

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE VISUALIZAÇÃO DE FLUXO POR FUMAÇA EM TÚNEL DE VENTO

Vinicius Kronhardt Calgaro (PUCRS) - vinicius.calgaro@edu.pucrs.br

Gabriel cirilo da silva simioni (PUCRS) - simioni@pucrs.br

Sérgio Boscato Garcia (PUCRS) - sergio.garcia@pucrs.br

Resumo:

A compreensão dos fenômenos envolvidos na interação do vento com corpos submersos tem como obstáculo a não visibilidade do ar. Existem diferentes técnicas para visualizar o fluxo de ar, como as técnicas de tufo de tecido e a técnica de visualização por fumaça. O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a realização de testes de um equipamento para a aplicação da técnica de visualização do fluxo com uso de fumaça para aplicação em túnel de vento. A metodologia proposta consiste em desenvolver um sistema para injeção de fumaça, de modo a permitir a visualização do fluxo sobre perfis aerodinâmicos, e analisar diferentes parâmetros de processo. Para a produção de fumaça, foram utilizadas glicerina e água em diferentes proporções em volume, sendo analisados 100%, 75% ou 50% de glicerina. Ensaios no túnel de vento foram realizados para velocidades de 3 m/s a 15 m/s, de modo a comparar visualmente o comportamento da fumaça produzida. O uso de glicerina sem a adição de água apresentou melhores resultados na produção de fumaça e foi possível visualizar com nitidez a linha de fluxo sobre um perfil aerodinâmico.

Palavras-chave: *Túnel de vento, Visualização por fumaça, Visualização de fluxo*

Área temática: *Outras fontes renováveis de energia*

Subárea temática: *Simulação, análise, equipamentos e sistemas de conversão eólica para eletricidade*

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE VISUALIZAÇÃO DE FLUXO POR FUMAÇA EM TÚNEL DE VENTO

Vinicius Kronhardt Calgaro – vinicius.calgaro@edu.pucrs.br

Gabriel Cirilo da Silva Simioni – simioni@pucrs.br

Sérgio Boscato Garcia – sergio.garcia@pucrs.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Escola Politécnica

6.1. Simulação, análise, equipamentos e sistemas de conversão eólica para eletricidade

Resumo. A compreensão dos fenômenos envolvidos na interação do vento com corpos submersos tem como obstáculo a não visibilidade do ar. Existem diferentes técnicas para visualizar o fluxo de ar, como as técnicas de tufo de tecido e a técnica de visualização por fumaça. O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a realização de testes de um equipamento para a aplicação da técnica de visualização do fluxo com uso de fumaça para aplicação em túnel de vento. A metodologia proposta consiste em desenvolver um sistema para injeção de fumaça, de modo a permitir a visualização do fluxo sobre perfis aerodinâmicos, e analisar diferentes parâmetros de processo. Para a produção de fumaça, foram utilizadas glicerina e água em diferentes proporções em volume, sendo analisados 100%, 75% ou 50% de glicerina. Ensaios no túnel de vento foram realizados para velocidades de 3 m/s a 15 m/s, de modo a comparar visualmente o comportamento da fumaça produzida. O uso de glicerina sem a adição de água apresentou melhores resultados na produção de fumaça e foi possível visualizar com nitidez a linha de fluxo sobre um perfil aerodinâmico.

Palavras-chave: Túnel de vento, Visualização por fumaça, Visualização de fluxo

1. INTRODUÇÃO

A aerodinâmica trata do estudo do escoamento de gases sobre corpos e, dentre as diferentes aplicações, podem ser citadas as análises de estruturas, aeronaves, veículos em geral e equipamentos para produção de energia. Os equipamentos utilizados para a conversão da energia proveniente dos ventos em energia elétrica, denominados aerogeradores ou turbinas eólicas, têm, principalmente no desenvolvimento das suas pás, uma importante aplicação do estudo dos efeitos aerodinâmicos que atuam em diferentes geometrias. Existem diversos tipos de turbinas eólicas, com distintas construções mecânicas para condições de vento específicas, sendo os principais aspectos utilizados na sua classificação o porte e a disposição do eixo, o qual pode ser horizontal ou vertical. Mais utilizadas em parques eólicos, as turbinas de eixo horizontal de grande porte têm seu funcionamento baseado na sustentação aerodinâmica, efeito que pode ser predominante também no funcionamento de turbinas de eixo vertical de menor porte, adequadas à ambientes urbanos ou de grande variação da direção do vento incidente.

Diversos perfis aerodinâmicos são estudados em experimentos para determinar a sua performance. Recentemente surgiram estudos de perfis aerodinâmicos rotacionais, onde sua superfície é dotada de uma esteira que desliza paralelamente ao fluxo do vento, utilizando o efeito Magnus para o aumento da performance (Kazemi *et al.*, 2016). Os aerofólios NACA são perfis aerodinâmicos inicialmente desenvolvidos para a aviação. Seu formato é descrito pelos dígitos que procedem a palavra NACA. Nos perfis NACA de 4 dígitos, os dois primeiros representam a convexidade máxima do perfil e sua posição em relação ao bordo de ataque, respectivamente, ambas em porcentagem da corda, e os dois últimos dígitos representam a espessura do perfil, também em porcentagem de corda. O NACA 0018 é um perfil simétrico muito utilizado em turbinas de eixo vertical, por apresentar uma alta razão entre a sustentação e arrasto aerodinâmico (Kumar *et al.*, 2018).

A eficiência energética aliada à aerodinâmica também está presente no desenvolvimento dos veículos, onde se objetiva principalmente a redução do consumo de combustível. Uma das maneiras de melhorar a eficiência energética nos veículos é por meio do desenvolvimento da performance aerodinâmica, assim, procura-se reduzir o arrasto, o que se aplica tanto a veículos de alta performance como a veículos em geral. Para isso, são realizados diversos estudos sobre os veículos a fim de analisar o arrasto em função de sua geometria (Lo e Kontis, 2017). Outra área em que se aplicam os estudos da aerodinâmica é a construção civil. O interesse se dá na interação do vento com as construções e as solicitações estruturais resultantes. Uma das aplicações estudadas corresponde às forças de empuxo que o escoamento realiza sobre os telhados, de acordo com o ângulo de inclinação dos mesmos (Ozmen *et al.*, 2016). Sobre os telhados, também se tem o estudo de dispersão de sedimentos que se depositam sobre eles, como a areia e a neve, e como algumas estruturas podem auxiliar na redução do acúmulo dos sedimentos, como a instalação e o posicionamento de painéis solares (Ferreira *et al.*, 2015).

No final da década de 60, com o advento da computação, a dinâmica de fluidos computacional (CFD) surge para auxiliar no estudo numérico e visual. Essa técnica é complementar a testes reais e ensaios em escala em túnel de vento (Blocken *et al.*, 2018). O estudo aerodinâmico necessita de matemática analítica avançada e os valores numéricos levantados experimentalmente não são suficientes para identificação dos fenômenos que ocorrem, principalmente em regime de escoamento turbulento e instável. Muito se ganha na visualização do escoamento sobre os corpos nesse sentido, por vezes, a visualização ensina mais sobre um caso do que os valores numéricos. A formação de recirculação, emissão de vórtices e fenômenos de estol são exemplos de estudos em que foram necessárias técnicas de visualização do escoamento para o seu entendimento (Alé, 1998).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de produção e injeção de fumaça para a aplicação da técnica de visualização por fumaça em túnel de vento. Trata-se de uma técnica de baixo custo que permite a determinação e visualização das linhas de fluxo, que representam o conjunto de posições pelas quais as partículas passam ao longo do tempo, com aplicação na análise de escoamentos externos.

2. ESCOAMENTO E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

Os escoamentos têm diversas classificações: interno ou externo; laminar ou turbulento; estacionário ou transiente; compressível ou incompressível. No escoamento externo há duas regiões a serem consideradas: uma próxima da superfície do corpo e a outra que cobre o restante do escoamento. Apenas na primeira região os efeitos da viscosidade do fluido são percebidos, fora dela, são desprezíveis. Essa fina região é denominada Camada Limite e foi apresentada por Ludwig Prandtl (1875 - 1953) em 1903, representando um grande avanço na Mecânica dos Fluidos e fornecendo um elo entre a teoria e os resultados experimentais que, até então, avançavam em divergência. Nela ocorrem os efeitos viscosos e de pressão do fluido sobre o corpo, resultando nas forças de arrasto e sustentação (Çengel e Cimbala, 2017). Os experimentos realizados por Osborne Reynolds (1842-1912) demonstraram que o regime do escoamento é a razão entre as forças inerciais sobre as viscosas. Dependendo da geometria da superfície, sua rugosidade e temperatura, e do tipo de fluido e sua velocidade, um escoamento pode ser laminar ou turbulento. O número de Reynolds, que define o tipo de escoamento, é aplicado em análises adimensionais com a premissa da similaridade entre os corpos, de modo que um ensaio aerodinâmico pode ser realizado em modelos em escala e os resultados serão os mesmos. É por meio dessa definição que os testes em túneis de vento se validam. Basicamente, os túneis de vento podem ser classificados pela velocidade do escoamento, em supersônicos ou de baixa velocidade, e pelo tipo de circuito, em fechado ou aberto, sendo componentes construtivos importantes o ventilador e a seção de testes. A Fig. 1 ilustra a aplicação de um estudo em que ciclistas são representados em escala e posicionados na seção de testes de um túnel de vento.

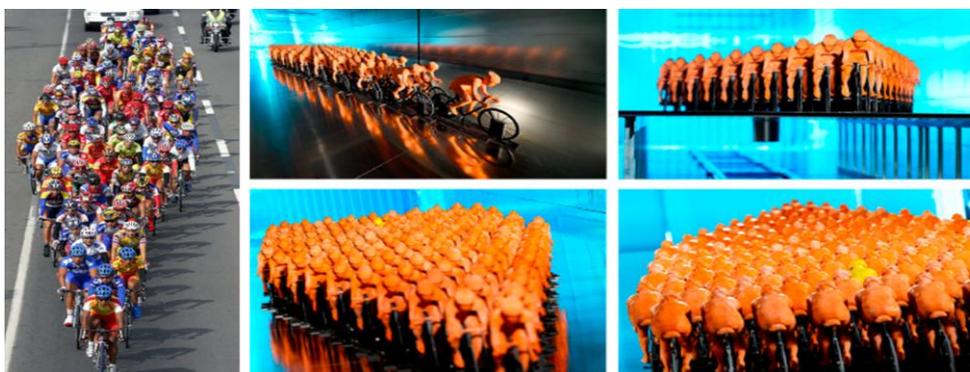


Figura 1 – Representação em escala de um pelotão de ciclistas para realização de ensaio em túnel de vento. Adaptado de Blocken (2018).

Estudos são realizados com o objetivo de avaliar a representatividade dos resultados obtidos em túnel de vento em relação ao nível de detalhamento dos modelos em escala, como a representação das pontes estaiadas, onde os cabos muitas vezes não são considerados no modelo em escala, mas influenciam no comportamento do escoamento. Pode-se citar também os retrovisores dos veículos e as linhas de alta tensão presentes na cobertura dos trens (Sicot *et al.*, 2018). Em ensaios de túnel de vento, alguns tem como objetivo o levantamento experimental das forças de arrasto e sustentação, e outros tem como objetivo o diagnóstico de como o escoamento se comporta ao interagir com o corpo. Ao longo dos anos, técnicas de visualização do fluxo foram desenvolvidas e aprimoradas para permitir a visualização dos fenômenos que ocorrem na camada limite e depois dela, na esteira.

As técnicas de filme de óleo e tufos são utilizadas para visualização dentro da camada limite, imediatamente sobre o corpo. Nelas podem ser identificadas direções do fluxo e separações. A técnica de filme de óleo consiste em aplicar pontos de óleo na superfície de interesse, pode-se misturar corante para melhor visualização, após o ensaio no túnel, o óleo vai apresentar as linhas de direção do fluxo, como ilustra a Fig. 2. Na técnica de tufos, são aplicados sobre as áreas de interesse tufos de tecido como nylon, lã e algodão, que irão sofrer influência do escoamento indicando a sua direção. Se ocorrer recirculação na superfície do corpo, os tufos se comportam de maneira desordenada, como mostra a Fig. 3. A

técnica de fumaça consiste na queima de um combustível e aplicação da fumaça produzida no escoamento. Com esta técnica é possível visualizar as linhas de fluxo, toda a trajetória das partículas ao longo do tempo, a identificação de vórtices na esteira e regiões de separação (Houghton *et al.*, 2013). A Fig. 4 apresenta uma visualização de fluxo sobre um caminhão articulado, na Fig. 4(a) observa-se o ponto de estagnação (ST), o ponto de separação do fluxo (SP) e a camada de separação superior (SL_U). Na Fig. 4(b) é apresentada a bolha de separação (SB) e na Fig. 4(c), o núcleo do vórtice (VC) e a camada de separação inferior (SL_L).

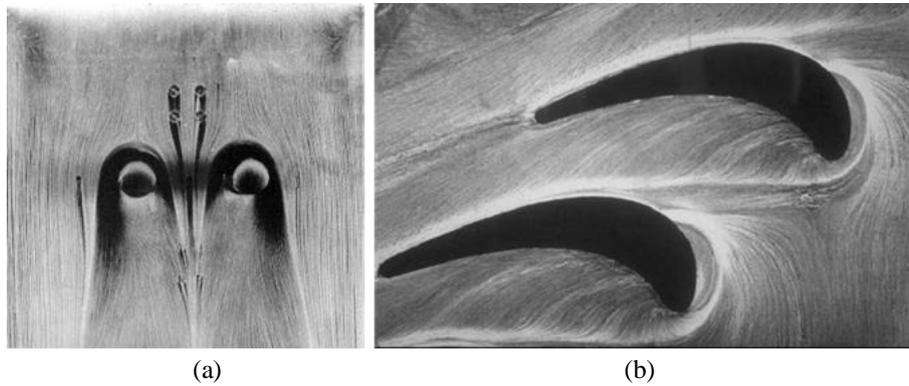


Figura 2 – Visualização por óleo: (a) área superior de uma esfera e (b) perfis aerodinâmicos. Adaptado de Ristić (2007).

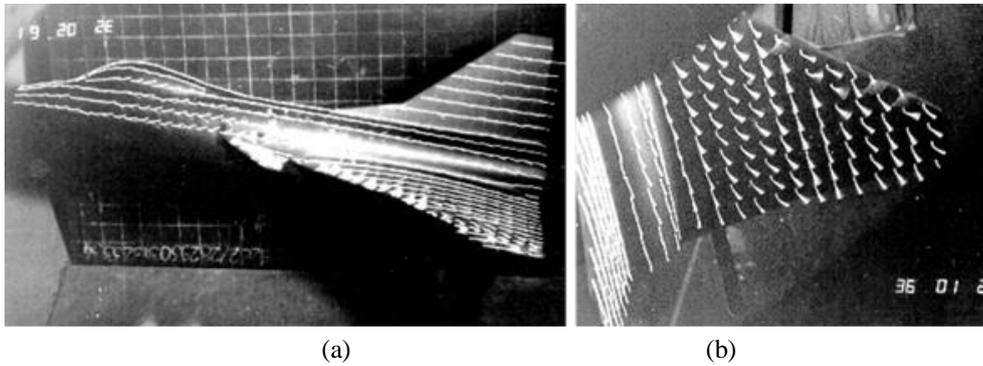


Figura 3 – Visualização por tufo de tecido sobre um aeromodelo: (a) vista lateral e (b) sob a asa. Adaptado de Ristić (2007).

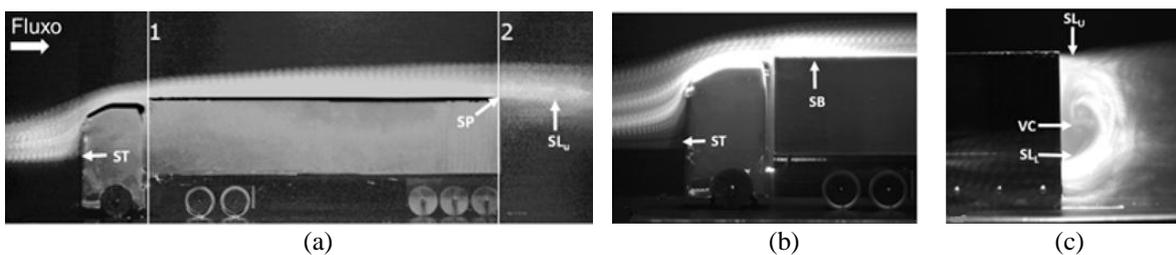


Figura 4 – Visualização pelo método de fumaça: (a) visão geral, (b) detalhe frontal e (c) detalhe da esteira. Adaptado de Lo (2017).

A técnica de visualização por fumaça, sob condições específicas, pode ser utilizada em túneis supersônicos (Barlow *et al.*, 1999), mas é mais utilizada com velocidades baixas, de até 20 m/s (Ozmen *et al.*, 2016). Em altas velocidades alguns fenômenos não são percebidos, pois as linhas de fluxo são constantes. Contudo, em baixas velocidades fenômenos como a separação e desprendimento de vórtices podem ser observados, como mostra a Fig. 5. Esta técnica tem baixo custo, sendo indicada para túneis de baixa turbulência e contraindicada para túneis de circuito fechado, pois polui o escoamento e diminui a visibilidade. Da mesma forma, não é indicada para ambientes fechados, pois exige uma renovação de ar, e dependendo do combustível utilizado pode ser tóxica e/ou corrosiva. Tetracloro de titânio e tetracloro de estanho reagem com o ar e formam uma fumaça densa, mas ambos materiais são corrosivos. Vapor de água e nitrogênio líquido produzem fumaça sem efeitos colaterais. Alguns óleos, como o querosene, a parafina e a glicerina também produzem fumaça densa com produção de pouco resíduo.

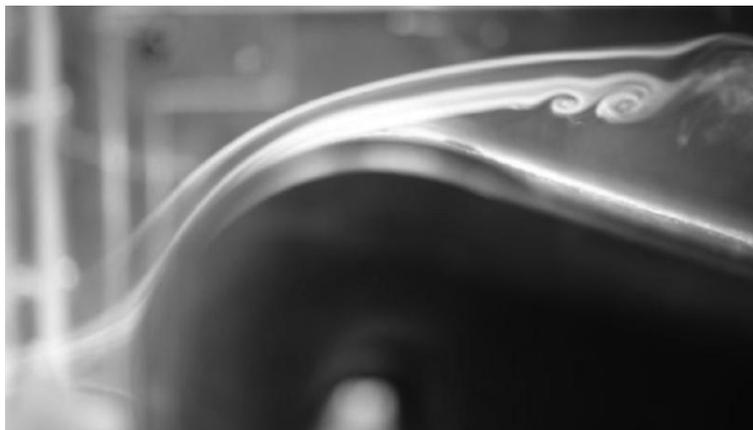


Figura 5 – Visualização de vórtices e separação. Adaptado de Kazemi (2016).

3. MÉTODOS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

A estrutura da metodologia proposta para o desenvolvimento de um sistema de produção e aplicação de fumaça em túnel de vento é apresentada na Fig. 6. Na primeira etapa estão definidos o projeto, seleção dos componentes e confecção de um bico injetor, estando subdividida no desenvolvimento de um sistema de abastecimento, aquecimento e reservatório. Na segunda etapa, consta a avaliação da funcionalidade do sistema, com testes da capacidade de aquecimento e produção de fumaça por meio da queima do combustível. Por fim, a análise dos resultados consiste na análise visual da densidade e dispersão da fumaça aplicada para diferentes condições no túnel de vento.

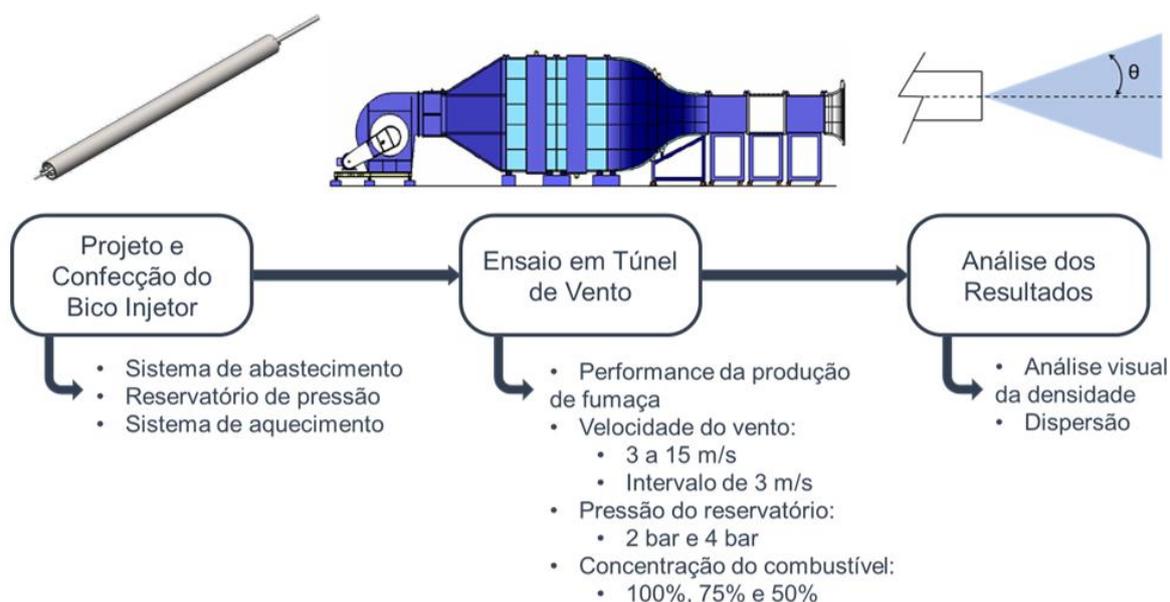


Figura 6 – Estrutura da metodologia proposta.

O túnel de vento do Laboratório de Energia Eólica da PUCRS, também ilustrado na Fig.6, é um túnel do tipo circuito aberto, equipado com um ventilador centrífugo e com uma seção de testes com área de 1 m^2 , estando instrumentado com um tubo de Pitot posicionado próximo à seção de testes e conectado a um manômetro digital. A potência do ventilador é de 60 kW, o que permite a aplicação de uma velocidade máxima controlada de 34 m/s.

Para a confecção do bico injetor de fumaça foram utilizados 3 tubos de inox sem costura, conforme ilustra a Fig. 7. Os tubos foram posicionados concêntricamente e a interface entre um tubo e outro foi soldada, utilizando o processo TIG (*Tungsten Inert Gas*). Foram adicionadas duas resistências tubulares retas para promover o aquecimento, ambas com 750 mm de comprimento, 11 mm de diâmetro, 800 W de potência e 127 V de tensão nominal. As resistências foram associadas em série, o que reduziu a potência de aquecimento para 400 W.

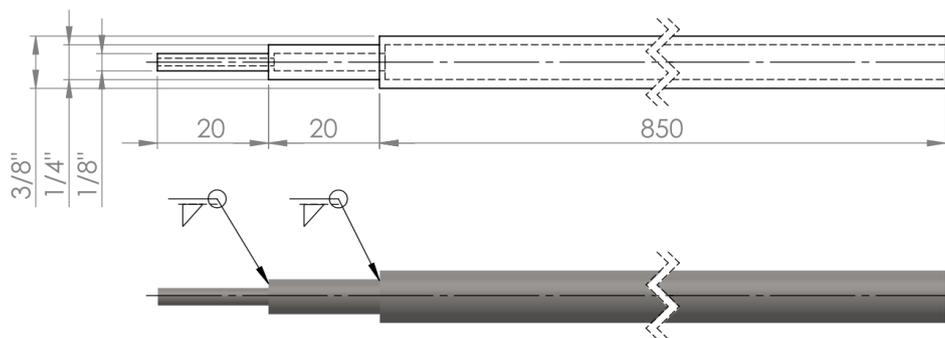


Figura 7 – Representação do projeto do bico injetor (dimensões em mm, quando não indicadas).

O sistema de aquecimento e o bico foram revestidos por uma camada de manta cerâmica (lã de rocha), para evitar a dissipação do calor do sistema para o fluxo de ar do túnel de vento. Os componentes foram inseridos em um tubo de aço, que protege e dá sustentação ao sistema. A Fig. 8(a) ilustra a montagem do equipamento, em que o item 1 é o bico injetor, o item 2 é a estrutura externa e o item 3 representa as resistências elétricas do sistema de aquecimento. O isolamento térmico é representado Fig. 8(c). A temperatura do sistema é medida por meio de um termopar do tipo K, e o valor é lido pela IHM (Interface Homem-Máquina) que controla o túnel. Um controle para o aquecimento não foi aplicado, pois observou-se que quanto maior a temperatura do sistema mais estável é a dinâmica de ebulição. O combustível utilizado consiste em uma mistura de água + glicerina ($C_3H_8O_3$). Em 100% de concentração de glicerina, a temperatura de ebulição é aproximadamente 290 °C (Glycerine, 2010). A glicerina foi escolhida pelo relativo baixo ponto de ebulição, por se apresentar em fase líquida a temperatura ambiente, por ser atóxica, sendo considerada como um produto não perigoso de acordo com a ABNT NBR 14725-2, de fácil acesso e baixo custo. A glicerina só apresenta risco caso haja inalação prolongada e deve ser utilizada em locais abertos e ventilados (FISPQ – glicerina, 2017). A parafina, também bastante utilizada, se assemelha muito com a glicerina em termos de toxicidade e propriedades, mas tem as seguintes desvantagens: se apresentar em estado sólido à temperatura ambiente, sendo mais complexo o seu manuseio, e a fumaça produzida pode causar irritações nas vias respiratórias (FISPQ – parafina histológica, 2017). Outro óleo utilizado é o querosene. Contudo, este apresenta perigo no manuseio por ser tóxico e inflamável (FISPQ – querosene, 2019).

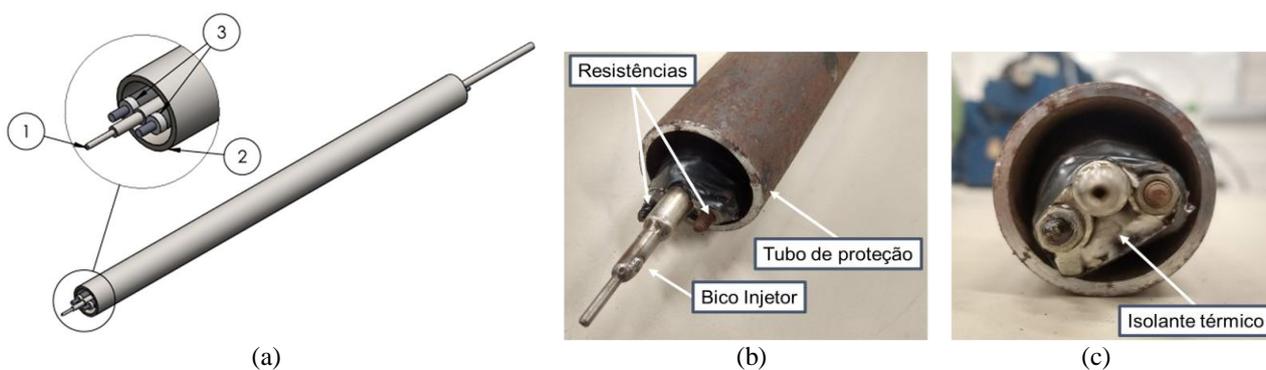


Figura 8 – Sistema de aquecimento e injeção de fumaça.

Para abastecer o bico com o combustível, foi desenvolvido um sistema com mangueiras, que conectam o reservatório de pressão ao bico injetor aquecido, onde o líquido entra em ebulição e se transforma em fumaça. Pela redução de diâmetro das tubulações, a fumaça é forçada a passar pela tubulação mais estreita, onde ela sai para o túnel de vento mais densa. Para que o combustível e/ou fumaça não retornem pelo sistema, uma válvula de retenção foi adicionada entre o reservatório e o bico injetor. O reservatório de pressão consiste em um vaso com duas entradas e uma saída. O combustível é alimentado através da entrada de abastecimento, localizada na parte superior do vaso, por efeito da gravidade, ele se posiciona no fundo do vaso, onde se localiza a saída. A segunda entrada é a de ar comprimido, localizada na lateral do vaso, próxima ao topo, nela se encontra a unidade de tratamento de ar, que é responsável pela interface entre a rede de ar comprimido e o reservatório, ela também realiza a regulagem da pressão que chega ao sistema. Essa pressão regulada, ao entrar no reservatório, força o combustível a escoar pelas mangueiras e chegar ao bico injetor. A vazão do sistema é praticamente constante, proporcional a pressão do sistema. A Fig. 9 apresenta o fluxograma simplificado do processo.

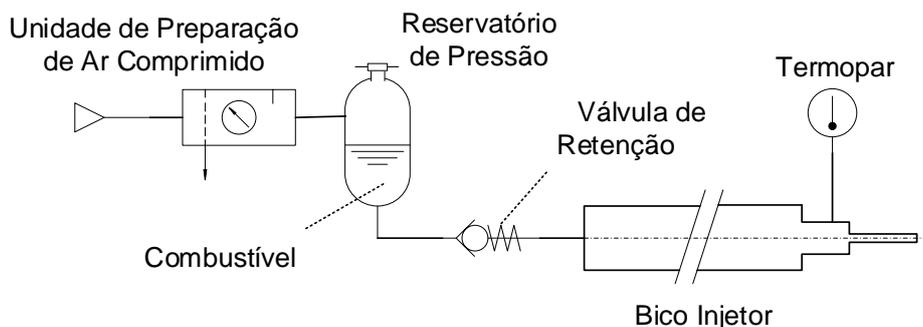


Figura 9 – Fluxograma simplificado do processo de produção de fumaça.

Na realização dos ensaios, o bico injetor foi posicionado na seção de testes do túnel de vento e o sistema de aquecimento foi acionado. Neste procedimento, durante o aquecimento do bico injetor, o combustível é preparado e abastecido no reservatório de pressão e a linha de ar comprimido permanece fechada inicialmente. Quando o sistema atinge 650 °C, a linha de ar comprimido é aberta e regula-se a pressão. O primeiro ensaio foi realizado com o túnel desligado, para avaliação da performance da produção de fumaça, utilizando-se a concentração de 100% glicerina. Nos testes seguintes, variações de velocidade em intervalos de 3 m/s foram aplicadas no túnel até uma velocidade máxima de 15 m/s e, em função da qualidade da fumaça produzida, foi determinada uma pressão para o reservatório, variando de 2 bar a 4 bar. O processo foi repetido para diferentes concentrações do combustível e, para cada conjunto de concentração, velocidade e pressão, imagens para avaliação visual da densidade e da dispersão da fumaça no fluxo foram registradas. As demais concentrações de combustível utilizadas foram com 75% e 50% de glicerina em mistura com água. A Fig. 10 ilustra os instrumentos utilizados nos ensaios. Utilizando uma câmera fotográfica, foram registradas entre 10 e 20 imagens por configuração, e destas, foram selecionadas 3 imagens que melhor representam a visualização do fluxo para análise da dispersão da fumaça.

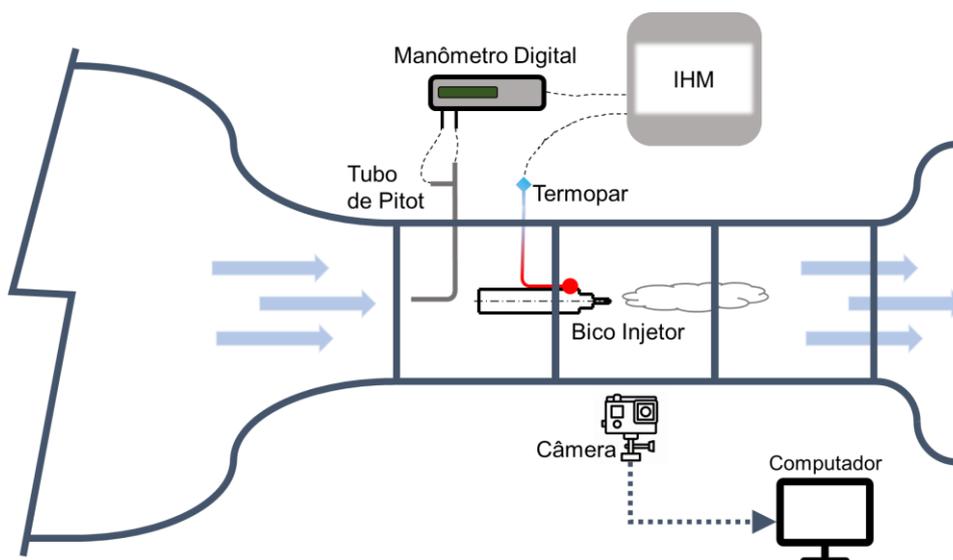


Figura 10 – Instrumentação e dispositivos utilizados para os ensaios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro ensaio foi realizado com o túnel desligado, analisando-se o sistema de aquecimento e a características da fumaça produzida. A concentração de combustível utilizada foi de 100% glicerina, com uma pressão de 2 bar. Observa-se na Fig. 11(a) que a densidade da fumaça produzida é satisfatória, sendo possível identifica-la facilmente. Percebe-se também que ela se dispersa rapidamente, de modo que o feixe de fumaça que deixa o bico logo se transforma em uma nuvem densa, efeito este que não é desejado, pois as linhas devem ser o mais finas e constantes possível. Esse efeito se deve ao fato de que há somente a pressão do sistema de abastecimento agindo no sistema, quando a fumaça se encontra em ambiente aberto, ela tende a se dissipar. A Fig. 11(b) ilustra o comportamento da fumaça sob as mesmas condições, porém com o túnel de vento ligado. Observa-se que a dispersão da fumaça diminui, tendo uma característica mais linear e constante. Na Fig. 11 observa-se um sistema de células de carga presente na seção de testes, que não interfere e não faz parte do ensaio.



Figura 11 – Ensaio de performance do sistema de aquecimento e produção de fumaça e análise do ângulo de dispersão.

Para a análise da dispersão, foi utilizado o *software WebPlotDigitizer*, em que é possível obter-se o ângulo entre dois pontos em uma imagem por meio da leitura dos pixels da mesma. O primeiro ponto é a saída do bico injetor e o segundo é a posição no feixe de fumaça que não apresenta uma variação perceptível, sendo praticamente constante.

Para as velocidades do vento de 3 m/s, 6 m/s e 9 m/s, a visibilidade da fumaça apresentou bom resultado, a partir de 9 m/s o feixe de fumaça se mostrou menos nítido, sendo necessário aumentar a pressão do sistema, de 2 bar para 4 bar. A Fig. 12 apresenta uma comparação entre a visibilidade da fumaça nos casos críticos, a Fig. 12(a) apresenta o resultado para a velocidade de 9 m/s e 2 bar de pressão, a Fig. 12(b) apresenta o resultado para 12 m/s e 2 bar com uma baixa visibilidade da fumaça e a Fig. 12(c) apresenta uma correção da visibilidade da fumaça com o aumento da pressão, mantendo-se 12 m/s de velocidade do vento e aplicando-se 4 bar de pressão.

Para a velocidade de 15 m/s foi constatada a mesma situação, com o aumento da pressão para 4 bar também foi observada uma significativa melhora na visibilidade do feixe de fumaça. Foram registradas entre 10 e 20 imagens de cada configuração de parâmetros, sendo selecionadas as 3 imagens que melhor representaram o ensaio: a melhor, a pior e uma intermediária. Essas imagens foram analisadas quanto ao ângulo de dispersão da fumaça, obtendo-se uma média dos valores de dispersão e seu desvio padrão. Os resultados obtidos são apresentados no gráfico da Fig. 13.

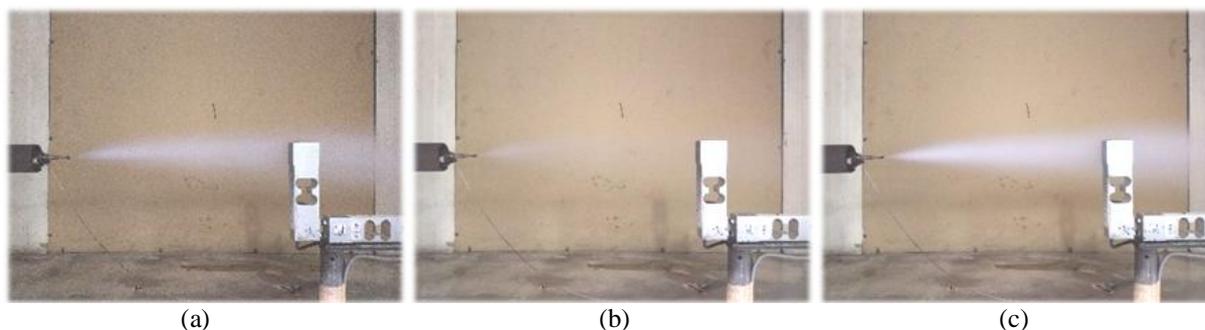


Figura 12 – Análise visual da densidade da fumaça para as configurações de ensaio: (a) 9 m/s e 2 bar, (b) 12 m/s e 2 bar e (c) 12 m/s e 4 bar.

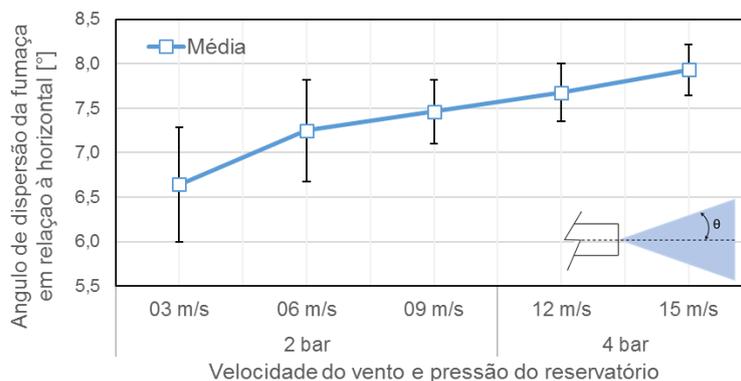


Figura 13 – Médias dos ângulos de dispersão para o combustível com 100% glicerina.

As configurações de velocidade e pressão que não apresentaram visibilidade suficiente não foram analisadas. Os resultados apresentaram um ligeiro aumento do ângulo de dispersão proporcional ao aumento da velocidade do vento no túnel. Em contrapartida, o comportamento do desvio padrão é o inverso. Isso significa que, conforme a velocidade do vento aumenta, o feixe de fumaça se apresenta mais constante. Entretanto, o escoamento acaba forçando a fumaça a ser liberada por meio de uma zona de baixa pressão na saída do bico, resultado do aumento de velocidade do escoamento, ocasionando o aumento do ângulo de dispersão, pois, nesse caso, não é somente a pressão do sistema que afeta a produção da fumaça.

O procedimento de ensaio foi realizado também para um combustível com 75% de glicerina em volume. O mesmo comportamento foi observado para uma velocidade do vento de 12 m/s, não foi possível identificar o feixe de fumaça, como ilustrado na Fig. 14(a). Ao aumentar a pressão do sistema para 4 bar, ao invés de um aumento na visibilidade da fumaça, observou-se a formação de jatos de combustível em forma líquida, provenientes da água da mistura que apresenta um ponto de ebulição muito mais baixo. Essa diferença de temperatura de ebulição separou os componentes da solução no momento em que entram no bico injetor aquecido, resultando na ebulição precoce da água. O vapor de água preencheu os espaços do bico, impedindo a troca térmica entre as paredes do bico e o restante da solução, não havendo condições adequadas para que a glicerina entrasse em ebulição. Desta forma, não foram realizadas análises para 15 m/s. A Fig. 14(b) ilustra um jato de combustível expelido pelo bico injetor.

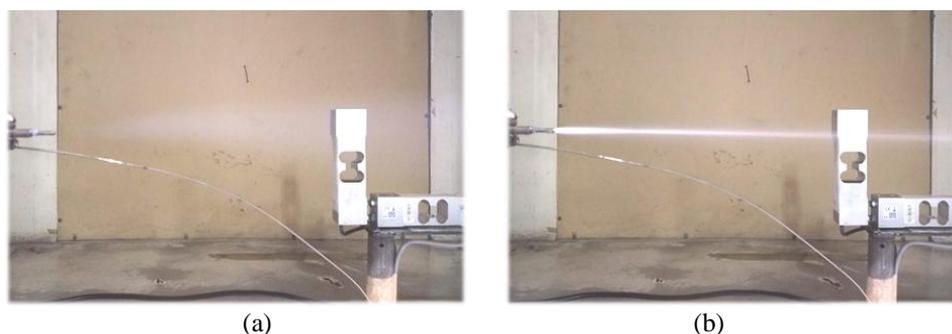


Figura 14 – Resultados obtidos para 75% de glicerina e velocidade do vento de 12 m/s: (a) baixa visibilidade com pressão de 2 bar e (b) jato expelido pelo bico com pressão de 4 bar.

Os resultados das imagens analisadas nos ensaios utilizando as concentrações de 75% e 100% de glicerina são comparados na Fig. 15. Percebe-se que as médias do ângulo de dispersão, para todas as velocidades, são bem próximas, sendo ligeiramente mais baixas para a mistura com 75% de glicerina. O ensaio com uma mistura de combustível tendo 50% de glicerina também não apresentou resultados satisfatórios em relação à fumaça produzida.

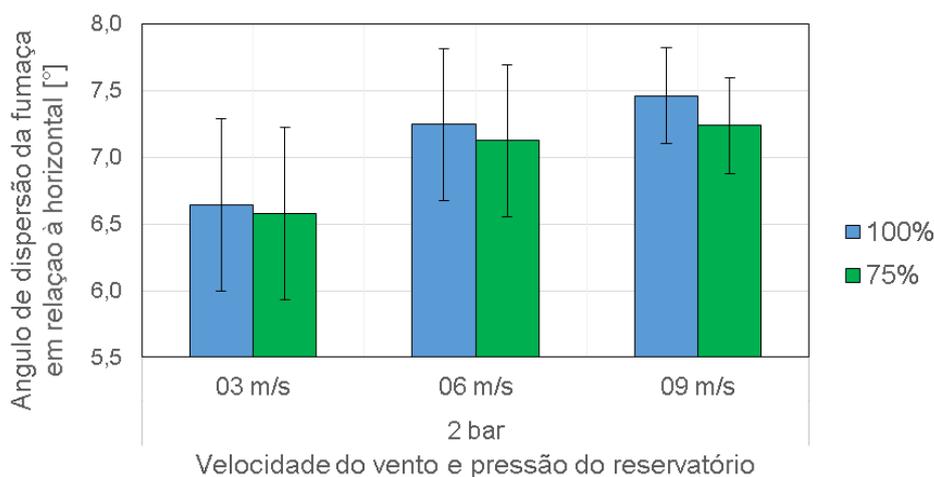


Figura 15 – Comparação entre os resultados de ângulo de dispersão de fumaça para combustíveis com concentrações de 100% e 75% glicerina.

Com a aplicação dos parâmetros que apresentaram os melhores resultados, combustível com 100% de glicerina, velocidade do vento de 12 m/s e pressão de 4 bar, foi realizado um ensaio de visualização de fluxo utilizando um perfil aerodinâmico NACA 0018. A fumaça produzida foi injetada no fluxo centralizada em relação ao perfil e, para o ângulo de ataque considerado, observa-se a formação de uma linha de fluxo sobre o perfil com baixa dispersão até o bordo de fuga, conforme mostra a Fig. 16. A densidade da fumaça no feixe produzido foi adequada para a visualização do fluxo, mas salienta-se que um contraste adequado deve ser utilizado na seção de testes do túnel.



Figura 16 – Resultado da produção de fumaça injetada no fluxo de vento sobre um perfil aerodinâmico.

5. CONCLUSÕES

Um sistema de produção e injeção de fumaça foi desenvolvido e confeccionado para a aplicação desta técnica de visualização de fluxo em túnel de vento e ensaios foram realizados para diferentes configurações dos parâmetros de processo.

A densidade e o ângulo de dispersão da fumaça expelida pelo bico injetor foram avaliados em uma análise comparativa das diferentes concentrações de combustível, sendo elas: 100%, 75% e 50% de volume de glicerina misturada com água não caracterizada. Os resultados obtidos com a utilização de 100% de glicerina se mostraram superiores aos das demais misturas, permitindo a melhor visualização de fluxo no túnel de vento. Observou-se a clara influência dos parâmetros de processo na formação e no comportamento da fumaça produzida. Com a melhor configuração registrada, um ensaio foi realizado aplicando-se a fumaça sobre um perfil aerodinâmico NACA 0018 e a linha de fluxo e seu comportamento foi observada com nitidez, porém espessa.

A adição de um pulmão, ou reservatório, após a produção da fumaça, para armazená-la pode suavizar o feixe de fumaça, pois a fumaça seria acumulada dentro desse reservatório e injetada no túnel à pressão constante, de forma homogênea. Assim, o sistema pode ser posicionado na área externa do túnel e a fumaça seria injetada no fluxo por meio de uma pequena tubulação, tendo o mínimo de influência sobre o escoamento. Outro aprimoramento a ser considerado é a implementação de uma iluminação adequada para o registro de imagens, como uma cortina de laser, que aumenta significativamente a qualidade das imagens capturadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, pela estrutura e condições para a realização deste trabalho, e em especial às equipes do Laboratório de Energia Eólica da PUCRS – LAB-Eólica e do Laboratório de Operações Unitárias da PUCRS – LOPE.

REFERÊNCIAS

- Alé, J. A. V., 1998. Visualização de Fluxo e Tratamento de Imagens do Escoamento em Corpos Submersos, Projeto Fapergs.
- Barlow, J. B., Rae jr, W. H., Pope, A., 1999. Low speed wind tunnel testing. John Wiley & Sons.
- Blocken, B., van Druenen, T., Toparlar, Y., Malizia, F., Mannion, P., Andrienne, T., Marchal, T., Maas G., Diepens, J., 2018. Aerodynamic drag in cycling pelotons: new insights by CFD simulation and wind tunnel testing. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 179, pp. 319-337.
- Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., 2017. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. McGraw-Hill.
- Ferreira, A. D. Thiis, T. K., Freire, N. A., 2015. Experimental and computational study on the surface friction coefficient on a flat roof with solar panels. In: 14th International Conference on Wind Engineering (ICWE14), Porto Alegre.
- FISPQ – glicerina. 2017. Labsynth Produtos para Laboratórios Ltda. Disponível em: <<http://downloads.labsynth.com.br/FISPQ/rv2012/FISPQ-%20Glicerina.pdf>>. Acesso em: 16/11/2019.

- FISPQ – parafina histológica. 2017. Labsynth Produtos para Laboratórios Ltda. Disponível em: < <http://downloads.labsynth.com.br/FISPQ/rv2012/FISPQ-%20Parafina%20Histologica.pdf>>. Acesso em: 16/11/2019.
- FISPQ – querosene. 2019. Petrobras Distribuidora S.A. Disponível em: < <http://www.br.com.br/wcm/connect/3cafaeac-6216-4321-ae54-dcbbe3b0446e/fispq-quim-querosene-iluminante.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IQYxc1j>>. Acesso em: 16/11/2019.
- Glycerine - Boiling and Freezing Points, 2010. Engineering Toolbox. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/glycerine-boiling-freezing-points-d_1590.html>. Acesso em: 30/09/2019.
- Houghton, E. L., Carpenter, P. W., Collicott, S., Valentine, D., 2013. Aerodynamics for Engineering Students. Butterworth-Heinemann.
- Kazemi, S. A., Nili-Ahmadabadi, M., Sedaghat, A., Saghafian, M., 2016. Aerodynamic performance of a circulating airfoil section for Magnus systems via numerical simulation and flow visualization. Energy, vol. 104, pp. 1-15.
- Kumar, M. S., Naiju, C. D., Patruni, H., 2018. Experimental Study and CFD Analysis of an Aerofoil Structure for Automotive Body Design. SAE Technical Paper. n. 2018-28-0091
- Lo, K. H., Kontis, K., 2017. Flow around an articulated lorry model. Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 82, pp. 58-74.
- Ozmen, Y., Baydar, E., Van Beeck, J. P. A. J., 2016. Wind flow over the low-rise building models with gabled roofs having different pitch angles. Building and Environment, vol. 95, pp. 63-74.
- Sicot, C., Deliancourt, F., Boree, J., Aguinaga, S., Bouchet, J. P., 2018. Representativeness of geometrical details during wind tunnel tests. Application to train aerodynamics in crosswind conditions. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 177, pp 186-196.

SMOKE TECHNIQUE EQUIPMENT DESIGN FOR WIND TUNNEL FLOW VISUALIZATION

Abstract. *The lack of visibility hinders the understanding of the interaction of the wind and the submerged body phenomena. There are many visualization techniques, such as tuft and smoke visualization technique. The present work objective is the design and test of an equipment for wind tunnel flow visualization using smoke. The proposed methodology consists of a nozzle system design to inject smoke, allowing flow visualization around airfoils, and analyze several process parameters. Different concentrations of glycerine and water solution were analyzed for smoke production: 100% glycerine by volume, 75% and 50%. The produced smoke behavior visually was compared with 3 m/s to 15 m/s wind tunnel speed tests. The glycerin without water solution presented better smoke production and it was possible to visualize the streamlines around an airfoil.*

Key words: *Wind tunnel, Visualization by smoke, Flow Visualization*