

# ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DO PERFIL VERTICAL DO VENTO NO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA (CLA)

*Suelen Trindade Roballo<sup>1</sup>, Gilberto Fisch<sup>2</sup>*

**RESUMO:** Esse trabalho apresenta uma análise das variações dos parâmetros meteorológicos que caracterizam o perfil logarítmico do vento na região do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), usando um conjunto de dados de 1995-1999. Os valores da velocidade de atrito  $u_*$  apresentaram-se maiores no período de estação seca, mostrando a variação sazonal do vento. A classe de maior frequência ficou no intervalo de (0,4-0,5) m/s na estação seca e no intervalo de (0,3-0,4) m/s na estação chuvosa. Os valores do comprimento da rugosidade aerodinâmica  $z_0$  apresentaram poucas variações com predominância de ocorrências no intervalo de (0,0 – 0,1) m. A análise do coeficiente alfa da Lei de Potência mostra pouca variação vertical e temporal situando, praticamente, no intervalo de 0,2-0,25 (adimensional). Por último foi analisada a estimativa do vento calculada com valores observados nos períodos de 2004-2005, sendo que o perfil estimado apresentou valores superiores aos observado, principalmente no período chuvoso (mês de Março).

**Abstract :** This work presents an analysis of the variations of the meteorological parameters that characterize the logarithms profile of the wind in the region of the Center of Launching of Alcantara (CLA), using a data set of 1995-1999. The values of the friction speed  $u_*$  had been presented great in the period of dry station showing the sazonal variation of the wind. The classroom of great frequency was in the interval of (0,4-0,5) m/s in the dry station and the interval of (0,3-0,4) m/s in the rainy station. The values of the length of the aerodynamic roughness  $z_0$  had presented few variations with predominance of the great occurrences in the interval of (0,0 - 0.1) m. The analysis of the alpha coefficient of the Law of Power, shows little vertical and temporal variation practically pointing out in the 0, 2 - 0, 25 interval (adimensional). Finally the estimate of the wind calculated with values observed in the periods of 2004-2005 was analyzed, being that the computed values presented higher values, specially during the rainy season (March).

**Palavras chave:** Camada Limite Superficial, Torre Anemométrica, Perfil Logarítmico.

## INTRODUÇÃO

O Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) está localizado nas proximidades do município de Alcântara, no litoral norte do Estado do Maranhão, distante 30 km em linha reta da cidade de São Luiz – MA. Do CLA são lançados foguetes e veículos espaciais tais como o Veículo Lançador de Satélites (VLS) e os de Sondagens (SONDA II, SONDA III, VS30 e VS40). Estudar as variações da velocidade do vento nos Centros de Lançamentos de Foguetes é muito importante, pois os foguetes são estruturas com massas inertes que ficam sujeitas a ação do vento (Fisch, 2003). O foguete, imediatamente após o seu lançamento, é fortemente influenciado pela ação dos ventos;

---

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, 1758, Jd. da Granja, 12227-010, São José dos Campos-SP, Telefone: 39456830, E-mail:suelen@cptec.inpe.br

<sup>2</sup> Centro Técnico Aeroespacial (CTA/IAE-ACA) Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias CEP: 12228-901 - São José dos Campos – SP. Telefone: 39474565. E-mail: gfisch@iae.cta.br

portanto as características do vento, nas localizações das plataformas de lançamentos, necessitam ser estudadas previamente e com detalhamento para garantir a segurança do lançamento.

A área de facilidades espaciais para lançamentos de foguetes do CLA apresenta características típicas, com uma região de superfície lisa (oceano) próxima a uma superfície rugosa (continente) (Fisch, 1999). Além disso, nessa descontinuidade ocorre uma relativa variação topográfica (falésias do mar) com grande inclinação e altura em torno de 40 metros fazendo com que o relevo lembre um degrau (Santa Catarina, 1999). As condições da atmosfera e características da superfície influenciam no perfil do vento, pois este, inicialmente em equilíbrio com a superfície, interage com a nova superfície, modificando-se e formando um novo perfil de vento.

A vegetação na região do CLA é característica de região de restinga, com altura média em torno de 2,0 - 3,0 metros (Fisch, 1999). Pode-se assim definir, para perfis de velocidade média do vento sobre superfícies rugosas, um deslocamento do plano zero,  $d$ , resultando na equação do perfil de vento:

$$\bar{U} = \left( \frac{u_*}{k} \right) \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right) \quad (1)$$

em que  $U$  é a velocidade média,  $u_*$  é a velocidade de atrito,  $k$  é a constante de *Von Karman* (= 0,4),  $z$  é a altura característica,  $z_0$  é o comprimento de rugosidade aerodinâmica. Os parâmetros  $u_*$  e  $z_0$  são calculados pelo perfil do vento em condições de estabilidade neutra caracterizando as propriedades turbulentas do local. Fisch (2005) sugere que, devido aos fortes ventos na região do CLA, a atmosfera apresente-se como sendo neutra, independente da hora do dia.

O vento interage com a superfície terrestre e dessas interações forma-se a estrutura da camada limite atmosférica. A região onde existe a variação da velocidade média com a altura é chamada de Camada Limite Superficial (CLS) e pode ser bem descrita pela equação da Lei de Potência:

$$\frac{V(z_1)}{V(z_2)} = \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^\alpha \quad (2)$$

em que  $V(z_1)$  e  $V(z_2)$  são as velocidades do vento nas alturas  $z_1$  e  $z_2$  e  $\alpha$  é a constante usada como expoente na lei de potência. O valor de alfa vai depender do tipo de terreno, sendo que para ventos marítimos os mesmos situam-se em torno de 0,15 (Blesmann, 1973). Um dos objetivos deste trabalho será obter os valores de alfa, relacionando os níveis (2 a 6) em que estão localizados os sensores da Torre Anemométrica (TA). Os valores de velocidade e altura do nível 2 (altura de 10 m) serão mantidos como referência para obtenção dos valores de alfa.

Além do objetivo já mencionado, deseja-se também analisar o perfil de velocidade do vento em condições próximas a neutralidade, com a determinação da velocidade de atrito  $u_*$ , variação de

$z_0$  e estimar o valor de deslocamento do plano zero,  $d$ , para aplicá-lo na equação do perfil logaritmo do vento. Estas análises foram realizadas para diferentes períodos do dia e do ano.

## MATERIAL E MÉTODOS

O município de Alcântara com coordenadas geográficas de 2°19' S de latitude e 44°22' W de longitude e está a 40 metros de altitude em relação ao nível do mar apresenta um clima com regime de precipitação dividido em dois períodos: chuvas intensas durante os meses de janeiro a junho sendo os meses de março e abril os mais chuvosos e período seco de julho a dezembro sendo os meses de setembro e outubro os mais chuvosos (Fisch, 1999).

Os dados utilizados nesse estudo foram coletados pela Torre Anemométrica (TA) localizada no CLA e a 50 metros da costa litorânea. Essa torre possui sensores de velocidade (tipo *propeller*) e de direção do vento (do tipo *aerovane*), da R.M Young (Transverse City, USA). Os sensores estão instalados nos níveis 1 a 6, com alturas de 6,0, 10,0, 16,3, 28,5, 43,0 e 70,0 metros, respectivamente. A coleta dos dados é feita por um sistema automático de aquisição de dados (CR-7) da Campbell Scientific Instrument (Logan, USA) e transmitidos ao SMTCLA (Seção de Meteorologia do CLA) via fibra ótica através de uma programação apropriada e são armazenados em intervalos de 10 minutos para cada nível da Torre.

A primeira parte desse trabalho foi realizada considerando o período de 1995 a 1999. Os dados de perfis de vento foram analisados primeiramente em período integral (24 horas) e depois separados em períodos diurno (6 às 18 hs) e noturno (18 às 6 hs). A segunda parte desse trabalho utilizou os valores de alfas obtidos anteriormente para calcular as velocidades nos níveis 3, 4, 5 e 6 através da (Eq. (2)) para os anos de 2004 a 2005. Logo após foi feita uma comparação dos valores calculados com os alfas e os valores observados (coletados pela TA).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através de um método numérico de bisseção foi estimado o valor de  $d$  (3,3 metros) para aplicar na Eq.(1). As Tabelas 1 e 2 mostram as comparações dos valores obtidos de  $u_*$  e  $z_0$ , respectivamente. Pode-se notar na Tabela 1 que os maiores valores médios de  $u_*$  ocorreram no período de estação seca (julho a dezembro). As medianas apresentaram valores coincidentes entre si e com os valores médios. No período considerado chuvoso (janeiro a junho), a classe de maior frequência apresentou-se no intervalo de (0,3-0,4) m/s e na estação seca no intervalo de (0,4-0,5) m/s.

Em relação à Tabela 2 nota-se que os valores médios de  $z_0$  apresentaram pouca variação mensal, porém os maiores valores ocorreram na estação chuvosa. As medianas apresentaram

menores que os valores médios e a classe de maior frequência ficou concentrada no intervalo de (0,0-0,1) metros para ambos períodos. A Tabela 3 mostra resultados de valores de  $u_*$  e  $z_0$  para dois meses característicos: março (representando o período chuvoso) e setembro (representando o período seco), considerando a divisão dos períodos diurnos e noturnos. Pode-se observar que os valores médios de  $u_*$  diurno e noturno para março ficaram próximos e comparando-os com os resultados do mês de setembro apresentaram-se menores, já os valores de  $z_0$  ficaram próximos. A classe de maior frequência de  $u_*$  foi maior no mês de setembro, (0,4-0,5) m/s, e de  $z_0$  apresentaram-se no intervalo de (0,0-0,1) m para ambos meses. A Tabela 4 mostra a distribuição anual de  $u_*$  e  $z_0$  com os valores de 0,39 m/s e 0,1 m, respectivamente.

A Tabela 5 apresenta os valores dos coeficientes alfas obtidos a partir da Equação da Lei de Potência. A maioria dos valores encontrou-se no intervalo de 0,20 - 0,25 (adimensionalmente) e decresceram com a altura. A Tabela 6 considera a divisão dos períodos para março e setembro mostrando que os valores médios de alfa ficaram em torno de 0,3 para o período diurno e de 0,44 para o período noturno. No mês de março, os valores mais frequentes apresentaram-se maiores do que os valores médios e medianas, estando próximos de 0,70. Em setembro os valores apresentaram-se coincidentes, situando-se em torno de 0,20. Para a distribuição anual de alfa, nota-se que seus valores ficaram em torno de 0,20 o que pode ser visto na Tabela 7.

A Figura 1 mostra a comparação dos valores calculados e observados das velocidades nos níveis 3, 4, 5 e 6 da Torre Anemométrica de dois meses característicos, como descrito.

**Tabela 1:** Distribuição mensal de  $u_*$  para o período de 1995 a 1999.

Valores de $U_*$	MESES											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Valor Médio (Desvio Padrão)	0,4 (0,1)	0,3 (0,1)	0,3 (0,1)	0,3 (0,1)	0,3 (0,1)	0,4 (0,1)	0,4 (0,1)	0,4 (0,1)	0,5 (0,1)	0,4 (0,1)	0,4 (0,1)	0,4 (0,1)
Mediana	0,4	0,36	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4
Moda	0,3-0,4	0,3-0,4	0,3-0,4	0,3-0,4	0,3-0,4	0,3-0,4	0,3-0,4	0,3-0,4	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5
Nº de perfis utilizados	3348	7997	12420	9734	13788	11024	12767	10930	17579	19970	8843	7146

**Tabela 2:** Distribuição mensal de  $z_0$  para o período de 1995 a 1999.

Valores de $Z_0$	MESES											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Valor Médio (Desvio Padrão)	0,1 (0,2)	0,1 (0,2)	0,2 (0,3)	0,2 (0,3)	0,2 (0,3)	0,1 (0,2)	0,1 (0,1)	0,1 (0,1)	0,1 (0,1)	0,1 (0,04)	0,1 (0,1)	0,1 (0,05)
Mediana	0,06	0,05	0,07	0,06	0,07	0,06	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05
Moda	0,0-0,1	0,0-0,1	0,0-0,1	0,0-0,1	0,0-0,1	0,0-0,1	0,0-0,1	0,0-0,1	0,0-0,1	0,0-0,1	0,0-0,1	0,0-0,1

**Tabela 3:** Comparação dos valores de  $u_*$  para Março e Setembro.

Meses característicos		Valor Médio (Desvio Padrão)	Mediana	Moda	Nº de perfis utilizados
Março	u. diurno	0,31(0,13)	0,31	0,3-0,4	5675
	u. noturno	0,32(0,13)	0,33	0,3-0,4	6565
	$Z_0$ diurno	0,2(0,3)	0,07	0,0-0,1	5675
	$Z_0$ noturno	0,2(0,3)	0,06	0,0-0,1	6565
Setembro	u. diurno	0,47(0,11)	0,45	0,4-0,5	8665
	u. noturno	0,46(0,11)	0,45	0,4-0,5	8914
	$Z_0$ diurno	0,1(0,1)	0,1	0-0,1	8665
	$Z_0$ noturno	0,1(0,1)	0,1	0-0,1	8914

**Tabela 4:** Distribuição anual de  $u_*$  e  $z_0$

Distribuição anual	Valor Médio (Desvio Padrão)	Moda	N° de perfis utilizados
<b>u- total</b>	0,39(0,13)	0,4-0,5	135546
<b>u- diurno</b>	0,39(0,13)	0,4-0,5	67744
<b>u- noturno</b>	0,39(0,13)	0,4-0,5	67802
<b>Z<sub>0</sub>total</b>	0,1(0,19)	0,0-0,1	135546
<b>Z<sub>0</sub> diurno</b>	0,1(0,11)	0,0-0,1	67744
<b>Z<sub>0</sub> noturno</b>	0,1(0,19)	0,0-0,1	67802

**Tabela 5:** Análise dos valores de alfa com o nível 2 da TA como referência.

ALFA		MESES											
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Valor Médio (Desvio Padrão)	N(2-3)	0,26 (0,07)	0,43 (0,27)	0,46 (0,27)	0,26 (0,12)	0,26 (0,13)	0,23 (0,1)	0,22 (0,22)	0,21 (0,05)	0,21 (0,05)	0,21 (0,07)	0,23 (0,07)	0,24 (0,04)
	N(2-4)	0,24 (0,05)	0,36 (0,2)	0,39 (0,2)	0,24 (0,11)	0,24 (0,24)	0,21 (0,07)	0,2 (0,2)	0,2 (0,05)	0,20 (0,04)	0,2 (0,05)	0,21 (0,06)	0,22 (0,04)
	N(2-5)	0,22 (0,08)	0,34 (0,19)	0,37 (0,2)	0,24 (0,12)	0,23 (0,12)	0,2 (0,07)	0,2 (0,2)	0,19 (0,05)	0,20 (0,06)	0,19 (0,04)	0,2 (0,05)	0,21 (0,04)
	N(2-6)	0,23 (0,06)	0,33 (0,16)	0,35 (0,16)	0,24 (0,11)	0,23 (0,11)	0,21 (0,07)	0,2 (0,2)	0,2 (0,05)	0,21 (0,04)	0,2 (0,04)	0,22 (0,05)	0,22 (0,04)
Mediana (Moda)	N(2-3)	0,25 (0,24)	0,27 (0,83)	0,33 (0,83)	0,25 (0,2)	0,25 (0,2)	0,2 (0,2)	0,2 (0,2)	0,21 (0,2)	0,22 (0,2)	0,22 (0,2)	0,23 (0,25)	0,25 (0,25)
	N(2-4)	0,23 (0,23)	0,25 (0,66)	0,3 (0,66)	0,23 (0,19)	0,23 (0,21)	0,2 (0,2)	0,2 (0,19)	0,19 (0,19)	0,2 (0,19)	0,2 (0,19)	0,22 (0,22)	0,23 (0,22)
	N(2-5)	0,22 (0,22)	0,23 (0,63)	0,28 (0,63)	0,22 (0,21)	0,22 (0,22)	0,2 (0,2)	0,2 (0,19)	0,19 (0,19)	0,2 (0,19)	0,19 (0,19)	0,2 (0,19)	0,21 (0,21)
	N(2-6)	0,24 (0,24)	0,26 (0,56)	0,29 (0,56)	0,23 (0,23)	0,22 (0,22)	0,22 (0,2)	0,2 (0,19)	0,2 (0,2)	0,21 (0,19)	0,21 (0,2)	0,22 (0,21)	0,23 (0,2)
N°de perfis utilizados		3348	7997	12420	9734	13788	11024	12767	10930	17579	19970	8843	7146

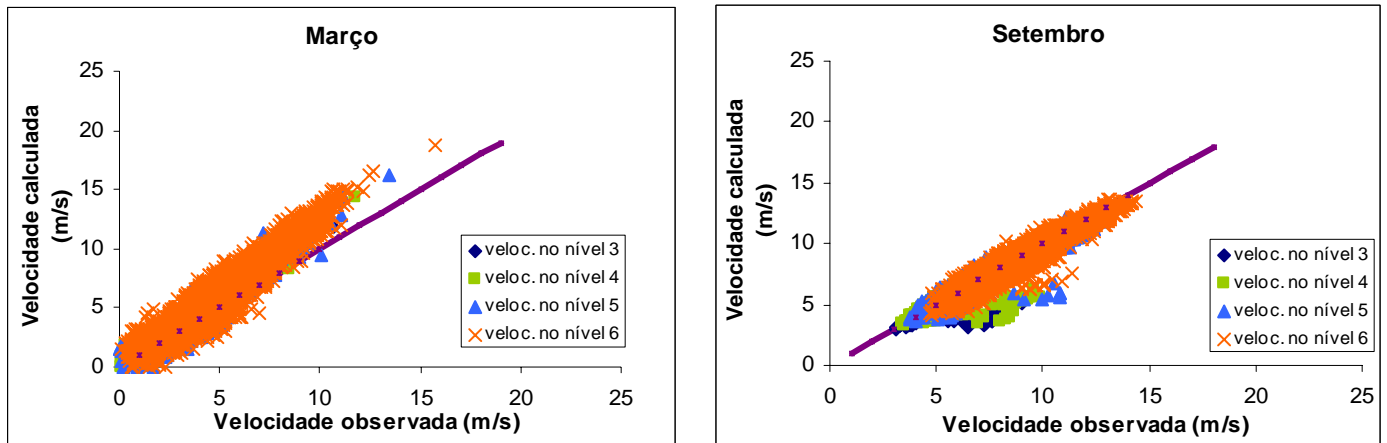
Obs: N(2-3) significa alfa calculado pelos níveis 2 e 3, N (2-4): níveis 2 e 4, N (2-5): níveis 2 e 5 e N (2,6): níveis 2 e 6.

**Tabela 6:** Valores de alfa para março e setembro

Meses (n°de perfis utilizados)	Estatísticas	Níveis 2-3	Níveis 2-4	Níveis 2-5	Níveis 2-6
Março-Diurno (6159)	Valor Médio (Desvio Padrão)	0,36 (0,24)	0,31(0,18)	0,3(0,18)	0,29(0,15)
	Mediana (Moda)	0,27 (0,83)	0,25 (0,66)	0,22 (0,63)	0,24 (0,56)
Março-Noturno (7629)	Valor Médio (Desvio Padrão)	0,53(0,27)	0,44(0,19)	0,42(0,19)	0,4(0,15)
	Mediana (Moda)	0,42 (0,83)	0,39(0,66)	0,39 (0,63)	0,38 (0,56)
Setembro-Diurno (8665)	Valor Médio (Desvio Padrão)	0,21(0,05)	0,19(0,04)	0,19(0,06)	0,2(0,04)
	Mediana (Moda)	0,21 (0,2)	0,19 (0,19)	0,19 (0,19)	0,2 (0,19)
Setembro-Noturno (8914)	Valor Médio (Desvio Padrão)	0,22(0,05)	0,21(0,04)	0,21(0,05)	0,22(0,04)
	Mediana (Moda)	0,22 (0,2)	0,21 (0,2)	0,2 (0,19)	0,22 (0,22)

**Tabela 7:** Comparação da distribuição anual dos valores de alfa.

Valores de Alfas (n° de perfis utilizados)		Níveis 2-3	Níveis 2-4	Níveis 2-5	Níveis 2-6
Período Integral (135546)	Valor Médio (Desvio Padrão)	0,24 (0,08)	0,22 (0,07)	0,21 (0,07)	0,22 (0,07)
	Moda	0,20	0,21	0,19	0,2
Período Diurno (67464)	Valor Médio (Desvio Padrão)	0,21 (0,09)	0,2 (0,07)	0,19 (0,08)	0,2 (0,08)
	Moda	0,2	0,19	0,19	0,2
Período Noturno (68604)	Valor Médio (Desvio Padrão)	0,25 (0,1)	0,23 (0,08)	0,23 (0,09)	0,23 (0,09)
	Moda	0,25	0,22	0,21	0,21



**Figura 1:** Comparação entre as velocidades observadas na TA e as calculadas utilizando os coeficientes alfas.

## CONCLUSÕES

Analisando  $u^*$  foi possível observar sua variação sazonal e verificar que os valores não apresentaram diferenças significativas durante o dia e a noite. A invariância do  $z_0$  representa a homogeneidade da vegetação da região e o valor estimado de  $d$  representa também a altura da vegetação, que se apresentou de acordo com a literatura. A validação dos valores de alfa com um conjunto de dados independentes mostrou que o ajuste logarítmico é melhor nos níveis mais baixos e próximos do nível 2, diminuindo a capacidade de representar as observações com a altura. Para o nível 6, os coeficientes de determinação são próximos a 0,9. Para o mês de setembro, os ajustes foram próximos da curva 1:1, comprovando que as velocidades intensas do vento misturam toda a estrutura da CLS não tendo variação da estabilidade atmosférica. Para o mês de março, verificou-se que a velocidade estimada é sempre maior do que a observada (em torno de 10 a 15% superior).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blesmann, J. Simulação da Estrutura do Vento Natural em um Túnel de Vento Aerodinâmico. São José dos Campos – SP. Tese (Doutor em Ciências). Instituto de Aeronáutica e Espaço – ITA, 1993.\*
- Fisch, G. Características do Perfil Vertical do Vento no Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara (CLA). Revista Brasileira de Meteorologia, v. 14, n.1, p. 11-22, 1999.
- Fisch, G. Análise da Turbulência Atmosférica no Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara. Revista Ciência & Natura. III Workshop Brasileiro de Micrometeorologia. p.211-215. Nov. 2003.
- Fisch, G. Análise do Perfil do Vento no Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara. Revista Ciência e Natura. IV Workshop Brasileiro de Micrometeorologia. p.171-175. Dez. 2005.
- Santa Catarina, M. F. Avaliação do escoamento no Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara: Estudo em Túnel de Vento. Relatório Final de Atividades de Iniciação Científica. ITA-Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Março, 1999.