# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Ramon Nunes de Oliveira

Um Modelo Matemático para Determinação da Trajetória de Aeronaves em Curva

> Trabalho de Graduação 2013

# Civil

Ramon Nunes de Oliveira

# Um Modelo Matemático para Determinação da Trajetória de Aeronaves em Curva

Orientador Prof. M. Sc. Ronaldo Gonçalves de Carvalho (ITA)

Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos Instituto Tecnológico de Aeronáutica

#### Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP) Divisão de Informação e Documentação

Oliveira, Ramon N.

Um Modelo Matemático para Determinação da Trajetória de Aeronaves em Curva / Ramon Nunes de Oliveira. São José dos Campos, 2013.

104f.

Trabalho de Graduação - Engenharia Civil-Aeronáutica - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013. Orientador: Prof. M. Sc. Ronaldo Gonçalves de Carvalho.

1. Aeroportos 2. Projeto Geométrico de Aeroportos 3. Planejamento de Aeroportos 1. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título

# **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

OLIVEIRA, Ramon N. Úm Modelo Matemático para Determinação da Trajetória de Aeronaves em Curva. 2013. 104f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

### **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Ramon Nunes de Oliveira TÍTULO DO TRABALHO: Um Modelo Matemático para Determinação da Trajetória de Aeronaves em Curva TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2013

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Ramon Nones de Oliveira

Ramon Nunes de Oliveira Rua 25-C, Qd. 159, Lt. 10 - Setor Garavelo CEP 74932-110 – Aparecida de Goiânia – GO

# UM MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAÇÃO DA TRAJETÓRIA DE Aeronaves em Curva

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

Kamon Voues 1/1/a

Ramon Nunes de Oliveira Autor

manph

Prof. M. Sc. Ronaldo Gonçalves de Carvalho (ITA) Orientador

an Anna

Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

"Dedico este trabalho a todos que me apoiaram e contribuíram. Em especial agradeço à minha família."

## AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer aos meus familiares e minha namorada pelo suporte oferecido durante a realização desse trabalho. Muito obrigado pela paciência e companheirismo.

À minha turma, CIVIL 13, por estar junto comigo nos momentos de estudo e de diversão.

Aos meus colegas de apartamento e agregados, pelos momentos compartilhados.

Aos meus orientadores pelo incentivo e disposição.

Ao meu conselheiro por ajudar nos momentos mais complicados de vida acadêmica.

"But when you have order, you don't need Gods. When everything is well ordered and disciplined then nothing is unexpected. If you understand everything', I said carefully', then there's no room left for magic. It's only when you're lost and frightened and in the dark that you call on the Gods, and they like us to call on them. It makes them feel powerful, and that's why they like us to live in chaos." Bernand Cornwell, Enemy of God

### **RESUMO**

Neste Trabalho de Graduação é apresentado um novo modelo de determinação da trajetória de deslocamento de aeronaves em solo, explicitando a necessidade do uso de fillets no design geométrico de aeródromos. Além do deslocamento das aeronaves em solo, foi analisada, ao longo do trajeto da aeronave, a manutenção de margens de segurança entre a borda externa do trem de pouso principal e o bordo das pistas de táxi.

O modelamento desenvolvido foi implementado por meio de rotinas computacionais de forma a gerar resultados gráficos de visualização do comportanto da aeronave relacionado ao desenho geométrico de curvas de pistas de táxi.

Foram apresentados, também, os métodos de determinação de fillets preconizados pela ICAO e pela FAA, os quais utilizam modelos de aproximação do deslocamento do trem de pouso de aeronaves.

Ao final, foram realizados cálculos dos parâmetros das aeronaves A380-800, A340-600, B777-300 e B747-400 e a aplicação dos métodos de determinação de fillets da FAA e da ICAO a fim de compará-los quanto a ser mais ou menos conservativos e visualizá-los quanto a margem de segurança em relação ao modelo de deslocamento desenvolvido. O método proposto pela FAA foi observado como mais conservativo.

Palavras-chaves: infraestrutura aeroportuária; projeto geométrico; fillet.

### ABSTRACT

This graduation work presents a new mathematical model for the aircraft displacement on the ground, explaining the importance of fillets in the geometrical design of aerodromes. Besides the displacement of the aircraft on the ground; it was analyzed, along the path of the aircraft, the maintenance of the safety margin between the outer wheels of main undercarriage leg and edge of pavement.

The developed model was implemented in computer routines to create graphical results of the aircraft behavior related to the geometric design of taxiways curves.

It were also presented the methods of determining fillets recommended by ICAO and FAA, which use displacement approach models of the landing gear of aircraft.

Finally, it was done parameters calculations of the A380-800, A340-600, B777-300 and B747-400, and the application of the FAA and ICAO fillets determining methods of in order to compare them as being more or less conservative and to visualize the maintenance of the safety margin compered to the developed model. The method proposed by the FAA was observed as more conservative.

Keywords: airport infrastructure; geometric design; fillet.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Deslocamento de aeronave em pista de táxi	14
Figura 2: Aeronave iniciando a curva	15
Figura 3: Primeira etapa da realização da curva	15
Figura 4: Aeronave durante a realização da curva	16
Figura 5: Aeronave terminando a curva e iniciando trecho retilíneo	16
Figura 6: Continuação do deslocamento em trecho retilíneo	17
Figura 7: Aeronave ao término do procedimento de curva, com o trem de pouso principa	al
alinhado à linha de eixo da pista de táxi	17
Figura 8: Parâmetros e pontos de interesse da aeronave	18
Figura 9: Código de Referência do Aeródromo	19
Figura 10: Afastamento entre a roda externa do trem de pouso principal e a borda da pis	ta de
táxi	19
Figura 11: Largura de Pistas de Táxi	20
Figura 12: Raios de Curva para aeronaves	21
Figura 13: Raio do fillet e Raio da Curva	22
Figura 14: Desvio máximo $\lambda_{max}$ do trem de pouso	24
Figura 15: Ângulo de esterçamento em função do desvio do trem de pouso principal	26
Figura 16: Aumento do ângulo de esterçamento durante uma curva	27
Figura 17: Comprimentos percorridos em função dos ângulos de esterçamento	28
Figura 18: Taxiway Design Groups	29
Figura 19: Dimensões (ft) para TDG 01	31
Figura 20: Dimensões (ft) para TDG 02	31
Figura 21: Dimensões (ft) para TDG 03 e 4	32
Figura 22: Dimensões (ft) para TDG 05	32
Figura 23: Dimensões (ft) para TDG 06	33
Figura 24: Dimensões (ft) para TDG 07	33
Figura 25: Curva de 90° para pistas de táxi	34
Figura 26: Curva menor que 90° para pistas de táxi	35
Figura 27: Curva maior que 90° para pistas de táxi	35
Figura 28: Termos e símbolos relacionados à trajetória de uma aeronave	37

Figura 29: Termos e símbolos relacionados à trajetória de uma aeronave, modelo
simplificado
Figura 30: Situação de início da curva executada pela aeronave40
Figura 31: Termos e símbolos relacionados à trajetória de uma aeronave durante trecho
retilíneo
Figura 32: Termos e símbolos relacionados à trajetória de uma aeronave durante trecho
retilíneo, modelo simplificado45
Figura 33: Termos e Parâmetros para determinação do deslocamento da borda externa do trem
de pouso principal48
Figura 34: Envergadura para aeronave A380-80050
Figura 35: Distância do trem de pouso principal ao ponto datum aeronave A38050
Figura 36: Distâncias entre os trens de pouso e comprimento T para aeronave A38051
Figura 37: Distância do trem de pouso principal ao ponto datum para aeronave A340-600 52
Figura 38: Comprimento T e envergadura para aeronave A340-600
Figura 39: Distâncias entre os trens de pouso para aeronave A340-60053
Figura 40: Envergadura para aeronave B747-40054
Figura 41: Distância do trem de pouso principal ao ponto datum para aeronave 747-400 54
Figura 42: Distâncias entre os trens de pouso para aeronave e Comprimento T para aeronave
747-400
Figura 43: Envergadura para aeronave B777-30056
Figura 44: Distância do trem de pouso principal ao ponto datum para aeronave 777-300 56
Figura 45: Distâncias entre os trens de pouso para aeronave e Comprimento T para aeronave
777-300
Figura 46: Características dos pneus de trem de pouso para a aeronave 777-30057
Figura 47: Curva de 30° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave A380-80067
Figura 48: Curva de 45° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave A380-800
Figura 49: Curva de 60° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave A380-800
Figura 50: Curva de 90° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave A380-80070
Figura 51: Curva de 120° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave A380-80071

Figura 52: Curva de 135° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave A380-80072
Figura 53: Curva de 150° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave A380-80073
Figura 54: Curva de 30° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave A340-60074
Figura 55: Curva de 45° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave A340-60075
Figura 56: Curva de 60° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave A340-60076
Figura 57: Curva de 90° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave A340-60077
Figura 58: Curva de 120° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave A340-60078
Figura 59: Curva de 135° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave A340-600
Figura 60: Curva de 150° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave A340-600
Figura 61: Curva de 30° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave B777-300
Figura 62: Curva de 45° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave B777-300
Figura 63: Curva de 60° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave B777-300
Figura 64: Curva de 90° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave B777-300
Figura 65: Curva de 120° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave B777-300
Figura 66: Curva de 135° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave B777-300
Figura 67: Curva de 150° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave B777-300
Figura 68: Curva de 30° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave B747-400

Figura 69: Curva de 45° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave B747-400
Figura 70: Curva de 60° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave B747-40090
Figura 71: Curva de 90° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave B747-40091
Figura 72: Curva de 120° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave B747-40092
Figura 73: Curva de 135° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave B747-40093
Figura 74: Curva de 150° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento
para aeronave B747-40094
Figura 75: Curva de 45° com fillet conforme previsto pela ICAO e desenho de curva sem o
fillet para aeronave A380-80096
Figura 76: Curva de 90° com fillet conforme previsto pela ICAO e desenho de curva sem o
fillet para aeronave A380-80097
Figura 77: Curva de 135° com fillet conforme previsto pela ICAO e desenho de curva sem o
fillet para aeronave A380-800

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Equações das envoltórias que definem os TDG's	. 29
Tabela 2: Resultados de verificação de equações para envoltória de definição de TDG's	. 30
Tabela 3: Parâmetros para aeronaves escolhidas	. 58
Tabela 4: Resultados de Cálculo de Fillet para o A380-800 pelo Método do Arco e da	
Tangente a partir de Raios de Curva determinados pela FAA	. 59
Tabela 5: Resultados de Cálculo de Fillet para o A380-800 pelo Método do Arco e da	
Tangente a partir de Raios de Curva determinados pela ICAO	. 60
Tabela 6: Resultados de Cálculo de Fillet para o A380-800 pelo Método do Arco e da	
Tangente a partir de Raios de Curva determinados pelo Manual da Aeronave	. 60
Tabela 7: Resultados de Cálculo de Fillet para o A340-600 pelo Método do Arco e da	
Tangente a partir de Raios de Curva determinados pela FAA	. 61
Tabela 8: Resultados de Cálculo de Fillet para o A340-600 pelo Método do Arco e da	
Tangente a partir de Raios de Curva determinados pela ICAO	. 61
Tabela 9: Resultados de Cálculo de Fillet para o A340-600 pelo Método do Arco e da	
Tangente a partir de Raios de Curva determinados pelo Manual da Aeronave	. 62
Tabela 10: Resultados de Cálculo de Fillet para o B777-300 pelo Método do Arco e da	
Tangente a partir de Raios de Curva determinados pela FAA	. 62
Tabela 11: Resultados de Cálculo de Fillet para o B777-300 pelo Método do Arco e da	
Tangente a partir de Raios de Curva determinados pela ICAO	. 63
Tabela 12: Resultados de Cálculo de Fillet para o B777-300 pelo Método do Arco e da	
Tangente a partir de Raios de Curva determinados pelo Manual da Aeronave	. 63
Tabela 13: Resultados de Cálculo de Fillet para o B747-400 pelo Método do Arco e da	
Tangente a partir de Raios de Curva determinados pela FAA	. 64
Tabela 14: Resultados de Cálculo de Fillet para o B747-400 pelo Método do Arco e da	
Tangente a partir de Raios de Curva determinados pela ICAO	. 64
Tabela 15: Resultados de Cálculo de Fillet para o B747-400 pelo Método do Arco e da	
Tangente a partir de Raios de Curva determinados pelo Manual da Aeronave	. 65
Tabela 16: Área adicional de pavimento necessário à criação de fillets	. 95

# LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil

FAA – Federal Aviation Administration

ICAO – International Civil Aviation Organization

RBAC - Regulamento Brasileiro da Aviação Civil

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL	14
2.1 Deslocamento das aeronaves em curvas e as margens de segurança	14
2.2 Modelo ICAO – Método do Arco e da Tangente	22
2.2.1 Determinação do raio do fillet (r)	22
2.2.2 Determinação do comprimento até o fim da tangente	24
2.3 Método FAA - 2012	28
3 DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DA TRAJETÓRIA DE UMA AERONAVE	36
3.1 Trecho Curvo	38
3.1.1 Primeiro caso: $R = d$	40
3.1.2 Segundo caso: $R \neq d$	42
3.2 Deslocamento do trecho retilíneo	44
3.3 Deslocamento completo da aeronave	47
4 ESTUDO DE CASO	49
4.1 Parâmetros de interesse das aeronaves	49
4.1.1 Aeronave AIRBUS A380-800	50
4.1.2 Aeronave AIRBUS A340-600	51
4.1.3 Aeronave BOEING 747-400	53
4.1.4 Aeronave BOEING 777-300	55
4.1.5 Compilação dos parâmetros das aeronaves	58
4.2 Aplicação do Método do Arco e da Tangente	59
4.3 Aplicação do Método da FAA	65
4.4 Construção e comparação dos fillet	65
5 CONCLUSÕES	99

# 1 INTRODUÇÃO

O projeto geométrico de aeródromos, de modo geral, engloba o dimensionamento de pistas de pouso, pistas de táxi e pátios para aeronaves. Nestas áreas as aeronaves farão seus deslocamentos e também quaisquer serviços em terra necessários. Desta forma, é natural que as aeronaves desloquem-se entre tais áreas e que façam curvas durante esses deslocamentos. Assim, um dos elementos de projeto a ser dada atenção é o fillet.

Entende-se fillet como uma adição de área pavimentada em curvas entre pistas de táxi ou entre pista de táxi e pista de pouso ou ainda entre pista de táxi e pátio. Essa adição de pavimento exige um projeto especifico, o qual está estritamente relacionado à movimentação da aeronave em terra e às margens de segurança necessárias a serem mantidas entre a borda externa do trem de pouso da aeronave e o bordo da pista. Como tais margens de segurança precisam ser mantidas durante qualquer deslocamento da aeronave, é necessário entender a trajetória descrita pela aeronave em solo, ou seja, a trajetória descrita pelos trens de pouso.

A determinação das trajetórias descritas pelos trens de pouso de uma aeronave é, porém, complexa. Por essa razão, são estabelecidos métodos baseados em procedimentos de cálculo que permitam a geração de um projeto geométrico adequado ao deslocamento das aeronaves sem que seja necessária a determinação da trajetória descrita pelos trens de pouso.

Nesse contexto, em que se utilizam modelos de construção de projetos geométricos de curvas a partir de aproximações, o presente trabalho apresenta uma determinação matemática das trajetórias descritas pelos trens de pouso de aeronaves. É também feita uma apresentação do desenvolvimento do deslocamento de aeronaves relacionado aos métodos de geração de fillets preconizados pela ICAO e FAA.

# 2 FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL

# 2.1 Deslocamento das aeronaves em curvas e as margens de segurança

O entendimento da necessidade dos fillets exige a compreensão do comportamento de uma aeronave ao realizar seu descolamento ao longo de uma curva. As figuras de 1 a 7 ilustram o deslocamento completo da aeronave durante tal procedimento. É importante perceber que há uma aproximação do trem de pouso principal em relação ao bordo da pista, de forma que a margem de segurança pode ficar comprometida. Este é o motivo pelo qual há a necessidade de haver um projeto específico para ampliação da área em que a aeronave pode realizar a curva, o fillet.



Figura 1: Deslocamento de aeronave em pista de táxi



Figura 2: Aeronave iniciando a curva



Figura 3: Primeira etapa da realização da curva



Figura 4: Aeronave durante a realização da curva



Figura 5: Aeronave terminando a curva e iniciando trecho retilíneo



Figura 7: Aeronave ao término do procedimento de curva, com o trem de pouso principal alinhado à linha de eixo da pista de táxi.

Uma vez reconhecido o fenômeno, deve-se entender como dimensionar o fillet, para isso é preciso verificar os parâmetros de interferem no seu dimensionamento.

Primeiramente, verifica-se que o fillet a ser projetado para uma determinada curva está ligado à aeronave que se deslocará ao longo da curva. Como tal, há pontos e parâmetros de interesse especial na determinação do deslocamento da aeronave ao longo da curva e, portanto, de especial interesse no dimensionamento do fillet. A Figura 8 apresenta tais parâmetros.

Segundo estabelecido pelo DOC 9157 – Aerodrome Design Manual (ICAO, 2005):

- S: Ponto Datum: Ponto do eixo longitudinal da aeronave que segue a linha de eixo no pavimento. O ponto datum se localiza na vertical abaixo do cockpit da aeronave.
- d: Comprimento Datum: Distância entre o ponto datum da aeronave e a linha central que passa pelo trem de pouso principal.
- T: Comprimento do trem de pouso principal: distância entre as rodas externas do trem de pouso principal, incluindo a largura das rodas.
- U: Centro do trem de pouso principal: Ponto de intersecção do eixo longitudinal da aeronave e a linha central que passa pelo trem de pouso principal.



Figura 8: Parâmetros e pontos de interesse da aeronave

Em segundo lugar, uma vez que o formato da curva é também importante no projeto do fillet, é preciso conhecer os fatores que configuram a curva. Tais valores são a largura da pista de táxi, o raio da curva que deve ser realizada e o afastamento aplicável. Esses valores, por sua vez, dependem da classificação da aeronave, sendo, portanto, preciso classificá-la e assim obter os parâmetros da curva. A Figura 9 mostra o código de referência a ser determinado a partir da envergadura e do comprimento do trem de pouso principal. A Figura 10 apresenta o afastamento a ser utilizado e Figura 11 mostra as larguras de pista de táxi. Os raios de curva definidos pela ICAO são apresentados na Figura 12.

Elem	Elemento 1 do Código Elemento 2 do Cód		ódigo	
Número do código	Comprimento básico de pista requerido pela aeronave	Letra do código	Envergadura	Distância entre as rodas externas do trem de pouso principal <sup>a</sup>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	Inferior a 800 m.	А	Inferior a 15 m.	Inferior a 4,5 m.
2	De 800 m a 1200 m exclusive.	В	De 15 m a 24 m exclusive.	De 4,5 m a 6 m exclusive.
3	De 1200 m a 1800 m exclusive.	С	De 24 m a 36 m exclusive.	De 6 m a 9 m exclusive.
4	1800 m e acima.	D	De 36 m a 52 m exclusive.	De 9 m a 14 m exclusive.
		Е	De 52 m a 65 m Exclusive.	De 9 m a 14 m exclusive.
		F	De 65 m a 80 m exclusive.	De 14 m a 16 m exclusive.

<sup>a</sup>. Distância entre as bordas externas das rodas do trem de pouso principal.

### Figura 9: Código de Referência do Aeródromo

Fonte: Regulamento Brasileiro de Aviação Civil RBAC nº 154 - Projetos de Aeródromos

### (ANAC, 2009)

Letra do código	Afastamento
A	1,5 m
В	2,25 m
С	3 m, se a pista de táxi for destinada a aeronaves com base de rodas menor que 18 m; ou 4,5 m, se a pista de táxi for destinada a aeronaves com base de rodas maior que 18 m.
D	4,5 m
Е	4,5 m
F	4,5 m

Figura 10: Afastamento entre a roda externa do trem de pouso principal e a borda da pista de táxi Fonte: Regulamento Brasileiro de Aviação Civil RBAC nº 154 – Projetos de Aeródromos

(ANAC, 2009)

Letra do código	Largura da pista de táxi
А	7,5 m
В	10,5 m
С	15 m, se a pista de táxi for destinada a aeronaves com distância entre eixos menor que 18 m
	18 m, se a pista de táxi for destinada a aeronaves com distância entre eixos maior que 18 m
D	18 m, se a pista de táxi for destinada a aeronaves com largura do trem de pouso principal menor que 9 m
	23 m, se a pista de táxi for destinada a aeronaves com largura do trem de pouso principal igual ou maior que 9 m
Е	23 m
F	25 m

Figura 11: Largura de Pistas de Táxi

Fonte: Regulamento Brasileiro de Aviação Civil RBAC nº 154 - Projetos de Aeródromos

(ANAC, 2009)

Tipo de Aeronave	Comprimento (m)	Envergadura (m)	Ângulo do trem de pouso	Raio da Curva (m)
300B-B2	46.70	44.80	50°	38.80
320-200	37.57	33.91	70°	21.91
330/A340-200	- 59.42	60.30	65°	45.00
330/A340-300	63.69	60.30	65°	45.60
3727-200	46.68	32.92	75°	25.00
737-200	30.58	28.35	70°	18.70
737-400	36.40	28.89	70°	21.50
737-900	41.91	34.32	70°	24.70
747	70.40	59.64	60°	50.90
747-400	70.67	64.90	60°	53.10
757-200	47.32	37.95	60°	30.00
767-200	48.51	47.63	60°	36.00
767-400 ER	51.92	61.37	60°	42.06
777-200	63.73	60.93	64°	44.20
777-300	73.86	73.08	64°	46.80
AC 111-400	28.50	27.00	65°	21.30
C8-61/63	57.12	43.41/45.2	70°	32.70
C9-30	36.36	28.44	75°	20.40
C9-40	38.28	28.44	75°	21.40
C9-50	40.72	28.45	75°	22.50
D82	45.02	32.85	75°	25.10
ID90-30	46.50	32.87	75°	26.60
C10-10	55.55	47.35	65°	35.60
C10-30	55.35	50.39	65°	37.30
C10-40	55.54	50.39	65°	36.00
ID11	61.60	52.50	65°	39.40
1011	54.15	47.34	60°	35.59

#### Figura 12: Raios de Curva para aeronaves

Fonte: adaptado do Aerodrome Design Manual – Part II (ICAO, 2005)

Além dos dados da aeronave e da curva, é também importante no projeto do fillet conhecer-se a forma que a aeronave fará a curva. As normas ICAO e FAA admitem dois tipos distintos de deslocamento da aeronave, sendo eles "Cockpit over centerline" e "Judgemental oversteering". No primeiro o piloto segue a linha de eixo enquanto faz as curvas da pista de táxi, já no segundo, o piloto deve intencionalmente não seguir a linha de eixo fazendo que a aeronave não translade próxima à borda da pista. Neste trabalho optou-se pelo formato denominado cockpit over centerline, uma vez que a FAA não o prevê o formato judgmental oversteering para que seja realizado o projeto geométrico das pistas de táxi.

De posse de todos os parâmetros intervenientes no projeto do fillet, procede-se consoante algum dos modelos de aproximação para a construção do projeto geométrico das curvas de interesse. Neste trabalho são trabalhados os modelos determinados pela ICAO e pela FAA.

### 2.2 Modelo ICAO – Método do Arco e da Tangente

Conforme estabelecido pelo Manual de Projetos de Aeroportos – ICAO (2° Volume), o caminho do trem de pouso principal de uma aeronave durante a curva é uma trajetória complexa, mas aproxima-se de um arco de circulo e suas tangentes. O design de um fillet que aproximadamente segue a trajetória do trem de pouso principal e assegura uma margem de segurança adequada, pode ser obtido usando:

- Um arco concêntrico ao centro do arco da linha de centro da pista de táxi de forma a garantir a largura extra de pavimento dentro da curva;
- A tangente em cada ponta do arco faz que o fillet conforme-se como uma cunha de forma a garantir a segurança no desvio residual do trem de pouso principal.

### 2.2.1 Determinação do raio do fillet (r)



**Figura 13: Raio do fillet e Raio da Curva** Fonte: adaptado do Aerodrome Design Manual – Part II (ICAO, 2005).

O raio do fillet é dado por:

$$\mathbf{r} = \mathbf{R} - \left(\lambda_{\max} + \mathbf{M} + \frac{\mathbf{T}}{2}\right) \tag{2.1}$$

Em que:

- R : raio da linha de eixo da pista de táxi
- $\lambda_{\max}$ : valor do desvio máximo do trem de pouso principal
- M : margem de segurança mínima (afastamento)

O valor do desvio máximo  $\lambda_{max}$  depende do comprimento datum (d), o raio de curvatura da linha de eixo da pista de táxi (R) e da taxa de mudança de direção. Esse valor de desvio máximo é obtido através da Figura 14 em que o dado de entrada é a porcentagem do comprimento datum para qualquer valor da relação R/d entre 1 e 5.

Quando o comprimento datum da aeronave (d) é maior que o raio da linha de centro da pista de táxi (R), deve-se utilizar para cálculo o raio da linha de centro da pista de táxi como igual ao comprimento datum, assumindo R/d = 1.



Figura 14: Desvio máximo  $\lambda_{max}$  do trem de pouso Fonte: adaptado do Aerodrome Design Manual – Part II (ICAO, 2005).

### 2.2.2 Determinação do comprimento até o fim da tangente

Uma vez determinado o raio de curvatura do fillet é preciso determinar a distância até o ponto final da tangente. Para isso, deve-se determinar em que ponto o fillet deixa de ser

necessário, que é a partir do ponto em que o desvio máximo do trem de pouso principal é menor que o desvio máximo permitido sem o fillet, tal desvio é calculado a partir da equação (2.2).

$$\lambda = \frac{X}{2} - \left(M + \frac{T}{2}\right) \tag{2.2}$$

Sendo

• X : largura da pista de táxi

O desvio residual é atingido ao final da curva, quando o ponto datum (S) tiver já passado pela parte retilínea uma distância F, dada pela equação (2.3). O comprimento de cada linha fim da tangente do fillet é dado pela equação (2.4).

$$\log\left(\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) = \log\left(\tan\left(\frac{\beta_{\max}}{2}\right)\right) - \frac{F}{d}$$
(2.3)

$$l = F - d \tag{2.4}$$

- β: é o ângulo de esterçamento residual correspondente a λ, obtido na equação (2.2).
- β<sub>max</sub>: é o ângulo de esterçamento durante a curva. Esse valor é atingido quando λ é igual a λ<sub>max</sub>, dado na Figura 14.

O ângulo de esterçamento residual atingido quando o desvio é igual ao desvio máximo permitido é obtido pela Figura 15.





O valor do máximo ângulo de esterçamento durante a curva é obtido pela Figura 16.



**Figura 16: Aumento do ângulo de esterçamento durante uma curva** Fonte: adaptado do Aerodrome Design Manual – Part II (ICAO, 2005).

Por último, a Figura 17 permite a conversão do valor do ângulo de esterçamento no valor do comprimento retilíneo percorrido pelo ponto datum.



Figura 17: Comprimentos percorridos em função dos ângulos de esterçamento Fonte: adaptado do Aerodrome Design Manual – Part II (ICAO, 2005).

### 2.3 Método FAA - 2012

A norma AC 150/5300-13A de 28/09/2012 da FAA apresenta critérios de determinação de parâmetros a serem utilizados para a criação de projetos de pistas de táxi incluindo o projeto de fillets. Tais critérios objetivam que sejam construídas curvas seguras para deslocamento das aeronaves, Para tal, as aeronaves são separadas em Grupos de Design de Pistas de Táxi (TDG – Taxiway Design Group), conforme mostrado na Figura 18,



Figura 18: Taxiway Design Groups Fonte: adaptado do Advisory Circular nº 150/5300-13A (FAA, 2012).

A partir do ábaco apresentado na Figura 18, é possível determinar o conjunto de equações que possibilite determinar-se o TDG de uma aeronave a partir dos parâmetros d e T da mesma. Essas equações são apresentadas na Tabela 1 e foram desenvolvidas para o presente trabalho para serem auxiliares nas rotinas implementadas para o modelamento gráfico das curvas, conforme apresentado posteriormente.

Tabela 1: Equações das envoltorias que definem os TDG-s						
TDG 01	TDG 02	TDG 03	TDG 04			
T > 0 d > 0 d < 20 $d < \frac{-10T}{3} + 60$ $d > \frac{20}{3}T - 90$	$\begin{array}{l} 0 < T < 12 \\ d < 28 \\ d < -\frac{8}{7}T + \frac{292}{7} \\ d < -10T + 210 \\ d > 10T - 190 \end{array}$	d = 66 ; 0 < T < 22,5 $d < \frac{-4}{5}T + \frac{420}{5}$ $d < \frac{-12}{2,5}T + \frac{485}{2,5}$ T = 30 ; 33,5 < d < 50 d = 2T - 26,5 $d = \frac{5}{1,75}T - \frac{81,25}{1,75}$ $d < \frac{10}{3}T - \frac{170}{3}$	T = 30 ; 18 < d < 31 $d > \frac{36}{5}T - \frac{1035}{5}$ d > 12T - 336			

TDG 05	TDG 06	TDG 07	
	0 < T < 31,25 ; d = 140 $d < \frac{-11}{12}T + \frac{2023,75}{12}$ T = 43,25 ; 85 < T < 12	$d < \frac{-5}{8,75}T + \frac{1345}{8,75}$ $T = 52 ; 76 < d < 124$ $9 d > \frac{18}{8,75} - \frac{279,75}{8,75}$	

A fim de testarem-se as equações das envoltórias foram realizados testes com três valores de cada TDG, obtidos a partir do ábaco da Figura 18, obtendo-se assim a Tabela 2.

d (ft)	T(ft)	TDG	Resultado	d (ft)	T(ft)	TDG	Resultado
10	15	01	01	40	80	05	05
15	8	01	01	44	60	07	07
2	18	01	01	44	120	07	07
2	24	02	02	50	100	07	07
14	20	02	02	44	128	07	07
18	4	02	02	42	88	06	06
20	16	03	03	32	136	06	06
16	28	03	03	10	136	06	06
28	40	03	03	22	12	04	04
26	60	03	03	28	8	04	04
10	80	05	05	28	28	04	04
32	40	05	05	20	4	04	04
42	60	05	05				

Tabela 2: Resultados de verificação de equações para envoltória de definição de TDG's

A Tabela 2 mostra que em todos os casos testes as equações de envoltória de definição de TDG's chegam ao resultado correto. Infere-se desse resultado que é possível utilizar tais equações classificar uma aeronave qualquer em relação à seu TDG. Assim, pode-se determinar os parâmetros adequados de construção dos fillets para pista de táxi.

É importante salientar que, pela AC 150/5300-13A as curvas em pistas de táxi devem, preferencialmente, ser de ângulos definidos por 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° ou 180°.

$\Delta$ (degrees)	30	45	60	90	120	135	150	180 <sup>1</sup>
W-0 (ft)	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
W-1 (ft)	15	16	17	20	22	22	23	17
W-2 (ft)	15	16	17	20	22	22	23	17
W-3 (ft)	N/A	35						
L-1 (ft)	15	20	25	30	30	30	30	25
L-2 (ft)	0	0	0	0	0	0	0	0
L-3 (ft)	4	7	10	20	37	54	87	32
R-Fillet (ft)	0	0	0	0	0	0	0	18
R-CL (ft)	25	25	25	25	25	25	25	35
R-Outer (ft)	70	50	45	40	38	38	38	N/A

As figuras de 19 a 24 mostram as dimensões a serem utilizadas no projeto do fillets. Tais dimensões devem ser utilizadas conforme mostrado nas figuras 25, 26 e 27.

Figura 19: Dimensões (ft) para TDG 01

Fonte: adaptado do Advisory Circular nº 150/5300-13A (FAA, 2012).

$\Delta$ (degrees)	30	45	60	90	120	135	150	180 <sup>1</sup>
W-0 (ft)	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5
W-1 (ft)	20	22	23	25	25	25	25	25
W-2 (ft)	20	22	23	25	25	25	25	25
W-3 (ft)	N/A	54						
L-1 (ft)	25	35	35	40	35	35	35	35
L-2 (ft)	0	0	0	0	0	0	0	0
L-3 (ft)	5	9	13	25	58	82	128	35
R-Fillet (ft)	0	0	0	0	10	10	10	10
R-CL (ft)	35	35	35	30	35	35	35	35
R-Outer (ft)	65	60	55	48	52	52	52	N/A

Figura 20: Dimensões (ft) para TDG 02

Fonte: adaptado do Advisory Circular nº 150/5300-13A (FAA, 2012).

$\Delta$ (degrees)	30	45	60	90	120	135	150	180 <sup>2</sup>
W-0 (ft)	25	25	25	25	25	25	25	25
W-1 (ft)	30	30	30	30	30	35	35	35
W-2 (ft)	35	40	45	50	50	51	55	62
W-3 (ft)	N/A	96						
L-1 (ft)	90	100	100	100	90	120	125	130
L-2 (ft)	50	55	70	80	80	50	55	60
L-3 (ft)	9	17	26	50	122	173	283	60
R-Fillet (ft)	0	0	0	0	25	25	25	20
R-CL (ft)	75	75	75	60	75	75	80	80
R-Outer TDG-3 (ft)	200	155	135	98	105	103	107	N/A
R-Outer TDG-4 (ft)	130	100	100	87	100	100	105	N/A

Fonte: adaptado do Advisory Circular nº 150/5300-13A (FAA, 2012).

$\Delta$ (degrees)	30	45	60	90	120	135	150	180 <sup>2</sup>
W-0 (ft)	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5
W-1 (ft)	40	45	45	45	50	50	45	50
W-2 (ft)	52	60	65	65	72	73	73	88
W-3 (ft)	N/A	150						
L-1 (ft)	100	165	180	180	210	215	180	185
L-2 (ft)	120	90	95	90	70	70	100	90
L-3 (ft)	14	25	37	103	191	276	440	96
R-Fillet (ft)	0	0	0	50	50	50	50	35
R-CL (ft)	110	110	110	95	115	120	120	120
R-Outer (ft)	350	250	200	164	160	160	160	N/A

Figura 22: Dimensões (ft) para TDG 05

Fonte: adaptado do Advisory Circular nº 150/5300-13A (FAA, 2012).
$\Delta$ (degrees)	30	45	60	90	120	135	150	180 <sup>3</sup>
W-0 (ft)	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5
W-1 (ft)	46	46	52	56	60	57	55	60
W-2 (ft)	60	71	82	85	95	102	107	105
W-3 (ft)	N/A	184						
L-1 (ft)	300	300	345	365	400	363	360	395
L-2 (ft)	111	157	137	125	110	145	165	120
L-3 (ft)	16	30	47	129	246	373	59 <mark>4</mark>	141
R-Fillet (ft)	0	0	0	60	60	60	60	75
R-CL (ft)	150	150	150	130	155	165	170	175
R-Outer (ft)	400	300	265	200	207	210	212	N/A

# Figura 23: Dimensões (ft) para TDG 06

Fonte: adaptado do Advisory Circular nº 150/5300-13A (FAA, 2012)

$\Delta$ (degrees)	30	45	60	90	120	135	150	180 <sup>3</sup>
W-0 (ft)	41	41	41	41	41	41	41	41
W-1 (ft)	50	50	55	56	60	57	55	60
W-2 (ft)	65	75	85	85	95	102	107	105
W-3 (ft)	N/A	184						
L-1 (ft)	360	355	390	440	450	489	410	450
L-2 (ft)	110	155	135	125	110	145	165	120
L-3 (ft)	17	31	49	129	246	363	594	141
R-Fillet (ft)	0	0	0	60	60	60	60	75
R-CL (ft)	150	150	150	130	155	165	170	175
R-Outer (ft)	400	300	270	205	210	215	215	N/A
	-							

Figura 24: Dimensões (ft) para TDG 07

Fonte: adaptado do Advisory Circular nº 150/5300-13A (FAA, 2012)



**Figura 25: Curva de 90° para pistas de táxi** Fonte: adaptado do Advisory Circular nº 150/5300-13A (FAA, 2012)



**Figura 26: Curva menor que 90° para pistas de táxi** Fonte: adaptado do Advisory Circular n° 150/5300-13A (FAA, 2012)



**Figura 27: Curva maior que 90° para pistas de táxi** Fonte: adaptado do Advisory Circular nº 150/5300-13A (FAA, 2012)

# 3 DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DA TRAJETÓRIA DE UMA AERONAVE

A identificação da forma que uma aeronave se desloca pode ser entendida como definir a trajetória que descreve a movimentação das rodas da aeronave por meio de equações. Para isso, é necessário que sejam assumidas determinadas características para esse movimento. Admite-se que uma aeronave durante uma curva não ocorrerá escorregamento lateral, ou seja, não há deslizamento dos pneus; além disso, deve-se assumir também que a movimentação da aeronave é de tal maneira que o trem de pouso principal move-se sempre em direção ao ponto datum, S.

Além das assunções descritas, é também interessante que a trajetória seja dividida em duas etapas, de forma a facilitar a resolução do problema.

Na primeira etapa a aeronave percorre um trecho curvo, ou seja, do instante em que ocorre a entrada na curva - situação em que o ponto datum está iniciando a curva e a linha do comprimento datum está paralela à linha de eixo (Figura 2) - até o instante em que o ponto datum inicia o trajeto retilíneo ao longo da pista de táxi, de forma que o trem de pouso principal estará deslocado na direção interna da curva (Figura 5).

A segunda etapa inicia-se ao final da etapa anterior, (Figura 5), e se estende enquanto o ponto datum deslocar-se ao longo da linha de eixo no trecho retilíneo da pista de táxi. Nesse processo, o trem de pouso principal desloca-se no sentido de retornar seu centro à linha de eixo da pista de táxi.

Para o modelamento matemático do deslocamento descrito, são utilizados alguns termos e símbolos, conforme a simbologia utilizada pela ICAO, sendo eles apresentados na Figura 28.

Todas as equações desenvolvidades neste trabalho foram implementadas em rotinas computacionas de forma que seja calculada a trajetória da aeronave e também apresentada graficamente, permitindo a visualização do caminho desenvolido pela aeronave na pista e também o caminho da margem de segurança que deve existir na pista.



Figura 28: Termos e símbolos relacionados à trajetória de uma aeronave



Figura 29: Termos e símbolos relacionados à trajetória de uma aeronave, modelo simplificado.

# 3.1 Trecho Curvo

A fim de se simplificar o modelo para determinar as equações de trajetória da aeronave, modela-se a aeronave como apresentado na Figura 29, sendo o ponto datum S e o centro do trem de pouso principal representado pelo ponto U, conforme anteriormente mencionado.

Considera-se também, que a aeronave execute a curva a velocidade constante e seguindo a linha de eixo da pista de táxi.

A posição dos pontos S e U é determinada no plano por suas coordenadas,  $(x_s, y_s)$  e  $(x_u, y_u)$ , respectivamente.

As velocidades dos pontos S e U são dadas por  $v_s e v_u$ , respectivamente. As componentes de velocidade no plano são representadas por  $(v_{sx}, v_{sy}) e (v_{ux}, v_{uy})$ 

O comprimento datum, d, no modelo simplificado, é a distância entre os pontos S e U.

A partir do que foi descrito e sabendo-se o raio da curva (R) que deverá ser descrita pela aeronave durante o deslocamento na pista de táxi e o ângulo da curva  $\theta$ , e utilizando as variáveis  $\alpha$  e  $\beta$  como auxiliares, pode-se determinar o modelamento matemático da forma:

$$\begin{cases} x_{s} = R\cos(\theta) \\ y_{s} = R\sin(\theta) \end{cases}$$
(3.1)

$$v_{u} = v_{s} \sin(\beta)$$

$$v_{ux} = v_{s} \sin(\beta) \cos(\alpha)$$

$$v_{uy} = v_{s} \sin(\beta) \cos(\alpha)$$
(3.2)

$$\beta = 180 - \alpha - \theta_{s}$$
  

$$\sin(\beta) = \sin(\alpha + \theta_{s})$$
(3.3)

$$\theta = \frac{v}{R}t \tag{3.4}$$

$$\partial \theta = \frac{\mathbf{v}}{\mathbf{R}} \partial \mathbf{t} \tag{3.5}$$

$$\tan\left(\alpha\right) = \frac{\mathbf{y}_{\mathrm{s}} - \mathbf{y}_{\mathrm{u}}}{\mathbf{x}_{\mathrm{s}} - \mathbf{x}_{\mathrm{u}}} \tag{3.6}$$

$$(\mathbf{x}_{s} - \mathbf{x}_{u})\tan(\alpha) = (\mathbf{y}_{s} - \mathbf{y}_{u})$$
(3.7)

Fazendo-se a derivada parcial no tempo da equação (3.7),

$$\left(\frac{\partial \mathbf{x}_{s}}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{x}_{u}}{\partial t}\right) \tan\left(\alpha\right) + \left(\mathbf{x}_{s} - \mathbf{x}_{u}\right) \sec^{2}\left(\alpha\right) \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{y}_{s}}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{y}_{u}}{\partial t}$$
(3.8)

$$(-v_{s}\sin(\theta) + v_{s}\sin(\alpha + \theta)\cos(\alpha))\tan(\alpha) + (x_{s} - x_{u})\sec^{2}(\alpha)\frac{\partial\alpha}{\partial t}$$

$$= -v_{s}\cos(\theta) + v_{s}\sin(\alpha + \theta)\sin(\alpha)$$

$$(3.9)$$

Reorganizando os termos da equação (3.9)

$$(x_{s} - x_{u}) \sec^{2}(\alpha) \frac{\partial \alpha}{\partial t} = = -v_{s} (\cos \theta - \sin (\theta + \alpha) \sin \alpha) - (-v_{s} (\sin \theta \cdot \tan \alpha + \sin (\theta + \alpha) \cdot \sin \alpha))$$

$$(3.10)$$

$$(x_s - x_u) \sec^2(\alpha) \frac{\partial \alpha}{\partial t} = v_s (\sin \theta \cdot \tan \alpha - \cos \theta)$$
 (3.11)

Dividindo-se ambos os lados da igualdade na equação (3.11)

$$\frac{(\mathbf{x}_{s} - \mathbf{x}_{u})}{d} \sec^{2}(\alpha) \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{\mathbf{v}_{s}}{d} \left( \sin(\theta) \tan(\alpha) - \cos(\theta) \right)$$
(3.12)

A partir da equação (3.12) e a partir da relação apresentada na equação (3.13)

$$\frac{\left(x_{s}-x_{u}\right)}{d}=-\cos\alpha \qquad (3.13)$$

Pode-se concluir que

$$-\cos\alpha \cdot \sec^{2}(\alpha)\frac{\partial\alpha}{\partial t} = \frac{v_{s}}{d}\left(\sin(\theta)\tan(\alpha) - \cos(\theta)\right)$$
(3.14)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{v_s}{d} \left( \sin \theta \tan \alpha - \cos \theta \right) \cdot \left( -\cos \alpha \right)$$
(3.15)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{v_s}{d} \left( \sin(\theta) \tan(\alpha) - \cos(\theta) \right) \left( -\cos(\alpha) \right)$$
(3.16)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{v_s}{d} \left( \cos\theta \cdot \cos\alpha - \sin\theta \cdot \sin\alpha \right)$$
(3.17)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{\mathbf{v}_{s}}{\mathbf{d}} \cdot \cos(\theta + \alpha)$$
(3.18)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{v_s}{d} \left( \cos\left(\alpha + \theta\right) \right)$$
(3.19)

As equações (3.5) e (3.19), podem ser reunidas de forma a parâmetros mais consistentes serem utilizados no modelamento:

$$\frac{\mathbf{v}_{s}}{\mathbf{R}}\frac{\partial \mathbf{t}}{\partial \theta}\frac{\partial \alpha}{\partial \mathbf{t}} = \frac{\mathbf{v}_{s}}{\mathbf{d}}\left(\cos\left(\alpha + \theta\right)\right)$$
(3.20)

39

Dessa forma, conclui-se que o modelamento que descreve o deslocamento de uma aeronave ao longo da curva, segundo as premissas já citadas, é:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \theta} = \frac{R}{d} \cos(\theta + \alpha)$$
(3.21)

O modelamento matemático do deslocamento da aeronave ao longo da curva, como mostrado na equação (3.21) pode, então, ser resolvido por meio de software (WolframAlpha, acessado em 29 de outubro de 2013) para dois diferentes casos, um em que os parâmetros R e d são iguais e um em que tais parâmetros tem diferentes valores.

### **3.1.1 Primeiro caso:** R = d

Além da condição de que os parâmetros R e d tenham o mesmo valor, é também considerado que no instante inicial em que a aeronave realizará a curva, ela encontra-se como mostrado na Figura 30.



Figura 30: Situação de início da curva executada pela aeronave

Dessa forma:

$$\alpha(0) = \frac{\pi}{2} \tag{3.22}$$

E o problema é resolvido como:

Seja

$$\mathbf{u}(\theta) = \alpha(\theta) + \theta \tag{3.23}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}(\theta)}{\partial \theta} = \frac{\partial \alpha(\theta)}{\partial \theta} + 1 \tag{3.24}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}(\theta)}{\partial \theta} - 1 = \cos\left(\mathbf{u}(\theta)\right) \tag{3.25}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}(\theta)}{\partial \theta} = \cos\left(\mathbf{u}(\theta)\right) + 1 \tag{3.26}$$

$$\frac{\frac{\partial \mathbf{u}(\theta)}{\partial \theta}}{\cos(\mathbf{u}(\theta))+1} = 1$$
(3.27)

$$\int \frac{\frac{\partial \mathbf{u}(\theta)}{\partial \theta}}{\cos(\mathbf{u}(\theta)) + 1} \partial \theta = \int 1 \partial \theta$$
(3.28)

$$\tan\left(\frac{u(\theta)}{2}\right) = \theta + cte \tag{3.29}$$

A partir das equações (3.29) e (3.23):

$$\tan\left(\frac{\alpha(\theta) + \theta}{2}\right) = \theta + \text{cte}$$
(3.30)

$$\alpha(\theta) = 2\arctan(\theta + \operatorname{cte}) - \theta \tag{3.31}$$

Utilizando-se a condição apresentada em (3.22):

$$\alpha(0) = 2\arctan(0 + \operatorname{cte}) - 0 = \frac{\pi}{2}$$
(3.32)

$$cte = 1$$
 (3.33)

Dessa forma, a partir de (3.31) e (3.33):

$$\alpha(\theta) = (2 \cdot \arctan(\theta + 1) - \theta)$$
(3.34)

# **3.1.2** Segundo caso: $R \neq d$

Além da condição de que os parâmetros R e d tenham diferentes valores, é também considerado que no instante inicial em que a aeronave realizará a curva, ela encontra-se como mostrado na Figura 30, como no caso anterior. Dessa forma:

$$\alpha(0) = \frac{\pi}{2} \tag{3.35}$$

E o problema é resolvido como:

Seja

$$\mathbf{u}(\theta) = \alpha(\theta) + \theta \tag{3.36}$$

Então

$$\frac{\partial \mathbf{u}(\theta)}{\partial \theta} = \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{d}} \frac{\partial \alpha(\theta)}{\partial \theta} + 1$$
(3.37)

$$\frac{\partial \mathbf{u}(\theta)}{\partial \theta} = \frac{\mathbf{d} + \mathbf{R} \cdot \cos\left(\mathbf{u}(\theta)\right)}{\mathbf{d}}$$
(3.38)

$$\frac{\frac{\partial u(\theta)}{\partial \theta}}{\frac{d + R \cdot \cos(u(\theta))}{d}} = 1$$
(3.39)

$$\int \left( \frac{\frac{\partial u(\theta)}{\partial \theta}}{\frac{d + R \cdot \cos(u(\theta))}{d}} \right) \partial \theta = \int 1 \partial \theta$$
(3.40)

$$-2 \cdot \mathbf{d} \cdot \operatorname{atanh}\left(\frac{(\mathbf{d} - \mathbf{R}) \operatorname{tan}\left(\frac{\mathbf{u}(\theta)}{2}\right)}{\sqrt{\mathbf{R}^2 - \mathbf{d}^2}}\right) = \theta + \operatorname{cte}$$
(3.41)

A partir das equações (3.36) e(3.41):

$$-2 \cdot d \cdot \operatorname{atanh}\left(\frac{\left(d-R\right) \operatorname{tan}\left(\frac{\alpha\left(\theta\right)+\theta}{2}\right)}{\sqrt{R^{2}-d^{2}}}\right) = \theta + \operatorname{cte}$$
(3.42)

$$\alpha(\theta) = -\theta - 2 \cdot \arctan\left(\frac{(d+R)\tanh\left(\frac{(\theta+cte)\sqrt{R^2 - d^2}}{-2d}\right)}{\sqrt{R^2 - d^2}}\right)$$
(3.43)

Utilizando-se a condição apresentada em (3.35):

$$\frac{\pi}{2} = 2 \cdot \arctan\left(\frac{\left(d+R\right) \tanh\left(\frac{\operatorname{cte}\sqrt{R^2 - d^2}}{-2d}\right)}{\sqrt{R^2 - d^2}}\right)$$
(3.44)  
$$\operatorname{cte} = -\frac{2 \cdot d \cdot \operatorname{atanh}\left(\frac{d-R}{\sqrt{R^2 - d^2}}\right)}{\sqrt{R^2 - d^2}}$$
(3.45)

Dessa forma, a partir de (3.43) e (3.45):

$$\alpha(\theta) = -\theta - 2 \cdot \arctan\left(\frac{(d+R)}{\sqrt{R^2 - d^2}} \tanh\left(\frac{(\theta\sqrt{R^2 - d^2}) - \frac{2 \cdot d \cdot \operatorname{atanh}\left(\frac{d-R}{\sqrt{R^2 - d^2}}\right)}{\sqrt{R^2 - d^2}}\sqrt{R^2 - d^2}}{-2d}\right)\right) (3.46)$$

$$\left(\left(1 + R\right) - \left(\frac{(\theta\sqrt{R^2 - d^2}) - 2 \cdot d \cdot \operatorname{atanh}\left(\frac{d-R}{\sqrt{R^2 - d^2}}\right)}{\sqrt{R^2 - d^2}}\right)\right)$$

$$\alpha(\theta) = -\theta - 2 \cdot \arctan\left[\frac{(d+R)}{\sqrt{R^2 - d^2}} \tanh\left[\frac{(\theta\sqrt{R^2 - d^2}) - 2 \cdot d \cdot \operatorname{atanh}\left[\frac{d}{\sqrt{R^2 - d^2}}\right]}{-2d}\right]\right] (3.47)$$

$$\alpha(\theta) = -\theta - 2 \cdot \arctan\left(\frac{(d+R)}{\sqrt{R^2 - d^2}} \tanh\left(\frac{(\theta\sqrt{R^2 - d^2})}{-2d} + \operatorname{tanh}\left(\frac{d-R}{\sqrt{R^2 - d^2}}\right)\right)\right)$$
(3.48)

$$\alpha(\theta) = -\theta + 2 \cdot \arctan\left(\frac{-(d+R)}{\sqrt{R^2 - d^2}} \tanh\left(\frac{(\theta\sqrt{R^2 - d^2})}{-2d} + \operatorname{tanh}\left(\frac{d-R}{\sqrt{R^2 - d^2}}\right)\right)\right)$$
(3.49)

43

$$\alpha(\theta) = -\theta + 2 \cdot \arctan\left(\frac{(d+R)}{\sqrt{R^2 - d^2}} \tanh\left(\frac{(\theta\sqrt{R^2 - d^2})}{2d} - \operatorname{atanh}\left(\frac{d-R}{\sqrt{R^2 - d^2}}\right)\right)\right)$$
(3.50)

Uma vez determinado o comportamento de  $\alpha$  pelas equações (3.34) e (3.50) pode-se descrever o movimento completo do centro do trem de pouso principal da aeronave (U) durante a curva. Dessa forma:

$$\begin{cases} x_{u} = x_{s} + d \cdot \cos(\alpha) \\ y_{u} = y_{s} - d \cdot \sin(\alpha) \\ \beta = 180^{\circ} - \theta - \alpha(\theta) \end{cases}$$
(3.51)

# 3.2 Deslocamento do trecho retilíneo

Uma vez que o ponto datum da aeronave termine a curva é iniciado o deslocamento pelo o trecho retilíneo. O equacionamento do movimento da aeronave no trecho retilíneo assemelha-se ao do trecho curvo, de forma que as definições utilizadas para os pontos S e U são novamente utilizadas, outros parâmetros, assim como utilizados pela ICAO, podem ser vistos na Figura 31.



Figura 31: Termos e símbolos relacionados à trajetória de uma aeronave durante trecho retilíneo.



Figura 32: Termos e símbolos relacionados à trajetória de uma aeronave durante trecho retilíneo, modelo simplificado.

Assim:

$$\lambda = \mathrm{d}\sin\left(\beta\right) \tag{3.52}$$

$$\begin{cases} y_{s} = \text{cte} \\ x_{s} = v_{s} \cdot t \end{cases}$$
(3.53)

$$v_{u} = v_{s} \cos(\beta)$$

$$\begin{cases} v_{ux} = v_{s} \cos(\beta) \cos(\beta) \\ v_{uy} = v_{s} \cos(\beta) \sin(\beta) \end{cases}$$
(3.54)

$$\tan\left(\beta\right) = \frac{\left(y_{s} - y_{u}\right)}{\left(x_{s} - x_{u}\right)}$$
(3.55)

$$\left(\mathbf{x}_{s} - \mathbf{x}_{u}\right) \cdot \tan\left(\beta\right) = \left(\mathbf{y}_{s} - \mathbf{y}_{u}\right)$$
(3.56)

Fazendo-se a derivada parcial em relação ao tempo a partir da equação (3.56):

$$\left(\frac{\partial \mathbf{x}_{s}}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{x}_{u}}{\partial t}\right) \tan\left(\beta\right) + \left(\mathbf{x}_{s} - \mathbf{x}_{u}\right) \sec^{2}\left(\beta\right) \frac{\partial\beta}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{y}_{s}}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{y}_{u}}{\partial t}$$
(3.57)

$$(\mathbf{v}_{sx} - \mathbf{v}_{ux})\tan\left(\beta\right) + (\mathbf{x}_{s} - \mathbf{x}_{u})\sec^{2}\left(\beta\right)\frac{\partial\beta}{\partial t} = (\mathbf{v}_{sy} - \mathbf{v}_{uy})$$
(3.58)

Das equações (3.54) e (3.58)

$$\left(\mathbf{v}_{s}-\mathbf{v}_{s}\cos^{2}\left(\beta\right)\right)\tan\left(\beta\right)+\left(\mathbf{x}_{s}-\mathbf{x}_{u}\right)\sec^{2}\left(\beta\right)\frac{\partial\beta}{\partial t}=0-\mathbf{v}_{s}\cos\left(\beta\right)\sin\left(\beta\right)$$
(3.59)

$$(x_{s} - x_{u})\sec^{2}(\beta)\frac{\partial\beta}{\partial t} = -v_{s}\cos(\beta)\sin(\beta) - v_{s}\tan(\beta) + v_{s}\sin(\beta)\cos(\beta) \qquad (3.60)$$

46

$$\left(x_{s} - x_{u}\right)\frac{\partial\beta}{\partial t} = -v_{s}\tan\left(\beta\right)\cos^{2}\left(\beta\right)$$
(3.61)

$$(x_{s} - x_{u})\frac{\partial\beta}{\partial t} = v_{s}\cos(\beta)(-\sin(\beta))$$
 (3.62)

Dividindo-se a equação (3.62) por d :

$$\frac{\left(\mathbf{x}_{s}-\mathbf{x}_{u}\right)}{d}\frac{\partial\beta}{\partial t}=\frac{\mathbf{v}_{s}}{d}\cos\left(\beta\right)\left(-\sin\left(\beta\right)\right)$$
(3.63)

A partir da equação (3.63) e a partir da relação apresentada na equação (3.64)

$$\frac{\left(x_{s}-x_{u}\right)}{d}=-\cos\beta$$
(3.64)

Obtém-se que:

$$\cos(\beta)\frac{\partial\beta}{\partial t} = \frac{v_s}{d}\cos(\beta)(-\sin(\beta))$$
(3.65)

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = \frac{\partial x_s}{\partial t} \frac{1}{d} \left( -\sin(\beta) \right)$$
(3.66)

$$\partial \beta = \partial x_{s} \frac{1}{d} \left( -\sin(\beta) \right)$$
(3.67)

$$\frac{\partial \beta}{\left(-\sin\left(\beta\right)\right)} = \frac{\partial x_{s}}{d}$$
(3.68)

Integrando-se a equação(3.68):

$$\int -d \frac{1}{\left(\sin\left(\beta\right)\right)} \partial\beta = \int \partial x_{s}$$
(3.69)

$$\mathbf{x}_{s} - \mathbf{x}_{s0} = -d \ln\left(\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) + d \ln\left(\tan\left(\frac{\beta_{0}}{2}\right)\right)$$
(3.70)

$$x_{s} - x_{s0} = -d \ln \left( \frac{\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\beta_{0}}{2}\right)} \right)$$
(3.71)

$$\mathbf{x}_{s} - \mathbf{x}_{s0} = \Delta \mathbf{s} = -\mathbf{d} \ln \left( \frac{\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\beta_{0}}{2}\right)} \right)$$
(3.72)

Além disso, também se pode verificar a partir de (3.72) que:

$$-\frac{\Delta s}{d} = \ln\left(\frac{\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\beta_0}{2}\right)}\right)$$
(3.73)

$$e^{-\frac{\Delta s}{d}} = \frac{\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\beta_0}{2}\right)}$$
(3.74)

$$\tan\left(\frac{\beta_0}{2}\right)e^{-\frac{\Delta s}{d}} = \tan\left(\frac{\beta}{2}\right)$$
(3.75)

$$\arctan\left(\tan\left(\frac{\beta_0}{2}\right) \cdot e^{-\frac{\Delta s}{d}}\right) = \left(\frac{\beta}{2}\right)$$
(3.76)

$$\beta = 2 \cdot \arctan\left(\tan\left(\frac{\beta_0}{2}\right) \cdot e^{-\frac{\Delta s}{d}}\right)$$
(3.77)

# **3.3** Deslocamento completo da aeronave

As equações (3.34), (3.50), (3.51), (3.72) e (3.77), permitem descrever completamente a trajetória descrita pelo ponto datum S e pelo centro do trem de pouso principal U, desde o início da curva até o momento em que a aeronave realinha-se à linha de centro da pista de táxi. A partir deste movimento, pode-se determinar a trajetória das rodas do trem de pouso da aeronave, sabendo-se, para tal, o valor do parâmetro T.

A Figura 33 apresenta os parâmetros necessários ao equacionamento.

47



Figura 33: Termos e Parâmetros para determinação do deslocamento da borda externa do trem de pouso principal.

A trajetória dos pontos externos das rodas do trem de pouso principal pode ser descrita da forma:

Seja,

$$m_{\rm r} = \frac{y_{\rm s} - y_{\rm u}}{x_{\rm s} - x_{\rm u}} \tag{3.78}$$

$$m_{s} = \frac{y_{b} - y_{u}}{x_{b} - x_{u}}$$
(3.79)

$$s: y_b = m_s (x_b - x_u) + y_u$$
 (3.80)

Como  $\, s \perp r$  :

$$\mathbf{m}_{s} \cdot \mathbf{m}_{r} = -1 \tag{3.81}$$

Como, da borda externa da roda até o centro do trem de pouso principal deve manterse constante:

$$\left(\frac{T}{2}\right)^{2} = \left(x_{u} - x_{b}\right)^{2} + \left(y_{u} - y_{b}\right)^{2}$$
(3.82)

$$\left(\frac{T}{2}\right)^{2} = \left(x_{u} - x_{b}\right)^{2} + \left(m_{s}\left(x_{u} - x_{b}\right)\right)^{2}$$
(3.83)

De (3.78), (3.81) e (3.83):

$$\left(\frac{T}{2}\right)^{2} = \left(x_{u} - x_{b}\right)^{2} + \left(\left(\frac{x_{u} - x_{s}}{y_{s} - y_{u}}\right)\left(x_{u} - x_{b}\right)\right)^{2}$$
(3.84)

$$x_{b} = x_{u} \pm \left(\frac{(T/2)}{1 + \frac{(x_{u} - x_{s})^{2}}{(y_{s} - y_{u})^{2}}}\right)^{-1}$$
(3.85)

A partir das equações (3.80) e (3.85), determina-se:

$$y_{b} = y_{u} + \left(\frac{x_{u} - x_{s}}{y_{s} - y_{u}}\right) \left(\pm \left(\frac{(T/2)}{1 + \frac{(x_{u} - x_{s})^{2}}{(y_{s} - y_{u})^{2}}}\right)^{1/2}\right)$$
(3.86)

Assim, por meio das equações (3.34), (3.50), (3.51), (3.72), (3.77), (3.85) e (3.86), pode-se definir o deslocamento completo da borda externa das rodas do trem de pouso principal de uma aeronave, desde que seja conhecida a trajetória do ponto datum S, que, conforme já mencionado, é o próprio trajeto da linha de eixo.

# 4 ESTUDO DE CASO

### 4.1 Parâmetros de interesse das aeronaves

Assim como dito anteriormente, uma vez determinadas as equações da trajetória de deslocamento da aeronave, sua aplicação exige conhecer-se a aeronave que se deseja trabalhar, em especial os parâmetros (d) e (T) da aeronave.

Como a determinação desses parâmetros (d) e (T) da aeronave exige certo estudo, são escolhidas algumas aeronaves como críticas pelo comprimento e bitola, sendo elas: A-380, 747-400, 777-340 e A-340.

49

#### 4.1.1 Aeronave AIRBUS A380-800

Para a determinação dos parâmetros para a aeronave AIRBUS A380, foram obtidos os dados a partir do manual da aeronave: AIRCRAFT CHARACTERISTICS AIRPORT AND MAINTENANCE PLANNING, de novembro de 2012.



**Figura 34: Envergadura para aeronave A380-800** Fonte: adaptado do Airbus A380: Aircraft Characteristics – Airport and Maintenance

Planning (NOV/12)



**Figura 35: Distância do trem de pouso principal ao ponto datum aeronave A380** Fonte: adaptado do Airbus A380: Aircraft Characteristics – Airport and Maintenance

Planning (NOV/12)

Trem de pouso na asa



**Figura 36: Distâncias entre os trens de pouso e comprimento T para aeronave A380** Fonte: adaptado do Airbus A380: Aircraft Characteristics – Airport and Maintenance

#### Planning (NOV/12)

Da Figura 36 pode-se obter que a distância entre o trem de pouso dianteiro e o centro do trem de pouso das asas é de 28,606 m, a distância entre o trem de pouso dianteiro e o centro do trem de pouso da barriga é de 31,882 m e a distância entre as bordas externas dos pneus do trem de pouso principal é de 14,336 m. Da Figura 35 obtém-se que distância entre o trem de pouso dianteiro e o ponto datum é de 2,05 m (4,97 m – 2,92 m).

$$d = 2,05 + \frac{31,882 + 28,606}{2} \tag{4.1}$$

$$d = 32,294 \text{ m}$$
 (4.2)

A Figura 34 permite a determinação da envergadura da aeronave como 79,75 m. A partir dos valores de envergadura e o comprimento T da aeronave, pode-se classificá-la como Letra Código F.

### 4.1.2 Aeronave AIRBUS A340-600

Para a determinação dos parâmetros para a aeronave AIRBUS A340-600, foram obtidos os dados a partir do manual da aeronave: AIRCRAFT CHARACTERISTICS AIRPORT AND MAINTENANCE PLANNING, de abril de 2013.



**Figura 37: Distância do trem de pouso principal ao ponto datum para aeronave A340-600** Fonte: adaptado do Airbus A340-500/-600: Aircraft Characteristics – Airport and

Maintenance Planning (ABR/13)



**Figura 38: Comprimento T e envergadura para aeronave A340-600** Fonte: adaptado do Airbus A340-500/-600: Aircraft Characteristics – Airport and

Maintenance Planning (ABR/13)



**Figura 39: Distâncias entre os trens de pouso para aeronave A340-600** Fonte: adaptado do Airbus A340-500/-600: Aircraft Characteristics – Airport and

#### Maintenance Planning (ABR/13)

Da Figura 39 pode-se obter que a distância entre o trem de pouso dianteiro e o centro do trem de pouso das asas é de 32,889 m, a distância entre o trem de pouso dianteiro e o centro do trem de pouso da barriga é de 33,637 m. Da Figura 38 a distância entre as bordas externas dos pneus do trem de pouso principal é de 12,61 m. Da Figura 37 obtém-se que distância entre o trem de pouso dianteiro e o ponto datum é de 4,18 m (6,58 m – 2,4 m).

$$d = 4,18 + \frac{32,889 + 33,637}{2}$$
(4.3)

$$d = 37,443 \text{ m}$$
 (4.4)

A Figura 38 permite a determinação da envergadura da aeronave como 63,45 m. A partir dos valores de envergadura e o comprimento T da aeronave, pode-se classificá-la como Letra Código E.

#### 4.1.3 Aeronave BOEING 747-400

Para a determinação dos parâmetros para a aeronave BOEING 747-400, foram obtidos os dados a partir do manual da aeronave: Airplane Characteristics for Airport Planning, de dezembro de 2002.



Figura 40: Envergadura para aeronave B747-400

Fonte: adaptado do Boeing 747-400: Aircraft Characteristics for Airport Planning (DEZ/02)



**Figura 41: Distância do trem de pouso principal ao ponto datum para aeronave 747-400** Fonte: adaptado do Boeing 747-400: Aircraft Characteristics for Airport Planning (DEZ/02)



**Figura 42: Distâncias entre os trens de pouso para aeronave e Comprimento T para aeronave 747-400** Fonte: adaptado do Boeing 747-400: Aircraft Characteristics for Airport Planning (DEZ/02)

Da Figura 42 pode-se obter que a distância entre o trem de pouso dianteiro e o centro do trem de pouso das asas é de 24,07 m, a distância entre o centro do trem de pouso das asas e o centro do trem de pouso da barriga é de 3,07 m. Também da Figura 42, a distância entre as bordas externas dos pneus do trem de pouso principal é de 12,60 m. Da Figura 41 obtém-se que distância entre o trem de pouso dianteiro e o ponto datum é de 2,34.

$$d = 2,34 + \frac{24,07 + 24,07 + 3,07}{2}$$
(4.5)

$$d = 27,945 \text{ m}$$
 (4.6)

A Figura 40 permite a determinação da envergadura da aeronave como 64,92 m. A partir dos valores de envergadura e o comprimento T da aeronave, pode-se classificá-la como Letra Código E.

#### 4.1.4 Aeronave BOEING 777-300

Para a determinação dos parâmetros para a aeronave BOEING 777-300, foram obtidos os dados a partir do manual da aeronave: 777-200/300 Airplane Characteristics for Airport Planning, de julho de 1998.



**Figura 43: Envergadura para aeronave B777-300** Fonte: adaptado do Boeing 777-200/300: Aircraft Characteristics for Airport Planning

(JUL/98)



**Figura 44: Distância do trem de pouso principal ao ponto datum para aeronave 777-300** Fonte: adaptado do Boeing 777-200/300: Aircraft Characteristics for Airport Planning

(JUL/98)



**Figura 45: Distâncias entre os trens de pouso para aeronave e Comprimento T para aeronave 777-300** Fonte: adaptado do Boeing 777-200/300: Aircraft Characteristics for Airport Planning

(JUL/98)

	UNITS	777-	-200		777-2	00 ER		777	-300
Máxima carga	LB	447,000	547,000	557,000	634,000	650,000	658,000	517,800	662,000
de design	KG	202,760	248,120	252,650	287,580	29 <b>4</b> ,840	298,460	234,870	300,280
Pneu dianteiro	N.		42 X 17 R 18, 26 PR						
Pressão do	PSI	190	195	200	200	200	200	205	205
pneu dianteiro	KG/CM <sup>2</sup>	13.36	13.71	14.06	14.06	14.06	14.06	14.41	14.41
Pneu principal	N.	50 X 20 R 22, 26 PR	50 X 20 R 22, 32 PR	50 X 20 R 22, 32 PR 32 PR 32 PR					0 R 22, PR
Pressão do	PSI	149	182	186	205	205	205	171	215
pneu principal	KG/CM <sup>2</sup>	10.48	12.80	13.08	14.41	14.41	14.41	12.02	15.12

**Figura 46: Características dos pneus de trem de pouso para a aeronave 777-300** Fonte: adaptado do Boeing 777-200/300: Aircraft Characteristics for Airport Planning

(JUL/98)

Da Figura 45 pode-se obter que a distância entre o trem de pouso dianteiro e o centro do trem de pouso principal 31,22 m. Da Figura 45 e Figura 46 a bitola do trem de pouso é de 36 pés, a distância entre os centros de duas rodas é de 55 polegadas e a largura do pneu utilizado pela aeronave é de 20 polegadas, dessa forma a distância entre as bordas externas dos pneus do trem de pouso principal é de 42 pés e 3 polegadas, utilizando-se que 1 polegada tem 2,54 cm, então a distância é de 12,878 m. Da Figura 44 obtém-se que distância entre o trem de pouso dianteiro e o ponto datum é de 3,63 m.

$$d = 3,63 + 31,22 \tag{4.7}$$

$$d = 34,85 m$$
 (4.8)

A Figura 43 permite a determinação da envergadura da aeronave como 60,93 m. A partir dos valores de envergadura e o comprimento T da aeronave, pode-se classificá-la como Letra Código E.

#### 4.1.5 Compilação dos parâmetros das aeronaves

Nas seções anteriores foram apresentados os parâmetros (d) e (T). A Tabela 3 apresenta os valores dos parâmetros de todas as aeronaves conjuntamente para fácil consulta.

Aeronave	d (m)	T (m)	Envergadura	Letra Código
A380-800	32,294	14,336	79,75	F
A340-600	37,443	12,610	63,45	Е
B747-400	27,945	12,600	64,92	Е
B777-300	34,850	12,878	60,93	Е

Tabela 3: Parâmetros para aeronaves escolhidas

# 4.2 Aplicação do Método do Arco e da Tangente

Uma vez estabelecido o método de determinação de fillets pela norma ICAO, pode-se aplica-lo para as aeronaves escolhidas, A380-800, A340-600, B747-400 e B777-300.

O cálculo dos fillets pelo Método do Arco e da Tangente exige a determinação do comprimento datum (d) e da distância entre os bordos externos do trem de pouso principal (T), conforme já apresentados na Tabela 3. Além disso, é necessário saber também o raio da linha de centro da pista de táxi na curva, para tal, foram escolhidos raios a partir do que é apresentado na FAA (Figura 23 e Figura 24), na ICAO (Figura 12) e no manual das aeronaves.

Para a largura das pistas de táxi e afastamento em relação ao bordo da pista, utiliza-se a Letra Código de Referência de cada aeronave, Tabela 3. Assim, pelo apresentado na Figura 10 e na Figura 11, a largura para a aeronave A380-800 deve ser de 25 m enquanto as outras aeronaves exigem largura de 23 m. Quanto ao afastamento, todas as aeronaves justificam um afastamento de 4,5 m.

Uma vez de posse dos dados necessários à aplicação do Método do Arco e da Tangente, são apresentados os resultados obtidos para o cálculo de fillets para tal método nas tabelas de Tabela 4 a Tabela 15.

		-				
30	45	60	90	120	135	150
45,75	45,75	45,75	39,65	47,275	50,325	51,85
25	25	25	25	25	25	25
32,294	32,294	32,294	32,294	32,294	32,294	32,294
14,336	14,336	14,336	14,336	14,336	14,336	14,336
4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
1,42	1,42	1,42	1,23	1,46	1,56	1,61
17	21	24,2	34,2	35	33,5	33,5
5,49	6,78	7,82	11,04	11,30	10,82	10,82
28,59	27,30	26,27	16,94	24,30	27,84	29,36
0,832	0,832	0,832	0,832	0,832	0,832	0,832
1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
22,15	29,15	33,15	43,4	39,4	38,4	37,9
125,62	125,62	125,62	125,62	125,62	125,62	125,62
36,00	26,00	21,00	12,00	14,00	15,00	16,00
89,62	99,62	104,62	113,62	111,62	110,62	109,62
57,33	67,33	72,33	81,33	79,33	78,33	77,33
	30 45,75 25 32,294 14,336 4,5 1,42 17 5,49 28,59 0,832 1,4 22,15 125,62 36,00 89,62 57,33	304545,7545,75252532,29432,29414,33614,3364,51,4361,421,421,421,4217215,496,7828,5927,300,8320,8321,41,422,1529,15125,62125,6236,0026,0089,6299,6257,3367,33	30 $45$ $60$ $45,75$ $45,75$ $45,75$ $25$ $25$ $25$ $32,294$ $32,294$ $32,294$ $14,336$ $14,336$ $14,336$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $1,42$ $1,42$ $1,42$ $17$ $21$ $24,2$ $5,49$ $6,78$ $7,82$ $28,59$ $27,30$ $26,27$ $0,832$ $0,832$ $0,832$ $1,4$ $1,4$ $1,4$ $22,15$ $29,15$ $33,15$ $125,62$ $125,62$ $125,62$ $36,00$ $26,00$ $21,00$ $89,62$ $99,62$ $104,62$ $57,33$ $67,33$ $72,33$	3045609045,7545,7545,7539,652525252532,29432,29432,29432,29414,33614,33614,33614,3364,54,54,54,51,421,421,421,23172124,234,25,496,787,8211,0428,5927,3026,2716,940,8320,8320,8320,8321,41,41,41,422,1529,1533,1543,4125,62125,62125,62125,6236,0026,0021,0012,0089,6299,62104,62113,6257,3367,3372,3381,33	30 $45$ $60$ $90$ $120$ $45,75$ $45,75$ $45,75$ $39,65$ $47,275$ $25$ $25$ $25$ $25$ $25$ $32,294$ $32,294$ $32,294$ $32,294$ $32,294$ $14,336$ $14,336$ $14,336$ $14,336$ $14,336$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $1,42$ $1,42$ $1,42$ $1,23$ $1,46$ $17$ $21$ $24,2$ $34,2$ $35$ $5,49$ $6,78$ $7,82$ $11,04$ $11,30$ $28,59$ $27,30$ $26,27$ $16,94$ $24,30$ $0,832$ $0,832$ $0,832$ $0,832$ $0,832$ $1,4$ $1,4$ $1,4$ $1,4$ $1,4$ $22,15$ $29,15$ $33,15$ $43,4$ $39,4$ $125,62$ $125,62$ $125,62$ $125,62$ $125,62$ $36,00$ $26,00$ $21,00$ $12,00$ $14,00$ $89,62$ $99,62$ $104,62$ $113,62$ $111,62$ $57,33$ $67,33$ $72,33$ $81,33$ $79,33$	30 $45$ $60$ $90$ $120$ $135$ $45,75$ $45,75$ $45,75$ $39,65$ $47,275$ $50,325$ $25$ $25$ $25$ $25$ $25$ $25$ $32,294$ $32,294$ $32,294$ $32,294$ $32,294$ $32,294$ $14,336$ $14,336$ $14,336$ $14,336$ $14,336$ $14,336$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $1,42$ $1,42$ $1,42$ $1,23$ $1,46$ $1,56$ $17$ $21$ $24,2$ $34,2$ $35$ $33,5$ $5,49$ $6,78$ $7,82$ $11,04$ $11,30$ $10,82$ $28,59$ $27,30$ $26,27$ $16,94$ $24,30$ $27,84$ $0,832$ $0,832$ $0,832$ $0,832$ $0,832$ $0,832$ $1,4$ $1,4$ $1,4$ $1,4$ $1,4$ $22,15$ $29,15$ $33,15$ $43,4$ $39,4$ $38,4$ $125,62$ $125,62$ $125,62$ $125,62$ $125,62$ $125,62$ $36,00$ $26,00$ $21,00$ $12,00$ $14,00$ $15,00$ $89,62$ $99,62$ $104,62$ $113,62$ $111,62$ $110,62$ $57,33$ $67,33$ $72,33$ $81,33$ $79,33$ $78,33$

Tabela 4: Resultados de Cálculo de Fillet para o A380-800 pelo Método do Arco e da Tangente a partir de Raios de Curva determinados pela FAA

Mudança de direção da pista (°)	30	45	60	90	120	135	150
Raio da Curva ICAO (m)	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8
Largura da pista de táxi (m)	25	25	25	25	25	25	25
Comprimento datum (m)	32,294	32,294	32,294	32,294	32,294	32,294	32,294
T (m)	14,336	14,336	14,336	14,336	14,336	14,336	14,336
Margem de segurança (m)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
R/d	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45
Desvio máximo (%)	16,6	20,5	24,2	31	35	36,2	37
Desvio máximo (m)	5,36	6,62	7,82	10,01	11,30	11,69	11,95
Raio do fillet (m)	29,77	28,51	27,32	25,12	23,83	23,44	23,18
Desvio máximo sem fillet (m)	0,832	0,832	0,832	0,832	0,832	0,832	0,832
Ângulo de esterçamento (°)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Ângulo de esterçamento ao final da curva (°)	21,9	28,4	32,4	37,9	41,9	42,15	43,9
L1 (m)	125,62	125,62	125,62	125,62	125,62	125,62	125,62
L2 (m)	36,00	26,00	22,00	16,00	13,00	12,00	10,00
L3 (m)	89,62	99,62	103,62	109,62	112,62	113,62	115,62
l (m)	57,33	67,33	71,33	77,33	80,33	81,33	83,33

Tabela 5: Resultados de Cálculo de Fillet para o A380-800 pelo Método do Arco e da Tangente a partir de Raios de Curva determinados pela ICAO

Tabela 6: Resultados de Cálculo de Fillet para o A380-800 pelo Método do Arco e da Tangente a partir deRaios de Curva determinados pelo Manual da Aeronave

Mudança de direção da pista (°)	30	45	60	90	120	135	150
Raio da Curva Manual (m)	51	51	51	51	51	51	51
Largura da pista de táxi (m)	25	25	25	25	25	25	25
Comprimento datum (m)	32,294	32,294	32,294	32,294	32,294	32,294	32,294
T (m)	14,336	14,336	14,336	14,336	14,336	14,336	14,336
Margem de segurança (m)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
R/d	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58
Desvio máximo (%)	16,5	19,5	23	29	32,2	33,2	35,5
Desvio máximo (m)	5,33	6,30	7,43	9,37	10,40	10,72	11,46
Raio do fillet (m)	34,00	33,03	31,90	29,97	28,93	28,61	27,87
Desvio máximo sem fillet (m)	0,832	0,832	0,832	0,832	0,832	0,832	0,832
Ângulo de esterçamento (°)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Ângulo de esterçamento ao final da curva (°)	20,9	27,15	30,65	35,5	37,4	37,8	38,4
L1 (m)	125,62	125,62	125,62	125,62	125,62	125,62	125,62
L2 (m)	38,00	28,00	24,00	18	16	16,5	15
L3 (m)	87,62	97,62	101,62	107,62	109,62	109,12	110,62
l (m)	55,33	65,33	69,33	75,33	77,33	76,83	78,33

Mudança de direção da pista (°)	30	45	60	90	120	135	150
Raio da Curva FAA (m)	45,75	45,75	45,75	39,65	47,275	50,325	51,85
Largura da pista de táxi (m)	23	23	23	23	23	23	23
Comprimento datum (m)	37,443	37,443	37,443	37,443	37,443	37,443	37,443
T (m)	12,61	12,61	12,61	12,61	12,61	12,61	12,61
Margem de segurança (m)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
R/d	1,22	1,22	1,22	1,06	1,26	1,34	1,38
Desvio máximo (%)	17,25	21,5	25,8	36,5	37,5	38	38
Desvio máximo (m)	6,46	8,05	9,66	13,67	14,04	14,23	14,23
Raio do fillet (m)	28,49	26,89	25,28	15,18	22,43	25,29	26,82
Desvio máximo sem fillet (m)	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695
Ângulo de esterçamento (°)	1	1	1	1	1	1	1
Ângulo de esterçamento ao final	22.5	29.75	34 5	47 5	46 25	43 5	44 5
da curva (°)	22,5	27,15	54,5	-7,5	40,23		,5
L1 (m)	158,01	158,01	158,01	158,01	158,01	158,01	158,01
L2 (m)	40,00	31,00	22,00	8,00	10,00	13,00	12,00
L3 (m)	118,01	127,01	136,01	150,01	148,01	145,01	146,01
l (m)	80,57	89,57	98,57	112,57	110,57	107,57	108,57

Tabela 7: Resultados de Cálculo de Fillet para o A340-600 pelo Método do Arco e da Tangente a partir de Raios de Curva determinados pela FAA

Tabela 8: Resultados de Cálculo de Fillet para o A340-600 pelo Método do Arco e da Tangente a partir de Raios de Curva determinados pela ICAO

Mudança de direção da pista (°)	30	45	60	90	120	135	150
Raio da Curva ICAO (m)	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6
Largura da pista de táxi (m)	23	23	23	23	23	23	23
Comprimento datum (m)	37,443	37,443	37,443	37,443	37,443	37,443	37,443
T (m)	12,61	12,61	12,61	12,61	12,61	12,61	12,61
Margem de segurança (m)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
R/d	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
Desvio máximo (%)	17,25	21,5	25,8	34,3	39,2	41,5	42
Desvio máximo (m)	6,46	8,05	9,66	12,84	14,68	15,54	15,73
Raio do fillet (m)	28,34	26,74	25,13	21,95	20,12	19,26	19,07
Desvio máximo sem fillet (m)	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695
Ângulo de esterçamento (°)	1	1	1	1	1	1	1
Ângulo de esterçamento ao final da curva (°)	22,5	29,75	34,5	42,5	46,75	47,75	50
L1 (m)	158,01	158,01	158,01	158,01	158,01	158,01	158,01
L2 (m)	40,00	31,00	22,00	19,00	10,00	9,00	6,00
L3 (m)	118,01	127,01	136,01	139,01	148,01	149,01	152,01
l (m)	80,57	89,57	98,57	101,57	110,57	111,57	114,57

	-					
30	45	60	90	120	135	150
45	45	45	45	45	45	45
23	23	23	23	23	23	23
37,443	37,443	37,443	37,443	37,443	37,443	37,443
12,61	12,61	12,61	12,61	12,61	12,61	12,61
4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
17,4	21,75	26,2	35	40,2	42,2	43,1
6,52	8,14	9,81	13,11	15,05	15,80	16,14
27,68	26,05	24,38	21,09	19,14	18,39	18,06
0,695	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695
1	1	1	1	1	1	1
22,75	30	35	43	47,6	48,3	50,75
158,01	158,01	158,01	158,01	158,01	158,01	158,01
40,00	31,00	21,00	14	9	7	5
118,01	127,01	137,01	144,01	149,01	151,01	153,01
80,57	89,57	99,57	106,57	111,57	113,57	115,57
	$\begin{array}{r} 30\\ 45\\ 23\\ 37,443\\ 12,61\\ 4,5\\ 1,20\\ 17,4\\ 6,52\\ 27,68\\ 0,695\\ 1\\ 22,75\\ 158,01\\ 40,00\\ 118,01\\ 80,57 \end{array}$	30454545232337,44337,44312,6112,614,54,51,201,2017,421,756,528,1427,6826,050,6950,6951122,7530158,01158,0140,0031,00118,01127,0180,5789,57	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	30 $45$ $60$ $90$ $45$ $45$ $45$ $45$ $23$ $23$ $23$ $23$ $37,443$ $37,443$ $37,443$ $37,443$ $12,61$ $12,61$ $12,61$ $12,61$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $1,20$ $1,20$ $1,20$ $1,20$ $17,4$ $21,75$ $26,2$ $35$ $6,52$ $8,14$ $9,81$ $13,11$ $27,68$ $26,05$ $24,38$ $21,09$ $0,695$ $0,695$ $0,695$ $0,695$ $1$ $1$ $1$ $1$ $22,75$ $30$ $35$ $43$ $158,01$ $158,01$ $158,01$ $158,01$ $40,00$ $31,00$ $21,00$ $14$ $118,01$ $127,01$ $137,01$ $144,01$ $80,57$ $89,57$ $99,57$ $106,57$	30 $45$ $60$ $90$ $120$ $45$ $45$ $45$ $45$ $45$ $23$ $23$ $23$ $23$ $23$ $37,443$ $37,443$ $37,443$ $37,443$ $37,443$ $12,61$ $12,61$ $12,61$ $12,61$ $12,61$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $1,20$ $1,20$ $1,20$ $1,20$ $1,20$ $17,4$ $21,75$ $26,2$ $35$ $40,2$ $6,52$ $8,14$ $9,81$ $13,11$ $15,05$ $27,68$ $26,05$ $24,38$ $21,09$ $19,14$ $0,695$ $0,695$ $0,695$ $0,695$ $0,695$ $1$ $1$ $1$ $1$ $1$ $22,75$ $30$ $35$ $43$ $47,6$ $158,01$ $158,01$ $158,01$ $158,01$ $158,01$ $40,00$ $31,00$ $21,00$ $14$ $9$ $118,01$ $127,01$ $137,01$ $144,01$ $149,01$ $80,57$ $89,57$ $99,57$ $106,57$ $111,57$	30 $45$ $60$ $90$ $120$ $135$ $45$ $45$ $45$ $45$ $45$ $45$ $23$ $23$ $23$ $23$ $23$ $23$ $37,443$ $37,443$ $37,443$ $37,443$ $37,443$ $12,61$ $12,61$ $12,61$ $12,61$ $12,61$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $1,20$ $1,20$ $1,20$ $1,20$ $1,20$ $17,4$ $21,75$ $26,2$ $35$ $40,2$ $6,52$ $8,14$ $9,81$ $13,11$ $15,05$ $15,80$ $27,68$ $26,05$ $24,38$ $21,09$ $19,14$ $18,39$ $0,695$ $0,695$ $0,695$ $0,695$ $0,695$ $0,695$ $1$ $1$ $1$ $1$ $1$ $1$ $22,75$ $30$ $35$ $43$ $47,6$ $48,3$ $158,01$ $158,01$ $158,01$ $158,01$ $158,01$ $158,01$ $40,00$ $31,00$ $21,00$ $14$ $9$ $7$ $118,01$ $127,01$ $137,01$ $144,01$ $149,01$ $151,01$ $80,57$ $89,57$ $99,57$ $106,57$ $111,57$ $113,57$

 Tabela 9: Resultados de Cálculo de Fillet para o A340-600 pelo Método do Arco e da Tangente a partir de Raios de Curva determinados pelo Manual da Aeronave

Tabela 10: Resultados de Cálculo de Fillet para o B777-300 pelo Método do Arco e da Tangente a partir de Raios de Curva determinados pela FAA

Mudança de direção da pista (°)	30	45	60	90	120	135	150
Raio da Curva FAA (m)	45,75	45,75	45,75	39,65	47,275	50,325	51,85
Largura da pista de táxi (m)	23	23	23	23	23	23	23
Comprimento datum (m)	34,85	34,85	34,85	34,85	34,85	34,85	34,85
T (m)	12,878	12,878	12,878	12,878	12,878	12,878	12,878
Margem de segurança (m)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
R/d	1,31	1,31	1,31	1,14	1,36	1,44	1,49
Desvio máximo (%)	17	21,25	25,3	35,75	37	36	36
Desvio máximo (m)	5,92	7,41	8,82	12,46	12,89	12,55	12,55
Raio do fillet (m)	28,89	27,41	25,99	16,25	23,44	26,84	28,37
Desvio máximo sem fillet (m)	0,561	0,561	0,561	0,561	0,561	0,561	0,561
Ângulo de esterçamento (°)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Ângulo de esterçamento ao final da curva (°)	21,9	29,15	33,9	44,65	43,15	40,9	41,15
L1 (m)	150,90	150,90	150,90	150,90	150,90	150,90	150,90
L2 (m)	38,00	26,00	21,00	10,00	12,00	14,00	13,00
L3 (m)	112,90	124,90	129,90	140,90	138,90	136,90	137,90
l (m)	78,05	90,05	95,05	106,05	104,05	102,05	103,05

	•				1.00	10-	1 - 0
Mudança de direção da pista (°)	30	45	60	90	120	135	150
Raio da Curva ICAO (m)	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6
Largura da pista de táxi (m)	23	23	23	23	23	23	23
Comprimento datum (m)	34,85	34,85	34,85	34,85	34,85	34,85	34,85
T (m)	12,878	12,878	12,878	12,878	12,878	12,878	12,878
Margem de segurança (m)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
R/d	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31
Desvio máximo (%)	17	21,25	25,3	35	40,3	42,2	43,2
Desvio máximo (m)	5,92	7,41	8,82	12,20	14,04	14,71	15,06
Raio do fillet (m)	28,74	27,26	25,84	22,46	20,62	19,95	19,61
Desvio máximo sem fillet (m)	0,561	0,561	0,561	0,561	0,561	0,561	0,561
Ângulo de esterçamento (°)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Ângulo de esterçamento ao final da curva (°)	21,9	29,15	33,9	40,9	44,65	45,15	47,9
L1 (m)	150,90	150,90	150,90	150,90	150,90	150,90	150,90
L2 (m)	38,00	26,00	21,00	14,00	9,00	8,00	6,00
L3 (m)	112,90	124,90	129,90	136,90	141,90	142,90	144,90
l (m)	78,05	90,05	95,05	102,05	107,05	108,05	110,05

Tabela 11: Resultados de Cálculo de Fillet para o B777-300 pelo Método do Arco e da Tangente a partir de Raios de Curva determinados pela ICAO

 Tabela 12: Resultados de Cálculo de Fillet para o B777-300 pelo Método do Arco e da Tangente a partir de Raios de Curva determinados pelo Manual da Aeronave

Mudança de direção da pista (°)	30	45	60	90	120	135	150	
Raio da Curva Manual (m)	45	45	45	45	45	45	45	
Largura da pista de táxi (m)	23	23	23	23	23	23	23	
Comprimento datum (m)	34,85	34,85	34,85	34,85	34,85	34,85	34,85	
T (m)	12,878	12,878	12,878	12,878	12,878	12,878	12,878	
Margem de segurança (m)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	
R/d	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	
Desvio máximo (%)	17,2	21,5	25,5	35,3	41	43	44	
Desvio máximo (m)	5,99	7,49	8,89	12,30	14,29	14,99	15,33	
Raio do fillet (m)	28,07	26,57	25,17	21,76	19,77	19,08	18,73	
Desvio máximo sem fillet (m)	0,561	0,561	0,561	0,561	0,561	0,561	0,561	
Ângulo de esterçamento (°)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	
Ângulo de esterçamento ao final da curva (°)	21,9	29,15	33,65	41,4	45,65	46,15	48,4	
L1 (m)	150,90	150,90	150,90	150,90	150,90	150,90	150,90	
L2 (m)	38,00	26,00	21,00	14	9	8	6	
L3 (m)	112,90	124,90	129,90	136,90	141,90	142,90	144,90	
l (m)	78,05	90,05	95,05	102,05	107,05	108,05	110,05	

-	-		-	-		
30	45	60	90	120	135	150
45,75	45,75	45,75	39,65	47,275	50,325	51,85
23	23	23	23	23	23	23
27,945	27,945	27,945	27,945	27,945	27,945	27,945
12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6
4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
1,64	1,64	1,64	1,42	1,69	1,80	1,86
16	19,5	22,5	31,5	30,8	29,2	28,3
4,47	5,45	6,29	8,80	8,61	8,16	7,91
30,48	29,50	28,66	20,05	27,87	31,37	33,14
0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
20,8	26,8	30,05	38,3	35,3	33,8	32,55
110,66	110,66	110,66	110,66	110,66	110,66	110,66
32,00	25,00	21,50	14,00	16,00	17,00	19,00
78,66	85,66	89,16	96,66	94,66	93,66	91,66
50,72	57,72	61,22	68,72	66,72	65,72	63,72
	$\begin{array}{r} 30\\ 45,75\\ 23\\ 27,945\\ 12,6\\ 4,5\\ 1,64\\ 16\\ 4,47\\ 30,48\\ 0,7\\ 1,3\\ 20,8\\ 110,66\\ 32,00\\ 78,66\\ 50,72\\ \end{array}$	$\begin{array}{c cccc} 30 & 45 \\ 45,75 & 45,75 \\ 23 & 23 \\ 27,945 & 27,945 \\ 12,6 & 12,6 \\ 4,5 & 4,5 \\ 1,64 & 1,64 \\ 16 & 19,5 \\ 4,47 & 5,45 \\ 30,48 & 29,50 \\ 0,7 & 0,7 \\ 1,3 & 1,3 \\ 20,8 & 26,8 \\ 110,66 & 110,66 \\ 32,00 & 25,00 \\ 78,66 & 85,66 \\ 50,72 & 57,72 \\ \end{array}$	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	30 $45$ $60$ $90$ $120$ $45,75$ $45,75$ $45,75$ $39,65$ $47,275$ $23$ $23$ $23$ $23$ $23$ $27,945$ $27,945$ $27,945$ $27,945$ $27,945$ $12,6$ $12,6$ $12,6$ $12,6$ $12,6$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $1,64$ $1,64$ $1,64$ $1,42$ $1,69$ $16$ $19,5$ $22,5$ $31,5$ $30,8$ $4,47$ $5,45$ $6,29$ $8,80$ $8,61$ $30,48$ $29,50$ $28,66$ $20,05$ $27,87$ $0,7$ $0,7$ $0,7$ $0,7$ $0,7$ $1,3$ $1,3$ $1,3$ $1,3$ $1,3$ $20,8$ $26,8$ $30,05$ $38,3$ $35,3$ $110,66$ $110,66$ $110,66$ $110,66$ $110,66$ $32,00$ $25,00$ $21,50$ $14,00$ $16,00$ $78,66$ $85,66$ $89,16$ $96,66$ $94,66$ $50,72$ $57,72$ $61,22$ $68,72$ $66,72$	30 $45$ $60$ $90$ $120$ $135$ $45,75$ $45,75$ $45,75$ $39,65$ $47,275$ $50,325$ $23$ $23$ $23$ $23$ $23$ $23$ $23$ $27,945$ $27,945$ $27,945$ $27,945$ $27,945$ $27,945$ $12,6$ $12,6$ $12,6$ $12,6$ $12,6$ $12,6$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $4,5$ $1,64$ $1,64$ $1,42$ $1,69$ $1,80$ $16$ $19,5$ $22,5$ $31,5$ $30,8$ $29,2$ $4,47$ $5,45$ $6,29$ $8,80$ $8,61$ $8,16$ $30,48$ $29,50$ $28,66$ $20,05$ $27,87$ $31,37$ $0,7$ $0,7$ $0,7$ $0,7$ $0,7$ $0,7$ $1,3$ $1,3$ $1,3$ $1,3$ $1,3$ $1,3$ $20,8$ $26,8$ $30,05$ $38,3$ $35,3$ $33,8$ $110,66$ $110,66$ $110,66$ $110,66$ $110,66$ $110,66$ $32,00$ $25,00$ $21,50$ $14,00$ $16,00$ $17,00$ $78,66$ $85,66$ $89,16$ $96,66$ $94,66$ $93,66$ $50,72$ $57,72$ $61,22$ $68,72$ $66,72$ $65,72$

Tabela 13: Resultados de Cálculo de Fillet para o B747-400 pelo Método do Arco e da Tangente a partirde Raios de Curva determinados pela FAA

Tabela 14: Resultados de Cálculo de Fillet para o B747-400 pelo Método do Arco e da Tangente a partir de Raios de Curva determinados pela ICAO

			<b>I</b>				
Mudança de direção da pista (°)	30	45	60	90	120	135	150
Raio da Curva ICAO (m)	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8	46,8
Largura da pista de táxi (m)	23	23	23	23	23	23	23
Comprimento datum (m)	27,945	27,945	27,945	27,945	27,945	27,945	27,945
T (m)	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6
Margem de segurança (m)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
R/d	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67
Desvio máximo (%)	16	19,5	22,5	28	31,2	32	32,3
Desvio máximo (m)	4,47	5,45	6,29	7,82	8,72	8,94	9,03
Raio do fillet (m)	31,53	30,55	29,71	28,18	27,28	27,06	26,97
Desvio máximo sem fillet (m)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Ângulo de esterçamento (°)	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Ângulo de esterçamento ao final da curva (°)	20,8	25,8	29,55	33,8	35,3	36,3	37,3
L1 (m)	110,66	110,66	110,66	110,66	110,66	110,66	110,66
L2 (m)	32,00	26,00	22,00	17,00	16,00	15,50	14,00
L3 (m)	78,66	84,66	88,66	93,66	94,66	95,16	96,66
l (m)	50,72	56,72	60,72	65,72	66,72	67,22	68,72

		1					
Mudança de direção da pista (°)	30	45	60	90	120	135	150
Raio da Curva Manual (m)	51	51	51	51	51	51	51
Largura da pista de táxi (m)	23	23	23	23	23	23	23
Comprimento datum (m)	27,945	27,945	27,945	27,945	27,945	27,945	27,945
T (m)	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6
Margem de segurança (m)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
R/d	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83
Desvio máximo (%)	15,7	18,7	21,2	25,7	28,1	28,4	29
Desvio máximo (m)	4,39	5,23	5,92	7,18	7,85	7,94	8,10
Raio do fillet (m)	35,81	34,97	34,28	33,02	32,35	32,26	32,10
Desvio máximo sem fillet (m)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Ângulo de esterçamento (°)	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Ângulo de esterçamento ao final da curva (°)	20,3	25,3	30,8	31,3	32,8	33,05	33,3
L1 (m)	110,66	110,66	110,66	110,66	110,66	110,66	110,66
L2 (m)	32,00	26,00	21,00	20	18,7	18	17,5
L3 (m)	78,66	84,66	89,66	90,66	91,96	92,66	93,16
1 (m)	50,72	56,72	61,72	62,72	64,02	64,72	65,22

Tabela 15: Resultados de Cálculo de Fillet para o B747-400 pelo Método do Arco e da Tangente a partir de Raios de Curva determinados pelo Manual da Aeronave

# 4.3 Aplicação do Método da FAA

Como mostrado anteriormente, o método de determinação de fillets utilizado pela FAA é baseado num modelo de construção de curva. Os parâmetros (d) e (T) das aeronaves escolhidas as determinam, pelo ábaco da Figura 18, como TDG 06, excetuando-se o A380-800 classificado como TDG 07. Com isso, todos os valores necessários à construção do fillet ficam determinados pelas figuras 23 e 24.

# 4.4 Construção e comparação dos fillet

Os dados obtidos nas seções anteriores assim como o equacionamento disposto, permitem a ilustração do desenho geométrico das curvas e seus fillets para cada uma das aeronaves escolhidas para cada um dos ângulos preconizados pela FAA. Para fins de comparação, as figuras de 47 a 74 mostram a sobreposição das curvas construídas pelo método da FAA e pelo método da ICAO, assim como o deslocamento da aeronave ao realizar a curva. Nas figuras ilustram-se apenas as curvas parcialmente, isto é, apenas da linha de eixo até o bordo da pista.

É perceptível a aproximação do fillet obtido pelo método da ICAO em relação ao deslocamento da aeronave. Nas figuras optou-se por utilizar um afastamento de 4,5 m, mostrando como a faixa de segurança, embora o modelo da FAA preveja afastamento de 5,0 m.



Figura 47: Curva de 30° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave A380-800



Figura 48: Curva de 45° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave A380-800


Figura 49: Curva de 60° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave A380-800



Figura 50: Curva de 90° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave A380-800



Figura 51: Curva de 120° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave A380-800



Figura 52: Curva de 135° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave A380-800



Figura 53: Curva de 150° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave A380-800



Figura 54: Curva de 30° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave A340-600



Figura 55: Curva de  $45^{\circ}$  com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave A340-600



Figura 56: Curva de 60° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave A340-600



Figura 57: Curva de 90° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave A340-600



Figura 58: Curva de 120° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave A340-600



Figura 59: Curva de 135° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave A340-600



Figura 60: Curva de 150° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave A340-600



Figura 61: Curva de 30° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave B777-300



Figura 62: Curva de 45° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave B777-300



Figura 63: Curva de 60° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave B777-300



Figura 64: Curva de 90° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave B777-300



Figura 65: Curva de 120° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave B777-300



Figura 66: Curva de 135° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave B777-300



Figura 67: Curva de 150° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave B777-300



Figura 68: Curva de 30° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave B747-400



Figura 69: Curva de 45° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave B747-400



Figura 70: Curva de 60° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave B747-400



Figura 71: Curva de 90° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave B747-400



Figura 72: Curva de 120° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave B747-400



Figura 73: Curva de 135° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave B747-400



Figura 74: Curva de 150° com fillet conforme previsto pela FAA e pela ICAO e deslocamento para aeronave B747-400

Em quase todos os casos mostrados nas figuras, é notável que os fillets determinados pelo método da FAA são mais conservativos, não somente por estarem associados a um afastamento de 5,0 m, mas também pelo fato de se estenderem por distâncias maiores na construção das tangentes. Para melhor elucidar tal fato, a Tabela 16 apresenta os resultados de área adicional de pavimento calculado em relação ao caso de não existência do fillet. Note-se que os valores de área adicional são crescentes com o ângulo da curva, positivando o fato de que quanto maior o ângulo da curva maior o desvio do trem de pouso principal.

Aeronave	Curva (°)	Área adicional de pavimento devido ao fillet (m²)		Diferença de área adicional de pavimento
		FAA	ICAO	(m <sup>2</sup> )
B777-300	30	562.26	507.19	55.07
B777-300	45	874.11	782.09	92.02
B777-300	60	1256.34	1045.14	211.20
B777-300	90	1879.5	1676.71	202.79
B777-300	120	2364.71	2048.00	316.71
B777-300	135	2750	2150.21	599.79
B777-300	150	2858.51	2312.92	545.59
B747-400	30	562.26	255.12	307.14
B747-400	45	874.11	392.96	481.15
B747-400	60	1256.34	526.14	730.20
B747-400	90	1879.5	863.54	1015.96
B747-400	120	2364.71	1054.46	1310.25
B747-400	135	2750	1107.10	1642.90
B747-400	150	2858.51	1152.57	1705.94
A340-600	30	562.26	559.00	3.26
A340-600	45	874.11	835.32	38.79
A340-600	60	1256.34	1163.08	93.26
A340-600	90	1879.5	1901.63	-22.13
A340-600	120	2364.71	2289.01	75.70
A340-600	135	2750	2477.89	272.11
A340-600	150	2858.51	2658.88	199.63
A380-800	30	644.26	342.56	301.70
A380-800	45	937.37	542.06	395.31
A380-800	60	1280.01	722.37	557.64
A380-800	90	1738.15	1183.92	554.23
A380-800	120	2186.92	1478.95	707.97
A380-800	135	2492.5	1554.54	937.96
A380-800	150	2613.86	1670.89	942.97

Tabela 16: Área adicional de pavimento necessário à criação de fillets

Para melhor entendimento do cálculo de área adicional a ser pavimentada, as figuras de 75 a 77 apresentam curvas projetas sem a adição do fillet e curvas obtidas pelo método do arco e da tangente da ICAO.



Figura 75: Curva de  $45^\circ$  com fillet conforme previsto pela ICAO e desenho de curva sem o fillet para aeronave A380-800



Figura 76: Curva de 90° com fillet conforme previsto pela ICAO e desenho de curva sem o fillet para aeronave A380-800



Figura 77: Curva de 135° com fillet conforme previsto pela ICAO e desenho de curva sem o fillet para aeronave A380-800

## 5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi destacada a importância dos fillets para o design geométrico de aeródromos no que tange ao deslocamento das aeronaves em solo e a manutenção de margens de segurança entre a borda externa do trem de pouso principal e o bordo das pistas de táxi ao longo de todo o trajeto da aeronave.

Uma vez que a determinação do trajeto descrita pelos trens de pouso da aeronave é complexa, foram apresentados os métodos de determinação de fillets preconizados pela ICAO e pela FAA, que utilizam modelos de aproximação.

Dessa forma, foi apresentado também um modelamento matemático teórico para o deslocamento das aeronaves em solo, sendo necessário utilizar no modelo parâmetros da aeronave já necessários à obtenção dos fillets pelos métodos citados.

Por último, foram realizados cálculos dos parâmetros das aeronaves a partir dos dados apresentados nos manuais das aeronaves, e aplicaram-se os métodos de determinação de fillets atuais a fim de compará-los quanto a ser mais ou menos conservativo, sendo o método proposto pela FAA sido observado como mais conservativo, não somente por basear-se em um afastamento maior, mas também por se mostrar pouco flexível quanto aos diversos tipos de aeronaves. Além disso, pode-se observar que o modelamento matemático criado parece encaixar-se aos modelos de fillet descritos.

Como já mencionado, o Manual de Projetos de Aeroportos – ICAO (2° Volume) apresenta o método do arco e da tangente como uma aproximação para o deslocamento do trem de pouso principal da aeronave em movimento. É notável que o modelamento matemático desenvolvimento no presente trabalho acompanha o traçado desenvolvimento pelo método da ICAO para o cálculo de fillets, tal fato revela indícios de que o modelo matemático é compatível com o desenvolvimento de desenho geométrico de fillets para pistas. Dessa forma, uma possível continuação do trabalho seria a adaptação das equações de trajetória de trens de pouso em um traçado de fillet, que poderia ser utilizado para qualquer aeronave sendo adequado quanto à margem de segurança exigida por norma.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AIRBUS. A380 Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning. [S.l.]: [s.n.], 2012.

AIRBUS. **A340-500/-600** Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning. [S.l.]: [s.n.], 2013.

ANAC. Projeto de Aeródromos. [S.l.]: [s.n.], v. RBAC 154, 2009.

BOEING. 777-200/300 Airplane Characteristics for Airport Planning. [S.l.]: [s.n.], 1998.

BOEING. 747-400 Airplane Characteristics fo Aiport Planning. [S.l.]: [s.n.], 2002.

FAA. Advisory Circular 150/5300-13A. [S.l.]: [s.n.], 2012.

ICAO. **Doc 9157 - Aerodrome Design Manual**. Fourth. ed. [S.l.]: [s.n.], v. Part 2 - Taxiways, Aprons and Holding Bays, 2005.

F	OLHA DE REGISTRO	DO DOCUMENTO	
<sup>1.</sup> CLASSIFICAÇÃO/TIPO	<sup>2.</sup> DATA	<sup>3.</sup> REGISTRO N°	<sup>4.</sup> N° DE PÁGINAS
ТС	26 de novembro de 2013	DCTA/ITA/TC-069/2013	104
<sup>5.</sup> TÍTULO E SUBTÍTULO:			
Um Modelo Matemático pa	ra Determinação da Trajetóri	a da Aaronavas am Curva	
<sup>6.</sup> AUTOR(ES):	la Determinação da Trajetori	la de Actollaves elli Cuiva.	
Ramon Nunes de Oliveira			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO	D(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES)	:	
Instituto Tecnológico de Ae	ronautica – ITA		
FALAVKAS-CHAVE SUGERI	DAS FELO AUTOK.		
Infraestrutura Aeroportuaria 9 PALAVRAS-CHAVE RESULT	; Projeto Geométrico; Fillet		
	n (126 22 n (22n 13,10)		
Aeroportos; Pistas (de pou	iso e decolagem); Aeronav	es; Deslocamento; Planeja	mento de aeroportos
Engenharia aeroportuaria; E	ngenharia aeronautica.	V Nacional	Internacional
APRESENTAÇÃO:		A Nacional	Internacional
ITA, São José dos Campos.	Curso de Graduação em Er	genharia Civil-Aeronáutica	. Orientador: Ronaldo
<sup>11.</sup> RESUMO:	blicado elli 2015.		
Neste Trabalho de deslocamento de aeronaves aeródromos. Além do desloc aeronave, a manutenção de r bordo das pistas de táxi. O modelamento de gerar resultados gráficos de de curvas de pistas de táxi. Foram apresentado pela FAA, os quais utilizam Ao final, foram rea 300 e B747-400 e a aplicaçã compará-los quanto a ser ma relação ao modelo de desloc mais conservativo.	Graduação é apresentado um em solo, explicitando a nece camento das aeronaves em so margens de segurança entre a senvolvido foi implementado visualização do comportanto s, também, os métodos de de modelos de aproximação do lizados cálculos dos parâmet ão dos métodos de determina ais ou menos conservativos e camento desenvolvido. O mé	n novo modelo de determina ssidade do uso de fillets no olo, foi analisada, ao longo d a borda externa do trem de p o por meio de rotinas compu o da aeronave relacionado ao eterminação de fillets precor o deslocamento do trem de p pros das aeronaves A380-80 ução de fillets da FAA e da I e visualizá-los quanto a marg todo proposto pela FAA foi	ção da trajetória de design geométrico de lo trajeto da bouso principal e o atacionais de forma a o desenho geométrico hizados pela ICAO e ouso de aeronaves. 0, A340-600, B777- CAO a fim de gem de segurança em observado como
<sup>12.</sup> GRAU DE SIGILO:			
(X) OSTENSIVO	() RESERVADO	() CONFIDENCIAL	() SECRETO

O numero de CDU: 629.73.08