

# UMA PROPOSTA PARA DETERMINAR A INFLUÊNCIA DOS DADOS DE POSICIONAMENTO DOS TRENS DE POUSO NO ALINHAMENTO DIRECIONAL DE UMA AERONAVE

GILSON S. GOMES

1. Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Pós- Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica

**Abstract**— This article presents the application of Factorial Design concepts in an experiment in order to verify if landing gear position factors are for final directional alignment of the aircraft.

**Keywords**— Landing Gear, Alignment, Aircraft

**Resumo**— Este artigo apresenta a aplicação dos conceitos de Projetos fatoriais em um experimento [2],afim de verificar se os fatores de posicionamento dos trens de pouso são significantes para o resultado final do alinhamento direcional de uma aeronave.

**Palavras-chave**— Trem de Pouso, Alinhamento, Aeronave

## 1 Introdução

A verificação final do alinhamento direcional de uma aeronave é realizada na fase de voo de produção, avaliando o seu comportamento direcional a baixa velocidade.

Antes deste processo, existe na fase de produção de uma aeronave, a verificação do alinhamento dos componentes estruturais da mesma tal como seção da asa, unidades da empenagem, superfície de comandos, motores e trem de pouso. Esta verificação é feita através de um processo denominado por *triangulação* [3].

Um dos fatores avaliados neste processo e de interesse deste trabalho é o posicionamento dos trens de pouso no que diz respeito ao alinhamento e assimetria.

Este trabalho tem como base um estudo através de um modelo de simulação foram avaliados os fatores de influencia no alinhamento direcional da aeronave durante o seu taxiamento.

Os fatores de posicionamento dos trens de pouso são obtidos no processo de triangulação conforme segue:

### 1.1 Fator: Posicionamento de Trem de Pouso

**Posições de Assimetria:** Verificada através de determinado pontos em cada trem de pouso até dois pontos de referência, obtidos através da linha de centro da aeronave.

**Posições de Paralelismo:** Verificada através de dois pontos no trem de pouso até a linha de centro da aeronave.

### 1.2 Fator: Variação de Posicionamento

Variação das posições citadas, limitadas pela tolerância especificada pelo fabricante da aeronave.

## 2 Propósito

### 2.1 Deslocamento lateral da aeronave

O quanto a variação das posições de paralelismo e assimetria podem gerar de deslocamento lateral da aeronave (isto é deslocamento para esquerda ou direita), durante o seu taxiamento em baixa velocidade.

## 3 Métodos

### 3.1 Unidades Experimentais

No estudo de caso foi considerada uma arquitetura de triangulação, representada de forma simplificada na figura 1

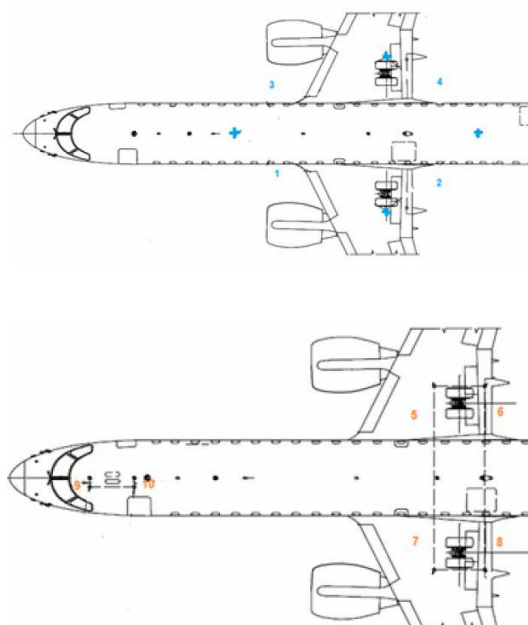


Fig 1

A unidade dos valores de posição e deslocamento é dada em metros (m).

Valor de tolerância adotado (para efeito de simulação) para a diferença de cada posição: 10 mm

### 3.2 O teste

No processo de avaliação do alinhamento da aeronave, a mesma é posicionada na linha central da pista sendo avaliada a sua trajetória conforme figura 2.

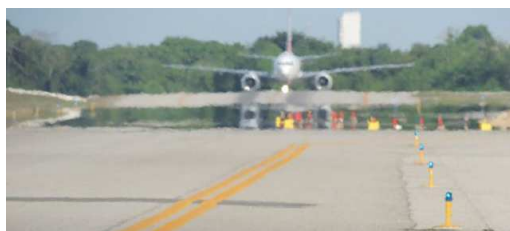


Fig 2

### 3.3 Modelagem e Simulação

Para fundamentar a influencia do alinhamento geométrico no comportamento final, foi utilizado um modelo matemático. A simulação foi desenvolvida em ambiente computacional através do Software LMS Virtual Lab Motion, capaz de desenvolver rapidamente simulações iterativas, para avaliar o desempenho de múltiplas alternativas de design [4].

No modelo temos as entradas correspondentes a cada posição dos trens de pouso, combinados a variáveis intrínsecas ao projeto da aeronave.

## 3 Resultados

Experimento realizado com base em uma aeronave de médio porte. Considerando um total de 40 simulações, alterando os valores nominais de cada uma das 10 posições determinadas de assimetria e paralelismo dos trens de pouso em 25%, 50%, 70% e 100% nas suas tolerâncias especificadas.

Na simulação é verificado o deslocamento da aeronave a uma trajetória de 500 metros na pista.

A tabela 1 mostra a coleta de dados da simulação obtida.

Simulações	Posições	% de Variação da tolerância	Deslocamento
1	1	25	0,38
2		50	0,46
3		75	0,54
4		100	0,62
5	2	25	0,41
6		50	0,52
7		75	0,63
8		100	0,74
9	3	25	0,22
10		50	0,14
11		75	0,07
12		100	-0,01
13	4	25	0,19
14		50	0,08
15		75	-0,03
16		100	-0,14
17	5	25	6,3
18		50	12,36
19		75	18,37
20		100	24,35
21	6	25	-5,75
22		50	-11,76
23		75	-17,77
24		100	-23,92
25	7	25	-4,56
26		50	-9,4
27		75	-14,18
28		100	-19,04
29	8	25	5,16
30		50	10,06
31		75	14,94
32		100	19,84
33	9	25	13,42
34		50	26,51
35		75	39,56
36		100	52,56
37	10	25	12,73
38		50	-25,66
39		75	-38,59
40		100	-51,96

TAB. 1

Transformando os dados da tabela 1 em um arranjo geral para um projeto fatorial 2 fatores, temos a tabela 2. Fazendo o mesmo para as tabelas 3 e 4 (referentes ao paralelismo).

Posições	% Variação da Tolerância			
	25	50	75	100
1	0,38	0,46	0,54	0,62
2	0,41	0,52	0,63	0,74
3	0,22	0,14	0,07	-0,01
4	0,19	0,08	-0,03	-0,14
5	6,3	12,36	18,37	24,35
6	-5,75	-11,76	-17,77	-23,92
7	-4,56	-9,4	-14,18	-19,04
8	5,16	10,06	14,94	19,84
9	13,42	26,51	39,56	52,56
10	12,73	-25,66	-38,59	-51,96

TAB. 2

Simulações	Posições	% de Variação da tolerância	Deslocamento
1	5	25	6,3
2		50	12,36
3		75	18,37
4		100	24,35
5	6	25	-5,75
6		50	-11,76
7		75	-17,77
8		100	-23,92
9	7	25	-4,56
10		50	-9,4
11		75	-14,18
12		100	-19,04
13	8	25	5,16
14		50	10,06
15		75	14,94
16		100	19,84
17	9	25	13,42
18		50	26,51
19		75	39,56
20		100	52,56
21	10	25	12,73
22		50	-25,66
23		75	-38,59
24		100	-51,96

TAB. 3

Posições	% Variação da Tolerância			
	25	50	75	100
5	6,3	12,36	18,37	24,35
6	-5,75	-11,76	-17,77	-23,92
7	-4,56	-9,4	-14,18	-19,04
8	5,16	10,06	14,94	19,84
9	13,42	26,51	39,56	52,56
10	12,73	-25,66	-38,59	-51,96

TAB. 4

### 3.1 Fatores e Níveis

- A: Posições: 5,6,7,8,9,10 - B: Variação de tolerância: 25, 50, 75 e 100%

### 3.2 O Modelo estatístico linear

$\gamma_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$  Sendo  $i=1,2,...,10$  (a),  $j=1,2,...,4$  (b),  $k=1, (n)$   
 $\mu$ =média global,  $\tau$ =Posições do Trem de Pouso,  $\beta$ =Variação da tolerância,  
 $\tau\beta$ =Interação Posições x Tolerância

### 3.3 Gráfico de Box

Utilizando o gráfico Box Plot para os fatores da tabela 2, permite-se visualizar de forma rápida e concisa duas situações do comportamento.

O gráfico da figura 3 demonstra a concentração da variação e deslocamento proveniente de cada posição (Fator A), direcionando e permitindo uma análise posterior mais apurada da amplitude do deslocamento de cada ponto. Sendo o cenário de maior concentração e variação, que iremos explorar no decorrer deste estudo (gráficos correspondentes fig 5 e 6.)

Já o gráfico da figura 4, expressa bem o aumento do deslocamento da aeronave mediante a variação da tolerância de cada posição (Fator B).

Estes gráficos podem ser utilizados juntamente com outros gráficos, deixando assim o cenário do experimento mais claro, resultando também em uma análise ainda mais robusta.

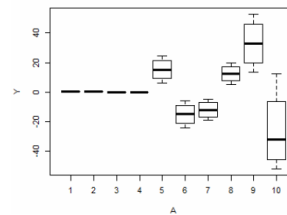


Fig 3

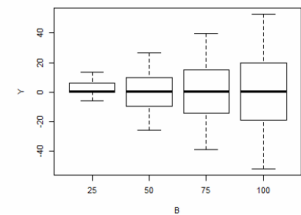


Fig 4

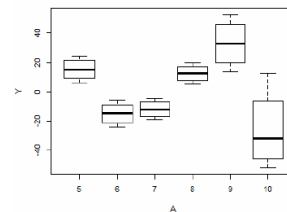


Fig 5

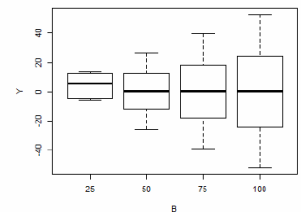


Fig 6

### A NOVA

Com a utilização dos dados do experimento simulado, pretende-se demonstrar a significância dos fatores de posição e se a variação da sua tolerância tem influência no deslocamento da aeronave.

Através da formula aplicada no R

A1= aov(Y~A\*B) ; summary(A1)

	Df	Sum Sq	Mean Sq
A	5	9989	1997.8
B	3	79	26.5
A:B	15	3704	246.9

A análise inicial ANOVA permite concluir que as posições (A), a variação (B) e a interação (A\*B) são mais significativas e influenciam o valor de deslocamento.

### Gráfico de Interação

Pela formula aplicada no R

with(dados,interaction.plot(A, B,Y,type="b")) ,  
with(dados,interaction.plot(B, A,Y,type="b")) temos

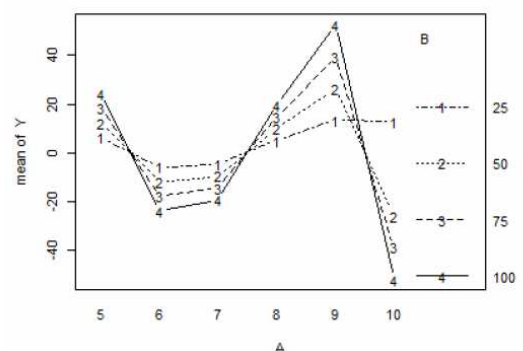


Fig 7

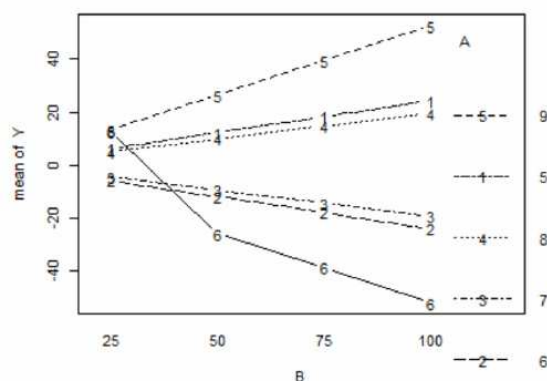


Fig 8

Através do gráfico da figura 7 permite-se identificar interações significantes existentes entre as posições intrínsecas ao fator posição (A), as quais coincidem diretamente com o fenômeno físico. Outro comportamento importante demonstrado de forma direta na figura 8 é a indicação que nas máximas variações das posições 9 e 6 (relacionadas ao trem de pouso dianteiro) que decorrem os maiores deslocamentos da aeronave, servindo de direcionamento para o trabalho de engenheiros de sistemas, projeto e manufatura.

#### Ajuste do modelo quadrático e análise de variância do modelo estatístico quadrático

A figura 9 apresenta a análise de variância do modelo quadrático abaixo e na figura 10 uma nova análise a partir dos dados significativos. Através da equação abaixo aplicada no R.

```
lm.dados=lm(Y~A+B+A*B+I(A^3)+I(B^3)+A*
B+I(A^3*B)+I(A*B^3)+I(A^2)+I(B^2)+A*B+I(A^2
*B)+I(A*B^2),dados)
```

```
> summary(lm.dados)
```

```
Response: Y
          Df Sum Sq Mean Sq  F value    Pr(>F)
A              1    84.0      84.0    1.0825 0.3186538
B              1    48.4      48.4    0.6233 0.4451371
I(A^3)         1    466.8    466.8    6.0144 0.0304571 *
I(B^3)         1    23.1     23.1    0.2978 0.5952766
I(A^3 * B)     1    470.6    470.6    6.0637 0.0299031 *
I(A * B^3)     1    245.0    245.0    3.1567 0.1009504
I(A^2)         1   8835.4   8835.4   113.8467 1.77e-07 ***
I(B^2)         1     8.0      8.0    0.1028 0.7539860
I(A^2 * B)     1    269.0    269.0    3.4666 0.0872786 .
I(A * B^2)     1    128.5    128.5    1.6552 0.2225171
A:B            1   2262.5   2262.5   29.1536 0.0001602 ***
Residuals    12    931.3     77.6
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Fig 9

```
Analysis of Variance Table
Response: Y
          Df Sum Sq Mean Sq  F value    Pr(>F)
I(A^3)     1   169.7    169.7    2.6341 0.12413
A          1   381.1    381.1    5.9160 0.02712 *
B          1    48.4     48.4    0.7510 0.39898
I(A^3 * B) 1   470.6    470.6    7.3054 0.01568 **
I(A^2)     1  8835.4   8835.4  137.1584 2.925e-09 ***
I(A^2 * B) 1   484.6    484.6    7.5232 0.01444 *
A:B        1  2352.1   2352.1   36.5135 1.709e-05 ***
Residuals 16  1030.7     64.4
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Fig 10

Portanto, podemos confirmar os fatores mais significantes resultantes da análise são: As componentes A e I(A^2) representando os efeitos linear e quadrático do fator Posição do Trem de Pouso e os

termos A\*B, I(A^3\*B) e I(A^2\*B) são as interações linear e quadrático dos fatores (A) posição do trem de pouso e (B) variação de tolerância.

#### Análise dos Resíduos

Através dos gráficos de resíduos, onde demonstra-se que os valores estão todos centrados no zero e com distribuição aparentemente aleatória, permite-se uma avaliação e indicação de boa adequação do modelo proposto.

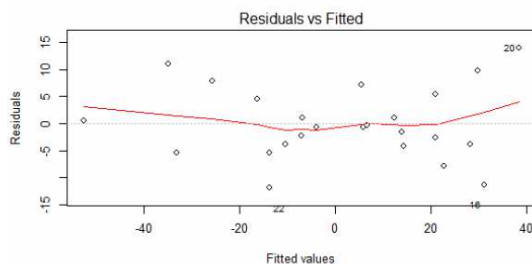


Fig 11

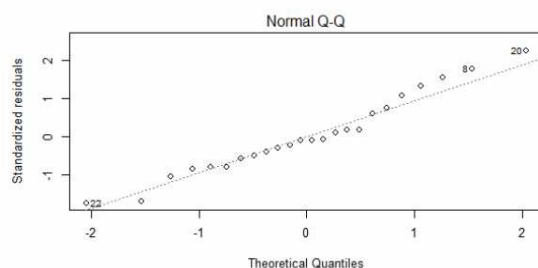


Fig 12

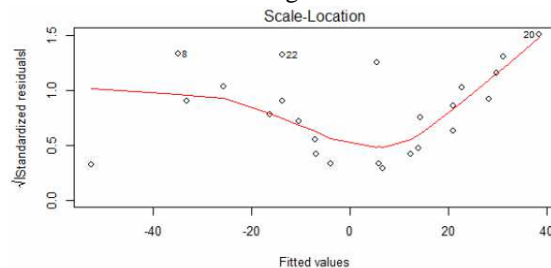


Fig 13

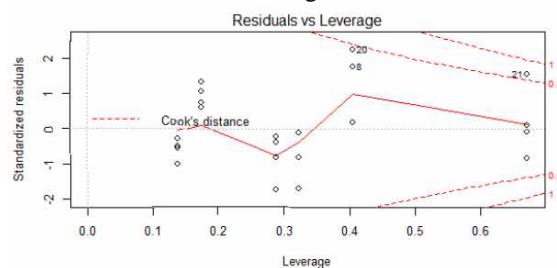
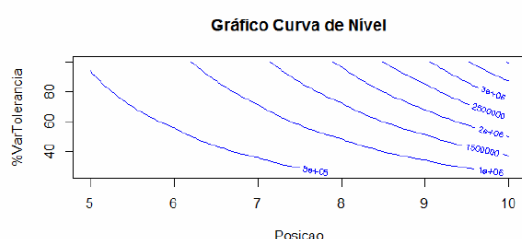
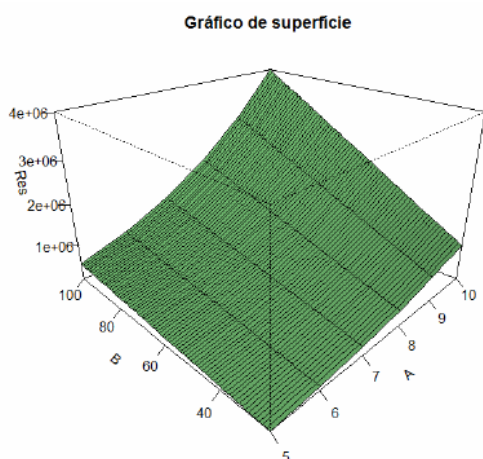


Fig 14

Os gráficos das figuras 15 e 16 (Superfície e Contorno respectivamente) auxiliam na definição que o deslocamento extremo da aeronave é atingido na máxima da variação (100%) da tolerância na posição 10.



## Conclusão

A análise permitiu destacar de modo estatístico a influência do posicionamento dos trens de pouso e suas variações, complementar a análise do estudo de caso e conhecer ainda mais o fenômeno físico.

Permitiu maior clareza na verificação do comportamento das variáveis envolvidas.

Contribuirá no direcionamento de trabalhos das áreas envolvidas no processo de alinhamento a saber Engenharias de Sistemas, Manufatura e Projeto desde o desenvolvimento do Produto até o processo de fabricação.

Oportunidade de aplicar o mesmo tipo de análise para os demais fatores envolvidos no processo.

Oportunidade de estender a análise para cada fator detalhadamente, utilizando um projeto fatorial 2k.

## Contribuição deste artigo

Os conceitos aplicados neste artigo servirão de base para a elaboração da minha tese de mestrado no Instituto Tecnológico de Aeronáutica saber:

*Análise das influências geométricas de uma aeronave na sua trajetória direcional*

## Referências Bibliográficas

- [1] Regulamentos Brasileiros de Homologação Aeronáutica (RBHA 21.127 - *Ensaio - Aeronaves*).
- [2] Douglas C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, Arizona State University – Fifth Edition
- [3] Apostilas do Curso Mecânico de Manutenção de Aeronaves Célula - DAC. CAPÍTULO 2 *MONITAGEM E ALINHAMENTO*
- [4] [www.lmsintl.com/simulation/virtuallab/motion](http://www.lmsintl.com/simulation/virtuallab/motion) - LMS Engineering Innovation