

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA E DA SECAGEM DE UM SECADOR
ROTATÓRIO DA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES**

Autor: Nilson José Fernandes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Uberlândia-MG
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

F363e Fernandes, Nilson José, 1975-
Estudo da fluidodinâmica e da secagem de um secador rotatório da indústria de fertilizantes / Nilson José Fernandes. - 2008.
90 f. : il.

Orientador: Marcos Antonio de Souza Barrozo.
Co-orientador: Carlos Henrique Ataíde.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.

1. Secagem - Teses. I. Barrozo, Marcos Antonio de Souza. II. Ataíde, Carlos Henrique. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.047

Membros da banca examinadora da dissertação de mestrado do Eng. Nilson José Fernandes apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia química da Universidade Federal de Uberlândia, em janeiro de 2008.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo
(Orientador – PPG – EQ/UFU)



Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
(Co-orientador – PPG – EQ/UFU)



Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
(PPG – EQ/UFU)



Dr. Roberto Mattioli Silva
Tecplan Consultoria

SUMÁRIO

Agradecimentos	i
Lista de Figuras	ii
Lista de Tabelas	iv
Nomenclatura	v
Resumo	xi
Abstract	xii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	01
1.1 – Fertilizantes	02
1.2 – Fertilizantes no Brasil	01
1.3 – Secagem de fertilizantes	03
1.4 – Objetivo do trabalho	04
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	06
2.1 – Secadores rotatórios	06
2.1.1 – Secadores rotatórios diretos com cascadeamento	07
2.2 – Suspensores	08
2.3 – Carga dos suspensores	08
2.4 – Comprimento e tempo de queda das partículas dos suspensores	17
2.5 – Transporte das partículas	19
2.6 – Tempo de residência das partículas	20
2.7 – Transferência de calor em secadores rotatórios diretos	26
2.8 – Umidade de equilíbrio	30
2.9 – Cinética de secagem	32
2.10 – Modelagem de secagem ARRUDA (2008)	34
2.11 – Metodologia de projeto de secadores	36
2.11.1 – METODOLOGIA I	36
2.11.2 – METODOLOGIA II	39
CAPÍTULO 3 – MATÉRIAS E MÉTODOS	44
3.1– Materiais	44
3.2 – Unidade experimental	45

3.2.1 – Informações construtivas do secador	47
3.3 – Métodos	49
3.3.1 – Caracterização do fertilizante granulado	49
3.3.1.1 – Temperaturas de entrada e saída do GTSP (T_{so} e T_{sf})	49
3.3.1.2 – Umidades de entrada e saída do GTSP (M_o e M_f)	49
3.3.1.3 – Determinação da distribuição granulométrica do GTSP	49
3.3.2 – Caracterização dos gases de secagem	50
3.3.2.1 – Temperaturas bulbo seco de entrada e saída dos gases (T_{fo} e T_{ff})	50
3.3.2.2 – Temperaturas de bulbo úmido dos gases	50
3.3.2.3 – Determinação da umidade dos gases (X_o e X_f)	50
3.3.3 – Caracterização do Combustível de secagem	50
3.3.3.1 – Densidade aparente dos cavacos de madeira (ρ_c)	50
3.3.3.2 – Umidade total dos cavacos de madeira.....	50
3.3.4 – Medições em geral.....	51
3.3.4.1 – Rotação do secador (N_R).....	51
3.3.4.2 – Perfil de temperaturas.....	51
3.3.4.3 – Vazões de GTSP no secador (W).....	51
3.3.4.4 – Vazões dos gases de secagem (G).....	52
3.3.4.5 – Vazões de cavacos de madeira consumidos.....	52
3.3.4.6 – Tempo de residência do GTSP no secador.....	52
3.3.4.7 – Fluidodinâmica (coeficiente de fricção do GTSP; distribuição de carga nos suspensores; comprimento, ângulo e tempo médio de queda das partículas).....	53
3.3.5 – Balanços de massas e energia.....	54
3.3.6 – Análise de metodologias de modelagem e projeto.....	55
3.3.6.1 – Metodologia ARRUDA (2008).....	55
3.3.6.2 – Metodologia I (VAN'T LAND, 1991).....	56
3.3.6.3 – Metodologia II (NONHEBEL E MOSS, 1971).....	56
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1– Condições limitantes de operação do equipamento.....	57
4.2 – Resultados da fluidodinâmica de secagem.....	57
4.2.1 – Coeficiente dinâmico de fricção.....	57
4.2.2 – Comportamento do GTSP nos suspensores (distribuição de carga; comprimento, ângulo e tempo médio de queda das partículas).....	60
4.2.3 – Análise do tempo médio de residência das partículas no equipamento.....	63

4.3 – Resultados dos balanços de massa e energia.....	65
4.4 – Metodologia ARRUDA (2008).....	69
4.5 – Metodologia I (VAN'T LAND, 1991).....	73
4.6 – Metodologia II (NONHEBEL E MOSS, 1971).....	74
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
ANEXOS	84
A.1 – Perfil de temperatura do costado do secador.....	84
A.2 – Determinação do diâmetro de Sauter das partículas de GTSP passante no secador.....	85
A.3 – Aplicação da Metodologia ARRUDA (2008) em Maple 8	86
A.4 – Aplicação da Metodologia I (Excel 2003)	89
A.5 – Aplicação da Metodologia II (Excel 2003)	90

LISTAS DE FIGURAS

	d gua 11 P eração ie n t e . a : d olru çã C re e e R d e F or o d u n o i s e t a n t e r n o e c o i l i o s r r r		
F	P a d o F o n t e B z p y a s e T : e h s r d u W o n i l i c n o g P i o d p (. t . . o q , k 2 0 0 5) . .	11	R
d	C g u a 1 2 n d u n o e d f : t a n t e r n o a i l i o F s o e N i l m o B D n e s (s . o c a ç ã o A s s		
d	H b a c d a a f u ã o e l u o , i 2 0 0 6 s A	2	
d	F d g u a 1 3 r u x o g i a m a e r u n t a u n a d e n d t a c o n e n c o m a p l a p o u ç ã o r e f t a n t e r		i l i
	g a n u a o r l s	4	
d	T g u a 2 1 r p o é e c a . o : e i o t a t o r r s i s	7	
d	g u a 2 2 r ã o t d . n e n r o s a e i i u n d s i e c a o o t p o o t a t o r i e r t o c o m i i		
	c a c a e n e n t o s	7	
C	d g u a 2 3 o n f g u a ç ã e . d r m u n i o d p n o e s e m s u n s e c a s o s o t a t o r i s e t r r i B		
d	d g u a 2 4 r r c a ç ã o d â n g u o i r â m c o d e e p o u i o (θ) i e d o â n g u o θ f o m a o e m t d a p o n t a o		
	u p e n o e z o p a m o s o s o n t a r l h i l		
d	d g u a 2 5 n a n t i a e e . m a t e a i d Q u p e n o v e i l p a s q u a q u s s o e r l r l	11	
d	d g u a 2 6 r q u e m a e u n : u s p e n o e 3 e g e n t s s s	13	
d	D u a 2 7 r f e n t e t p o : e i u p e n s o i s s r s s s	18	
	d g u a 2 8 e r g o e i e e c o a n e m i t o C o p o T i t p o R H K e (1 8 7) B A 2 5 E R		
d	d g u a 2 r q u e m a o e e n e n t o e o u n t e c o m o p e a ç ã o c o n c o e n t e r r	34	
d	d g u a 2 k 0 r a o i p a a a . e r m m a ç a r a e e i a g m s	37	
d	d g u a 2 d 1 r u t a ç ã M a n p d a ç ã o d e t o d i o g a e m p o t o l e i e c a o e r	3	
d	d g u a 2 d 2 r u t a ç ã M a n p d a ç ã o d e t o d i o g a e m p o t o l e i e c a o e r	43	
d	g u a 3 1 e r c a o i o t a t o r n u t a r i i s i l	45	
d	g u a 3 2 d u t a ç ã e q u e m t s c a a o p s f a ç ã o e r e c a g e m t e n e s o n u t o . a e c p a n (s l a x i - r l		
	) . . . . .	47	
d	F d g u a 3 3 o t o n e m a e u n e c a i o o t a t o r i s o d e r n c o m a p a f e t m a n t e r d g a n u a d i	48	l s .
	F g u a 3 4 r o t o d e m a t e : o c o r n e z c o m d s u l a o d i p a s g o i l a s c o t a o l o e c a o s r s		
	o t a t o r r i	48	
d	d g u a 3 5 r u t a ç ã o d r m e l o s o o ç a e e d e m l m a ç a r o â n g u o r â m c o e l e p o i o n i		
	. . . . .	54	
d	C d g u a 4 1 d o u f c a n e r â m c o i e i f c a ç ã o (T i t e t S a n t e r i l i	5	
	d g u a 4 2 e r a ç ã e n t e o â n g u o r â m c o e R e p o z i o (r) e a a ã o e n t e a f o ç a e n t r f u g a e r s i		
v	= μ g a t a c o m (ω) , i p a i a 1 0 7 4 6	5	
d	C d g u a 4 3 r o m p i n e n t o r e q u e a l a l p a t c u a (r) s e m f u n ç ã o e f e n t e p o ç e i s		
	a n g u a e o n p e n d e (θ) s r s s s	60	

C	gua 44	a ga b u p e n d e e m s f u n ç ã o s a p o ç ã o a n g u a o s i r e n o (0) s s s 61	.....	61
d d F	gua 45	r a ç ã o p e r t a : e r c a g d e t i a n r u p e n d i e m f u n ç ã o s a p o ç ã o a n g u a o s i r e n o (0) s s s	.....	61
F	gua 46	r a ç ã o i e r m d e : a e m q n e a p e l i t e m f u n ç ã o a p o ç ã o a n g u a o s i r e n o (0) s s s	.....	62
d	d	D u d 47	r t u ç ã o d e t e m p o i e i e ê n c a p a a o t a ç ã o e i 3 5 p m r	.....63.....
d	d	D u d 48	r t u ç ã o d e t e m p o i e i e ê n c a p a a o t a ç ã o e i 4 2 p m r	.....63.....
d d H	gua 4	e r d é u n d e o i l ó o ã o o n g o s s o l e c a o (o t a ç ã o s 3 5 p m) r :	70 R.....	
P d	gua 410	r e f d i e t e n d e a t u a i l o r g a r e a o o n g o s o e s c a o (o t a ç ã o s 3 5 p m) r :	71 R.....	
d d H	gua 411	r e f i e u n . a e o i l ó o ã o o n g o s s o l e c a o (o t a ç ã o s 4 2 p m) r :	72 R.....	
P d	gua 412	r e f d i e t e n d e a t u a i l o r g a r e a o o n g o s o e s c a o (o t a ç ã o s 4 2 p m) r :	72 R.....	
R	gua 413	r e f l i o r a . o e o d i c e f s c e l t e s r e a e t i a n r f é d i n c a e r c a o s () ã o o n g o o	1	
N	e ca o (	3 5 p m) r	.....R.....	75.....
R	gua 414	r e f l i o r a . o e o d i c e f s c e l t e s r e a e t i a n r f é d i n c a e r m a s a () ã o o n g o s s o	1	
N	e ca o (	3 5 p m) r	.....R.....	75.....
R	gua 415	r e f l i o r a . o e o d i c e f s c e l t e s r e a e t i a n r f é d i n c a e r c a o s () ã o o n g o o	1	
N	e ca o (	4 2 p m) r	.....R.....	76.....
R	gua 416	r e f l i o r a . o e o d i c e f s c e l t e s r e a e t i a n r f é d i n c a e r m a s a () ã o o n g o s s o	1	
N	e ca o (	4 2 p m) r	.....R.....	76.....

LISTA DE TABELAS

d	a e a 21	a o e para r. pa arl fse nê ur pndie ' s r s s s .	17
d d	da e a 2b2	quaiçõe pa a um are esequ u B(r Zil, li 5) BA 99 ...RRO3D	...
d	a e a 23	quaiçõe le d cage m e n s e n s p z e n a r u t a a i p a a g a o i l r s s	33
d d	P a e a 31G	T o p e a r o : i s	44
d d	P da e a 32	v o p e a r o : c a a c o i e m e a r i	44
b C	d a e a 33	o n q u e l a m e n t a i z a n t a e r a a ç a o o t e t l i s s s	45
d	d a e a 41	nguo l nã m co el s A o i o i n G a l o P e t S a n t e r e n h i f u n ç a o a p o ç a o	58
d T	da e a 42	e m p o e l e . ê d h c a p s t o s p o e q i a ç õ e r e n c o n t a a m a s t e a t u a r s r l i	64
	a e a 43d	e u t a o l o p e a c o s a l r p a s a c o R e x i r n e n t a i o m 3 5 p m l r	66
	a e a 44d	e u t a o l o p e a c o s a l r p a s a c o R e x i r n e n t a i o m 4 2 p m l r	66
b d	d e a 45	a a n ç o e l m a : a o l t o B a n t s s o t e è s s s	67
d	b a l e d a 46a)	a a n ç o e e r e g a d d t r o B u a n t e o t e è c o m o e c a o s e s m 3 5 r p m r	67
d	b a l e d a 46)	a a n ç o e e r e g a d d t r o B u a n t e o t e è c o m o e c a o s e s m 4 2 r p m r	68
b C	d a e a 47	o e f c e n t e g o a b i d a n s f e n d i s e r e n e s g a (i r) o t o é p e t o p a s o r i s	68
d	e t e d x p e z n e n t a v r u t	a n o e o d a o i l i a t e m p e a t u d c o m a r m t u a e a f a o i s r	68
d d	d a e a 48	e u t a d a : h o s a g e n e l R 1 (2 0 0 8) p a a t a ç a o r A R R c a o e m 3 5 s	70
d d	d a e a 4	e u t a d a : h o s a g e n e l R 1 (2 0 0 8) p a a t a ç a o r A R R c a o e m 4 2 s	71
d d	d e a 410	e u t a d M a a p o s ç a o a s e t o d i r g a c o m o l a ç a o e 3 5 p m r	73
d d	d e a 411	e u t a d M a a p o s ç a o a s e t o d i r g a c o m o l a ç a o e 4 2 p m r	73

Nomenclatura

d	d d	número de acordo à declinação 26, s	. 9 . E
d	P d	bandeira equatorial nominal isométrica	isométrica
d d d		bandeira equatorial	
d		bandeira equatorial 20	. 9 . E
d		bandeira equatorial (figura 26), m	i A. O
d		bandeira equatorial (figura 26), m	i AB. .
d		bandeira equatorial (figura 26), m	i B . .
d	d	bandeira equatorial, gausiana	
d	d	bandeira equatorial 277 l	. . E
d	P d	bandeira equatorial em duas dimensões isométricas	isométricas
		bandeira equatorial	
		bandeira equatorial 2 lli, m ²	. E
d	- d	bandeira equatorial a parte, m ¹ s	l s .
d		bandeira equatorial, m ²	s .
d	d	bandeira equatorial 277 l	. . E
d	d	bandeira equatorial (figura 26), m	i A. O
d	d	bandeira equatorial (figura 26), m	i AB. .
d	d	bandeira equatorial (figura 26), m	i B . .
d		bandeira equatorial - i . B	
d	d	bandeira equatorial 277 l	. E
		bandeira equatorial, s/ g ^o r	k k .
d		bandeira equatorial, s/ g ^o r	k k .
d		bandeira equatorial, s/ g ^o r	k k .
d	d	bandeira equatorial, s/ g ^o r	k k .
d		bandeira equatorial, s/ g ^o r	k k .
d d		bandeira equatorial m ²	i s s.
d	d	bandeira equatorial 277 l	. E
d	v	bandeira equatorial, m	l .
d		bandeira equatorial, m	l .
d	d	bandeira equatorial, m	l .
d d	v	bandeira equatorial, m ²	i s s.

d d d v d âme to de t o d e ca o, eif d os como a tãnciente o eintro b e m o r ili
 d e a pontã o u p e no, m s r s s .
 d ; d coefce nte de a abe, i irru fato e sncrme nto o tam chi r .
 d d fação e ma e a emque a - il .
 d d paâne to e acõnar o a ca gal oi e ca o, q ua çã o 2 53 - . . E
 d taxa edma a e ma e a esoma fa e a e i d sa, g / r s k s.
 d F núme o e o n e, - r r i .
 d d F núme o e o r u e, - r .
 d taxa e ma a e ma e a esoma fa e e i n a, g / s s k s.
 d d d v a e e a çã o a r g a d e, r m / ² i s .
 d d d v z d d ã o o i n e t c a e a r ú n h o m i a a o e i c a o, (m ³ /) r s s
 d taxa má ca e a e o, s g i s k s.
 d d coefce nte e tan f e i m e a e r c a d s p o c o i r e çã o / m ² s .
 d v v a á e a r q u a çã o 2 1 0 8 . . E
 d d pa â n e t o r e f n r o p e a q u a çã o 2 2 h ³ / m . 9 E.
 d d d da ga e ó r o n o u p e r s o l i e s f n a p e o p o j t o i g l k .
 d = v a o e p r a 0 1 0, r g k .
 d d d d ca ga e ó r o e p e j a s d i s p e s n o e, g s r s s s k .
 d d coefce nte p e c u a e i t a n t e e i m c l a e r c a k, s / m ² i r l s .
 d d ca ga e ó r o n o e c a o s, l i g s r s k .
 d d d d ca ga t o t a r e ó o n o e t a o s l i f n a p e o p o j t o i g l k .
 d e f n z o c o m o a a ã o i r, - .
 d d ca ga e ó r o m a f a e a e s a l a, s g r s k .
 d d ca ga e ó r o m a f a e e s n h i g s s k .
 d d d pa â n e t o q u e e r p e n e a g o n e t a o u r p e n o q u a çã o 2 6 8 s m . . E
 d pa â n e t o r a q u a çã o 2 5 0 - . . E
 d pa â n e t o r a q u a çã o 2 4 0 - . . E
 d d coefce nte de d a n f e i m e a e r m a a p o u n a e r e s c o m p n e n t o r g / m i k s .
 d pa â n e t o r a q u a çã o 2 7 8 - . . E
 d d d d pa â n e t o r e p o p d c o m a n e e p e d i e n t e l i o p o j t o o r u p e n o e e s r s s s s
 e c a o q u a çã o 2 2 - . 9 . E
 d d d d c o n d i t i e e c a g e n s n e n ã o e p e n e i a e q u a çã o .
 d d d d f a t o e c o e r çã o e r f n o p e a e q u a çã o 2 1 0 8 1 . .
 d d d d c o n t a n t e e f n a p e a e q u a çã o 2 6 2 1 . .

d d pa âne to é acorâio ao fatod ad pa t cua ca em o n jeno e fene sr i
 d pod çõe , com fene smpo eiq ue as quaçãõ 283 . . E
 d d pa âne to refnro p a quaçãõ 281 l . . E
 d d pa âne to refnro p a quaçãõ 2 0 l .9 . E
 d pa âne to e acornar o a quaçõõ 2112e 2113 s . E .
 d d pa âne to refnro p a quaçãõ 283 l . . E
 pa âne to a quaçãõ 2 5 .9 . E
 d d coe fce nte e tan fê ê mca erma a, mo /m² ss l s.
 d d d d pofun a ad a a or uipeno (idmpsrne nts ro 3 e gnie nt)º, m s .
 d d comp ne nto ro 2 e gnie ntº o u pno, m s s s .
 d d comp ne nto ro 3 e gnie ntº o u pno, m s s s .
 d d comp ne nto ro e ca oij m r s .
 d con tane a quaçãõ 250 ²/m . s E
 con tane quaçãõ 253 /m . s E
 z d a ãoe nte a ca gne ope ração or uipeno () e a sa ga os t mata é or i s
 po çto ,r- .
 d z a ãoe nte ca ga to u ipeno e ca gar o pte to para θ 0ºr .
 d í ma a e uma ún ca sa t cua, g i l k .
 d d b um a e o mat a em ne e ca, ig/ g s s k k .
 d d b í um a e e equ õ, g/ g il i k k .
 d d d b um a e fma o ói o, ãe e ca s lg/ g s s k k .
 d d d b um a e nca o õ o j i a i e ca s lg/ g s s k k .
 d d d a ne nora e uni a esi l i .
 d pa âne to ra quaçãõ 2 0 .9 . E
 d í d núme o e pa t cua em que a no l u pno e,- s s s s s .
 d ví dúme o e f t e pa t cua em que a o l u pno e,- s s s s s .
 d núme o e u pno e,- s s s s s .
 d d — í dúme o né ore pa t cua em que a no das ca t a me nto,- s .
 d d núme o e c cro e ca ca ta il s s .
 d pa âne to ra quaçãõ 2 5 .9 . E
 d d d v d b d e od a e e o ta ção io tam o o e ca ro, pm r s .
 b pe ão tota a o utas a l s l .
 d d po çta g me ca da (o dme e mat a po ro un e re id ca o), l r s %.
 d d d d í po d a e ro fu xo e sa pa t cua lem que a- l s .
 d d P núme o e am t- r .

d taxa e tan fê mca erca o sJnte gr e ró l o, / s s li s.
 d a o o erca o, m i r s .
 d pa âne to ra q ração 2 1, m²/ .9 H.
 d a o e r to p a p i n h a s o i u p e h o e c o m e s t o s o t a m o g a t ó n, m r i i .
 d y d núme o e erro , - l s . R
 taxa e e c a g e m ⁻¹ s s .
 d área a d rã o t a n e d a s o n p e n s o c h i p a u p e o s ó o, m² l s s l i s .
 í d d área a p a t c u a e m q u e a o l u p e n o e, m² s s s s s .
 t e m p o, s .
 d d d t e m p o e u a ç ã o e n u m c c o e e c a g e m i l s s .
 d d d d í t e m p o e q u e a a p a t c u a i o u p e n o d s s s s s s s .
 d d d t e m p o e q u e a m á x m o a p a t c u a i o u p e n o d s s s s s s s .
 d d d d t e m p o e q u e a n é o a p a t c u a i o u p e n o d s s s s s s s .
 b t e m p e a t u a K r o u t a, s l .
 d v ⁻ o a o n c a r a t e m p e a t u a j l r r .
 b t e m p e a t u a a k n e n e, i
 d d d t e m p e a t u a o r f u r o e K c a g e m l i s s .
 b d t e m p e a t u a n r c a r o e a a k o i r e l e, s s
 b d t e m p e a t u a f m a o r e a a k o i r e l e, s s .
 d d t e m p e a t u a o r a r e K c a g e m s s .
 d d t e m p e a t u a K r ó r o, s l i .
 d d t e m p e a t u a n r c a r o K ó o j i i l s s l i s .
 d d t e m p e a t u a f m a o K ó o, i l s s l i s .
 d í n é a o g a t m a e t e m p e a t u a, r o u f .
 d d d v d e o c a d e e d o a l e m t o o a s a á e a r e r o e c a o, m / r s s .
 b d d c o e f c e n t e g o a e t i a n f ê m c d l e r c a o s a e a i r n o c o m p o s e n t o r o e c a o j r s
 W K / m ° .
 b d d c o e f c e n t e g o a e t i a n f ê m c a l e r c a o s a e a i r m á e l a e f s r a e c o n t a t o i
 d e n t e W g á G o ó o, / m² s l i .
 b d d c o e f c e n t e g o a e t i a n f ê m c a l e r c a o s p o G i r e c r a d / m³ .
 b d d d c o e f c e n t e g o a e p i a C e r e l g a, / m³ i k s .
 d v u m a e e a t a r i l i % .
 d d d v d e o c a e o f u x o l e i g á, m / l s s .
 d d d d ⁻ d d e o c a i e n e a e l q u e a a p a t c u a, m / s l s s .

d d d v í é a e o c a e a p a t d u a i m / l s .
 d d v v e o c á e e a t a e n t e g á e l p a i t c u a , m / s l s .
 d d v o u n e o e c a o , l m ³ r s .
 d d d v í é a d e d c d a e a p a d d u a i m r f a e a e a a l e r o s f o ç a e a r a i e , m / r s s .
 d d d v d e o c a e a f a e t n i a , m / s s s .
 t a x a e m a t e a e c o r g / i l s k s .
 d v d z v a ã o e á g u a e a p o a a , g / r k s .
 d v z d a ã o e á g u a p e e n t e m o ó o n s c a m e n t e , l i g / i i i l k s .
 d v z d a ã o e á g u a p e e n t e m o ó o n s f m a , g / l i i l k s .
 d d d c a o p o n t o s p i s a a c o o r d m a a b c m e n t o n o p a m o e n t a o t a m o , m l r
 d d u m a e o g a e , i g / g s s s k k .
 d d u m a e n c a o g á , g á g i l s k k .
 d d u m a e f m a o g á , i g / g i l s k k .
 d d t a n c a e m c o o c i s m a a i e t a n g u a r , m r l .
 d a c a o p o n t o n o p n e o e g n e m t o (i g u a s 2 6) , m i . .
 d d a c a o p o n t o n o e g n e m t o (g u a s 2 6) , m i . .
 d a c a o p o n t o n o t e s e o e g n e m t o (g u a s 2 6) , m i . .
 d a E a o p o n t o (i s g u a 2 6) , m i A . .
 d a E a o p o n t o (i s g u a 2 6) , m i B . .
 d C E a o p o n t o (i s g u a 2 6) , m i . .
 d d d o e m a a r a p o n t a o u p e n o , m r s s s .
 d d d o C e m a a r o p o n t o p a a a c o o r d m a a b c m e n t o n o p a m o e n t a o t a m o , m l r
 d d t a n c a e m c o o c i s m a a i e t a n g u a r , m r l .
 d d o e m a a r o p o n t o n o p n e F o e g n e m t o i (i g u a 2 6) , m i A . O
 d d d o e m a a r o p o n t o n o e g u n F o e g n e m t o (g u a 2 6) , m i A B . .
 d d o e m a a r o p o n t o n o t e C e F o e g n e m t o (i g u a 2 6) , m i B . .
 d d o e m a a r o p o n t o (g u a 2 6) , m i A . .
 d d o e m a a r o p o n t o (g u a 2 6) , m i B . .
 d d o C e m a a r o p o n t o (g u a 2 6) , m i . .
 d d d c o m p n e n t o r e q u e a i a p a t c u a a r é o p ó x m o l a s c o , m i i l .
 d d c o m p n e n t o r e q u e a a i p a t c u a r o s p e n o d s m s r s s s s .
 d d d c o m p n e n t o n e o e q u e a a p a i t c u a r o s p e n o d s m s r s s s s .
 d d t a n c a e m c o o c i s m a a i e t a n g u a r , r l

RESUMO

de n o r a n e n d, i m o s i a g m e O m u a ç ã b e e c s i o e l o t a t ó r s o r c o n r t s t u e m e m i s u m s i
g a n e e r a f o d v e c a g e m e n i o e s t a n t e A e m c a l d e c a o s e m a i a e p o l e o r f i s s o r ã m s s o s l i i
a m a d f e n t e s f o r m i s d i m a o s p a t e s o p r o j t o A e e c a o e é f e t a s p o e m p s m o j c o m i s
a e " m e x p e d c a e e n g e n e o b e r a d e - u p " b e s p o s t l p o r o j t o i o s . t a a o i f o O l l
d a m a a o e q u a c o n d i c i o n t s , m o i a g e n e s p o p o t a d r e s p o j t o s e s e c a g e m e n s o n t a o r a r
e a t u d p a r a e l i o e o z a t o d o d u t r a n o - e i p s a b i l i d a m a s e a o s e x p e l i e n t a r o s t o i i s
c o m a d e c a g z m e f e t s a n t e d e a n u a s i r (s) e m u m e c a o o t a t ó r o r c o n c o e n t e i r r
d v d n u t a c o n d i c i o n s (i 3 l m e â n e t b d x d 3 0 m G c o m p n e n t o) r o m o i a o o p e a c o s a r s
v v c o e t a o (d a á e l e p s o e o) e i o e u t a s s r s s l

ABSTRACT

T d d e n e n o n g h t e i m o e y i d g i a n h e m u l a t d n o f h e s o t a l i r e r d o m t t u e a g s i s
T c a d e n g e v e h n l i n o d e l y m a i a n i e d t t a n s s , a n h f u r s a m e p d c i e o f t i e s m o t s s s h
G y f e e n t f o m d e a t p a t o f t a r e p o r t c h a d e b o n d a r c o s n g t o e m p c m i a m a e i o i n i s
d t e e x p e n e o f a n g r e y i a n o n t e i c a s e - u p o f l p o s t l e r e p u p o e o s r t h p e e o f h i s i
w o z a d t o a d a e k t e s q u a t o n l , t e h o y e a n s t d h p o j e c t s p o p h a n o n g f o n l s n t e i
y d y e a t u e a r o u t y k i t a r e r , u r d h g f o b t s a h o y d e x p h i s e n t a s i a a o t a r e l n g i r
g a o t a p r e f i t s e v r l r n a i b o y e d y t o m a i n u l t a c o i c u r e i n t o s t r i l r e (r 3 m r n r a n e t e x i r i
d 3 0 m n e n g t d H a n g l o b e c h . t e v i e a t l o n d b a l a (d a e d f t e p o c i) s m o h t a r e s e i
y e u t , t c a e s o l u t a n a i s a i y o d t e p o j e c t s p o p h o f t e o t a s k e r a n r o f t e n g r h
d v m o e e a u a e a c c o s n g l o r o t e l p e c i o f w o h o f i t e s U a n e k n D h s , k 2 0 0 8 a n A
d T S d , d 2 0 0 4 d e e t a o R e i n t e d i s t e l s p e i c t o i r p a h n e t r o f e r e n c e r t s e , t e s i i
d c o e f f i c i e n t o f e a t t a n i f i a n h t e f s r m a m l e s n o i m a t o n r i n s e p d e n i e o f t h e f a c t s a t h
e x p e n e n t a r t d t v e i e a c o m p s e n a n n l i h t a i e q u r p r i e n t s t i e l e v i e r m t h o n l i i
e g a n g t e r p a d t e i r a l a t o n r d e e q u i p m e n t h e r d o m a e f x e f s i u s t a u n d r a n s i l i
b o t e v p a n e r e r a h y a r d a r e t r a d g u a y e e l s e h q u d t v a n t e p o l i c i t o f t e n u i t i a h r i
u n t H e n e , t e e q u i p m e n t b o t a t o n y i d a p a n e i e r i s e z o e a n a d o n e t e e l , r h
e x e p t o m a n t e e q u i p m e n t n i n d w c i t e t e t i v e h i a c o m p s e , a o t a t o n i s h o t a t i
e m a e , a c c o n g t o r s e t u c t u a r m a t s o n o f t e l i e q u i p m e n t a h a a t o n o f 2 0 o f i %
b d d e u t w h e v e s o l a n h i h o y n g t o i t e e a o o f t h a f u h i m a c h o f t e m a e a i s n r h
y d d e d n e o o f t e l r e , p i e r e d h r g o o c o n s u e n e w r t e m o e d i w i t h n t e h s a l t u e i o h r l i
d d b e e m d e t o f g t o i u p h t l i t u d n h a n d t e s i a i o o f t h a m a h a i c a c a n g n t i e l n s e i i r h
d p a t o f t e r e (t m e , r a g t a n a i d a l e y a h g e v o f t e f a) , t e m e t l o o d l g h h l L
(2 0 0 1) p e e n t r q u e c o n s e d t n f o m a t s i r o n c i n n g t i e p e c t o i r u n g t e i f i c t o n s i r h
d c o y f f c e n t e e m r e i a x p e n e n t a i r d o f T O 7 4 6 f o S i t e r . n c h e l t o r e t r m e t e i
e d o n c e r t m e , t e s i q u a t o n i t a t l f t e e i t o h t e e x p e d e f n t a r e M u t n v a l s l s I a s
S S H (1 L A) d d y a t o n w o t p a a n e i r e U l m a r e E D s i s i (2 0 0 8) e e A u t r A R R
b t a t v e d o t a y e h f o t e m a r i a a n e a n e y s g d l v e e r q u e c o n t e n t a n i t e s i s e c e a a h r
d q u e p e t r e n t d i t a i o n e a e d s i t e i p o j e c t c o m d h a t o n t r a t e s a w i t i t e l p e m d o i f f a h e i s s
d a e n t o n e m o i e l o r t s m m e t e r g o a c o e f f i c i e n t o f e a t t a n i e , s t r e q u a t o n s t a t h t i h
f o e a d y r p a a n e t s r t h i s m e p e e d n e s h d s I L L (1 4 2) , p o n e n g t e e e r o m o f h
t e t e m p e a t u e o f d t y r g a e n t e h g n s b y o f h e e i v r r v a c a u e h i h t e s a e a h r l
l T e h y a n e r e m o e n g p d p o e l r l l d s (2 0 0 8) p e v e A e r g n A R R e e f s i t o i n i i l
a c c o n g y o r t e e x p e i f e n t a h e d u y i r e l v e s l p a m c a u e s s i m p e c s o n r w e i s i
v d e a o o f t e m a t h U a i d e r h D S i d l s s e i t (2 0 0 8) a n t e s a R R e n t h e x p e s e n t i r h i
d y e v i p c a t o n o f t e e n T i o o n g d h (D I l , L l) p e e n t r o n e n c e n i t e s i s i s
p o j e c t o p p o n g t e a p p o a d s b o f f a e a e n h a n e l s y n t o m e f s e a i r e t o o o g h h I I l
N d (M H S S n L , l d 7 1) B e O d o y e p e u n e t r s O n o w e s g e v f h t e k l n g c u r e d f t e i
T b m a t e a r u , t e i l u t l u s t a h d l s i (d 2 0 0 8) v e e A e r A R R a p p s e . t s i h A
e t o o o g , n o d n l d e n c e i n t e s i p o j e c t s v i e h f o u n r H o v e e , t e . p r o f e o f t h e i l s
d c o e f f c e d t o f m a n i e a t t a n s s b r a c h d w i t s e e u t t r a i t h v e U s t l s e h l d i i
d b (2 0 0 8) p e e n y a n d f s d a o k i t p r k a i e x p i t e h t e n e l h c e i s .
y k y d e w o m g o t a s : r e , i n z t r a , f t r e i s i l r i l i s .

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1- Fertilizantes

A população mundial aumentou de 3 bilhões em 1960 para 6 bilhões em 2000. O mundo acumulou mais pessoas durante estes 40 anos do que durante os primeiros 60 anos do século XX e todo o século XIX.

Este crescimento populacional tem intensificado a demanda por recursos naturais (terra, água, ar, alimentos, etc.). Para o atendimento desta demanda por alimentos, a otimização da produtividade agrícola é de fundamental importância. Daí, tem-se no uso de fertilizantes um dos fatores preponderantes para atender esta demanda. A Figura 1.1 apresenta a relação entre a demanda por alimentos (produção de cereais) e o consumo de fertilizantes do decorrer dos anos.

Fertilizantes são produtos compostos por nutrientes que aumentam o crescimento e a produtividade das plantas, melhorando a natural fertilidade do solo ou então devolvendo os elementos retirados do mesmo pela erosão ou por culturas anteriores.

Recentes projeções indicam que a demanda mundial por fertilizantes irá aumentar em 30% até 2030.

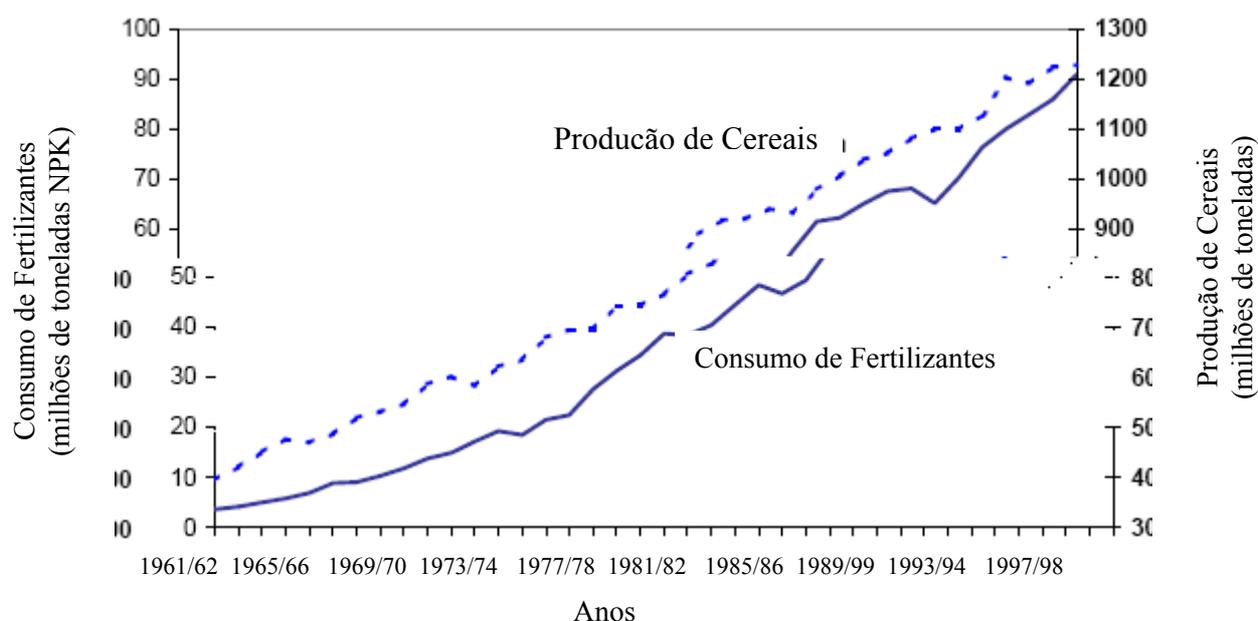


Figura 1.1: Relação entre a Produção de Cereais e o Consumo de Fertilizantes no decorrer dos anos.

Fonte: Phosphate Fertilizer Production Technology Workshop (J. R. Polo, 2005).

1.2- Fertilizantes no Brasil

Até o início da década de 50 a indústria nacional de fertilizantes era constituída por produtores de adubo de origem animal e vegetal, além de misturadores de fertilizantes minerais importados. Somente em 1943 com a exploração do carbonatito apatítico de Jacupiranga e em 1947 com a produção de sulfato de amônio pela Cia. Siderúrgica Nacional como subproduto de processo siderúrgico é que se iniciou a produção nacional de fertilizante.

Com a evolução da agricultura brasileira e a necessidade de substituições de importações nos fins dos anos 40 e início da década de 50 surgem as primeiras fábricas de superfosfatos simples (SSP), obtido a partir do concentrado fosfático nacional e importados (maioria).

Em 1958, inicia-se a produção de amônia no Brasil, através da FAFER, obtida por síntese a partir dos gases residuais da Refinaria de Presidente Bernardes, em Cubatão (SP).

Na década de 70 vários complexos industriais como o da Ultrafertil (atual Fosfertil), Copebrás e Quimbrasil surgiram produzindo novos fertilizantes simples (superfosfato triplo - TSP; monoamônio fosfato - MAP; diamônio fosfato - DAP; e nitrato de amônio) e produtos intermediários como amônia e ácido fosfórico.

Entre o final da década de 70 e início dos anos 80 novas unidades industriais entravam em operação, ainda em conseqüência das metas traçadas pelo PNFC (Programa Nacional de Fertilizantes e Calcário Agrícola), como a Goiásfertil (atual Copebrás) em Ouidor (GO), a Valefertil (atual Fosfertil) em Uberaba (MG) e a Arafertil (atual Bunge) em Araxá (MG).

Com as tendências sempre crescentes de demanda por fertilizantes no Brasil (Figura 1.2) verifica-se a partir daí um aumento da produção de fertilizantes através de uma nova fase de desenvolvimento marcada por privatizações, liberação de importações, planos econômicos e reestruturação do setor (expansões, fusões, aquisições, etc.).

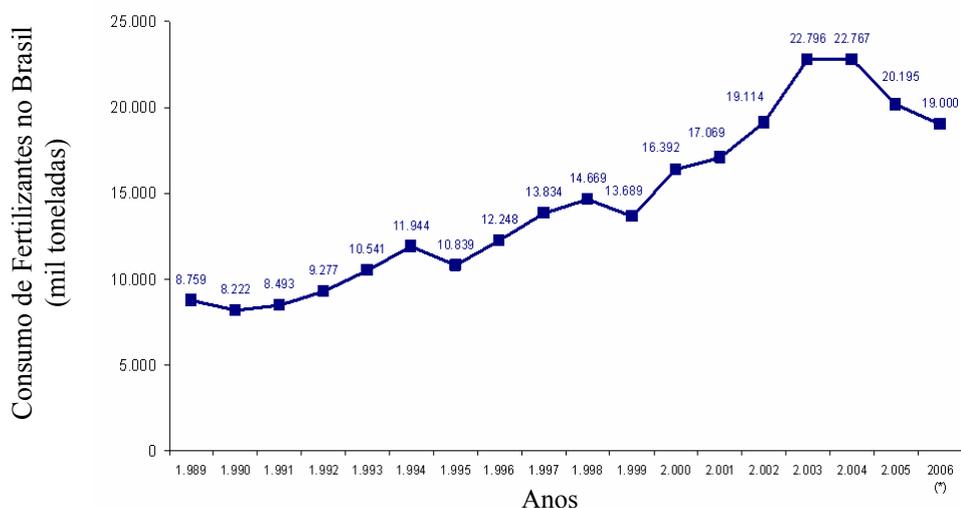


Figura 1.2: Consumo de fertilizantes no Brasil no decorrer dos anos.

Fonte: ANDA (Associação Nacional Para Difusão de Adubos, 2006).

1.3- Secagem de fertilizantes

A necessidade de secagem existe há muito tempo. Vários processos foram desenvolvidos e aprimorados pelo homem para atendimento desta necessidade. Através da história, o sol e o vento já foram os principais elementos de secagem. Mesmo usados até hoje em algumas circunstâncias, esses métodos são muitos lentos e imprecisos.

O vento atmosférico foi substituído pela passagem forçada de ar e o sol por outras fontes de calor. Com o avanço tecnológico, novos equipamentos permitiram um aumento de eficiência na remoção de voláteis (ex.: água), seguindo dos rudimentares fornos da idade média até os modernos secadores por infravermelho e microondas atualmente existentes.

Na produção de fertilizantes granulados os insumos (água, amônia, ácido sulfúrico e vapor entre outros) são dosados em um equipamento chamado granulador, que tem como objetivo adequar o produto às especificações químicas e aumentar o tamanho das partículas até um padrão desejado (entre 2 e 4 mm). Após o processo de granulação vem o processo de secagem, que é responsável por remover as substâncias voláteis (água) utilizadas no processo de granulação.

O método mais empregado na secagem de fertilizantes é o por troca de calor direta (corrente de ar quente forçada em contato com o sólido úmido) em um equipamento denominado secador rotatório. Este secador é dotado de suspensores para o aumento da área de contato gás-sólido.

A secagem dos fertilizantes granulados é necessária para evitar o empedramento ou desintegração dos grânulos, impedindo assim seu manuseio e/ou aplicação adequada do mesmo; além de contribuir com a redução de formação de incrustações no interior dos equipamentos de forma geral.

Devido a esta característica inerente aos fertilizantes granulados (tendência de formação de incrustações), é comum em unidades produtivas de fertilizantes os balanços energéticos (controle de umidade) serem os limitantes do processo produtivo destas unidades. Desta forma, um maior domínio das variáveis do processo de secagem de fertilizantes e dos passos para o dimensionamento destes secadores rotatórios, certamente decorrerá para o seguimento de fertilizantes em uma maior produtividade e rentabilidade do negócio.

Em seguida é apresentada a Figura 1.3 com um fluxograma de uma unidade convencional de produção de fertilizantes granulados, onde pode ser visualizada a localização do secador rotatório na unidade industrial.

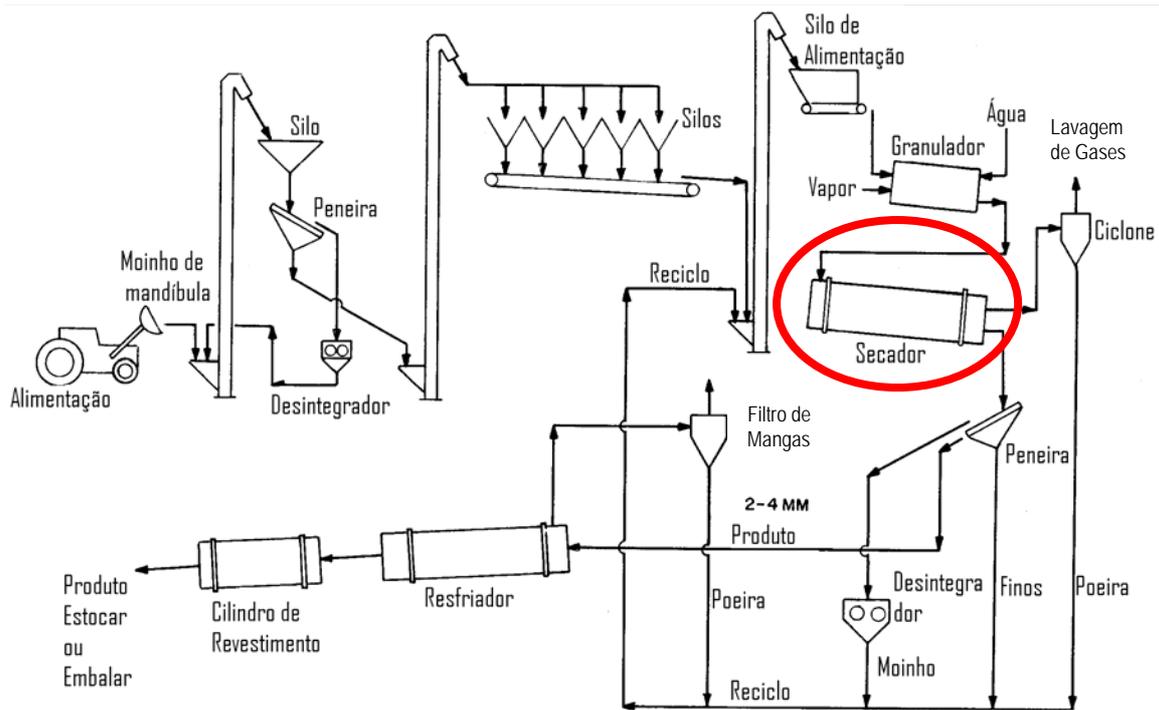


Figura 1.3: Fluxograma de uma unidade industrial convencional de produção de fertilizantes granulados.

1.4- Objetivo do trabalho

O dimensionamento, modelagem e simulação de secadores rotatórios constituem em um grande desafio. A secagem envolve transferências de calor e massa e processos fluidodinâmicos das mais diferentes formas. As temperaturas, vazões mássicas, umidades e propriedades físico-químicas dos gases e sólidos constituem variáveis chaves do processo. No entanto, outras são de tamanha relevância e influem diretamente na eficiência destes equipamentos como, por exemplo, variações nas condições ambientais e entradas e saídas de ar falso, ou seja, ar indesejado ao processo de troca térmica (secagem), porém que participa deste devido impossibilidades ou deficiências de vedações.

Apesar dos secadores rotatórios serem empregados em diversas indústrias e dimensionados para as mais diversas aplicações, muito pouco se tem feito no que concerne ao desenvolvimento de metodologias para projeto dos mesmos. A maior parte dos projetos de secadores é feita por empirismo, com base na experiência de engenheiros e “scale-up” de protótipos.

Logo, o objetivo deste trabalho foi analisar os equacionamentos encontrados em literatura, tanto de projeto como para previsão do comportamento da secagem em secadores rotatórios, utilizando-se para isto resultados obtidos em campo para a secagem de fertilizantes granulados em um secador industrial convencional da indústria de fertilizantes (3 metros de diâmetro x 30 metros

de comprimento). Com isto buscou-se encontrar informações que possam contribuir para a precisão nos desenvolvimentos de novos projetos bem como com o aumento de eficiências de secagem em equipamentos já instalados.

Com os dados operacionais coletados (variáveis de processo) e os resultados obtidos, este trabalho irá apresentar informações sobre:

- Coeficiente dinâmico de fricção do GTSP;
- Distribuição de carga do GTSP nos suspensores ao longo do secador;
- Comprimento, ângulo e tempo médio de queda das partículas de GTSP;
- Tempo de residência do GTSP no secador;
- Balanços de massa e energia (coeficientes globais de transferência de energia);
- Modelagem para previsão do processo de secagem (ARRUDA, 2008); e
- Propostas de projeto de secadores rotatórios (CRISTO, 2004).

CAPÍTULO 2

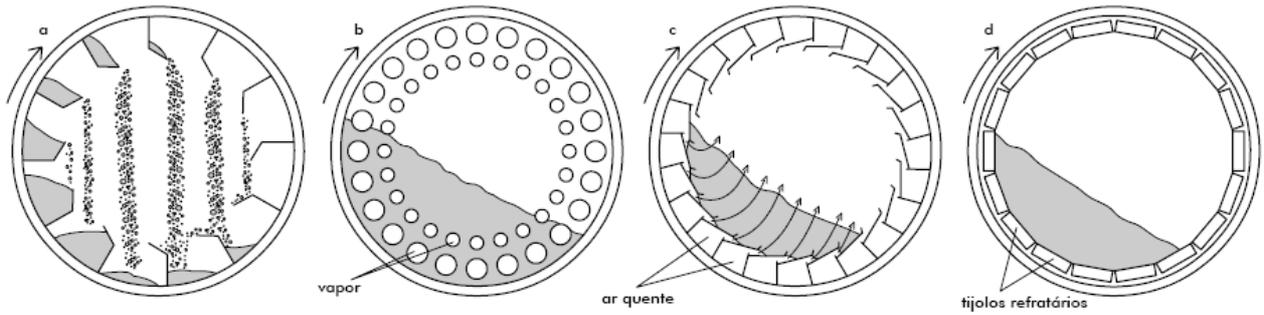
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Secadores rotatórios

Secadores rotatórios são ideais para secagem de materiais granulados de escoamento livre, sendo bastante empregados na secagem de sais, fertilizantes e areia. Podem ainda ser adaptados, com o uso de etapas preparatórias de material, para a secagem de pastas, lamas e soluções, aumentando sua alternativa de uso (NONHEBEL e MOSS, 1971; PERRY, 1997).

Um secador rotatório é constituído por uma câmara cilíndrica um pouco inclinada em relação a horizontal, que gira em torno do seu eixo longitudinal. O comprimento da câmara cilíndrica normalmente varia de quatro a dez vezes o seu diâmetro, que pode medir de 0,3 m a mais de três metros (PERRY 1997). O secador opera com os sólidos sendo alimentados em sua extremidade superior. Estes são então cascateados até a outra extremidade em virtude da rotação, diferença de pressão, inclinação da câmara cilíndrica e arraste pelo gás; e em seguida são descarregados na extremidade inferior com menor teor de umidade. Além do transporte do material a ser seco, os gases arrastam a umidade para fora do secador e fornecem calor ao material seco (transferência de massa e energia). Esses gases, normalmente o ar, também entram por uma extremidade e sai pela outra, podendo escoar em contracorrente ou de forma concorrente com os sólidos. O último modo é indicado para materiais que precisam de uma secagem rápida no início do processo, ou que são susceptíveis de serem degradados pelo calor. O escoamento contracorrente é usado normalmente para casos em que o sólido pode atingir altas temperaturas. Essa configuração é também a de maior eficiência térmica.

O secador rotatório mais comum tem como particularidade a secagem pelo ar passando perpendicularmente por uma cascata de material. A câmara cilíndrica do secador praticamente horizontal possui suspensores internamente, que funcionam como pás, que conduzem os materiais da parte inferior da câmara cilíndrica para a parte superior e os despejam em forma de cascata. Esse secador recebe o nome de secador rotatório direto em cascata. Este nome é usado para diferenciá-lo de outros secadores rotatórios como o secador indireto a tubo vapor, em que os tubos com vapor são dispostos longitudinalmente na câmara cilíndrica, promovendo o aquecimento e secagem do material. Na Figura 2.1 são mostradas as seções transversais destes secadores em operação.



a) por contato direto, b) por tubos a vapor, c) por venezianas d) forno rotativo.

Figura 2.1: Tipos de secadores rotatórios.

2.1.1- Secadores rotatórios diretos com cascadeamento

No secador rotatório direto com suspensores, as cascatas são de extrema importância para a transferência de massa e calor entre os gases (ar) e o material a ser seco (sólidos). Os suspensores são construídos de forma simples, normalmente com dois segmentos formando um ângulo de 90°, mas podem assumir configurações de acordo com o cascadeamento que se deseja. Os formatos mais comuns são os que cascadeiam o material uniformemente por toda a parte superior da câmara cilíndrica ou com distribuição concentrada no centro, proporcionando uma maior distância de queda e, conseqüentemente, maior contato entre os gases e o material a ser seco. As dimensões, tipos e distribuições dos suspensores pela parede da câmara cilíndrica são determinados pelas propriedades do material a ser seco, podendo variar ao longo da câmara cilíndrica (PERRY, 1997). Na Figura 2.2 abaixo é mostrada uma construção típica de um secador rotatório.

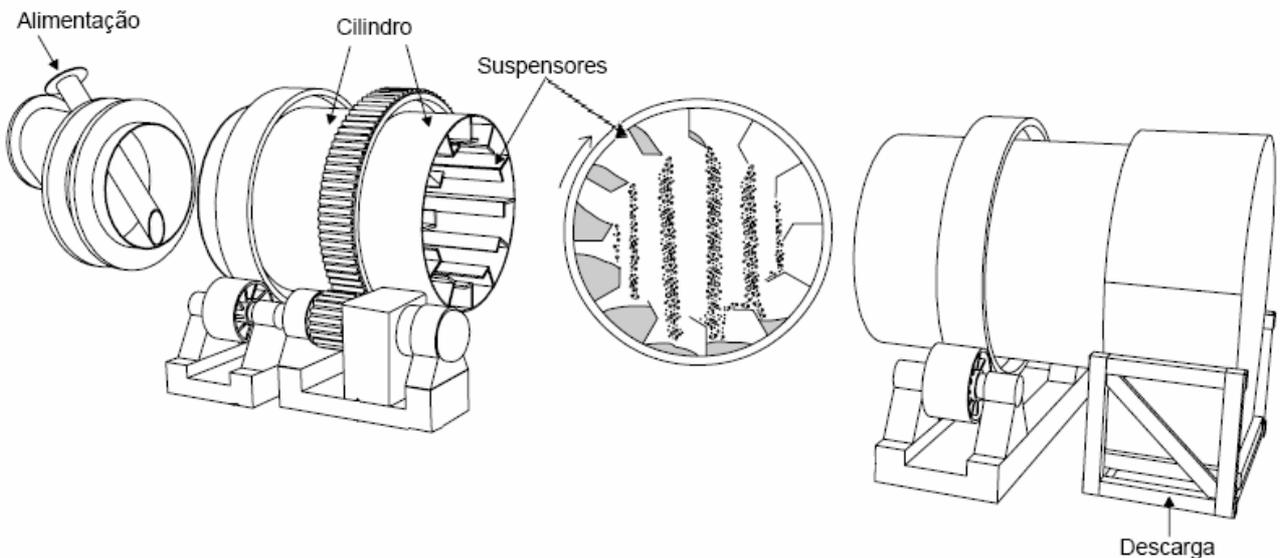
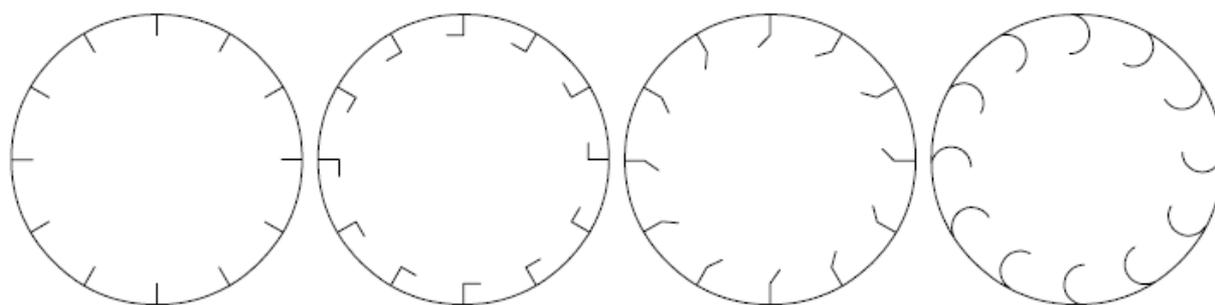


Figura 2.2: Visão tridimensional de um secador do tipo rotatório direto com cascadeamento.

2.2- Suspensores

Como mencionado anteriormente, a grande maioria dos secadores rotatórios com aquecimento direto possui suspensores com o objetivo de promover um contato mais íntimo entre os sólidos úmidos e os gases quentes (cascadeamento). Na maioria dos casos, a profundidade do suspensor está entre $D/12$ a $D/8$, sendo que D é o diâmetro do secador (PERRY, 1997).

Um determinado secador pode incorporar um ou mais tipos diferentes de suspensores. Abaixo se mostra alguns tipos de suspensores e seus respectivos nomes:



a) suspensores retos b) suspensores ângulo reto c) suspensores angulares d) suspensores helicoidais

Figura 2.3: Configurações comuns dos suspensores em um secador rotatório direto.

Os suspensores retos (Figura 2.3.a) geralmente são empregados na secagem de materiais impregnantes que tendem a aderir nas paredes internas do secador. No caso da indústria de fertilizantes, estes suspensores, se aplicam principalmente no início do equipamento, onde são usados para introduzir os sólidos úmidos dentro do secador (obs.: os suspensores situados logo após a alimentação dos sólidos, podem ter uma forma inclinada (helicoidal) para promoverem a rápida entrada dos sólidos no secador, evitando acúmulo e eventual retorno do material). Para sólidos menos aderentes os suspensores podem ser angulares ou de ângulo reto.

Várias configurações de suspensores foram propostas com base teórica, particularmente por KELLY (1992), com o objetivo de melhorar o desempenho dos secadores. Alguns destes suspensores ainda nem são empregados industrialmente, possivelmente por causa da complexidade do seu formato.

2.3- Carga dos suspensores

O conhecimento da quantidade de sólidos transportados no suspensores é essencial para assegurar que o secador esteja operando nas condições próximas do menor custo energético bem

como da maior quantidade de produto dentro das especificações de teor de umidade. Se o secador operar com suspensores com baixo carregamento de material, o secador estará operando abaixo de sua capacidade, havendo ineficiência. Por outro lado, se o secador trabalhar acima de sua capacidade de carregamento, haverá um excesso de material transportado, reduzindo o tempo de residência dos sólidos devidos curtos circuitos através transbordamento sobre os suspensores, reduzindo assim a eficiência do processo de secagem podendo afetar a qualidade do produto final (BAKER, 1983).

De acordo com SCHOFIELD e GLIKIN (1962) a quantidade de sólidos retida em cada suspensor pode ser calculada em uma função da geometria (l), do ângulo dinâmico de repouso do material (ϕ) e da posição angular do suspensor θ formado entre a ponta do suspensor e o plano horizontal, como é mostrado na Figura 2.4 a seguir.

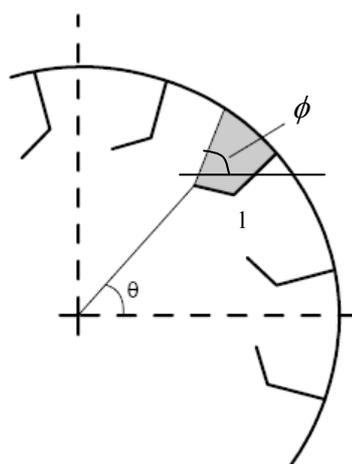


Figura 2.4: Indicação do ângulo dinâmico de repouso (ϕ) e do ângulo θ formado entre a ponta do suspensor e o plano horizontal.

O ângulo dinâmico de repouso do material (ϕ) é determinado em função do coeficiente dinâmico de fricção (μ). Se um material é derramado em uma superfície plana, formará uma pilha cujo ângulo com o plano horizontal é chamado de ângulo estático de repouso (α_r). Este ângulo de repouso é afetado pela coesividade do material. Partículas dentro de um suspensor também exibem um ângulo de repouso com o plano horizontal, que dependerá da posição angular do suspensor. Como o ângulo de repouso nos suspensores é afetado pela velocidade de rotação da câmara cilíndrica, este é chamado de ângulo dinâmico de repouso (ϕ). A Equação proposta por SCHOFIELD e GLIKIN (1962) que relaciona o ângulo dinâmico de repouso como uma função da velocidade de rotação da câmara cilíndrica (ω), da posição angular do suspensor (θ) e da característica do material (coeficiente dinâmico de fricção, μ) é apresentada a seguir:

$$\tan \phi = \frac{\mu + \frac{\omega^2}{g}(\cos \theta - \mu \sin \theta)}{1 - \frac{\omega^2}{g}(\sin \theta - \mu \cos \theta)} \quad (2.1)$$

em que, θ é o ângulo subtendido entre a ponta do suspensor e o plano horizontal que passa pelo centro da câmara, e r é o raio do centro da câmara até a ponta do suspensor.

A relação ω é igual à razão entre as forças centrífuga e gravitacional atuando sobre a superfície do material. Esta equação é resultado do balanço das forças que agem sobre uma partícula que está a ponto de cair do suspensor. Entre estas forças estão: a força gravitacional Φ_g , a força centrífuga Φ_c , e a força de fricção das partículas que é obtida multiplicando o coeficiente de atrito da

BAKER (1983) mostrou como o ângulo dinâmico de repouso pode ser usado para calcular a carga de sólidos em um suspensor para qualquer posição angular deste. Desenvolveu equações para vários tipos de geometrias de suspensores e também explicou como realizar o cálculo do número ótimo de suspensores em secadores rotatórios para maximizar a carga no tambor a fim de secar mais produto com a mesma umidade desejada.

KELLY (1992) estendeu sua teoria para a predição da geometria do suspensor ideal, ou o de igual distribuição angular (EAD). Os suspensores EAD distribuem os sólidos uniformemente sobre o plano horizontal que passa pelo centro do tambor rotatório. Isto garante um excelente contato gás-sólido no secador.

Com o cálculo da área transversal dos suspensores ocupada pelos sólidos (Figura 2.5) é possível determinar a quantidade de material nos suspensores para qualquer valor de θ .

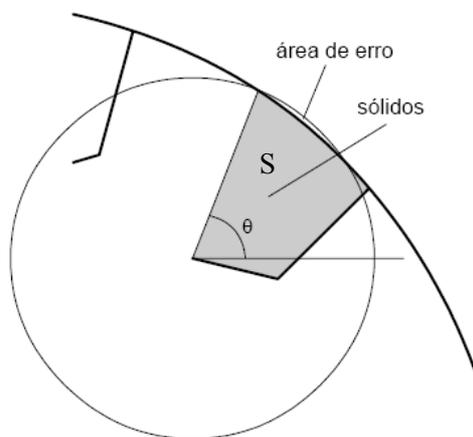


Figura 2.5: Quantidade de material nos suspensores para qualquer valor de θ .

A relação para a carga de sólidos nos suspensores é dada pela Equação 2.2:

$$G(\theta) = \rho S \quad (2.2)$$

em que G é a carga de material no suspensor (kg), ρ é a densidade das partículas, L é o comprimento do secador e S é a área na seção transversal ocupada pelos sólidos no suspensor.

A quantidade de material despejada pelo suspensor, devido ao movimento de rotação do cilindro do secador, que mudam de posição θ para uma outra, ao longo da circunferência interna do secador, é dada pela Equação 2.3:

$$G(\theta) = G(\theta - \Delta\theta) - G(\theta + \Delta\theta) \quad (2.3)$$

na qual G é a massa despejada do suspensor (kg).

O formato dos suspensores determina o modo que os sólidos são descarregados no fluxo de gás quente. Por definição, a quantidade de sólidos despejados pelos suspensores EAD para $0^\circ < \theta < 180^\circ$ é constante. Os suspensores com ângulo reto exibem uma taxa de cascata constante, para

valores de ângulo final de descarga $\theta < 140^\circ$. Os suspensores angulares e semicirculares exibem taxas de cascata que diminuem rapidamente com θ . Com estes suspensores o cascadeamento cessa para ângulos no intervalo entre 90° e 120° .

Para cálculos de projeto da carga total de material no secador () KELLY e O'DONNELL (1977), sugeriram o uso da Equação 2.4:

$$* = \frac{*_0(\theta + 1)}{2} \quad (2.4)$$

em que $*_0$ é a carga no metro de suspensor para a posição $\theta = 0^\circ$, n é o número de suspensores e L é o comprimento do secador (m).

GLIKIN (1978) propôs a seguinte Equação 2.5 para o cálculo da quantidade de material no secador:

$$* = 2 \sum * - * \quad (2.5)$$

em que \sum é a soma das quantidades de material nos suspensores em toda a região $0^\circ < \theta < 180^\circ$, $*_0$ é a carga de material presente no suspensor para um ângulo $\theta = 0$.

Um número suficiente de suspensores deve ser projetado de modo que o volume do material transportado pelos suspensores esteja entre 10 a 15 % do volume total de material do secador. Se n é o número de suspensores, o espaçamento entre eles será $\theta_N = 360/n$. GLIKIN (1978) mostrou que para o suspensor de ângulo reto que se encontra completamente carregado para $\theta = 0^\circ$, o espaçamento mínimo entre os suspensores deve ser tal que a seguinte relação seja satisfeita:

$$\tan(\theta - \psi) > (\tan \phi)_{\theta=0} \quad (2.6)$$

em que ψ é definido como:

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{\phi}{-1} \right) \quad (2.7)$$

O projeto de suspensores é muito importante para o bom desempenho da secagem. Sabe-se que partículas que cascadeiam a partir do centro da câmara cilíndrica, percorrem uma maior distância em contato com os gases quentes, o que ajudaria na transferência de massa e calor. Entretanto, se o cascadeamento estiver concentrado em uma posição qualquer, resultará numa grande quantidade de partículas juntas uma a outra cascadeando, ou seja, protegidas por suas vizinhas, o que poderá prejudicar a transferência de massa e calor.

REVOL (2001) desenvolveram equacionamentos para a descrição do comportamento fluidodinâmico do material em suspensores de três segmentos. A Figura (2.6) a seguir identifica as variáveis geométricas utilizadas para estes equacionamentos.

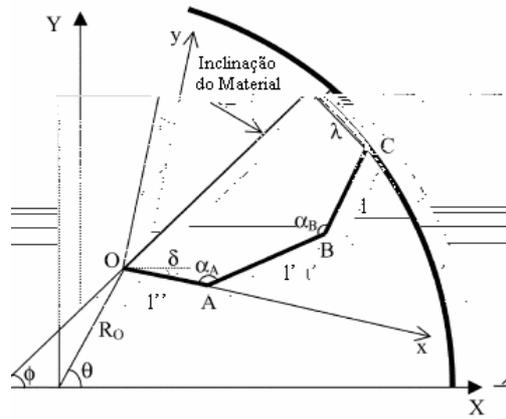


Figura 2.6: Esquema de um suspensor de 3 segmentos.

O suspensor de três segmentos é caracterizado pelos comprimentos dos segmentos l'' , l' e l (também chamados de 1º; 2º e 3º segmento respectivamente), pelos seus respectivos ângulos α_A e α_B , e pelo raio do círculo (R_0) descrito pela ponta do suspensor () com o centro da câmara cilíndrica giratória. Dois sistemas de coordenadas cartesianas são considerados. A origem do sistema (x,y) é a ponta dos suspensores, estando o eixo x coincidente com o primeiro segmento e o eixo y perpendicular a este. A sua trajetória acompanha a rotação dos suspensores. A origem do outro sistema de coordenadas fixas (X,Y) , está situada no centro da secção transversal da câmara cilíndrica.

Para calcular o volume de material nos suspensores, as coordenadas dos pontos A, B e C deverão ser obtidas de acordo com a Figura (2.6), deve-se também obter o ângulo (δ) formado entre os dois sistemas de coordenadas (x,y) e (X,Y) .

O equacionamento para suspensores de três segmentos pode ser obtido da seguinte forma:

- segmento 1:

$$y_1 = 0 \quad (2.8)$$

- segmento 2:

$$y_2 = a_2 + b_2x \quad (2.9)$$

em que: $a_2 = x_A \tan(\alpha_A)$ e $b_2 = -\tan(\alpha_A)$

- segmento 3:

$$y_3 = a_3 + b_3x \quad (2.10)$$

em que: $a_3 = y_B + x_B \tan(\alpha_A + \alpha_B)$; e $b_3 = -\tan(\alpha_A + \alpha_B)$

As coordenadas dos pontos A, B e C são dadas por:

- ponto A:

$$x_A = l' \quad (2.11)$$

$$y_A = 0 \quad (2.12)$$

- ponto B:

$$x_B = x_A - l' \cos(\alpha_A) \quad (2.13)$$

$$y_B = l' \sin(\alpha_A) \quad (2.14)$$

- ponto C:

$$x_C = x_B + l \cos(\alpha_A + \alpha_B) \quad (2.15)$$

$$y_C = y_B - l \sin(\alpha_A + \alpha_B) \quad (2.16)$$

No sistema de coordenadas estacionárias, a posição do ponto C, desde que este fique situado na parede da câmara cilíndrica de raio R, tem que satisfazer a Equação:

$$x_C^2 + y_C^2 = R^2 \quad (2.17)$$

Os dois sistemas de coordenadas estão relacionados pelas seguintes Equações:

$$X_C = X_0 + x_C \cos(\delta) - y_C \sin(\delta) \quad (2.18)$$

$$= R_0 \cos(\theta) + x_C \cos(\delta) - y_C \sin(\delta) \quad (2.19)$$

$$Y_C = Y_0 + y_C \cos(\delta) + x_C \sin(\delta) \quad (2.20)$$

$$= R_0 \sin(\theta) + y_C \cos(\delta) + x_C \sin(\delta) \quad (2.21)$$

Substituindo as Equações (2.19) e (2.21) em (2.17) tem-se uma Equação que pode ser resolvida para δ , para qualquer posição do ângulo θ especificado.

A Equação para a linha que delimita a quantidade de sólidos retido no suspensor é determinada por:

$$y = x \tan(\gamma) = x \tan(\phi - \delta) \quad (2.22)$$

A interseção da linha do nível dos sólidos com a linha formada pelo segundo segmento possui a seguinte abscissa:

$$x_2 = \frac{a_2}{\tan(\gamma) - b_2} \quad (2.23)$$

com coordenadas:

$$y_2 = a_2 + b_2 x_2 \quad (2.24)$$

A interseção da linha dos sólidos com a linha formada pelo terceiro segmento possui a seguinte abscissa:

$$x_3 = \frac{a_3}{\tan(\gamma) - b_3} \quad (2.25)$$

com coordenadas:

$$y_3 = a_3 + b_3 x_3 \quad (2.26)$$

A interseção da linha do nível dos sólidos com a parede da câmara cilíndrica possui a seguinte abscissa:

$$x = -\frac{\pm \sqrt{A_w^2 - 4B_w}}{2} \quad (2.27)$$

sendo: $A_w = 1 + [\tan(\gamma)]^2$; $B_w = 2X_0[\cos(\delta) - \tan(\gamma)\sin(\delta)] + 2Y_0[\tan(\gamma)\cos(\delta) + \sin(\delta)]$; e $\gamma = \arctan\left(\frac{Y_0}{X_0}\right)$.

A ordenada é dada por:

$$Y_w = x_w \tan(\gamma) \quad (2.28)$$

Quatro tipos de carregamentos nos suspensores irão ocorrer:

1) As partículas alcançam a parede do secador. Isto acontecerá se:

$$\gamma > A \tan\left(\frac{Y_c}{X_c}\right) \quad (2.29)$$

Sendo que a área ocupada pelos sólidos é dada pela Equação 2.30:

$$S = \frac{R^2}{2} \left[\beta - \frac{1}{2} \left| \frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4}}{2} \right| + \frac{1}{2} \left| \frac{\beta + \sqrt{\beta^2 - 4}}{2} \right| \right] \quad (2.30)$$

sendo:

$$\beta = 2 \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{Y_c}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{Y_0}{X_0}\right)^2} + \frac{Y_0}{X_0}}{2} \right] \quad (2.31)$$

2) As partículas não alcançam a parede mas alcançam o terceiro segmento. Isto ocorre quando:

$$\gamma > \tan\left(\frac{y_2}{x_2}\right) \text{ e } \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2} < \dots \quad (2.32)$$

Sendo a área ocupada pelos sólidos dada pela Equação 2.33:

$$= \frac{1}{2} | \dots + \dots | \quad (2.33)$$

3) As partículas não alcançam o terceiro segmento, mas alcançam o segundo segmento. Isto ocorre quando:

$$\gamma > \tan\left(\frac{y_2}{x_2}\right) \text{ e } \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} < \dots \text{ e } y_2 > 0 \quad (2.34)$$

Sendo a área ocupada pelos sólidos dada pela Equação 2.35:

$$= \frac{1}{2} | \dots | \quad (2.35)$$

4) O suspensor se encontrará vazio quando:

$$x_2 \leq 0 \quad (2.36)$$

O máximo carregamento de um suspensor é obtido para a posição de $\theta = -90^\circ$. Em ângulos entre -90° e 0° ($-\pi/2$ e 0 radianos), a carga retida nos suspensores pode ser obtida assumindo simetria no sistema, isto é, a quantidade de sólidos perdida pelo suspensor quando este gira de $\theta < 0$ é igual a quantidade perdida quando este gira de 0 para $|\theta|$:

$$Q(\theta) = Q(0) + [Q(0) - Q(|\theta|)] \quad (2.37)$$

2.4- Comprimento e tempo de queda das partículas dos suspensores

Quando o ângulo formado pela superfície das partículas nos suspensores com a horizontal atinge um valor superior ao ângulo de equilíbrio, partículas começam a deixar o suspensor. Como as partículas deixam os suspensores em posições angulares diferentes, uma faixa de comprimento de queda () será experimentada. GLIKIN (1978) propôs a Equação 2.38 para o cálculo do comprimento de queda das partículas do suspensor, na qual o comprimento de queda é a distância percorrida pela partícula da ponta do suspensor até o leito de partículas na parte inferior do secador.

$$= \frac{+ \sqrt{^2 - _0^2}}{\cos \alpha} \quad (2.38)$$

em que α é a inclinação do secador, $\cos \theta$ e $\sin \theta$ para igual à distância da ponta do suspensor até o centro do secador.

O comprimento médio de queda pode ser expresso como:

$$= \frac{\int_0^{(0)} \theta}{(0) \cos \alpha} \quad (2.39)$$

em que é o diâmetro efetivo do secador (diâmetro da circunferência pelo deslocamento da ponta do suspensor), é o volume de material no suspensor (GLIKIN, 1978).

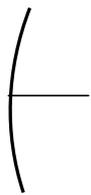
Em geral a distância média pode ser dada por (KELLY, 1992):

$$= \frac{'}{\cos \alpha} \quad (2.40)$$

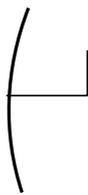
em que é a razão entre a carga efetiva do secador e a carga de projeto do secador e a constante é dependente da geometria do suspensor. KELLY (1992) apresentou valores de , para diferentes projetos de suspensores (Figura 2.7). Estes valores estão na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Valores para para diferentes suspensores:

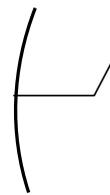
Tipos de suspensor	
Semicircular	0,570
EAD	0,637
Ângulo reto	0,760
CBD	0,902



(a) reto



(b) ângulo reto



(c) angular

(d) E.A.D

(e) C.B.D

(f) semi-circular

E.A.D - Equal Angular Distribution

C.B.D - Centrally Biassed Distribution

Já a velocidade média de queda pode ser determinada pela Equação 2.45:

$$v = \sqrt{\frac{g \cdot d_p}{2}} \quad (2.45)$$

Porém, a distância e o tempo de queda das partículas dos suspensores calculados pelas Equações apresentadas anteriormente não contabilizam o efeito do arraste do ar pelas partículas, que resultará numa diferença entre os valores obtidos e os valores reais. Contudo, as distâncias longitudinais percorridas em cada ciclo de cascata são geralmente pequenas, estabelecendo assim um efeito de arraste desprezível.

A área para a transferência de massa, devido à ação dos suspensores, é igual à área superficial das partículas em queda. Esta área superficial pode ser obtida pela área de todas as partículas em queda calculada conforme Equação 2.46 abaixo (KAMKE e WILSON, 1986):

$$A_s = (1 - \epsilon) \cdot A_p \cdot \frac{6}{d_p} \quad (2.46)$$

em que ϵ é a porosidade da cascata de partículas em queda.

As partículas se deslocam axialmente no secador por uma sucessão de “ciclos de cascata”. O ciclo de cascata pode ser definido como sendo o período em que a partícula é recolhida pelo suspensor na parte inferior do secador, até o momento que as partículas deixam o suspensor (KELLY E O’DONNELL, 1977). O tempo de cada ciclo (t_c) é dado pela razão entre a distância percorrida pelo material até o ângulo de queda médio $\bar{\theta}$ e a velocidade de rotação do tambor mais o tempo médio de queda, conforme apresentado na Equação 2.47 abaixo.

$$t_c = \frac{\pi + \bar{\theta}}{\omega} + t_f \quad (2.47)$$

2.5- Transporte das partículas

O secador rotatório opera tanto como transportador do material sólido em secagem como dispositivo para beneficiar a transferência de massa e energia entre as partículas úmidas e os gases quentes.

São quatro os componentes responsáveis pelo avanço das partículas ao longo do secador:

- força gravitacional, devido à inclinação da câmara cilíndrica que constitui o secador;
- força de arraste exercida pelo fluxo de ar sobre as partículas em cascata;
- repique das partículas no fundo do secador; e
- rolagem das partículas no fundo do secador, principalmente em secadores sobrecarregados.

Cada uma destas componentes pode contribuir independentemente para o movimento das partículas. Os dois últimos itens são de difícil predição teórica e são avaliados experimentalmente para cada tipo de material usado (KEMP E OAKLEY, 1997).

As partículas coletadas pelo suspensor são transportadas do fundo do secador até uma região superior. Para alguma posição θ do suspensor entre 0° e 180° , o material começa a sofrer uma queda e, como resultado da inclinação do secador, o material desloca-se ao longo do comprimento deste. Não havendo nenhum fluxo axial de gases através do secador, a queda das partículas será vertical, e sua progressão devido ao cascadeamento é dada por $\sin\theta / \tan\alpha$. Em sistemas com fluxo de gases concorrentes as partículas avançam com uma maior velocidade devido ao arraste das partículas exercido pelo fluxo de ar. O inverso é constatado com fluxo em contracorrente.

O efeito de rotação da câmara cilíndrica torna-se efetiva quando as partículas rolam na parte inferior do secador. Por causa da inclinação do secador, as partículas progridem para a saída deste. O deslocamento das partículas também pode acontecer em secadores que não possuem uma inclinação, ou seja, secadores horizontais, como resultado do “gradiente hidráulico” de sólidos.

O repique das partículas no fundo do secador ocorre quando a partícula em queda depara-se com a superfície da câmara cilíndrica ou com outra partícula, resultando em uma força reativa que devido à inclinação da câmara cilíndrica irá deslocar o material (BAKER, 1983).

2.6- Tempo de residência das partículas

O tempo médio de residência das partículas em secadores rotatórios e a carga de sólidos estão relacionados pela Equação 2.48:

$$\bar{\tau} = \frac{W}{F} \quad (2.48)$$

sendo que W é a alimentação de sólidos no secador e F é a quantidade de sólidos efetiva dentro do secador, sendo determinada interrompendo-se o movimento da câmara cilíndrica do secador e pesando seu conteúdo. A Equação 2.48 somente será válida quando não houver dispersão axial.

MISKELL e MARSHALL (1956) foram os primeiros a estudar o efeito da carga no secador sobre a dispersão e verificaram que os desvios foram mínimos para cargas entre 7,5 e 8,0 % do volume total do secador.

A transferência de calor e massa no secador depende da retenção de sólidos. Um secador operando com sobrecarga terá uma transferência de calor não uniforme, porque o excesso de sólidos deslizará pela ação do tambor (transbordo sobre os suspensores), não sendo coletados pelos

suspensores e, prejudicando assim, o contato entre o gás e as partículas. Por outro lado, quando o secador trabalha com baixo carregamento, os sólidos passarão rapidamente pelo secador fazendo com que o tempo de residência seja inferior ao tempo necessário para atender a umidade final requerida da partícula. Os principais fatores que influenciam a carga de sólidos no secador rotatório são: geometria e características específicas do material de secagem (densidade, coeficiente de fricção, porosidade etc), geometria do secador (comprimento, diâmetro, suspensores) e condições de operação (taxa de alimentação de sólidos, taxa e direção do fluxo de gás, inclinação e rotação da câmara cilíndrica etc.) (ALVAREZ e SHENE, 1994).

A primeira informação sobre o tempo de residência em secadores rotatórios foi publicada por JONHSTONE e SINGH (1940). Com base em dados bastantes limitados calcularam o tempo médio de residência utilizando uma versão modificada da Equação de SULLIVAN (1927). A Equação obtida para o cálculo do tempo médio de residência foi:

$$\bar{\tau} = \frac{0,0433 L^{0,5}}{\tan \alpha} \quad (2.49)$$

em que $\bar{\tau}$ é o tempo médio de residência (minutos), L , α , $\tan \alpha$ e N são: comprimento (m), diâmetro (m), inclinação (rad), e velocidade rotacional (rpm) do secador, respectivamente, e α é o ângulo de repouso dos sólidos em graus.

MILLER (1942), baseado em estudos experimentais realizados em um secador de 0,2 m de diâmetro e 1,22 m de comprimento propuseram a seguinte Equação para a estimativa do tempo médio de residência.

$$\bar{\tau} = \frac{L}{\tan \alpha} + \frac{D}{60} \quad (2.50)$$

em que $\bar{\tau}$ é o tempo médio de residência (minutos), L , α , $\tan \alpha$ e D são: comprimento (m), diâmetro (m), inclinação (rad), e velocidade rotacional (rpm) do secador, respectivamente, o valor da variável K é de -177 a -531 (s²m⁻¹) para concorrente e de 236 a 945 (s²m⁻¹) para contracorrente. O valor da variável C é de 0,275 para secador com seis suspensores até 0,375 para secador operando com 12 suspensores.

Uma das correlações empíricas mais utilizadas para estimativa do tempo de residência foi proposta por FRIEDMAN e MARSHALL (1949):

$$\bar{\tau} = \left(\frac{0,23}{\alpha^{0,9}} \pm \frac{0,6 \cdot 5 \cdot L}{0,5} \right) \quad (2.51)$$

em que G é a taxa de alimentação do material (kg/s), g é a taxa de gás (kg/s), d_p é o diâmetro da partícula em micras, D é o diâmetro do secador (ft) e L é seu comprimento em (ft), α é dado em radiano e N é dado em rpm. O sinal negativo da Equação 2.51 é usado para fluxo concorrente e o

sinal positivo para fluxo contracorrente. O estudo de FRIEDMAN e MARSHALL (1949) para o tempo de residência em secadores rotatórios é bastante utilizado em trabalhos na literatura. Entretanto, a maioria dos dados foram obtidos em secadores com carregamento muito inferior aos encontrados na indústria (BAKER, 1983).

ARRUDA (2008) estimou os parâmetros da Equação de FRIEDMAN e MARSHALL (1949) para a aplicação em fertilizante granulados (Equação 2.52).

$$\bar{\tau} = \left(\frac{0,19625}{\alpha^{0,9}} \pm \frac{0,00036 \cdot}{0,5} \right) \quad (2.52)$$

em que \dot{m} é a taxa de alimentação do material (kg/min), \dot{V} é a taxa de gás (kg/min), d_p é o diâmetro da partícula (m), D é o diâmetro do secador (m) e L é seu comprimento (m), α é dado em radiano e ν é dado em rpm.

SAEMAN e MITCHELL (1954) foram os primeiros a fugir da usual aproximação empírica para o cálculo do tempo médio de residência em secadores rotatórios. Eles analisaram o transporte de material pelo secador através da associação das taxas de transporte com caminhos individuais de cascadeamento. Assumiram uma relação linear entre o deslocamento horizontal das partículas, devido ao fluxo de ar, e a velocidade destas. A Equação 2.53 foi proposta para o tempo médio de residência:

$$\bar{\tau} = \frac{L}{v \left(\frac{1}{\tan \alpha} \pm \nu \right)} \quad (2.53)$$

O valor do ν (fator de cascata) é definido como sendo igual a 2 para secadores ligeiramente carregados e π para secadores fortemente carregados com suspensores pequenos. O sinal positivo indica fluxo concorrente, e o sinal negativo indica fluxo contra corrente. PORTER e MASSON (1960) definiram em experimentos com fertilizantes em resfriadores de 6 a 9 pés de diâmetro que o m' pode ser considerado igual a 0,0108 s/m. ARRUDA (2008) estimou os parâmetros da Equação de SAEMAN e MITCHELL (1954) para fertilizantes granulados em uma unidade piloto do secador rotatório e obteve os seguintes valores para os parâmetros ν igual a 4,02 e m' igual a 0,00318 s/m.

Desde 1962, muitos modelos teóricos para predição do tempo médio de residência começaram a contabilizar o conceito de ciclo de cascata, caminho percorrido pelo material desde o momento em que este é coletado pelo suspensor até o término do movimento de cascata. Sendo assim, o tempo médio de residência das partículas no secador pode ser dado por:

$$\bar{\tau} = \frac{L}{v \left(\frac{1}{\tan \alpha} \pm \nu \right)} \quad (2.54)$$

ou

$$\bar{\tau} = \frac{L}{v \left(\frac{1}{\tan \alpha} \pm \nu \right)} \quad (2.55)$$

em que t_c é o tempo médio do ciclo de cascata, n_c é o número de ciclos de cascata e Δz é o avanço na direção axial do secador realizado pelo material em cada ciclo. A distância percorrida pela partícula é determinada pela altura de queda, inclinação do secador e velocidade do gás.

No ciclo de cascata as partículas podem estar sujeitas à diferentes situações que podem contribuir para o movimento axial desta. As contribuições podem ser: as partículas caem do suspensor para o fluxo de gases e saltam no fundo do secador. Após estes movimentos as partículas podem passar um longo tempo até serem novamente coletadas pelos suspensores, uma vez que dependem da recarga do secador.

KELLY e O'DONNELL (1977) desenvolveram um modelo para a predição do tempo médio de residência usando o conceito do ciclo de cascata. Eles consideraram suspensores de igual distribuição angular, especialmente projetados para manipular um fluxo de cascata constante. O efeito do fluxo de ar não foi considerado neste trabalho. Este modelo consiste em duas funções que consideram os secadores em operação acima e abaixo do carregamento do projeto.

Para secadores operando com carregamento abaixo ou igual ao carregamento determinado pelo projeto, o tempo do ciclo de cascata pode ser dado por:

$$t_c = \left\{ \frac{2 [1 - \cos(\pi - \theta_0)]}{\pi \cos \alpha} \right\}^{0,5} + \frac{1}{2} (1 - 0,5 \theta_0) \quad (2.56)$$

em que t_c é calculado através a Equação 2.57 abaixo:

$$t_c = t_{c0} \cdot \ln(\dots) < 0 \quad (2.57)$$

para t_{c0} representando a carga de operação dos suspensores e t_c à carga de projeto dos suspensores que é calculada pela Equação 2.58 a seguir:

$$t_c = 0,5 \cdot (\dots + 1) \cdot t_{c0} \quad (2.58)$$

em que n_s é número de suspensores na seção circular e C_s é carga do suspensor cheio na posição angular $\theta=0^\circ$.

A expressão correspondente para um secador com carregamento acima das condições de projeto é dada por:

$$t_c = \left(\frac{4 \theta_0}{\pi \cos \alpha} \right)^{0,5} + \frac{1}{2} \left(\frac{-1}{\dots} \right) \quad (2.59)$$

sendo t_c calculado através a Equação 2.60:

$$t_c = \frac{1}{t_{c0}} \left[t_{c0} + \dots \cdot t_{c0} \cdot (\dots - 1) \right] = 1 + 2 \frac{-1}{+1} \geq 0 \quad (2.60)$$

GLIKIN (1978) propôs equações baseadas na análise gases-sólido que podem prever o comportamento da partícula por meio das seguintes simplificações: não existe interação entre as partículas; as partículas são consideradas de formato esféricas; os suspensores operam no carregamento definido no projeto.

Para a determinação do avanço axial das partículas () um balanço de forças foi aplicado na partícula. A seguinte expressão foi obtida como uma função do tempo:

$$= 0,5 \alpha^2 \pm 0,5 \quad (2.61)$$

em que é a velocidade relativa entre o gás e as partículas. O parâmetro é dado pela seguinte Equação 2.62:

$$= \frac{1,5 \rho}{\rho} \quad (2.62)$$

com

$$= \frac{12}{Re} \quad \text{Para } Re < 0,2 \quad (2.63)$$

e

$$= \frac{12(1 + 0,15 Re^{0,687})}{Re} \quad \text{Para } 0,2 < Re < 1000 \quad (2.64)$$

em que ρ e ρ são as densidades do ar e do sólido, respectivamente, e é o diâmetro da partícula. Os sinais mais e menos da Equação 2.61 referem-se a fluxo concorrente e contracorrente, respectivamente.

A Equação 2.65 para o tempo médio de residência é dada por:

$$\bar{\tau} = \frac{\left[\left(\frac{2}{\alpha} \right)^{0,5} + \frac{\bar{\theta}}{\pi} \right]}{\alpha} \quad (2.65)$$

GLIKIN (1978) não apresentou nenhum dado experimental para comparar suas predições. Ele também fez inferência que para fluxo concorrente, $\bar{\tau}$ aumenta com o aumento do diâmetro da partícula . Porém o inverso foi indicado para o fluxo em contracorrente.

MATCHETT e BAKER (1987) desenvolveram um modelo que tratava o fluxo de material através do secador como consistindo de duas regiões em paralelo, conforme pode ser visto na Figura 2.8.

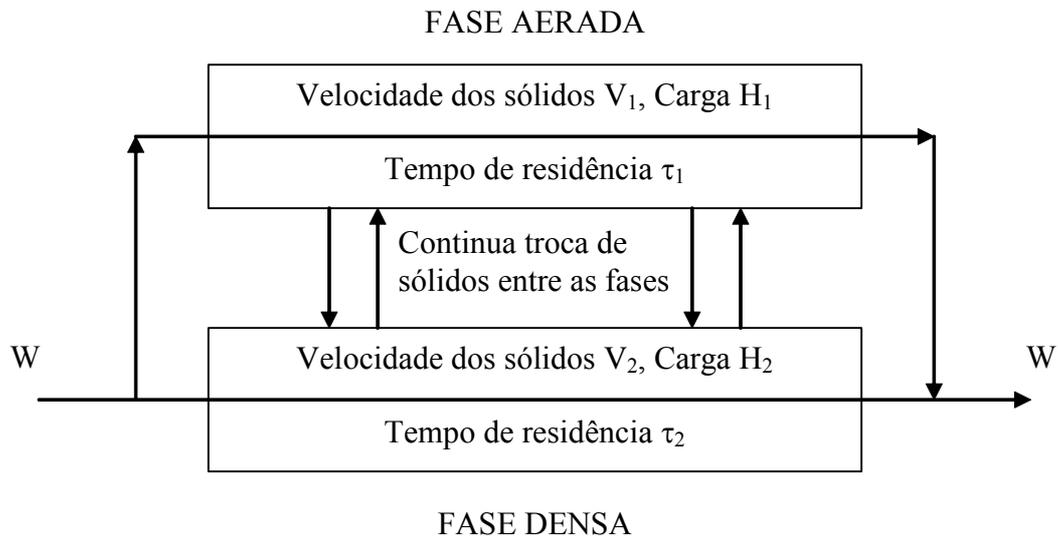


Figura 2.8: Regiões de escoamento proposta por MATCHETT e BAKER (1987).

Uma região chamada por eles de “fase densa”, é formada pelo material carregado nos suspensores e o material no fundo do secador. Esta fase é influenciada principalmente pela rotação do secador. Os mecanismos responsáveis pela fase densa são: colisões e rolagens das partículas no fundo do secador. A outra fase chamada de “fase aerada” é formada pelo material em queda na cascata. Esta fase sofre influência da força gravitacional e da força de arraste devido ao fluxo de gás no secador. As partículas permanecem de 90 a 95% do tempo de escoamento pelo secador na fase densa, no entanto, a secagem ocorre praticamente quando o material se encontra na “fase aerada”.

Estes pesquisadores propuseram a seguinte correlação para o tempo médio de residência:

$$\bar{\tau} = \frac{(2 + 1)}{2 \cdot V_1 + \tan \alpha} \quad (2.66)$$

em que $\bar{\tau}$ e V_1 são dados em metros, τ em rps, τ em segundos, α em radianos e V_1 é a velocidade da fase aerada em m/s, que é calculada pela relação empírica:

$$V_1 = 7,45 \cdot 10^{-4} \text{Re}^{2,2} \frac{\mu}{\rho} \quad (2.67)$$

O $\bar{\tau}$ pode ser calculado pela Equação 2.68 ou pela Equação 2.44:

$$\bar{\tau} = \left(\frac{2 \cdot H_0}{\cos \alpha} \right)^* \quad (2.68)$$

em que $\bar{\tau}$ é um parâmetro que depende da geometria do suspensor. PAPADAKIS (1992) estabeleceu para esse parâmetro, um valor de 0,74 como estimativa inicial, quando informações sobre a forma do suspensor não é conhecida.

O parâmetro $\bar{\tau}$ (definido a partir da velocidade da fase densa) pode ser estimado, de modo simplificado, com fluxo de ar nulo, utilizando a Equação 2.69 a seguir:

$$= \frac{(1 - \phi)^2 \cos(\alpha)}{2\phi} \quad (2.69)$$

em que ϕ é a fração de material sólido transportada na fase densa, g é a aceleração gravitacional em m/s^2 , t é o tempo de queda em segundos, α é a inclinação em radianos, D é o diâmetro do tambor e ϕ pode ser calculado através da Equação (2.70) abaixo:

$$\phi = \frac{\int_0^{\theta} \theta}{\pi} + \frac{1}{\pi} \quad (2.70)$$

Outra equação (Equação 2.71) utilizada na determinação do tempo de residência é a conhecida equação “Bureau of Mines” de 1927, utilizada para fornos rotatórios.

$$\bar{\tau} = \frac{1}{\tan \alpha} \quad (2.71)$$

em que $\bar{\tau}$ é 0,19, ω e D estão em unidades consistentes, α em radianos e N está em r.p.m.

ARRUDA (2008) encontrou com dados experimentais de um secador piloto a seguinte derivação (Equação 2.72) para a Equação “Bureau of Mines”:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{0,9 \tan \alpha} \quad (2.72)$$

em que $\bar{\tau}$ e D estão em unidades consistentes, α em radianos, N em r.p.m. e ϕ igual a 0,26.

Pesquisas como as de PAPADAKIS (1994) e WANG (1997) desenvolveram modelos mais sofisticados e convenientes para uma implementação computacional.

KEMP e OAKLEY (1997) encontram para a determinação do tempo médio de residência uma relação entre o tempo de residência na fase aerada (τ_g) e na fase densa (τ_s) com o tempo médio de queda das partículas ($\bar{\tau}$) e o tempo até uma nova coleta destas partículas pelos suspensores (τ_{co}).

2.7- Transferência de calor em secadores rotatórios diretos

Muitas vezes, secadores rotatórios de contato direto são tratados como simples trocadores de calor. O calor trocado é definido em termos de um coeficiente global, ou volumétrico, de transferência de calor, de acordo com a Equação 2.73.

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.73)$$

em que h é a taxa de transferência de calor entre o gás e os sólidos, V é o volume do secador, e ΔT é a média logaritma da diferença entre as temperaturas do gás e dos sólidos.

O coeficiente volumétrico K_v é definido como a taxa de transferência de calor por unidade de volume do secador e por unidade de diferença de temperatura. Ele consiste no produto entre o coeficiente de transferência de calor h , baseado na área efetiva de contato entre o gás e os sólidos, e a relação desta área de contato para o volume do secador. Assim, com a definição deste coeficiente, elimina-se a necessidade de especificar a área bastante complexa onde a transferência de calor ocorre.

Os primeiros a investigarem extensivamente o calor transferido em secadores rotatórios foram MILLER (1942). Estes autores obtiveram dados de secagem em um tambor rotatório com 0,2 m de diâmetro e 1,22 m de comprimento provido de seis ou doze suspensores (os suspensores possuíam ângulo de 120° entre os segmentos). A velocidade do tambor era mantida constante a 4,3 rpm e a inclinação era variada de 1,8 a 3,6°. Foram utilizados dois tamanhos de suspensores, e na maioria das corridas o fluxo de gás e de sólidos era contracorrente. Todas as experiências foram realizadas sob condições de carregamento ótimo do secador.

MILLER (1942), obtiveram as seguintes correlações para o coeficiente volumétrico de transferência de calor:

para seis suspensores:

$$K_v = 0,652 (G - 1)^{-1} V^{0,46} \quad (2.74)$$

para doze suspensores:

$$K_v = 0,145 (G - 1)^{-1} V^{0,6} \quad (2.75)$$

em que K_v é dado em $W/m^3 K$; V e G são dados em metros e o fluxo mássico de ar é dado em $kg/m^2 h$.

O fluxo de calor nestas equações foi determinado como sendo independente da velocidade e inclinação do tambor, e conseqüentemente do tempo de residência. Os autores notaram que aumentando o fluxo mássico de ar a eficiência do secador também era aumentada.

FRIEDMAN e MARSHALL (1949) realizaram experimentos em um secador de 0,3 m por 1,83 m. Por meio de isolamento extensivo da unidade, eles reduziram as perdas de calor do secador em aproximadamente 15%. Esforço considerável foi realizado para obter medidas precisas da temperatura dos sólidos, gases e da carcaça ao longo do comprimento do secador. Apesar destas preocupações, foram obtidos resultados irregulares para as temperaturas do ar. Como conseqüência, as temperaturas do ar foram calculadas indiretamente por meio do balanço de energia.

FRIEDMAN e MARSHALL (1949) propuseram que o coeficiente global de transferência de calor em secadores do tipo rotatório pode ser expresso por correlações do tipo:

$$h = \dots \quad (2.76)$$

em que G e v são as taxas mássicas de sólido e fluido, respectivamente. D , μ e ρ são parâmetros.

SAEMAN e MICHELL (1954) postularam que a transferência de calor, em secadores rotatórios e refrigeradores, acontecem principalmente entre os sólidos em queda e o ar que passa através destes. Segundo eles a massa de ar alcança rapidamente equilíbrio térmico com a superfície das partículas. Por meio de medidas experimentais de temperaturas feitas em um refrigerador de 1,83 m de diâmetro, estes autores constataram que a temperatura do ar próxima ao fundo do tambor era consideravelmente mais alta do que no topo.

Concluíram ainda que a taxa de transferência de calor depende em grande parte da taxa de material em queda na cascata e da quantidade de ar que entra no secador e passa através do fluxo de material em queda do suspensor. A taxa de queda de material dos suspensores é, principalmente, uma função do tamanho e do número de suspensores, da carga e da rotação do secador. Como resultado desta análise propuseram a seguinte Equação para a transferência de calor:

$$h = 18,6 \left[0,6 + 2,5 \exp(-15,7 \dots) \right] \quad (2.77)$$

em que L é dado em metros e E é dado em (kJ/mKh). E é calculada através Equação 2.78.

$$E = 60 \cdot \dots \quad (2.78)$$

sendo V dado em (m²/h), N é o numero de suspensores, R é dado em r.p.m., e V_s é o volume de material contidos nos suspensores por metros (m³/m).

Através de análise experimental SAEMAN e MICHELL (1954) relacionaram o coeficiente de transferência de calor por unidade de comprimento do secador e não por unidade de volume:

$$h = \Delta \quad (2.79)$$

em que h tem as unidades W/(m²K). Uma comparação entre as Equações 2.73 e 2.79 indica que h e Δ estão relacionadas pela expressão:

$$h = \frac{(\pi \dots)^2}{4} \quad (2.80)$$

McCORMICK (1962), com base nos dados obtidos por MILLER (1942), FRIEDMAN e MARSHALL (1949), SAEMAN e MITCHELL (1954), com o propósito de obter

uma única correlação para o coeficiente volumétrico de transferência de calor, assumiu que poderia ser escrito da seguinte maneira:

$$= \text{---} \quad (2.81)$$

McCORMICK (1962) verificou que todos os dados experimentais analisados por ele poderiam ser correlacionados com $0,46 < < 0,67$. Embora a evidência estivesse longe de ser conclusiva, ele acreditou que um valor de 0,67 para era mais razoável. O parâmetro mostrou ser uma função das propriedades dos sólidos, da geometria do suspensor, da aceleração rotacional e da carga do secador, cujo valor adotado é de 0,54. é dado em (kg/m²h), em (m) e em (W/m³K). LISBOA (2005), após realizar testes em planta piloto de fertilizantes, encontrou valores de igual a 0,8 e igual a 1,72 para a mesma equação, no entanto com em kg/min e em kJ/m³min°C.

Para a quantidade de calor trocado em um secador rotatório com contato direto McCORMICK (1962) sugeriu a seguinte Equação:

$$= ' \Delta \quad (2.82)$$

Este mesmo autor também comentou que testes futuros deveriam ser realizados para determinação do efeito da velocidade do gás sobre para o caso de suspensores sobrecarregados. Sugeriu também que uma correlação ampla levaria a forma:

$$= ' \Delta () () () () \quad (2.83)$$

na qual a constante de proporcionalidade é principalmente uma função das propriedades dos sólidos a serem secos.

MYKLESTAD (1963) realizou experimentos em um secador de 0,2 m de diâmetro por 2 m de comprimento que continha suspensores angulares, com ângulo entre os segmentos igual a 135°. Os dados obtidos experimentalmente foram correlacionados pela Equação:

$$= 0,60^{0,8} \quad (2.84)$$

em que é dado em W/m³K e em kg/m²h. Observa-se nesta Equação que o coeficiente volumétrico de transferência de calor é independente do diâmetro do secador.

DOUGLAS (1993) aplicou um modelo matemático baseado em balanços diferenciais de massa e energia para o controle dinâmico de um secador rotatório na secagem de açúcar granular. Este modelo usou um coeficiente volumétrico de transferência de calor correlacionado empiricamente com o fluxo de gás quente, :

$$= 0,247 \left(\frac{\quad^*}{\rho} \right)^{0,5} \quad 0,16 \quad (2.85)$$

Mesmo com a complexidade de se identificar a área efetiva de contato entre os gases e os sólidos, autores como KAMKE e WILSON (1986); RANS e MARSHALL (1952) e HIROSUE e SHINOHARA (1978) ainda assim propuseram equações para a determinação do coeficiente de troca térmica utilizando-se deste parâmetro.

2.8- Umidade de equilíbrio

Imediatamente após o contato entre o material sólido e os gases de secagem, a temperatura dos sólidos ajusta-se até atingir um regime permanente. A temperatura dos sólidos e a velocidade (taxa) de secagem podem aumentar ou diminuir para chegarem às condições do regime permanente, no qual a temperatura da superfície dos sólidos úmidos será a temperatura de bulbo úmido do meio secante. As temperaturas no interior dos sólidos tendem a ser iguais a temperatura de bulbo úmido dos gases, mas a concordância entre elas é imperfeita em virtude das defasagens entre o movimento de massa e o de calor.

Quando o sólido úmido fica em contato com o ar de menor umidade, este tende a perder umidade e secar até alcançar o equilíbrio com o ar. Quando a umidade do ar é superior a de equilíbrio com o sólido, este absorve umidade do ar até se alcançar o equilíbrio.

A umidade de equilíbrio (M^*) é, portanto, a umidade do sólido que está em equilíbrio com o vapor contido no meio de secagem, ou seja, é a porção de água contida no sólido úmido que não pode ser separada pelos gases. Os gases que passam no secador dificilmente é totalmente isento de umidade (seco). A quantidade de umidade retida em um sólido, em equilíbrio com um gás úmido, depende da estrutura do sólido, da temperatura dos gases e do teor de umidade dos gases. A diferença entre o teor total de umidade do sólido e o teor de umidade no equilíbrio é chamada de umidade livre do sólido,

Segundo BARROZO (1995) as duas técnicas clássicas de determinação da umidade de equilíbrio são denominadas de método estático e método dinâmico. Na primeira técnica, o material é exposto ao ar sem movimento (estático). Na segunda o material fica exposto a fluxo de ar dinâmico. A vantagem do método estático se deve a maior facilidade de obter condições de equilíbrio termodinâmico.

Pelo primeiro método, as isotermas de equilíbrio podem ser conseguidas através da utilização de soluções salinas saturadas para a regulação da pressão de vapor nas vizinhanças dos

grãos analisados. O uso de soluções salinas é mais comum devido à segurança no manuseio e à maior facilidade de manter a umidade relativa constante. Se houver evaporação da água, alguns sais precipitarão, mas a umidade relativa não irá modificar (LABUZA, 1985 e BARROZO, 1995). Soluções ácidas podem também ser usadas, no entanto há dificuldades com o manuseio e na estabilidade da umidade relativa.

Há um grande número de equações teóricas (baseadas em teorias cinéticas de adsorção), semi-empíricas e empíricas para determinação da umidade de equilíbrio de materiais biológicos.

Os modelos teóricos (exemplos: KELVIN, LANGMUIR, BET) não conseguem prever com precisão a umidade de equilíbrio para grãos em uma ampla faixa de temperatura de umidade relativa. Estes modelos são bastante específicos os quais aplicações podem encontradas em trabalhos como BROOKER (1974) e BARROZO (1995).

Assim, há uma série de modelos empíricos e semi-empíricos que buscam maior precisão na estiva deste parâmetro. As principais equações utilizadas são conforme apresentadas na Tabela 2.2 a seguir:

Tabela 2.2: Equações para umidade de equilíbrio (BARROZO, 1995).

Nome	Equação	Referência
HENDERSON	$* = \left[\frac{\ln(1 - \frac{a}{b})}{-c} \right]^{1/2}$	HENDERSON (1952)
HENDERSON-THOMPSON	$* = \left[\frac{\ln(1 - \frac{a}{b})}{-c \cdot (d + e)} \right]^{1/2}$	THOMPSON (1968)
CHUNG-PFOST	$* = \frac{-1}{c} \cdot \ln \left(\frac{(d + e) \cdot \ln(\frac{a}{b})}{-} \right)$	CHUNG e PFOST (1967)
CHEN-CLAYTON	$* = \frac{-1}{c} \cdot \ln \left(\frac{\ln(\frac{a}{b})}{-} \right)$	CHEN e CLAYTON (1971)
HALSEY modificada	$* = \left[\frac{-\exp(-c \cdot d + e)}{\ln(\frac{a}{b})} \right]^{1/2}$	OSBORN (1989)

Uma das expressões mais conhecidas para previsão da umidade de equilíbrio é a Equação de HENDERSON (1952), que é baseada no modelo de adsorção de Gibbs. Esta Equação foi considerada inadequada para grãos e então surgiram alterações empíricas como, por exemplo, a Equação de THOMPSON (1968). Da mesma maneira para outras equações originou-se a Equação

de CHUNG e PFOST (1967) que, segundo BROOKER (1974), é adequada para grãos em uma faixa de umidade relativa do ar entre 20 e 90%.

Também a Equação de CHEN e CLAYTON (1971) foi gerada por modificações empíricas da Equação de HENDERSON (1952). A Equação de HALSEY modificada (OSBORN, 1989) tem como origem o modelo teórico BET aliada a hipótese de interação de moléculas adsorvidas na multicamada.

ARRUDA (2008) analisou a aplicação das equações da Tabela 2.2 para previsão da umidade de equilíbrio de fertilizantes granulados e observou que a Equação de HALSEY modificada foi a que melhor se adequou aos dados experimentais de umidade de equilíbrio obtido pelo método estático. A Equação de HALSEY com os parâmetros estimados por ARRUDA (2008) é apresentada a seguir:

$$* = \left[\frac{-\exp(-0,044 \cdot + 2,080)}{\ln()} \right]^{1/1,435} \quad (2.86)$$

2.9- Cinética de secagem

A secagem de um determinado material pode ocorrer em dois ou mais períodos distintos. Inicialmente, para materiais que possuem alto teor de umidade, ocorre um período durante o qual a taxa de secagem é constante. Este período é observado em condições em que a resistência interna ao transporte de umidade é muito menor que a resistência externa de remoção de voláteis da superfície. Em seguida, são observados um ou mais períodos em que a taxa de secagem decresce continuamente. Nas vizinhanças entre estes períodos tem-se o teor de umidade do sólido conhecida por umidade crítica.

Vários mecanismos de difusão são propostos na literatura para descrever a transferência de umidade do interior dos sólidos para sua superfície:

- escoamento capilar do líquido;
- difusão do vapor devido à diferença de concentração;
- difusão térmica do vapor;
- difusão de Knudsen;
- movimento de líquido e vapor devido à diferença de pressão total.

Uma teoria bastante difundida na literatura foi proposta por LUIKOV (1966) para a secagem de materiais capilares porosos, baseado nos mecanismos anteriormente citados.

A obtenção experimental da cinética de secagem é feita normalmente em camada fina. Nos experimentos em camada fina, ar em condições constantes de umidade, temperatura e fluxo mássico atravessa uma fina camada do material úmido. O comportamento do material é então observado por um determinado período de tempo. Os modelos clássicos de secagem em camada fina, isoladamente, não descrevem corretamente o processo de transferência de calor e massa em camadas espessas, uma vez que os balanços de massa e energia da fase gasosa não são considerados. Entretanto estes estudos são indispensáveis na predição de equações para a taxa de secagem, utilizadas na modelagem dos fenômenos de transferência em leitos de camada espessa.

Alguns pesquisadores preferem tratar o problema da secagem de grãos em camada fina, utilizando equações semi-empíricas, geralmente oriundas do modelo difusivo, ou ainda de analogias com outros fenômenos. A Tabela 2.3 apresenta as equações de secagem semi-empíricas mais utilizadas para grãos.

Tabela 2.3: Equações de secagem semi-empíricas mais utilizadas para grãos.

Equação	Referência
$MR = \exp(-Kt)$, sendo, $K = A \exp(-B/T_f)$	LEWIS (1921)
$MR = C \exp(-Kt)$, sendo, $K = A \exp(-B/T_f)$	BROOKER . (1974)
$MR = C \left[\exp(-Kt) + \frac{1}{9} \exp(-9Kt) \right]$, sendo, $K = A \exp(-B/T_f)$	HENDERSON e HENDERSON (1968)
$MR = \exp(-Kt^n)$, sendo, $K = A \exp(-B/T_f)$	PAGE (1949)
$MR = \exp(-Kt^n)$, sendo, $K = \exp(A+B/T_f)$	OVERHUTS . (1973)

Fazendo analogia com a lei de Newton do resfriamento temos a Equação proposta por LEWIS (1921). As Equações propostas por BROOKER . (1974) e HENDERSON e HENDERSON (1968) podem ser vistas como simplificações da solução analítica do modelo difusivo, onde somente o primeiro e os dois primeiros termos da série são considerados,

respectivamente. As Equações de PAGE (1949) e OVERHUTS (1973) são oriundas de modificações empíricas da Equação de Lewis (1921).

O parâmetro K, apresentado nestas equações, é conhecido como constante e secagem e no caso dos trabalhos que utilizam equações oriundas do modelo difusivo, é comum encontrar a seguinte relação de K com a difusividade efetiva:

$$= \frac{\pi^2}{2} \quad (2.87)$$

As utilizações das equações empíricas frequentemente fornecem bons resultados no comportamento da secagem de grãos. Entretanto, os parâmetros destas equações têm validade restrita à faixa de condições experimentais em que foram estimados.

ARRUDA (2008) analisou a aplicação das equações da Tabela 2.3 para previsão da cinética de secagem de fertilizantes granulados e observou que a Equação de PAGE (1949) foi a que melhor se adequou aos dados experimentais obtidos em camada fina. A Equação de PAGE (1949) com os parâmetros estimados por ARRUDA (2008) é apresentada a seguir:

$$MR = \exp(-K \cdot t^{0,424}) \quad (2.88)$$

sendo

$$K = 0,304 \exp(-128,282 / T_f) \quad (2.89)$$

2.10- Modelagem de secagem ARRUDA (2008)

O Modelo de ARRUDA (2008) foi desenvolvido com o objetivo de estimar os perfis de temperatura e umidade do sólido e do ar de secagem em secadores rotatórios de contato direto. A Figura 2.9 mostra o esquema do elemento infinitesimal de volume de um secador rotatório operando com fluxo concorrente sobre o qual foram realizados os balanços de massa e energia para esta metodologia.

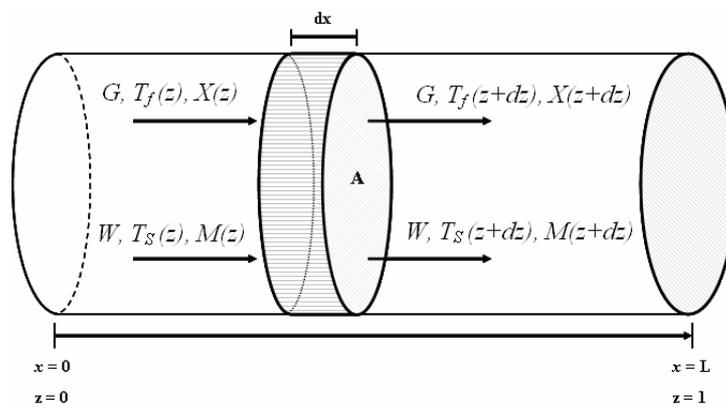


Figura 2.9: Esquema do elemento de volume com operação concorrente.

As variáveis são definidas como: c_p é calor específico (kJ/kg°C), D é o diâmetro interno do tambor (m), G é vazão mássica de gases (kg/s), W é vazão mássica de sólidos (kg/s), M é carga total do secador (kg), X é a umidade do sólido (kg/kg), R é a taxa de Secagem (s⁻¹), T é temperatura (°C), U é o coeficiente global de transferência de calor (kJ/sm³°C), V é o volume do tambor (m³), X_a é a umidade absoluta do ar (kg/kg), (x, y) é uma coordenada cartesiana, τ é o tempo de residência dos sólidos no secador (s), λ é calor latente de vaporização da água (kJ/kg), $Q_{p,s}$ são perdas de energia na troca térmica (kJ/m²), subscripto significa o material sólido, para o gases, o material líquido (água) e o vapor.

Os equacionamentos propostos e implementados na metodologia seguem abaixo:

1) Variação da umidade do ar com o comprimento do secador:

$$\frac{dX_a}{dz} = \frac{+}{V} \quad (2.90)$$

2) Variação da umidade do sólido com o comprimento do secador:

$$\frac{dX}{dz} = \frac{-}{V} \quad (2.91)$$

3) Variação da temperatura do ar com o comprimento do secador:

$$\frac{dT_g}{dz} = \frac{-[\rho_g (T_g - T_s) + (\lambda + c_{p,s} T_s) + \pi (T_g - T_s)]}{V} \quad (2.92)$$

4) Variação da temperatura do sólido com o comprimento do secador:

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{[\rho_s (T_g - T_s) + \lambda + c_{p,s} T_s]}{V} \quad (2.93)$$

A taxa de secagem pode ser relacionada com o adimensional de umidade (X^*), as umidades inicial e de equilíbrio, o tempo de residência e o comprimento do secador, por meio da seguinte expressão:

$$X^* = \frac{(1 - X/X_e)(X_0 - X_e^*)}{\tau} \quad (2.94)$$

em que a equação para previsão de X^* foi obtida por ARRUDA (2008) por meio de um estudo de cinética de secagem em camada fina. A Equação que melhor representou os dados cinéticos de ARRUDA (2008) foi a de PAGE, 1949 (Tabela 2.3), conforme apresentada nas Equações 2.88 e

2.89. A melhor expressão encontrada para a predição da umidade de equilíbrio () por ARRUDA (2008) foi a de HALSEY modificada (Tabela 2.2), conforme apresentada na Equação 2.86.

2.11- Metodologia de projeto de secadores

2.11.1- Metodologia I

A denominada Metodologia I (CRISTO, 2004) de dimensionamento de secadores rotatórios tem como ponto de partida o trabalho de VAN'T LAND (1991). As principais restrições constituem apresentar boa funcionalidade para altas temperaturas e não aceitar a condição da matéria sólida se resfriar durante a secagem.

Para iniciar o método é preciso conhecer a temperatura e a pressão ambiente, (K) e (Pa); as temperaturas de entrada do ar e do sólido, (K) e (K); o calor específico do sólido, (J/kg K); as umidades de entrada e saída, (-) e (-); a vazão de sólido úmido na saída (kg/s) e o grau de enchimento do secador, (-). O primeiro passo é determinar a quantidade de água evaporada no processo, (kg/s):

$$= \quad (2.95)$$

$$= - \quad (2.96)$$

$$= \frac{0}{(1 - 0)} \quad (2.97)$$

$$= 0 - \quad (2.98)$$

em que é a vazão de sólido seco (kg/s) e e (kg/s) as vazões de água presente no material na entrada e na saída do secador, respectivamente.

Para efetuar o balanço de energia, a temperatura de saída do ar é calculada por uma equação linear em função da temperatura de entrada (). Para determinar os coeficientes desta Equação VAN'T LAND (1991) usou uma série de temperaturas de secadores operando em co-corrente, contra-corrente, corrente de ar indireta (sem contato com o sólido) e injeção cruzada.

Na Figura 2.10 são mostrados os valores apresentados pelo autor. Os valores de a e b (temperaturas em K) para a reta apresentada pelo autor são de 0,0495 (-) e 336,91 (K)

respectivamente, com uma correlação linear de 0,916. A correlação encontrada pelo autor foi feita com 11 pontos. CRISTO (2004) propõe os valores de a e b conforme Equação apresentada a seguir:

$$= 0,05 \quad + 337,66 \quad (2.99)$$

em que os subscritos e representam entrada e saída.

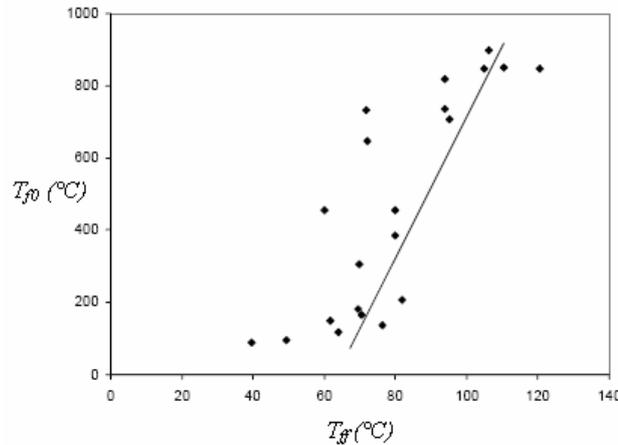


Figura 2.10: Dados para a determinação da de secagem.

Os calores necessários para a secagem, (J/s); para o aquecimento do sólido, (J/s), para o aquecimento da umidade até a temperatura de saída do ar, (J/s), e o calor total (J/s), são dados pelas Equações conforme apresentadas a seguir:

$$_1 = (\lambda() + (-) - (-)) \quad (2.100)$$

$$_2 = (-) \quad (2.101)$$

$$_3 = (-) \quad (2.102)$$

$$_1 = _1 + _2 + _3 \quad (2.103)$$

$$_2 = \frac{_1(-)}{ - } 1,25 \quad (2.104)$$

sendo e (J/kg K) as capacidades térmicas do vapor e da água líquida respectivamente; (J/s) é a soma dos 3 calores; λ (J/kg) é o calor latente de evaporação da água, e o valor que multiplica na Equação 2.104 é um valor de correção para compensar as perdas térmicas para o ambiente.

A vazão de ar na entrada do secador à temperatura e dado pela Equação abaixo e deve ser suficiente para fornecer o calor necessário à secagem, considerando as perdas:

$$_1 = \frac{2}{(-)} \quad (2.105)$$

Para a determinação do diâmetro do secador, D (m), é necessário determinar a vazão do ar na temperatura de saída, G'_2 ; e incluir a umidade removida do sólido nesta vazão, G_2 .

$$v'_2 = \frac{v_2}{(1 - \phi_2)} 1,2 \quad (2.106)$$

$$G_2 = v'_2 + \quad (2.107)$$

$$v_2 = \frac{G_2}{\rho} + \frac{\quad}{\rho} \quad (2.108)$$

em que ρ_r (kg/m^3) é a densidade do ar que deve ser calculada na temperatura ambiente e o valor de 1,2 na Equação 2.106 é um parâmetro de correção para compensar as entradas de ar falso que possam existir no secador, v_2 (m^3/s) é a vazão volumétrica de ar úmido na saída onde a densidade e a capacidade térmica do ar devem ser calculadas com base na temperatura de saída do ar.

O diâmetro do secador é calculado com base na velocidade de escoamento do ar na área livre do secador, v (m/s). Essa velocidade é obtida de acordo com o material e condições de operação, sendo os valores de 0,5 a 2 m/s os recomendados. O diâmetro do secador é dado então por:

$$D = \sqrt{\frac{4 v_2}{0,85 \pi}} \quad (2.109)$$

sendo que o valor 0,85 é para compensar uma ocupação máxima de 15 % da área do secador pelo sólido, ou seja, o grau de enchimento do secador, f (-).

O comprimento do secador, L (m); o número de suspensores, N (-) e a profundidade dos suspensores, l (m); são dados em função do diâmetro conforme apresentado abaixo:

$$L = 7 D \quad (2.110)$$

$$7,87 \leq N \leq 9,84 \quad (2.111)$$

$$0,083 \leq l \leq 0,125 \quad (2.112)$$

VAN'T LAND (1991) ainda recomenda os valores de 0° a 5° para a inclinação do secador; e de 0,1 a 0,5 m/s para a velocidade periférica do cilindro, sendo mais comuns os valores de 0,35 a 0,4 m/s.

A seguir temos a Figura 2.11 que ilustrativa esquematicamente a aplicação da Metodologia I.

Figura 2.11: Ilustração da aplicação da Metodologia I em projeto de Secadores.

2.11.2- Metodologia II

A chamada Metodologia II (CRISTO, 2004) de projeto de secadores rotatórios utiliza balanços de massa e energia em varias seções do secador. Esta metodologia tem como referência o trabalho de NONHEBEL E MOSS (1971). Há balanços específicos para as etapas de aquecimento, secagem a taxa constante e secagem a taxa decrescente. A metodologia não presume o conhecimento da curva de secagem do material, impondo a secagem do mesmo pelo emprego de coeficientes de transferência de massa empíricos, que, por sua vez, estão atrelados ao balanço de energia por correlações de analogia com a transferência de calor. O método não é aplicável para secadores em fluxo contracorrente e é necessária a especificação da condição de saída da umidade do ar, parâmetro que não é fácil de se prever, uma vez que depende de um conjunto de fatores.

Para o desenvolvimento da metodologia é neces

em que T_{max} (K) é a temperatura máxima que o sólido pode atingir ou a temperatura máxima que o ar pode ser aquecido, T_s (K) a temperatura do sólido, T_a (K) a temperatura do ar e o valor de 10 K é sugerido pelo autor como uma diferença que gera um gradiente de temperatura suficiente para uma boa troca de calor. Para os balanços, NONHEBEL E MOSS (1971) trabalham com pressão parcial e umidade relativa para representar a umidade do ar. Como os métodos psicrométricos se limitam a temperaturas inferiores a cerca de 200 °C esses valores serão substituídos pela umidade absoluta em base seca. Uma outra mudança é o uso de vazão em massa no lugar da vazão em volume usada por NONHEBEL E MOSS (1971). Para um cálculo correto do balanço de massa seria necessário o cálculo da densidade do ar em todos os pontos o que pode ser evitado com o uso da vazão em massa, que não é alterada com a variação da temperatura.

A vazão de sólido seco, \dot{m}_s (kg/s); as umidades de entrada e saída do sólido, X_1 (-); e do ar, X_2 (-); e as temperaturas de entrada devem ser conhecidas. Com isso, é possível determinar a vazão de ar seco, \dot{m}_a (kg/s); e a temperatura de entrada do ar:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_s (X_2 - X_1)}{(X_1 - X_2)} \quad (2.115)$$

$$\dot{m}_s (c_{ps} + X_1 c_{pw}) + \dot{m}_a (c_{pa} + X_1 c_{pw}) = \lambda (X_2 - X_1) + \dot{m}_a (c_{pa} + X_2 c_{pw}) \quad (2.116)$$

sendo que c_{ps} , c_{pw} e c_{pa} (J/kg K) são as capacidades térmicas do ar seco, vapor, sólido seco e água líquida respectivamente; e λ (J/kg) o calor latente de evaporação da água tomado na temperatura média do sólido. A Equação 2.116 deve ser resolvida de forma iterativa se for considerada a variação da capacidade térmica com a temperatura.

O diâmetro, D (m), pode ser calculado em função da velocidade de escoamento do ar no secador:

$$D = \frac{\dot{m}_a}{\rho} (1 + X_2) \quad (2.118)$$

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{\dot{m}_a}{\rho} (1 + X_2)} \quad (2.119)$$

em que ρ (kg/m³) é densidade do ar úmido, \dot{m}_a (m³/s) a vazão volumétrica do ar úmido na saída do secador, v (m/s) a velocidade do ar e ϕ (-) o grau de enchimento. O valor do comprimento do secador, L (m), será a soma dos comprimentos necessários para completar cada etapa de secagem, e deve ser calculado com base no coeficiente de transferência de calor por unidade de comprimento, h_L (J/m s K).

O coeficiente de transferência de calor usado é o coeficiente por unidade de volume do secador, $(J/m^3 s K)$, que deve ser transformado em h multiplicando-o pela área:

$$h = 4 \pi^2 \quad (2.120)$$

O comprimento para cada seção é dado por:

$$L_i = \frac{Q_i}{h \Delta T_i} \quad (2.121)$$

em que i representa o índice da seção, Q_i (J/s) o calor fornecido ao sólido e ΔT_i (K) a média logarítmica da diferença de temperatura entre o ar e o sólido.

Para a etapa de pré-aquecimento, L_0 pode ser calculado por:

$$L_0 = \frac{Q_0}{h_0 (T_{a0} - T_{s0})} \quad (2.122)$$

As temperaturas T_{s1} e T_{f1} devem ser encontradas iterativamente por:

$$Q_0 (T_{a0} - T_{s0}) + Q_0 (T_{a0} - T_{f0}) = Q_1 (T_{a1} - T_{s1}) + Q_1 (T_{a1} - T_{f1}) \quad (2.123)$$

sendo T_{f0} a temperatura de bulbo úmido, que é função de T_{s0} ; e as umidades w_0 e w_1 tendo os mesmos valores de w_{s0} e w_{s1} , pois é considerado que não há secagem neste estágio.

Para a seção de secagem a taxa constante, as equações para calcular L_1 e a temperatura do ar são:

$$L_1 = \lambda (T_{a1} - T_{a2}) \quad (2.124)$$

$$Q_1 (T_{a1} - T_{s1}) + Q_1 (T_{a1} - T_{f1}) = Q_2 + Q_2 (T_{a2} - T_{s2}) + Q_2 (T_{a2} - T_{f2}) \quad (2.125)$$

em que w_c é a umidade crítica, separação entre secagem a taxa constante e secagem a taxa decrescente, $w_c = w_{s1}$ por ser secagem de bulbo úmido e L_1 pode ser encontrada pelo balanço de massa:

$$L_1 + w_{s1} = L_2 + w_{s2} \quad (2.126)$$

A seção de secagem a taxa decrescente é dividida em vários intervalos. Cada intervalo considera uma taxa decrescente linear. Nestes intervalos, as temperaturas do sólido e do ar, o comprimento e o valor de L_i não são conhecidos, e portanto é necessário um método iterativo para a resolução. Como L_i depende somente das temperaturas T_{a1} e T_{s1} e não de w_i , em que i indica o intervalo de cálculo, o sistema pode ser resolvido pois se tem 3 variáveis (L_i , T_{a1} e T_{s1}), e três Equações.

A primeira Equação é o balanço de energia, da qual é possível calcular λ_i :

$$\lambda_i \left(\frac{1}{\rho_i} + \frac{1}{\rho_{i+1}} \right) + \frac{1}{\rho_{i+1}} \left(\frac{1}{\rho_i} + \frac{1}{\rho_{i+1}} \right) = \dots \quad (2.127)$$

$$\lambda_i \left(\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_{i+1}} \right) - \frac{1}{\rho_{i+1}} \left(\frac{1}{\rho_i} + \frac{1}{\rho_{i+1}} \right) = \dots \quad (2.128)$$

sendo λ_i calculado pelo balanço de massa:

$$\lambda_i + \lambda_{i+1} = \lambda_{i+1} + \lambda_{i+2} \quad (2.129)$$

A segunda Equação é o cálculo do comprimento pela Equação 2.121.

A terceira é o cálculo do comprimento pelo coeficiente de transferência de massa por unidade de comprimento k_L (kg/m s):

$$\lambda_i = \frac{\rho_i - \rho_{i+1}}{k_L} \quad (2.130)$$

O coeficiente de transferência de massa por unidade de comprimento, k_L , não é comumente encontrado, o mais comum é encontrar valores para o coeficiente por unidade de massa k (kg/kg s), que deve ser dado em função das umidades em base seca e pode ser transformado em k_L por:

$$k_L = \frac{\pi}{4} \rho \quad (2.131)$$

em que ρ (kg/m³) é a densidade bulk do sólido. O valor de k_L será dado pela soma dos valores de k em cada divisão. É comum que a secagem não envolva todas as etapas, se só existir secagem a taxa decrescente, por exemplo, pode-se ignorar os cálculos das etapas de pré-aquecimento e secagem a taxa constante e usar i de 0 a n .

A seguir temos a Figura 2.12 que ilustrativa esquematicamente a aplicação da Metodologia II.

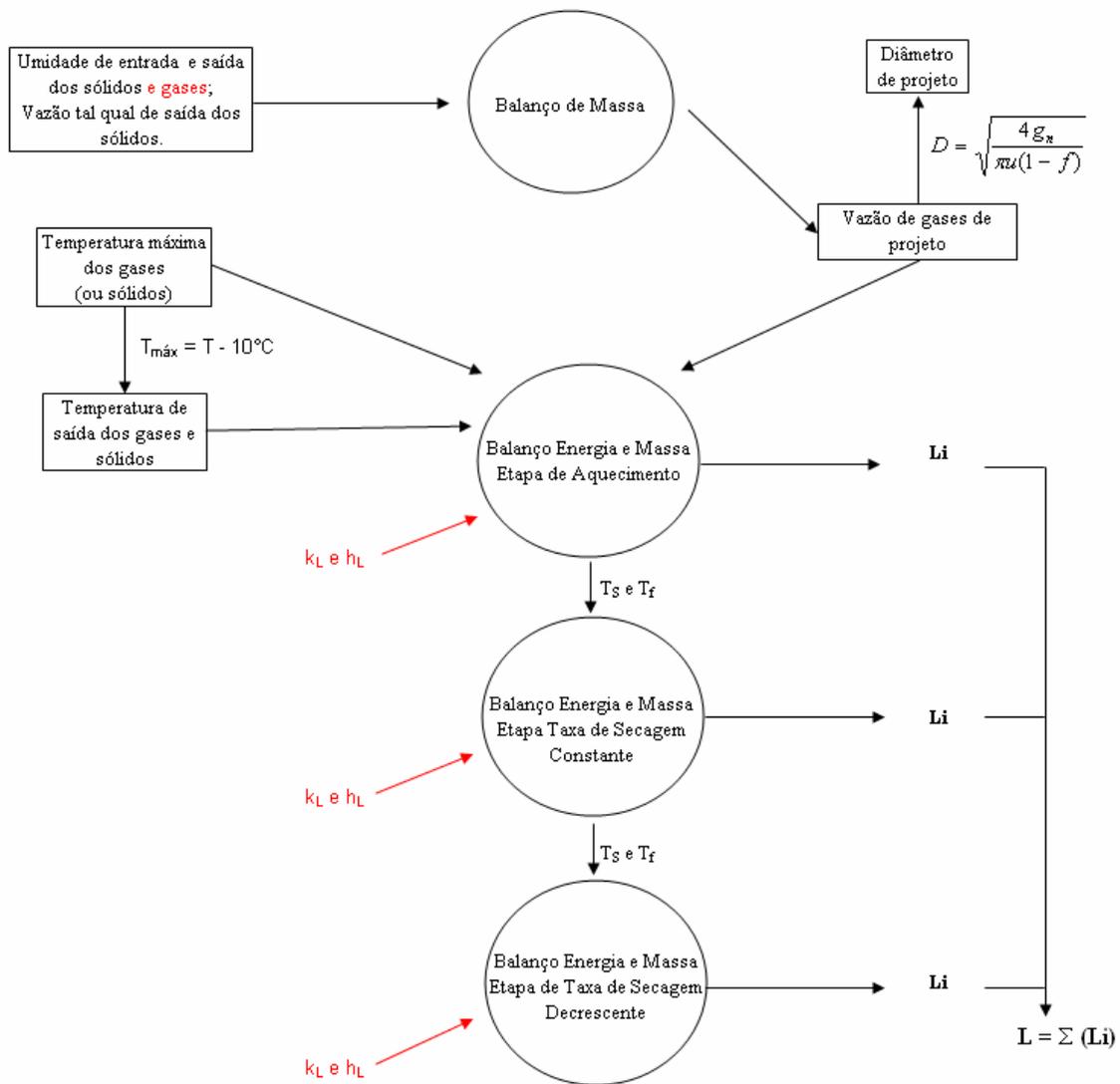


Figura 2.12: Ilustração da aplicação da Metodologia II em projeto de Secadores.

CAPÍTULO 3

MATÉRIAS E MÉTODOS.

3.1- Materiais

Para a realização dos experimentos de Secagem foi utilizado como produto de secagem o fertilizante GTSP (Superfosfato Triplo Granulado). Este produto é resultado da granulação do fertilizante TSP (Superfosfato Triplo), que é produzido através a reação de concentrado fosfático com ácido fosfórico e vapor d'água. O GTSP foi escolhido para a realização dos experimentos por caracterizar no segmento como um dos granulados de maior dificuldade de secagem.

O material para secagem (GTSP antes do processo de peneiramento) e dados experimentais foram obtidos através da empresa Copebrás Ltda. em Catalão-GO, uma empresa do grupo Anglo American plc.

As características físico-químicas do fertilizante granulado GTSP foram analisadas e suas propriedades apresentadas conforme Tabela 3.1 abaixo:

Tabela 3.1: Propriedades do GTSP

Propriedades	d_p (mm)*	ρ_s (g/cm ³)	ρ_b (g/cm ³)	c_s (kcal/kg°C)**
Valor	1,8 (3,5 rpm) 3,1 (4,2 rpm)	1,05	1,95	0,31

* diâmetro de Sauter (Anexo A.2)

** calorimetria

Para a Secagem do GTSP foi utilizado ar quente proveniente da queima de cavaco de madeira em fornalha industrial. As propriedades deste combustível (madeira) são apresentadas na Tabela 3.2 abaixo.

Tabela 3.2: Propriedades do cavaco de madeira

Propriedades	ρ_c (g/cm ³)	Umidade	PCI _c b.s. (kJ/kg)*
Valor	0,25	20,70%	17.798

* calorimetria

As condições ambientes durante a realização dos testes são apresentadas conforme Tabela 3.3 abaixo.

Tabela 3.3: Condições ambientais durante a realização dos testes.

Rotação: 3,5 rpm

Pressão atmosférica:	695,8	mmHg
Temperatura ambiente:	24,3	°C
Umidade absoluta ambiente:	0,00660	kg água/ kg ar seco

Rotação: 4,2 rpm

Pressão atmosférica:	693,8	mmHg
Temperatura ambiente:	28,5	°C
Umidade absoluta ambiente:	0,00848	kg água/ kg ar seco

3.2- Unidade experimental

Os experimentos foram realizados em um secador industrial convencional para este tipo de aplicação (secagem de fertilizantes granulados), ou seja, secador rotatório de secagem direta concorrente e com cascadeamento.

Abaixo segue na Figura 3.1 uma foto do secador utilizado nos testes bem como em seguida uma pequena descrição da operacionalidade deste equipamento.



Figura 3.1: Secador rotatório industrial.

O ar de secagem (em torno de 1100 °C) é aquecido através da queima de cavacos de madeira em uma fornalha. Estes gases são direcionados para o secador através da depressão provocada por um exaustor localizado após o secador. As cinzas provenientes da combustão do cavaco são retiradas por uma corrente transportadora no fundo da fornalha.

O material úmido do granulador é alimentado no secador rotatório através de uma calha de aço inox oca refrigerada por ar ambiente forçado. Além disso, a calha é revestida com cerâmica refratária para garantir a integridade da mesma frente à exposição a altas temperaturas.

Na entrada do secador existe um helicóide que acelera o carregamento do material para a região de secagem. O cascadeamento do material na câmara cilíndrica varia ao longo do comprimento do secador pelo efeito das suspensores internos, proporcionando uma secagem gradual.

Os suspensores devem estar todos em bom estado e limpos para operarem nas condições de projeto. Estas condições podem ser avaliadas pela diferença de temperatura de saída dos gases e dos sólidos, que devem permanecer em torno de 10°C. Ocorrendo uma elevação nesta diferença, mantida as outras condições de operação, estará havendo uma má operação dos suspensores do secador (Conservação de Energia na Indústria de Fertilizante, 1985).

Na extremidade oposta à alimentação, existe um vaso separador (capela) sendo o produto seco descarregado pelo fundo e o gás de secagem contendo finos arrastados pelo topo. Os grumos são encaminhados para um equipamento chamado degrumador enquanto que o restante do material vai diretamente para a próxima etapa.

Na exaustão do secador, os gases são forçados a passar em uma bateria de 6 ciclones (com sistemas de correntes auto-limpantes). O pó coletado vai para o circuito de reciclo e o gás vai para uma estação de lavagem de gases.

Entradas de ar falso (indesejados ao processo de secagem) são normalmente presentes em vários pontos do circuito de secagem.

A Figura 3.2 a seguir ilustra o texto acima:

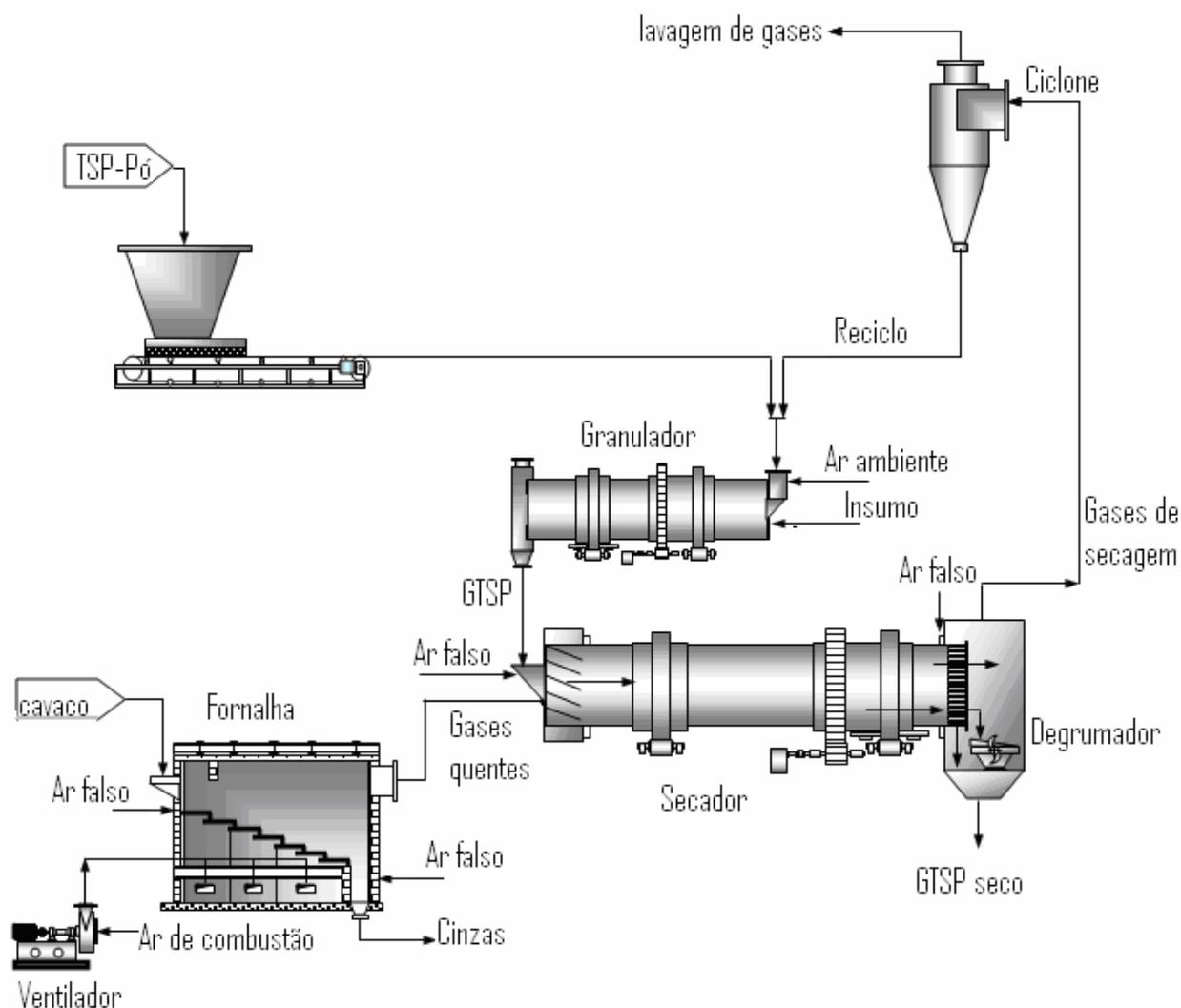


Figura 3.2: Ilustração esquemática da operação de secagem.

Fonte: Consultoria Tecplan (Araxá - MG)

3.2.1- Informações construtivas do secador

O secador é do tipo tambor rotatório com diâmetro interno de 3,0 m e comprimento de 30,0 m. Possui um ângulo de inclinação de 2,5° e sua rotação de projeto é de 3 rotações por minuto. Sua capacidade de projeto é de 120 toneladas por hora, e os produtos processados são GSSP (Superfosfato Simples Granulado), GSSPA (Supefosfato Simples Granulado Amoniado), GTSP (Superfosfato Triplo Granulado) ou MAP (Monoamônio Fosfato Granulado). Os suspensores são do tipo 3 segmentos com dimensões de 220 x 190 x 50 mm. Os ângulos entre os segmentos dos suspensores são 90° entre o costado e o terceiro segmento, 145° entre o terceiro e o segundo segmento e 125° entre o segundo e primeiro segmento. Na Figura 3.3 é apresentada uma foto interna do secador utilizado nos experimentos.



Figura 3.3: Foto interna de um secador rotatório convencional para fertilizantes granulados.

No início do secador (parte externa) há um conjunto de martelos que golpeiam o costado deste equipamento, visando o desprendimento das incrustações formadas nos primeiros metros do secador, onde o produto (GTSP úmido) ainda apresenta alta característica de impregnação. Na Figura 3.4 é apresentada uma foto dos martelos do secador utilizado nos experimentos.



Figura 3.4: Foto de martelos convencionais utilizados para golpear o costado do secador rotatório.

3.3- Métodos

Durante os testes operacionais de secagem do GTSP foram coletadas um total de 182 amostras de produto, das quais 120 foram utilizadas para a determinação do tempo de residência, 52 para a determinação das umidades de entrada e saída do secador e as 10 restantes para determinação da carga do secador.

Cavacos de madeira utilizados na geração de ar quente para o secador foram amostrados para a determinação da densidade aparente (ρ_c).

Para a realização das amostragens e medições durante os testes, foram realizadas montagens de plataformas, verificação e adequação de ferramentas de amostragem, treinamentos e acompanhamento do setor de segurança para garantir a integridade de todos os envolvidos nos testes.

3.3.1- Caracterização do fertilizante granulado

3.3.1.1- Temperaturas de entrada e saída do GTSP (T_{So} e T_{Sf})

Para a medição de temperaturas do GTSP, tanto na entrada quanto na saída do secador, foram usados termômetros previamente calibrados da marca Incoterm.

3.3.1.2- Umidades de entrada e saída do GTSP (M_0 e M_f)

Para a determinação das umidades () do GTSP foi utilizado um analisador de umidade por infra-vermelho modelo IV 2000 da marca GEHAKA, que analisava a umidade de amostras moídas por um moinho modelo MA630/1 da marca Marconi. O instrumento foi previamente calibrado conforme procedimentos internos da Copebrás Ltda.

3.3.1.3- Determinação da distribuição granulométrica do GTSP

Para a determinação da distribuição granulométrica das amostras do GTSP, estas primeiramente foram homogeneizadas em sacos plásticos e posteriormente quarteadas através um quarteador tipo Jones. A fração era reduzida para uma medida de massa entre 100 e 200 gramas.

Esta porção pesada era então adicionada em um equipamento de fracionamento por peneiramento onde ocorria uma vibração do conjunto por 15 minutos. A massa recolhida em cada fração de abertura de tela das peneiras (telas de 4, 5, 6, 7, 8, 10, 14 e 16 meshes) foram, então, pesadas individualmente em balança modelo EOF120 da marca Explorer previamente calibrada sendo que, a divisão das massas individuais pela massa total peneirada, possibilita o levantamento da distribuição granulométrica do produto.

3.3.2- Caracterização dos gases de secagem

3.3.2.1- Temperaturas bulbo seco de entrada e saída dos gases (T_{f0} e T_{ff})

A temperatura do ar de entrada foi coletada através instrumento termopar PT100 da Consistec com transmissor ITA110 da Yokogawa previamente aferido.

Para a medida de temperatura dos gases de saída foi usado termômetro previamente calibrado da marca Incoterm.

3.3.2.2- Temperaturas de bulbo úmido dos gases

Devido às altas temperaturas dos gases de entrada praticadas no processo de secagem do GTSP (em torno de 1100°C), não foi possível realizar medições de temperatura de bulbo úmido neste ponto.

Para as medidas de temperatura de bulbo úmido dos gases na saída do secador foi usado termômetro previamente calibrado da marca Incoterm, invólucro por um tecido encharcado com água.

3.3.2.3- Determinação da umidade dos gases (X_0 e X_f)

Os teores de umidade dos gases na entrada do secador foram calculados somando-se a umidade absoluta do ar ambiente durante os testes (verificada através de estação ambiental marca: Weather link, modelo: Vantage PRO 2) com a umidade desprendida do cavaco de madeira queimado durante os testes.

A umidade do ar de saída foi obtida por meio de medições de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido com a utilização de cartas psicrométricas.

3.3.3- Caracterização do combustível de secagem

3.3.3.1- Densidade aparente dos cavacos de madeira (ρ_c)

A densidade aparente do cavaco foi calculada dividindo a massa (pesagem) de uma amostra deste material coletada durante os testes numa balança previamente calibrada, pelo volume que esta amostra ocupava em um becker.

3.3.3.2- Umidade total dos cavacos de madeira

Para a determinação da umidade total do cavaco, amostras deste material foram colocadas e levadas a uma estufa com temperatura aproximada de 150 °C durante 24 horas. A diferença de

massa (pesagem em balança calibrada) entre a amostra antes e depois da permanência na estufa, dividido pela massa antes de entrar na estufa, caracteriza o teor de umidade tal qual do cavaco amostrado.

3.3.4- Medições em geral

3.3.4.1- Rotação do secador (N_R)

Para a medição da rotação do secador, foi marcado um ponto fixo no costado deste equipamento, e então durante a operação do mesmo, com um cronômetro, foi medida a quantidade de voltas que este dava em um determinado tempo.

Os testes foram realizados para duas rotações diferentes (3,5 rpm e 4,2 rpm).

3.3.4.2- Perfil de temperaturas

Num equipamento industrial de secagem em condições de operação com altas temperaturas conforme realizados nos testes, é impraticável a determinação de perfis de temperaturas internas de gases e/ou sólidos ao longo do secador.

Medições de temperaturas ao longo do costado do secador (onde não havia o isolamento térmico) foram realizadas apenas para verificação das possibilidades de perfis de temperatura (Anexo A.1). Para estas medições foi utilizado instrumento de medição de temperatura tipo laser da marca AKSO modelo AK32.

3.3.4.3- Vazões de GTSP no secador (W)

Na unidade operacional que foram realizados os testes, não havia instrumento de medição de vazão de sólidos passante pelo secador. Para identificação desta variável foi utilizada a medida de vazão de produto final da unidade que se encontra após o equipamento resfriador (vide Figura 1.3).

Foi necessário, portanto, a caracterização das distribuições granulométricas dos fluxos antes e após o sistema de classificação e também os tempos de residências dos equipamentos até a chegada do produto no instrumento de medição de vazão (balança radioativa da marca LINCE, modelo W-4000) previamente calibrado. Com a combinação de balanços de massa e tempos de residências dos equipamentos, foi possível então identificar a vazão do GTSP pelo secador .

3.3.4.4- Vazões dos gases de secagem (G)

A vazão do ar de secagem foi medida por um tubo Pitot. O equipamento utilizado para as medidas foi um coletor isocinético de poluentes atmosféricos modelo CPP0062 do tipo gasosômetro TECNOBRAS GALLUS previamente calibrado.

3.3.4.5- Vazões de cavacos de madeira consumidos

As vazões de cavacos de madeira durante os testes foram calculadas através da diferença de volume de armazenagem de cavacos de madeira no início e no fim dos testes.

As medições de nível e dimensões do silo de armazenamento de cavacos de madeira foram realizadas com uma trena marca Starret.

A massa de cavaco de madeira consumida durante os testes dividida pelo tempo de duração dos testes determina o valor da taxa mássica de cavacos de madeira consumido.

3.3.4.6- Tempo de residência do GTSP no secador

Convencionalmente, a determinação do tempo real de residência em secadores piloto é feita através traçadores visuais (partículas de fertilizante marcadas com tinta). Estes traçadores são então introduzidos no secador em forma de pulso e um cronômetro acionado. Posteriormente através o processo de catação estes traçadores são coletados e quantificados em relação ao tempo. Estes procedimentos são adotados a fim de se obter

3.3.4.7- Fluidodinâmica (coeficiente de fricção do GTSP; distribuição de carga nos suspensores; comprimento, ângulo e tempo médio de queda das partículas)

Para a caracterização do cascadeamento de sólidos em suspensores, as metodologias existentes prevêm a necessidade de registro fotográficos do cascadeamento. Num secador industrial concorrente estes registros fotográficos são impossíveis de serem realizados, pois a quantidade de poeira na saída do secador é de tal forma que impedem a visualização do cascadeamento. Outra barreira é a impossibilidade do acesso à saída do secador, que é vedada para que ocorra a exaustão dos gases.

Com isso os trabalhos de caracterização do cascadeamento para o produto GTSP foram feitos no equipamento resfriador contracorrente, o qual possui características físicas muito semelhantes ao secador, diferenciando-se basicamente no comprimento do equipamento (16,0 m) e no modo de operação contracorrente, que tornou possível as realizações de medidas fotográficas.

Os equacionamentos para suspensores de três segmentos utilizados cálculos fluidodinâmicos foram baseados na metodologia REVOL (2001) apresentada no item 2.3 de Revisão Bibliográfica. As previsões por estas equações foram comparadas com os dados experimentais obtidos no equipamento resfriador mencionado acima.

Um dos itens da análise fluidodinâmica é a previsão de carga dos suspensores, que varia com a rotação do equipamento. Tanto para o equipamento secador, quanto para o equipamento resfriador, a medida de carga dos suspensores não é representativa se realizada de forma direta (pesagem). Em ambos os equipamentos (secador e resfriador) a freagem não ocorre em condições desejáveis, ou seja, a redução da rotação do equipamento é lenta, alterando assim a carga dos suspensores até o momento da freagem. Outra condição indesejável são os balanços que o equipamento dá durante a freagem e que são provocados pelo diferencial de carga dos suspensores dentro do equipamento. Portanto, as previsões de cargas dos suspensores do resfriador foram realizadas através de predições, utilizando-se os perfis de carga verificados nos registros fotográficos, as medidas dos suspensores e a densidade aparente do produto.

Para medida dos ângulos característicos (θ), foram tiradas fotografias da parte interna do equipamento (resfriador) nas condições de operação (5,1 rpm) e em diferentes posições angulares dos suspensores. As posições angulares do suspensor (θ) e o ângulo característico (θ_c) foram medidos utilizando o recurso computacional "Auto Cad".

Obtidos experimentalmente os ângulos característicos e as posições angulares, calcula-se o coeficiente de fricção do GTSP através da Equação rearranjada a seguir (3.1):

$$\mu = \frac{\frac{\omega^2}{\tan \phi} (\cos \theta + \tan \phi \theta) - \tan \phi}{\tan \phi \cos \theta + \frac{\omega^2}{\theta - 1}} \quad (3.1)$$

Com a identificação desta variável é possível então descrever através a metodologia REVOL (2001) a fluidodinâmica deste material em diferentes escalas.

Para medida do comprimento de queda das partículas dos suspensores, foram feitas medidas em campo com o equipamento parado. Para cada posição angular dos suspensores, o comprimento de queda das partículas foi medido. O comprimento de queda consiste na distância, em linha reta, entre a ponta do suspensor, na posição em que os sólidos iniciam a cascata, até o leito de sólidos na parte inferior do resfriador. As medidas destas distâncias foram realizadas utilizando-se de uma trena marca Starret. Com os comprimentos de queda e a distribuição de carga nos suspensores é possível determinar através equacionamentos o comprimento, ângulo e tempo médio de queda das partículas.

Abaixo segue uma Figura (3.5) representativa da metodologia utilizada para determinação experimental da posição angular dos suspensores e seus respectivos ângulos dinâmicos de repouso.

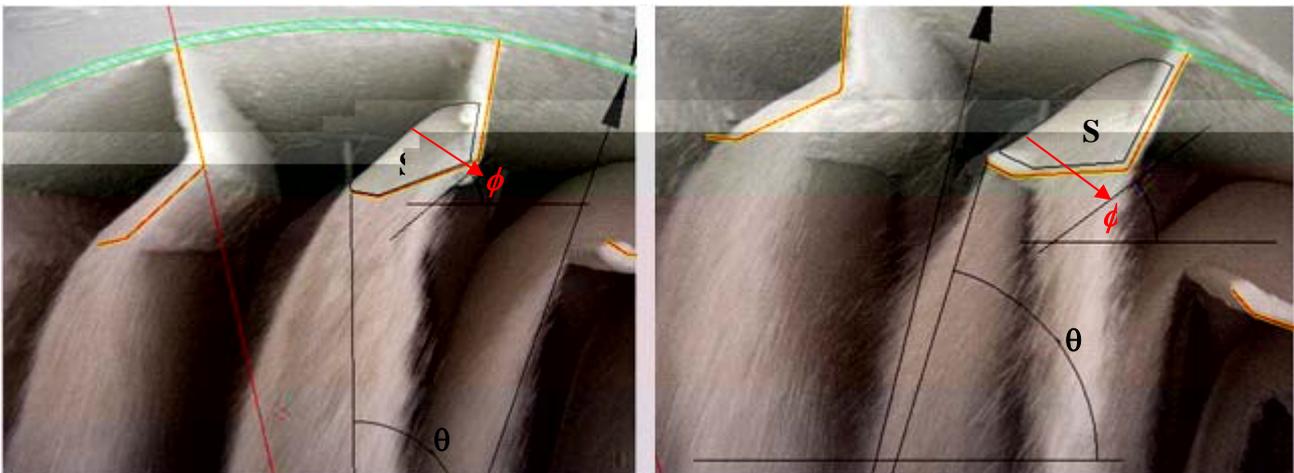


Figura 3.5: Ilustração da metodologia de determinação do ângulo dinâmico de repouso.

3.3.5- Balanços de massa e energia

Os cálculos dos balanços de massa e energia foram realizados utilizando-se as informações levantadas em campo e análises realizadas em laboratório.

Os balanços de massa parciais e totais dos testes foram sempre que possíveis confrontados das mais diferentes formas, de maneira a garantir ao máximo a confiabilidade das informações. Da mesma maneira foi realizado para o balanço de energia pelo qual se ponderou tanto as taxas

mássicas de sólidos e gases, quanto o fornecimento energético proveniente da queima dos cavacos de madeira.

3.3.6- Análise de metodologias de modelagem e projeto

Existem poucas metodologias de modelagem e projeto de secadores rotatórios diretos disponíveis na literatura. Dois trabalhos foram usados para verificação da aplicabilidade dos dados experimentais em modelagens encontradas na literatura. Em um destes trabalhos (ARRUDA, 2008) é possível estimar os perfis de temperaturas e umidades dos sólidos e gases ao longo do secador, e assim prever suas propriedades ao final do equipamento.

Em outro trabalho (CRISTO, 2004) duas metodologias de projetos (VAN'T LAND, 1991 e NONHEBEL e MOSS, 1971) foram amplamente avaliadas através de informações disponíveis na literatura.

Com os dados operacionais do secador industrial levantadas neste trabalho foi possível então uma análise destes dois trabalhos, sendo que para a metodologia de NONHEBEL e MOSS (1971) há variáveis (coeficientes lineares de transferência de massa e calor) que dificilmente são inferidas sem informações dos perfis de umidades e temperaturas (GTSP e gases de secagem) ao longo do secador.

No trabalho apresentado por CRISTO (2004), a metodologia proposta por VAN'T LAND (1991) foi identificada como metodologia I, e a metodologia proposta de NONHEBEL e MOSS (1971) como metodologia II. Da mesma maneira, esta nomenclatura será adotada neste trabalho como forma de facilitar referências ao trabalho apresentado por CRISTO (2004). A metodologia realizada por ARRUDA (2008) será identificada com o próprio nome.

As três metodologias são apresentadas com maiores detalhes em Referências Bibliográficas nos itens 2.10 e 2.11.

3.3.6.1- Metodologia ARRUDA (2008)

Os resultados obtidos experimentalmente foram alimentados num programa computacional (Maple 8) com a metodologia ARRUDA (2008) implementada, obtendo-se como resultado os perfis de temperatura e umidade para os sólidos e os gases ao longo do secador.

No Anexo A.3 temos uma apresentação da implementação desta metodologia para o programa Maple 8 mencionado.

3.3.6.2- Metodologia I (VAN'T LAND, 1991)

Os resultados obtidos experimentalmente foram alimentados num programa computacional (Excel 2003) com a metodologia VAN'T LAND (1991) implementada conforme apresentado por CRISTO (2004), obtendo-se como resultado informações de projeto (Diâmetro, Comprimento, Temperatura final dos gases, Massa base seca de gases) para um secador operando nas condições experimentais deste trabalho.

No Anexo A.4 temos uma apresentação da implementação desta metodologia para o programa Excel 2003 mencionado.

3.3.6.3- Metodologia II (NONHEBEL e MOSS, 1971)

A metodologia II não presume o conhecimento da curva de secagem do material, necessitando portanto de informações como os coeficientes de transferência de massa e energia, que são informações de difícil predição (normalmente calculados empiricamente). Neste trabalho, a aplicação da metodologia será aplicada de maneira inversa, ou seja, com os perfis de temperaturas e umidades identificadas no trabalho de ARRUDA (2008), serão identificados os valores dos coeficientes lineares de transferência de massa e energia.

Desta maneira, os perfis de umidade dos sólidos e temperatura dos gases obtidos na aplicação da metodologia ARRUDA (2008) foram alimentados num programa computacional (Excel 2003) com a metodologia NONHEBEL e MOSS (1971) implementada conforme apresentado por CRISTO (2004), obtendo-se como resultados os perfis de transferência de calor e massa ao longo do secador.

No Anexo A.5 temos uma apresentação da implementação desta metodologia para o programa Excel 2003 mencionado.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1- Condições limitantes de operação do equipamento

Durante o teste experimental realizado no equipamento, a principal limitação foi a velocidade de rotação máxima permitida pelo fabricante (1100 rpm) e a temperatura máxima de operação (110°C). A velocidade de rotação foi limitada a 1100 rpm devido à velocidade crítica do eixo, e a temperatura máxima de operação foi limitada a 110°C devido à temperatura máxima de operação do motor. A velocidade de rotação foi limitada a 1100 rpm devido à velocidade crítica do eixo, e a temperatura máxima de operação foi limitada a 110°C devido à temperatura máxima de operação do motor.

4.2- Resultados da fluidodinâmica de secagem

4.2.1- Coeficiente dinâmico de fricção

O coeficiente dinâmico de fricção (μ) foi determinado a partir da relação entre a força de atrito e a força normal. Os resultados são apresentados na tabela 4.1.

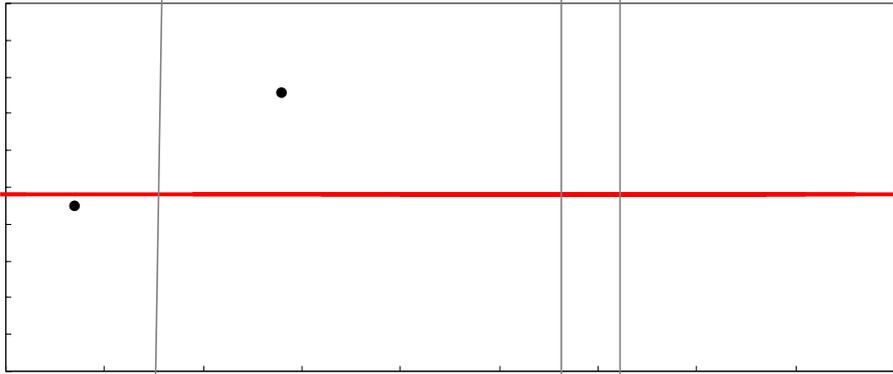
Tabela 41: Ângulo de incidência experimental θ e ângulo de reflexão ϕ para a fonte de luz incidente sobre a superfície plana da água. O ângulo de incidência θ é medido em graus e o ângulo de reflexão ϕ é medido em graus. O ângulo de incidência θ é medido em graus e o ângulo de reflexão ϕ é medido em graus. O ângulo de incidência θ é medido em graus e o ângulo de reflexão ϕ é medido em graus.

Tabela 41: Ângulo de incidência experimental θ e ângulo de reflexão ϕ para a fonte de luz incidente sobre a superfície plana da água. O ângulo de incidência θ é medido em graus e o ângulo de reflexão ϕ é medido em graus. O ângulo de incidência θ é medido em graus e o ângulo de reflexão ϕ é medido em graus.

	$\theta [^\circ]$	$\phi [^\circ]$
1	27	37
2	48	3
3	66	36
4	101	37
5	80	36
6	7	37
7	3	37
8	57	38
	73	36
10	5	35
11	60	37
12	106	38
13	73	37
14	52	38
15	74	37
16	7	35

9

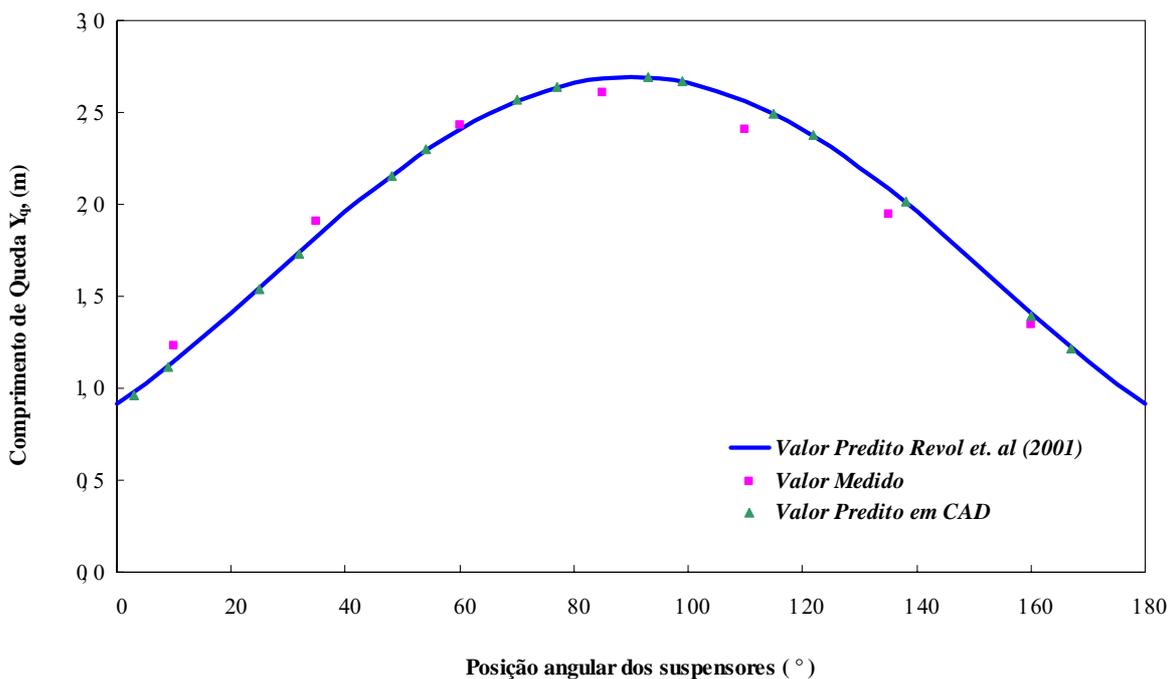
Figura 41: Ângulo de incidência experimental θ e ângulo de reflexão ϕ para a fonte de luz incidente sobre a superfície plana da água. O ângulo de incidência θ é medido em graus e o ângulo de reflexão ϕ é medido em graus. O ângulo de incidência θ é medido em graus e o ângulo de reflexão ϕ é medido em graus. O ângulo de incidência θ é medido em graus e o ângulo de reflexão ϕ é medido em graus.



Porém, a velocidade angular ω no plano da amostra de 0° a 60° com o aumento da rotação, o comprimento médio do ângulo de impacto (θ) da superfície erguida do ângulo de 90° a 180° para a velocidade de rotação ω é diretamente proporcional ao ângulo de impacto θ . Assim, o aumento da velocidade de rotação resulta na diminuição do ângulo de impacto (θ) da superfície.

4.2.2- Comportamento do GTSP nos suspensores (distribuição de carga; comprimento, ângulo e tempo médio de queda das partículas)

Figura 4.3 apresenta o comprimento médio de queda das partículas (Y_q) em função da posição angular dos suspensores (θ) e os resultados experimentais e os resultados preditos em CAD. Como pode ser observado, o comprimento médio de queda das partículas é diretamente proporcional ao ângulo de queda das partículas. Assim, o aumento da velocidade de rotação resulta na diminuição do ângulo de queda das partículas e, consequentemente, na diminuição do comprimento médio de queda das partículas.



Como pode ser observado, o comprimento médio de queda das partículas (Y_q) em função da posição angular dos suspensores (θ) é diretamente proporcional ao ângulo de queda das partículas.

Conforme a Figura 4.3, o comprimento médio de queda das partículas (Y_q) em função da posição angular dos suspensores (θ) é diretamente proporcional ao ângulo de queda das partículas.

Figura 44 mostra a curva de resposta da carga contra o seno dos senos de acordo com a metodologia Revol (até a eletrodo) como se pode ver na Figura 44 (Revol et al., 2001) em função da posição angular (θ) da suspensão.

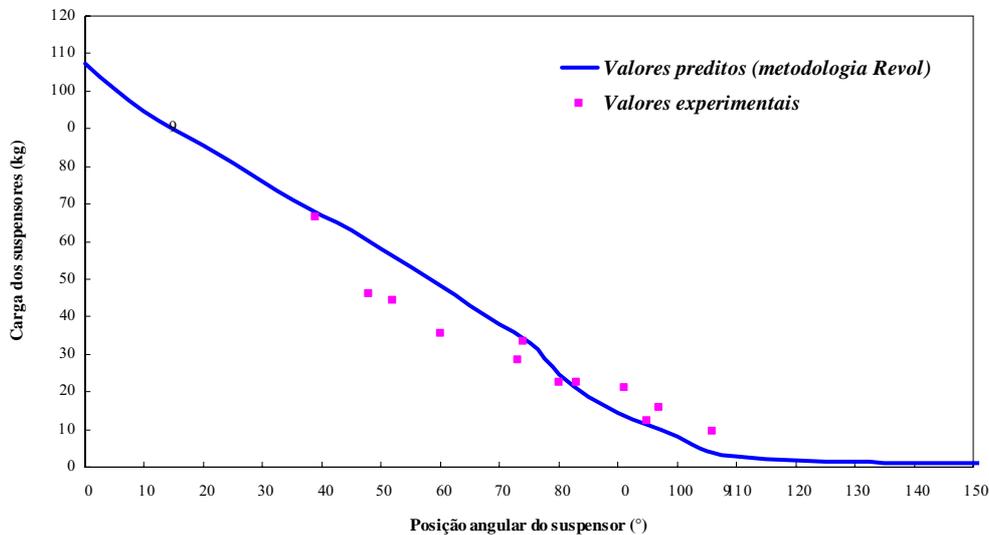


Figura 44 a carga suportada em função da posição angular do seno (θ) dos senos.

deve ser feita a carga suportada em função da posição angular do seno (θ) dos senos de acordo com a metodologia Revol (até a eletrodo) como se pode ver na Figura 44 (Revol et al., 2001).

Há que se ter em conta a carga suportada em função da posição angular do seno (θ) dos senos de acordo com a metodologia Revol (até a eletrodo) como se pode ver na Figura 44 (Revol et al., 2001). A carga suportada em função da posição angular do seno (θ) dos senos de acordo com a metodologia Revol (até a eletrodo) como se pode ver na Figura 44 (Revol et al., 2001). A carga suportada em função da posição angular do seno (θ) dos senos de acordo com a metodologia Revol (até a eletrodo) como se pode ver na Figura 44 (Revol et al., 2001).

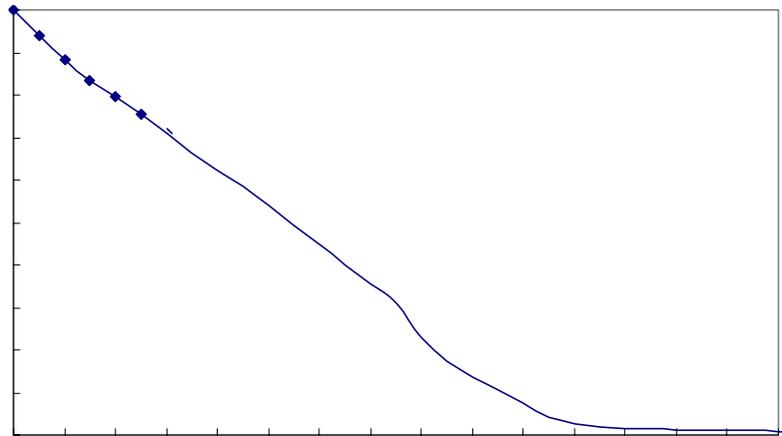


Figura 45 mostra a distribuição de frequência dos dados coletados, o que demonstra a importância da análise estatística para a interpretação dos resultados. A distribuição é unimodal e assimétrica à esquerda, com o pico ocorrendo em torno de 80°.

A distribuição de frequência da posição angular (θ) é mostrada na Figura 46. A distribuição é unimodal e assimétrica à esquerda, com o pico ocorrendo em torno de 80°.

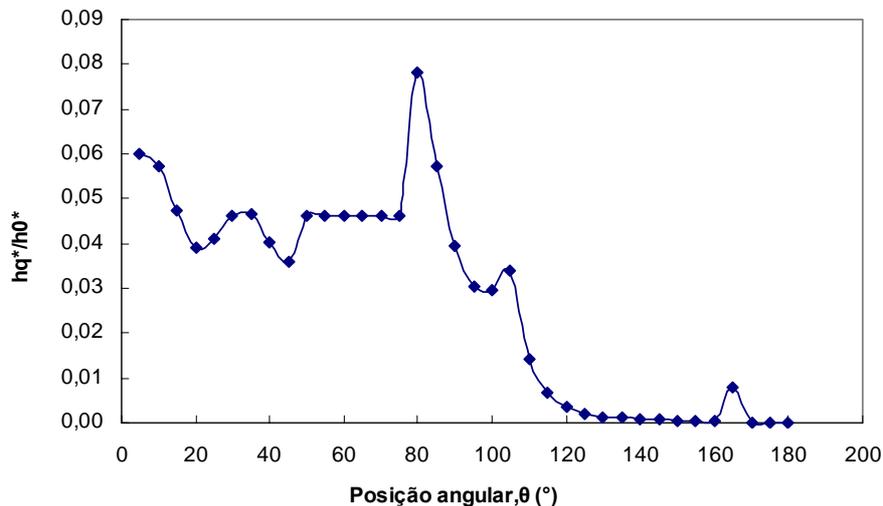


Figura 46 mostra a distribuição de frequência da posição angular (θ) dos dados coletados, demonstrando uma distribuição unimodal e assimétrica à esquerda.

Na Figura 46, a distribuição de frequência da posição angular (θ) é mostrada. A distribuição é unimodal e assimétrica à esquerda, com o pico ocorrendo em torno de 80°. A frequência máxima é de aproximadamente 0,078.

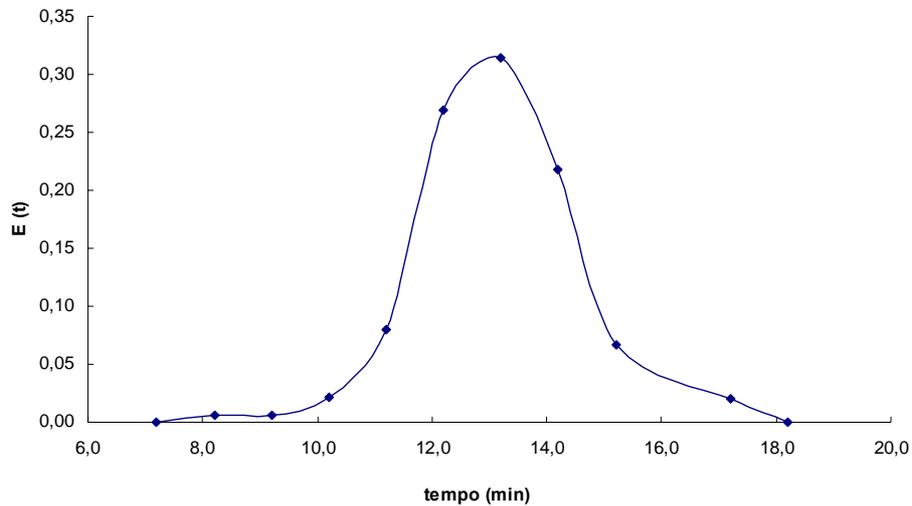
Como o objetivo da pesquisa é analisar a distribuição dos dados, foi utilizado o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov. Os resultados indicam que a distribuição dos dados não segue uma distribuição normal, justificando a utilização de métodos estatísticos não paramétricos.

Para a análise da distribuição dos dados, foi utilizado o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov. Os resultados indicam que a distribuição dos dados não segue uma distribuição normal, justificando a utilização de métodos estatísticos não paramétricos.

Os resultados da análise estatística são apresentados na Tabela 4. Os dados mostram que a distribuição dos dados é unimodal e assimétrica à esquerda, com o pico ocorrendo em torno de 80°.

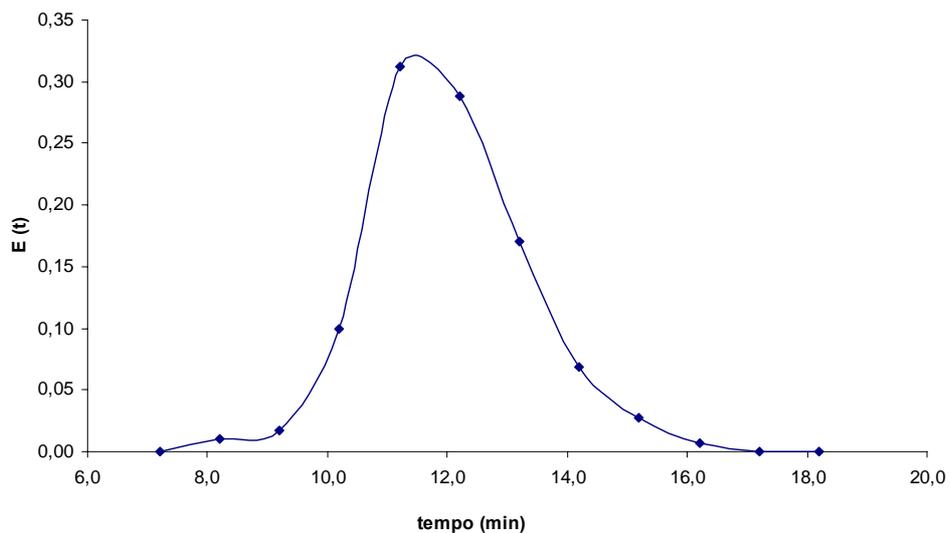
4.2.3- Análise do tempo médio de residência das partículas no equipamento

Nas Figuras 47 e 48 são apresentadas as curvas de distribuição do tempo de residência experimental em função do tempo.



Na Figura 47 a distribuição do tempo de residência experimental para a situação de 35 pm é mostrada.

Para a situação de 35 pm foram coletados 13 litros com uma vazão de 21 ml/min.



Na Figura 48 a distribuição do tempo de residência experimental para a situação de 42 pm é mostrada.

Para a situação de 42 pm foram coletados 12 litros com uma vazão de 1,8 ml/min.

d á a eq uação e ncia (ve relim 26 e a ão . ogáfca) fra mli rBi
 d e tadaz pa a pe se o tempo eie êncna enao sTpedine nta is a eia 42 em e gu la . s
 d d a pte nta o tempo sné os e e sêncna sa cua si poie tal de quação cosmsa nfo nação r s i
 o tda o e e xpe nta dr sa a dr comia otição lo e ca o em 35r pme 42 pm em
 d v como o e o e nont s o se inde o a o e de xpe rne nta l res o pe ito pna casa e q uação

T d d T d e a 42 em po ele . êncna ps to sp o eq uação e ncia a ma se a tua r s r li :

	Tempo e êncna experimental	Tempo e êncna (m) com 35 Spm	Tempo e êncna (m) com 42 pm	Devição 35 pm	Devição 42 pm	
T N S	NGH S e H I (1 40) 9	si i 13,1 il	120	-	-	
		O 17,2 O E	144	31,7	1,8	%
M N D S	eHL (1 42)	9 88 ER	51	-32,8	-57,6	%
M N D S	Ie H (1 4DL)	AR E 1,0 A 9A R	78	-161	-35,4	%
M N D S	Ie H (1 4DL) com pa âne to Dr (2008)	AR E 1,3 A 9A R	124	,5	30	9 %
M S MTC	e H I (1 54) 9	A LIA E,0	69	7,6	-31,5	-36,8 %
M S MTC	e H I (1 54) com pa âne to Dr (2008)	A LIA E 1,7 A 9A R	E	,8	-10,5	-18,0 %
K YNN D e LL (1 77) 9		LL E 12 ' O O	E 9 10	-1,9	-8	%
N K	(LI78)	9 73	34	-43	-71,5	9%
C TT	H K e (1 87) 9	A 68 BÆ	ER 73	-48,4	-3,0	%
M M	ueauof r ãe (1 27) B i s 9	124	104	-51	-13,7	%
M M	ueauof r ãe (1 27) B i s 9 mo fca a com i i (2008)	1,3 ARR	9 164	47,4	36,5	%

dP b v o e Te o e a o ms a e s 42 ac ma que de quação que me o e aju ta ao la usta or s s s
 d o p a com ré a quação pe Kta pY NN Dr é IEL (1 77) pã apê ota o m e r s
 v ne me e ro (-N4 se -s is) d e d a n d e e u ta cre a s p e r b e r o e s ta quação i s
 z v d ut da o da o e ali ar da galde ntol o de ra od pa a a p e r ção ro tempo eie êncna o qua si i
 ta e e um d nfo nação ere ncia no cá clu e de pa âne to e q uer não é comum e e e r s

a e e a t q ue nã o f i s s i l t o n e n u m a j u t e i e p a l â n e t o r r e a r e q u a ç õ e s o u s e s j a e a f o s a m s r l s
z u d a a c o m p a d i e t o s r o g r a r o a s t o e i o i s e s t a a o s e m q u e e t e l h p a â n e t o r f o a s m r s
o t o i s .

p ó x m a r q d a ç ã o q u e a d m a e a p o x m o l i s o e u t a o r e x p e n e h t a r s f o a i i s
M N D M Se H d (1 4) R o e m p a â n e 9 4 0 r U m a o p d s s i r (2 0 0 8) , q u e f o A m r A R R
d t a e d a o e i x p e n e t a d r s e l u m i e c a i s p o t o r o p e a n o t u m é m z c o m f é t a n e r i l i
g a n d a l o r e o l e m s e a ç ã o s o i s a o e l o q u e n e s t a r f o a m e i p r e c t a n e n t e s , 5 e i 3 5 9
p a a a o t a ç ã o r e d 3 5 e 4 2 p m e p r e c t a n e n t e s i
o e q u i p a m e n t o , p o e - i e a p e e n t e t a l q u a d r a ç ã o c o m o u m a q u e p e a a e q u a n e n t e i o a o r
o d e m p o e e ê n c a e m i u m s e c a o c o m c a a c e l t r a e n e a n t e s i a s a p e d i n t a o s r e t e s
t a a o r l h .

b q u a ç ã o u e a u o f r a r e d t a m e m a p e s e n t a r a o e p e r t o p ó x m o r a i o s i
e x p e n e t a r n o e d i a n t o i s a d e e u m a e q u a ç ã o e e n o a p a s a p a ç ã o e m f o n d i r
o t a t ó r e d q u e p e i n e n t e a p e s s i t a l f o t e e p e m s e n c a c o m a e c a a o e q u i p a m e n t o , u m a e i
d q u e o e u t a d r p e s t o s t o m s o p a l i n e t o r d r b (2 0 0 8) n ã o a p e s e n t a A n R R o a r s
c o n c o â n c a r i .

e l m a e q u a ç õ e s n ã o a p e e d n a s m o a r o s e a ç õ e r r o s m o l a o s e x p e n e t a r s i
d o t o m o t e i g u m s d e s a s . e l a n e s t a p o s e u t a d m e r n f o s n a ç ã o r p o i e n e n t e s i
e q u i p a m e n t o c o m a c a c e t s c a c o n d u t a s i n s t a n t e s f i d e l s e (s e r c a a i m e n s e s q u a n t i a e s s
b e d u p e n o e , d o u t s ,) e s t a m s e d n e s m a t e a b f i d e l i t e d o i u s a n i a a g r a m a p o i d e e s s i l i
n c o m ê n c a e i u n a i s e n a p a ç ã o o s e q u a d r a n e n t e s i s .

4.3- Resultados dos balanços de massa e energia

d b e g u ã o t a p e s e n t a i n a s a d a e s l a 4 3 e s 4 4 c o l m o . e u t a o r e e m p e h t u a s e r r
d u m a e d o b ó d i e o g a s l i e s e c a g e m o s s a s o d n o t e t s o p e a s o m a s p a a c o n d i ç õ e s s
e o t a ç ã o e 3 5 e 4 2 p m e p r e c t a n e n t e s i .

a e a 43 e u ta o lo p e a co sal d pa sa o d e xp R n s n to r co m o ta çã o ro se ca o e m 3 5 r p m r

tempo C mm	T_{fo} C (°)	T_{ff} C (°b)	T_{so} C (°) b	T_{sf} C (°)	M_o a e ç ca	M_f % [a s s ca
0 30	818	115	85	101	6 61	2 56
0 35	807	113	86	103	6 61	2 67
0 40	7 1	112	84	104	7 07	3 20
0 45	7 4	110	86	100	7 18	3 73
0 50	800	108	85	8	6 72 9	3 31
0 55	813	107	85	8	6 84 9	3 84
10 00	822	106	83	6	7 18 9	3 52
10 05	825	106	84	7	7 07 9	3 73
10 10	833	105	86	6	7 53 9	3 31
10 15	853	105	83	7	6 16 9	2 88
10 20	874	105	84	7	7 18 9	3 0
10 25	8 4	105	84	8	7 76 9	3 20
10 30	12	105	85	7	7 07 9	3 31
é a	834	108	85	99	7,00	3,26
e o a ão	38 6	3 4	1, 0	2 6	0 42	0 40
ne b nfr 5	810- 857	106- 110	84- 85	7- 100	6 75- 7 25	3 02- 3 50

a e a 44 e u ta o lo p e a co sal d pa sa o d e xp R n s n to r co m o ta çã o ro se ca o e m 4 2 r p m r

tempo C mm	T_{fo} C (°)	T_{ff} C (°b)	T_{so} C (°) b	T_{sf} C (°)	M_o a e ç ca	M_f % [a s s ca
14 30	1026	112	86	102	6 61	3 0
14 35	1021	111	83	101	7 07	3 52
14 40	1005	110	84	8	6 72 9	2 15
14 45	1002	110	80	101	6 61	3 20
14 50	1003	10	82		7 30 99	3 31
14 55	1017	106	85	8	6 38 9	2 88
15 00	102	106	77	7	7 30 9	2
15 05	1042	104	73	6	7 18 9	2
15 10	104	103	75	5	7 41 9	2 67
15 15	1050	102	78	4	7 53 9	2
15 20	1048	101	80	3	7 41 9	2 67
15 25	1056	104	83	5	8 23 9	3 20
15 30	1058	105	83	6	8 11 9	2
é a	1031	106	81	97	7,22	2,97
e o a ão	20 6	3 7	4 0	2 8	0 55	0 34
ne b nfr 5	1018- 1044	104- 10	78- 83	6-	6 88- 7 55	2 76- 3 18

M
v PD
v C

M
v PD
v C

a a n o e m a a d p e e B o d r o s e u l a s o r c o n f o m e T a p e r e n t a o r m a a e s a 4 5 a

e g u r s i .

T d b d d e a 4 5 a a n o e l m a : a o l t o B a n t s s o t e e s s s .

Rotação: 3,5 rpm

d T d	axa T nta a (t/)	axa a a (t/)
S ó o a e e ca	513	513
G a s e a e e ca	10875	10875
d S g u a n o ó o	6661	3101
G g u a n o a e	1012	4688
b C v a a c o a e e ca	1,123 z	n a

s h
9 9
9
i s

Rotação: 4,2 rpm

d T d	axa T nta a (t/)	axa a a (t/)
S ó o a e e ca	107353	107353
G a s e a e e ca	103743	103743
d S g u a n o ó o	7750	310
G g u a n o a e	1202	5860
b C v a a c o a e e ca	1,234 z	c n a

s h
9
i s

d d q u a n t a d e á g u a a i n e n t a a o r g a e f o a c e s c a s (s ã m i c u a s n i i l s
a e a) e m 2 3 g / l p a o e t k o m o t a ç ã o 3 5 p m e 3 2 2 g / p a o e t k o m o t a ç ã o 4 2

d q u a n t a d e t r á g u a é p o e n e t v a u m a e i o c a a c o (2 6 d e m v a e e c a) q u e é a s p o s a a u a n t e r
u a q u e m a i n f o r m a e q u e f o , p o t a n t o , c o n t a i a a i l i .

d v D e o n o a a n o s e i n a a p l a a á g u a ã s p o d e m e s e m p e c i ã e e e n i a s e s s s i i
e n e a e a a a r u i a n e o l r e t s s s s s .

d P d a a o b a l a n o e e r e g a b e r u t a o d o i t s o f o h a m c o n f o m e T a p e r e n t a o r m a a e s a s
4 6 a) e) a a x o . . i .

T d b a l e d a 4 6 a) a a n o l e e r e g a d d t r o B u a n t o t e e c o m o e c a o s e m 3 5 r p m r .

Rotação: 3,5 rpm

J	/m n
re ga e n a p e r c a d i o	323 055
=	
re ga c o n r u m a m a e c a g s m	170 575
+	
d í re ga g a e r m a a a e c a s o s	152 034
+	
d d P < e a e e n e g a	5

k i
.
.
.
.
%

baled 46) a ançol e e re gadd t roBuane ô t e e como e ca os em 4 2 rpm r

Rotação: 4,2 rpm

	J	/m n	k i
b d	re ga e na a pe or cai d io	356 631	.
	=		
d	re ga con num a ma e ca g sm	221 150	.
	+		
d	dí re ga ga er ma a a e ca sos	134 574	.
	+		
d	P < e a e e re ga	5	%

ne çõe e e sul gavi A era a pe o ia lá coda pe al e mãrve em na pe e a (s e em is s i
 e to oboga e m 3 3 415) imoi ta a m. ex ra ta de ba o s e d s pa a o f e r a n e n t o o a a n ç o e l
 de re ga com uma íemi a re pe N e ipe e dr so e n t a n t o, a i s e - e q u e a p o x m a s e n t e 50 i
 d d v o e c a o e t a r s e p d o l r e o s a n t o d e m i s o l m c a n o a i p o i v i a e e s s e i l i r
 d m p e l o d m a q u a n t f a s ç õ s a e r e g a i e n a a p e o r c a i d i o l .

buta m p o r t a n t e c o m t a t a ç ã o r e d e O a s a n ç o d e d r e g a e q u e , q u a n o i a m a o o e o l i s s
 a p e c t o a e r e g a v e r a a p e o i g a l i e f d e l q u e s p a i à m a r a e a m e s s n o t e t e , a i s s
 t e m p e a t u a o r g a r e e e a e s e m t o m o 203 s f d a a o d e t e c o m o t a ç ã o s f 5 p m o e c a o e r s
 236 ° ; p a a d e r e c o m o t a ç õ s 4 s 2 p m d o r e n o e m a o e r e p e n e n o i a s m p e c õ e r s i
 d q u a n t o à p e a d e e m e g a d t o r n t a q u e i . á s g a i d e i e n t a l a e n a f a o n s t e m a e l s e c a g s i n s
 (c o c a e 50 e r h o u n d , o t / 70 e d m m a d) , d e f i o u m a s s a s a c a e e n t a s a o i e c a o , o r s
 q u e é c o e z e n t e l u m a e q u e e t a d a e u n d p o l s t o e a x a e f e n c r a e e n t a s i s e a i q u e o c o e . r r
 d p o t a n t o é u m a m t u a o a r f a o i s o m o g a e l q u e n e l p o s e n e n e a s f z m a a i e u n o u h i
 t e m p e a t u a e r e c a g e m n c a (T 70) i i i l .

uto pontor ndpo tant edq ued e fo Qa a r p e m a r e e n t a a i s e r a f a o n s n c o m a l s
 d a n e d v n e n t e r q u e d e o m v a ç ã o e i p d i u t m a s e , j á e m 2006 e m t e t e e a a o r p a s l i s
 e m p e a e c o n u t o a s e f i n d o n s e l m i c a (r d) d o n t a t a z p r a a e a r a ç ã o E R e t u o l i e s
 d a e q u a ç ã d e p o d u t d e , f o d m e l i c o n t z a a g a n e a r e e n t a a e s a f a o e r n e a n t e d s s l h
 e n c o n t a a r e r e t a a o r s s l h .

El d a d e f h o r e m o e a g m i o e c o e l o t r a n o r d i e n t a - e - á l h p o s t a n t o n a r s p e m a r e i
 d q u e a d e m p e a t u a n r c a e a o g a i i i l e d e l a g s m é s a t e m p e a t u a q u e c o n e a e n t a n e s i a r s
 d f a o u m a e q u e l s a u d h a a o u s a t e m p e a t u a (e r m c o n e a e n t a r a r e s i a f a o) e s f c a e r l s i
 > n e n õ e e p e i a b n o s e n t e (r s 200) e q u e t a m é f r m ã o z e a c o n r e n t e s o m a e n i g a r
 e a a p e a r q u e l i m a e c a a l c o i .

... (e ...), a ...
 ...
 ...
 ...

...
 ...

...	...	coeficiente de troca de calor com 3,5 pmS /m ³ m ² n ^o J k	coeficiente de troca de calor com 4,2 pm /m ³ m ² n ^o k
...	...	148	1561
...	ER	1417	1376
...	...	-48	-11,

9%

...
 ...
 ...
 ...
 ...

...
 ...

...
 ...
 ...
 ...

4.4- Metodologia ARRUDA (2008)

...
 ...
 ...
 ...

Figura 4: Um exemplo de DSR (2008) para a taxa de ARR em 3,5%.

	Uso Experimental	D (2008)	S D	R E	ARR %
mae o ó o (i) s	26	3,6		21,9	%
mae o g e (i) s	430	3,82		-11,2	%
emp e atu a or g e (°) s	108	74		-31,5	%
emp e atu a or ó r o (°) s	li s	99		-20,2	%

devido a esta situação, os resultados podem ser interpretados de maneira diferente. A experiência remete à ideia de uma ordem, mesmo que seja a ordem de chegada dos participantes no código. Portanto, a ordem de chegada dos participantes no código (2008) e o ARR são os resultados finais.

Figura 4: Um exemplo de DSR. O gráfico mostra a relação entre a taxa de erro e a taxa de acerto. A taxa de erro é a taxa de acerto menos a taxa de erro. A taxa de erro é a taxa de acerto menos a taxa de erro. A taxa de erro é a taxa de acerto menos a taxa de erro.

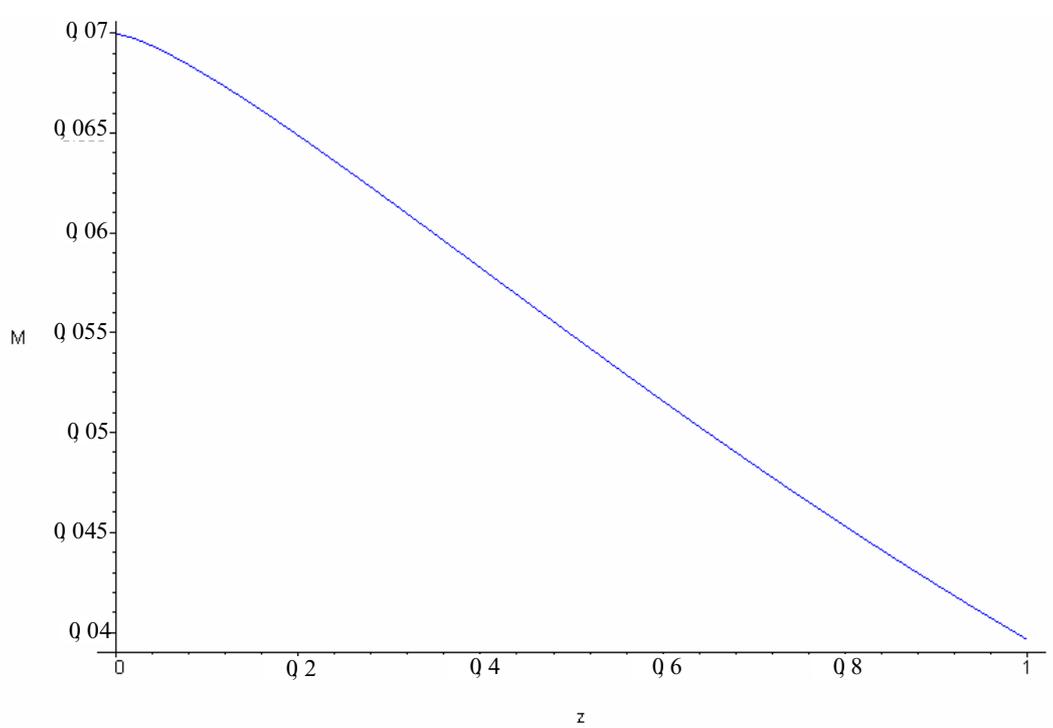
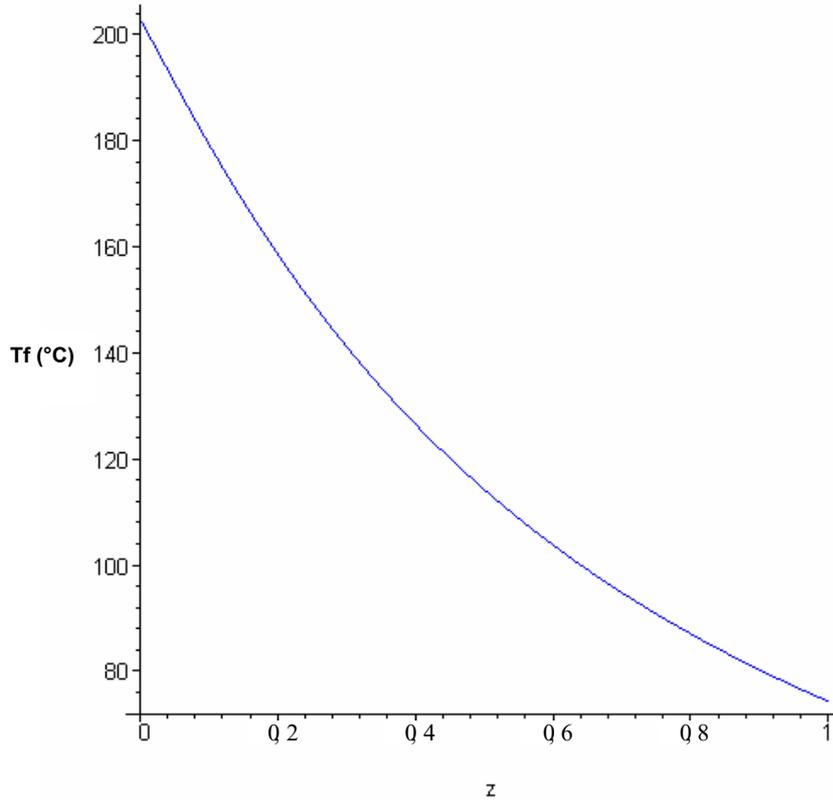


Figura 4: Um exemplo de DSR para a taxa de ARR em 3,5%.



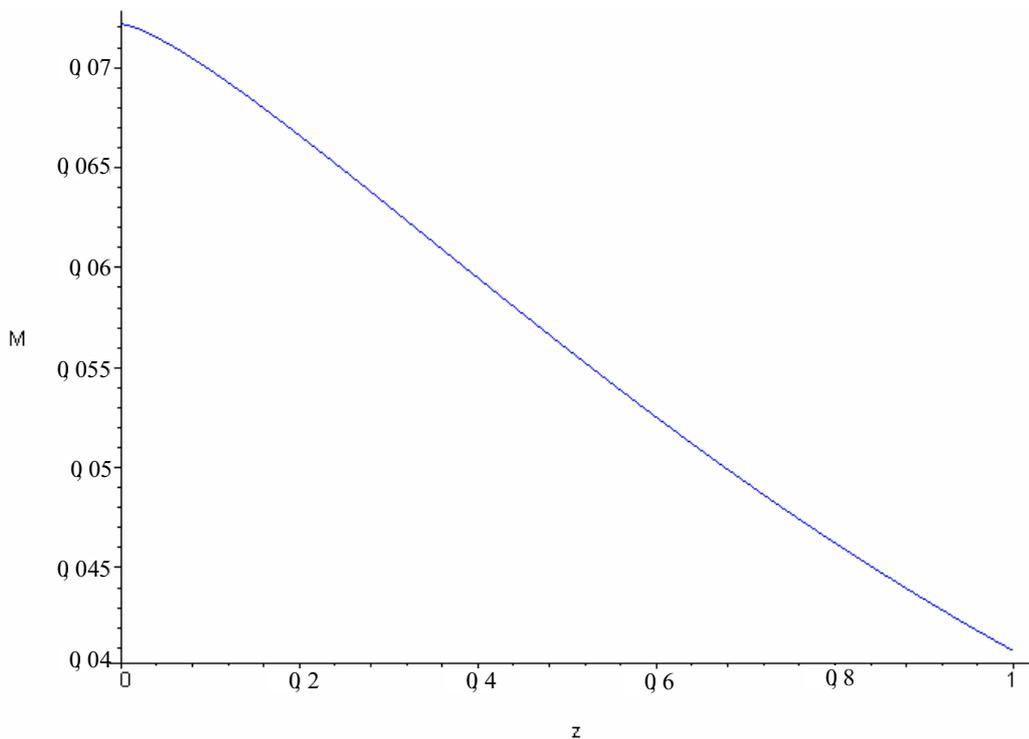
Pd gua 410 re f die t n d e atu a ilor gare ao ongo so escs o (o ta ç õ s 3,5 pm) r : R
 d d d v e u t a o r e e s o s l o a d o G x p e s n e n t a r c o m a o t a ç ã o i s r o e c a o e m 4 2 r p m r
 o t o p e a n e t o i o g d l d (2 0 0 8) ã o e n a l e g u a A R R e t a o i c o n f o r m e a e s a 4
 T d a a x o a m d e n t e i a d o e l a g e m f a m c ó n r e a a d p r a d s e p e v s e c o n f o r m e e c i n c a o i
 = n o a a n ç o g o a e e l e f g a (U p r l 0) i g u a 4 1 1 d 4 1 2 a p e s e n t a n r o . p e f s e u m a s e p a i s n i
 o ó o d e e t e m p e d u s a p a r a o r g a d e t o p r a s m e d a g e m c o m o a l o e x p e n e n t a r o i
 e c a o c o m o t a ç ã o e 4 2 p m r .

d d a e a 4 e u t a o l a u n o e s a g e d d s d R (2 0 0 8) p a a o t a ç ã o r o A R R e m 4 2 r p m r

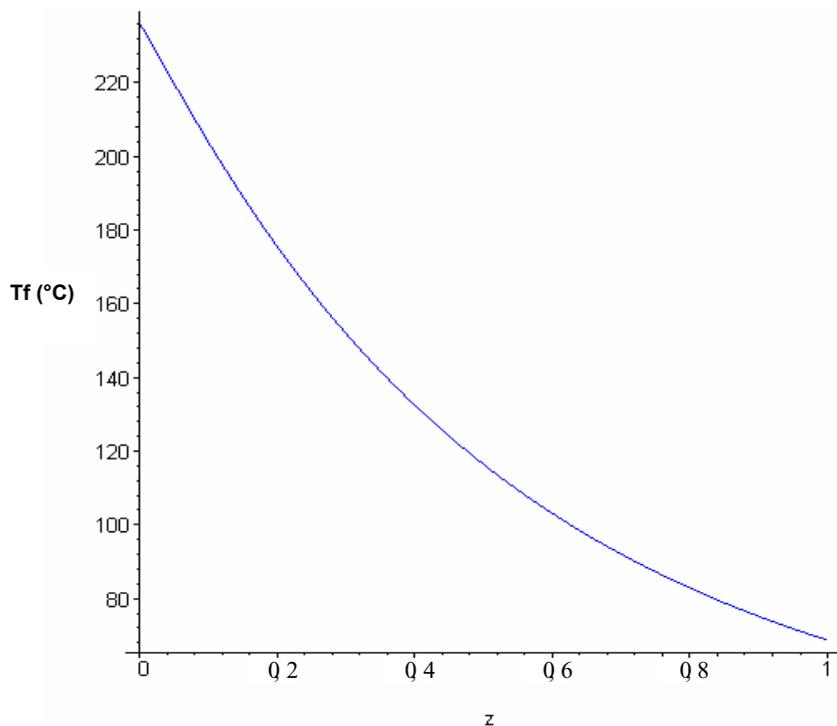
	e U t a o x p e n e n t a r	D s l (2 0 0 8) D i s	R e o A E e o A	ARR S i
dU	m a e o ó o (t) s s l i s % 2 7	4 9 8	3 7 4	%
U	m a e o g a e (i) s s s % 5 6 5	4 8 8	- 1 3 6	%
T	e m p e a t u a o r g a r e (°) s s s 1 0 6	6	- 3 4 9	9%
T d	e m p e a t u a o r ó r o (°) s s l i s 7	9 6	- 2 1, 6	%

D a d n e m a m a r e a q u e r o e u t a o r e x p e n e n t a r s e v o i ã o i s p o s e i n e n e s s i l
 d p o b o c a o r p o m p e c r e d e n e a l i s x p e n e n t a r e s m a o i e e i s t a a o u s a a , p e n s a s s

eda í fa o (na) e /cris po el s ê nçass no icodipo tam ntr o ma e a ut r a o ni s ili
 Ue n ado D s (2008) de o ut Aa o no ARRe ilie nts r m ut ai rs i s i s.



Fd d d El gua 411 re d íe un. a e o iló o ão ongs solie ca o (l o ta çã os 4 2 pm) r : R



Fd P d gua 412 re fdie e n d e atu a ilor gar e ao ongo so esca o (l o ta çã os 4 2 pm) r : R

4.5- Metodologia I (VAN'T LAND, 1991)

T a e a d 410 e 411. A s o t a n d o . r e u t a s o r e s s o l o s a o s e x p e n e n t a r s i
 e n c o n t a o d e r e t a a o s r p a d u m p h o t o r e c a g e n d a c u a s o a t a é h a r p a ç ã o s i
 e t o o g a I l i .

T d d d e a 4 H 0 e u t a d M a a p a ç ã o a s e t o d i r e g a c o m o l a ç ã o e 3 5 p m r :

Rotação: 3,5 rpm	M e u t a o x p e n e n t a r	e t o s l o g s i o g s	R e l o i	s i
em p e a t u a f r a r o g a e (°) ⁽¹⁾ s	86	88,5	-10,3	%
a a e g a e a e s s e c a (t o r / s) ⁽²⁾ s s	108,0	100	-6,59	%
â n g u l o e e c a d i (m) ⁽³⁾ r	3,0	5,1	6,4	9 %
o m p o s e n t o r o e c a o i (m) ⁽⁴⁾ r	30,0	35,6	18,6	%

T d d d e a 4 H 1 e u t a d M a a p a ç ã o a s e t o d i r e g a c o m o l a ç ã o e 4 2 p m r :

Rotação: 4,2 rpm	M e u t a o x p e n e n t a r	e t o s l o g s i o g s	R e l o i	s i
em p e a t u a f r a r o g a e (°) ⁽¹⁾ s	106,3	0,1	-19,2	%
a a e g a e a e s s e c a (t o r / s) ⁽²⁾ s s	103,7	10,8	5,8	%
â n g u l o e e c a d i (m) ⁽³⁾ r	3,0	5,3	7,1	%
o m p o s e n t o r o e c a o i (m) ⁽⁴⁾ r	30,0	37,2	23	9%

d e d f c a e q u e o b i u t a s o r a p e s t a b r m s u a s a e a s a p e e s t a n r e d n p o t a s e n t o r
 e n e a n t e l p a s a p a r d ã o s r o p a â n e t i d r e p r o c e o b r s e n e n o m a s s e n t o i o e s c a o a x o s
 e d g u e o c o n e n t a s o o s e o e b u t a s o r c o n f o m s t r a c a ç ã o e r m o e c t o s r s s i .

V ⁽¹⁾ e m p e a t u a f r a r o g a e d e l f c o s u e r s m a p a i ç ã o s a e t o l o g a q u e p a l o i o r
 e x p e n e n t o r e u t a o r d e s t e m p a t u a s f r a r o g a e p e i l o s i o s e s m e q u e s r e u t a o r s s
 N e x p e n e n t a r o d e i a n a i q u e d e m p e a t u a p a r t a p r a n e t o o g a (e m t o n o e 8 r °)
 ã o p l o x m a l r a s e m p e a t u a s e n t a a o p o u t o n o e c a o (8 5 ° p a s a o t e e c o m 3 5 s p m e s r
 8 1 ° p a a o t e e c o m 4 2 s p m) , s o u e j á e t a m e n t e s t a t e m p e a t u a s ã o e r a a t n g r a e a s i i i
 e f c ê n c a e d t o c a i e i m d e t a a l m c o m p o n e t a r a o o n g o o e c s o l r s .

(2) a a e g a e a e s s e c a s o n f o s e a p e n e n t a o r a n t e o s e n t r , r e v f c a e r u m a p o i á e s r
 (e t n d t a) e n t a s e a r i f a o e m t o d o e 5 0 e m o d n e (e f t o n o e 7 0 e m m a) o % s s
 e f t a n e n t a q u e c o e m f o n a i o m a t e m p e l a t d a c o m p e n a a p a e t a e r n t a a e n s f a o r s

z a da ãe e galispe tas pras sto o g d lão a lante ãe ente como a o expe menta r s i do t o n o t e t e , o q u e s e a s e p e s r o r s .

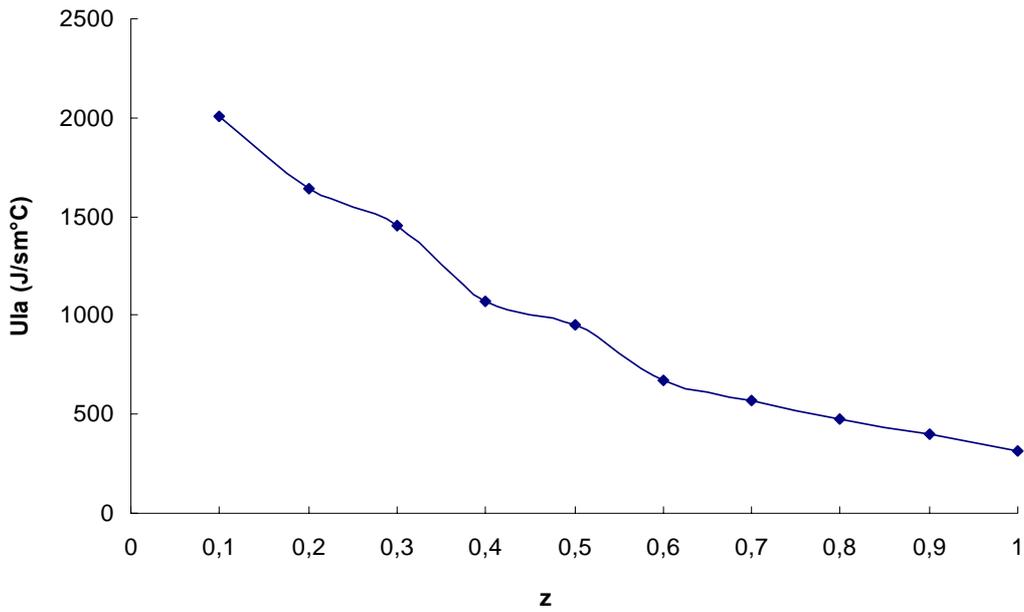
D (3) ãd d o e d i d a o r sã r d o : o ã n e m b o s e c a d i a v e t o r o s o g a p e ê u m a fã i x a e e o d a e e a e l l e c a r g e m (u) n o e s c a d o e m t o m o d e 0,5 a 2,0 m / v a n o e o m a o s a o s r i e e o c a d d o g a t e i e d e c a g e m s e c o n e s r a o p e a n e t o o g a (l u 2 m / l) , i e m e u m s d ã n b t o p e r t o i p a a o e r cã o o e m s e l a m a o r q u e i r e a , i n r c a n o a l m i u m s s i u p e n e n o m a s e n d i o e q u i p a d e n t o p d a a a p r a çã o e t a n e l i o g a s e p o ç t o l r e f a t o . s e e - d e d v f e n ç a n t a d a d o r e d o n e m r a o l p a a e o r a e e a e l e c a r g e m (u) e o s a o e a r r l o e n a o s s i s .

d (4) d o m p n t o r o e c a d i a n e t o o g a : o c o d p n e n i o (r) p e l i o p a a o e c a r o s t a t a e r s = a i p e n a e u m a e a çã o s i m p d (l r 7) e p o t a n t o d n t a e a o c o n t i n tã o s q u a n t o a o ã n t o r i o e c a o e m a r s n e n d o m a n e i t o , i a s i n d o d n b s u m i s s i e a e t a e p o f u n l a e s e t a i s t a m e m ã o t a t a a n a s i m a m a r e s a (e a çã o e m p i c a) l r s i s .

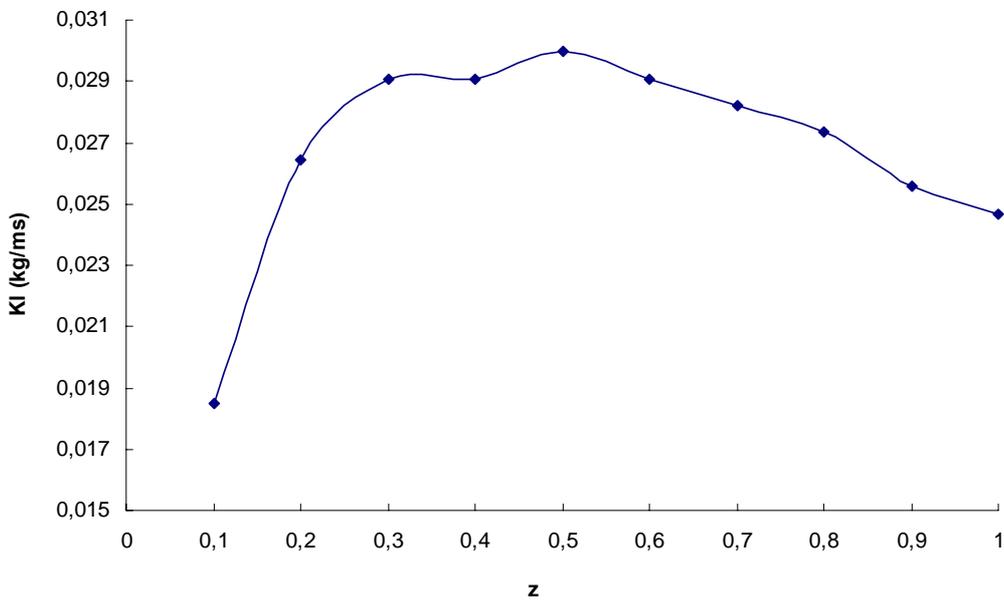
4.6- Metodologia II (NONHEBEL e MOSS, 1971)

d p e m a d rã c a p a a a i s p a çã o e t a n e l i d o g a f o z q u e o f e l t i a n e r g a n u a o i t i o e c a o n c a o s p o e o i r e i d e c a g e m sã m a e s p a e c e e n e r e t a x a s e c a g e m o u e j s o n d c a n m o e f u çã o (s a n d e ã m i c a s e r m a s i) n o i n t e d t c a b i o s p i o é a e t a p a s c o n t o s a o a r a r l b t a x a e e c a g e m d a p e m a é r . a s t a n t e c o i s s e n e i s r d e i m t a a c a a c t i c a f i c a e t i s s i s d p o e m z e a (d i t r a n t e r g a d u a o i e f o c o n t a h a n U t a i a s D (h 2 0 0 8) A A R R d o m d p e f e r m p e s a d u a s o r g a d e e c a g e m s e m a s e o ó o i p e t o s p o l i s r i D i v (2 0 0 8) f o p d A e e nã o A R R a s s o m a a p l i c a çã o d e t o b i o g a o p e f l e u m a s e i s d o g a e e t e m p e s t u a s s r d o o e d a m a s o l i n o s p a a s i n e t o o g a D l (i 2 0 0 8) , o A d e u tã o r p a a a s e m p e s t u a o r o nã o a p e s e l i t a d a m a o r e s p o x m o r d o s e u t a i o r s s s e x p e n e n t a r i s .

d h a a m c o m o f o n s a i d e r o n t d u çã o r p a a M a i p r i a çã o a e t o b i o g a c o m I l i i n f o m a çã o d e m e i c a a n u s t a , f o a n d i c a c a i d o c o d f d e n e s e a e e i t a n s f i e n c a s e r c a o s i r J C (U L A e m / m °) e e m a s t a (k L e d n g / m s) p a a d l e r u t a o r o t s o s o l m a s n e t o s o g a J D d (2 0 0 8) , n e m o v a p e n e n t a r e e a o s e d o p l a o s e f i e s t e m p e s t u a i s o r o r o s s m e f g u a e g u e m a d g u a s 4 1 E r 4 1 4 c o m o . p e f . o c o e f i c i e n t e s n e a e e i t a n s f i e n c a s r s d b d a o e m a p a d e n d a s o t o s o m a s t a çã o e c a o e m 3 5 r p m r .

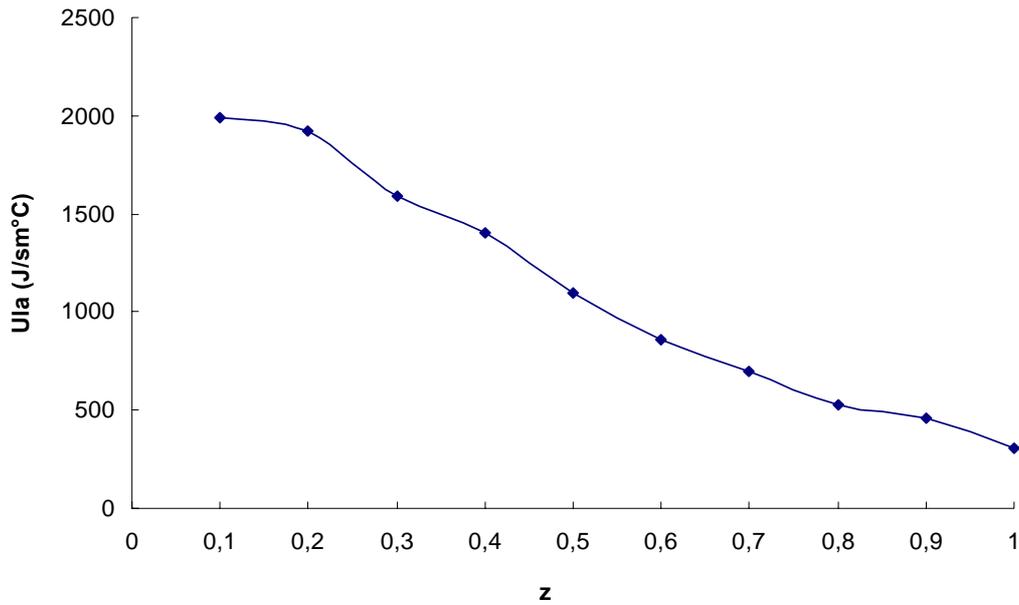


Pd guav413 re f d o ra o e o i l t e f c e h e s r e a e i t a n t e t i m c a e r c a o s (U_{LA}) i a o o n g o o l e c a o (N_R 3r5 p m) r .

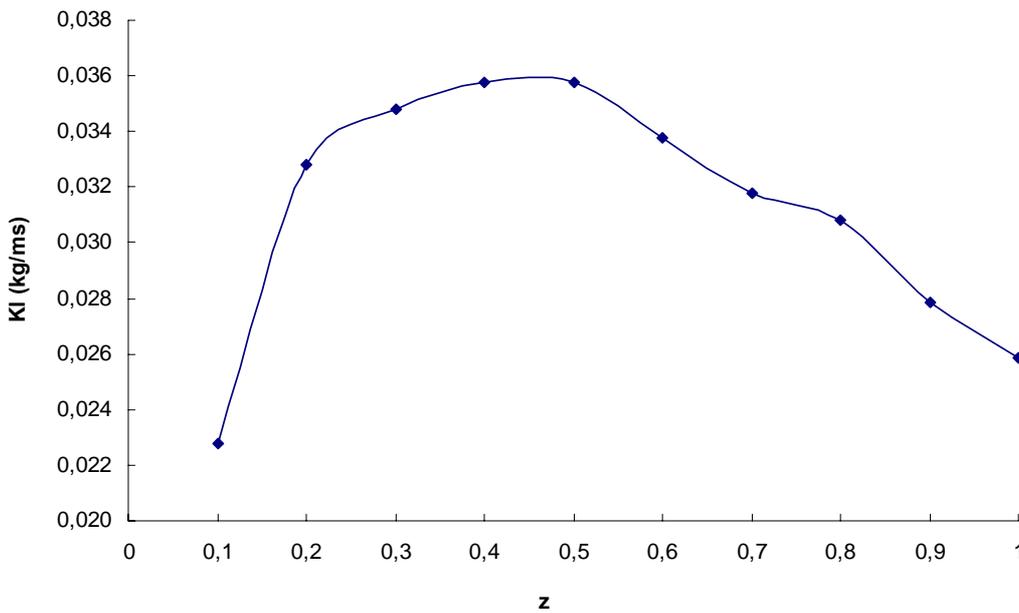


Pd guav414 re f d o ra o e o i l t e f c e h e s r e a e i t a n t e t i m c a e r m a s a (k_L) i a o o n g o s o l e c a o (N_R 3r5 p m) r .

d m e g u a ã a p e s n t a i a r a l g u a 415 e 416 c o m o . p e f . o c o e f s e n t e s r e a e i i r s l i e t a n t e t i m c a b r a o s e m a r p a d e n d a s o t o s o m a s t a ç ã o e c a o e m 42 r p m r



Pd guav415 re f d o ra o e o i b e f c e h e s r e a e i t a d e f i n c a e r c a o s (U_{LA}) i a o o n g o o l e c a o (N_R 4,2 p m) r .



Pd guav416 re f d o ra o e o i b e f c e h e s r e a e i t a d e f i n c a e r m a s a (k_L) i a o o n g o s o l e c a o (N_R 4,2 p m) r .

b e f c a m e p a a a i n o r o e x p e r i m e n t o r (3,5 e 4,2 p m) q u e , e m o a o p e r f e r s e m p e a t a c r ó v o t e v e m e d i a s o i d e s s o , b p e f d o i n e f c e n t e i s e s t a n f i ê m c a e r s d a o e m a r a d e l i t a m e s s e r e s ê n c a e p e a c a f i c a m e n t e o m i s i e p e a o o c r e u s u m r e u ç ã o r a t a d e f ê m c a d e r c a o s a o d o n g o o e l c a o (t a x a e r c e c e n t e r e e c a g e m) e u m a s e n t o

d o coefcent edtañ fñimca edmalsa no inco osca do iegu ar se e usãõ no ongo o 1
d ne no (auncho astemp atua or ór odúm o snlgane íansê mca s masa, aunesno ss
d a cag m adé unspcoe egua eliução ga ia a tan fê mcla se mas a aéios fna ss i
e ca o) r s .

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

de uma orotidol quanto do conteúdo menor fu do râmco olmae ia nô ne o oif ri
deca o ape e dasam oa como dança coma mo e aie n apesenta lr mas e atua rs rli .
P d d b a ala e tr mmaçãr a t iu ção re caisai ni d upe noe e so samps tase ntor o
ca cabamento e smat a no me o o lleda id (é mpor a tua e ânguo né o e quel a) a i
me to ooga et al. (2001) ape ento ur rFE dno çs ra tinte con t ntes e pe são coma i
d z dut açãod o coe ficiente e f ção iere m ma die xpe nentia ne nE Te 10 746 pã a o r .
N d d a e t nbraçãr o t mpo die e ê nca, em o asi q uã ção Y NN D e LL E, LL
1 77(qua ção 2 56) ape e n dme. oe Es uta orz lpo se st l a s nfo sma çõ i rea i q uer não ãs is
d comum e e t em(dca ga s mat e a ea mo me d llo t cr o), a i equaçã o e cone nra a ao
e u da or xpe nentia r e a q uã ção De M ISe EH (1 4) R Em pã a nã o A O R r
e U mado p d d s ir D (2008) ant e a b f e nã r e cadi o qua f osam lts ro ois e u ta or, i s s s l
e tane ntr pa ad ap ca çã o em f e t lã n e r ganua Fir a q uã ção De M s Se HE LAR E
d (1 4) com pa nã o t e U m o p d d s ir (2008) é a vma e pe a RR ra i pa a p o çã o ir
d d pe ão r o t mpo e is ê nca o ma e sa no ier ca o il r s .
o d b edu ta or o t so q ala os b rã o çs e ma s a t e nsga fo am a tã nti con t ntes e sis
b e e nca am uma i tuã çã o a tã nti se t r e n e se m con d e açõ e p o çã o q u e t a t a r s
d pem a r e e nta a iss e r d fã o d s q uã to q d l e em d n e to ooga E e p o çã o tã r se ca o e r s
enconta a de m e atua p e ê r h i d m do no e 20 a 25 d e e nta a e tã fã o, o s a o l s s
e xpe nentia r n ca a im um isa iã e m to r o de 70 (em ma a) e nta a s s rã fã o, o çã o l s
bz e ca a c tã r o mpe tane nã d alahço e r e g s tã o l e nã o con è a s o r si .
N a b e t h maçãr o coe ficiente go a iei tan flê vica e nsga á iã equaçõ i s
e d conta ad mar e d tual forã nã t i t r d uã n o co r d s. a a a er Q uã o r e t mpe atua or gre s
d no nã o d eca o i po i o crã p e a e nta a e a lã o n e n s o m a a l s m a, a q uã çã o q i e n e o r
z dpe e t r pa nã o tã r m p e nta a r p o s r e l l L (1 42) 9 . ER
mo e a g m p l o p o tã d r s (2008) ape e nã o ur v e A o R R s n f cã tã o i o n i i i s
d e u ta or xpe nentia r s v e d e i o p o v e s n e s e i s o d p l o a or p o mpe crõ e s r e m iã , s s
d pem a d e iã fã o (p s sã) e o u l p o de s f e nça s nã o d m p o tane ntr o rã zã e a ut rã o i s i l
no U e nã o D s s (2008) e o ut A a o nã o A R R e i l n e n t s r s i s .
d VM ap ca çã o a Nã o b i o nã (DI 1 i d L 1) ape e nã o ur 9ã n ê nca e i p o çã o r i s
d d em d o nã o p o nã a a o d g m r e e nta a e rã fã o c rã lã a nã d s m e nã r, nã o e i m o tã n o, i s s

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

:

P N SLDy Hd I, A , Ape nd nRE tu ydfi Ee hst nE ntsi ect otari he ,i r r r
y TD ng ec noog, li 4 nhl 21 7 p 902-1651. . 9 .

D N ,d dcação accDis paA fuãri el uo,i vswwan a o gs, Al 5/08/2006 .

J d D S, F d ecag mAc .e t A RE Bem Ed itie o d tó o De Fas e outo a o sacR ae .
í d de ngEn d a bu mEd, h ei U a e Fe Q R P G si e U h a, il - /1 ,i 2008 Q .

C K JdC yCy dape IBAa. ca hgy ER: re ri r lãnc n s.Nng HermsApeYe, i.e.wro is h r
M ujSm av (er) 1 83 2 p 1- 519

C K J T , d ey dy g h a f.f.g h nER ca ynli utID re ri r ng ec nosog, li 88 h p 9
631- 653 .

d G K J d , ydy- o BAag.n carsaErg o aID re ri r ng ec nosog, li 2 hl 01p 99 .
365-3 3 9 .

M d T ZS, C aBAM rca. eRROs O a iar nts lo eress nte e o j e m A E to L i
Dz d e ar e e coan linó Su R P G rão U Fa G, E S / l a T 1 5 p 13-22 Q e 99 E . .

D e outo a o r .

K D , KK, M KBW- y. . RCO BEBAH CDA GER. ARNgE vra A. a r i e l i s. h
Py C u ng ompan, l i n i , e I t p t 1 74. r s 9

N C C ST N JY, T L. T, e E e ct Af em p S tu O or r o p t o n E o t e m of i r o s g d a s i l i
M T ve a am actom Sof te s ,i s 145, p 27 A, Al 71 .9 E 9 9 9

NG d P F D I S T , d 8 , , H ., .V o p t b y W r. e o s p D i n f r a t s a p o u r e e a g a n a n r l i s
P t e T p o u c t V r a h i an d s o m S o f t e s ,i s 145, p 27 A, A 67 .9 E 9 9 9

T P M , H I d o S d a E m. m u a d o b l e O s j t i e r e c a o e P B C t o U F M G, r - i s / i s, R
2004 p 34 41 .

G D P Sy d y S, L y m u l a t o n o f y o A O l e i f o y u g r c i D t a r r e r s ng ec l l i o g, li 3 hl 1, 1 99
p 12-155 . 9 .

M N D J MS d I, S W y d y H S . A R E L t u e A n o t a C. R r n i g s i a r t 1, R e r m i c a ng re hng i l r i
P v oge, r 45 p 482-583 l. 4 . 9 9.

M N D J MS I, S W C H d b. A R E L e m c A ng Arc M h G H a r o o i R a c a w H E , k 3 ° e , ill
p 831, 1 50 . 9 .

ND HM S K , a c o n e m o f E r s u C A B m o r t u e i l o n t e n t is E c u t u a r . r i l A l
ng re ng or 33 (D), pi 2 - 31, l l E 52 . 9 9

ND JHM N , ND, HM S d. E ERPO d m p y t a t o F a E R D O e r f i D e p e ng r i
J ma ou ma of V i g i c A t u a r l n g m e i n g A t r a c i o i d 3 p s 8 E h 1 68 R. 9 9

N P ~~Q~~ , Id Itan pd to f o r to sug f g s e l l i s o t a t o m C i u h a n i n t r e l m n g s, s. 56 p. s. .
120 126 1 78 9 .

U S H JH n f u e n c l o f p a t c e l f r O n g f o m i f l g r t b i n o u n e f l i c h a t t r a n f e c o e f f i c e n t n s i i
d o t a h e r a n f o o e o w e r e c l n o r o g, 5, p h l 2 1 1 2 8 1 9 . 9 9 .

U S H N S J H y H y H I , H , d S O l ' H M A p S A O n g R . o n t e a, l 7 8 p 1 5 2 1 9 .

T N S F H N G S H , D H , I . O u @ E . . o B 2 4 B . 5 6 l l 4 0 . 9

K F K W N , J S , C , A d y o m p A u e . m u a t r o n B O o s a l r e f a r t r e t n l o n t n e": i i
C J v o l i m a, l 8 6 h 3 A p 2 6 3 9 2 6 8 E . .

K F K W N , J S , C , A d y o m p A u e . m u a t r o n B O o s a l r e f a r t r e a t a l i m a : h
C J t a n f e " , r v r o l i m a, l 8 6 h 3 A p 2 6 9 2 7 5 E . 9 .

J T P N Z K , C N J A B , A I T , A A f a c t o f A e m p e a t u a o n e r S o t i e o p h o n i s i
y W o t e m a y d r a t b d t s t r f d o f w o i e A i a t F o o h u m a S o f o o s . c e n e l i
v o 5 0 p 3 8 5 3 0 l l 8 5 . 9 9

K J Y d N N D P L d y , d e l l e n e t n e n o e s t o E t i r n v t a n c e m , l . 5 5 p h .
2 4 3 2 5 2 1 7 7 9 .

P K C , K d , Y D S , . L . m u l t y a n d o e - u p f p r e u s a t l c o n e n g a n i a c a n g i s i
y o a i D r e r r v n g e c m o s o g , i 1 5 p h l 6 1 - 1 7 1 0 1 7 9 9 9 9 .

W y S T K d , L I D a t e o f M r n g h n e o C i a n l i s n g l e i n s , o . 1 3 . p 4 2 7 . 1 2 1 . E . 9

d M b U L i H i t u S D F A e c o g m e e t E n e r t m e c a i l i e s o r p o t a t o s o i r i
U P P G e U H a r - d / l , i 2 0 0 5 D p 1 - 4 M Q e t a c a o e r . e i s a o r s .

d K L I y H e a t a h d n a . t a n A d c a p s a P - p o c d i r o P i l l e g a m n o n i e s . , x f o , s s
1 6 9 9 .

C T T J H C d G J , P A . d . a A e d B y e . n e r t n i E R n c a i c a P n g i o t a i r e r i a r t l r r s .
v d e a t o n o f t e t v o i t e i a m m o n e S u b a o f t p a l a t o n b e e r c m o o g , s 8 p h l - 1 .
1 7 1 8 7 9 .

C T T J H C d G J , P A . d . a A e d B y e . n e r t n i E R n c a i c a P n g i o t a i r e r i a r t 2 r r s .
d p p c a t o n o f t e t u d i t e i a m n d r e t o e x p e m e n t a h i n u i t a a t a r o u m s o f l r l
S P y t p a a t o n o e e r c m o o g , s s , 1 8 8 1 . 9 9 .

C T T J H S M K d H S H A M . n A n p e o e i l M o e B y G A c e o t o n n a i d a n g i o t a i s r i
D C e " , r a n e m s l l 0 s 6 8 p 1 3 9 9 4 8 . . E 9 .

MC y P c G v Y , I a d e o c t e f e c o s y b a t i t a n e s n l e a t C a t r o t a i i r e h e m r c a s . h i
P n g v e n g o g e , i r 5 6 p 5 7 6 s s l 6 2 . 9 .

C M T S , I L L , C U B T W , . F I E R , . C H B a a p n f u e n c n g t e E o p e t a t o n o f r o t a r i r
T C e , a n r r , l 4 2 s 3 8 p h 8 4 1 9 . . E .

SKM dy, ISW LL H , . Llydtf Aof e. AntRst ne ACe Roia i re ir h e m ca s. h i l
P ngree ng oge, it 56 52 Ess, p935-38

DIYK S D ydyHeatn ma taAECEn otass Ores r ie rftca ngree hngiolge, it 63 Ess 9
v 13 p 12-137 . . . 9 .

M M , SS ,L , D .BIO Engf.ro. . Ato c em di sni ult h uterwo t s r . r Bhs
on e ,Lngat e i p 301, l 171 . . . 9 .

NSG W T G M , UH M S NB , . OW OR N I H, bP E A L A, A ctng r qu. Em O r Ri i
M yb o tue opstf m io fr V ean i anacton Softe s, i o 316, p 210 A21A3 . E 9
1 8 9 9

U T G SWD T G M , M T, NOI E yb . J IS , DE, A S . .Ing or Can wBi RO
T Heate anacton Softe A i s112h13 1 73 A A 9 E

G F , , actM nf uAcIng te sdExlmuri aD ofyG ngr ere io n iR shall a e Li hi
d U yP S a h- Iv , d i e nr e . D, l 4M i e sição 9e9. e sa o r s
D KdS S , d *et al* d A A t. Aydeyr gn st o A o caica m g h o a D Re r i r ng 2(oc ir 9
MS 2I ontea), l 92 e e ,lp 9258-1367i . E .

D K S Sd , Sy dly al AveAupA. fca ca yng o a T D re r i r ng ec nosog, li 4 hl21 99 .
(1 2), p 25 - 277 . . 9 . &

C C db, em ca eng ne m G n E R R o R i i d v H , M N, v7t - ill Y99 o ah o , r
U ta o n o s s i s . E

J Ty dy , e e gn of. o t a h D B s i R n o C e as r n t l e m ca s. n gree hng il 63 i i 9
4l, p 272-287

J M S N, WSG T F , . . d . ORS ERAe . oc, h e d M i g on o n B l i a l 60 p a e n o 61 9r

W SM , SW dvH .A. LR apo a C o n f a r m R o p ie rftca E n gree hngiolge, i r ni Ess
v 1 52 48 p 1419146

C D U N, T . SIM "P NGZ, . I, TREP R A LI, R G e o p e t e r o f D e a n i e u " , I s s i i s
M G c a d n i v, r d 87, 4 Y, d l l a 9o , h a p n o k s s i s E

DN C , SCL GNI J MHIRE D. T, R(200) DE ABA e. gn of Ght nsio ta li h s i
By T e ", owre ec nrog, n121, pg 230-238

M S W C MTC y T , J y d H y A I, d A L E m a r a f o t a . ie s i n A r t e r e p e f o m a n e i t .
C ie rftca ngree hngiolge, i r 50 p 467E575 1 54 . . . 9 .

FS F "EG y NP CKL C . LI. I Ota E o Fer R f E Chu a l e s t R", r e n r c a i n h i l
P o e ngree ng essou ei, oir 40 p 183 § 62l. R 9 .

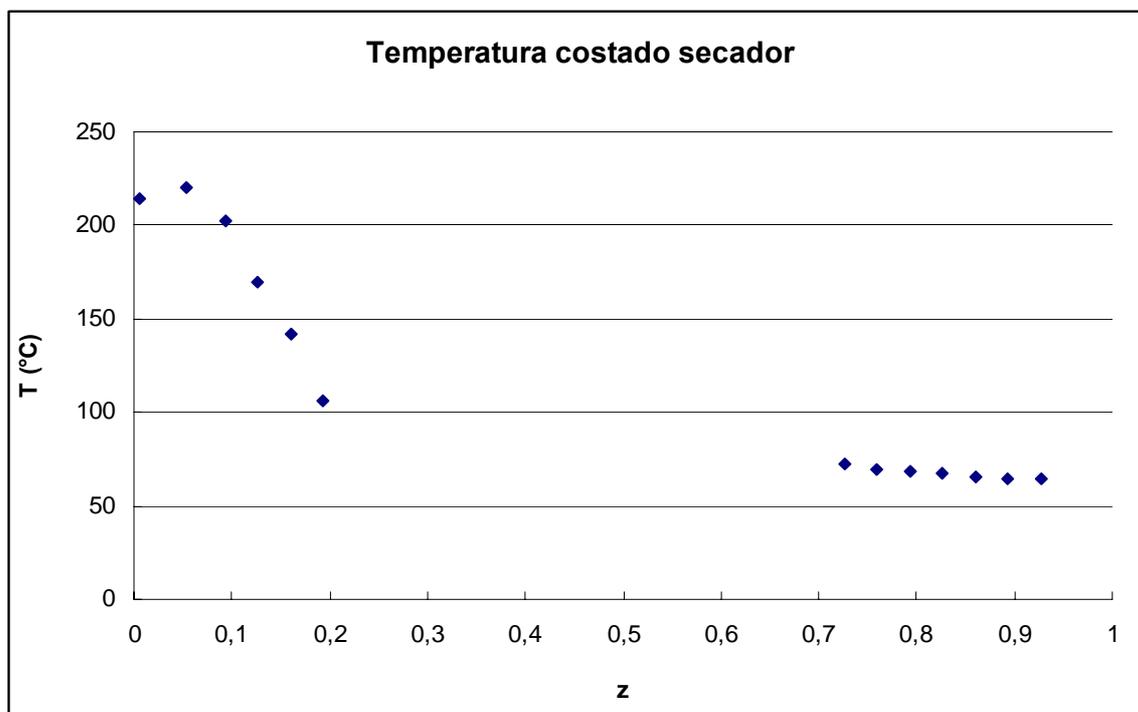
SN J M D G CI , T N S C AU , SA . , T ERA . re. R e c . , p a p e O B B 4 1 1 27 9

MP N T S HP T , M F T L , GS . , MO Q . A , ya ES Rat @ . mu Q h o E f o ri l rig- ar i
N M T ewVoe anactomSoftte s ; so 1 h p 582 586 1A68 . E 9
Td N d Cy MD , L , n u d al . 'Angeq n p n i t e i c t o m n a p p s d a t o i n D a e k i r i , r l k k
N v d d Y o a o U , l r t a o k n 99 , p 362 s i s E .

ANEXOS

A.1 – Perfil de temperatura do costado do secador.

Obs.: Medidas realizadas no lado de entrada dos gases quentes no secador.



A.2 – Determinação do diâmetro de Sauter das partículas de GTSP passante no secador

80%

Para rotação de 3,5 rpm

Mesh	Abertura (mm)	Msól (g)	Fração retida
5	4	94,04	0,4261
6	3,35	14,2	0,0643
7	2,8	11,73	0,0532
8	2,36	29,81	0,1351
10	1,7	44,62	0,2022
14	1,18	17,33	0,0785
16	1	1,42	0,0064
cega	0	7,53	0,0341
		220,68	

Dsauter
3,1

$$D_{sauter} = 1/\Sigma(FM/D)$$

Diâmetro médio (D) – é a média aritmética entre a abertura de duas peneiras consecutivas.

Fração mássica (FM) = Retenção(%) / 100.

Dsauter é o Diâmetro Médio de Sauter.

100%

Para rotação de 4,21 rpm

Mesh	Abertura (mm)	Msól (g)	Fração Ret
5	4	66,4	0,4002
6	3,35	8,02	0,0483
7	2,8	4,54	0,0274
8	2,36	11,03	0,0665
10	1,7	26,79	0,1615
14	1,18	19,87	0,1198
16	1	1,95	0,0118
cega	0	27,31	0,1646
		165,91	

Dsauter
1,8

A.3 – Aplicação da Metodologia ARRUDA (2008) em Maple 8

```
restart;
with(plots):
```

Perfis de Umidade e Temperatura (ar e sólido) no Secador Rotatório

Condições de Entrada

```
n:=1: # número de volumes de controle
MMar:=28.951: # massa molecular do gás [g/gmol]
R:=8.2e-5: # cte dos gases ideais [atm.m3/mol.K]
P:=0.9159: # atm
```

```
d Pa act tra e Sô to so i esca o r
r:=1.5: # Raio do tambor [m]
Diametro:=2*r;
L:=30: # Comprimento efetivo do tambor [m]
A:=3.14159265359*r^2; # Área da seção transversal do secador [m2]
V:=L*A; # Volume do secador [m3]
```

```
a act tra r p e aco n s i s i s: O
TR:=720; # Tempo de residência [s]
tr:=TR/n: # tempo de residência em cada volume de controle [s]
NR:=4.2: # Rotação do tambor [rpm]
H:=(Gs/(1+Mo))*TR*z: # Holdup de sólido seco no secador [kg]
tq:=0.641: # tempo médio de queda das partículas (s)
Yq:=2.064: # comprimento médio de queda das partículas (s)
Inclina:=2.5: # inclinação do tambor (o)
ff:=L*tq/(Yq*sin(Inclina/180*3.14159265)*TR); # fator do tempo real de contato
gás partícula
```

```
d on çõe e nta a io rs r : E A
Tfo:=236: # Temperatura de entrada do gás [oC]
Wo:=0.008480: # Umidade absoluta de entrada do gás [kgvp/kgarseco]
UR:=0.0004370: # Umidade relativa do gás [-]
var:=5.2056: # Velocidade do gás [m/s]
rhoar:=(P*MMar/1000)/(R*(Tf(z)+273.15)); # Densidade do ar [kg/m3]
Gf:=(var*A*P*MMar/1000)/(R*(Tfo+273.15)*(1+Wo)); # Vazão mássica do gás [kg/s]
Ma:=var*A*(TR*z)*(P*(MMar/1000)/(R*(Tfo+273.15))*(1+Wo)); # Holdup de ar seco [kg]
```

```
d d on çõe e nta a io rs o li E
Gs:=107353/3600: # Vazão mássica de sólido seco [kg/s]
Tso:=80.7: # Temperatura de entrada do produto [oC]
Mo:=0.0722: # Umidade do material na entrada [kg vapor/kg de sól. seco]
```

d d a çõe p a o a d n e n Ma e u d e a es (l) a ju t a i P e a e q u a ç õ e l R : A E

```
#taxa 1
AA:=0.303984635497554;
BB:=128.2820265;
CC:=0.423840072;
```

Equação para a umidade de equilíbrio (We) ajustada pela equação de HALSEY modificada:

```
aa:=-0.0444558421871917;
bb:=1.43490322957228;
cc:=-2.07950585482656;
```

```
K:=AA*exp(-BB/Tf(z));
MR:=exp(-K*(ff*TR*z)^CC);
```

```
Meq:=((-exp(aa*Ts(z)+cc)/ln(UR))^(1/bb))/100; # [kg/kg-bs]
```

Ud a â n e t o r e r p a a u p e s m o e e t e r s e g m e n t s s s s

```
# [kJ/soC] - Miller, Smith e Schuette (1942)
UaV:=((0.145*(16-1)*(Gf*3600/A)^0.6)/(Diametro*1000)*V;
Up:=0; # [kJ/sm2oC]
Tamb:=28.5; # [oC]
```

Correlções Termodinâmicas - fixo

```
Cps:=1.298;
Cpso:=Cps+1.805*Mo; # Cp do sólido úmido [kJ/kg oC]
Cpf:=1.0; # Cp do ar seco [kJ/kg oC]
Cpl:=4.2; # Cp do líquido [kJ/kg oC]
Cpfy:=Cpf+Cpv*W(z); # Cp do ar úmido [kJ/kg oC]
Cpv:=2.1; # Cp do vapor [kJ/kg oC]
```

```
# Calor Lat. de vaporização da água pura [kJ/kg oC]
qlat:=2492.71-2.144*Ts(z)-0.001577*Ts(z)^2-7.3353e-6*Ts(z)^3;
```

Balanços de Massa e Energia

Equações

```
> # Balanço de umidade do ar [eq1=dW/dz]
eq1:=Rw*H/Gf;
```

```
# Balanço de umidade do sólido [eq2=dM/dz]
eq2:=-Rw*H/Gs;
```

```
# Balanço de energia do ar [eq3=dTf/dt]
eq3:=-1/(Gf*(Cpf+W(z)*Cpv))*(UaV*(Tf(z)-Ts(z))+Up*3.141593*Diametro*L*(Tf(z)-Tamb)+Rw*H*(qlat+Cpv*Tf(z)));
```

```
# Balanço de energia do sólido [eq4=dTs/dt]
eq4:=1/(Gs*(Cps+M(z)*Cpl))*(UaV*(Tf(z)-Ts(z))+Rw*Cpl*Ts(z)*H-Rw*H*(qlat+Cpv*(Tf(z)-Ts(z))));
```

Taxa de Secagem Pontual

```
Rw:=(1-MR)*(Mo-Meq)/(TR*z); # [1/s]
```

```
> indets({eq1,eq2,eq3,eq4});
```

```
> sys := diff(W(z),z)=eq1, diff(M(z),z)=eq2, diff(Tf(z),z)=eq3,
diff(Ts(z),z)=eq4:
fcns := {W(z),M(z),Tf(z),Ts(z)}:
> sol:=dsolve({sys,W(1e-5)=Wo,M(1e-5)=Mo,Ts(1e-5)=Tso,Tf(1e-5)=Tfo},fcns,numeric,output=listprocedure);
```

```
dsolM:=subs(sol,M(z));
dsolW:=subs(sol,W(z));
dsolTf:=subs(sol,Tf(z));
dsolTs:=subs(sol,Ts(z));
```

```
Mcal:=dsolM(1); Mexp:=0.0297; Erro_M:=(Mcal-Mexp)/Mexp*100;
```

```
Wcal:=dsolW(1); Wexp:=0.0565; Erro_W:=(Wcal-Wexp)/Wexp*100;
```

```
Tfcal:=dsolTf(1); Tfexp:=106;ErroTf:=(Tfcal-Tfexp)/Tfexp*100;
Tscal:=dsolTs(1); Tsexp:=97;ErroTs:=(Tscal-Tsexp)/Tsexp*100;
odeplot(sol,[z,M(z),color=blue],1e-5..1); M(tr):=Mexp;
odeplot(sol,[z,W(z),color=blue],1e-5..1); W(tr):=Wexp;
odeplot(sol,[z,Ts(z),color=black],1e-5..1); Ts(tr):=Tsexp;
odeplot(sol,[z,Tf(z),color=blue],1e-5..1); Tf(tr):=Tfexp;
odeplot(sol,[[z,Tf(z),color=blue],[z,Ts(z),color=black]],1e-
5..1,legend=["Tf(z)", "Ts(z)"]);
```

A.4 – Aplicação da Metodologia I (Excel 2003)

Metodologia I

Temperatura ambiente	Tatm	301,65	K	28,5	oC
Pressão ambiente	Patm	92686	Pa	694	mmHg
Temp. Sól. Entrada	t1(sol)	353,85	K	80,7	oC
Temp. Ar Entrada	T1(ar)	509,15	K	236	oC
Umidade Sól. Entrada	m1(sol)	6,73%	-		
Umidade Sól. Saida	m2(sol)	2,88%	-		
Massa Sól. Saida	W2(sol)	30,71	Kg/s		

Cálculos da quantidade de água evaporada (Wevap_Kg/s):

$$w_2 = W_2 m_2 \quad w_2 = 0,88 \text{ Kg/s} \quad 3183,593 \text{ Kg/h}$$

$$W = W_2 - w_2 \quad W = 29,82 \text{ Kg/s} \quad 107357,8 \text{ Kg/h}$$

$$w_1 = \frac{W m_1}{(1 - m_1)} \quad w_1 = 2,15 \text{ Kg/s} \quad 7746,523 \text{ Kg/h}$$

$$W_{\text{evap}} = w_1 - w_2 \quad W_{\text{evap}} = 1,27 \text{ Kg/s} \quad 4562,93 \text{ Kg/h}$$

Van't Land (1991)	T2=	362,11	K	89	oC
Processo Colet (2004)	T2=	362,11	K	89	oC

Cálculos do calor para secagem:

(*)

$$t_{\text{ref}} = 373,15 \text{ K} \quad 100 \text{ oC}$$

$$c_{\text{pvapor}} = 2175 \text{ J/(Kg}^{\circ}\text{K)} \quad \text{???} \quad \text{(*)}$$

$$c_{\text{págua}} = 4200 \text{ J/(Kg}^{\circ}\text{K)} \quad \text{???} \quad 1,003 \text{ Kcal/Kg (à 25 oC)}$$

$$\lambda = 2260000 \text{ J/Kg} \quad \text{???} \quad 539,8 \text{ Kcal/Kg (à 100 oC)}$$

(**)

$$c_{\text{p sól.}} = 1298 \text{ J/(Kg}^{\circ}\text{K)} \quad \text{Cp TSP (kcal/kg}^{\circ}\text{C)} = 0,31$$

(***)

$$\text{ns. do vapor} = 1,0050 \text{ Kg/m}^3 \quad \text{???} \quad \text{pg 25 material termodinâmica}$$

$$\text{Experiência} \quad 0,995 \text{ m}^3/\text{Kg (à 116 oC)}$$

$$176209,3 \text{ KJ/min} \quad Q_1 = W_{\text{evap}}(\lambda(t_{\text{ref}}) + c_{\text{vap}}(T_2 - t_{\text{ref}}) - c_w(t_1 - t_{\text{ref}})) \quad Q1 = 2936821 \text{ J/s}$$

$$19188,43 \text{ KJ/min} \quad Q_2 = W c_p (T_2 - t_1) \quad Q2 = 319807,2 \text{ J/s}$$

$$Q_3 = w_2 c_w (T_2 - t_1) \quad Q3 = 33292,1 \text{ J/s}$$

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 347931,9 \text{ KJ/min} \quad Q_{\text{total}} = \frac{W_{\text{total}}(T_2 - T_1)}{T_1 - T_2}$$

3 91460,75 Kg/h

Calculo da Vazão de gás:

$$G_1 = \frac{Q_{\text{total}}}{(T_1 - T_{\text{amb}}) c_{\text{pAr}}} \quad G1 = 25,41 \text{ Kg/s}$$

$$G'_2 = \frac{Q_{\text{total}}}{(T_1 - T_{\text{amb}}) c_{\text{pAr}}} \cdot 1,2 \quad G'_2 = 30,49 \text{ Kg/s} \quad 109752,9 \text{ Kg/h}$$

$$G_2 = G'_2 + W_{\text{evap}} \quad G2 = 31,75 \text{ Kg/s} \quad 114315,8 \text{ Kg/h}$$

$$g_2 = \frac{G_2}{\rho_{\text{Ar}}} + \frac{W_{\text{evap}}}{\rho_w} \quad g2 = 37,68 \text{ m}^3/\text{s} \quad 135630,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

Cálculos do Diâmetro (D_m) e Comprimento do Secador (L_m):

eram muito maiores:

$$u = 2 \text{ m/s} \quad \text{(Observação as velocidades encontradas para o secador fi}$$

$$D = \sqrt{\frac{4g_2}{\rho \cdot u}} \quad D = 5,31 \text{ m}$$

$$L = 7D \quad L = 37,18 \text{ m}$$

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)