechas na Figura 7 indicam a magnitude e direção dos vetores velocidade. Estas medições foram realizadas entre as alturas de 5 m e 30 m acima do helideck, e entre as posições longitudinais -10 m e 20 m. A posição (0,0) foi ajustada como o centro do helideck.

Porém, para realizar uma análise da qualidade do escoamento sobre todo o helideck optou-se por trabalhar com os parâmetros  $SW$  e  $SU$  na região sobre o helideck e para entre as alturas

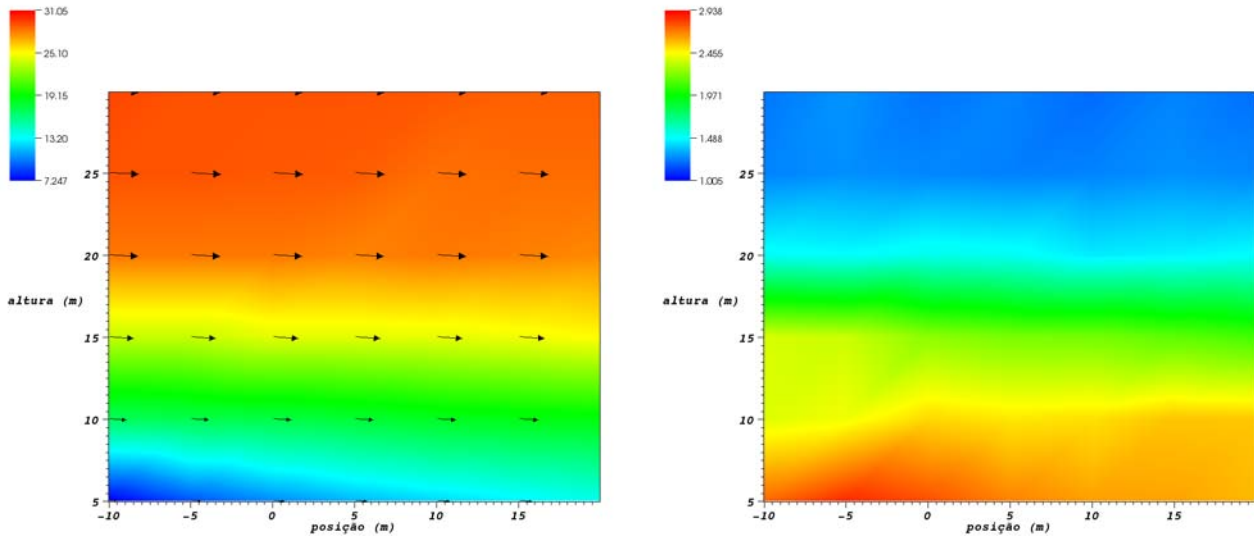


Figura 7: Mapeamento de velocidade (à esquerda) e turbulência (à direita) realizados com o CTA

entre 10 m e 20 m acima do *helideck*, como feito no [CAA, 2009](#). Os resultados mostrados a seguir foram obtidos para os ângulos de aproamento  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  e  $30^\circ$ .

Na Figura 8 são mostrados os resultados da intensidade de turbulência na direção vertical ( $SW$ ). A linha pontilhada define o parâmetro  $SW = 1,75$  m/s, que é a intensidade de turbulência máxima aceita, de acordo com [CAA, 2008](#) e [CAA, 2009](#). Nesta figura são mostrados os resultados obtidos para as velocidades de referência a 10 m acima da superfície do mar  $U_{10} = 25$  m/s (parâmetro para o mar do norte) e para  $U_{10} = 15$  m/s (parâmetro para o Brasil). Também são mostrados os valores máximos de  $SW$  (linha contínua) obtidos dentro da região de medição e os valores médios de  $SW$  (linha tracejada) obtidos na mesma região de medição.

Nota-se que ao tomar os valores máximos de  $SW$  - linha contínua - (que ocorrem localmente, e principalmente próximo ao nariz do *helideck* (ver Figura 7), praticamente todos os valores estão acima do parâmetro  $SW = 1,75$  m/s. Porém, ao analisar os valores médios de  $SW$  - linha pontilhada - nota-se que para a velocidade de referência  $U_{10} = 25$  m/s os valores de  $SW$  estão entre 1,75 m e 2,00 m/s, mas para a condição de voo de helicóptero do Brasil, que é a velocidade de referência  $U_{10} = 15$  m/s, os valores médios de  $SW$  estão bem abaixo do parâmetro especificado no [CAA, 2008](#) e [CAA, 2009](#).

Na Figura 9 são mostrados os resultados da intensidade de turbulência na direção horizontal ( $SU$ ). A linha pontilhada define o parâmetro  $SU = 5,00$  m/s, que é a intensidade de turbulência máxima aceita, de acordo com [CAA, 2008](#) e [CAA, 2009](#). A forma de apresentação dos resultados é similar ao caso anterior.

Neste caso nota-se que somente uma condição ultrapassou o parâmetro definido  $SU = 5,00$  m/s, porém esse foi um valor de pico, também no nariz do *helideck*, e obtido para o ângulo de aproamento  $30^\circ$ . Os demais resultados estão dentro do parâmetro especificado, principalmente o valores médios de  $SU$  sobre o *helideck*.

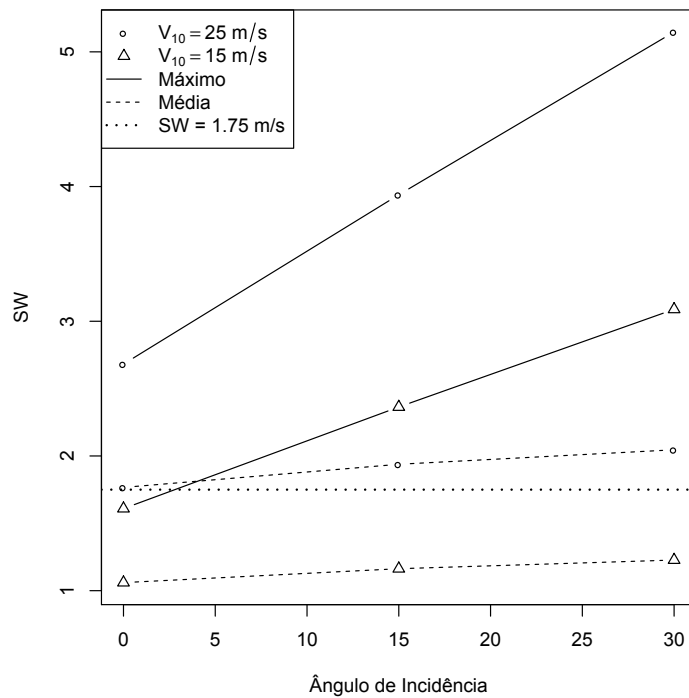


Figura 8: Valores da intensidade de turbulência vertical sobre o *helideck* obtidos para as velocidades horizontais de referência ( $U_{10}$ ) de 25 m/s e 15 m/s

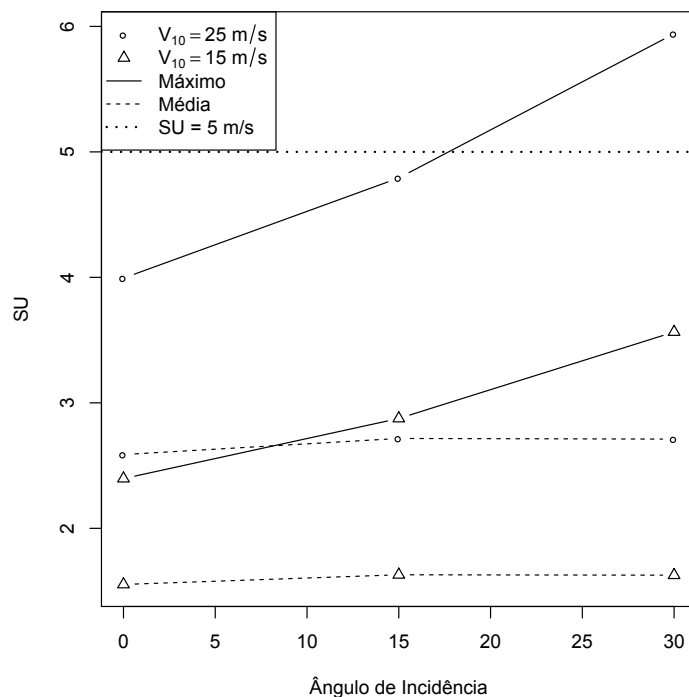


Figura 9: Valores da intensidade de turbulência horizontal sobre o *helideck* obtidos para as velocidades horizontais de referência ( $U_{10}$ ) de 25 m/s e 15 m/s

## 6.2 Resultados da elevação de temperatura de plumas no helideck

Os mapas de elevação de temperatura são tomados na seção transversal localizada no nariz do *helideck* são mostrados nas Figuras 10 a 13. Nestas figuras a ordenada refere-se à cota Z acima do *helideck* e a abscissa à cota Y, transversal ao navio, cujo valor zero refere-se ao centro

do *helideck*. Nas mesmas figuras observa-se um contorno em branco de  $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ ; e o disco relativo ao diâmetro do rotor do helicóptero, em tom mais escuro, com centro no ponto de máximo valor de  $\Delta T$ .

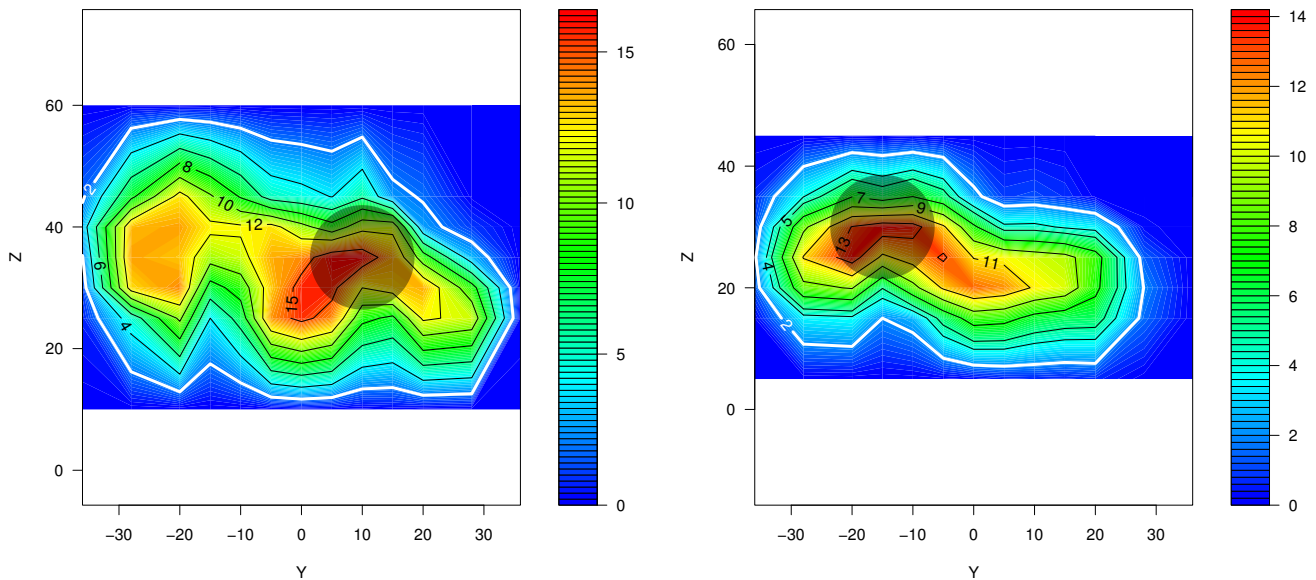


Figura 10: Mapa de distribuição de elevação de temperatura,  $\Delta T$ , para aproamento de  $0^\circ$ , velocidade do vento de 12 m/s (à esquerda) e 21 m/s (à direita), temperatura de exaustão de  $250^\circ\text{C}$  nas quatro chaminés mais à vante e altura das chaminés igual ao projeto original. À direita a escala de  $\Delta T$

Na Figura 10 são mostrados os resultados dos ensaios simulando as plumas deixando as chaminés a  $250^\circ\text{C}$ , para o ângulo de aproamento da plataforma de  $0^\circ$ . Percebe-se que para a velocidade de 12 m/s os *cores* (núcleos centrais) das quatro plumas estão entre 30 e 35 m de altura acima do *helideck*, e esses *cores* chegam  $\Delta T$  de  $19^\circ\text{C}$ . Nos resultados dos ensaios a 21 m/s os *cores* das plumas estão praticamente em uma mesma linha, na altura média de 25 m, e o  $\Delta T$  é de  $14^\circ\text{C}$ .

Os resultados do ensaio das elevação de temperatura das plumas das chaminés a  $250^\circ\text{C}$  no ângulo de aproamento  $15^\circ$  são mostrados na Figura 11. Para a velocidade de 12 m/s os *cores* das quatro plumas estão entre 30 e 40 m de altura acima do *helideck*, e esses *cores* chegam  $\Delta T$  de  $21^\circ\text{C}$ . Nos resultado dos ensaios a 21 m/s os *cores* das plumas também estão praticamente em uma mesma linha, na altura média 23 m e o  $\Delta T$  é de  $17^\circ\text{C}$ .

Na Figura 12 são mostrados os resultados dos ensaios simulando as plumas deixando as chaminés a  $450^\circ\text{C}$ , para o ângulo de aproamento da plataforma de  $0^\circ$ . Percebe-se que para a velocidade de 12 m/s os *core* das quatro plumas estão entre 30 e 45 m de altura acima do *helideck*, e esses *cores* chegam  $\Delta T$  de  $39^\circ\text{C}$ . Nota-se também um efeito curioso nas duas plumas emitidas pelas chaminés centrais, pois eles se sobrepõem. Esse efeito de sobreposição é menor no resultado dos ensaios a 21 m/s, onde os *cores* das plumas estão praticamente em uma mesma linha, na altura média 28 m e o  $\Delta T$  de  $41^\circ\text{C}$ .

Os resultados do ensaio das elevação de temperatura das plumas das chaminés a  $450^\circ\text{C}$  no ângulo de aproamento  $15^\circ$  são mostrados na Figura 13. Para a velocidade de 12 m/s os *cores* das quatro plumas estão entre 30 e 40 m de altura acima do *helideck*, e esses *cores* chegam  $\Delta T$  de

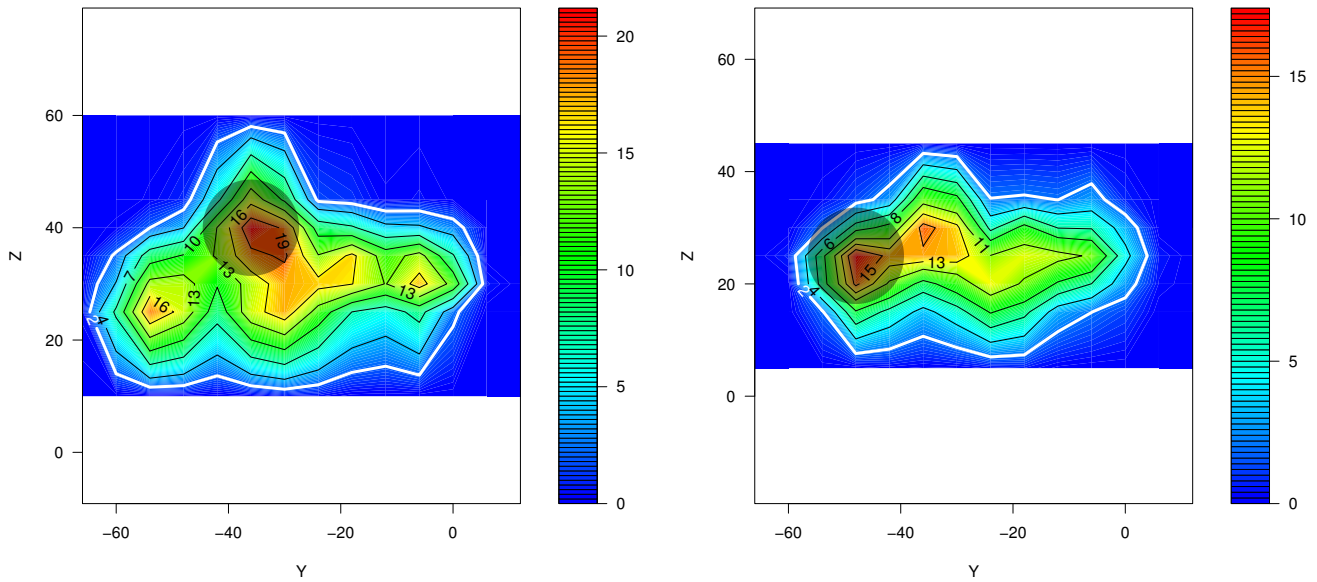


Figura 11: Mapa de distribuição de elevação de temperatura,  $\Delta T$ , para aproamento de  $15^\circ$ , velocidade do vento de 12 m/s (à esquerda) e 21 m/s (à direita), temperatura de exaustão de  $250^\circ\text{C}$  nas quatro chaminés mais à vante e altura das chaminés igual ao projeto original. À direita a escala de  $\Delta T$

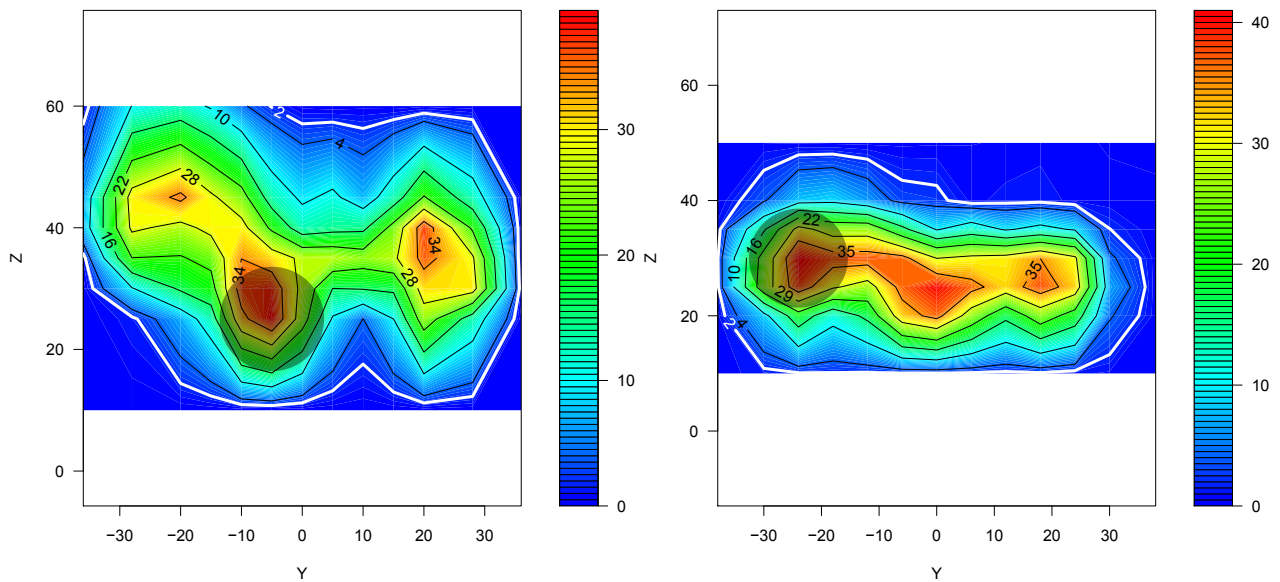


Figura 12: Mapa de distribuição de elevação de temperatura,  $\Delta T$ , para aproamento de  $0^\circ$ , velocidade do vento de 12 m/s (à esquerda) e 21 m/s (à direita), temperatura de exaustão de  $450^\circ\text{C}$  nas quatro chaminés mais à ré e altura das chaminés igual ao projeto original. À direita a escala de  $\Delta T$



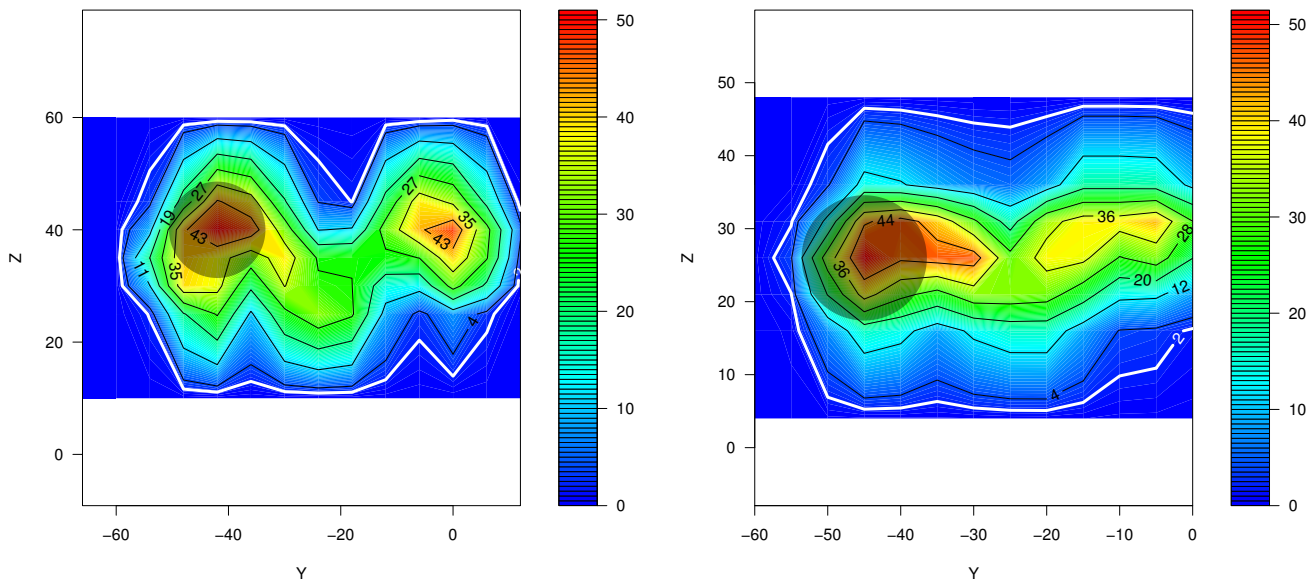


Figura 13: Mapa de distribuição de elevação de temperatura,  $\Delta T$ , para aproamento de  $15^\circ$ , velocidade do vento de 12 m/s (à esquerda) e 21 m/s (à direita), temperatura de exaustão de  $450^\circ\text{C}$  nas quatro chaminés mais à ré e altura das chaminés igual ao projeto original. À direita a escala de  $\Delta T$

$50^\circ\text{C}$ . Neste caso também observa-se a sobreposição das duas plumas emitidas pelas chaminés centrais. Nos resultado dos ensaios a 21 m/s os *cores* das plumas estão praticamente em uma mesma linha, na altura média 28 m e o  $\Delta T$  de  $50^\circ\text{C}$ .

Ao analisar em conjunto as duas condições de simulação de elevação de temperatura, nota-se que em média obtém-se, entre 10 m e 20 m de altura acima do helideck, uma variação de temperatura entre  $2^\circ\text{C} < \Delta T < 10^\circ\text{C}$ . Quando se analisam as temperaturas das plumas das chaminés que passaram por recuperação de calor ( $T = 250^\circ\text{C}$ ), o  $\Delta T$  da pluma no nariz do *helideck* não ultrapassa  $17^\circ\text{C}$ . No entanto, para as plumas dos gases emitidos a  $450^\circ\text{C}$  pelas chaminés, o  $\Delta T$  do core da pluma chega até  $50^\circ\text{C}$ , porém isso ocorre em média acima de 28 m de altura do nível do *helideck*, e para velocidades do vento de 21 m/s, que é uma velocidade média que não ocorre com frequência durante a operação de helicópteros, e no Brasil, pouso de helicópteros em plataformas de petróleo *off-shore* ocorrem, normalmente, para velocidades do vento de até 15 m/s.

## 7 CONCLUSÕES

Por meio dos resultados obtidos, nota-se a relevância de ensaios em túnel de vento para modelagem de efeitos devidos ao vento em estruturas. Nesse caso, foi realizado o ensaio de uma estrutura naval, onde foram realizados 3 tipos de ensaios, que foram de carregamento do vento na embarcação, qualidade do escoamento e elevação de temperatura de plumas no helideck.

No caso das medições dos coeficientes de força e momento, os resultados obtidos são independentes do número de Reynolds e as áreas foram definidas tal que os resultados dos coeficientes ficassem entre 0 e 1. Nota-se a influência da variação do calado nos coeficientes de força  $CF_y$  e momento  $CM_z$ . Para o caso de  $CF_x$ , a variação do calado não apresenta grandes alterações no resultado dos coeficientes, indicando que é o arranjo das estruturas acima do convés

que contribui com essa resistência ao avanço da plataforma.

Quanto às medições da qualidade do escoamento, foram realizadas análises das intensidades de turbulência vertical e horizontal. Observou-se que ao considerar os valores médios dessas grandezas, entre as alturas 10 m e 20 m sobre o *helideck*, os valores obtidos foram satisfatórios, tanto considerando a velocidade do vento horizontal de referência ( $U_{10}$ ) de 25 m/s quanto 15 m/s.

E, finalmente, a metodologia de simulação de elevação de temperatura de plumas, realizada com gases à temperatura ambiente, e utilizando o hélio como elemento de fluuabilidade das plumas e o propano como elemento de simulação de temperatura, se mostra uma ferramenta versátil e capaz de simular situações de alta temperatura e sua dispersão com o vento.

## REFERÊNCIAS

CAA - Civil Aviation Authority - London: *CAP437 Offshore Helicopter Landing Areas - Guidance on Standards*, dezembro, 2008.

CAA - Civil Aviation Authority - CAA PAPER 2008/02 *Offshore Helideck Environmental Research*, maio, 2009.

ESDU - ENGINEERING SCIENCE DATA UNIT. *Computer program for wind speeds and turbulence properties: flat or hilly sites in terrain with roughness changes*. London: ESDU International, 1995. 29 p. (Item, 92032)

ISYUMOV, N. e TANAKA, H. *Wind-Tunnel Modeling of Stack Gas Dispersion - Difficulties and Approximations*. In: PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 1979, Fort Collins, Colorado, U.S.A.

POREH, M. e KACHERGINSKY, A. *Simulation of Plume Rise Using Small Wind-Tunnel Models*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 7, p. 1-14, 1981.

SNYDER, W. H. *Similarity Criteria for the Application of Fluid Models to the Study of Air Pollution Meteorology*. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 3, p. 113-134, 1972.

SNYDER, W. H. *Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion*. Environmental Sciences Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency - EPA, Research Triangle Park, NC 27711, abril, 1981.