

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
ANA PAULA FRANCISCHINELLI

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE DISPOSITIVO PARA
PRÉ ROTAÇÃO DAS RODAS DO TREM DE POUSO
PRINCIPAL DE AERONAVES**

Taubaté - SP
2019

ANA PAULA FRANCISCHINELLI

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE DISPOSITIVO PARA
PRÉ ROTAÇÃO DAS RODAS DO TREM DE POUSO
PRINCIPAL DE AERONAVES**

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Aeronáutica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientador(a): Prof. Pedro Augusto da
Silva Alves

Coorientador(a): Daniel Bragotto Bertanha

**Taubaté - SP
2019**

SIBi - Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

F819e Francischinelli, Ana Paula
Estudo de viabilidade de dispositivo para pré rotação das rodas do trem de pouso principal de aeronaves / Ana Paula Francischinelli. – 2019.
38f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.
Orientação: Prof. Pedro Augusto da Silva Alves, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Engenharia aeronáutica. 2. Pouso de aeronaves. 3. Rodas pré-giratórias. I. Título. II. Graduação em Engenharia Aeronáutica.

CDD 629

ANA PAULA FRANCISCHINELLI

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE DISPOSITIVO PARA PRÉ ROTAÇÃO DAS
RODAS DO TREM DE POUSO PRINCIPAL DE AERONAVES**

Trabalho de Graduação apresentado para
obtenção do Certificado de Graduação do
Curso de Engenharia Aeronáutica do
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Taubaté.


DATA: 28/11/2019

RESULTADO: APROVADO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Pedro Augusto da Silva Alves

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

Prof. Me Pedro Marcelo Alves Ferreira Pinto

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

28 de novembro de 2019.

DEDICATÓRIA

Honro o fechamento deste ciclo dedicando este trabalho aos meus pais, Evilasia Vieira Francischinelli e Euzebio Francischinelli Filho, aos meus professores, que também se fizeram amigos e a todos que de alguma maneira estão em constante busca do conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Pedro Augusto da Silva Alves, por contribuir com o tema deste trabalho e pelo suporte durante todo o desenvolvimento.

Ao Engenheiro pesquisador Edson Basso, pela imensurável dedicação e contribuição técnica ao trabalho.

Aos meus professores durante a jornada universitária, pela colaboração com o meu crescimento profissional.

Aos meu pais, pelo amor e apoio incondicional.

Enfim, minha eterna gratidão a todos aqueles que fizeram parte da minha caminhada e me permitiram alcançar a minha profissão.

"Sempre é possível tornar as coisas
mais complicadas, mas vamos simplificar as coisas..."

(IGO BESSELINK)

RESUMO

Ano após ano, o mercado de aviação vem se tornando cada vez mais sólido e promissor, no qual os avanços tecnológicos buscam contribuir com a melhora na relação custo-benefício para a indústria. No cenário atual é indispensável aliar sustentabilidade e responsabilidade ambiental com segurança e altos níveis de desempenho. Com a crescente competitividade no mercado é preciso investir constantemente em inovações tecnológicas. O objetivo desse estudo é verificar qualitativamente potenciais melhorias na vida útil dos pneus do trem de pouso principal de aeronaves de porte médio através da rotação da roda previamente ao *touchdown*, o que reduz a derrapagem entre os pneus e a superfície da pista, imediatamente após o pouso. Tal estudo consiste em uma análise matemática aliada a simulação computacional simplificada de um modelo físico de um trem de pouso com uma roda e um dispositivo composto basicamente por aletas acopladas a roda. O princípio físico do funcionamento é o aproveitamento da energia cinética do vento e conversão dessa energia em energia rotacional no eixo das rodas. Contudo, devido a sérias limitações dos instrumentos computacionais de simulação disponíveis, tanto quanto a geração de malhas quanto aos *solvers* adequados para a análise dessa problemática, o estudo identificou qualitativamente a existência da influência do dispositivo na pré-rotação das rodas do trem de pouso através de comparações entre o torque e o arrasto gerado para cada configuração do dispositivo.

Palavras-chave: Engenharia Aeronáutica. Pouso de aeronaves. Rodas pré-giratórias.

ABSTRACT

Year after year the aviation market has been becoming each time more solid and promising in which the technological advances look for contributing with a better cost-benefit relationship for the industry. In the current scenario is indispensable to relate sustainability and environmental responsibility to safety and high levels of performance. With the increasing competitiveness in the market it is necessary to invest constantly in technological innovations. The aim of this research is to verify qualitatively the potential improvement on the life cycle of the midsize aircraft main landing gear tires through the wheel previously being rotated to touchdown in order to reduce the sideslip between the tire and the runway surface right after the landing. Such study consists of an mathematical analysis allied to a simplified computational analysis of a physical solid model of a landing gear with a wheel, tire and a device composed basically of vanes attached to the wheel. The physical principle of the functionality is that the vanes will utilize the kinetic energy of the airflow during landing and convert it to rotational energy to the wheel axis. Due to the serious limitations of the available computational instruments, as well as the mesh generation and the solvers for the analysis of this problematic, the study qualitatively identified the existence of the influence of the device on the pre-rotation of the landing gear wheels through comparisons between torque and the drag resultant from each configuration.

Keywords: Aeronautical Engineering. Aircraft landing. Pre-spinning wheels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Visão global de uma das malhas computacionais geradas – Exemplificação da Fronteira de *Farfield*.

Figura 2 – Visão geral de uma das malhas computacionais geradas – Exemplificação do posicionamento superior da fronteira de *Farfield*.

Figura 3 – Vista geral da malha do trem de pouso e respectivo detalhamento.

Figura 4 – Contornos de pressão para as aletas posicionadas a 0 grau.

Figura 5 – Contornos de pressão para as aletas posicionadas a 20 graus.

Figura 6 – Contornos de pressão para as aletas posicionadas a 30 graus.

Figura 7 – Contornos de pressão com linhas de corrente, para as aletas posicionadas a 0 graus.

Figura 8 – Contornos de pressão com linhas de corrente, para o conjunto sem o dispositivo.

Figura 9 – Contornos de pressão com linhas de corrente, para as aletas posicionadas a 0 graus.

Figura 10 – Contornos de pressão com linhas de corrente, para as aletas posicionadas a 20 graus.

Figura 11 – Contornos de pressão com linhas de corrente, para as aletas posicionadas a 30 graus.

Figura 12 – Tempo [s] para que a roda alcançasse a velocidade [m/s] de avanço da aeronave.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de forças e momentos obtidos através das simulações.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	<i>Agência Nacional de Aviação Civil</i>
CFD	<i>Computacional Fluid Dynamics</i>
LES	<i>Large Edge Simulation</i>
RANS	<i>Reynolds-averaged Navier-Stokes</i>
UNITAU	<i>Universidade de Taubaté</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Coeficiente de atrito
R	Raio da roda
r_e	Raio efetivo da roda
∂	Deflexão do pneu
K_t	Constante da mola
F_R	Força vertical reagida pelo pneu
\dot{w}	Aceleração rotacional
I	Momento de inércia
F_x	Força de atrito
M	Torque
w	Velocidade rotacional
$w_{inicial}$	Velocidade rotacional inicial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3 METODOLOGIA.....	20
3.1 GEOMETRIA DO TREM DE POUSO PRINCIPAL.....	20
3.2 GERAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL	20
3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	23
3.4 ANÁLISE ANALÍTICA DA DINÂMICA DAS RODAS	24
3.4.1 GEOMETRIA DA RODA.....	25
3.4.2 DINÂMICA ROTACIONAL DAS RODAS	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
5 CONCLUSÃO.....	35
REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

Os pneus são elementos fundamentais e responsáveis por garantir a segurança dos pousos e decolagens de qualquer aeronave, bem como o controle durante o taxiamento. O trem de pouso, principalmente de aeronaves maiores, precisa suportar alta capacidade de carga e alta velocidade, além de garantir o alinhamento da aeronave na pista, e devem absorver grande parte do choque da aeronave com a pista, no pouso, acelerações e desacelerações súbitas e grandes variações de temperatura. É um componente aeronáutico extremamente complexo, tanto estrutural quanto com respeito aos materiais com que é manufaturado. A fabricação de um pneu de aviação envolve o que há de mais moderno em avanços tecnológicos. Além disso, é um elemento que representa uma grande despesa para os operadores, tanto proprietários particulares quanto companhias aéreas, substituí-los, assim como mantê-los, pois os pneus de aviões possuem vida curta, e ainda que com pouca quilometragem, estes sofrem grande desgaste.

A fase de pouso de uma aeronave é a mais crítica em relação ao desgaste de pneus, pois ao tocar o solo em alta velocidade a fricção entre a borracha do pneu e o pavimento é tão intensa que acaba por queimar a borracha, sendo possível inclusive visualizar bastante fumaça. Os conjuntos de roda e pneu, em aeronaves de médio porte por exemplo, por ocasião do pouso, devem subitamente ser acelerados de 0 a 240 km/h. A energia necessária para esta aceleração é proporcionada pela fricção com o pavimento, para que um enorme torque seja dado ao pneu/roda e a velocidade de rotação seja alcançada, fazendo com que o conjunto pare de derrapar e comece a deslizar.

Partindo do princípio de que esses pneus são fabricados com borracha natural, látex, devido a propriedades importantes desse material, a grande demanda de pneus pode ser uma problemática ambiental no que toca o esgotamento desse recurso natural. Além do que, a eventual troca de um pneu de uma aeronave em um vôo com escala é relativamente demorada e dispendiosa para a companhia, e ainda pode trazer desconforto para os passageiros, atrasando o vôo em relação aos horários previstos de saída e chegada. Ou seja, a eventual troca de um pneu reduz a disponibilidade da aeronave para uso de seu proprietário.

Considerando a máxima de que a redução do desgaste de pneus pode aumentar sua vida útil assim como sua disponibilidade para uso, este estudo baseia-se no princípio da pré-rotação do pneu/roda, em que aletas acopladas a roda direcionam o escoamento proveniente do deslocamento da aeronave durante a aproximação para pouso, para que o pneu não toque o solo parado e o tempo de fricção com o pavimento seja reduzido, reduzindo assim o esfacelamento e/ou queima da borracha. A solução proposta para rotacionar a roda parte do princípio de certos tipos de turbinas eólicas que dependem predominantemente da força de arrasto para movimentar o rotor. O objetivo é estudar qualitativamente a viabilidade de pequenas aletas curvas que aproveitem a energia cinética do vento e a convertam em energia rotacional no eixo. Devido a significativas limitações dos instrumentos computacionais de simulação disponíveis, a responsabilidade das análises será identificar a existência da influência do dispositivo na pré-rotação das rodas do trem de pouso através de comparações entre o torque e o arrasto gerado para cada configuração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

“TREM DE POUSO: Infraestrutura que suporta o peso de uma aeronave quando em contato com o solo ou com a água e em geral contém um mecanismo para a redução do choque no pouso”. (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, 2017).

O fato de as rodas do trem de pouso principal de uma aeronave estarem totalmente travadas durante a fase de *touchdown* de um procedimento de pouso, configura este momento como uma fase crítica para os pneus das aeronaves, pois acaba por sensibilizar a borracha devido a derrapagem dos pneus. Uma roda giratória no momento do toque com o solo seria então capaz de se recuperar mais rapidamente, se não imediatamente, em relação a uma roda estática que estará totalmente travada por mais tempo.

De acordo com estudos de Alroqi e Wang (2016), soluções para pré rotação de rodas que se baseiam no princípio de turbinas eólicas pequenas movidas a força de arrasto apresentam resultados satisfatórios para evitar a derrapagem total dos pneus se forem capazes de gerar 50% da velocidade de avanço da aeronave antes do *touchdown*, ou seja, se o dispositivo for capaz de fazer com que a roda atinja no mínimo a metade da velocidade de avanço da aeronave antes do momento do impacto no pouso, aproveitando o vento abundante durante a fase de aproximação da aeronave.

A velocidade de aproximação de aeronaves de médio a grande porte durante a fase de pouso é consideravelmente alta devido, principalmente, a limitações de peso. Essa velocidade elevada causa, após o *touchdown*, uma alta taxa de escorregamento entre os pneus e a superfície da pista, pois os pneus estão parados nesse momento. Segundo Cadle & Williams (1978 apud Alroqi, A. A.; Wang, W., 2015, p.1), o calor gerado pela alta derrapagem dos pneus no pouso é suficiente para derreter a fina camada de borracha e aderir à superfície da pista.

A temperatura do pavimento da pista aumenta imediatamente após o toque da aeronave com o solo, e as ligações do material de borracha do piso do pneu rompem-se e então o desgaste ocorre literalmente pela força de atrito. Portanto, o processo de derrapagem produz desgaste dos pneus à medida que a borracha queima, e o material é desgastado enquanto os pneus aceleram para alcançar a velocidade de avanço da aeronave ao longo da pista. Bennett (2011 apud Alroqi, A.A; Wang, Weiji, 2016, p.127) discute algumas questões na qual em uma delas menciona que parte das partículas de

borracha que queimam sob o processo de derrapagem evaporam na forma de fumaça ($\pm 32\%$), visível a olho nu inclusive, enquanto o restante de borracha esfacelada permanece na pista para ser removido posteriormente.

O número de estudos que simularam a dinâmica dos pneus durante o pouso é ainda bastante baixo. Nomes como Padovan, Kazempour e Kim (1990) construíram um modelo de balanço de energia de uma única roda do ônibus espacial, que experiencia grandes porções de desgaste por pouso, com o objetivo de calcular a taxa de trabalho em virtude da fricção entre o pneu e o pavimento da pista, utilizando modelos simples de fricção através da formulação de atrito de Coulomb (coeficiente de atrito constante, μ) incluindo ainda efeitos do crescimento da inércia rotativa da roda. Eles concluíram basicamente que o desgaste do pneu está intrinsecamente ligado ao aumento da velocidade horizontal de pouso, taxas de escoamento e coeficientes de atrito de superfície.

Besselink (2000) construiu um modelo e simulou a oscilação lateral no trem de pouso principal de uma aeronave Boeing 747-400, registrando alguns dados como o tempo de rotação da roda durante o pouso. Khapane (2004), apresentou dados que se assemelhavam aos estudos de Basselink, onde amostrava que os pneus das aeronaves aceleravam da velocidade de rotação zero para uma velocidade de rolagem livre em cerca de 0,1 segundos após o *touchdown*.

Beazley (1947) e outros, propuseram patentes de sistemas para pré rotação das rodas do trem de pouso principal antes da fase de pouso, cujo princípios eram dos mais variados, como por exemplo, em seu documento de patente, Beazley propõe soluções pneumáticas, com suprimento de ar comprimido que de alguma maneira fosse otimizado e gerasse torque as rodas. Em tal documento o autor também se refere a soluções de motor com fluido elástico, fontes de gás, controle através de aparelhos fotoelétricos e cita propostas com sistemas baseados no princípio do aproveitamento da energia eólica disponível na fase de aproximação para pouso.

O moderno pneu de avião é uma estrutura bastante complexa e produto de uma engenharia avançada, projetado para transportar cargas pesadas em altas velocidades, com a menor dimensão e peso possível, ou seja, uma configuração prática que garanta o êxito da missão. A tecnologia empregada em um pneu aeronáutico envolve desde inteligências em gestão até uma variedade de avaliações de laboratório e campo. Todo o processo é analisado cuidadosamente para assegurar

os requisitos de desempenho e garantir a certificação do produto aeronáutico. (GOODYEAR AVIATION, 2017)

Os pneus são produtos multicomponentes compostos por três materiais principais: aço, borracha e tecido. Os tipos de tecidos podem ser variados, assim como os compostos de borracha, buscando propriedades especiais que devem ser atribuídas devido aos requisitos de cada configuração de aeronave. Os pneus atendem às especificações exatas e são qualificados para as demandas mais rigorosas estabelecidas pelas aeronaves de alto desempenho atuais, para atenderem requisitos rígidos de segurança.

Popularmente, dizem que a durabilidade média de um pneu empregado em aeronave comercial é de cerca de 250 voos. Os aviões comerciais, especialmente os usados em voos mais curtos, podem fazer até dez voos por dia, logo, os pneus do avião podem durar apenas 25 dias. Independente da veracidade desse dado específico, a questão é que os pneus aeronáuticos são dispendiosos, devido ao alto valor tecnológico empregado, e infelizmente duram bem pouco.

O pneu aeronáutico é fabricado totalmente com borracha natural, feita do látex da seringueira, diferente dos pneus automotivos que são feitos de borracha sintética, feita de derivados do petróleo. O látex é composto por 35% de hidrocarbonetos (isopreno), além de água, proteínas, lipídios etc, formando uma microestrutura que confere ao material capacidade de deformação e elasticidade. A borracha natural é composta por moléculas maiores e mais pesadas, configurando uma estrutura estável, o que acaba por atribuir menor desgaste ao atrito e maior elasticidade, logo, a ruptura do material não ocorre facilmente. Essas características fazem com que os pneus de carga e de avião, os preservativos e as luvas cirúrgicas sejam obrigatoriamente fabricados com borracha natural (SOUZA, 2013).

Os pneus são desenvolvidos com o objetivo de suportar diversos tipos de esforços e impactos, mas existem limites no material quanto a sua resistência. A seguir, alguns fatores que podem interferir, ao mesmo tempo ou não, nesses limites (ARTHUR ÉDICO M. DA SILVA, 2017):

1. Ciclos de alta e baixa pressão: A alta pressão ocasiona maior desgaste no centro da banda de rodagem, enquanto a baixa pressão imprime o efeito contrário, tal desgaste pode gerar trincas internas na carcaça.

2. *Câmbor* positivo ou negativo: O desgaste excessivo em um dos lados do pneu é causado por empenamento ou desalinhamento do eixo.

3. Trilhos: Desgaste descontinuado ao longo das bordas dos sulcos, comum em pneus que rotacionam em eixo livre com cargas leves.

4. Folga dos rolamentos: Desgastes em forma de trilha no sentido diagonal, causado por folga dos rolamentos.

5. Pressões desiguais: Desgaste irregular nos cravos do pneu em formato de cunha, causado por mau emparelhamento e pressões desiguais.

6. Desgaste localizado: Desgaste numa região específica, causado por frenagem excessiva.

7. Perda das extremidades laterais da banda de rodagem: Partes da borda da banda de rodagem são extraídas, causado pela fricção do pneu em manobras fechadas.

Quanto a complexidade e responsabilidade da manutenção do setor do trem de pouso, todo o conjunto deve ser regularmente checado, senão diariamente, pois está diretamente ligado a segurança de pouso e decolagem da missão da aeronave. Segue o *check* (INSTITUTO DE AVIAÇÃO CIVIL, 2002):

- a) Todos os componentes, quanto ao estado e segurança da fixação;
- b) Amortecedores, quanto ao correto nível do óleo;
- c) Hastes, articulações e suportes, quanto ao desgaste excessivo, fadiga do material e deformações;
- d) Mecanismo de retração e distensão quanto à operação correta;
- e) Tubulações hidráulicas, quanto a vazamento,
- f) Sistema elétrico, quanto a desgaste e operação correta dos interruptores;
- g) Rodas, quanto a rachadura e estado dos rolamentos;
- h) Pneus, quanto a cortes e desgaste;
- i) Freios, quanto ao ajuste correto.

3 METODOLOGIA

Para simplificar a geometria do modelo, a simulação computacional e a análise semi-empírica da dinâmica da roda utilizaram-se as seguintes premissas, suportadas com referências:

1. O piloto não usa freios imediatamente após o *touchdown* para evitar rodas travadas, o que aumentaria a derrapagem. Portanto, uma velocidade horizontal constante foi usada nestas simulações.
2. A aeronave aterrissará com todas as rodas principais e sustentação zero da asa. Portanto, é utilizado o peso máximo de aterrissagem da aeronave.
3. A roda do nariz tocará o solo após o *touchdown* das rodas principais. Portanto, o peso da aeronave é dividido apenas pelo número de rodas do trem principal.

3.1 Geometria do Trem de Pouso principal

O modelo do trem de pouso foi simplificado com uma geometria genérica da perna do trem, assim como do pneu, desconsiderando-se possíveis sistemas de fluídos, cablagens, linhas da banda de rodagem do pneu, etc. O objetivo do modelo simplificado era a redução do tempo de processamento numérico, pois os recursos eram limitados. Considerou-se um conjunto roda/pneu similar à de aeronaves de porte médio, com o raio do pneu igual a 0,337 m e raio do cubo de 0,185 m.

3.2 Geração da malha computacional

Com o modelo simplificado, optou-se por utilizar meia geometria orientada no eixo de simetria do conjunto, também visando reduzir o domínio de cálculo, e assim reduzindo também o tamanho da malha computacional necessária para discretizar tal domínio. As simulações foram realizadas com o auxílio do software de dinâmica dos fluidos computacional CFD++, da empresa Metacomp *Technologies*. A geração das malhas foi feita no software ICEM, da empresa ANSYS. Após a importação do modelo geométrico para o ICEM, realizou-se um tratamento da geometria do modelo, a fim de eliminar linhas e pontos que possivelmente sobrecarregassem o processamento numérico de geração de malha e fossem considerados desnecessários.

O software ICEM é capaz de gerar malhas computacionais estruturadas e não estruturadas. Malhas estruturadas apresentam, de uma forma geral, um maior potencial sobre o controle na disposição e qualidade dos elementos gerados, a custo de uma maior interação do usuário com o programa. No caso do processo de geração de malhas não estruturadas presente no ICEM, a interação do usuário com o programa gerador é significativamente menor, reduzindo o custo homem/hora do processo. Porém, o controle sobre a qualidade e distribuição dos elementos de malha também é menor. Como o objetivo do presente trabalho era apresentar um estudo qualitativo entre um sistema com e um sistema sem o dispositivo de geração de torque, optou-se por realizar uma geração de malha não estruturada, pela maior simplicidade e menor tempo de familiarização da autora com o *software*.

A definição do tamanho do domínio computacional, bem como sua forma, foi baseada em experiências anteriores com outras simulações correlatas. Como se trata da simulação de um escoamento subsônico, é correto afirmar que as perturbações causadas pela presença do trem de pouso no escoamento se propagam em todas as direções, logo, eventualmente estas perturbações acabam por chegar na fronteira de malha denominada *farfield*, a qual pode, por razão das condições de contorno impostas, refletir parte destas perturbações para dentro do domínio. Esta situação claramente não representam a física do problema que se quer reproduzir aqui. Portanto é necessário posicionar a fronteira de *farfield* a uma distância onde estes efeitos não influenciem mais os valores das propriedades do escoamento sobre a superfície do conjunto do trem de pouso. Definiu-se então que a fronteira estaria posicionada a aproximadamente 50 vezes a altura do trem de pouso principal, o que reduziria satisfatoriamente a influência das condições de contorno aplicadas à ela sobre as propriedades calculadas ao longo da superfície do trem de pouso.

Uma vista desta fronteira externa é exemplificada na Figura 1, onde é possível notar a região de malhas mais densa, onde se posicionou as superfícies do trem de pouso. Além disso, é possível notar a diferença entre os tamanhos de elementos de malha utilizados para discretizar estas partes do domínio.

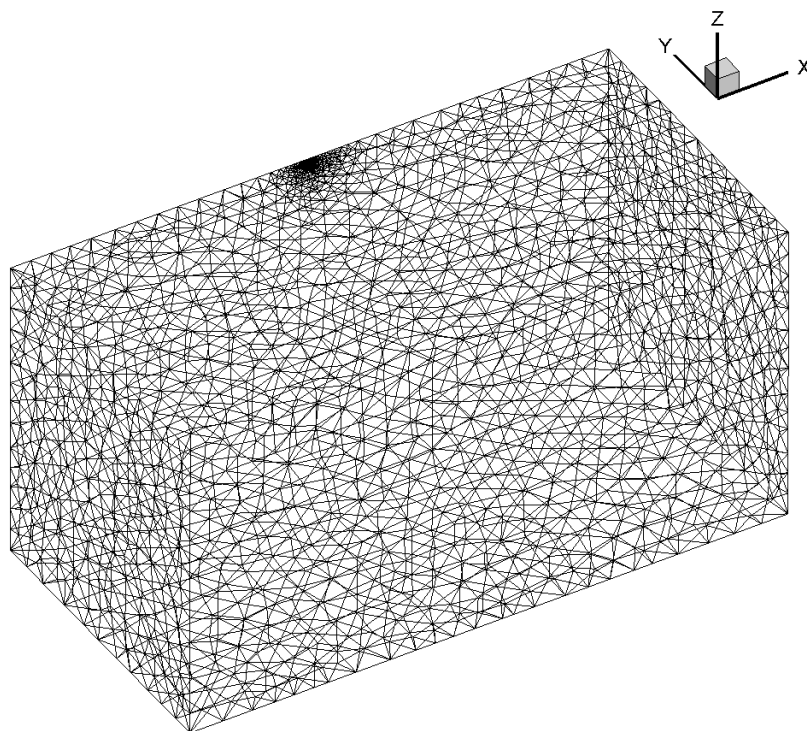


Figura 1 – Visão global de uma das malhas computacionais geradas – Exemplificação da Fronteira de *Farfield*. Fonte: ICEM

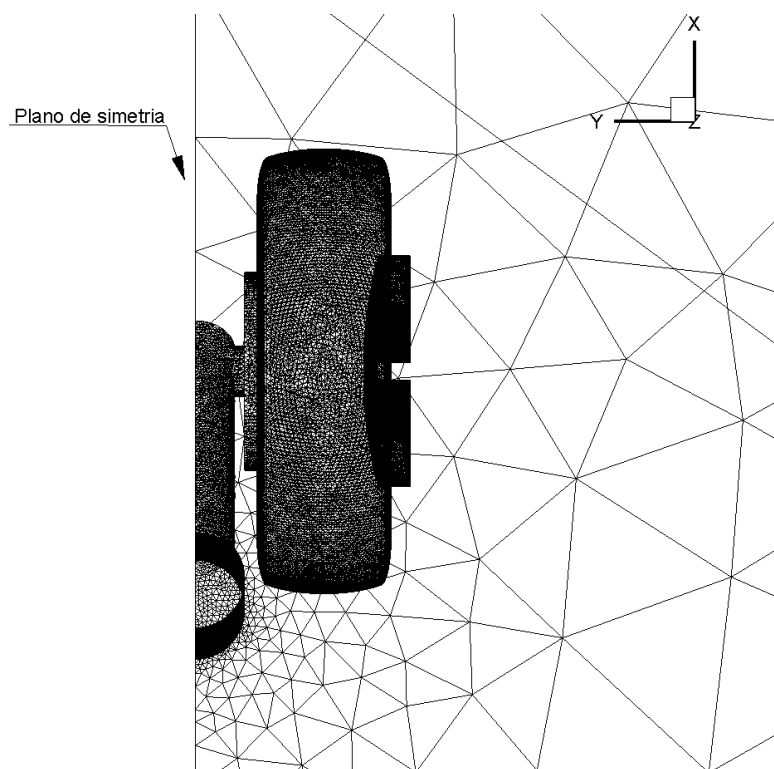


Figura 2 – Visão geral de uma das malhas computacionais geradas – Exemplificação do posicionamento superior da fronteira de *Farfield*. Fonte: ICEM

A parte superior do domínio foi posicionada no final da haste principal do trem de pouso. Por não incluir a fuselagem da aeronave neste estudo, por razões de simplicidade, julgou-se aceitável acomodar esta fronteira do domínio nesta posição, e aplicar condições de contorno que refletissem, em algum grau, a influência da fuselagem. O domínio é fechado com a presença de uma fronteira posicionada exatamente no plano que define a simetria do conjunto, mostrada na Figura 2.

Gerou-se quatro malhas diferentes, sendo uma para o trem de pouso sem o dispositivo gerador de torque e três malhas para o dispositivo gerador, cada uma com posições distintas das aletas em relação ao vento, sendo elas: zero graus, vinte e trinta graus. Todas as malhas foram constituídas de elementos tetraédricos e um maior refinamento de malha foi aplicado junto às superfícies do trem de pouso. A Figura 3 apresenta uma destas malhas, a título de exemplo, para o conjunto com o dispositivo gerador, na posição nominada de zero graus. Nesta figura, a imagem da esquerda mostra uma vista do conjunto completo, e a imagem da direita mostra, com mais detalhes, os elementos de malha sobre a superfície do conjunto.

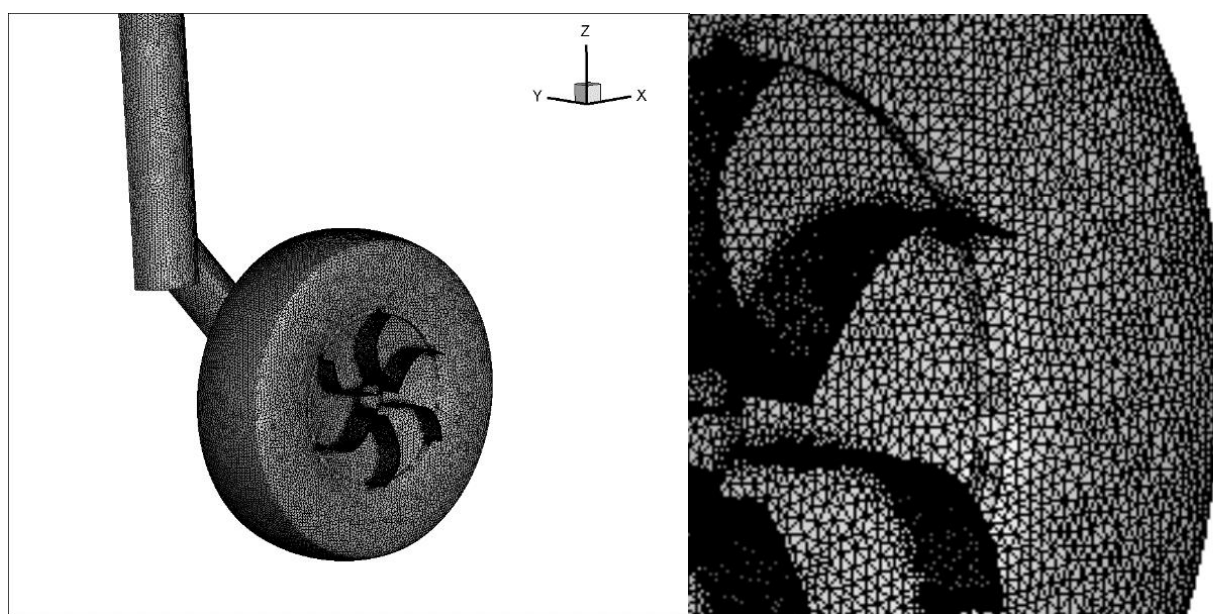


Figura 3 – Vista geral da malha do trem de pouso e respectivo detalhamento. Fonte: ICFM

3.3 Simulação Computacional

Assumiu-se que as rodas iniciavam a rotação através da geração de um torque devido a presença das aletas, que transformam a energia cinética do vento em energia

mecânica no eixo da roda assim que o trem de pouso se estende na fase de aproximação e o escoamento atinge o conjunto.

A análise no software CFD++ foi configurada da seguinte forma: A velocidade longitudinal do escoamento que atingiu o conjunto era constante e de 240 km/h, alinhada com o eixo x da malha, no sentido positivo, porque tal velocidade se aproxima da velocidade de pouso de aeronaves de médio porte. Todas as outras propriedades do escoamento foram tomadas com valores de atmosfera padrão, ao nível do mar, tais como, pressão atmosférica de 101.325,0 Pa, temperatura de 288,15 K e densidade aproximadamente igual a 1,225 kg/m³.

Como se trata de um escoamento com grande predominância da esteira do conjunto, o uso de um equacionamento baseado nas equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS) já não seria adequado. Este equacionamento depende totalmente do uso de modelos de turbulência para uma modelagem satisfatória dos termos que dão suporte à turbulência. Como os recursos computacionais disponíveis não eram suficientes para tal empreitada, resolveu-se abordar o problema fazendo uso das equações de Euler, que também possuem o seu valor como ferramenta de análise e que são capazes de tratar muitos problemas em Engenharia.

Um aspecto bastante importante a ser considerado foi o fato de as simulações serem realizadas com o eixo parado, ou seja, todo o conjunto sofria a ação do escoamento sem reagir a ele. Esta escolha simplificou de sobremaneira a simulação, ao mesmo tempo que não impactaria significativamente os resultados. Isso porque levou-se em consideração que o trem de pouso é estendido e fica sob ação do escoamento com a roda ainda sem velocidade de rotação e que todo o conjunto possui uma inércia relativamente grande, é razoável supor que, mesmo que a velocidade do vento imprima forças a roda durante um certo tempo, a sua velocidade de rotação não será considerável nos primeiros intervalos de tempo após sua exposição ao escoamento. Logo, todas as simulações foram realizadas com o eixo parado e o torque foi medido sob nestas condições.

3.4 Análise Analítica da dinâmica das rodas

As etapas a seguir descrevem as relações físicas utilizadas no desenvolvimento desse estudo. Baseando-se em um sistema de mola-amortecedor de massa usado para modelar forças verticais na estrutura do trem de pouso. Em uma

condição estática, a força vertical reagida pelo pneu é igual a constante da mola do trem de pouso multiplicada pelo deslocamento das molas em suspensão, que também é igual ao peso da aeronave, que é 124,587 kN (Baseado em uma aeronave pousando com 12.700 Kg, apenas com combustível de segurança). Para a simulação em questão utilizou-se apenas uma roda, logo, $F_R = 124,587/4 = 31,147$ kN.

3.4.1 Geometria da Roda

O raio da roda, a princípio R , no momento do pouso deflexiona em função do peso da aeronave e um raio efetivo, re , pode ser usado para generalizar o raio de rolamento através do contato do pneu. Tal raio efetivo foi obtido através de uma aproximação linear de Milwitzky, Lindquist & Potter (1955):

$$re = R - \frac{\partial}{3} \quad (1)$$

Onde ∂ é a deflexão do pneu, obtida através de uma modelagem linear de Lindsley & Talekar (2000), com uma constante de mola, Kt , igual a $1,7 \cdot 10^6$, que fornece um raio de rolamento do pneu constante e efetivo de 0,331 m.

$$Kt = F_R / \partial \quad (2)$$

3.4.2 Dinâmica Rotacional das Rodas

O coeficiente de atrito, μ , é uma função complexa do deslizamento longitudinal da aeronave, das condições do pneu e da pista. Entretanto, reiterando que esse estudo é puramente qualitativo, para analisar a dinâmica rotacional da roda utilizou-se um coeficiente de atrito constante de 0,65 a fim de simplificar os cálculos e sabendo que muitos fabricantes usam coeficiente de atrito constante. Logo, a força de atrito longitudinal imediata é dada por:

$$F_x = \mu \cdot F_R \quad (3)$$

A força de atrito F_x atua na área de contato do pneu, distanciada do eixo da roda pelo raio efetivo e atua para acelerar a rotação da roda. Utilizando a forma rotacional da força de atrito da Segunda Lei de Newton, a aceleração rotacional da roda após o toque no solo é dada por:

$$\dot{w} = Fx .re / I \quad (4)$$

Onde I é o momento de inércia da roda, composto por dois componentes: momentos de inércia do pneu e do aro. Foi extraído do software Inventor, do pacote Autodesk e igual a 2,3727 Kg.m².

E a aceleração rotacional da roda antes do toque no solo é dada por:

$$\dot{w} = M / I \quad (5)$$

Onde M é o momento gerado na roda devido a presença das aletas, considerando a velocidade do escoamento de 240 Km/h, que é a velocidade de avanço da aeronave considerada nesse trabalho.

No primeiro estágio do pouso a roda está com uma aceleração angular dada por (5) e imediatamente após o toque adquire aceleração dada por (4). A velocidade de rotação enquanto a aeronave derrapa sobre a pista é dada por:

$$w = \int \dot{w} . \partial t + w_{inicial} \quad (6)$$

Onde w é a velocidade rotacional da roda [rad/s] e $w_{inicial}$ é a velocidade da roda antes do *touchdown*.

Calculou-se o quanto da velocidade longitudinal da aeronave as rodas atingiriam ainda sem o toque com o solo e após o *touchdown*, além do tempo necessário para que as rodas alcançassem a velocidade horizontal de avanço da aeronave de 240Km/h, na fase de rolamento livre da roda.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira parte da análise dos resultados, depois de concluída todas as simulações numéricas computacionais, para todas as configurações de aletas, á zero, vinte e trinta graus, foi extraído do software o valor dos respectivos momentos [N.m] gerados no eixo da roda e gerou-se imagens para análise das distribuições de pressões no conjunto do trem de pouso principal.

A Figura 4 mostra a distribuição de pressões sobre a superfície do conjunto com as aletas posicionadas a zero graus. É possível notar através da imagem que a aleta posicionada diretamente abaixo do eixo da roda está com valores de pressões elevados na sua parte anterior, ou seja, a parte voltada para o escoamento. O mesmo pode ser percebido na aleta diametralmente oposta, mas com uma intensidade notadamente menor. Tal diferença entre as pressões, entre todas as aletas, é o que leva ao valor de momento em torno do eixo da roda.

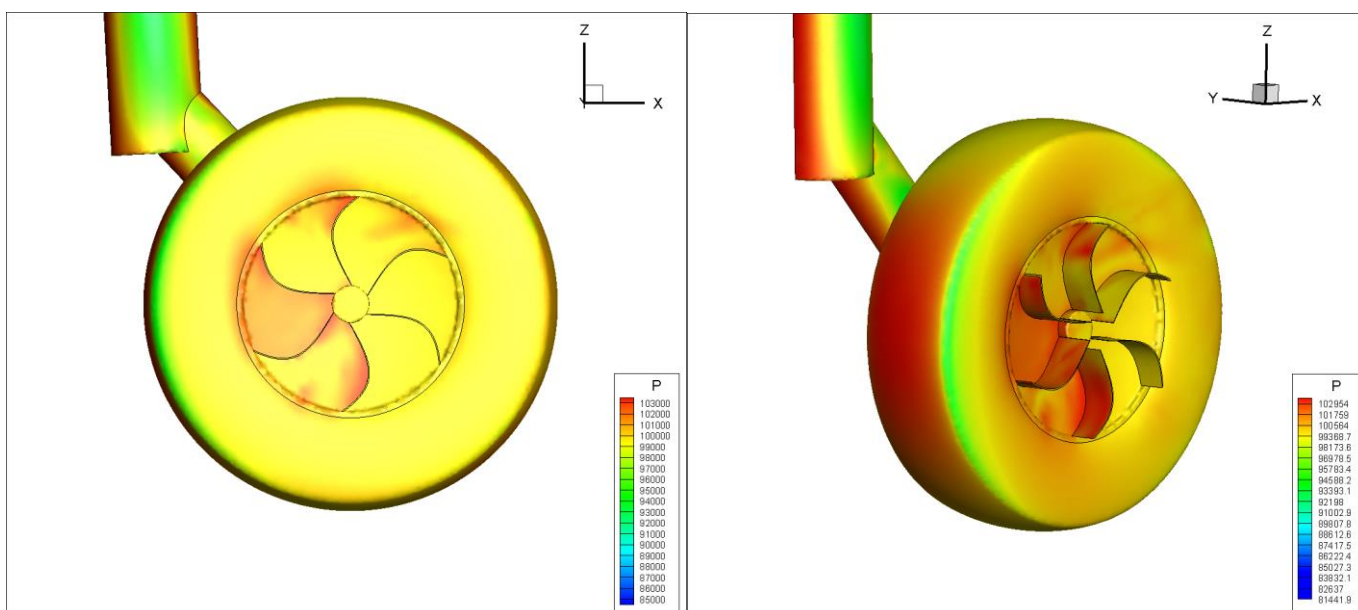


Figura 4 – Contornos de pressão para as aletas posicionadas a 0 grau. FONTE: TECPLOT 360

O mesmo comportamento pode ser observado para o caso do trem de pouso configurado com as aletas posicionadas a 20 graus, mostrado pela Figura 5. Ainda pode-se perceber que a aleta posicionada mais abaixo do eixo recebe uma carga maior de pressão vinda do escoamento. Outro aspecto notado através das imagens é o fato de as aletas posicionadas a jusante do eixo não receberem uma carga de

pressão significativa do escoamento, uma vez que a mesma intensidade de cores é vista em ambos os lados destas aletas.

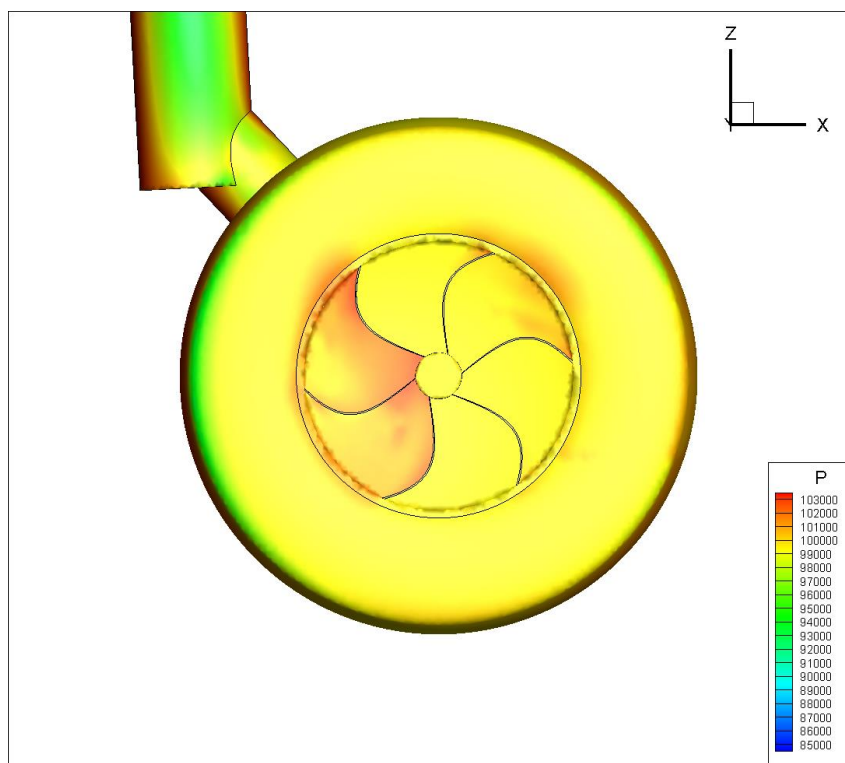


Figura 5 – Contornos de pressão para as aletas posicionadas a 20 graus. FONTE: TECPLOT360

Para o caso do trem de pouso configurado com as aletas posicionadas a 30 graus, cuja distribuição de pressão pode ser vista na Figura 6, a situação é diferente. A partir da figura é possível visualizar que a aleta posicionada mais acima do eixo apresenta cores mais intensas para os contornos de pressão, na sua parte anterior, que é a superfície da aleta voltada para a direção do escoamento, enquanto as aletas que estão abaixo do eixo da roda não apresentam valores tão intensos de pressão em suas faces anteriores. Esta discrepância justifica o que é observado para o valor de momento colhido em torno do eixo da roda para este caso, mostrado na tabela 1. A aleta que sofre a maior carga de pressão do escoamento é justamente a aleta que está descrevendo o movimento contrário à direção do escoamento, logo, o momento resultante no eixo é desfavorável.

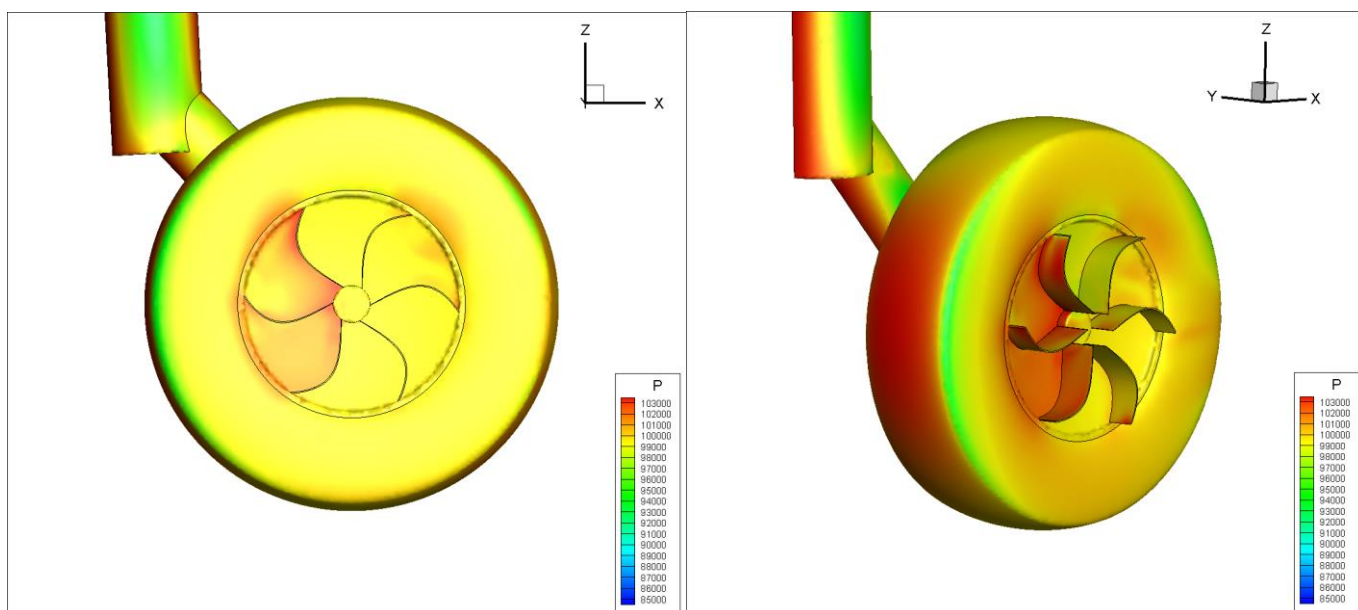


Figura 6 – Contornos de pressão para as aletas posicionadas a 30 graus. FONTE: TECPLOT360

Os valores de força de arrasto e momento em torno do eixo da roda, obtidos das simulações para os casos estudados, são mostrados na Tabela 1. Através destes valores é possível notar que existe um torque calculado para a condição sem as aletas, entretanto, este valor é duas ordens de grandeza diferente da média para o torque das outras configurações com aletas. Isto se deve a pequenos erros numéricos, uma vez que a geometria apresenta simetria da roda e eixo.

Tabela 1 – Valores de forças e momentos obtidos através das simulações

CONFIGURAÇÃO DO TREM DE POUSO	Força de Arrasto em X [N]	Momento em Y [N.m]
Ausência do dispositivo	1,264E+2	8,888E-3
CASO 1- Presença de aletas, zero grau	1,709E+2	-5,575E-1
CASO 2 - Presença de aletas, 20 graus	1,538E+2	-2,451E-1
CASO 3- Presença de aletas, 30 graus	1,783E+2	2,569E-1

FONTE: CFD++

Os valores para as forças de arrasto, mostradas como forças na direção do eixo x, aproximam-se para os casos com a presença das aletas, sendo a diferença entre o maior valor calculado e o menor da ordem de 14%. Isso se dá, em parte, pelo número de pás escolhido para o dispositivo. Quanto maior o número de pás, menor é a diferença esperada entre valores de força de arrasto, para diferentes ângulos de simulação. Outro motivo, e mais importante, é o fato de que a maior parcela desta força de arrasto estar associada à geometria dos suportes, pneus e rodas do que propriamente pelas aletas. Além disso, como se trata de um escoamento sobre um corpo rombudo, ou seja, corpos menos aerodinâmicos, a esteira desempenha um papel muito grande na composição do arrasto. Verificou-se, através das Figuras 7 e 8 que a presença das aletas pouco altera o tamanho da região da esteira atrás dos pneus.

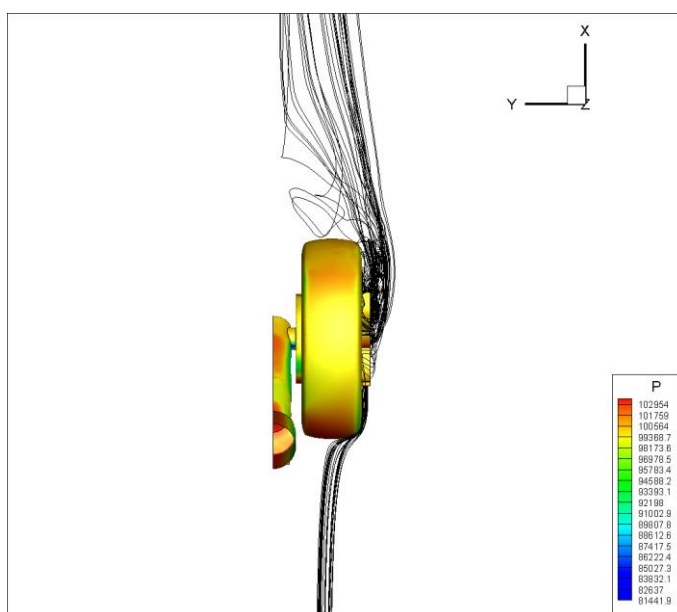


Figura 7 – Contornos de pressão com linhas de corrente, para as aletas posicionadas a 0 graus. FONTE: TECPLOT 360

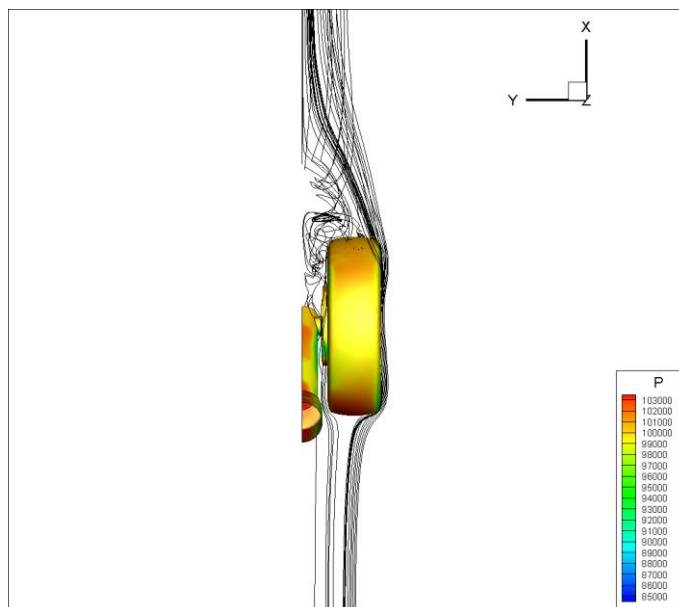


Figura 8 – Contornos de pressão com linhas de corrente, para o conjunto sem o dispositivo. FONTE: TECPLOT 360

Entretanto, o acréscimo das aletas gera uma região de turbulência considerável a frente da roda para as três configurações do dispositivo, o que também contribui para o aumento da força de arrasto. A região de turbulência é caracterizada, nas Figuras 9, 10 e 11 pela instabilidade da esteira de vórtices, tal como a desordem das linhas de corrente representadas pela cor preta.

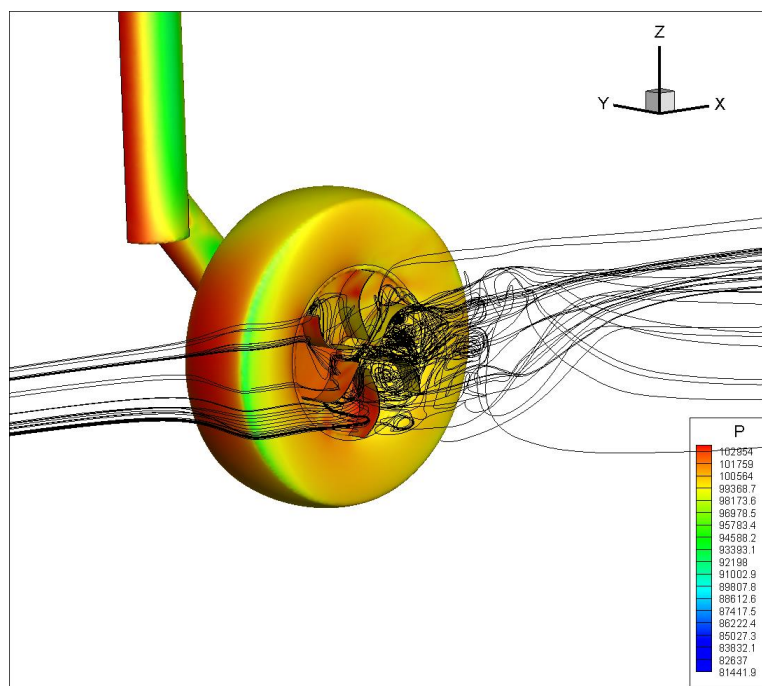


Figura 9 – Contornos de pressão com linhas de corrente, para as aletas posicionadas a 0 graus. FONTE: TECPLOT 360

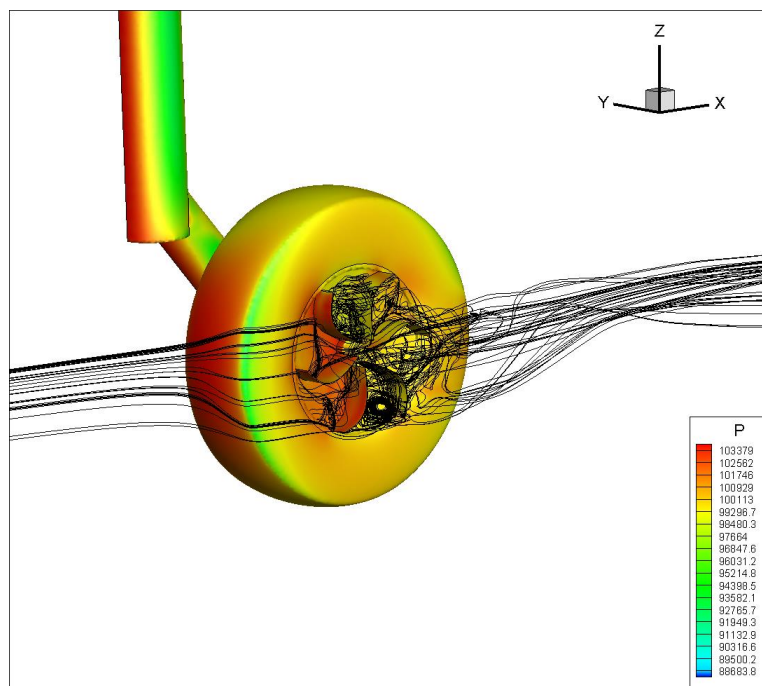


Figura 10 – Contornos de pressão com linhas de corrente, para as aletas posicionadas a 20 graus. FONTE: TECPLOT 360

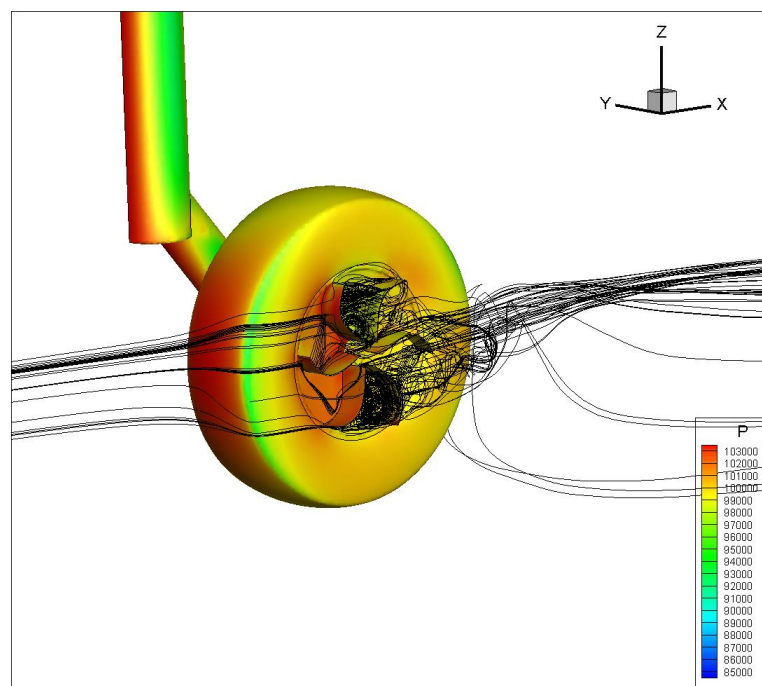


Figura 11 – Contornos de pressão com linhas de corrente, para as aletas posicionadas a 30 graus. FONTE: TECPLOT 360

A segunda parte dos resultados basearam-se puramente em formulações da segunda Lei de Newton na forma rotacional. Como a problemática do trabalho baseia-se em uma análise qualitativa e não quantitativa, o objetivo é apenas verificar a

influência das aletas. Obteve-se os resultados numéricos através de algumas simplificações:

1. Assim que o conjunto do trem de pouso é estendido para fora da fuselagem, durante a fase de aproximação da aeronave, ele adquire uma aceleração rotacional constante e exclusiva do torque gerado pelas aletas.
2. Desconsiderou-se efeitos da velocidade vertical da aeronave durante o *touchdown*.
3. O tempo médio entre a extensão do trem do pouso e o *touchdown* é de três minutos, ou seja, a velocidade de rotação final da roda antes do toque é produto da aceleração angular constante da roda durante 180 segundos.
4. Desconsiderou-se a desaceleração durante a manobra de flare e durante o impacto com o solo.

Para estas condições, através da segunda lei de newton, a aceleração angular da roda, com as aletas a zero grau, era de $-0,2349 \text{ rad/s}^2$, gerada puramente através torque das aletas. A velocidade de rotação da roda até o toque no solo era então de $42,29 \text{ rad/s}$, o que corresponde a uma velocidade horizontal de $51,31 \text{ Km/h}$, a qual não chega a 25% da velocidade de avanço da aeronave. O conjunto do trem de pouso acrescido do dispositivo configurado com aletas a 20 graus apresentou uma aceleração angular de $-0,1033 \text{ rad/s}^2$, que corresponde a uma velocidade horizontal de $18,59 \text{ Km/h}$. Já no caso com as aletas a 30 graus, a aceleração angular era de $0,1082 \text{ rad/s}^2$ e velocidade horizontal do conjunto de $19,48 \text{ Km/h}$.

No momento em que a aeronave atinge o solo, com os pneus já rotacionando, a aceleração angular da roda sofre influência da força de atrito, F_x , que é produto de um coeficiente de atrito médio do pavimento e o peso da aeronave no momento do pouso. A roda então acelera para $2,8754 \text{ rad/s}^2$ e atinge a velocidade de avanço da aeronave em 2,3 segundos, 2,45 segundos, respectivamente para a posição de 0 e 20 graus, como exemplificado na Figura 12. Enquanto, para o conjunto do trem de pouso sem o dispositivo, as rodas levam aproximadamente 2,65s para atingirem o rolamento livre da aeronave.

A partir da figura 12 pode-se observar que o tempo para que a roda alcance a velocidade de rolamento da aeronave é o mesmo para o caso 2 e o caso 3. Entretanto o caso 3, configurado com aletas a 30 graus, possui uma particularidade que é o momento positivo gerado na roda. A aleta que sofre a maior carga de pressão do escoamento é justamente a aleta que está descrevendo o movimento contrário à

direção do escoamento, logo, o momento resultante no eixo é desfavorável. Ao tocar o solo, a roda terá que vencer essa força contrária para conseguir acelerar em direção a velocidade de avanço da aeronave, o que provavelmente levaria mais tempo ainda.

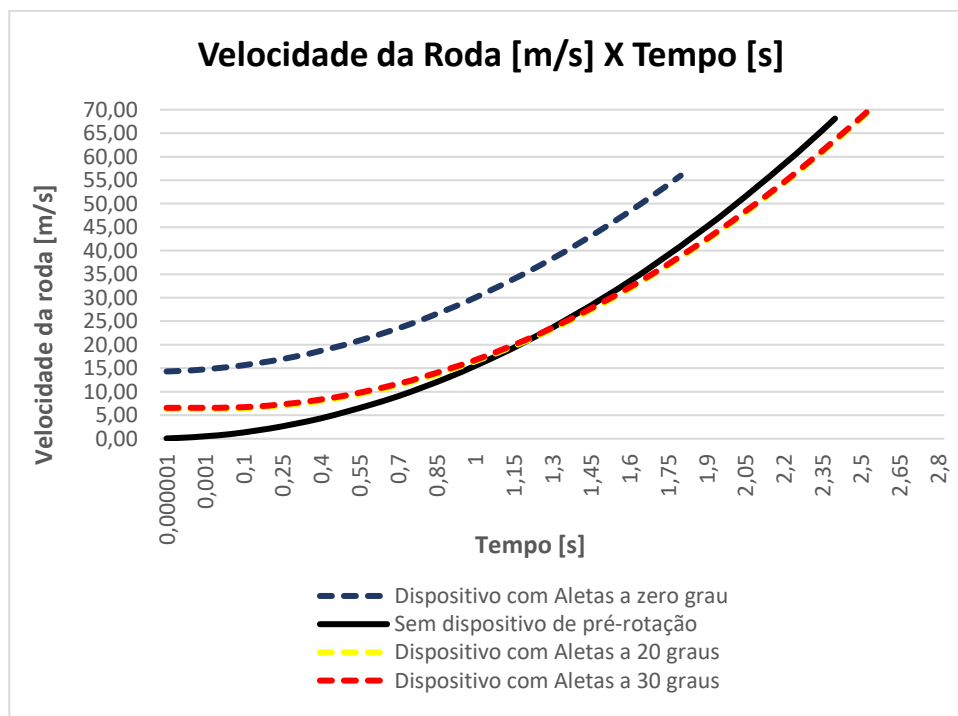


Figura 12 – Tempo [s] para que a roda alcançasse a velocidade [m/s] de avanço da aeronave.
 FONTE: Elaborado pelo autor.

Estabelecendo vínculo comparativo entre os casos estudados, o caso 1 apresenta as melhores condições para ser um dispositivo de pré rotação das rodas, considerando que as aletas posicionadas a zero graus acabaram por gerar o maior torque na roda, conseqüentemente, contribui para que as rodas atinjam mais rapidamente o rolamento livre da aeronave, onde a taxa de escorregamento do pneu é zero, contribuindo para a redução do desgaste dos pneus.

Entretanto, levando em consideração os estudos de Alroqi e Wang (2016), a solução para pré rotação das rodas baseada em aletas geradoras de força de arrasto, ainda que seja responsável por fazer com que as rodas atinjam certa velocidade de rotação antes do *touchdown*, já não seria suficiente, por não gerar, no mínimo, 50% da velocidade de avanço da aeronave durante a fase de aproximação, já que o dispositivo, na melhor das configurações estudadas, não gerou nem 25% de tal velocidade.

5. CONCLUSÃO

A partir das análises dos resultados é possível notar que através do escoamento incidente nas aletas existe torque resultante no eixo para rotacionar o conjunto, colocando a roda em uma condição mais favorável para o toque em solo. Sabendo-se da falta da representatividade da situação que se alcançou com as simulações e por conseguinte a falta de representatividade dos resultados numéricos, os resultados em geral, por se tratar de uma análise comparativa, demonstram a influência do dispositivo no conjunto do trem de pouso principal de aeronaves, visto que causa um aumento no torque no eixo, que pode acelerar a roda antes do toque com o solo e por consequência diminuir o desgaste no momento do *touchdown*, aumentando a vida útil dos pneus.

Um fator interessante notado através das simulações é que o torque gerado, para a condição do caso 3 em que as aletas foram configuradas a 30 graus, foi contrário ao que se pretende com a adição das aletas. O que se pode concluir através desta condição pontual e deste resultado é que mais simulações são necessárias a fim de se determinar o torque médio ao longo de uma rotação completa do conjunto.

As propriedades do escoamento (pressão, densidade, etc.) sobre as estruturas são fortemente influenciadas pela esteira do conjunto do trem de pouso e por essa razão, devido ao tipo de simulação utilizada, não se resolve bem o escoamento nesta esteira, e não se resolve bem o escoamento sobre as estruturas. As equações utilizadas nas simulações continham simplificações que basicamente, consideravam a parte média do escoamento como a mais importante, e assim acaba desconsiderando parte das flutuações, e substituindo essa parte por modelos de turbulência, os quais não representam tão bem escoamentos complexos, como por exemplo grandes esteiras. Logo, como a problemática do trem de pouso possui uma grande esteira, não é razoável supor que os resultados das simulações são representativos de tal situação, e os valores das propriedades sobre a estrutura não está sendo corretamente calculado.

A formulação que melhor resolveria a esteira e, portanto, daria os melhores resultados seria uma formulação LES (Large Eddy Simulation). O problema com esta formulação é a exigência de uma malha muito mais refinada, o que exige mais memória do computador onde o caso será rodado e uma estratégia de simulação mais específica, que considera mais do que as propriedades médias sobre a superfície, o

que aumenta o tempo de simulação. O conjunto do trem de pouso possui uma esteira muito grande, que certamente influencia as propriedades sobre a superfície sobremaneira. Uma formulação LES resolveria melhor esta esteira, e assim vai prover um resultado melhor para as propriedades sobre a estrutura, entretanto encareceria absurdamente o estudo. Entretanto, concluiu-se que, já que não era possível usar a formulação LES e uma formulação RANS também geraria as mesmas dúvidas sobre os resultados, não traria respostas melhores e carregaria muito mais a malha, uma formulação Euler seria capaz de contribuir com o estudo qualitativo comparativo.

Por fim, a viabilidade do uso de um dispositivo para pré rotação das rodas visando a redução do desgaste dos pneus foi avaliada através do confronto dos dados numéricos adquiridos através das simulações e dos cálculos analíticos e a existência da influência do dispositivo na rotação das rodas do trem de pouso foi identificada.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil**. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/participacao-social/audiencias-e-consultas-publicas/audiencias/2010/aud05/anexo-rbac-135.pdf>. Acesso em maio de 2019.

ALROQI, ABDURRHMAN A; WANG, WEIJJ (2016). **A comparison of aircraft tire skid with initial wheel rotational speed using ANSYS transient simulation**. International Journal of Mechanical and Production Engineering (IJMPE).

ALROQI, ABDURRHMAN A; WANG, WEIJJ (2015). **Comparison of Aircraft Tire Wear with Initial Wheel Rotational Speed**. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 2 (1). <https://doi.org/10.15394/ijaaa.2015.1043>

BEAZLEY, R. H. (1947). **Aircraft wheel spinner and control**. U.S. Patent, Publication No. US2414849 A. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/5c/05/50/eceebab85336e7/US2414849.pdf> Acesso em outubro de 2019.

BESSELINK, I. J. M. (2000). **Shimmy of Aircraft Main Landing Gears** Delft: Technische Universiteit Delft. Disponível em: <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/2819299/581815718970472.pdf>. Acesso em outubro de 2019.

GOODYEAR AVIATION. **Aircraft Tire Care and Maintenance Manual effective**, book, Akron, OH: The Goodyear Tire & Rubber Co, 2017.

INSTITUTO DE AVIAÇÃO CIVIL (IAC). Divisão de Instrução Profissional Matérias Básicas, **tradução do AC 65-9A do FAA (Airframe & Powerplant Mechanics-General Handbook)**. Edição Revisada 2002.

KHAPANE, P. D. (2004). **Simulation of aircraft landing gear dynamics using flexible multibody dynamics methods in SIMPACK**. Conference: ICAS, Yokohama, Japan. Disponível em: http://icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2004/PAPERS/262.PDF Acesso em outubro de 2019.

LINDSLEY, N. J.; TALEKAR, N. B. (2000). **A tire model for air vehicle landing gear dynamics**. International ADAMS User Conference. Disponível em:

http://web.mscsoftware.com/support/library/conf/adams/na/2000/18_usaf_tire_landing_gear.pdf

MILWITZKY, B.; LINDQUIST, D. C.; POTTER, D. M. (1955). **An experimental study of applied ground loads in landing**. National advisory committee for aeronautics, Langley aeronautical laboratory, Washington, DC. Disponível em: <http://hdl.handle.net/2060/19930092250>

PADOVAN, J.; KAZEMPOUR, A.; KIM, Y. H. (1990). **Aircraft landing-induced tire spinup**. Journal of Aircraft.

SILVA, M.A (2017). **Tecnologia do pneu, fabricação, dimensionamento e aplicação**. Trabalho de Graduação – Universidade de Rio Verde. Disponível em: <https://docplayer.com.br/52489519-Tecnologia-do-pneu-fabricacao-dimensionamento-e-aplicacao-resumo.html>. Acesso em novembro de 2019.

SOUZA, C. M., **Utilização da Radiação Ionizante na Reciclagem de Pneus Inservíveis de Automóvel e sua Destinação Ambiental Adequada**. 2013, 104p. Dissertação de Mestrado - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Universidade de São Paulo, São Paulo.