

## SIMULAÇÃO NUMÉRICO-COMPUTACIONAL DA DISSIPACÃO DE ESTEIRAS DE AERONAVES PRÓXIMAS DO SOLO UTILIZANDO O MÉTODO DE VÓRTICES DISCRETOS COM MODELAGEM DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Gabriel Ferraz Marcondes de Carvalho<sup>1</sup> (IC), Luiz Antonio Alcântara Pereira (PQ)<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá

**Palavras-chave:** Método de vórtices discretos. Método de Imagens. Vórtices de ponta de asa de aeronave. Rugosidade superficial. Modelagem de turbulência do tipo LES.

### Introdução

Neste trabalho de Iniciação Científica foi realizada a modelagem de um par de vórtices de ponta de asa desprendidos por uma aeronave durante uma operação de decolagem ou aterrissagem. A abordagem utilizada para esta simulação foi puramente lagrangiana, isto é, foi feita a discretização do campo de vorticidades, e o estudo acompanhou a trajetória de cada estrutura vorticosa ao longo do tempo e a interação delas com uma pista com efeitos de rugosidade superficial.

A relevância deste estudo é dupla. Ela permite uma fortificação da área de concentração de métodos lagrangianos aplicados à problemas de engenharia, dado que a maior parte das simulações computacionais utilizam descrição euleriana. O segundo ponto, de natureza prática, é que as aeronaves precisam de um tempo entre operações sucessivas de decolagem e aterrissagem, a fim de permitir que a vorticidade saia da pista, uma vez que sua presença poderia causar acidentes durante tais operações.

O estudo computacional ganha destaque quando Harvey e Perry (1971) procuraram compreender o motivo de as trajetórias desviarem do comportamento hiperbólico que seria previsto pela teoria potencial de Lamb (1932). Ricci *et al.* (2003) estudaram o problema do desprendimento de vórtices de ponta de asa com uma abordagem lagrangiana, porém a modelagem utilizada consistia apenas de um par de vórtices discretos, sem a modelagem dos efeitos de rugosidade superficial.

Estudos como o de Wakin *et al.* (2017) sobre o controle da esteira de aeronaves permitiram simulações que aproximaram o comportamento hiperbólico, que tem maior velocidade de dissipação do que quando ocorre o desprendimento de camada limite do solo.

Ainda na área computacional, Moraes *et al.* (2022) realizaram a simulação do desenvolvimento da trajetória com uma nuvem de vórtices discretos, modelagem de turbulência, efeitos de vento lateral e transferência de calor, porém sem realizar a modelagem de rugosidade superficial.

Duró e Bergadà (2021) realizaram um estudo

simplificado do desprendimento de vórtices de ponta de asa para diferentes tamanhos de aeronaves, com a teoria potencial a fim de acelerar os cálculos, sem, também, efeitos de rugosidade superficial.

A condição de contorno de impenetrabilidade é, automaticamente, satisfeita com o uso do método de imagens, (KATZ & PLOTKIN, 1980), no qual se geram vórtices discretos-imagens simétricos aos vórtices discretos reais, porém com intensidades opostas. A cada instante, se realiza a interação vórtice-vórtice por meio da lei de Biot-Savart, considerando os efeitos da nuvem de vórtices discretos e dos vórtices discretos imagens.

Os processos de difusão e advecção são resolvidos com o algoritmo da separação dos efeitos viscosos (CHORIN, 1973). Neste trabalho, a difusão foi resolvida utilizando o método do avanço randômico, enquanto a advecção utilizou um esquema de Adams-Bashforth de segunda ordem.

A turbulência foi modelada com uma metodologia de *Large Eddy Simulation* (LES), por meio uma função estrutura de velocidade de segunda ordem, adaptada para escoamento bidimensional. Foi realizada, ainda, a modelagem de efeitos de rugosidade superficial junto ao solo, uma contribuição importante deste trabalho. Para acelerar o tempo de simulação, foi utilizado processamento paralelo utilizando OpenMP. A implementação desta técnica acelera consideravelmente os cálculos e possibilita a realização de cálculos mais custosos computacionalmente.

Os resultados obtidos foram comparados com as trajetórias experimentais de Liu e Srnsky (1990) e também com os trabalhos já desenvolvidos por Zheng e Ash (1996), e apresentaram uma boa compatibilidade. Além disso, foi gerado um vídeo do desenvolvimento da trajetória utilizando o *software* TECPLOT, facilitando a visualização dos resultados obtidos. O *link* para o vídeo é encontrado na seção dos resultados.

### Metodologia

Inicialmente, é feita a adimensionalização do problema ao se adotarem grandezas representativas, a fim de definir as escalas do problema. A partir disso, utilizou-

se a metodologia do Método dos Vórtices Discretos (MVD). A equação do transporte da vorticidade em duas dimensões é representada pela equação (1), simplificada da equação da vorticidade de Helmholtz (BATCHELOR, 1967):

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla})\omega = (\nu + \nu_t)\nabla^2 \omega \quad (1)$$

onde  $\omega$  é o único componente não-nulo do campo de vorticidades,  $\nu$  a viscosidade molecular,  $\nu_t$  a viscosidade turbulenta e  $\vec{u}$  o campo de velocidades. Ainda, consideram-se na equação (1) as hipóteses de escoamento incompressível, de propriedades termodinâmicas do fluido constantes e escoamento isotérmico.

A solução da equação do transporte de vorticidade é feita utilizando-se o algoritmo da separação dos efeitos viscosos proposto por Chorin (1973) que, para incrementos de tempo pequenos, diz que a equação (1) pode ser dividida em duas equações que representam, respectivamente, os problemas da advecção e da difusão da vorticidade; resolve-se cada uma delas e somam-se seus efeitos. A advecção foi resolvida pelo esquema de avanço de segunda ordem de Adams-Bashforth (FERZIGER, 1981), e a difusão utilizou o método de avanço randômico, que é um método estatístico baseado no movimento Browniano de partículas.

A advecção da nuvem de vórtices discretos necessita do cálculo da velocidade total induzida por cada vórtice discreto da nuvem, sendo calculada sobre cada vórtice discreto. Este cálculo leva em conta as contribuições dos vórtices discretos, de suas imagens e do vento lateral, e é realizado por meio da Lei de Biot-Savart (KATZ & PLOTKIN, 1991).

A turbulência é modelada com o cálculo da viscosidade turbulenta. A finalidade é realizar a transferência de energia das grandes escalas para as pequenas escalas (BIMBATO, 2012). Para isso, filtram-se as equações diferenciais governantes, na qual as grandes escalas são resolvidas e as pequenas escalas são modeladas.

Modelam-se as pequenas escalas via função estrutura de velocidade de segunda ordem, que foi adaptada para o espaço bidimensional. Tal adaptação é obtida quando se calculam os efeitos turbulentos para um vórtice discreto considerando os vórtices discretos que se encontram no interior de uma coroa circular centrada no vórtice discreto em análise. A função estrutura de velocidade é usada para calcular a viscosidade turbulenta pela equação (2) a seguir:

$$\nu_t = 0,105C_k^{-3/2}\sigma_0\sqrt{\bar{F}_2(t)} \quad (2)$$

onde  $C_k$  é a constante de Kolmogorov,  $\sigma_0$  o raio do núcleo do vórtice discreto em análise e  $\bar{F}_2(t)$  é a função estrutura de velocidade para o mesmo vórtice discreto.

Em seguida, modelam-se efeitos de rugosidade junto ao solo. Esta etapa é viabilizada com o suporte da modelagem de turbulência. Entretanto, ao invés de utilizar uma coroa circular, a rugosidade associa-se com pontos rugosos gerados em uma semicircunferência em torno dos vórtices discretos nascentes em cada ponto de controle. O efeito inercial adicionado pela rugosidade é refletido no valor do raio do núcleo do vórtice discreto nascente, visto na equação (3).

$$\sigma_{0m}(t) = 2\sqrt{\frac{\Delta t}{Re}(1 + \nu_t Re)}\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{0N}}\right) \quad (3)$$

onde  $\sigma_0$  é o raio do vórtice discreto não rugoso,  $\sigma_{0N}$  é o raio nominal do vórtice discreto,  $\Delta t$  é o incremento de tempo e  $Re$  é o número de Reynolds.

A condição de escorregamento nulo é satisfeita sobre pontos de controle na pista. Para isso, é necessário resolver um sistema linear de equações algébricas, cujo vetor coluna incógnita resulta na intensidade dos vórtices discretos nascentes. A solução é obtida via método dos mínimos quadrados.

Utiliza-se processamento paralelo com OpenMP para Fortran, a fim de reduzir o tempo de processamento da simulação numérica, pois permite o uso de todos os *threads* de um processador, ao invés de apenas um, como é usado no processamento serial. Essa ferramenta é importante, principalmente, por conta da interação vórtice-vórtice, na Lei de Biot-Savart (LOS REIS, 2017), que é altamente custosa computacionalmente.

Os resultados obtidos passaram por uma etapa de pós-processamento usando o software TECPLOT, que possibilitou que os arquivos de saída fossem unidos em forma de vídeo e permitiu a visualização do escoamento. O programa também calculou as magnitudes de velocidade para permitir a visualização da ordem de grandeza das estruturas primárias e secundárias geradas.

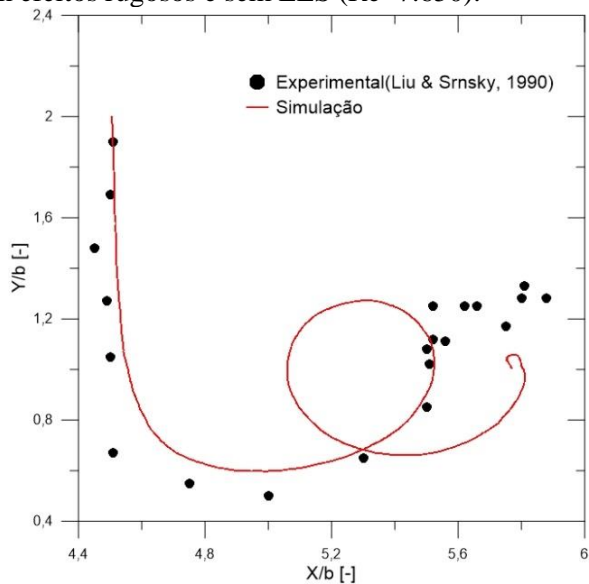
## Resultados e discussão

Inicialmente, apresenta-se o resultado da simulação numérica sem o uso de LES e com chão do aeroporto liso, para comparação com a trajetória experimental (figura 1). Os eixos estão em unidades adimensionalizadas de comprimento. Este resultado apresenta boa conformidade com os resultados experimentais. Entretanto, na medida em que o par de estruturas vorticosas primárias passa a interagir mais fortemente com o chão do aeroporto, a trajetória passa a divergir dos resultados experimentais, especificamente, nos instantes de tempo que se formam estruturas vorticosas secundárias e terciárias.

Esta diferença deve-se a alguns motivos, já discutidos por Zheng e Ash (1996). Os valores experimentais

foram obtidos a partir de medições feitas em um tanque, e nestas condições, conforme ocorre o desenvolvimento temporal das estruturas vorticosas que interagem com a parede, verifica-se uma interferência nos valores medidos. Outro fator que pode ser destacado é que a medição do centro das posições das estruturas vorticosas desprendidas é difícil de ser feita experimentalmente, por ocorrer mistura com as estruturas vorticosas secundárias e terciárias presentes no escoamento.

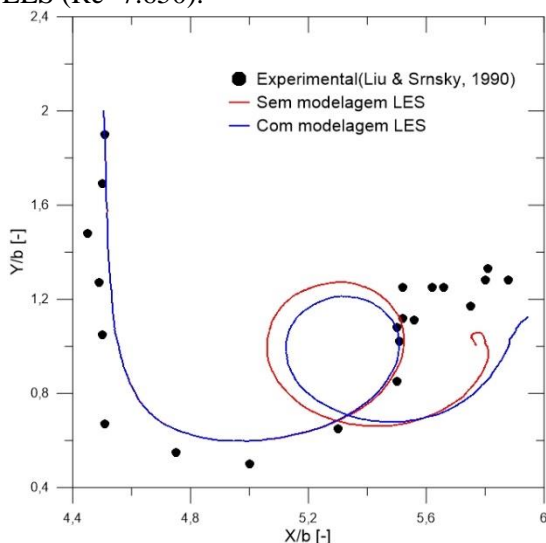
Figura 1 – Trajetória média dos vórtices de ponta de asa sem efeitos rugosos e sem LES ( $Re=7.650$ ).



Fonte: O autor (2022).

Em seguida, apresenta-se na figura 2 outro resultado da simulação numérica, porém com simulação tipo LES da turbulência e ainda com plano que representa o chão do aeroporto na condição de parede hidraulicamente lisa.

Figura 2 – Trajetória média dos vórtices de ponta de asa com LES ( $Re=7.650$ ).



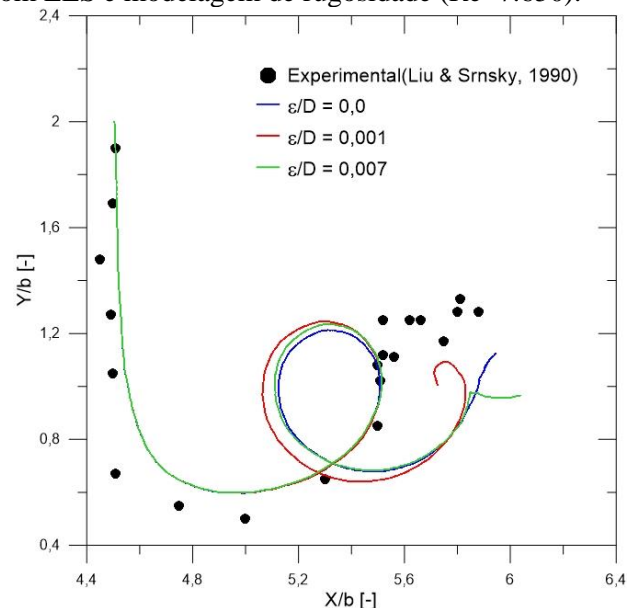
Fonte: O autor (2022).

A simulação LES altera a trajetória da estrutura

vorticosa primária do lado direito. Entretanto, como se observa na figura 2, o comportamento ainda é similar à modelagem sem os efeitos da turbulência. Destacam-se os mesmos problemas citados para o caso apresentado na figura 1, mesmo assim, o algoritmo consegue retratar alterações que a implementação de turbulência gera na trajetória do centro da estrutura vorticosa primária.

Apresentam-se, na figura 3, os resultados da simulação com LES e considerando diferentes alturas médias de rugosidade para verificar a sensibilidade do modelo.

Figura 3 – Trajetória média dos vórtices de ponta de asa com LES e modelagem de rugosidade ( $Re=7.650$ ).



Fonte: O autor (2022).

Observa-se que a rugosidade acelerou o desprendimento das estruturas vorticosas do chão do aeroporto, isto é, facilitou o descolamento da camada limite que se forma nesse chão. Este resultado é coerente com a previsão física para o escoamento. Observa-se, também, que as trajetórias não apresentaram mudanças bruscas em relação à trajetória com chão liso do aeroporto. Isto mostra que o modelo foi incorporado de modo apropriado ao algoritmo e a sensibilidade é apropriada.

Um fato, importante de ser discutido, é que os ensaios realizados foram feitos para número de Reynolds de 7.650, que não é representativo para um problema do desprendimento de vórtices de ponta de asa de um avião em condições reais. Porém, este número é utilizado para que seja feita a aferição do algoritmo desenvolvido, devido aos resultados experimentais. A animação gerada pelo pós-processamento no TECPLOT pode ser vista no seguinte link: <https://youtu.be/AP-3jty2nso>. Portanto, é possível realizar novas simulações para maiores valores do número de Reynolds. Informações sobre a simulação numérica: chão discretizado em 40 painéis, envergadura da aeronave  $b = 1$ , comprimento da pista  $B = 8b$ ,



distância entre o chão e a posição de desprendimento do par de estruturas vorticosas primárias  $h/b=2.0$  e 50 vórtices discretos representando cada estrutura vorticiosa primária de intensidade unitária. Não foram incluídos efeitos de vento lateral na pista.

### Conclusões

Este trabalho implementou um modelo de efeitos de rugosidade superficial do chão do aeroporto sobre a trajetória e dissipação de um par de estruturas vorticosas primárias gerado a partir da ponta de asa de uma aeronave. Os resultados das trajetórias mostraram a sensibilidade do modelo de rugosidade.

Os efeitos da rugosidade do solo aceleram o desprendimento das estruturas vorticosas secundárias e terciárias no chão, o que era esperado. Observa-se que seus efeitos não foram abruptos após a implementação, o que é também apresenta comportamento esperado.

Os resultados numéricos apresentaram coerência com resultados de Zheng e Ash (1996), embora estes últimos utilizaram apenas dois vórtices discretos de sinais opostos a partir das pontas de uma asa de avião. Portanto, o estudo atual é mais vantajoso, porque permitiu que fosse observada a deformação das estruturas vorticosas ao longo de seu desenvolvimento.

Como trabalho futuro, podem-se utilizar diferentes alturas de rugosidade para o centro da pista do aeroporto e para pistas laterais e também simular transferência de calor por convecção mista (MORAES et al. 2022). É possível, também, realizar simulações com presença de vento lateral.

Pode-se, ainda, realizar estudos com números de Reynolds maiores, necessitando-se de resultados experimentais para comparação, quando possível.

As simulações numéricas consideram descrição puramente lagrangiana, que possibilita o acompanhamento individual de cada vórtice discreto presente no domínio fluido; o que resulta numa abordagem diferente da Euleriana, tipicamente utilizada em simulações de dinâmica dos fluidos computacional.

Destaca-se que este trabalho gerou um artigo que foi aceito para publicação no ENCIT 2022, oferecendo ainda mais visibilidade à linha de pesquisa desenvolvida (CARVALHO et al., 2022).

### Agradecimento

Aos integrantes do Laboratório de Modelagem e Algoritmo de Métodos Lagrangeanos (LMAML) do Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI.

À Universidade Federal de Itajubá/União (PIBIC UNIFEI) pelo suporte financeiro por meio da concessão

da bolsa de Iniciação Científica.

### Referências

**BATCHELOR, G.K., (1967)**, “An Introduction to Fluid Dynamics”. Cambridge University Press.

**BIMBATO, A. M., (2012)**, “Estudo de Escoamento Turbulento em Torno de um Corpo Rombudo de Superfície Hidraulicamente Lisa ou Rugosa Utilizando o Método de Vórtices Discretos”. Tese de Doutorado, IEM/UNIFEI.

**CARVALHO, G.F.M., JÚNIOR, F.H.C., MORAES, P.G., OLIVEIRA, M.A., BIMBATO, A.M., ALCÂNTARA PEREIRA, L.A. (2022)**, “Numerical Simulation of Vortices Generated at the Wing Tips of Aircraft near a Rough Ground Plane by Using Lagrangian Description”, Proceedings of the 19th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, November 06-10, Bento Gonçalves-RS, Brazil, Paper ENCIT-36736.

**CHORIN, A.J., (1973)**, “Numerical Study of Slightly Viscous Flow”. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 57, pp.785-796.

**DURÓ, J.M.; BERGADÀ, J.M. (2021)**, “Airplane Vortices Evolution Near Ground”, *Appl. Sci.* v. 11, pp. 1-39.

**FERZIGER, J.H., (1981)**, “Numerical Methods for Engineering Application”. John Wiley & Sons, Inc.

**HARVEY, J.K.; PERRY, F.J., (1971)**, “Flowfield Produced by Trailing Vortices in the Vicinity of the Ground”, AIAA Journal, vol. 9, no. 8, pp. 1659-1660.

**KATZ, J., PLOTKIN, A., (1991)**, “Low Speed Aerodynamics: From Wing Theory to Panel Methods”. McGraw Hill, Inc.

**LAMB, H. (1932)**, “Hydrodynamics”, Dover Publication, New York.

**LIU, H.T. AND SRNSKY, R.A., (1990)**, “Laboratory Investigation of Atmospheric Effects on Vortex Wakes”, Flow Research, Inc., Report No. 497, Belleville, WA.

**LOS REIS, J.H.F., (2017)**, “Método de Vórtices Discretos no Ambiente FORTRAN/OPENMP”. Trabalho Final de Graduação, IEM/UNIFEI.

**MORAES, P. G., OLIVEIRA, M. A., BIMBATO, A. M., ALCÂNTARA PEREIRA, L.A., (2022)**, “A Lagrangian Description of Buoyancy Effects on Aircraft Wake Vortices from Wing Tips near a Heated Ground Plane”, *Energies*, v. 15 (19): 6995.

**RICCI, J.E.R., ALCÂNTARA PEREIRA, L.A., HIRATA, M.H. AND OLIVEIRA, W., (2003)**, “Simulation of the Airplane Wake Using the Vortex Method with Turbulence Modeling”, Proceedings of the 17th International Congress of Mechanical Engineering, November 10-14, São Paulo, Brazil, Paper COBEM2003-0887.

**WAKIN, A.; JACQUIN, L.; BRION, V.; DOLFI-BOUTEYRE, A., (2017)**, “Vortex Pair in ground vicinity: Optimal Perturbation and Optimal Control”, 23ème Congrès Français de Mécanique, 28 de Agosto - 1º de Setembro, Lille, França.

**ZHENG, Z.C.; ASH, R.L., (1996)**, “Study of Aircraft Wake Vortex Behavior Near the Ground”, AIAA Journal, v. 34, nº 3, pp. 580-589.