

# 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 empennagem, 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

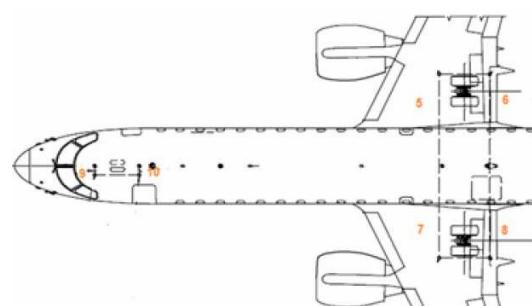
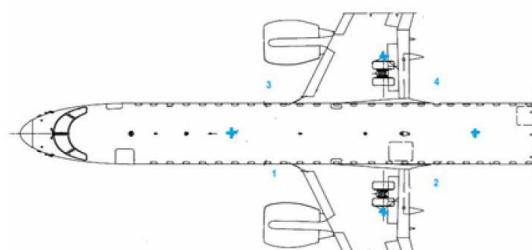


Fig 1

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

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

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

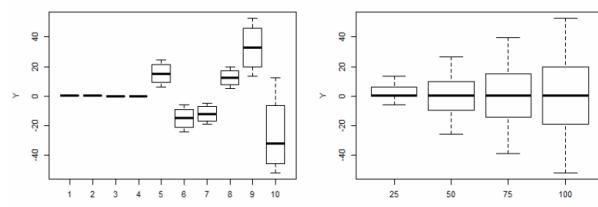


Fig 3

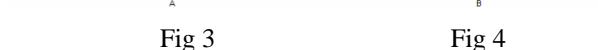


Fig 4

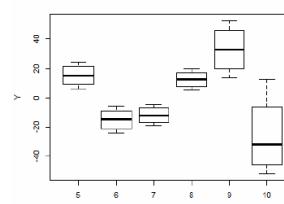


Fig 5

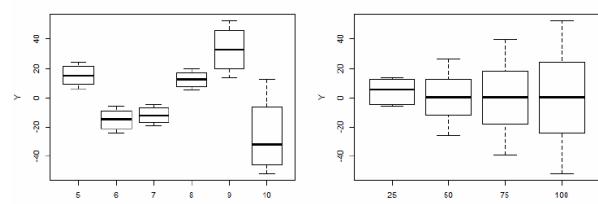


Fig 6

### 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 influencia 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 Intereração

Pela formula aplicada no R

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

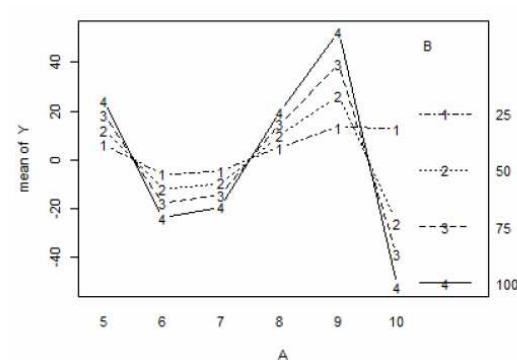


Fig 7

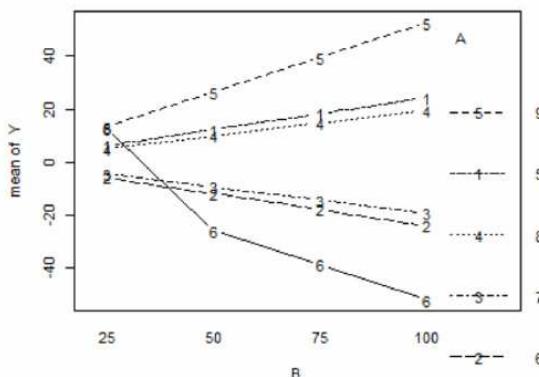


Fig 8

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^3 ^ 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.

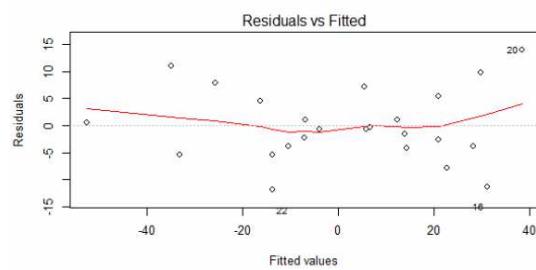


Fig 11

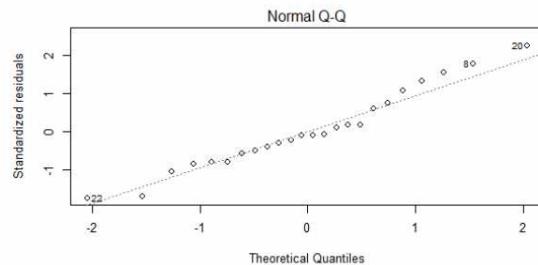


Fig 12

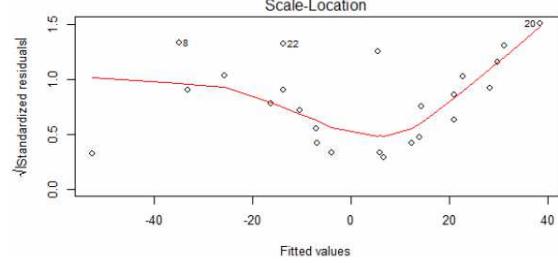


Fig 13

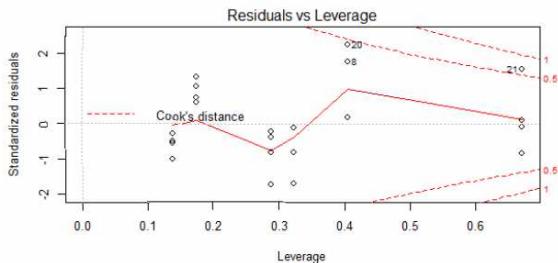
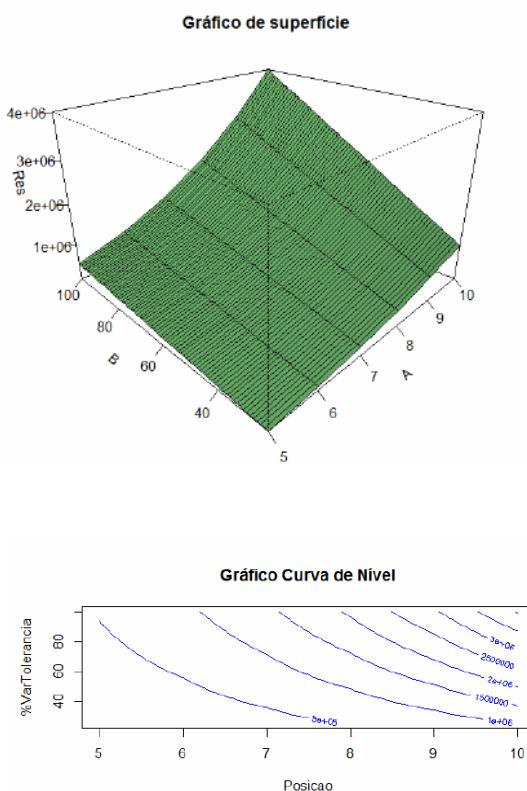


Fig 14

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.

## Referências Bibliográficas

- [1] Regulamentos Brasileiros de Homologação Aeronáutica (RBHA 21.127 - *Ensaios - 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 *MONTAGEM E ALINHAMENTO*
- [4] [ww.lmsintl.com/simulation/virtuallab/motion](http://www.lmsintl.com/simulation/virtuallab/motion) - LMS Engineering Innovation



## 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*