

ESCOAMENTO EM TORNO DO CORPO DE AHMED PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS RELATIVAS ENTRE O CORPO E O SOLO

Leonardo Mendes de Souza, leonardomendes3@hotmail.com¹
Leandro Oliveira Salviano, leandro.salviano@unesp.br²
Fernando Augusto Alves Mendes, fernandomendes@ufgd.edu.br¹
Augusto Salomão Bornschlegell, augustosalomao@ufgd.edu.br¹

¹UFGD, FAEN, Rodovia Dourados - Itahum, Km 12 - Cidade Universitaria, Cx. Postal 364 - CEP 79804-970

²UNESP, Departamento de Engenharia Mecânica. Av. Brasil, 56, Centro, 15385000 - Ilha Solteira, SP

Resumo. O presente trabalho constituiu na realização do estudo numérico e experimental, do escoamento em torno do corpo de Ahmed para velocidades de 10 m/s e 1 m/s e diferentes distâncias relativas entre o corpo e o solo, estipuladas em 1, 0,5 e 0,2. Os estudos numéricos foram realizados em software OpenFOAM 6.0. Os estudos experimentais consistiram na visualização em túnel de vento de um protótipo em escala do Corpo de Ahmed. Foram encontrados, numericamente, os campos de pressão, velocidade, linhas de corrente e coeficientes de arrasto e sustentação. Foram observadas as estruturas já conhecidas, além da formação de uma zona de recirculação adicional. Foi estabelecida uma relação entre coeficientes e distância relativa de vão livre.

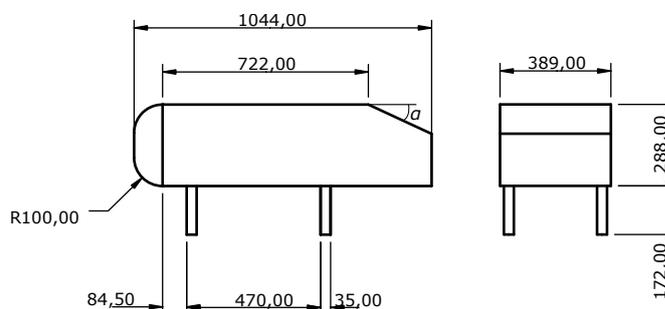
Palavras chave: Escoamento, Corpo de Ahmed, Túnel de Vento, Efeito de Parede

1. INTRODUÇÃO

O estudo da aerodinâmica em veículos terrestres é um fator primordial na busca pela maximização da eficiência no transporte terrestre. A aerodinâmica veicular engloba fatores de extrema relevância, como por exemplo a estabilidade do veículo, os ruídos emitidos e o consumo de energia, que é diretamente ligado ao fator mais estudado quando se fala de aerodinâmica veicular, a força de arrasto. Esta por sua vez, é definida como a força contrária ao movimento de um corpo imerso em um fluido.

Uma representação genérica para o estudo aerodinâmico de veículos terrestres Fig.1 foi proposta por Ahmed *et al.* (1984). A proposta é de um modelo de veículo terrestre simplificado para fins de estudos aerodinâmicos. Este modelo é caracterizado pelo corpo alongado, sua face frontal com as arestas arredondadas e um declive na parte posterior do corpo com uma angulação específica, (α) amplamente estudada.

Figura 1. Corpo de Ahmed [mm](Adaptado de Ahmed *et al.* (1984))



As ferramentas comumente utilizadas para tal estudo abrangem duas grandes áreas, o estudo numérico e o estudo experimental. O estudo numérico, realizado normalmente por softwares CFD (*Computational Fluid Dynamics*) é caracterizado pela praticidade, confiabilidade e obtenção de resultados quantitativos consistentes, se adequadamente empregados. Este tipo de estudo se torna prático por não exigir inicialmente grandes gastos em protótipos, sendo necessários apenas conhecimento do problema estudado e de um computador condizente com a complexidade do modelo a ser tratado. Para Raina *et al.* (2017), por exemplo, foi possível investigar a influência de defletores, posicionados no Corpo de Ahmed, no coeficiente de arrasto, gerando resultados para as velocidades de entrada de 16 m/s e 40 m/s, com a angulação, α , de 25°.

O estudo experimental, normalmente realizado em túneis fluidodinâmicos, é caracterizado pela obtenção precisa de resultados confiáveis, como as forças de arrasto e sustentação. No estudo experimental é possível uma observação direta da influência dos parâmetros geométricos do estudo e das estruturas encontradas no escoamento. Em Hanfeng *et al.* (2016), por exemplo, foi possível reduzir o coeficiente de arrasto de um modelo experimental do Corpo de Ahmed, usando defletores instalados no mesmo, seus resultados foram obtidos utilizando *scanners* de pressão e visualização de filmes de óleo. Já em Tunay *et al.* (2016), foram utilizadas tanto ferramentas experimentais, *particle image velocimetry* (PIV), quanto numéricas, *Large Eddy Simulation* (LES), para investigar as estruturas formadas na esteira subsequente ao Corpo de Ahmed.

Como objetivo, este trabalho pretende analisar e comparar numericamente e experimentalmente a influência do posicionamento vertical de um modelo em escala 1/10 do corpo de Ahmed simplificado, em relação ao solo, ou seja, sua altura livre do chão.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente trabalho foram abordados dois métodos diferentes de análise de escoamento para fins de comparação, a simulação numérica do escoamento em software livre OpenFOAM 6.0. e a visualização experimental do caso em túnel de vento.

Em ambos os casos, definir alguns fatores é de suma importância para caracterizar o escoamento estudado. Assim ficam definidos o Número de Reynolds, dado pela Eq.(1), a relação de alturas do vão livre do solo, Eq.(2).

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (1)$$

Sendo Re , Número de Reynolds, um parâmetro adimensional que caracteriza o escoamento, $V(m/s)$, a velocidade de referência, neste caso é a velocidade de entrada estipulada nas condições de contorno, $D(m)$, o comprimento característico adotado, para este estudo foi utilizada a altura do Corpo de Ahmed em escala (28,8 mm) e $\nu (m^2/s)$, a viscosidade cinemática do ar.

$$R_{YD} = \frac{Y}{D} \quad (2)$$

Com R_{YD} sendo a relação de alturas do vão livre, $Y(m)$, principal fator estudado neste trabalho, a altura do vão livre do solo.

Ficam definidos também os coeficientes de arrasto e sustentação expressos pela Eq.(3).

$$C_{D,L} = \frac{2 \cdot F_{D,L}}{\rho \cdot A \cdot V^2} \quad (3)$$

Na forma que, $C_{D,L}$, são os coeficientes de arrasto e sustentação do corpo, $F_{D,L} (N)$, as força de arrasto e de sustentação, $\rho (1,225 kg/m^3)$, a densidade do ar atmosférico, $A (1,12 \cdot 10^{-3} m^2)$, a área frontal do Corpo de Ahmed.

2.1 Estudo numérico

Todas as simulações foram realizadas em software livre OpenFoam 6.0. Para solução numérica do escoamento o software faz uso das equações de Navier-Stokes juntamente com a equação de conservação de massa. O ambiente foi modelado de forma que o escoamento seja isotérmico, incompressível com suas propriedades constantes e avaliado como um regime transitório. O fluido simulado no escoamento é Newtoniano e possui as mesmas propriedades do ar atmosférico. Adicionalmente, foi estipulado um ambiente bidimensional, desta forma, todos as incógnitas referentes ao terceiro componente vetorial nas equações citadas anteriormente são desconsideradas.

Para os esquemas numéricos utilizados na simulação, a integração no tempo foi definida como sendo, de segunda ordem do tipo *backward*, ou passo para trás. Para os termos difusivos foi adotado o método das diferenças centrais. No tratamento dos termos advectivos, o esquema de resolução adotado foi o *upwind*, de segunda ordem. O modelo de turbulência adotado para resolução do presente escoamento foi o de Spalart and Allmaras (1992).

2.1.1 Domínio, condições de contorno e condição inicial

A malha teoricamente é construída apenas em três dimensões, porém como o trabalho visa apenas o escoamento em duas dimensões, o terceiro componente vetorial da malha foi construído apenas com um elemento. As faces que seriam a frente e o fundo da malha foram atribuídos a ambas a condição de *empty*. Esta condição faz com que a ferramenta de solução não resolva as equações governantes na direção do terceiro componente vetorial.

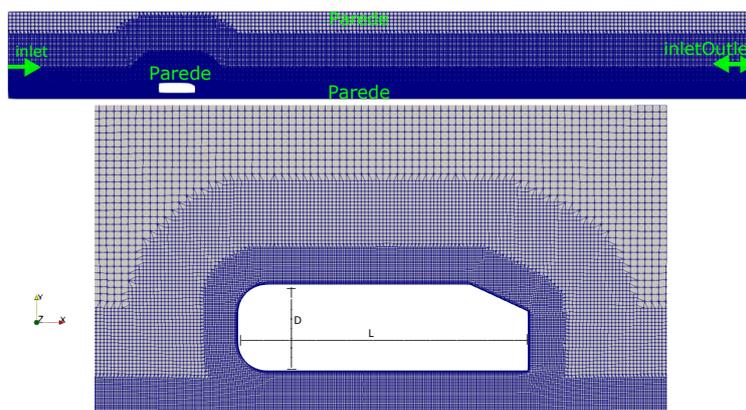
As dimensões da malha foram construídas de modo a representar as condições encontradas experimentalmente, assim as dimensões externas são semelhantes as dimensões encontradas na seção de testes do túnel de vento, porém está foi

alongada para minimizar a influência das condições de contorno no resultado. As dimensões do sólido imerso no escoamento são semelhantes ao protótipo construído em escala 1/10 em relação ao Corpo de Ahmed simplificado (sem as rodas).

A malha final construída possui dimensões de 225 mm por 1920 mm e possui 145939 elementos, sendo, 142653 hexahédricos, 33 prismas triangulares, 3153 poliedros de 7 faces e 100 poliedros de 8 faces, representada pela Fig.2, com o corpo de prova posicionado de forma a garantir que a distância da entrada fosse maior que $4 \cdot L$, a distância da saída maior que $15 \cdot L$ e distância do topo maior que $5 \cdot D$, sendo L (m) o comprimento horizontal do corpo de prova (104,4 mm). Para as relações de alturas do vão livre (R_{YD}) foram estabelecidas as proporções de 1, 0,5 e 0,2.

As condições de contorno foram definidas de modo a representar da forma mais fiel possível o ambiente experimental utilizado, neste caso a seção de testes do túnel de vento. Assim foram definidas quatro regiões principais no escoamento, sendo elas: a entrada (*inlet*) a qual foram impostas duas velocidades iniciais constantes para cada caso, 1 m/s e 10 m/s, a saída (*inletOutlet*) condição que permite a reentrada de ar pela saída, o solo e topo do domínio (representando as paredes do túnel), foram definidos ambos com as mesmas características, estáticos e atribuídos a ambos a condição de parede. A última região é a superfície corpo de prova em si, o modelo do Corpo de Ahmed, o qual também é atribuído a condição de parede, assim ele é interpretado na malha como um sólido imerso no escoamento.

Figura 2. Malha e condições de contorno



Para o escoamento estudado são esperadas características transitórias no tempo. A solução de um problema transiente exige a definição de uma condição inicial. porém a ferramenta de resolução de escoamentos em regime transiente exige que seja imposta uma condição inicial para o escoamento. Então, o escoamento é inicialmente resolvido em regime permanente utilizando a ferramenta de resolução *simpleFoam*. Assim que os resultados alcançam um nível aceitável de convergência, resíduos reduzidos próximos a $1e^{-4}$, o resultado encontrado é utilizado como condição inicial para resolução em regime transiente. Desta forma, o escoamento em regime transiente, é resolvido, para um intervalo de tempo de 1 segundo, utilizando a ferramenta *pisoFoam*, com um tempo de obtenção dos resultados menor, graças as condições iniciais com baixos valores de resíduos.

2.2 Estudo Experimental

O estudo experimental foi realizado de forma a garantir a mínima interferência possível de fatores externos e garantir que os únicos parâmetros governantes fosse Re e R_{YD} .

2.2.1 Túnel de vento

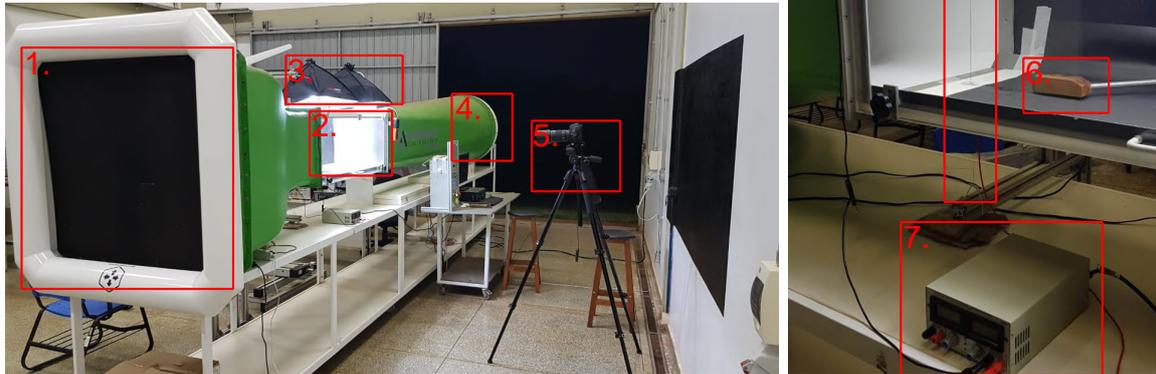
O túnel de vento utilizado para o estudo experimental foi um túnel AA-TVSH (adaptado), da fabricante Aeroalcool Tecnologia Ltda. este túnel de vento é caracterizado por ser aspirado, de circuito aberto, subsônico com um seção de testes de 465x465x1200 mm. As adaptações realizadas no túnel de vento consistiram na substituição da placa superior da seção de testes por uma placa transparente fabricada em acrílico, garantindo uma passagem de luz incidente na seção de testes. Para este estudo a placa traseira da seção de testes também foi substituída por uma placa de madeira pintada em preto, garantindo assim uma redução de reflexos e contraste do elemento traçador. Também foi fixado papel preto no piso do túnel para contraste. A montagem utilizada para visualização é expressa na Fig.3.

2.2.2 Técnicas de visualização

Para a obtenção das linhas de corrente do escoamento o elemento traçador escolhido foi a fumaça. Esta foi produzida aquecendo um fio embebido em glicerina. O fio foi esticado e disposto no início da seção de testes Fig.3. com ajuda de

Figura 3. Montagem do elemento traçador e do setup de fotografias

1. Entrada de ar
2. Seção de testes
3. Iluminação
4. Saída de ar
5. Equipamento fotográfico
6. Corpo de prova
7. Fonte de alimentação
8. Fio aquecido (traçador)



um funil foi despejada glicerina em todo seu comprimento e então a partir de uma fonte 0/30 Vcc - 0/5 Acc EQ030F da fabricante Cidepe, o fio foi aquecido, devido passagem de corrente elétrica.

A aquisição das imagens foi feita em período noturno gerando o mínimo possível de luzes externas, garantindo assim uma redução dos reflexos. Foi utilizado sistema de iluminação direcionado para contraste do elemento traçador. A câmera utilizada foi do modelo Canon 6D com a lente fixa macro 100 mm f/2.8, munida de tripé nivelado e um disparador remoto, reduzindo efeito de imagens tremidas devido interferência humana.

O controle da velocidade do escoamento no túnel foi feito utilizando a própria regulagem de rotação do motor do túnel onde a discriminação da velocidade no interior da seção de testes foi mensurada a partir de um anemômetro com tubo de Pitot. A velocidade na seção de testes foi fixada em 1 m/s para todos os casos e altura do corpo de prova em relação ao solo foi dividida da mesma forma que no setup numérico.

O corpo de prova utilizado foi um modelo de madeira em escala 1/10 do Corpo de Ahmed simplificado, com ângulo α igual a 30° .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

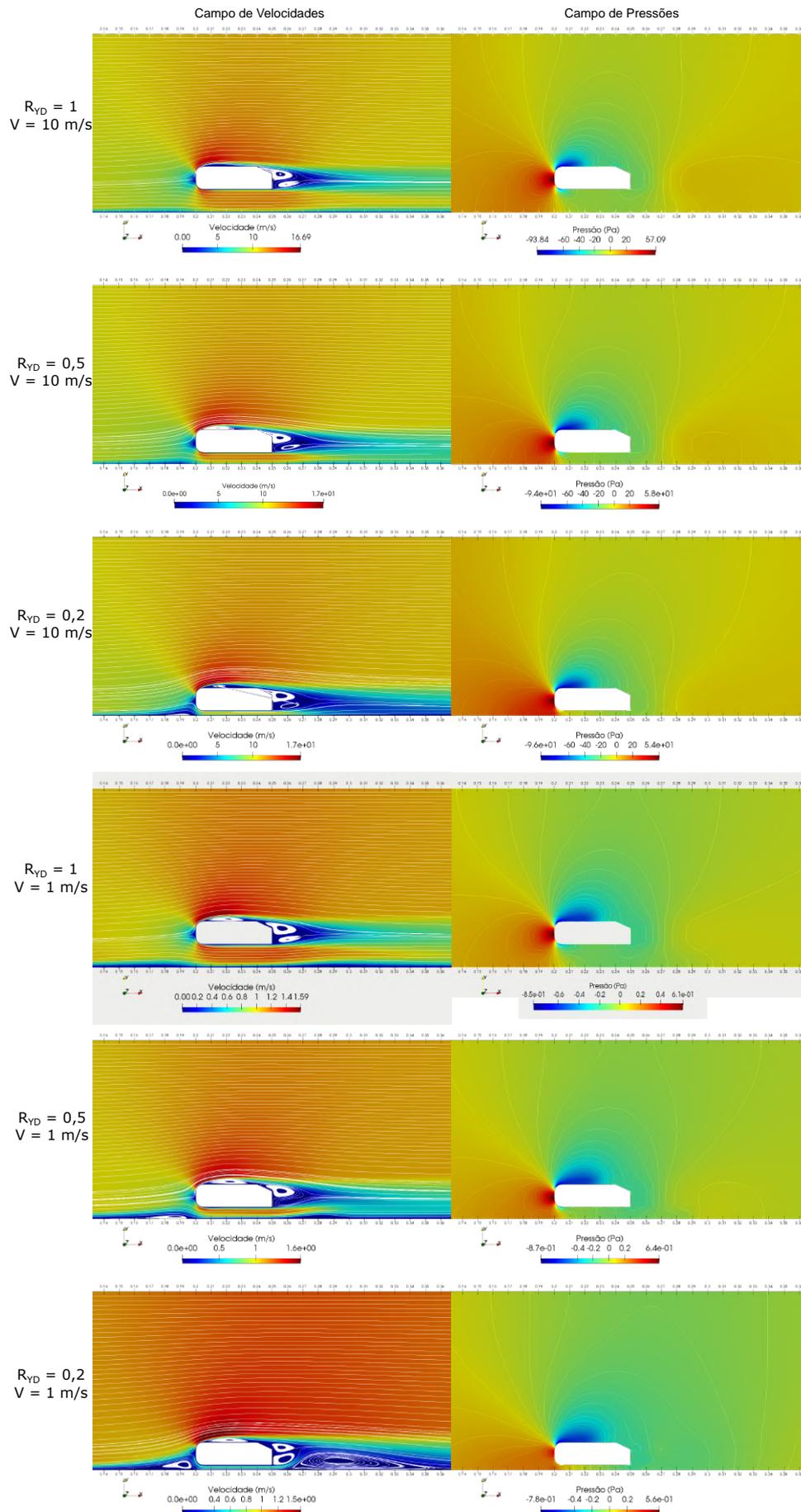
3.1 Resultados numéricos

Com as simulações realizadas foi possível obter os campos de pressão e campos de velocidade com linhas de corrente expressos na Fig.4. Com as linhas de corrente é possível observar algumas estruturas características do escoamento em torno do Corpo de Ahmed. O descolamento da camada limite na superfície superior é notado em todos os casos, porém com o decréscimo de R_{YD} , seu recolamento é notadamente retardado. Este efeito se torna mais expressivo com $V = 1 \text{ m/s}$, onde em $R_{LD} = 0,2$ o ponto de recolamento da camada limite é muito próximo a angulação α , podendo se unir a zona de recirculação subsequente.

Um efeito causado pela alteração da altura do corpo de prova, pode ser percebido na região a frente do corpo de prova. Uma pequena zona de recirculação aliada a um decréscimo significativo no campo de velocidades é notado junto ao chão em $R_{YD} = 0,2$ para $V = 10 \text{ m/s}$. Com a diminuição da velocidade de entrada para $V = 1 \text{ m/s}$ e conseqüentemente, a atenuação da forças inerciais, esta zona de recirculação já aparece em $R_{YD} = 0,5$, porém agora maior, da forma que em $R_{YD} = 0,2$, esta zona de recirculação já está notavelmente mais alta que Y e desloca ligeiramente o ponto de estagnação para cima.

Em todos os casos foram observados as duas bolhas de recirculação, características do escoamento em torno do Corpo de Ahmed, com poucas ou nenhuma alteração com o passar dos casos. Particularmente, a esteira formada em $V = 1 \text{ m/s}$, onde $R_{YD} = 0,2$, houve a formação de uma grande zona de recirculação adicional, posterior as já conhecidas bolhas duplas. Em função da restrição, perda de carga, gerada na passagem do ar por baixo do corpo de prova, sua energia cinética diminuiu quando comparada aos outros casos, evidenciado pelo campo de velocidade. Esta diminuição de energia cinética traz duas conseqüências. A primeira, na saída do fluxo abaixo do corpo, o pouco ar ali presente é induzido pela corrente de ar superior, mudando sua trajetória e assim, induzindo a formação da zona de recirculação posterior. A segunda, pelo menor fluxo de ar entrando abaixo do corpo, forma-se em frente ao corpo, outra bolha de recirculação.

Figura 4. Campos de velocidade de pressão para diferentes velocidades e R_{YD}



Os campos de pressão demonstram os efeitos causados por pontos muito importantes em escoamento de um forma geral. O ponto de estagnação, caracterizado pela velocidade nula, é demonstrado pelo pico de pressão logo a frente do corpo de prova.

As zonas de aceleração, onde ocorre o descolamento da camada limite, podem ser observadas pela forte coloração azul, presentes tanto na parte superior do corpo de prova, quanto na parte inferior, porém aqui, esta zona é notavelmente menor e suprimida com a redução de R_{YD} , ao ponto que com $R_{YD} = 0, 2$ e $V = 1 \text{ m/s}$ ela não é percebida.

Também foram estabelecidos os coeficientes de $C_{D,L}$, Fig.5. Inicialmente foi notado oscilações periódicas, em ambos os coeficientes, somente para o caso com $V = 10 \text{ m/s}$ e $R_{YD} = 1$. Estas periodicidades foram confirmadas e calculadas através da ferramenta Transformada Rápida de Fourier (FFT), expressa gráficamente na Fig.6. Foram encontrados os picos de 15 Hz e picos subsequentes múltiplos ao primeiro, em ambos os coeficientes. Esta periodicidade normalmente ocorre quando há emissão alternada de vórtices, onde a frequência encontrada no coeficiente de sustentação seja metade do coeficiente de arrasto, diferente do encontrado neste trabalho.

Foi observado na Fig.5 que o coeficiente de sustentação tende a aumentar com a diminuição de R_{YD} , para ambas velocidades, isto é evidenciado pela tendência de supressão da zona de baixa pressão encontrada na curvatura abaixo do corpo, Fig.4.

Para os casos a $V = 10 \text{ m/s}$, a Fig.5 mostrou que com a diminuição de R_{YD} o coeficiente de arrasto aumentou, isto é notado pela concentração de pressões positivas na frente do corpo que tende a aumentar com a proximidade do solo. Já para $v = 1 \text{ m/s}$ o mesmo efeito só é observado para $R_{YD} = 1$ e $R_{YD} = 0, 5$. Em $R_{YD} = 0, 2$ foi observado o menor coeficiente de arrasto para $v = 1 \text{ m/s}$, este efeito pode ser explicado devido a influência do aumento da zona de recirculação a frente do corpo de prova, está além de deslocar o ponto de estagnação, também reduziu sua influência no campo de pressão fazendo com que o coeficiente de arrasto fosse menor que nos casos anteriores.

Figura 5. Respectivamente C_D e C_L para ambos casos

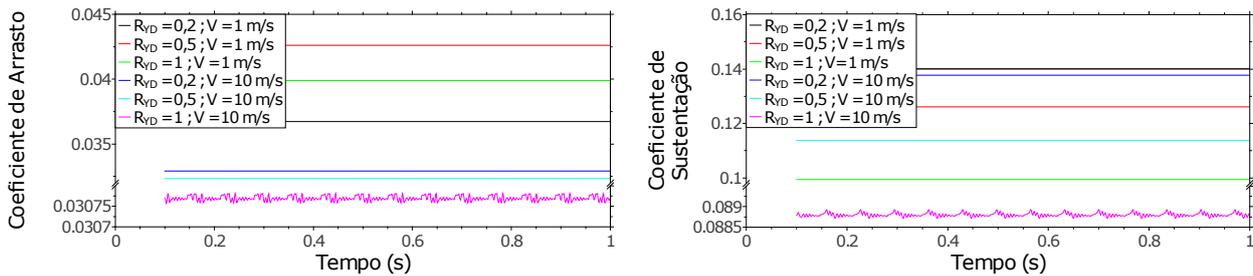
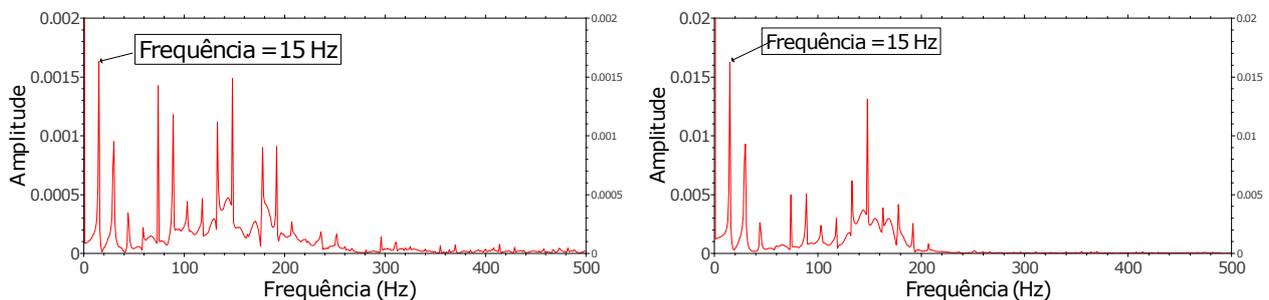


Figura 6. Transformada rápida de Fourier para o caso a 10 m/s e $R_{YD} = 1$, respectivamente C_D e C_L



3.2 Resultados experimentais

Apresenta-se, na Fig.7, os resultados obtidos por meio de visualização de escoamento. Nestes também puderam ser observadas alguns características pertinentes ao Corpo de Ahmed. É percebido, em todas as 3 relações R_{YD} , um leve descolamento da camada limite, na face superior do corpo de prova, seguido por seu recolamento, semelhante ao observado nos estudos numéricos. Subsequente, foi notada a formação das zonas de recirculação na região traseira do corpo de prova. Infelizmente, devido a formação de sombras, a visualização na região a baixo do corpo de prova é prejudicada. Porém, logo a frente do mesmo, é notado o desvio do traçador, semelhante a zona de recirculação citada nos resultados numéricos. Como o traçador não preenche as zonas de recirculação, estas não se apresentam explicitamente.

Figura 7. Caso experimental a 1 m/s para, a) $R_{YD} = 1$, b) $R_{YD} = 0,5$ e c) $R_{YD} = 0,2$



4. CONCLUSÃO

As estruturas comumente observadas para o escoamento em torno do corpo de ahmed foram reproduzidas e seus comportamentos, conforme eram alterados R_{YD} e a velocidade de entrada, foram apontados. Foram observadas diferenças no escoamento bem expressivas com a alteração da velocidade de entrada e de R_{YD} . Fica evidenciado a mudança do comportamento do escoamento, para $V = 10\text{ m/s}$ quando R_{YD} é reduzido de 1,0 para 0,5, com a supressão da periodicidade encontrada em seus coeficientes de arrasto e sustentação. Foram encontrados os $C_{D,L}$ para cada relação R_{YD} e velocidade. Observou-se, o fenômeno de formação de bolhas adicionais de recirculação com o decréscimo de R_{YD} .

5. AGRADECIMENTOS

Ficam aqui registrados os agradecimento especiais aos técnicos Evandro e Marcelo pelo apoio durante os ensaios experimentais e a Intuição, Universidade Federal da Grande Dourados, por ceder o espaço em que o trabalho foi realizado.

6. REFERÊNCIAS

- Ahmed, S.R., Ramm, G. and Faltin, G., 1984. "Some Salient Features Of The Time-Averaged Ground Vehicle Wake". *SAE Technical Paper 840300*.
- Hanfeng, W., Yu, Z., Chao, Z. and Xuhui, H., 2016. "Aerodynamic drag reduction of an ahmed body based on deflectors". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 148, pp. 34 – 44.
- Raina, A., Harmain, G. and Haq, M.I.U., 2017. "Numerical investigation of flow around a 3d bluff body using deflector plate". *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 131-132, pp. 701 – 711.
- Spalart, P. and Allmaras, S., 1992. "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows". *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*.
- Tunay, T., Yaniktepe, B. and Sahin, B., 2016. "Computational and experimental investigations of the vortical flow structures in the near wake region downstream of the ahmed vehicle model". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 159, pp. 48 – 64.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.