[REEC] Revista Eletrônica de Engenharia Civil
Volume 21, N° 1, 2026 31 - 45
https://revistas.ufg.br/reec

INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE UMA PLACA PLANA NO COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO EM TORNO DE UM CILINDRO CIRCULAR LISO E RÍGIDO

Influence of the presence of a flat plate on the flow behavior around a smooth and rigid circular cylinder

Edson Luis Nicolait Fernandes [1], **Acir Mércio Loredo-Souza** [2], **Edith Beatriz Camaño Schettini** [3]

PALAVRAS CHAVE:

Desprendimento de vórtices;
Cilindro circular;
Camada limite;
Coeficiente de arrasto;
Coeficiente de sustentação.

KEYWORDS:

Vortex shedding;
Circular cylinder;
Boundary layer;
Drag coefficient;
Lift coefficient.

RESUMO: Em algumas aplicações na engenharia, cilindros circulares próximos a contornos planos são frequentemente sujeitos a escoamentos normais aos seus eixos. As simulações físicas com esse tipo de arranjo geralmente são feitas com cilindros montados próximos a placas planas no interior de túneis de vento ou de água. No presente estudo, o desprendimento de vórtices e os coeficientes aerodinâmicos em um cilindro circular liso e rígido, imerso em um escoamento próximo a uma placa plana, foram investigados experimentalmente. Os experimentos foram realizados com dois escoamentos incidentes distintos, com número de Reynolds, baseado no diâmetro do cilindro (D), de $3{,}1 \times 10^4$. A espessura das camadas limites (δ) desses escoamentos foi de $1D$ e $1{,}4D$. Os resultados mostraram que tanto o coeficiente de arrasto (C_D) quanto o de sustentação (C_L) foram fortemente influenciados pela razão da distância entre o cilindro e a placa (G/D) e que δ afetou esses coeficientes de maneira desigual. A análise dos espectros de potência dos sinais de fio quente e dos sinais do C_L indicou que o desprendimento alternado dos vórtices foi suprimido quando G/D caiu de certo valor crítico – $(G/D)_{cr}$. O $(G/D)_{cr}$ foi de 0,4 para $\delta = 1D$ e de 0,3 para $\delta = 1{,}4D$. Por meio da análise dos espectros de potência também foi possível confirmar os resultados obtidos em estudos anteriores de que o número de Strouhal na faixa intermediária do regime subcrítico é praticamente insensível à presença da placa quando $G/D > (G/D)_{cr}$.

ABSTRACT: *In some engineering applications, circular cylinders near flat boundaries are often subjected to flows normal to their axes. Physical simulations with this type of arrangement are typically conducted with cylinders mounted close to flat plates inside wind or water tunnels. In the present study, vortex shedding and aerodynamic coefficients of a smooth, rigid circular cylinder immersed in a flow near a flat plate were experimentally investigated. The experiments were performed with two distinct incident flows, with a Reynolds number, based on the cylinder diameter (D), of 3.1×10^4. The boundary layer thicknesses (δ) of these flows were 1D and 1.4D. The results showed that both the drag coefficient (C_D) and the lift coefficient (C_L) were strongly influenced by the ratio of the distance between the cylinder and the plate (G/D), and that δ affected these coefficients unevenly. Analysis of the power spectra of hot-wire signals and C_L signals indicated that the alternate vortex shedding was suppressed when G/D fell below a certain critical value – $(G/D)_{cr}$. The $(G/D)_{cr}$ was 0.4 for δ = 1D and 0.3 for δ = 1.4D. Through the power spectral analysis, it was also possible to confirm results from previous studies that the Strouhal number in the intermediate range of the subcritical regime is practically insensitive to the presence of the plate when $G/D > (G/D)_{cr}$.*

*** Contato com os autores:**

Publicado em 28 de junho de 2026

[1] **e-mail: edson.nicolait@suinfra.ufrgs.br (E. L. Nicolait Fernandes)**
Engenheiro Civil, Mestre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
[2] **e-mail: acir@ufrgs.br (A. M. Loredo-Souza)**
Engenheiro Civil, Doutor, Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
[3] **e-mail: bcamano@iph.ufrgs.br (E. B. C. Schettini)**
Engenheira Hídrica, Doutora, Professora, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ISSN: 2179-0612 DOI: 10.5216/reec.V21i1.79811
© 2026 REEC - Todos os direitos reservados.

1. INTRODUÇÃO

Apesar da sua aparente simplicidade, o escoamento em torno de um cilindro circular isolado é bastante complexo. Devido ao seu grande interesse prático, as investigações visando à elucidação dos principais fenômenos físicos associados a este tipo de escoamento, remontam a mais de cem anos. Quando o número de Reynolds [$Re = DU/v$; D = diâmetro do cilindro; U = velocidade da corrente livre; v = viscosidade cinemática do fluido] do escoamento incidente é menor do que 5, as forças viscosas são dominantes e o escoamento permanece aderido à superfície do cilindro. Aumentando-se ainda mais o Re, o escoamento descola e dois vórtices estacionários são formados. Para $Re > 47$ o escoamento na região da esteira próxima torna-se instável e o par de vórtices formado é desprendido alternadamente. Com o aumento gradativo do Re o fenômeno periódico persiste e uma transição de estados contínua se estabelece, caracterizados em uma série de regimes (Roshko, 1954; Zdravkovich, 1990; Sumer e Fredsøe, 1997).

Quando o cilindro está próximo a um contorno plano, a simetria observada no desprendimento alternado dos vórtices na condição de isolamento não é mais possível. Por outro lado, a presença do contorno altera a dinâmica dos campos de pressão e de velocidade e as chances de ocorrer um escoamento incidente com um perfil de velocidades uniforme tornam-se limitadas. Se a superfície do contorno estiver fixa, será gerada uma camada limite na qual naturalmente estará presente um perfil com um gradiente de velocidades. O estado dessa camada limite e as características da sua formação podem influenciar o mecanismo de desprendimento de vórtices e afetar alguns dos principais parâmetros do escoamento, como os coeficientes de pressão (C_P), de arrasto (C_D) e de sustentação (C_L). Além disso, outros fenômenos complexos podem ocorrer devido à interação entre as camadas limites da placa e do cilindro, tornando a análise do escoamento uma tarefa desafiante.

Existem muitas aplicações práticas em que estruturas compostas por cilindros circulares estão próximas a superfícies planas rígidas e estão sujeitas ao escoamento externo de um fluido. Podem-se citar alguns arranjos de tubos e placas presentes nos trocadores de calor e as tubulações lançadas nas proximidades do leito marinho.

A regularidade do desprendimento dos vórtices na esteira de um cilindro próximo a uma placa plana na faixa intermediária do regime subcrítico ($3 \times 10^2 < Re < 3 \times 10^5$) foi avaliada por Bearman e Zdravkovich (1978) por meio da análise dos espectros de potência dos sinais da anemometria de fio quente. Eles concluíram que o desprendimento alternado dos vórtices foi suprimido quando a razão da distância entre o cilindro e a placa (G/D) – [G = distância entre o cilindro e a placa] – era menor do que 0,3. Para G/D maiores, a análise mostrou que o número de Strouhal [$St = fD/U$, onde f é a frequência do desprendimento dos vórtices e U é a velocidade da corrente livre] se manteve, nas palavras dos autores, "notavelmente constante", assumindo valores parecidos com os observados em cilindros isolados. Estudos posteriores mostraram uma boa concordância com esse padrão de estabilidade do St, porém a distância crítica em que ocorreu a supressão dos vórtices – $(G/D)_{cr}$ – apresentou variações. O $(G/D)_{cr}$ foi de 0,2 e 0,3 no trabalho de Lei et al. (1999), com forte dependência da razão da espessura da camada limite incidente (δ/D), até 0,5 no trabalho de Lin et al. (2009). Os valores de St foram muito semelhantes na maioria das pesquisas realizadas na faixa média e superior do regime subcrítico ($1 \times 10^4 < Re < 3 \times 10^5$), assumindo valores no entorno de 0,2. No entanto, na faixa inferior ($3 \times 10^2 < Re < 1 \times 10^4$) os valores foram sensivelmente diferentes quando $G/D < 1{,}5$: 0,27 no trabalho de Lin et al. (2009), 0,29 no de He et al. (2017) e 0,4 no de Price et al. (2002).

Os principais coeficientes aerodinâmicos também foram alvo de intensas pesquisas. Roshko et al. (1975) investigaram os coeficientes de arrasto e de sustentação em um cilindro circular próximo a uma placa plana em um pequeno túnel de vento com escoamento incidente na faixa subcrítica ($Re = 2 \times 10^4$).

Eles observaram uma queda acentuada do arrasto quando o cilindro imergiu na camada limite gerada pela presença da placa. Tal comportamento foi observado mais tarde por Zdravkovich (1985) ao ensaiar cilindros com diâmetros diferentes em uma larga faixa de números de Reynolds ($4{,}8 \times 10^4 < Re < 3 \times 10^5$). Essa correlação importante do arrasto com a espessura da camada limite estimulou este autor a sugerir que o parâmetro governante do C_D seria G/δ e não G/D. Lei et al. (1999) também observaram que o C_D quase não foi afetado pela presença da placa quando o cilindro estava fora da camada limite. No entanto, eles perceberam que o C_D foi ligeiramente maior para camadas limites mais delgadas em G/D pequenos. O comportamento do C_D observado por Nishino et al. (2007) foi semelhante ao do experimento de Zdravkovich (1985) quando este usou o cilindro de maior diâmetro (D = 65 mm). Nesses experimentos, a queda pronunciada do arrasto com a proximidade da placa ocorreu quando $G/D < 0{,}5$.

A dependência marcante do C_D em relação à G/D também foi observada para o comportamento do C_L. No entanto, as investigações conduzidas por Zdravkovich (1985) e por Lei et al. (1999) mostraram que as características da formação da camada limite podem alterar significativamente os resultados do C_L. Lei *et al.* (1999) observaram que o parâmetro apresentou valores negativos (cilindro sendo atraído pela placa) quando foram usadas camadas limites espessadas artificialmente por uma barra de aço lisa. Por outro lado, os valores obtidos por estes autores com camadas limites desenvolvidas naturalmente (sem o auxílio de artifícios colocados entre o bordo de ataque da placa e o cilindro) apresentaram um comportamento similar aos de Göktun (1975) e de Roshko et al. (1975), que também não se utilizaram de tais artifícios.

O objetivo principal do presente trabalho foi o de fornecer uma quantidade adicional de informações, as já existentes, a fim de ajudar a melhorar a compreensão do escoamento externo em torno de um cilindro circular próximo a um contorno plano. Para isso, foi reproduzida a modelagem adotada pela maioria dos pesquisadores que se dedicaram a estudar esse tipo de escoamento. Ela consistiu em posicionar adequadamente um cilindro circular liso com o seu eixo orientado paralelamente a uma placa plana rígida e normal ao escoamento incidente gerado por um túnel de vento. A análise dos resultados de trabalhos anteriores foi determinante na decisão de evitar o uso, no presente estudo, de artifícios para o espessamento da camada limite. Tal procedimento, embora seja de uso consagrado, pode acrescentar uma série de incertezas em relação à estrutura de formação do perfil da camada limite e levar a dispersões exageradas entre os resultados obtidos com perfis de diferentes espessuras. A comparação dos resultados do presente trabalho com os da literatura disponível mostrou que a estratégia se apresentou adequada.

2. DETALHES EXPERIMENTAIS

Os experimentos foram realizados no túnel de vento de camada limite Prof. Joaquim Blessmann do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Trata-se de um túnel de vento de retorno fechado, equipado com quatro mesas de ensaios giratórias. A mesa usada nos experimentos está localizada na seção principal da instalação, que tem 900 mm de altura e 1300 mm de largura e pode operar com o escoamento do vento na sua velocidade máxima (42 m/s), impulsionada por um motor elétrico de 75 kW. Maiores informações sobre as características desse túnel de vento podem ser obtidas em Blessmann (1982) e Loredo-Souza et al. (2004).

O aparato de ensaio foi composto por um cilindro circular liso de *PVC* de 50 mm de diâmetro e por uma placa plana de compensado naval de 20 mm de espessura. O cilindro teve o comprimento igual à altura da câmara de ensaios (900 mm) e foi posicionado verticalmente na seção de testes, com uma de suas extremidades fixada na mesa de ensaios e a outra fixada no teto do túnel de vento. A fixação das extremidades do cilindro foi feita por meio de suportes parafusáveis. A razão de bloqueio do conjunto

placa-cilindro foi inferior a 4% e a razão de aspecto entre o vão do cilindro e o seu diâmetro (*W/D*) foi igual a 18. Essa razão de aspecto foi considerada grande o suficiente para garantir um escoamento bidimensional na região central do cilindro.

A placa de formato retangular, com 900 mm de altura e 1900 mm de comprimento, teve o seu bordo de ataque biselado e foi montada de modo que o seu plano principal ficasse paralelo tanto ao eixo do cilindro quanto ao escoamento gerado pelo túnel de vento. O posicionamento da superfície da placa em relação ao cilindro foi feito por dois perfis do tipo cantoneira (de alumínio), uma fixada no piso e a outra no teto do túnel de vento. A distância entre o cilindro e a placa pôde ser alterada através da mudança gradual da posição do cilindro, mantendo-se a placa fixa. Para permitir um ajuste preciso da distância entre a placa e o cilindro foram construídos pequenos gabaritos com espessuras iguais às razões de distâncias pré-estabelecidas (*G/D* = 0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,8, 1, 1,5 e 2). Esses gabaritos, feitos com chapas de *MDF* (Medium Density Fiberboard), foram interpostos entre o cilindro e a placa no momento do ajuste da distância entre eles, assegurando-se, assim, a manutenção da precisão da medida no momento do aperto dos parafusos de fixação do cilindro. Esse procedimento foi repetido sistematicamente para todas as distâncias adotadas entre os dois elementos. A Figura 1 mostra um diagrama ilustrativo do aparato montado na câmara de ensaios do túnel de vento. Para permitir uma melhor visualização do conjunto, as paredes laterais do túnel de vento foram omitidas nos desenhos.

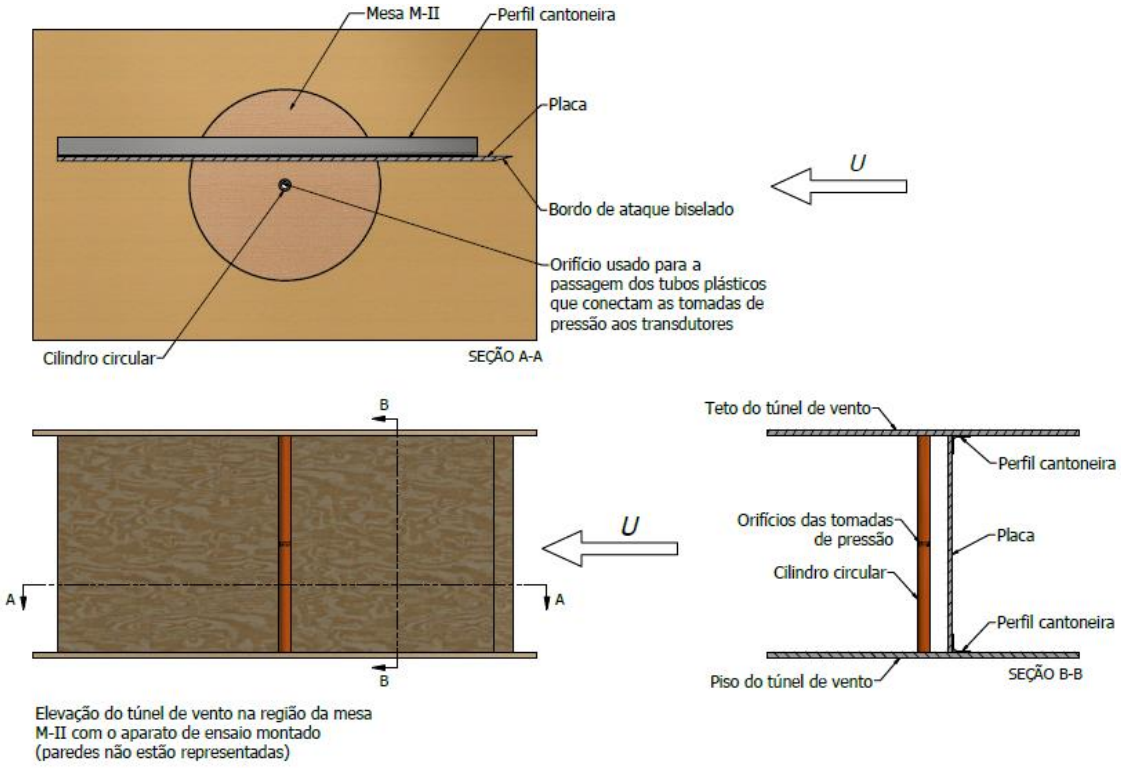


FIGURA 1: Diagrama ilustrativo da montagem do aparato de ensaio
FONTE: Autoria própria

Para estudar os efeitos da presença da placa sob a influência de camadas limites de diferentes espessuras, foi necessário deslocá-la paralelamente em relação ao escoamento incidente. Na presente investigação, foi decidido posicionar o eixo do cilindro a 10*D* e a 20*D* de distância do bordo de ataque da placa. Com esse procedimento, foi possível gerar duas camadas limites de espessuras diferentes. Para medir as velocidades nos perfis dessas camadas limites foi utilizada uma sonda de fio quente, porém sem a presença do cilindro. As medidas indicaram que δ = 1*D* para a camada limite em 10*D* e δ = 1,4*D* para a

camada limite em 20*D*. A Figura 2 mostra um diagrama esquemático do procedimento usado para deslocar a placa paralelamente ao escoamento incidente. Na sequência (Figura 3), têm-se os gráficos dos perfis de camada limite obtidos a partir dos dados de velocidade gerados pela anemometria de fio quente. A espessura das camadas limites foi determinada, graficamente, quando a velocidade destas (*u*) na altura *h* foi igual 99% de *U*.

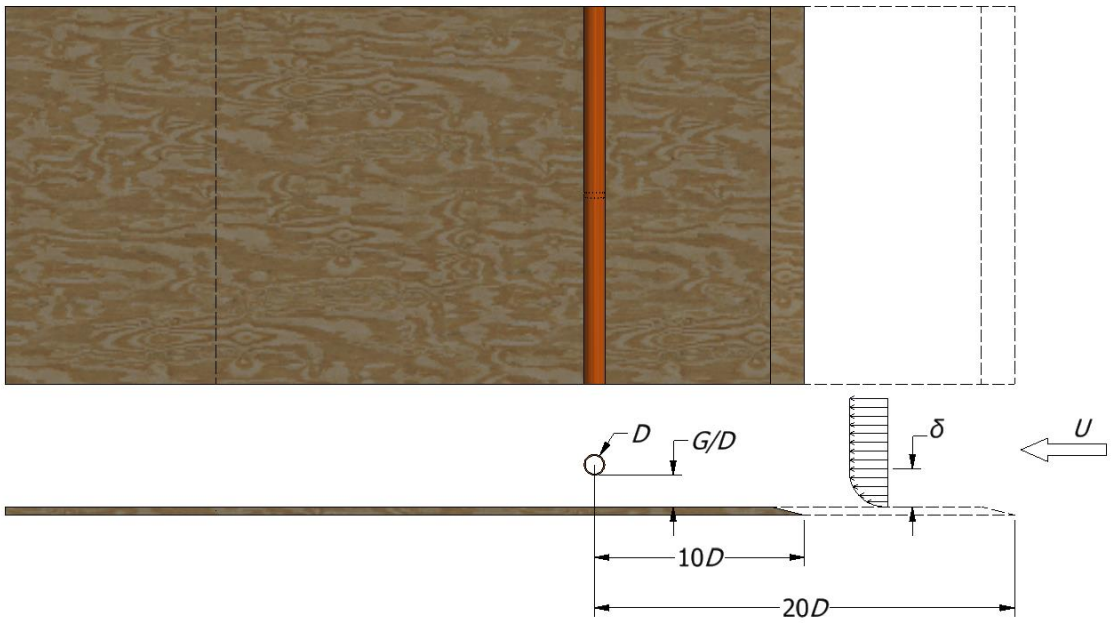


FIGURA 2: Diagrama esquemático do posicionamento do cilindro para a geração das camadas limites
FONTE: Autoria própria

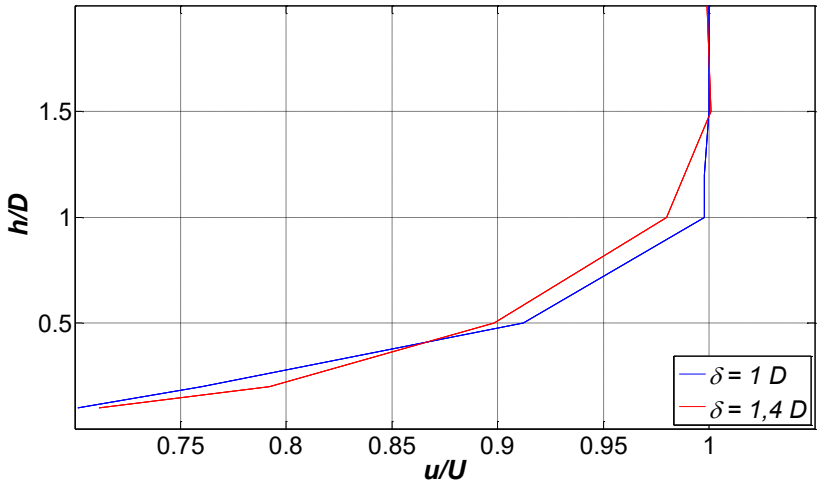


FIGURA 3: Perfis de velocidade das camadas limites
FONTE: Autoria própria

2.1 METODOLOGIA EMPREGADA PARA A MEDIDA DAS PRESSÕES NA SUPERFÍCIE DO CILINDRO

Com o intuito de se obter um mapa suficientemente detalhado das pressões na superfície do cilindro, as mesmas foram medidas a cada 10°. Para isso, foram criadas duas linhas de orifícios na seção central do cilindro. Esse procedimento viabilizou a inserção dos pequenos tubos plásticos de 1,7 mm de diâmetro usados para comunicar as pressões atuantes na superfície do cilindro aos transdutores de

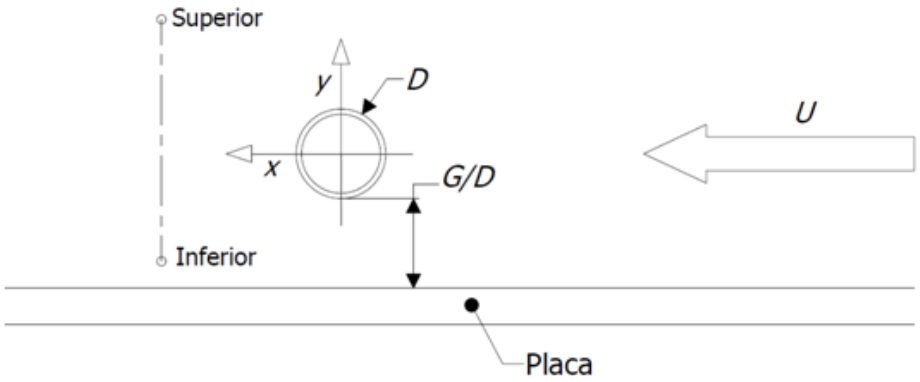
pressão. Os 36 tubos foram então conduzidos pelo interior do cilindro até a abertura existente na base da mesa de ensaios; a partir daí foi possível conectá-los ao módulo que abrigava os transdutores de pressão.

Para a obtenção dos dados de pressão na superfície do cilindro foi utilizado o equipamento Scanivalve Pressure System, fabricado pela Scanivalve™. As pressões instantâneas foram registradas nas 36 tomadas a uma taxa de aquisição de 512 Hz em um intervalo de tempo com duração de 16 segundos. Todo o processo foi gerenciado pelo software RAD4000 da Scanivalve™.

2.2 METODOLOGIA EMPREGADA NA MEDIDA DO CAMPO DE VELOCIDADES

A anemometria de fio quente foi usada para medir as velocidades dos perfis das camadas limites, identificar a presença dos vórtices na esteira do cilindro e para determinar a frequência do desprendimento dos mesmos. A estratégia usada para investigar o campo de velocidades consistiu em posicionar a sonda de fio quente nas duas regiões (superior e inferior) onde são desprendidos os vórtices alternados. A Figura 4 mostra a posição da sonda para todas as *G/D* empregadas.

O sistema de anemometria utilizado foi o Stream Wire, fabricado pela Dantec Dynamics. Em cada amostragem, as velocidades instantâneas registradas pela sonda de fio quente foram adquiridas a uma taxa de 1024 Hz durante 64 s.



	G/D	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,5	2
Inferior	x (D)	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	y (D)	-	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9	-1	-1,1	-1,2	-1,4	-1,4
Superior	x (D)	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	y (D)	-	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

FIGURA 4: Posições da sonda de fio quente
FONTE: Autoria própria

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 O DESPRENDIMENTO ALTERNADO DE VÓRTICES E A RAZÃO DE ABERTURA CRÍTICA – $(G/D)_{cr}$

O desprendimento dos vórtices afeta tanto o campo de velocidades quanto o campo de pressões no entorno do cilindro e, em vista disso, a detecção do fenômeno pode ser feita por meio da análise dos dados obtidos na medida desses campos. No presente trabalho, foram usados dois métodos para avaliar a presença dos vórtices e para determinar a sua frequência: a análise dos espectros de potência dos sinais do campo de velocidades, fornecidos pela anemometria de fio quente, e dos sinais do coeficiente de sustentação (C_L).

Na Figura 5 e na Figura 6 são mostrados os resultados obtidos pelos dois métodos. Os espectros da anemometria de fio quente são apresentados em vermelho para os sinais da sonda posicionada na

região próxima à camada cisalhante inferior do cilindro (próxima à placa) e em azul para os sinais da região próxima à camada cisalhante superior; os espectros do C_L estão na cor preta.

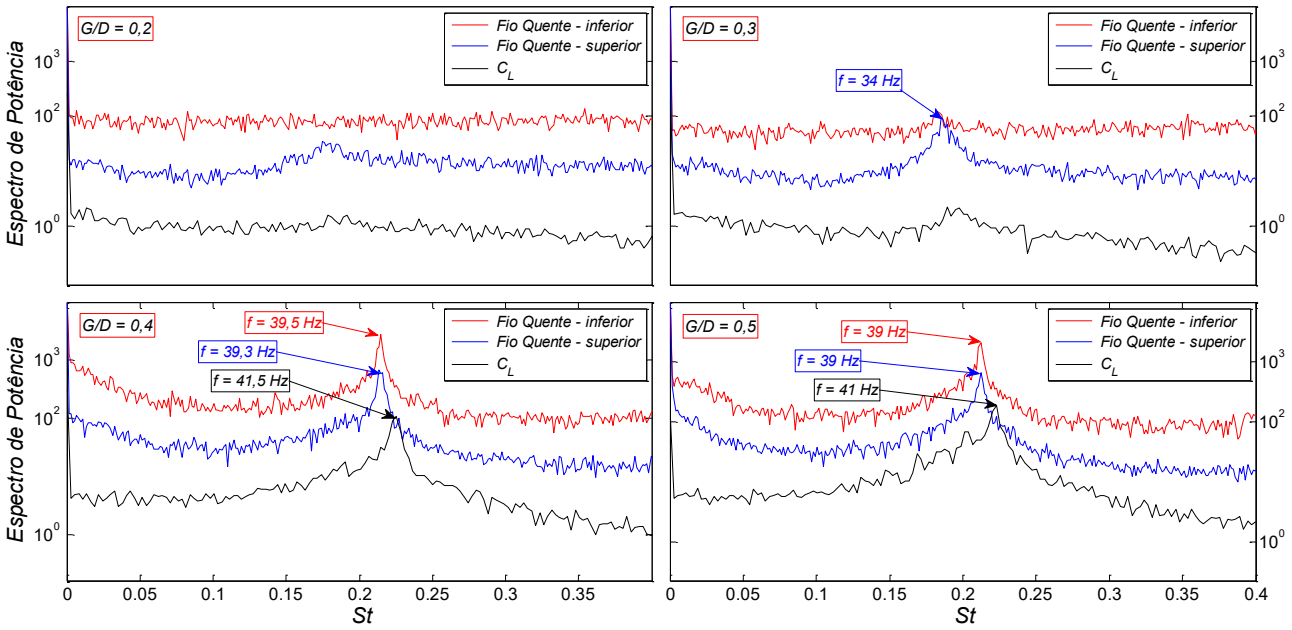


FIGURA 5: Espectros de potência dos sinais de fio quente e dos sinais do C_L, com δ =1D
FONTE: Autoria própria

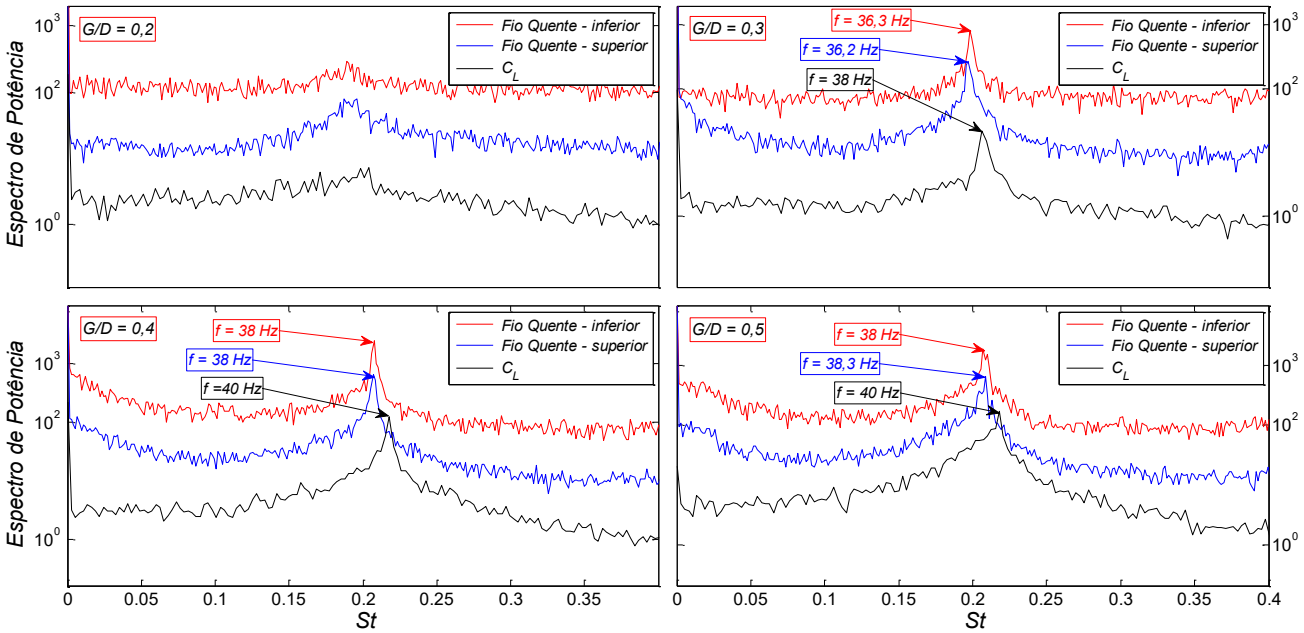


FIGURA 6: Espectros de potência dos sinais de fio quente e dos sinais do C_L, com δ =1,4D
FONTE: Autoria própria

Analisando-se os espectros da anemometria de fio quente com δ = 1D (Figura 5) em G/D = 0,2 e 0,3, na região inferior do cilindro, concluiu-se que estes não apresentaram nenhum pico claro e destacado. No entanto, em G/D = 0,3 é possível observar um pico organizado e de frequência facilmente identificável (34 Hz) no espectro da região superior. Os resultados obtidos da anemometria de fio quente são corroborados pelos espectros do C_L. Nestes, também não é possível identificar qualquer pico destacado que indique o desprendimento alternado de vórtices em G/D = 0,2 e 0,3. No entanto, quando G/D = 0,4 torna-

se evidente a presença dos picos em ambas as posições da sonda de fio quente (39,3 Hz e 39,5 Hz) e também no espectro do C_L (41,5 Hz), indicando o restabelecimento do desprendimento alternado dos vórtices quando $G/D \geq 0{,}4$.

Os espectros para $\delta = 1{,}4D$ (Figura 6) são sutilmente diferentes dos da camada limite mais delgada. Para $G/D = 0{,}2$ também não é possível identificar um pico bem definido em nenhum dos espectros. Porém, para $G/D = 0{,}3$ nota-se facilmente a presença dos sinais periódicos com frequência bem definida em ambas as posições da sonda de fio quente (36,2 Hz e 36,3 Hz) e, também, no espectro do C_L (38 Hz), indicando o restabelecimento do desprendimento alternado dos vórtices para $G/D \geq 0{,}3$.

Os resultados sugerem que uma camada limite mais espessa tende a minimizar o efeito da proximidade da placa na supressão do desprendimento alternado dos vórtices. Esta conclusão está de acordo com as observações de Buresti e Lanciotti (1992) e Lei et al. (1999).

É possível concluir que a análise dos espectros de potência dos sinais do C_L é uma forma mais direta de avaliação da presença do desprendimento alternado de vórtices na esteira do cilindro. Em arranjos experimentais semelhantes ao que foi empregado no presente trabalho, o método apresenta uma diminuição considerável de custos (em relação à anemometria de fio quente) para a detecção do fenômeno.

3.2 NÚMERO DE STROUHAL

Desde os primeiros estudos realizados com o escoamento em torno de cilindros circulares isolados, existe certo consenso de que no regime subcrítico o número de Strouhal para um cilindro liso assume um valor próximo de 0,2 (Kovasznay, 1949; Roshko, 1954; Lienhard, 1966; Achenbach e Heinecke, 1981; West e Apelt, 1982; Schewe, 1983). Esse valor é também amplamente aceito como uma aproximação adequada para muitas aplicações de cunho prático (Xu, 2013). Na Figura 7 são apresentados os resultados obtidos pelo presente trabalho para a variação do St em função de G/D. Deve-se ressaltar que os valores obtidos por meio da anemometria de fio quente são referentes aos da sonda posicionada na região superior do cilindro para $G/D \geq (G/D)_{cr}$. Na mesma figura, para efeito de comparação, também foram plotados os gráficos obtidos por Bearman e Zdravkovich (1978) e por Oner et al. (2008). Dos resultados do presente trabalho, é possível concluir que a presença da placa não afetou de forma significativa o comportamento do St até que a distância entre o cilindro e a placa alcançasse $(G/D)_{cr}$. Esses resultados estão em bom acordo com a maioria dos trabalhos realizados na faixa intermediária e superior do regime subcrítico. É possível também perceber que nos dos dois métodos a espessura da camada limite teve pouca influência no comportamento do parâmetro.

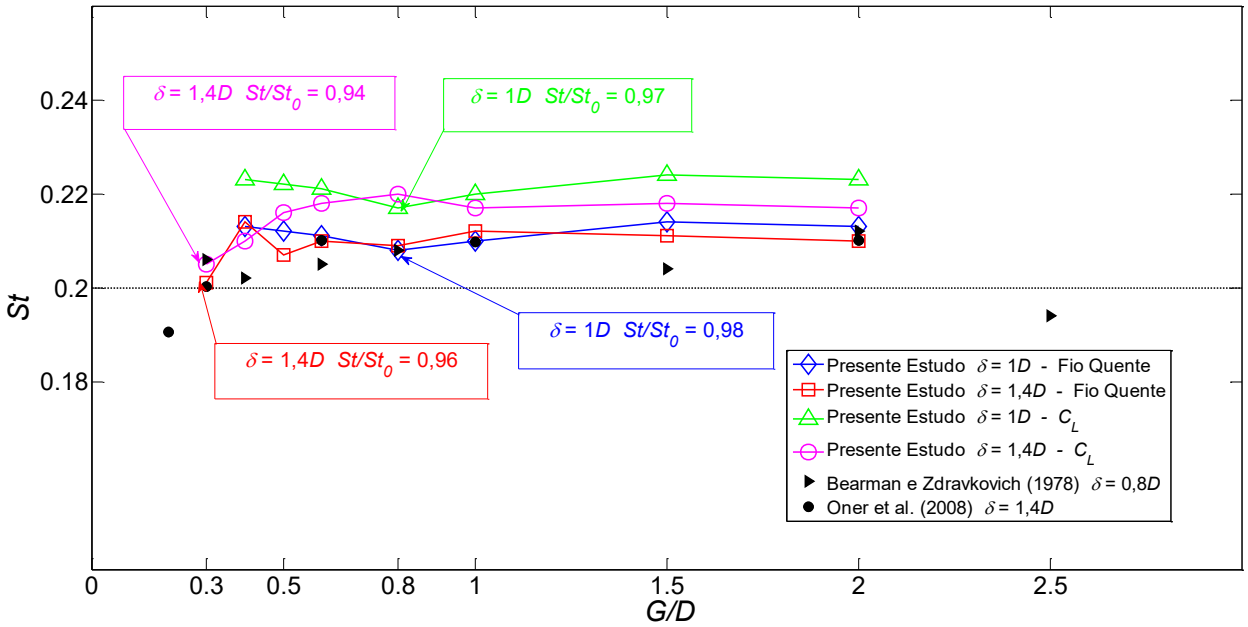


FIGURA 7: Variação do número de Strouhal em relação à *G/D*
FONTE: Autoria própria

Nos gráficos também estão assinalados os pontos nos quais houve as maiores dispersões dos valores do parâmetro em relação ao valor de referência adotado, St_0 (*St* em *G/D* = 2). É possível perceber que as dispersões máximas ocorreram no escoamento com δ = 1,4*D*, com diferença de até 6 % nos valores determinados por meio dos espectros do C_L. Importante ressaltar que os dois métodos utilizados apresentaram resultados coincidentes para a dispersão máxima e a respectiva razão de abertura (*G/D* = 0,3 para δ = 1,4*D* e *G/D* = 0,8 para δ = 1*D*).

3.3 COEFICIENTE DE ARRASTO

A variação do coeficiente de arrasto em relação à *G/D,* para as duas camadas limites usadas no presente trabalho, pode ser vista na Figura 8. Para efeitos de comparação, também foram acrescentados os resultados obtidos por Zdravkovich (1985), Lei et al. (1999) e Nishino et al. (2007). Percebe-se que a proximidade da placa começa a influenciar o arrasto quando *G/D* < 1,5. Essa influência se mostra mais presente na camada limite com δ = 1*D*, com valores ligeiramente maiores do que os da camada limite com δ = 1,4*D*. Tal comportamento é similar ao que foi observado por Lei et al. (1999) em seus experimentos com seis camadas limites de diferentes espessuras.

Para *G/D* > 1,5 a presença da placa não é mais sentida e os valores do C_D em ambas as camadas limites tornam-se praticamente idênticos. Tais valores estão de acordo com os divulgados pela literatura para cilindros isolados com razões de bloqueio semelhantes ao do arranjo experimental adotado no presente trabalho (West e Apelt, 1982).

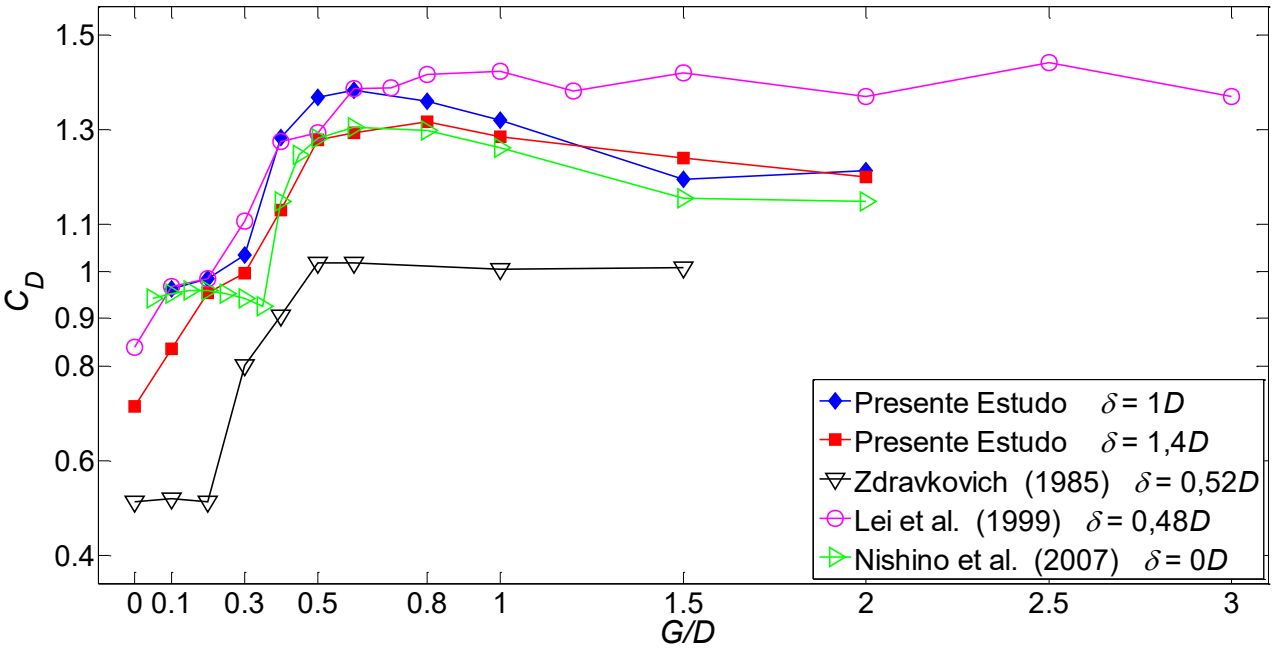


FIGURA 8: Variação do coeficiente de arrasto em relação à *G*/*D*
FONTE: Autoria própria

Os gráficos também evidenciam que nas duas camadas limites o C_D apresenta uma queda pronunciada quando a distância do cilindro à placa cai abaixo de certo valor crítico ($G/D \approx 0{,}5$). Essa característica também é acompanhada pelos gráficos dos demais autores. A existência de um valor crítico para *G* já havia sido percebida por Roshko et al. (1975) ao observarem a queda pronunciada do arrasto quando o cilindro iniciou a imersão na camada limite gerada pela placa. Com base nas observações de Roshko et al. (1975) e em seus próprios resultados, Zdravkovich (1985) sugeriu que a distância crítica na qual ocorreria o início da queda pronunciada do arrasto seria dada por $G/\delta = 1$. No entanto, a hipótese de Zdravkovich (1985) pode não ser adequada para camadas limites de pequena espessura, pois os resultados obtidos por Nishino et al. (2007) usando um escoamento incidente sem os efeitos de um perfil cisalhante ($\delta \approx 0$) mostraram que a queda pronunciada do C_D ocorreu em $G/D \approx 0{,}5$. Como se pode ver, os resultados obtidos pelo presente trabalho com camadas limites de mesma ordem de grandeza de *D* (e ainda maiores) também não se mostraram adequados à hipótese de Zdravkovich (1985).

Outra característica apresentada pelo escoamento com $\delta = 1D$ é a interrupção da queda pronunciada do C_D quando $G/D \approx 0{,}3$. O parâmetro assume certa estabilidade (com valores muito próximos de 1) à medida que a distância entre a placa e o cilindro diminui ainda mais. Essa característica, porém, não está claramente presente no escoamento com $\delta = 1{,}4D$, no qual a queda pronunciada persiste (embora apresente uma pequena inflexão em *G*/*D* entre 0,2 e 0,3) até o cilindro tocar a placa. A presença desse patamar de estabilidade é evidente também nos resultados de Zdravkovich (1985) e de Nishino et al. (2007). Coincidentemente, nesses trabalhos a determinação dos coeficientes de arrasto e de sustentação foi feita por meio do uso de balanças com extensores.

Sabe-se que o grande arrasto dos corpos rombudos é o resultado do elevado gradiente de pressões causado pela separação do escoamento e a formação de uma larga esteira. Uma quantidade apreciável de trabalhos indica que as mudanças no coeficiente de pressão de base (C_{Pb}) são um indicativo preciso da variação do coeficiente de arrasto. Nishino et al. (2007) citam a explicação convincente dada por Bearman e Trueman (1972) sobre a correlação entre a queda do C_{Pb} e o aumento do C_D. Estes argumentaram que a queda do C_{Pb} é causada pela atração contínua de fluido da região da esteira próxima para alimentar o crescimento progressivo dos vórtices, tendo como consequência o aumento do arrasto. A

argumentação encontra forte amparo na clássica hipótese fornecida por Gerrard (1966) para o mecanismo de formação da região dos vórtices nos corpos rombudos. Na Figura 9 estão plotados os gráficos da variação do C_{Pb} e do C_D obtidos pelo presente trabalho. É possível perceber uma boa simetria nas curvas dos dois parâmetros, no qual é facilmente identificável a mesma variação acentuada do C_{Pb} quando G/D < 0,5 e o aparecimento de um patamar semelhante ao do C_D em razoes de abertura inferiores a 0,3. Assim como já observado em relação ao C_D, os valores do C_{Pb} para G/D > 1,5 estão de acordo com aqueles divulgados pela literatura para cilindros isolados com razões de bloqueio semelhantes ao do arranjo experimental adotado no presente trabalho.

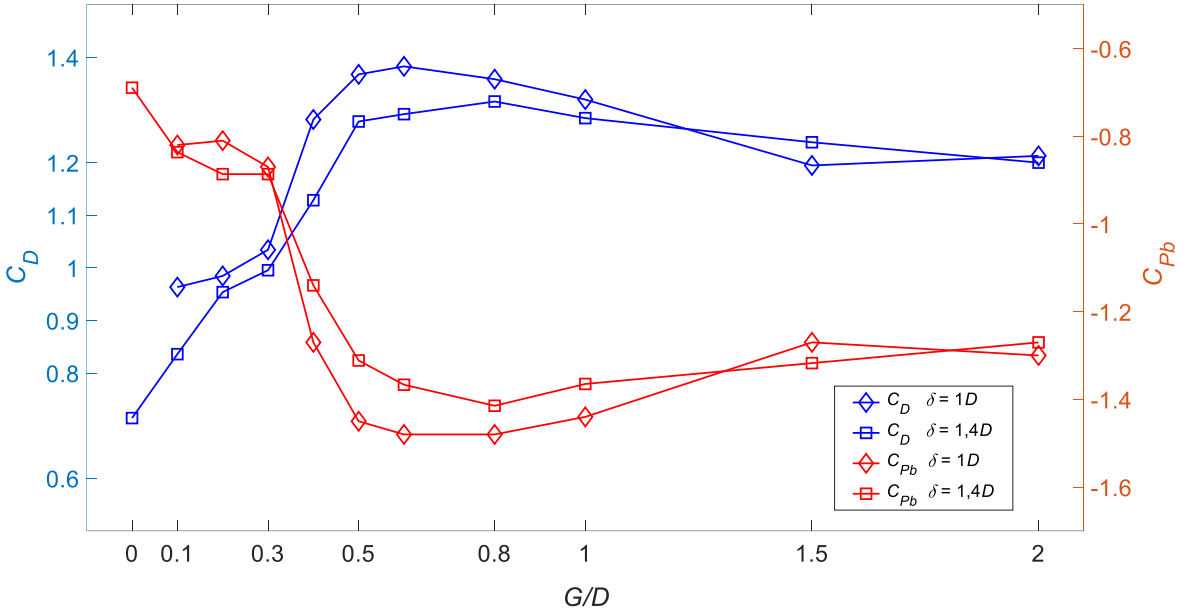


FIGURA 9: Variação do coeficiente de arrasto e do coeficiente de pressão de base em relação à G/D
FONTE: Autoria própria

3.4 COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO

Na Figura 10 são mostrados os resultados obtidos pelo presente trabalho para o comportamento do coeficiente de sustentação. Para efeitos de comparação, foram adicionados os gráficos obtidos por Zdravkovich (1985), Lei et al. (1999) e Nishino et al. (2007). Percebe-se que apesar de haver alguma dispersão nos valores, principalmente nos da camada limite com δ = 1,4D, a tendência em ambas as curvas apresenta boa concordância. Estes resultados indicam que a espessura da camada limite não exerceu um papel determinante na variação do C_L à medida que houve a aproximação da placa. É possível também observar que os resultados obtidos pelo presente trabalho estão em boa conformidade com os dos demais autores. No entanto, parece evidente que um dos resultados obtidos por Zdravkovich (1985) destoa bastante dos demais. Tal fato – como alertado por Lei et al. (1999) – evidencia que as características de formação da camada limite podem exercer uma influência marcante no comportamento do C_L. Os resultados de Zdravkovich (1985) foram obtidos mediante o emprego de barras e malhas de fios (interpostos entre o bordo de ataque da placa e o cilindro) para espessar a camada limite. Nota-se que, apesar das camadas limites usadas por ele possuírem a mesma espessura (δ = 0,52D), o comportamento do C_L com a camada limite espessada por uma malha de fios foi significativamente distinto do apresentado

pela camada limite espessada por uma barra. Nos demais gráficos, observa-se um padrão comportamental bem definido, com um aumento expressivo do C_L quando a placa se aproxima do cilindro (G/D < 0,5). Para G/D > 0,5, a tendência apresentada é de uma estabilização dos valores em um patamar próximo de zero.

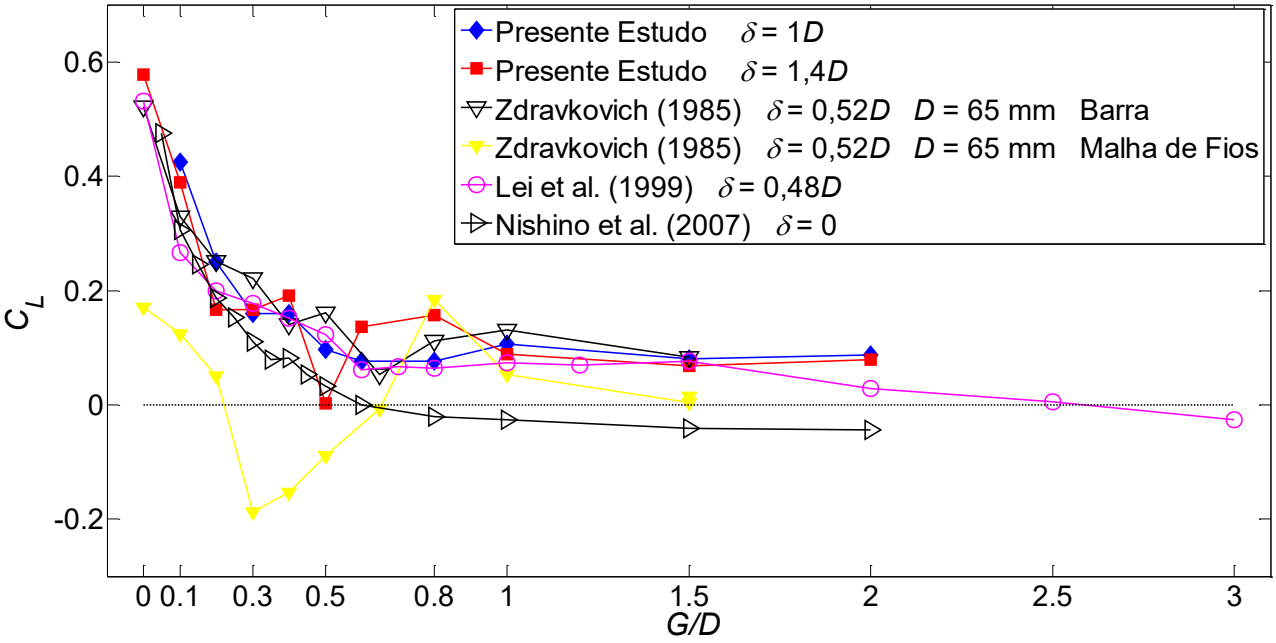


FIGURA 10: Variação do coeficiente de sustentação em relação à G/D
FONTE: Autoria própria

Assim como aconteceu com o coeficiente de arrasto médio, $G/D \approx 0,5$ também pareceu ser a razão de abertura crítica para a mudança do comportamento do C_L. Esta constatação ganha amparo ao se examinar a variação do $C_{L\,RMS}$ em relação à G/D (Figura 11). Comparando-se os gráficos do C_L e do $C_{L\,RMS}$ é possível perceber que o aumento do C_L devido à aproximação da placa coincide com o início da queda acentuada do $C_{L\,RMS}$ em G/D = 0,5. Essa forte variação do $C_{L\,RMS}$ é interrompida em G/D = 0,3 e tende a se estabilizar em torno de um patamar, à medida que a distância entre o cilindro e a placa diminui ainda mais. Esse patamar também é aproximadamente coincidente com a faixa de G/D na qual ocorre a supressão do desprendimento alternado dos vórtices (ver Lei et al., 1999). No entanto, a estabilização do $C_{L\,RMS}$ é acompanhada de forma quase sincronizada de um incremento ainda mais vigoroso na variação do C_L, culminando com o parâmetro atingindo o seu valor máximo, em torno de 0,6 – para δ = 1,4D –, quando o cilindro toca a placa. Como se pode observar na figura, o patamar de estabilidade da curva do $C_{L\,RMS}$ também está presente nos resultados apresentados por Lei et al. (1999), porém em uma faixa de G/D ligeiramente menor.

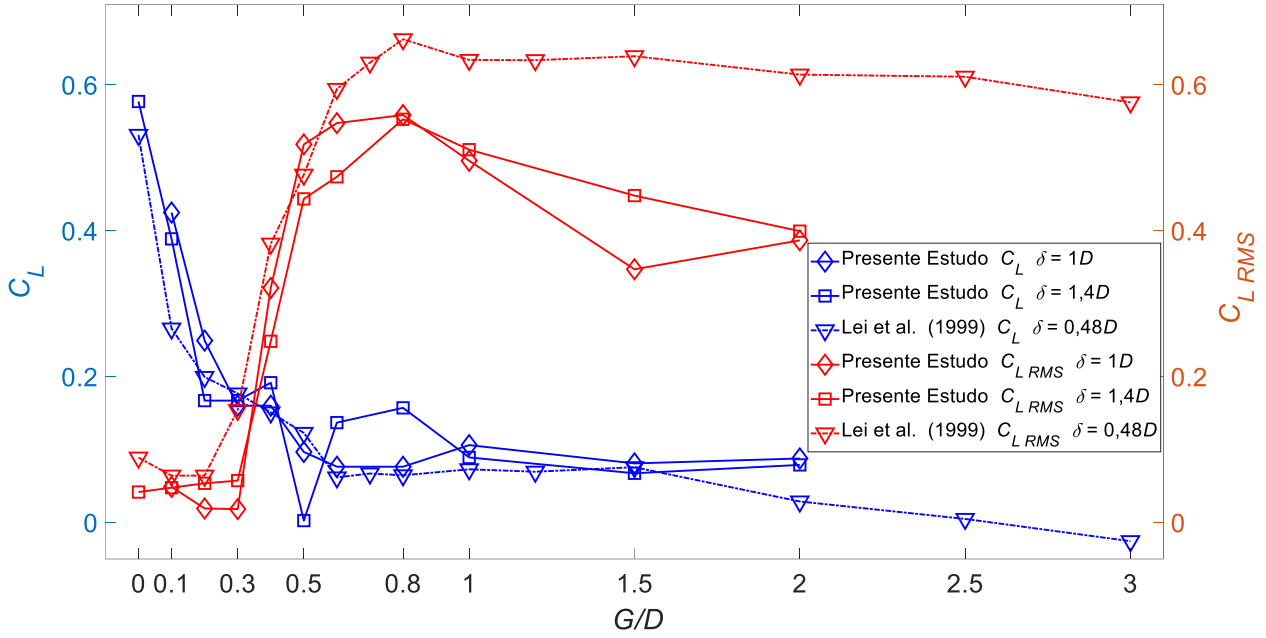


FIGURA 11: Variação do coeficiente de sustentação e do $C_{L\ RMS}$ em relação à G/D
FONTE: Autoria própria

4. CONCLUSÕES

Os efeitos da proximidade de uma placa plana no escoamento em torno de um cilindro circular liso foram estudados experimentalmente. Os experimentos foram realizados em um túnel de vento de camada limite de retorno fechado em um número Reynolds, baseado no diâmetro do cilindro (D), de $3{,}1 \times 10^4$. Foram examinados os efeitos da espessura da camada limite (δ) do escoamento incidente e a razão da distância entre a placa e o cilindro (G/D) no comportamento do desprendimento alternado de vórtices, do número de Strouhal (St) e dos coeficientes de arrasto (C_D) e de sustentação (C_L).

Foram usados dois métodos para avaliar a presença do desprendimento alternado dos vórtices na esteira do cilindro e para determinar a sua frequência. A análise dos espectros de potência dos sinais da anemometria de fio quente e dos sinais do coeficiente de sustentação mostrou que o desprendimento dos vórtices foi interrompido quando a razão da distância entre a placa e o cilindro diminuiu de certo valor crítico – $(G/D)_{cr}$. O $(G/D)_{cr}$ foi de 0,4 no escoamento com $\delta = 1D$ e de 0,3 no escoamento com $\delta = 1{,}4D$. A determinação das frequências do desprendimento dos vórtices indicou que o número de Strouhal se manteve praticamente constante em toda a extensão da faixa de G/D estudada [$(G/D)_{cr} \leq G/D \leq 2$]. As variações máximas do parâmetro em relação ao St_0 adotado (St em $G/D = 2$) se deram em $G/D = 0{,}3$ (6 %) na camada limite com $\delta = 1{,}4D$ e em $G/D = 0{,}8$ (3 %) na camada limite com $\delta = 1D$.

De forma geral, tanto a presença da placa quanto a espessura da camada limite influenciaram o comportamento do coeficiente de arrasto. Os resultados mostraram que a presença da placa começou a influenciar o C_D quando $G/D < 1{,}5$. Essa influência se mostrou mais evidente na camada limite mais delgada, com os valores de C_D sendo ligeiramente maiores para a camada limite com $\delta = 1D$. Nas duas camadas limites houve uma queda pronunciada do C_D quando $G/D < 0{,}5$. No_entanto, esse fenômeno foi interrompido em $G/D = 0{,}3$ na camada limite com $\delta = 1D$, dando lugar ao aparecimento de um patamar de estabilidade, com o parâmetro assumindo valores próximas a 1.

Os resultados obtidos para o coeficiente de sustentação indicaram que apenas a presença da placa teve influência no comportamento do parâmetro. Assim como foi observado no C_D, as alterações mais significativas no C_L se deram quando $G/D < 0{,}5$. Os gráficos do $C_{L\ RMS}$ foram eficientes em sinalizar o rápido aumento do C_L. No primeiro intervalo, entre $0{,}3 \leq G/D \leq 0{,}5$, a expressiva variação do $C_{L\ RMS}$ coincidiu com o início do aumento do C_L e no segundo trecho, com a estabilização do $C_{L\ RMS}$ (em $G/D \leq 0{,}3$), o patamar do $C_{L\ RMS}$ praticamente coincidiu com o incremento mais vigoroso na variação do C_L.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHENBACH, E., HEINECKE, E., 1981. **On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of Reynolds numbers 6×10^3 to 5×10^6.** J. Fluid Mech. 109, 239-251. https://doi:10.1017/S002211208100102X.

BEARMAN, P., TRUEMAN, D.,1972. **An Investigation of the flow around rectangular cylinders. Aeronautical Quarterly.** 23(3), 229-237. https://doi.org/10.1017/S0001925900006119.

BEARMAN, P. W., ZDRAVKOVICH, M. M., 1978. **Flow around a circular cylinder near a plane boundary.** J. Fluid Mech. 89, 33–47. https://doi.org/10.1017/S002211207800244X.

BLESSMANN, J., 1982. **The boundary layer tv-2 wind tunnel of the UFRGS.** J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 10 (2), 231–248. https://doi.org/10.1016/0167-6105(82)90066-6.

BURESTI, G., LANCIOTTI, A., 1992. **Mean and fluctuating forces on a circular cylinder in cross-flow near a plane surface.** J. Wind. Eng Ind. Aerodyn. 41, (1–3), 639–650. https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90476-Q.

GERRARD, J. H., 1966. **The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies.** J. Fluid Mech., 25, 401-413. https://doi.org/10.1017/S0022112066001721.

GÖKTUN, S., 1975. **The drag and lift coefficients of a cylinder placed near a plane surface.** MSc Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California. https://archive.org/details/dragliftcharacte00gokt.

HE, G. S., WANG, J. J., PAN, C., FENG, L.-H., GAO, Q., RINOSHIKA, A., 2017. **Vortex dynamics for flow over a circular cylinder in proximity to a wall**. J. Fluid Mech., 812, 698–720. http://dx.doi.org/10.1017/jfm.2016.812

KOVASZNAY, L. S. G., 1949. **Hot-wire investigation of the wake behind cylinders at low Reynolds numbers.** Proc. Roy. Sac. (London), spr. A, vol. 198, no. 1053, Aog. 15, 174-190. https://doi.org/10.1098/rspa.1949.0093

LEI, C. W., CHENG, L., KAVANAGH, K., 1999. **Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder.** J. Wind Eng. Ind. Aerod. 80, 263–286. https://doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00204-9.

LIENHARD, J. H., 1966. **Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders.** Technical Extension Service, Washington State University, Pullman, WA, USA. https://uh.edu/engines/vortexcylinders.pdf

LIN, W. J., C., HSIEH, S. C., DEY, S., 2009. **Flow characteristics around a circular cylinder placed horizontally above a plane boundary.** J.Eng. Mech. 135, 697–716. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:7(697)

LOREDO-SOUZA, A. M., SCHETTINNI, E. B., PALUCH, M. J., 2004. In: Moller, S.V., Silvestrini, J. H. Turbulência (Eds.). **Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento.** Vol. 4. Associação Brasileira de Engenharias e Ciências Mecânicas, Rio de Janeiro, pp. 137–160.

NISHINO, T., ROBERTS, G. T., ZHANG, X., 2007. **Vortex shedding from a circular cylinder near a moving ground.** Phy. Fluids 19, 025103. https://doi.org/10.1063/1.2710273.

ONER, A. A., KIRKGOZ, M. S., AKOZ, M. S., 2008. **Interaction of a current with a circular cylinder near a rigid bed.** Ocean. Eng. 35, 1492–1504. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.06.005.

PRICE, S. J., SUMNER, D., SMITH, J. G., LEONG, K., PAIDOUSSIS, M. P., 2002. **Flow visualization around a circular cylinder near to a plane wall.** J. Fluid Struct. 16, 175–191. https://doi.org/10.1006/jfls.2001.0413.

ROSHKO, A., 1954. **On the development of turbulent wakes from vortex streets.** Technical Report, NACA, Washington DC. https://ntrs.nasa.gov/citations/19930092207.

ROSHKO, A., STEINOLFSON, A., CHATTOORGOON, V., 1975. **Flow forces on a cylinder near a wall or near another cylinder.** In Proceedings of the 2nd U.S. National Conference on Wind Engineering Research, Colorado State University, Fort Collins, paper IV-15.

SCHEWE, G., 1983. **On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers.** Journal of Fluid Mechanics, 133, 265-285. https://doi.org/10.1017/S0022112083001913.

SUMER, B. M., FREDSØE, J., 1997. **Hydrodynamics Around Cylindrical Structures.** Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 26. World Scientific, Singapore. https://doi.org/10.1142/3316.

WEST, G., APELT, C. J., 1982. **The effects of tunnel blockage and aspect ratio on the mean flow past a circular cylinder with Reynolds numbers between 10^4 and 10^5.** Journal of Fluid Mechanics, 114, 361-377. https://doi.org/10.1017/S0022112082000202.

XU, Y. L., 2013. **Wind Effects on Cable-supported Bridges.** John Wiley & Sons, Singapore.

ZDRAVKOVICH, M. M., 1985. **Forces on a circular cylinder near a plane wall.** Appl. Ocean. Res. 7 (4), 197–201. https://doi.org/10.1016/0141-1187(85)90026-4.

ZDRAVKOVICH, M. M., 1990. **Conceptual overview of laminar and turbulent flows past smooth and rough circular cylinders.** J. Wind Eng. Ind. Aerod. 33, 53–62. https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90020-D.