



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



**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA NA MODELAGEM
DA SECAGEM DE FERTILIZANTES EM SECADOR ROTATÓRIO**

MARISA GONÇALVES DA SILVA



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



ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA NA MODELAGEM DA SECAGEM DE FERTILIZANTES EM SECADOR ROTATÓRIO

Marisa Gonçalves da Silva

Orientadores: Prof^ª. Dr^ª. Valéria Viana Murata e
Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Desenvolvimento de Processos Químicos

Uberlândia - MG

2010

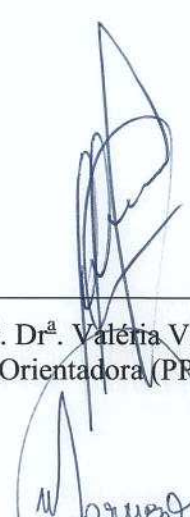
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

- S586a Silva, Marisa Gonçalves da, 1978-
Análise de sensibilidade paramétrica na modelagem da secagem de fertilizantes em secador rotatório [manuscrito] / Marisa Gonçalves da Silva. - 2010.
110 p. : il.
- Orientadora: Valéria Viana Murata.
Orientador: Marcos Antônio de Souza Barrozo.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.
1. Secagem - Teses. 2. Fertilizantes - Secagem - Teses. 3. Calor - Transferência - Teses. 4. Massa - Transferência - Teses. 5. Processos químicos - Modelos matemáticos - Teses. I. Murata, Valéria Viana. II. Barrozo, Marcos Antônio de Souza. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

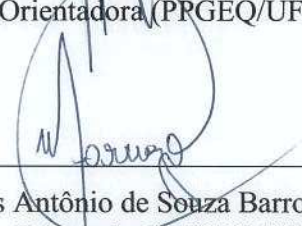
CDU: 66.047.57

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARISA GONÇALVES DA SILVA SUBMETIDA
AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 29 DE
JUNHO DE 2010

BANCA EXAMINADORA:



Prof.^a Dr.^a Valéria Viana Murata
Orientadora (PPGEQ/UFU)



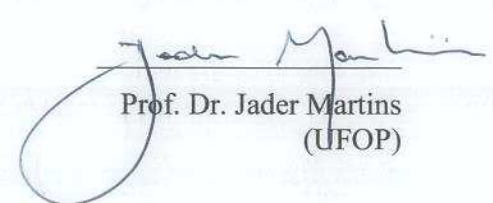
Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo
Orientador (PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte
(PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
(PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Jader Martins
(UFOP)

Dedico esta dissertação à minha família pelo amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à minha família pelo amor e confiança dedicados a mim, ao longo de minha formação pessoal e profissional. Vocês são tudo em minha vida.

À Prof^ª. Valéria Viana Murata e ao Prof. Marcos Antônio de Souza Barrozo pela orientação, por toda a dedicação, paciência e confiança.

À Prof^ª. Taisa Shimosakai de Lira e ao Prof. Edu Barbosa Arruda por toda a ajuda e amizade durante este período

A todos os professores, colegas e funcionários da FEQUI pela colaboração.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade concedida.

À Empresa FOSFERTIL pela confiança depositada.

Enfim, a todos que fizeram parte desta história e colaboraram para o bom andamento do trabalho.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	v
Nomenclatura	vii
Resumo	ix
<i>Abstract</i>	x

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 1

1.1 – AGRONEGÓCIO	1
1.2 – FERTILIZANTES	4
1.3 – SECAGEM DE FERTILIZANTES	6
1.4 – OBJETIVO	8

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 9

2.1 – FERTILIZANTES	9
2.2 – SECAGEM	13
2.2.1 – Secadores Rotatórios	14
2.3 – MODELAGEM DA SECAGEM EM SECADORES ROTATÓRIOS.....	17
2.4 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA	20
2.4.1 – Planejamento de Experimentos	23

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS 25

3.1 – MODELO MATEMÁTICO	25
3.1.1 – Equações Constitutivas do Modelo	27
3.2 – CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS UTILIZADAS NO ESTUDO DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA	30
3.3 – MÉTODOS	31

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES 34

4.1 – DISTRIBUIÇÕES DAS RESPOSTAS SIMULADAS.....	34
4.1.1 – Variação do Parâmetro Coeficiente Global Volumétrico de Transferência de Calor (U_{va}).....	34
4.1.2 – Variação do Parâmetro Coeficiente de Calor Perdido (U_p).....	41
4.1.3 – Variação do Parâmetro Taxa de secagem do Material (R_w)	48

4.1.4 – Variação do Parâmetro Calor Específico do Sólido (Cp_s)	55
4.1.5 – Variação do Parâmetro Calor Específico do Ar (Cp_f).....	62
4.2 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS RESPOSTAS SIMULADAS.....	69
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
APÊNDICE I – DISTRIBUIÇÕES DAS RESPOSTAS SIMULADAS PARA A CORRIDA CENTRAL DE SECAGEM.....	85
Variação do Parâmetro Coeficiente Global Volumétrico de Transferência de Calor (U_{va})	86
Variação do Parâmetro Coeficiente de Calor Perdido (U_p)	89
Variação do Parâmetro Taxa de secagem do Material (R_w).....	92
Variação do Parâmetro Calor Específico do Sólido (Cp_s)	95
Variação do Parâmetro Calor Específico do Ar (Cp_f).....	98
APÊNDICE II – ROTINA IMPLEMENTADA PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA UM CASO TÍPICO	101
APÊNDICE III – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS RESPOSTAS SIMULADAS PARA A CORRIDA CENTRAL DE SECAGEM.....	106

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Terras poupadas no Brasil para produção para 16 principais culturas (Fonte: ANDA/IBGE).....	3
Figura 1.2 – Índice de crescimento do consumo de fertilizantes (Fonte: IFA).	4
Figura 1.3 – Consumo mundial de fertilizantes, estimado para 2010 (Fonte: IFA).	5
Figura 1.4 – Consumo mundial de fertilizantes estratificado por país (Fonte: IFA).....	5
Figura 2.1 – Incompatibilidade entre diversos fertilizantes.	11
Figura 2.2 – Fluxograma esquemático de unidade de granulação de fertilizantes.	12
Figura 2.3 – Vista de unidade industrial de granulação de fertilizantes (Fonte: Catálogo da empresa DEDINI).....	12
Figura 2.4 – Esquema de um secador rotatório com cascadeamento (Fonte: PERRY e GREEN, 1999).....	14
Figura 2.5 – Fotos de secadores rotatórios para unidades industriais de granulação de fertilizantes (Fonte: Catálogo da empresa DEDINI).	14
Figura 2.6 – Fotos dos suspensores na parte interna de um secador rotatório industrial (Fonte: Catálogo da empresa DEDINI).....	15
Figura 2.7 – Esquemas comuns de suspensores encontrados na prática industrial (Fonte: LISBOA, 2005).	16
Figura 2.8 – Tipos comuns de suspensores (Fonte: LISBOA, 2005).	16
Figura 3.1 – Esquema do elemento infinitesimal de volume do secador rotatório operando com fluxo contracorrente (Fonte: ARRUDA et al., 2008).	25
Figura 3.2 – Fotografias da unidade experimental utilizada por ARRUDA (2008).....	30
Figura 3.3 – Etapas da metodologia empregada para estudo de sensibilidade paramétrica.	33
Figura 4.1 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de mínima secagem.	35
Figura 4.2 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de máxima secagem.	35
Figura 4.3 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de mínima secagem.	36
Figura 4.4 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de máxima secagem.	36
Figura 4.5 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de mínima secagem.	38
Figura 4.6 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de máxima secagem.	39
Figura 4.7 – Distribuições da temperatura do ar (T_f) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de mínima secagem.	39
Figura 4.8 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de máxima secagem.	40
Figura 4.9 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de mínima secagem.	42
Figura 4.10 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de máxima secagem.	42

Figura 4.11 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de mínima secagem.	43
Figura 4.12 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de máxima secagem.	43
Figura 4.13 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de mínima secagem.	45
Figura 4.14 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de máxima secagem.	46
Figura 4.15 – Distribuições da temperatura do ar (T_f) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de mínima secagem.	46
Figura 4.16 – Distribuições da temperatura do ar (T_f) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de máxima secagem.	47
Figura 4.17 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de mínima secagem.	49
Figura 4.18 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de máxima secagem.	49
Figura 4.19 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de mínima secagem.	50
Figura 4.20 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de máxima secagem.	50
Figura 4.21 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de mínima secagem.	52
Figura 4.22 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de máxima secagem.	53
Figura 4.23 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de mínima secagem.	53
Figura 4.24 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de máxima secagem.	54
Figura 4.25 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s) para experimento de mínima secagem.	56
Figura 4.26 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s) para experimento de máxima secagem.	56
Figura 4.27 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s) para experimento de mínima secagem.	57
Figura 4.28 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s) para experimento de máxima secagem.	57
Figura 4.29 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s) para experimento de mínima secagem.	59
Figura 4.30 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s) para experimento de máxima secagem.	60

Figura 4.31 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s) para experimento de mínima secagem.	60
Figura 4.32 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s) para experimento de máxima secagem.	61
Figura 4.33 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do calor específico do ar (Cp_f) para experimento de mínima secagem.	63
Figura 4.34 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do calor específico do ar (Cp_f) para experimento de máxima secagem.	63
Figura 4.35 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do calor específico do ar (Cp_f) para experimento de mínima secagem.	64
Figura 4.36 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do calor específico do ar (Cp_f) para experimento de máxima secagem.	64
Figura 4.37 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do calor específico do ar (Cp_f) para experimento de mínima secagem.	66
Figura 4.38 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do calor específico do ar (Cp_f) para experimento de máxima secagem.	67
Figura 4.39 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do calor específico do ar (Cp_f) para experimento de mínima secagem.	67
Figura 4.40 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do calor específico do ar (Cp_f) para experimento de máxima secagem.	68
Figura 4.41 – Superfície de resposta da umidade do sólido (M) com a taxa de secagem do material (R_w) e o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}).	75
Figura 4.42 – Superfície de resposta da umidade do ar (W) com a taxa de secagem do material (R_w) e o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}).	75
Figura 4.43 – Superfície de resposta da temperatura do sólido (T_s) com a taxa de secagem do material (R_w) e o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}).	76
Figura 4.44 – Superfície de resposta da temperatura do sólido (T_s) com o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) e o calor específico do sólido (Cp_s).	77
Figura 4.45 – Superfície de resposta da temperatura do ar (T_f) com o calor específico do ar (Cp_f) e o coeficiente de calor perdido (U_p).	78
Figura AP1.1 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}).	86
Figura AP1.2 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}).	87
Figura AP1.3 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}).	88
Figura AP1.4 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}).	88
Figura AP1.5 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p).	89

Figura AP1.6 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p).	90
Figura AP1.7 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p).	91
Figura AP1.8 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p).	91
Figura AP1.9 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação da taxa de secagem do material (R_w).	92
Figura AP1.10 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação da taxa de secagem do material (R_w).	93
Figura AP1.11 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação da taxa de secagem do material (R_w).	94
Figura AP1.12 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação da taxa de secagem do material (R_w).	94
Figura AP1.13 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s).	95
Figura AP1.14 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s).	96
Figura AP1.15 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s).	97
Figura AP1.16 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s).	97
Figura AP1.17 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do calor específico do ar (Cp_f).	98
Figura AP1.18 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do calor específico do ar (Cp_f).	99
Figura AP1.19 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do calor específico do ar (Cp_f).	100
Figura AP1.20 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do calor específico do ar (Cp_f).	100

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Parâmetros analisados nos dois métodos utilizados por LIRA (2005).....	22
Tabela 3.1 – Nível das variáveis usadas no planejamento experimental dos ensaios de secagem no secador rotatório [$\alpha = 3^\circ$; $N = 6$; $N_R = 3,6$ rpm] feitos por ARRUDA (2008).....	31
Tabela 3.2 – Nível das variáveis usadas no planejamento para os ensaios de secagem no secador rotatório [$\alpha = 3^\circ$; $N = 6$; $N_R = 3,6$ rpm] feitos por ARRUDA (2008).....	32
Tabela 3.3 – Planejamento experimental para análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo de secagem do fertilizante SSPG.....	33
Tabela 4.1 – Variações no parâmetro coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para a umidade do sólido (M) em $z = 1$	37
Tabela 4.2 – Variações no parâmetro coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para a umidade do ar (W) em $z = 0$	37
Tabela 4.3 – Variações no parâmetro coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para a temperatura do sólido (T_s) em $z = 1$	40
Tabela 4.4 – Variações no parâmetro coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para a temperatura do ar (T_f) em $z = 0$	41
Tabela 4.5 – Variações no parâmetro coeficiente de calor perdido (U_p) para a umidade do sólido (M) em $z = 1$	44
Tabela 4.6 – Variações no parâmetro coeficiente de calor perdido (U_p) para a umidade do ar (W) em $z = 0$	44
Tabela 4.7 – Variações no parâmetro coeficiente de calor perdido (U_p) para a temperatura do sólido (T_s) em $z = 1$	47
Tabela 4.8 – Variações no parâmetro coeficiente de calor perdido (U_p) para a temperatura do ar (T_f) em $z = 0$	48
Tabela 4.9 – Variações no parâmetro taxa de secagem (R_w) para a umidade do sólido (M) em $z = 1$	51
Tabela 4.10 – Variações no parâmetro taxa de secagem (R_w) para a umidade do ar (W) em $z = 0$	51
Tabela 4.11 – Variações no parâmetro taxa de secagem (R_w) para a temperatura do sólido (T_s) em $z = 1$	54
Tabela 4.12 – Variações no parâmetro taxa de secagem (R_w) para a temperatura do ar (T_f) em $z = 0$	55
Tabela 4.13 – Variações no parâmetro calor específico do sólido (Cp_s) para a umidade do sólido (M) em $z = 1$	58
Tabela 4.14 – Variações no parâmetro calor específico do sólido (Cp_s) para a umidade do ar (W) em $z = 0$	58
Tabela 4.15 – Variações no parâmetro calor específico do sólido (Cp_s) para a temperatura do sólido (T_s) em $z = 1$	61
Tabela 4.16 – Variações no parâmetro calor específico do sólido (Cp_s) para a temperatura do ar (T_f) em $z = 0$	62

Tabela 4.17 – Variações no parâmetro calor específico do ar (Cp_f) para a umidade do sólido (M) em $z = 1$	65
Tabela 4.18 – Variações no parâmetro calor específico do ar (Cp_f) para a umidade do ar (W) em $z = 0$	65
Tabela 4.19 – Variações no parâmetro calor específico do ar (Cp_f) para a temperatura do sólido (T_s) em $z = 1$	68
Tabela 4.20 – Variações no parâmetro calor específico do ar (Cp_f) para a temperatura do ar (T_f) em $z = 0$	69
Tabela 4.21 – Análise de variância para as respostas simuladas conforme PCC para o ensaio do ponto central de secagem feito por ARRUDA (2008).	70
Tabela AP3.1 – Análise de variância para a resposta umidade do sólido (M) para a corrida central de secagem.	107
Tabela AP3.2 – Análise de variância para a resposta umidade do ar (W) para a corrida central de secagem.	108
Tabela AP3.3 – Análise de variância para a resposta temperatura do sólido (T_s) para a corrida central de secagem.	109
Tabela AP3.4 – Análise de variância para a resposta temperatura do ar (T_f) para a corrida central de secagem.	110

Nomenclatura

C_p	=	calor específico, [kJkg ⁻¹ °C ⁻¹]
D	=	diâmetro do secador, [m]
d_p	=	diâmetro das partículas, [m]
f_{tef}	=	fator de tempo efetivo, [-]
G	=	vazão mássica, [kg/min]
H^*	=	carga total do secador, [kg]
L	=	comprimento do secador, [m]
M	=	umidade do sólido, massa de água por massa de sólido seco, [kg _{água} /kg _{sól. seco}]
MR	=	adimensional de Umidade, [-]
N	=	número de suspensores, [-]
N_{Ci}	=	número total de ciclos de cascata realizados pela partícula ao atravessar o secador, [-]
N_R	=	número de rotações do tambor por unidade de tempo, [rpm]
R_W	=	taxa de secagem do material, [min ⁻¹]
t	=	tempo, [s]
T	=	temperatura, [°C]
UR	=	umidade relativa do ar, [-]
U_{va}	=	coeficiente global volumétrico de transferência de calor, [kWm ⁻³ °C ⁻¹]
U_P	=	coeficiente de calor perdido, [kWm ⁻² °C ⁻¹]
V	=	volume do secador, [m ³]
v	=	velocidade do ar, [m/s]
W	=	umidade absoluta do ar, massa de água por massa de ar seco, [kg _{água} /kg _{sól. seco}]
x	=	posição ao longo do secador, [m]
z	=	adimensional de comprimento, [-]
α	=	inclinação do secador, [°]
$\bar{\tau}$	=	tempo médio de residência das partículas no secador, [s]
λ	=	calor latente de vaporização da água pura, [kJ kg ⁻¹]

Subscritos

<i>amb</i>	=	ambiente
<i>ef</i>	=	efetivo
<i>eq</i>	=	equilíbrio
<i>f</i>	=	fluido
<i>l</i>	=	líquido
<i>s</i>	=	sólido
<i>su</i>	=	sólido úmido
<i>v</i>	=	vapor

RESUMO

O secador rotatório figura entre os equipamentos de maior importância em processos de secagem de diversos produtos devido ao seu elevado desempenho e grande capacidade de processamento. Consiste de um tambor cilíndrico, ligeiramente inclinado em relação à horizontal, que gira em baixa velocidade. O interior do tambor é equipado com suspensores que coletam os sólidos no fundo do tambor e os transporta até uma posição angular de onde são lançados em forma de cascata contra uma corrente de gases quentes. A modelagem do processo de secagem de fertilizantes em secadores rotatórios é baseada na aplicação das equações de conservação de massa e energia para as fases fluida e particulada em elementos infinitesimais de volume do secador. Em trabalho prévio na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia-MG, foi desenvolvido um novo modelo para descrever as distribuições de umidade e temperatura do ar e do fertilizante ao longo do comprimento do secador, sendo validado com dados experimentais para o fertilizante superfosfato simples granulado (SSPG). A comparação dos resultados obtidos pelo modelo proposto por ARRUDA (2008) mostrou uma boa concordância com os dados experimentais obtidos em uma unidade piloto (0,3 m de diâmetro e 1,5 m de comprimento). Entretanto, a modelagem proposta por ARRUDA (2008) apresentou desvios significativos com os resultados experimentais obtidos por FERNANDES (2008) em um secador industrial concorrente (3,0 m de diâmetro e 30 m de comprimento), porém estes desvios possivelmente foram provocados por imprecisões de medidas, premissas de ar falso (perdas) e/ou possíveis diferenças no comportamento dos materiais utilizados nos ensaios por ARRUDA (2008) e os utilizados por FERNANDES (2008). A fim de buscar melhorias significativas a previsibilidade do modelo, o principal objetivo deste trabalho foi analisar as influências dos parâmetros: coeficientes de transferência de calor, taxa de secagem do material e calor específico do sólido e do ar, através de um estudo de sensibilidade paramétrica avaliada pelas técnicas de planejamento fatorial de experimentos e superfície de resposta. As respostas analisadas foram umidades e temperaturas, do sólido e do fluido, obtidas pelo modelo de secagem de fertilizantes em secadores rotatórios contracorrente proposto por ARRUDA (2008). As análises de variância juntamente com as superfícies de resposta demonstraram que todos os parâmetros estudados têm significância estatística, porém em algumas respostas foi observado uma maior influência de alguns parâmetros. Os resultados obtidos da análise de sensibilidade paramétrica demonstram a importância de conhecer os parâmetros mais significativos para buscar descrevê-los com maior acurácia, o que irá contribuir para o conhecimento mais apurado do processo de secagem proporcionando um aumento de eficiência em equipamentos já instalados e de precisão no projeto de novos equipamentos.

Palavras-chave: transferência de calor e massa, secagem de fertilizantes, secadores rotatórios, análise de sensibilidade paramétrica.

ABSTRACT

Due to its high performance and great processing capacity, the rotary dryer has an important role in drying processes of various products. The rotary dryer is based in a cylindrical drum, slightly inclined in relation to the horizontal line that rotates in slow speed. The inner side of drum is equipped with flights that collect the solids on the bottom of the drum and are transported to an angular position where they fall as a raining curtain through a hot air stream. The modeling of the process was carried out by application of the mass and energy conservation equations to the fluid and particulate phases in infinitesimal element of volume of dryer. In a previous work at the Chemical Engineering School of the Federal University of Uberlândia-MG, it was developed a new model to describe the distributions of air's and fertilizer's humidity and temperature throughout the dryer, being validated with experimental data for granulated single superphosphate (SSPG). The comparison of results obtained from the model proposed by ARRUDA (2008) demonstrated a good agreement with the experimental data obtained from a small scale unit (diameter – 0.3m and length – 1.5m). However, the model proposed by ARRUDA (2008) demonstrated significant deviation when compared to experimental results obtained by FERNANDES (2008) in an industrial scale dryer (diameter – 3.0m and length – 30m), although these deviations were probably caused by measurements imprecision, false air (losses) assumptions and/or potential different behavior between the material used by ARRUDA (2008) and the one used by FERNANDES (2008). Aiming to improve the model's predictability, the main objective of this work was to analyze the influence of the following parameters: heat transfer coefficient, material drying rate and solid and air specific heat, through parametric sensitivity study using experimental design evaluated for solid moisture and temperature and air humidity and temperature responses, obtained by fertilizers drying model in rotary dryers countercurrent proposed by ARRUDA (2008). The variance analysis together with the surface plots demonstrated that each studied parameters has a statistic result, although in some results were observed a strong influence that features an important meaning in physical terms. The results obtained from the parametric analysis demonstrate the importance of knowing the most significant parameters in order to describe them accurately, which will contribute to aim in depth knowledge about the drying process enabling efficiency increase on already existent equipment and more accuracy on projects of new equipment.

Keywords: heat and mass transfer, fertilizer drying, rotary dryers, parametric sensitivity analysis.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – AGRONEGÓCIO

Há um grande potencial de crescimento para o Brasil nas atividades relacionadas ao agronegócio. O mercado interno é expressivo e o mercado internacional tem apresentado acentuado crescimento do consumo.

Países superpopulosos terão dificuldades de atender às demandas devido ao esgotamento de suas áreas agricultáveis. As dificuldades de reposição de estoques mundiais e o acentuado aumento do consumo especialmente de grãos como milho, soja e trigo, criam condições favoráveis aos países como o Brasil, que têm imenso potencial de produção e tecnologia disponível.

Com mais de 6,5 bilhões de habitantes, o mundo parece não ter sucumbido às previsões negativas de Thomas Robert Malthus em relação à situação alimentar. No século 18, o economista e demógrafo britânico publicou teoria segundo a qual a população cresceria em proporções geométricas, enquanto os alimentos seriam produzidos em proporções aritméticas, projetando um cenário onde a fome assolaria o planeta. Porém, de 1798 para cá, o cenário agrícola mostrou-se resistente à projeção, principalmente em países como o Brasil, cuja produção de grãos fechou em 144,1 milhões na safra 2007/2008 (MAPA, 2009).

No começo de 2008 ocorreu a elevação dos preços das *commodities* agrícolas aliada ao forte crescimento econômico nos países pobres o que pressionou os gastos com alimentação. Esta situação se agravou devido os baixos estoques provocados por quebras de safras e os altos preços dos insumos causados em parte pela alta do petróleo.

Neste cenário, o Brasil exportou os excedentes da sua produção a mais de 180 países nos cinco continentes batendo recorde nas exportações do agronegócio e a balança comercial do setor registrou superávit de US\$ 60 bilhões, o que o torna conhecido como “celeiro do mundo”.

Na história recente, as elevações de preços dos produtos agrícolas eram provocadas por um desequilíbrio de oferta. Assim, secas, pragas, geadas, granizo ou chuvas em excesso prejudicavam a produtividade das lavouras elevando seus preços até que se restabelecesse o equilíbrio entre oferta e demanda. O processo de mudança no qual o momento atual se encontra evidencia que desta vez o desequilíbrio veio pelo lado da demanda, ou seja, uma

busca concentrada por um maior volume de alimentos/grãos, num espaço de tempo em que a oferta não teve sequer tempo para reagir.

É possível destacar os principais motivos dessa “corrida” por produtos agrícolas. A entrada no mundo “capitalista selvagem” de países até então xenófobos e mal alimentados como China e Índia, onde populações de bilhões de pessoas desejavam, necessitavam e de fato começaram a comer. Um êxodo rural sem precedentes faz também que países como o Brasil (com mais de 190 milhões de habitantes) saia das zonas rurais produtivas e migrem para as grandes cidades onde vão aumentar o número dos “simplesmente consumidores de alimentos” (DAHER, 2008).

Além destes motivos, o aumento no preço do petróleo, superando a barreira dos 100 dólares por barril, tornou toda e qualquer energia renovável originária da biomassa vegetal viável e economicamente “palatável”. Sem focar a produção do etanol derivado da cana-de-açúcar, mas considerando a bioenergia derivada de etanol de trigo na Europa, de mandioca na Índia e Tailândia e, sobretudo de milho nos Estados Unidos, fizeram com que houvesse uma disputa desigual entre energia e alimentos. A relação consumo/estoque de grãos ficou altamente reduzida e os preços dos alimentos, como era de se esperar, aumentaram violentamente (DAHER, 2008).

Com o aquecimento na demanda de alimentos, houve uma pressão sobre a produtividade agrícola no campo o que gerou também, um desequilíbrio na demanda por fertilizantes e suas matérias-primas em níveis internacionais com uma consequente elevação dos preços em todos os continentes.

Considerando todo este cenário no começo de 2008, o agronegócio diversificado, moderno e eficiente desenvolvido no Brasil elevou o País à categoria de grande fornecedor mundial de alimentos. Assim como a conquista do mercado internacional através da alavancagem no setor de agroenergia, com produção sustentável e de qualidade.

No entanto no segundo semestre de 2008, a crise financeira global, trouxe apreensões freando o acelerado desenvolvimento do País relativo ao desempenho das safras e da balança comercial e provocou queda generalizada no preço das commodities agrícolas. De acordo com a Comissão Econômica para a América Latina e Caribe (Cepal), a evolução dos preços internacionais dos alimentos implicou em uma desaceleração inflacionária na região, passando de 8,5%, em 2008, para 6%, em 2009 (MAPA, 2009).

Considerando que a situação de demanda se encontra restabelecida atualmente em 2010, estudos do MAPA (2009) demonstram que os produtos mais dinâmicos do agronegócio brasileiro deverão ser a soja, milho, trigo, carnes, etanol, farelo de soja, óleo de soja e leite.

As projeções da produção de grãos (soja, milho, trigo, arroz e feijão) para 2018/19 demonstram que a produção deverá ser de 180,0 milhões de toneladas ao invés das 139,7 milhões em 2007/08. A produção de carnes (bovina, suína e aves) deverá aumentar em 12,6 milhões de toneladas. Três outros produtos com elevado crescimento previstos são o açúcar (14,5 milhões de toneladas), o etanol (37,0 bilhões de litros) e o leite (9,0 bilhões de litros).

É observado no referido estudo que o crescimento da produção agrícola dar-se-á com base na produtividade. Os resultados revelam maior acréscimo da produção agropecuária que os acréscimos de área. As previsões realizadas até 2018/19 são de que a área de soja, milho e cana devem crescer em relação à 2007/08, respectivamente, 5,2; 1,75 e 6,0 milhões de hectares (MAPA, 2009).

A Figura 1.1 mostra a quantidade de terras poupadas no Brasil para a produção das principais culturas cultivadas: soja, milho, arroz, feijão, trigo, algodão, amendoim, café, cacau, laranja, cana de açúcar, fumo, tomate, batata, mamona e mandioca ao longo dos anos devido o aumento de produtividade.

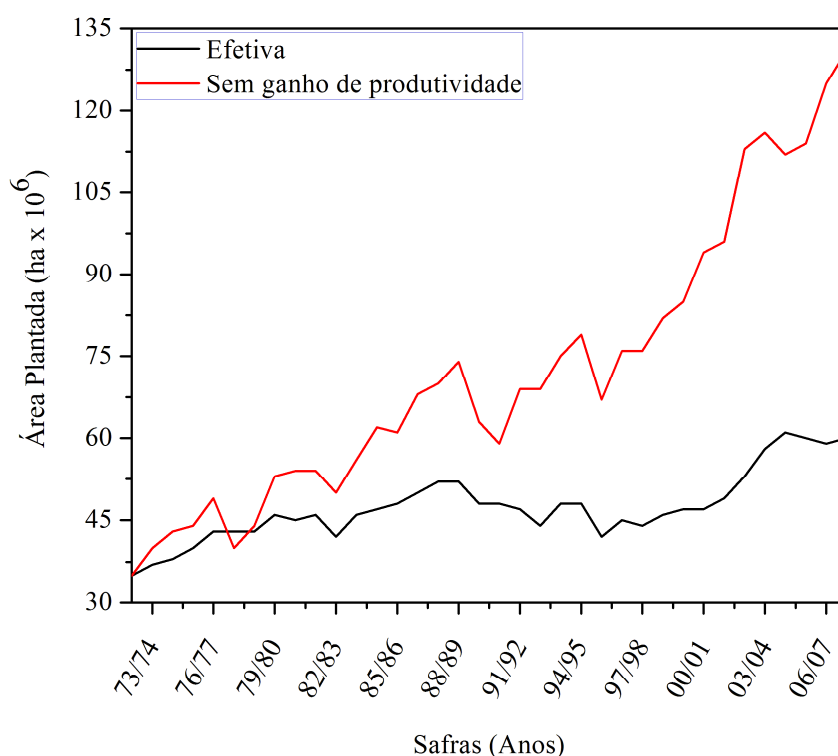


Figura 1.1 – Terras poupadas no Brasil para produção para 16 principais culturas (Fonte: ANDA/IBGE).

A área plantada sem ganho de produtividade é calculada por cultura e safra, considerando a produção agro-vegetal base seca, dividida pela produtividade obtida na safra

70/71, ou seja, representa a área total que seria necessária para obter a produção agro-vegetal em cada safra agrícola, para a mesma produtividade obtida na safra 70/71.

Considerando que a produção agro-vegetal na safra 1970/71 foi de 52 milhões de toneladas e a estimada para a safra 2007/08 foi de 222 milhões de toneladas, observa-se na Figura 1.1 uma redução de 71 milhões de hectares de terras plantadas. Logo, o ganho de produtividade foi de 1,44 t/ha para 3,68 t/ha. O papel dos fertilizantes neste aumento de produtividade é bastante significativo.

1.2 – FERTILIZANTES

Como já dito anteriormente, o aumento da produtividade agrícola está intimamente ligado à utilização racional dos fertilizantes comprovado pelas estatísticas de fertilizantes publicadas pela Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA). Para aumentar a competitividade dos produtos em um país com a extensão territorial do Brasil, quanto maior for a concentração das formulações NPK utilizadas nas culturas, menor será o custo de produção delas.

A Figura 1.2 mostra o índice de crescimento do consumo de fertilizantes ao longo dos anos para o mundo e os principais países consumidores.

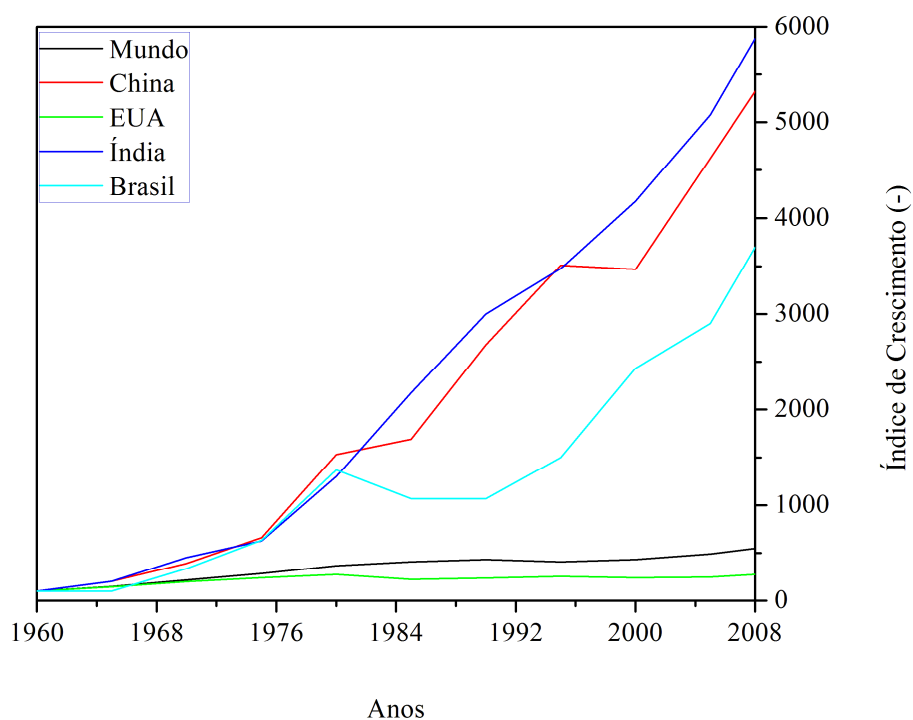


Figura 1.2 – Índice de crescimento do consumo de fertilizantes (Fonte: IFA).

Observa-se na Figura 1.2 que o índice de crescimento no consumo de fertilizantes para o mundo foi de 548% e para o Brasil em particular foi de 3700%, o que reforça a importância da utilização de fertilizantes para atender às demandas de países superpopulosos devido ao esgotamento de suas áreas agricultáveis.

As Figuras 1.3 e 1.4 mostram o consumo mundial de fertilizantes NPK e o consumo estratificado por país ao longo dos anos.

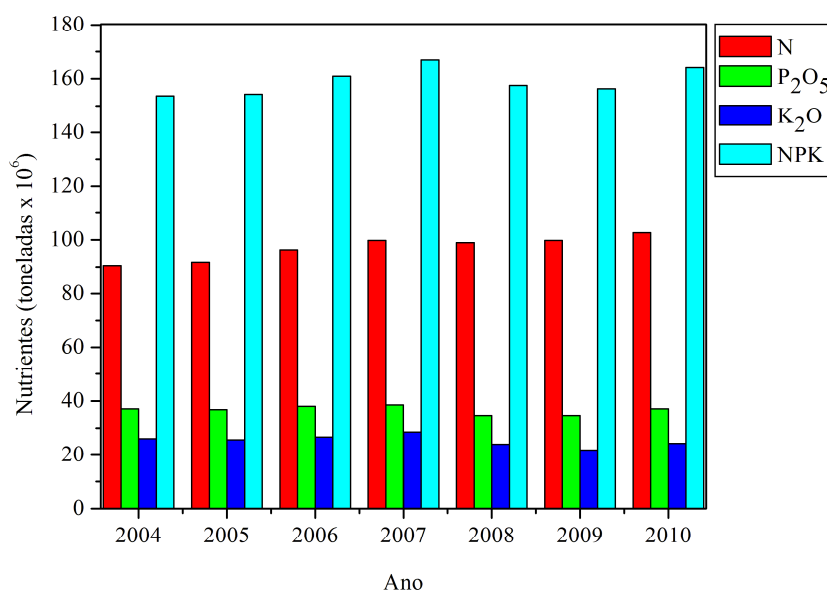


Figura 1.3 – Consumo mundial de fertilizantes, estimado para 2010 (Fonte: IFA).

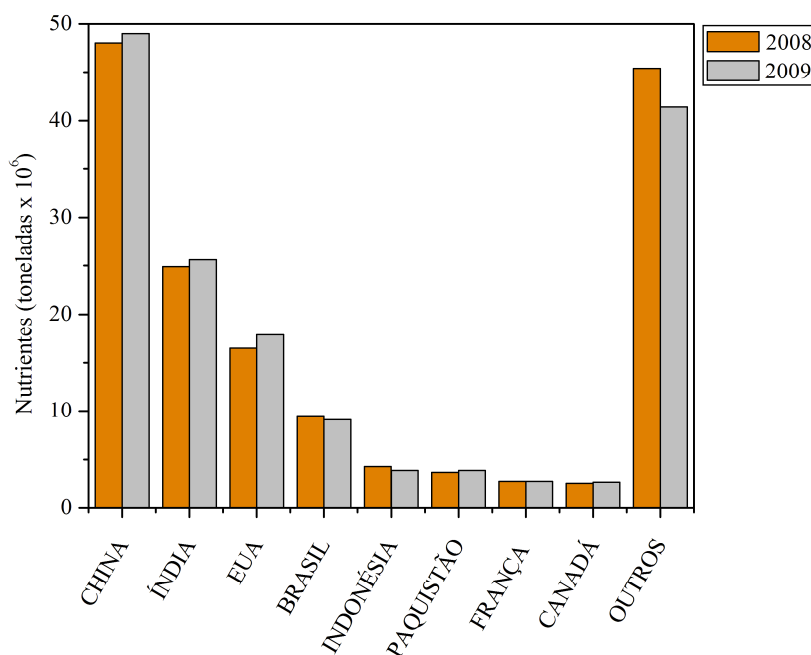


Figura 1.4 – Consumo mundial de fertilizantes estratificado por país (Fonte: IFA).

Pelo exposto, considerando a conjunção dos fatores, nota-se que a dependência pelos fertilizantes aqui citados é imensurável para que a agricultura brasileira continue competitiva nos próximos anos.

Afinal, o Brasil tem essência agrícola, com terra fértil e extensa, clima diversificado e profissionais qualificados, que são armas eficazes, as quais aliadas ao investimento em tecnologia, às pesquisas e à moderna indústria de máquinas e de implementos, ganham mais força para enfrentar as adversidades. Outros diferenciais são os programas de sanidade animal e vegetal, que garantem alimentos seguros e mantêm o País como peça-chave no exigente comércio globalizado do século XXI (MAPA, 2009).

Uma vez que a demanda por fertilizantes se faz sempre crescente e devido à região possuir grandes indústrias produtoras de fertilizantes fosfatados no país (FOSFERTIL, BUNGE, COPEBRAS), realizou-se, na Faculdade de Engenharia Química na Universidade Federal de Uberlândia, vários estudos técnico-científicos a fim de se conhecer e se aprimorar as técnicas dos principais equipamentos do processamento de fertilizantes.

A secagem de fertilizantes granulados é uma das mais importantes operações unitárias no processo de fabricação de fertilizantes devido seu alto custo. Por sua vez, a secagem é necessária porque a granulação é um processo em via úmida, e, em caso contrário, ocorreriam posteriormente vários problemas no produto final e na própria unidade de granulação como, por exemplo: empedramento dos grânulos nos armazéns ou nos sacos de embalagens, desintegração dos grãos devido à falta de dureza, entupimento de telas de peneiras, maiores incrustações nos equipamentos de transporte (correias e elevadores), e maior deposição de material nos moinhos; além da adequação do teor de umidade do produto aos padrões exigidos pela legislação.

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. 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 (FERNANDES, 2008).

1.3 – SECAGEM DE FERTILIZANTES

O secador rotatório é muito utilizado industrialmente por ser indicado para a secagem de uma grande variedade de materiais, ter um elevado desempenho e alta capacidade

de processamento (200 t/h com custos mais baixos). É indicado para secagem de materiais granulados de escoamento livre como sais, fertilizantes e areia (NONHEBEL e MOSS, 1971; PERRY e GREEN, 1999).

A aplicação dos princípios básicos de secagem ao projeto de um equipamento não é direta, pois existem dificuldades para determinação das condições de secagem ao longo do secador, da área da transferência térmica e da área da transferência de massa, da configuração do escoamento do gás, do efeito das variáveis de operação, da escolha do equipamento relativamente às condições do produto seco, além da dificuldade da previsão da curva da taxa de secagem.

Por estas razões, o projeto de um secador industrial é usualmente baseado em ensaios preliminares em unidades piloto, mantidas pela maioria dos fabricantes, onde amostras do material são secas em diversas condições operacionais que se assemelham às da produção a fim de encontrar a combinação ótima do tipo de equipamento e das condições de operação.

Logo, deve-se buscar melhora na eficiência de secagem através da otimização das variáveis operacionais e/ou modificações da própria estrutura do equipamento convencional, pois é uma etapa do processo de produção de fertilizantes com elevada demanda energética.

Definir, entender e buscar modelos matemáticos que representem o processo de secagem de fertilizantes e que sejam de fácil aplicação para equipamentos industriais proporcionará um conhecimento mais apurado do processo de secagem, contribuindo para o aumento de eficiência em equipamentos já instalados e o aumento de precisão no projeto de novos equipamentos.

Muitos modelos de secagem, normalmente consideram parâmetros relacionados às propriedades físicas, como constantes. Outros parâmetros do modelo relacionados à transferência de calor e massa são de suma importância na modelagem. Em muitos trabalhos utilizam-se estudos específicos prévios para a obtenção de equações para previsão destes parâmetros.

Portanto, quantificar a magnitude da dependência das predições do modelo em relação a determinados parâmetros é de suma importância, pois permite empregar esforços para descrever com grande acurácia os parâmetros significativos assim como simplificar a modelagem matemática sem comprometer a previsibilidade do modelo. Estudos relacionados à secagem em um leito deslizante com fluxo concorrente mostraram a importância de se estudar a sensibilidade paramétrica do modelo (LIRA, 2005).

Desta forma, para trazer melhorias significativas à previsibilidade dos modelos de secagem de fertilizantes, dada a importância do assunto para a região, é preciso que se conheça a sensibilidade dos principais parâmetros do modelo para esta aplicação.

1.4 – OBJETIVO

Portanto, o objetivo deste trabalho é analisar a sensibilidade paramétrica na modelagem da secagem de fertilizantes em secador rotatório usando como ferramenta o método de planejamento de experimentos do tipo composto central.

Os parâmetros do modelo matemático proposto por ARRUDA (2008) que terão a sua sensibilidade estudada serão o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}), o coeficiente de calor perdido (U_p), a taxa de secagem do material (R_w), o calor específico do sólido (Cp_s) e o calor específico do ar (Cp_f) sobre as seguintes variáveis de estado, umidades (M e W) e temperaturas (T_s e T_f) do sólido e ar, respectivamente, obtidas pelo modelo do secador rotatório contracorrente, aplicado à secagem de fertilizantes.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – FERTILIZANTES

Nutriente é todo elemento químico reconhecidamente necessário ao desenvolvimento das plantas. São 17 (dezesete) os elementos químicos importantes para o desenvolvimento das plantas e podem ser divididos em duas classes:

- **Macronutrientes:**
 - a) Retirados do gás carbônico, do ar e da água: carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O);
 - b) Primários: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K);
 - c) Secundários: cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S);
- **Micronutrientes:** níquel (Ni), molibdênio (Mo), cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn), ferro (Fe), boro (B) e cloro (Cl).

A diferença entre macronutrientes e micronutrientes, bem como, entre os macronutrientes primários e secundários reside nas quantidades requeridas pelas plantas. Assim, os macronutrientes primários são necessários em grandes quantidades. Os macronutrientes secundários também em grandes quantidades, ainda que sensivelmente menores do que os primários. Enquanto, que os micronutrientes são necessários em quantidades pequenas.

Alguns desses elementos estão disponíveis em abundância no meio ambiente e são diretamente assimiláveis pelas plantas (carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O)). Outros, como o nitrogênio (N), apesar de disponível na atmosfera, não são diretamente absorvíveis pelas plantas, ou o processo de absorção é muito lento face à demanda produtiva, sendo então a adubação nitrogenada essencial para a produção agrícola (SILVÉRIO, 2010).

Logo, fertilizante ou adubo é todo material que contenha pelo menos um macronutriente primário, em quantidade conhecida e em uma forma assimilável pela planta.

A forma de expressar a quantidade de macronutrientes primários em fertilizantes é a seguinte: N-P-K, sendo as quantidades disponíveis às plantas são expressas em porcentagens.

Os fertilizantes se dividem em simples e compostos sendo os fertilizantes simples divididos em 3 (três) grupos: nitrogenados, fosfatados e potássicos e os compostos em: sólidos granulados, mistura e os fluidos.

Os fertilizantes nitrogenados são produtos que contêm nitrogênio (N) disponível para a planta. Nessa categoria estão classificados os seguintes produtos: Nitrato de Amônio, Uréia, Sulfato de Amônio e Nitrocálcio.

Os fertilizantes fosfatados são produtos que contêm o fósforo (P) disponível para a planta. Nessa categoria estão classificados os seguintes produtos: Superfosfato Simples (SSP), Superfosfato Triplo (TSP) e Termofosfato.

Os fertilizantes potássicos são produtos que contêm o potássio (K) disponível para a planta. Nessa categoria estão classificados os seguintes produtos: Sulfato de Potássio (K_2SO_4) e Cloreto de Potássio (KCl).

Os fertilizantes compostos são os produtos que possuem mais de um macronutriente em sua fórmula disponível à planta.

Os fertilizantes granulados são aqueles que possuem N-P-K no grânulo.

As misturas são fertilizantes que possuem grânulos de N, de P e de K misturados formando o adubo N-P-K. As misturas podem ser farelada (Pó) ou granulada. Os fertilizantes fluidos são os que possuem o N-P-K solubilizado em solução ou suspensões.

A forma física com que um fertilizante é produzido é de considerável importância, tanto sob o aspecto agrônômico, quanto sob os aspectos de um manuseio satisfatório, transporte, estocagem e aplicação no campo. A maioria dos problemas encontrados com os fertilizantes são, provavelmente, aqueles resultantes de deficiência nas suas propriedades físicas, tais como: empedramento, segregação, compatibilidade.

O empedramento é quando as partículas se agregam, formando torrões que dificilmente se quebram. Isto ocorre com o tempo, devido a fatores relacionados com as reações químicas que vão ocorrendo na estocagem. Os fatores envolvidos neste problema são umidade, granulometria, estocagem (pressão, temperatura, reações secundárias) e compatibilidade.

A segregação é a separação física dos constituintes de um fertilizante. Ocorre sempre que houver mistura das partículas e propriedades físicas diferentes, tais como: densidade, forma das partículas, granulometria e ângulo de fricção (movimento de uma partícula sobre a outra). Três tipos distintos de causas de segregação são reconhecidos no manuseio de fertilizantes. Todas as três causas de segregação ocorrem principalmente por causa das diferenças de tamanho de partículas na mistura de fertilizantes.

Existem dois tipos de incompatibilidade: física e química. A incompatibilidade física está relacionada ao fato de certas matérias primas serem bastante higroscópicas e quando misturadas a outras que não são higroscópicas, absorvem umidade, formando uma mistura

pastosa de difícil distribuição. A incompatibilidade química está relacionada ao fato de que quando misturadas às matérias primas e estas, possuindo propriedades químicas diferentes, provocam o desprendimento do elemento químico necessário à planta (na maioria dos casos o nitrogênio na forma amoniacal) ou a retrogradação (conversão da fórmula primitiva em outra insolúvel pela planta).

Cada matéria prima possui suas características físicas e químicas, por isto, algumas destas quando misturadas podem apresentar problemas de incompatibilidade conforme Figura 2.1.

L COMPATIBILIDADE LIMITADA
X INCOMPATÍVEL
OK COMPATÍVEL

NITRATO DE AMÔNIO									
X									
UREIA									
OK	OK								
SULFATO DE AMÔNIO									
OK	L	OK							
SUPERFOSFATO TRIPLO									
OK	L	OK	OK						
SUPERFOSFATO SIMPLES									
OK	OK	OK	L	L					
DAP									
OK	OK	OK	OK	OK	OK				
MAP									
OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK			
CLORETO DE POTÁSSIO									
OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK		
SULFATO DE POTÁSSIO									
OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	

Figura 2.1 – Incompatibilidade entre diversos fertilizantes.

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 tamanho 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 (FERNANDES, 2008).

Na Figura 2.2 é apresentado um fluxograma esquemático das principais operações unitárias do processo de granulação de fertilizantes de baixa concentração em fósforo como o fertilizante superfosfato simples (00-20-00) e amoniado (03-17-00).

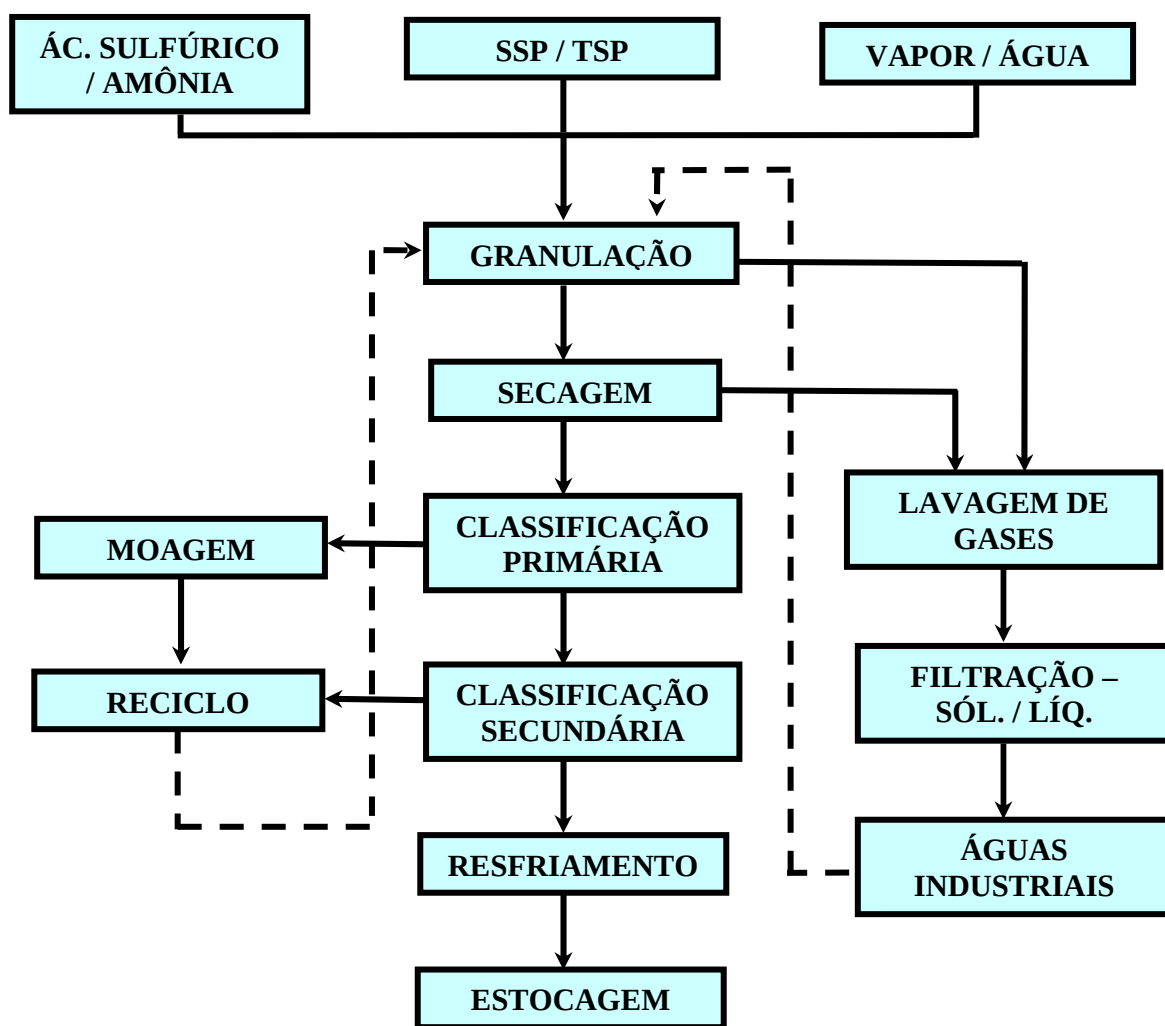


Figura 2.2 – Fluxograma esquemático de unidade de granulação de fertilizantes.

A Figura 2.3 mostra uma foto com vista de uma unidade industrial de granulação de fertilizantes com seus principais equipamentos rotatórios: granulador (1), secador (2) e resfriador (3).

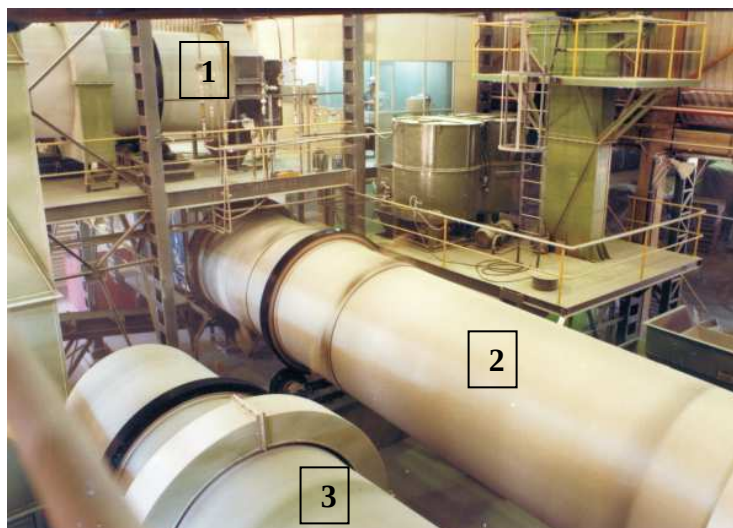


Figura 2.3 – Vista de unidade industrial de granulação de fertilizantes (Fonte: Catálogo da empresa DEDINI).

2.2 – SECAGEM

A secagem é uma operação unitária importante e aplicada em várias indústrias como alimentícias, farmacêuticas e de fertilizantes. A adequação do teor de umidade se faz necessária para conservação das qualidades físico-químicas, uma maior facilidade de armazenamento, transporte, manuseio e atendimento à legislação.

O termo secagem, normalmente aplica-se à transferência de um líquido que está num sólido molhado para uma fase gasosa não saturada (FOUST et al., 1982).

Na secagem de um sólido úmido, mediante um gás a uma temperatura e umidade fixas, manifesta-se sempre certo tipo de comportamento. Imediatamente depois do contato entre a amostra e o meio secante, a temperatura do sólido ajusta-se até atingir um regime permanente. A temperatura do sólido e a velocidade de secagem podem aumentar ou diminuir para chegarem às condições de regime permanente. Neste regime, uma prova de medida da temperatura mostra que a temperatura da superfície do sólido molhado é a temperatura de bulbo-úmido do gás. Uma vez que as temperaturas do sólido tenham atingido a temperatura do bulbo-úmido do gás, elas permanecem bastante estáveis e a taxa de secagem também permanece constante. Este período de secagem é período de secagem a taxa constante. O período termina quando o sólido atinge o teor de umidade crítico. Além deste ponto, a temperatura da superfície eleva-se e a taxa de secagem cai rapidamente. O período de taxa decrescente pode ser bem mais dilatado que o período de taxa constante, embora a remoção de umidade seja muito menor. A taxa de secagem aproxima-se de zero, num certo teor de umidade de equilíbrio, que é o menor teor atingível, no processo de secagem, com o sólido nas condições a que está submetido (FOUST et al., 1982).

Segundo MUJUMDAR (1995) os principais tipos de secadores são: rotatórios, leitos fluidizados, tambores, *spray dryers*, *flash dryers*, transportadores (*conveyor dryers*), liofilizadores, microondas e dielétrica, solares, leitos de jorro e infravermelho.

Os secadores do tipo leito fluidizado ou transportadores podem ser difíceis de reter materiais particulados que correm soltos. Logo, para este tipo de sólido, os tipos de secadores mais adequados são os secadores rotatórios, onde o material pode ser cascadeado através de uma corrente de gás ou nos *flash dryers* onde o material é soprado juntamente com a corrente de gás.

Os secadores rotatórios classificam-se nos tipos direto, indireto-direto, indireto e especial. Os termos referem-se ao método de transferência de calor, a transferência é “direta” quando o calor é fornecido ou removido dos sólidos por uma troca direta entre eles e o gás; é

“indireto” quando o fluido de aquecimento está separado dos sólidos por uma parede ou tubo metálico (PERRY e GREEN, 1999).

O método mais empregado na secagem de fertilizantes é por troca de calor direto onde a corrente de ar quente é forçada em contato com o sólido úmido como no secador do tipo rotatório.

2.2.1 – Secadores Rotatórios

O secador rotatório consiste de um tambor cilíndrico, inclinado em relação a horizontal por pequeno ângulo (α), que gira em baixa velocidade em torno do próprio eixo. O comprimento (L) do cilindro varia de 4 (quatro) a 10 (dez) vezes o seu diâmetro (D), o qual pode medir de 0,2 a mais de 3 m (PERRY e GREEN, 1999). A Figura 2.4 mostra o esquema de um secador rotatório.

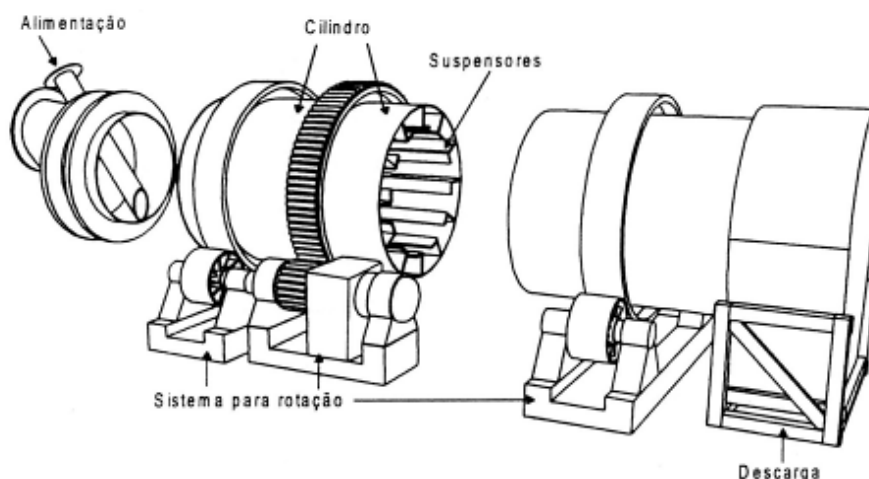


Figura 2.4 – Esquema de um secador rotatório com cascadeamento (Fonte: PERRY e GREEN, 1999).

A Figura 2.5 mostra fotos de secadores rotatórios sendo transportados para instalação em unidades industriais de granulação de fertilizantes onde observa-se as grandes dimensões.



Figura 2.5 – Fotos de secadores rotatórios para unidades industriais de granulação de fertilizantes (Fonte: Catálogo da empresa DEDINI).

Nos secadores rotatórios, os sólidos são alimentados por uma extremidade do cilindro e se deslocam, em concorrente ou contracorrente com o ar de secagem, até a outra extremidade, onde o material seco é descarregado.

O gás aquecido pode ser alimentado em contracorrente ou concorrente ao fluxo de material úmido de acordo com a característica do material. O escoamento dos gases e sólidos em contracorrente dá maior eficiência de transferência de calor, para uma dada temperatura do gás de entrada; o escoamento em correntes paralelas, no entanto, pode ser usado mais frequentemente na secagem de materiais termicamente sensíveis, em virtude do rápido resfriamento do gás durante a evaporação inicial da umidade de superfície e, assim, o produto deixa o secador em temperaturas menores, sem prejuízos à sua qualidade.

Na parte interna do casco estão fixados os suspensores, fixados paralelamente ao eixo central do cilindro, que funcionam como “conchas” e tem a finalidade de melhorar o contato gás-sólido através do cascadeamento dos grânulos contra a corrente de gases quentes que atravessa o secador, como pode ser visto na Figura 2.6.



Figura 2.6 – Fotos dos suspensores na parte interna de um secador rotatório industrial (Fonte: Catálogo da empresa DEDINI).

A maior parte da secagem ocorre quando os sólidos caem dos suspensores e estão em contato íntimo com o gás, o que corresponde aproximadamente a um décimo do tempo de residência do sólido no secador. A geometria dos suspensores depende das características do material processado (MATCHETT e BAKER, 1988).

A carga de material no suspensor depende da sua posição angular no casco e das características próprias do material, como o ângulo dinâmico de repouso e o coeficiente dinâmico de fricção. Na maioria dos casos, a profundidade do suspensor está entre $D/12$ a $D/8$, onde D é o diâmetro do secador (PERRY e GREEN, 1999).

As Figuras 2.7 e 2.8 ilustram vários tipos de suspensores e suas características serão discutidas a seguir. Um determinado secador pode incorporar um ou mais tipos diferentes de suspensores (LISBOA, 2005).

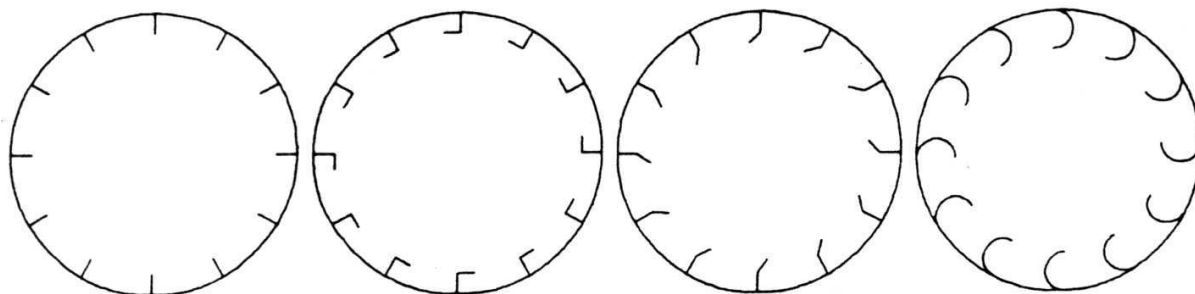


Figura 2.7 – Esquemas comuns de suspensores encontrados na prática industrial (Fonte: LISBOA, 2005).

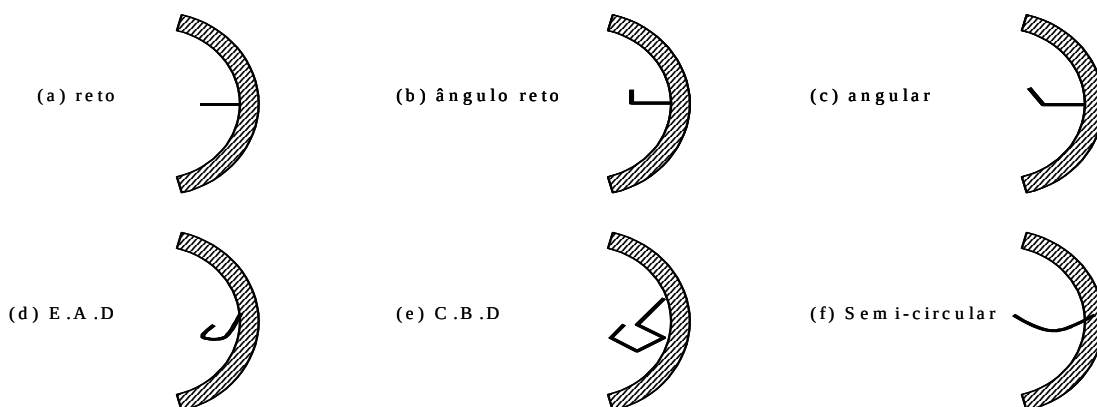


Figura 2.8 – Tipos comuns de suspensores (Fonte: LISBOA, 2005).

Os suspensores retos (Figura 2.8a) geralmente são empregados na secagem em casos onde o material sólido é pegajoso e adere nas paredes internas do tambor. Eles são geralmente situados imediatamente à alimentação e podem ser usados para introduzir os sólidos úmidos dentro do secador (obs: os suspensores situados logo após a alimentação dos sólidos podem ser um pouco inclinados para promoverem rápida entrada dos sólidos no secador, evitando acúmulo e eventual retorno de material). Para sólidos menos aderentes os suspensores podem ser angulares ou de ângulo-reto (Figuras 2.8b e 2.8c). Os suspensores das Figuras 2.8 a, b, e c são os geralmente usados em processos industriais (LISBOA, 2005).

Alguns projetos de suspensores foram propostos com base teórica, particularmente por KELLY (1968), com o objetivo de melhorar o desempenho dos secadores. Estes incluem suspensores de igual distribuição angular (EAD) (Figura 2.8d) e os suspensores de distribuição central (CBD), (Figura 2.8e). Estes suspensores parecem não serem empregados industrialmente, possivelmente por causa da complexidade do seu formato. O uso de suspensores com formato semicircular (Figura 2.8f) foi proposto por PORTER (1963) apud LISBOA (2005).

Para garantir que o secador rotatório esteja operando em condições próximas ao ponto ótimo é essencial ter o conhecimento da quantidade de sólidos transportados pelos suspensores. Se o secador operar sobrecarregado, o tempo de residência dos sólidos será reduzido o que pode ser prejudicial para a qualidade do produto final. Em contrapartida, se o secador operar com suspensores com baixo carregamento de material, estará operando abaixo de sua capacidade, havendo ineficiência (BAKER, 1983).

O número de suspensores e condições operacionais do secador deve ser tal que o volume de sólidos em relação ao volume total do tambor esteja na faixa de 10 a 15 % (BAKER, 1983), o que corresponde à faixa ótima de operação do equipamento.

2.3 – MODELAGEM DA SECAGEM EM SECADORES ROTATÓRIOS

O estudo e a escolha de um modelo apropriado que represente bem as condições operacionais e possibilite a obtenção de dados das distribuições de umidade e temperatura é de suma importância. Não somente para facilitar a compreensão do processo no interior do secador rotatório de um determinado processo industrial, mas também para que se possa aplicar ao processo técnicas de otimização.

Segundo IGUAZ et al. (2003) a secagem em secadores rotatórios é um processo muito complexo que envolve diversos mecanismos e está associado ao movimento das partículas dentro do secador. Diversos autores realizaram investigações sobre a modelagem do estado estacionário do processo de secagem em equipamentos giratórios. Os modelos estáticos são geralmente descritos em equações diferenciais e são apropriados para a investigação de distribuições em estado estacionário.

MYKLESTAD (1963) foi o primeiro a obter uma expressão para prever umidade do produto ao longo de um secador rotativo baseada na temperatura do ar, umidade inicial e taxa de alimentação do produto.

SHARPLES et al. (1964) apud IGUAZ et al. (2003) desenvolveram um modelo para a secagem em secador rotatório concorrente para fertilizante, usando um conjunto de quatro equações diferenciais para descrever transferência de calor e massa e os balanços materiais e de energia. Considerando que a transferência de calor depende da velocidade de rotação e do *hold up* dos suspensores, estes autores construíram um modelo geral, mas nenhum resultado experimental foi apresentado para verificar a exatidão do modelo.

PORTER (1963) e TURNER (1966) foram os primeiros a considerar a transferência de calor em um resfriador rotatório como um fenômeno intermitente constituído de um

número de períodos de resfriamento e umedecimento. TURNER (1966) apud IGUAZ et al. (2003) desenvolveu uma expressão para temperatura média das partículas esféricas após um número de períodos de resfriamento e umedecimento.

THORPE (1972) apud IGUAZ et al. (2003) conduziu uma análise similar a SHARPLES et al. (1964), mas usou a equação de SAEMAN e MITCHELL (1954) para calcular tempo de residência. Subdividiu o secador em elementos de volume e estabeleceu balanços de massa e energia em cada um. Quando o número de elementos era suficientemente alto ele obteve resultados similares a SHARPLES et al. (1964), porém em ambos trabalhos os resultados não foram comparados com valores experimentais.

O'DONNELL (1975) desenvolveu nova equação para tempo de residência (KELLY e O'DONNELL, 1977). Esta equação foi combinada com equações de transferência de calor de PORTER (1963) para construir um modelo de secagem geral. Apesar das boas previsões dos dados experimentais obtidos, o autor admitiu que era um modelo complexo e tedioso para utilizar.

KAMKE e WILSON (1986) apud IGUAZ et al. (2003) estudaram secadores rotatórios para partículas de madeira usando uma equação de tempo de residência similar a de KELLY e O'DONNELL (1977) e a equação RANZ e MARSHALL (1952) para prever transferência de calor. Os resultados do modelo aproximaram-se aos valores experimentais. Eles concluíram que a umidade inicial do produto e a temperatura do ar de secagem tiveram o maior efeito na umidade de saída do produto. Entretanto, os estudos em simulação dinâmica de secadores rotatórios não são tão numerosos na literatura. Nestes modelos as variáveis do sistema são dependentes do tempo e da posição (espaço).

DOUGLAS et al. (1993) apud IGUAZ et al. (2003) desenvolveram um modelo dinâmico para secagem do açúcar em um secador rotatório contracorrente. O secador foi dividido em 10 seções e os balanços dinâmicos de massa e energia foram aplicados em cada seção. Estes autores calcularam o tempo de residência e a transferência de calor usando as equações de FRIEDMAN e MARSHALL (1949a, 1949b) supondo que o equilíbrio era atingido em cada seção. O modelo foi validado com dados industriais e o comportamento dinâmico do secador foi avaliado com perturbações em muitas variáveis de entrada.

WANG et al. (1993) apresentaram um modelo distribuído de não equilíbrio para secador rotatório baseado no modelo de DOUGLAS et al. (1993). O modelo consistiu em um conjunto de equações diferenciais parciais, sendo que diferentes métodos para prever transferência de calor foram utilizados. Estudos de simulações estáticas e dinâmicas foram conduzidos por estes autores.

CAO e LANGRISH (2000) apud IGUAZ et al. (2003) desenvolveram um modelo geral para secador rotatório concorrente baseado nos balanços de massa e energia combinados com dois modelos subsidiários. Um descreve o transporte da partícula e a transferência de calor no secador e outro a cinética de secagem do material. Seis equações diferenciais parciais foram utilizadas para avaliar seis variáveis: umidade e temperatura dos sólidos, umidade e temperatura do ar, *hold up* do sólido e do ar como funções do tempo e comprimento do secador. O modelo foi validado em um secador rotatório concorrente escala piloto usando soja, sendo que uma razoável adequação foi obtida entre os resultados preditos e os experimentais.

IGUAZ et al. (2003) desenvolveram um modelo dinâmico para desidratação de resíduos vegetais para secador rotatório. O modelo demonstrou prever com sucesso o comportamento do estado estacionário de um secador rotatório concorrente. Pode ser usado para simular a resposta do sistema a uma variação das condições de operação e estudar novas estratégias de controle.

LISBOA et al. (2007) desenvolveram e avaliaram uma configuração não convencional do secador rotatório, conhecida como secador roto-fluidizado com o objetivo de aumentar a eficiência de secagem.

ARRUDA (2008) desenvolveu um novo modelo para previsão das distribuições de umidade e temperatura do ar de secagem e do sólido ao longo do comprimento do secador. É um modelo geral para qualquer tipo de material particulado, baseado nas características fluidodinâmicas do secador e propriedades intrínsecas do material.

FERNANDES (2008) analisou um secador industrial (3,0 m de diâmetro e 30 m de comprimento) concorrente e obteve o coeficiente dinâmico de fricção, possibilitando estimar a distribuição da carga dos suspensores além de realizar a modelagem para previsão do processo de secagem para o fertilizante superfosfato triplo granulado (TSPG).

ARRUDA et al. (2009a) avaliaram a configuração não convencional do secador rotatório de LISBOA et al. (2007), denominada inicialmente de secador roto-aerado e depois mais precisamente como secador roto-fluidizado. O objetivo deste trabalho era comparar a transferência de massa e energia entre o ar quente e o material particulado (fertilizante superfosfato simples granulado (SSPG)) em secadores rotatórios nas versões: convencional (contracorrente) e não convencional (roto-fluidizado).

ARRUDA et al. (2009b) avaliaram o secador roto-aerado que continha um tubo central com 1,8 m de comprimento e 0,1 m de diâmetro interno, diretamente acoplado à linha de ar, em vez de suspensores. A ramificação de tubos menores era composta por 56 mini

tubos de 0,08 m de comprimento, sendo que foram usados diâmetros internos de 9×10^{-3} m e 20×10^{-3} m, montados em arranjos específicos. Nesse estudo verificou-se que o secador roto-aerado possui melhor desempenho que a versão convencional contracorrente com cascadeamento.

SILVÉRIO (2010) estudou os aspectos fluidodinâmicos e de secagem do fertilizante SSPG em secadores rotatórios convencionais com fluxo de ar concorrente e aquecimento direto, bem como comparou o desempenho do mesmo em relação a outras configurações já estudadas. Além dos estudos experimentais, também realizou a modelagem matemática do secador concorrente, a fim de se obter a predição das distribuições de umidade e temperatura do ar e do sólido, sendo os resultados da simulação comparados com os dados obtidos experimentalmente para a secagem de fertilizante.

2.4 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA

Muitos problemas de engenharia são descritos por sistemas de equações algébrico-diferenciais (EADs). Um sistema de EADs é caracterizado pelo seu índice diferencial, que é o número mínimo de vezes que o sistema é diferenciado com relação a variável independente, até ser transformado por manipulações algébricas num sistema explícito de EDOs (equações diferenciais ordinárias). O valor do índice diferencial está diretamente relacionado às propriedades de convergência dos métodos numéricos de solução (MURATA, 1996).

Os modelos utilizados para representar a secagem em secadores rotatórios juntamente com suas equações constitutivas (coeficiente volumétrico de transferência de calor, coeficiente de calor perdido, cinética de secagem e umidade de equilíbrio) são exemplos de sistemas de EADs.

Nos últimos anos tem havido um crescente interesse na análise de sensibilidade para os sistemas em grande escala governados tanto por equações algébrico-diferenciais (EADs) como por equações parciais-diferenciais (EDPs). Os resultados da análise de sensibilidade têm aplicações amplas na ciência e na engenharia, incluindo desenvolvimento de modelo, otimização, estimação de parâmetro, controle ótimo, análise de incerteza, planejamento experimental e simplificação do modelo (PETZOLD et al., 2005).

A análise de sensibilidade de EADs pode ser usada também para quantificar a magnitude da dependência das predições do modelo em relação a determinados parâmetros e condições iniciais. Para o objetivo deste trabalho, a análise de sensibilidade será utilizada para

possível simplificação do modelo em virtude da significância dos principais parâmetros do modelo aplicado à secagem de fertilizante.

Em linhas gerais, a análise de sensibilidade calcula as taxas de mudança nas variáveis de saída de um sistema que resultam das pequenas perturbações nos parâmetros do problema (PETZOLD et al., 2005).

De acordo com MALY e PETZOLD (1996), para ilustrar a abordagem básica da análise de sensibilidade, considere o sistema de EADs de um modelo com parâmetros:

$$F(x, y, y', p) = 0, \quad y(0) = y_0, \quad y'(0) = y'_0 \quad (2.1)$$

onde $y \in R^{n_y}$ e $p \in R^{n_p}$. Aqui, n_y e n_p são a dimensão e o número de parâmetros do sistema de EADs original, respectivamente. A análise de sensibilidade consiste em encontrar a derivada do sistema em relação a cada parâmetro de interesse:

$$\frac{\partial F}{\partial y} s_i + \frac{\partial F}{\partial y'} s'_i + \frac{\partial F}{\partial p_i} = 0, \quad i = 1, \dots, n_p \quad (2.2)$$

onde $s_i = \frac{dy}{dp_i}$ é o coeficiente de sensibilidade absoluta. Isto produz $n_s = n_p \cdot n_y$ equações de sensibilidade adicionais, que juntamente com o sistema original rende:

$$F = \begin{bmatrix} F(x, y, y', p) \\ \frac{\partial F}{\partial y} s_1 + \frac{\partial F}{\partial y'} s'_1 + \frac{\partial F}{\partial p_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial F}{\partial y} s_{n_p} + \frac{\partial F}{\partial y'} s'_{n_p} + \frac{\partial F}{\partial p_{n_p}} \end{bmatrix} = 0, \quad Y(0) = \begin{bmatrix} y_0 \\ \frac{\partial y_0}{\partial p_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial y_0}{\partial p_{n_p}} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.3)$$

As equações de sensibilidade podem ser resolvidas analiticamente se a equação do modelo tem solução analítica conhecida. Infelizmente, isto raramente acontece e alguns métodos numéricos têm sido utilizados para aproximar as equações de sensibilidade. Dentre eles estão o método diferencial direto (ATHERTON et al., 1975), o método função de Green (HWANG et al., 1978), o método da aproximação polinomial (HWANG, 1983) e o método de diferenciação automática (HWANG et al., 1997) apud LIRA (2005).

A quantificação da influência de parâmetros em um modelo através de análise de sensibilidade paramétrica pode ser feita por diferentes métodos, tais como técnicas de planejamento de experimentos e o código DASPK 3.0 (LI & PETZOLD, 1999).

O código DASPK 3.0 (LI & PETZOLD, 1999) é um código desenvolvido em FORTRAN onde resolve EADs e executa o cálculo de coeficientes de sensibilidade de parâmetros e também para condições iniciais.

LIRA (2005) estudou a transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante com escoamentos concorrentes. Para tanto, foi discutida a validade das considerações de perfil plano de velocidade do ar e parâmetros físico-químicos constantes ao longo do leito. Diversos modelos de distribuição de porosidade e de velocidade do ar foram considerados e validados por dados experimentais. Foram realizadas também análises de sensibilidade de parâmetros físico-químicos por planejamento de experimentos do tipo composto central (PCC) e pelo código DASPK 3.0.

Os parâmetros do modelo para secagem de sementes de soja em leito deslizante com escoamentos concorrentes que foram estudados por LIRA (2005) através do planejamento de experimentos foram densidade da semente de soja (ρ_s), calor específico do ar seco (C_{p_f}), viscosidade do ar (μ) e entalpia de vaporização (λ). Não foi estudado o coeficiente de transferência de calor (h), pois BARROZO (1995) analisou a sensibilidade e concluiu que não influencia significativamente o modelo a duas fases.

A análise de sensibilidade paramétrica através do código DASPK 3.0 foi efetuada por LIRA (2005) para os parâmetros que foram significativos pela análise através da técnica de planejamento de experimentos, acrescentando o calor específico das sementes (C_{p_s}), do vapor d'água (C_{p_v}) e da água (C_{p_l}).

A Tabela 2.1 mostra os parâmetros estudados por LIRA (2005) através dos dois métodos.

Tabela 2.1 – Parâmetros analisados nos dois métodos utilizados por LIRA (2005).

PARÂMETROS	PCC	DASPK 3.0
Densidade do sólido	ρ_s	-
Calor específico do ar seco	C_{p_f}	C_{p_f}
Viscosidade do ar	μ	-
Entalpia de vaporização da água	λ	λ
Calor específico das sementes	-	C_{p_s}
Calor específico do vapor d'água	-	C_{p_v}
Calor específico da água	-	C_{p_l}

Destaca-se na Tabela 2.1 que para ambos os métodos, o parâmetro mais significativo foi calor específico do ar seco (Cp_f) nas respostas umidade (M) e temperatura (T_s) das sementes de soja em leito deslizante com escoamentos concorrentes.

Tanto no estudo de sensibilidade por planejamento de experimentos quanto por DASPK 3.0, os resultados obtidos por LIRA (2005) para o modelo a duas fases mostraram maior sensibilidade à perturbação do parâmetro físico-químico calor específico do ar seco. Com relação aos outros parâmetros estudados, as sensibilidades foram muito pequenas, próximas de zero.

O método de planejamento de experimentos do tipo composto central (PCC) para análise de sensibilidade dos parâmetros é simples de ser utilizado e se demonstrou altamente eficaz no estudo realizado por LIRA (2005). Logo, o PCC será o método utilizado para a quantificação da sensibilidade paramétrica que será realizada neste trabalho. O tópico seguinte apresenta, de forma sucinta, uma abordagem geral do planejamento de experimentos encontrada na literatura.

2.4.1 – Planejamento de Experimentos

A característica básica de um planejamento fatorial de experimentos é o estudo simultâneo de vários fatores. Neste tipo planejamento, deve-se decidir quais são os fatores e as respostas de interesse para o sistema em estudo. Os fatores, em geral, são as variáveis que se pode manipular. As respostas são as variáveis de saída do sistema, nas quais estamos interessados, e que serão ou não afetadas por modificações provocadas nos fatores (BRUNS et al., 2003).

O planejamento composto central (PCC) é uma classe de planejamento fatorial de primeira ordem acrescido de alguns pontos que permitem a estimativa de coeficientes de segunda ordem (MYERS, 1976). Os experimentos a serem realizados são organizados em uma matriz de planejamento, onde os níveis são representados numa forma codificada, de acordo com a seguinte equação:

$$x_i = \frac{\varphi_i - \varphi_{(0)}}{(\varphi_{(1)} - \varphi_{(-1)}) / 2} \quad (2.4)$$

sendo:

x_i - valor da variável codificada;

φ_1 - valor da variável não codificada;

$\varphi_{(0)}$ - valor da variável não codificada referente ao nível central;

$\varphi_{(1)}$ e $\varphi_{(-1)}$ - valor da variável não codificada referentes aos níveis 1 e -1.

O número de experimentos a serem realizados é dado por:

$$N_T = 2^k + 2k + n_2 \quad (2.5)$$

sendo N_T o número total de experimentos, k o número de variáveis em estudo e n_2 o número de pontos na condição central.

Para que um PCC seja ortogonal é necessário que o valor do nível extremo, α , adotado pelo pesquisador torne a matriz de variância e covariância diagonal e os parâmetros estimados, relativos aos efeitos, não correlacionados. Das Equações (2.6) e (2.7), é obtido o valor de α para um planejamento ortogonal (MYERS, 1976):

$$\alpha = \left(\frac{QG}{4} \right)^{1/4} \quad (2.6)$$

$$Q = \left[(G + T)^{1/2} - G^{1/2} \right]^2 \quad (2.7)$$

sendo G o número de pontos fatoriais 2^k e T o número de pontos adicionais no PCC $(2k + n_2)$.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o modelo da secagem de fertilizantes em secador rotatório proposto por ARRUDA (2008), as condições experimentais e a metodologia utilizada no estudo de sensibilidade paramétrica.

3.1 – MODELO MATEMÁTICO

A modelagem da transferência de calor e massa em secadores rotatórios, para previsão das distribuições de umidade e temperatura do ar de secagem e do material úmido ao longo do comprimento do secador, é baseada nos balanços de massa e energia realizados sobre elementos infinitesimais de volume do secador rotatório operando em regime permanente, com sentido de fluxo contracorrente conforme mostra a Figura 3.1.

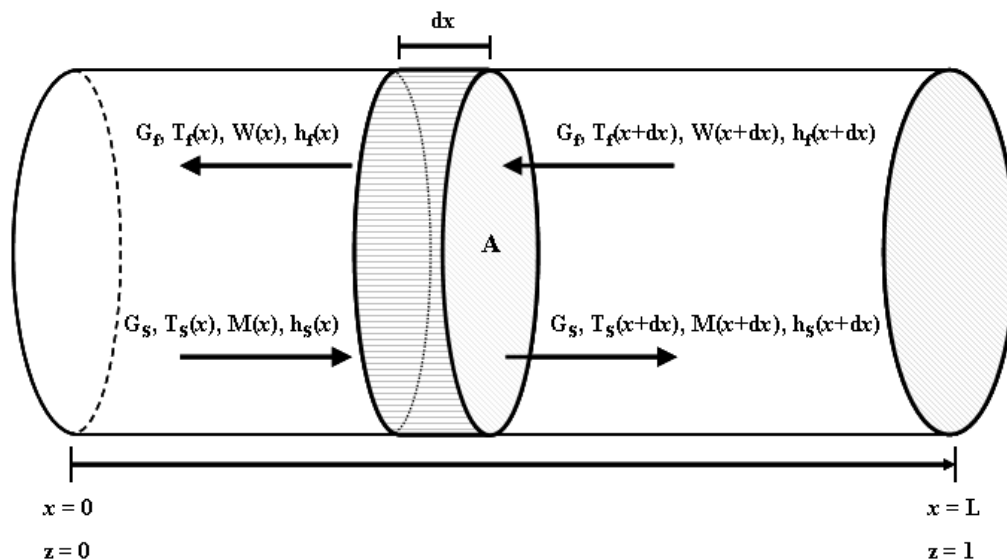


Figura 3.1 – Esquema do elemento infinitesimal de volume do secador rotatório operando com fluxo contracorrente (Fonte: ARRUDA et al., 2008).

Foi desenvolvido por ARRUDA (2008) um modelo geral que pudesse ser aplicado para qualquer tipo de material particulado. Esse modelo leva em conta as características fluidodinâmicas do secador, bem como as propriedades intrínsecas do material.

No estabelecimento destas equações são admitidas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- A velocidade de escoamento do sólido através do tambor é constante;
- A taxa de secagem é avaliada no elemento infinitesimal de volume do secador;

- As propriedades termodinâmicas do material e do ar são constantes ao longo do tambor;
- O formato e as propriedades físicas do grão não se alteram durante a secagem;
- As condições das correntes alimentadas: vazão, temperatura e umidade do sólido e do ar são constantes;
- As condições operacionais de inclinação e rotação do tambor são constantes;
- As partículas de sólido são consideradas uma esfera perfeita.

As distribuições da umidade do ar (W) e do sólido (M) e temperatura do ar (T_f) e do sólido (T_s) ao longo do secador rotatório com escoamentos contracorrente podem ser calculados pelo sistema de equações diferenciais definido pela Equação (3.1) a Equação (3.4), sendo z o adimensional de comprimento, dado pela razão entre a referida posição (x) e o comprimento total do secador (L). Logo, $z=1$ se refere à saída do secador, ou seja, para fluxos contracorrente refere-se à entrada do ar e saída do sólido.

$$\frac{dW}{dz} = -\frac{R_w H^*}{G_f} \quad (3.1)$$

$$\frac{dM}{dz} = -\frac{R_w H^*}{G_s} \quad (3.2)$$

$$\frac{dT_f}{dz} = \frac{\left[U_{va} V (T_f - T_s) + R_w H^* (\lambda + C_{p_v} T_f) + U_p \pi D L (T_f - T_{amb}) \right]}{G_f (C_{p_f} + W C_{p_v})} \quad (3.3)$$

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{\left[U_{va} V (T_f - T_s) + R_w H^* C_{p_l} T_s + -R_w H [\lambda + C_{p_v} (T_f - T_s)] \right]}{G_s (C_{p_s} + M C_{p_l})} \quad (3.4)$$

sendo W e M expressos em ($kg.kg^{-1}$); R_w em (s^{-1}); H^* em (kg); G_f e G_s em ($kg.s^{-1}$); T_f, T_s e T_{amb} em ($^{\circ}C$); U_{va} em ($kW.m^{-3}.^{\circ}C^{-1}$); U_p em ($kW.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$); V em (m^3); λ em ($kJ.kg^{-1}$); $C_{p_s}, C_{p_f}, C_{p_v}$ e C_{p_l} em ($kJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$); D e L em (m); e z adimensional.

As Equações (3.1) e (3.2) representam a variação de umidade do ar e do sólido respectivamente, ao longo do comprimento do secador, decorrente da taxa de secagem. Os balanços de energia definidos pelas Equações (3.3) e (3.4) representam a variação de temperatura do ar e do sólido decorrentes da transferência de calor entre o sólido e o fluido,

que resulta no resfriamento do ar e no aquecimento do sólido, da entalpia de vaporização e da transferência de calor entre o secador e o ambiente através das suas paredes.

O sistema de equações diferenciais do modelo deve ser resolvido simultaneamente para as quatro variáveis envolvidas levando-se em consideração as seguintes condições de contorno:

$$\begin{aligned} W(1) &= W_0 ; & M(0) &= M_0 ; \\ T_f(1) &= T_{f0} ; & T_s(0) &= T_{s0} . \end{aligned}$$

O modelo depende de equações constitutivas para cinética de secagem, umidade de equilíbrio e coeficientes de transferência de calor. As equações utilizadas neste trabalho foram oriundas de estudos prévios realizados por ARRUDA (2008) utilizando fertilizante superfosfato simples granulado (SSPG) e que serão apresentados a seguir.

3.1.1 – Equações Constitutivas do Modelo

A umidade de equilíbrio (M_{eq}) refere-se ao teor mínimo de umidade do material para uma determinada temperatura do sólido e umidade relativa do ar. Para o trabalho desenvolvido por ARRUDA (2008), os experimentos visando à obtenção das isotermas de equilíbrio do fertilizante SSPG foram conduzidos utilizando o método estático com solução salina saturada. Com base nos resultados experimentais, a correlação que apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais de umidade de equilíbrio foi a equação de HALSEY modificada (OSBORN et al., 1989), representada pela Equação (3.5) que já conta com os parâmetros estimados por ARRUDA (2008) para o SSPG.

$$M_{eq} = \left(\frac{-\exp(-0,045T_s - 2,08)}{\ln(UR)} \right)^{\frac{1}{1,435}} \quad (3.5)$$

sendo M_{eq} em ($kg.kg^{-1}$); e UR adimensional.

A cinética de secagem pode ser escrita em função do adimensional de umidade (MR), conforme a Equação (3.6). Os estudos de cinética de secagem são geralmente conduzidos em camada fina.

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (3.6)$$

Para os estudos em camada fina, o ar, em condições constantes de umidade, temperatura e fluxo mássico, atravessa uma fina camada do material úmido. O comportamento do material sob estas condições é então observado por determinado tempo. Com base em resultados experimentais obtidos por ARRUDA (2008) em camada fina, a correlação que apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais de cinética de secagem para o fertilizante SSPG foi a equação de PAGE (1949), representada pela Equação (3.7). Nesta equação são apresentados os parâmetros estimados por ARRUDA (2008) para o SSPG.

$$MR = \exp \left[-0,431 \exp \left(\frac{-121,845}{T_f} \right) t^{0,392} \right] \quad (3.7)$$

sendo t expresso em (s).

Os coeficientes de transferência de calor foram determinados por meio de balanços de massa e energia, tendo o secador rotatório como volume de controle. Assim, com os dados de temperatura e umidade do ar e do fertilizante SSPG, na entrada e na saída do secador, obtidos nos ensaios de secagem realizados por ARRUDA (2008), foi possível o ajuste das equações de FRIEDMAN e MARSHALL (1949b) e de MYKLESTAD (1963) para o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) e para o coeficiente de calor perdido através da parede (U_p), respectivamente. Os resultados desses ajustes feitos por ARRUDA (2008) podem ser vistos nas Equações (3.8) e (3.9), respectivamente.

$$U_{va} = 3,535 G_f^{0,289} G_S^{0,541} \quad (3.8)$$

$$U_p = 0,227 G_f^{0,879} \quad (3.9)$$

O modelo tem como base o conjunto de equações auxiliares, taxa de secagem (R_w) que pode ser calculada pela Equação (3.11) e a carga total de sólidos no secador (H^*) que pode ser estimada pela Equação (3.12).

$$-R_w = \frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{[M - M_0]}{\Delta t} = \frac{dM}{dt} \quad (3.10)$$

$$-R_w = \frac{(MR-1)(M_0 - M_{eq})}{t} \quad (3.11)$$

$$H^* = \bar{\tau} \times G_s \quad (3.12)$$

sendo $\bar{\tau}$ o tempo médio de residência das partículas no secador, expresso em (s).

Nos secadores rotatórios, a secagem ocorre preferencialmente durante o período em que as partículas estão caindo dos suspensores, ou seja, quando estão em contato com o ar de secagem, e corresponde apenas a uma fração do tempo de residência (BAKER, 1983). Conforme proposto por ARRUDA (2008), essa fração se refere ao tempo efetivo de contato entre o sólido e ar de secagem (t_{ef}) e pode ser avaliada pela relação entre o tempo médio de queda da partícula e o tempo total de um ciclo. Este, por sua vez, corresponde ao tempo gasto desde a coleta do material pelo suspensor até o seu retorno ao leito de partículas no fundo do tambor. Essa fração pode ser avaliada pela Equação (3.13), onde o número total de ciclos (N_{Ci}) é obtido através da Equação (3.14), e o tempo efetivo de contato gás-partícula (t_{ef}), pela Equação (3.15).

$$f_{tef} = \frac{\bar{t}_q}{\bar{t}_{Ci}} \times \frac{N_{Ci}}{N_{Ci}} = \frac{N_{Ci} \bar{t}_q}{\bar{\tau}} \quad (3.13)$$

$$N_{Ci} = \frac{L}{l} = \frac{L}{Y_q \sin(\alpha)} \quad (3.14)$$

$$t_{ef} = f_{tef} \times \bar{\tau} \quad (3.15)$$

O tempo efetivo de contato gás-partícula deve então ser usado na avaliação do adimensional de umidade (MR), Equação (3.7), uma vez que, nos ensaios de cinética de secagem em camada fina realizados por ARRUDA (2008), a amostra de material fica em contato com o ar de secagem durante todo o tempo do experimento. Enquanto isso, no secador rotatório, esse contato ocorre principalmente quando as partículas estão em cascateamento.

3.2 – CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS UTILIZADAS NO ESTUDO DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA

As condições experimentais utilizadas no estudo de sensibilidade paramétrica foram obtidas tendo como base os experimentos realizados por ARRUDA (2008) com SSPG, que contém em sua formulação (N-P-K), 0% de nitrogênio, 20% de fósforo e 0% de potássio. Os sólidos utilizados nos testes apresentavam um diâmetro médio de *Sauter* de 2,45 mm, umidade inicial na faixa de 0,13-0,15 kg de água/kg de sólido seco, massa específica aparente de 1100 kg/m³ e calor específico de 0,245 kcal/kg°C.

A unidade experimental utilizada por ARRUDA (2008) era constituída por um soprador de 5,0 cv acoplado a um duto com comprimento de 2,0 m e 0,2 m de diâmetro. Entre esse duto e o secador existia um sistema de aquecimento do ar por resistências elétricas, ajustado por um variador de voltagem. A alimentação de sólidos foi feita através de uma correia transportadora montada abaixo do silo de sólidos e acionada por um motor de 0,5 cv acoplado a um moto-redutor, cuja velocidade era ajustada por um inversor de frequência. O secador rotatório tinha 1,5 m de comprimento e 0,3 m de diâmetro e foi construído de forma a permitir variações de inclinação e rotação do tambor e para operar com diferentes números e tipos de suspensores. A Figura 3.2 mostra fotografias da unidade experimental utilizada por ARRUDA (2008).



Figura 3.2 – Fotografias da unidade experimental utilizada por ARRUDA (2008).

O número de suspensores, a vazão de alimentação de sólidos, a inclinação e rotação do tambor, foram escolhidos por ARRUDA (2008) de forma que a fração volumétrica de sólidos no interior do secador variasse entre 10% e 15%, ou seja, dentro da faixa ótima recomendada por BAKER (1983). Os ensaios experimentais de distribuição de umidade e

temperatura do ar e do fertilizante ao longo do comprimento do secador foram realizados com sólido e gás escoando em contracorrente e usando 6 (seis) suspensores de três segmentos, cujas dimensões eram 2,0 cm, 0,7 cm e 0,7 cm (ARRUDA et al., 2006).

Para os experimentos de secagem de fertilizantes no secador rotatório foi elaborado por ARRUDA (2008) um planejamento experimental do tipo composto central (PCC) com 4 réplicas no centro totalizando 18 experimentos (BOX et al., 1978). Os níveis dessas variáveis do PCC são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Nível das variáveis usadas no planejamento experimental dos ensaios de secagem no secador rotatório [$\alpha = 3^\circ$; $N = 6$; $N_R = 3,6$ rpm] feitos por ARRUDA (2008).

VARIÁVEL	NÍVEL DE CADA VARIÁVEL				
v_f (m/s)	1,09	1,5	2,5	3,5	3,91
T_f ($^\circ\text{C}$)	60,8	75	80	95	98,1
G_{su} (kg/min)	0,72	0,8	1,0	1,2	1,28

O tempo médio de residência do sólido nos secadores rotatórios foi determinado usando traçadores. As temperaturas dos sólidos e do ar, na entrada e saída, foram determinadas por calorimetria usando termopares de cobre-constantan situados na entrada e na saída do secador. A umidade do ar foi determinada por psicrometria através da medida da temperatura de bulbo úmido e bulbo seco na entrada e na saída do secador. A umidade do sólido foi determinada pelo método da estufa (24 h com temperatura de $105^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$). Com os dados de umidade do produto na entrada e na saída do secador e as respectivas condições de operação, ARRUDA (2008) determinou a taxa de secagem em cada experimento.

3.3 – MÉTODOS

No presente trabalho, para resolução do modelo foi empregada a subrotina ‘BVP4C’ do software *Matlab*® 7.1, com tolerância relativa utilizada da ordem de 10^{-6} , que implementa o método de colocação para solução de problemas de valor de contorno (SHAMPINE et al., 2000).

Utilizou-se a técnica de colocação normal com no mínimo 10 pontos para a aproximação polinomial de quarta ordem. Esse número de pontos foi empregado mediante testes que mostraram que valores acima deste não traziam melhorias na precisão dos resultados obtidos com o modelo.

A técnica de colocação é simples e a que resulta nas expressões de manipulação mais fácil. Propõe simplesmente que o vetor resíduo seja anulado em alguns pontos do intervalo de definição do problema, o que é equivalente a obrigar que a equação original seja satisfeita nestes pontos com a solução aproximada (VILLADSEN e MICHELSEN, 1978).

Para o planejamento e a análise estatística foi utilizado o software *Statistica*® 7.

Como a taxa de secagem foi determinada por ARRUDA (2008) em cada experimento definiu-se utilizar três (3) condições experimentais do planejamento que representassem as condições de mínima, central e máxima secagem. A Tabela 3.2 demonstra os níveis destas condições do planejamento feito por ARRUDA (2008).

Tabela 3.2 – Nível das variáveis usadas no planejamento para os ensaios de secagem no secador rotatório [$\alpha = 3^\circ$; $N = 6$; $N_R = 3,6$ rpm] feitos por ARRUDA (2008).

VARIÁVEL	CONDIÇÕES		
	Mínima	Central	Máxima
v_f (m/s)	1,5	2,5	3,5
T_f (°C)	75	85	95
G_{su} (kg/min)	1,2	1,0	0,8

Para variação dos parâmetros no modelo de secagem do fertilizante em secador rotatório contracorrente foi elaborado no presente trabalho um planejamento experimental do tipo composto central (PCC) ortogonal (BOX et al., 1978) para análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo de secagem do fertilizante SSPG. Neste planejamento foi estudado o efeito de 5 parâmetros do modelo (U_{va} , U_p , R_w , Cp_s , Cp_f), com variação máxima de $\pm 10\%$ em cada parâmetro, com 4 réplicas centrais, totalizando 46 simulações. O valor de α (nível extremo) foi de 1,784 e as respostas consideradas foram as temperaturas e umidades do sólido e do ar na saída do secador. Esse planejamento é mostrado na Tabela 3.3. Os valores referentes aos níveis -1 e +1 foram escolhidos de forma que a diferença entre os valores extremos do intervalo e o valor original não ultrapassasse 10%.

Após definido o planejamento experimental foram feitas todas as simulações previstas no PCC (46), para cada uma das 3 (três) condições experimentais estudadas, ou seja, experimentos de mínima, central e máxima secagem do planejamento de ARRUDA (2008).

Tabela 3.3 – Planejamento experimental para análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo de secagem do fertilizante SSPG.

PARÂMETROS	NÍVEL				
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
U_{va}	0,900	0,944	1,000	1,056	1,100
U_p	0,900	0,944	1,000	1,056	1,100
R_w	0,900	0,944	1,000	1,056	1,100
Cp_s	0,900	0,944	1,000	1,056	1,100
Cp_f	0,900	0,944	1,000	1,056	1,100

Apesar do PCC ter sido feito para variações nos parâmetros de -10% e $+10\%$ para os níveis $-\alpha$ e $+\alpha$, respectivamente, simulações adicionais foram realizadas para as seguintes variações: -20% , -15% , $+15\%$ e $+20\%$, para as distribuições de umidade e temperatura do fertilizante SSPG e do ar em função do comprimento adimensional do leito para os valores dos parâmetros estudados (U_{va} , U_p , R_w , Cp_s , Cp_f).

Com as respostas (M , W , T_s , T_f) previstas pelo modelo realizaram-se as análises de variância para cada uma das respostas na condição experimental feita por ARRUDA (2008) que leva a secagem intermediária. Considerando significativos os coeficientes lineares e os quadráticos e as interações, são geradas as superfícies de resposta. Para todos os parâmetros, a probabilidade de erro do teste de hipótese máxima adotada foi de 5%. A Figura 3.3 mostra as etapas realizadas para desenvolvimento deste trabalho.

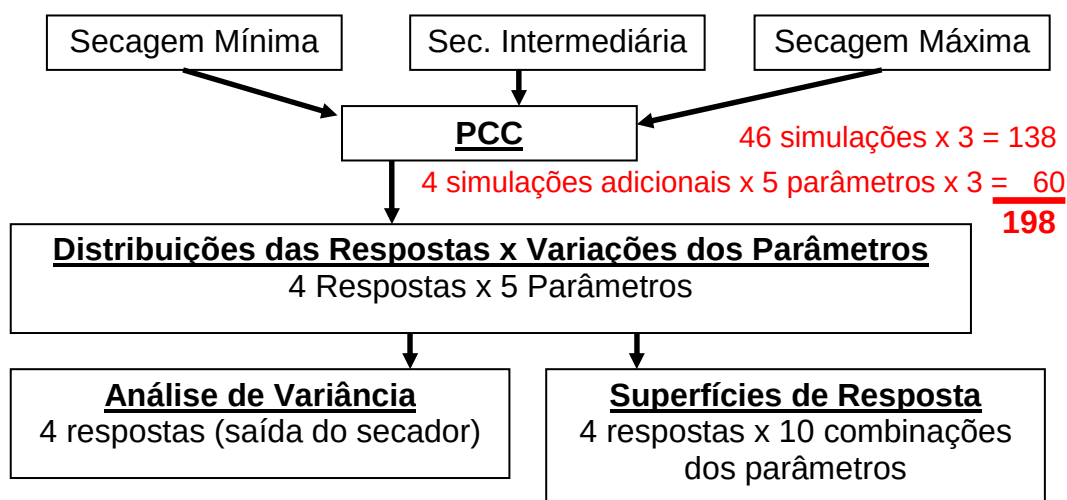


Figura 3.3 – Etapas da metodologia empregada para estudo de sensibilidade paramétrica.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os gráficos das distribuições das respostas simuladas pelo modelo em função do comprimento adimensional do leito (z) nas condições experimentais de mínima e máxima secagem. Os gráficos das distribuições na condição central estão apresentados no Apêndice I. A rotina implementada para análise de sensibilidade é apresentada no Apêndice II para um caso típico.

Neste capítulo, os valores das respostas previstas na saída do secador rotatório contracorrente, ou seja, para o sólido (M e T_s) em ($z = 0$) e para o ar (W e T_f) em ($z = 1$), para a flutuação estudada dos parâmetros são apresentados em forma de tabelas para as 3 (três) condições experimentais, a fim de condensar todos os resultados.

4.1 – DISTRIBUIÇÕES DAS RESPOSTAS SIMULADAS

4.1.1 – Variação do Parâmetro Coeficiente Global Volumétrico de Transferência de Calor (U_{va})

As Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam as distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W) em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) [$\text{kW.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}$] estabelecidos pelo planejamento experimental e simulados para as condições experimentais, de mínima e máxima secagem, respectivamente.

Observa-se que as variações para as respostas umidade do sólido e da umidade do ar em função das flutuações no parâmetro U_{va} , tendem a aumentar e atingem intensidade máximas na saída das correntes, como esperado.

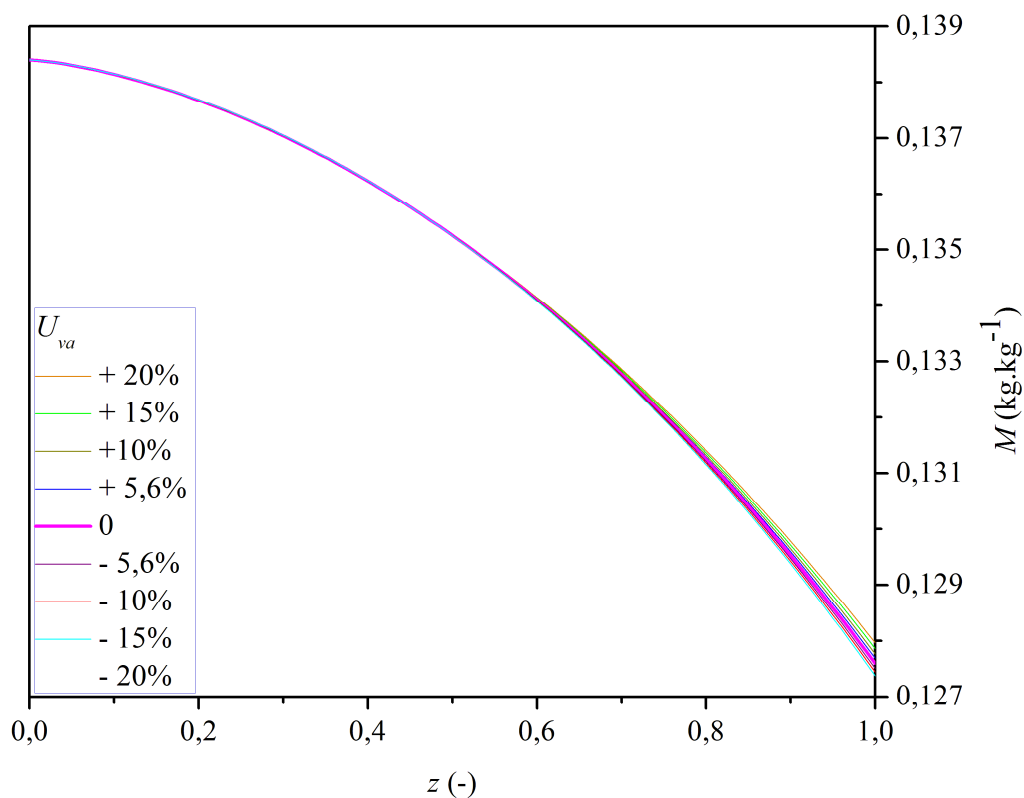


Figura 4.1 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de mínima secagem.

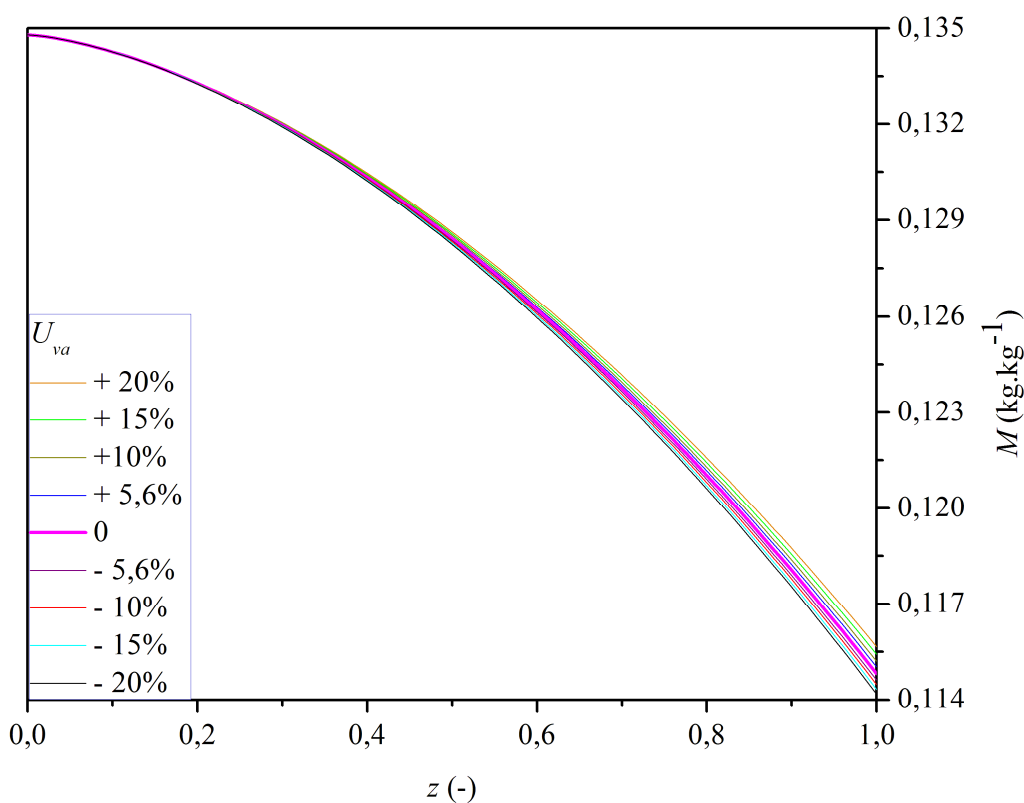


Figura 4.2 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de máxima secagem.

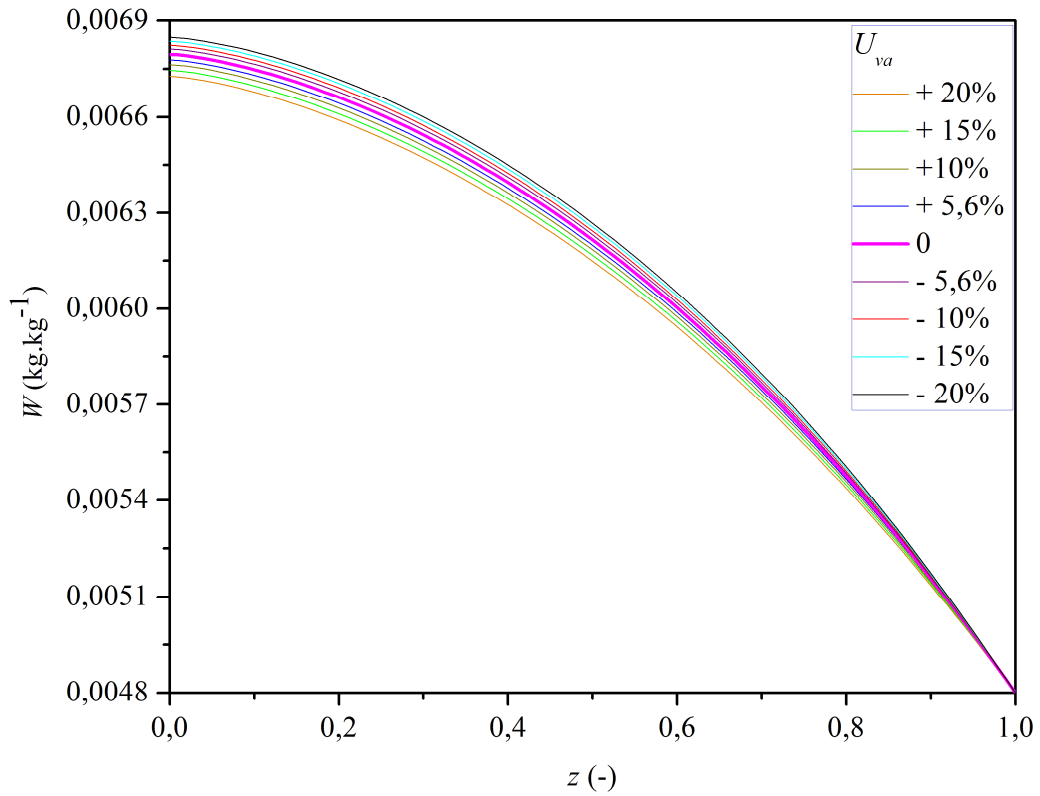


Figura 4.3 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de mínima secagem.

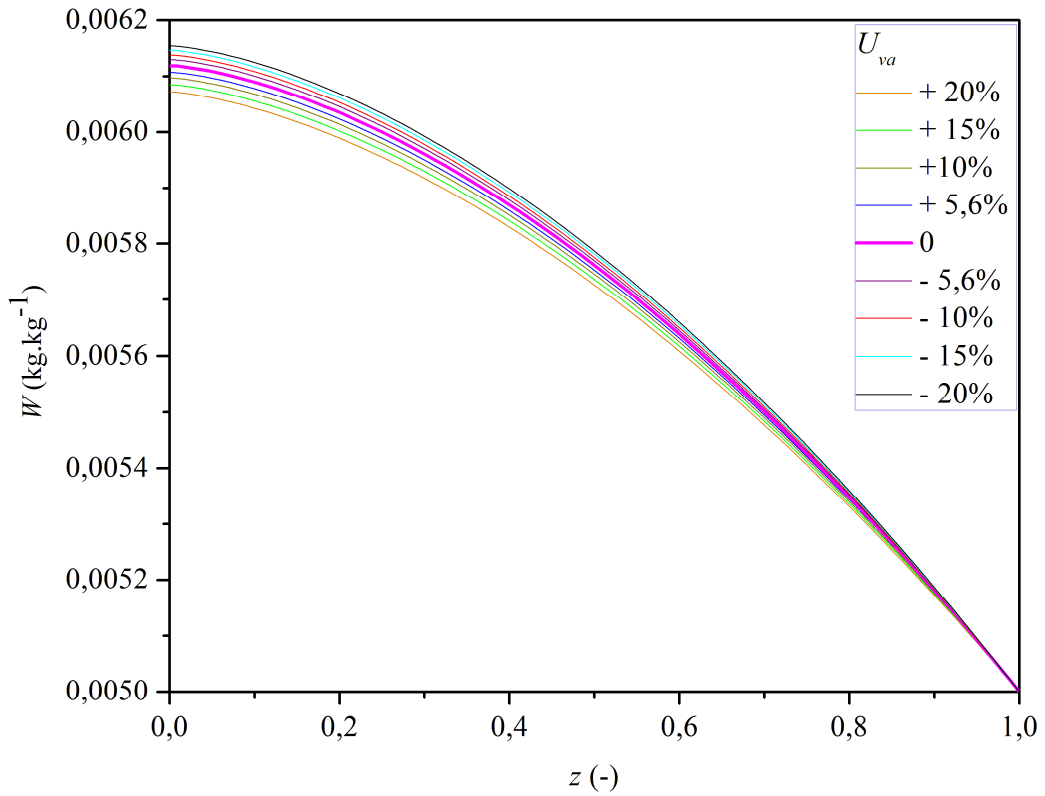


Figura 4.4 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de máxima secagem.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam as variações da umidade do sólido e do ar na saída do leito, em função da flutuação de U_{va} . Estas variações têm como referência o valor de U_{va} no ponto central do planejamento utilizado neste trabalho. As flutuações são apresentadas para as 3 (três) condições experimentais estudadas, ou seja, ensaios que conduzem a uma mínima, ponto central e máxima secagem. Observa-se nestes resultados que as variações em todas as condições não ultrapassam 1,0%, ou seja, menores que as incertezas experimentais. Sendo assim, pode-se concluir que as umidades do material e do ar são pouco sensíveis à variação de U_{va} .

Tabela 4.1 – Variações no parâmetro coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para a umidade do sólido (M) em $z = 1$.

VARIAÇÃO U_{va} (%)	UMIDADE DO SÓLIDO (M)					
	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)
- 20,0	0,1280	0,3	0,1245	0,7	0,1157	0,7
- 15,0	0,1279	0,2	0,1243	0,5	0,1154	0,5
- 10,0	0,1278	0,1	0,1241	0,3	0,1152	0,3
- 5,6	0,1277	0,1	0,1239	0,2	0,1150	0,2
0,0	0,1276	0,0	0,1237	0,0	0,1148	0,0
+ 5,6	0,1275	-0,1	0,1235	-0,2	0,1146	-0,2
+ 10,0	0,1274	-0,1	0,1234	-0,3	0,1145	-0,3
+ 15,0	0,1274	-0,2	0,1232	-0,4	0,1143	-0,4
+ 20,0	0,1273	-0,2	0,1231	-0,5	0,1142	-0,6

Tabela 4.2 – Variações no parâmetro coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para a umidade do ar (W) em $z = 0$.

VARIAÇÃO U_{va} (%)	UMIDADE DO AR (W)					
	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)
- 20,0	0,00673	-1,0	0,00974	-0,8	0,00607	-0,8
- 15,0	0,00675	-0,7	0,00976	-0,6	0,00609	-0,6
- 10,0	0,00676	-0,5	0,00978	-0,4	0,00610	-0,4
- 5,6	0,00678	-0,3	0,00980	-0,2	0,00611	-0,2
0,0	0,00680	0,0	0,00982	0,0	0,00612	0,0
+ 5,6	0,00681	0,2	0,00983	0,2	0,00613	0,2
+ 10,0	0,00682	0,4	0,00985	0,3	0,00614	0,3
+ 15,0	0,00684	0,6	0,00986	0,5	0,00615	0,4
+ 20,0	0,00685	0,8	0,00988	0,6	0,00615	0,6

Nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 são demonstrados as distribuições de temperatura do sólido (T_s) e do ar (T_f) em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) [$\text{kW.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}$] estabelecidos pelo PCC e simulados para as condições experimentais que levam a mínima e máxima secagem, respectivamente.

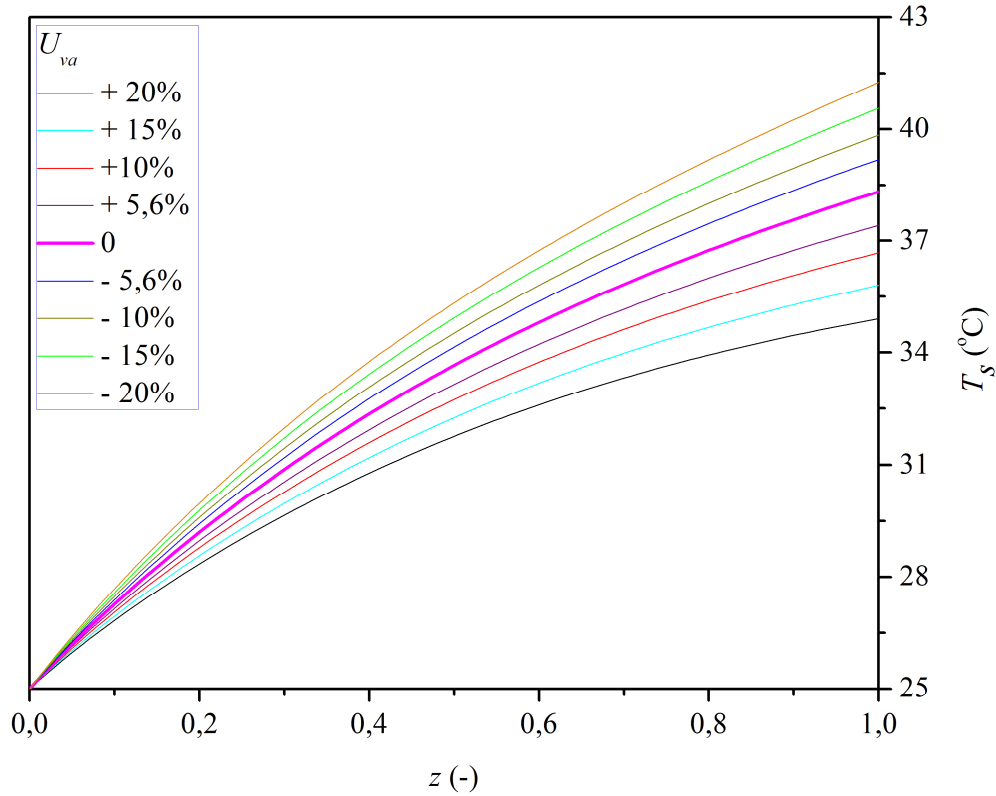


Figura 4.5 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de mínima secagem.

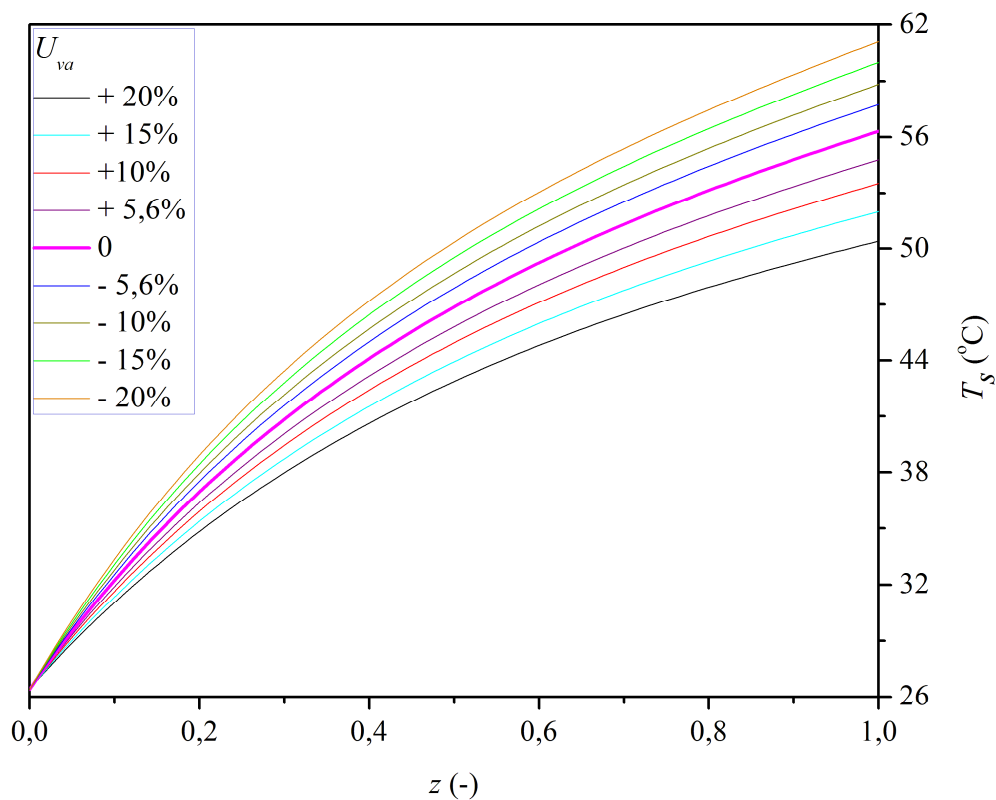


Figura 4.6 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de máxima secagem.

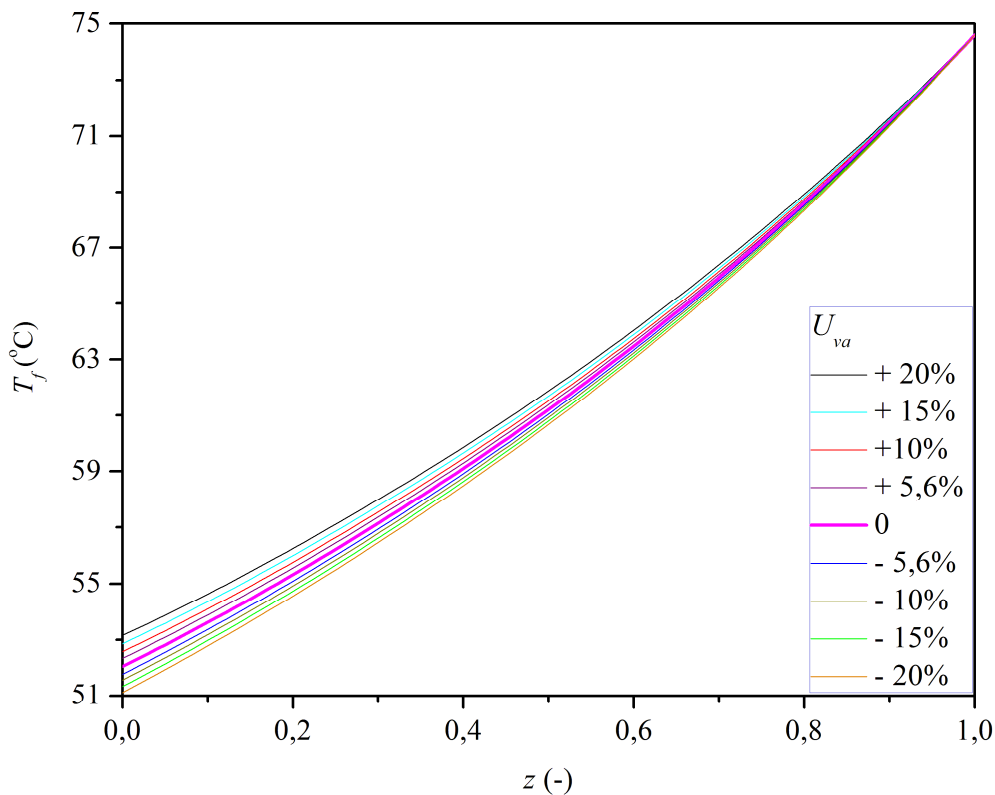


Figura 4.7 – Distribuições da temperatura do ar (T_f) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de mínima secagem.

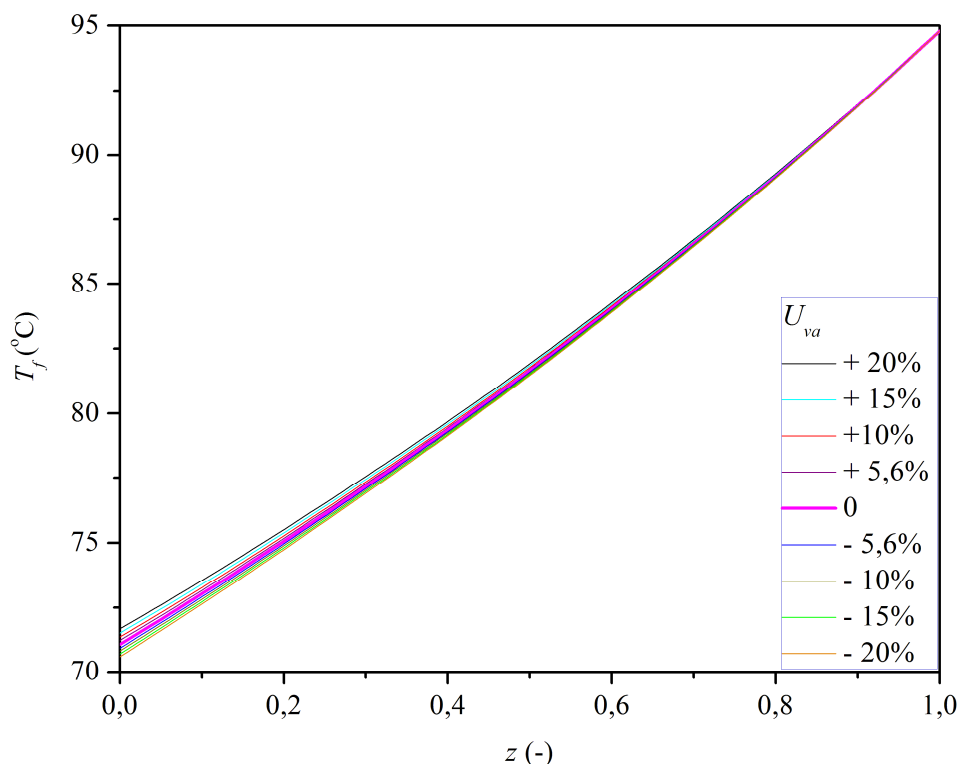


Figura 4.8 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para experimento de máxima secagem.

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam as variações da temperatura do sólido e do ar, na saída do leito, para os valores de U_{va} para as 3 (três) condições experimentais com ensaios nos pontos de mínima, central e máxima secagem.

Tabela 4.3 – Variações no parâmetro coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para a temperatura do sólido (T_s) em $z = 1$.

VARIAÇÃO U_{va} (%)	TEMPERATURA DO SÓLIDO (T_s)					
	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
- 20,0	34,9	-8,9	43,2	-9,5	50,4	-10,5
- 15,0	35,8	-6,5	44,4	-7,0	52,0	-7,7
- 10,0	36,7	-4,3	45,5	-4,6	53,5	-5,0
- 5,6	37,4	-2,4	46,5	-2,5	54,8	-2,7
0,0	38,3	0,0	47,7	0,0	56,3	0,0
+ 5,6	39,2	2,3	48,9	2,4	57,8	2,6
+ 10,0	39,8	4,0	49,7	4,2	58,8	4,5
+ 15,0	40,6	5,9	50,7	6,2	60,0	6,6
+ 20,0	41,3	7,7	51,6	8,0	61,1	8,5

Tabela 4.4 – Variações no parâmetro coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para a temperatura do ar (T_f) em $z = 0$.

VARIAÇÃO U_{va} (%)	TEMPERATURA DO AR (T_f)					
	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
- 20,0	53,2	2,1	63,4	1,4	71,7	0,9
- 15,0	52,9	1,6	63,1	1,0	71,5	0,6
- 10,0	52,6	1,0	62,9	0,7	71,4	0,4
- 5,6	52,3	0,6	62,7	0,4	71,2	0,2
0,0	52,0	0,0	62,5	0,0	71,1	0,0
+ 5,6	51,8	-0,5	62,3	-0,3	70,9	-0,2
+ 10,0	51,6	-0,9	62,1	-0,6	70,8	-0,4
+ 15,0	51,3	-1,4	61,9	-0,9	70,7	-0,5
+ 20,0	51,1	-1,8	61,8	-1,2	70,6	-0,7

As variações no parâmetro coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) para a temperatura do sólido (T_s) são de até 10%, portanto bem superiores que as incertezas experimentais. Observa-se também que a ordem de grandeza das variações para a temperatura do ar (T_f) é de no máximo 2,0%.

Logo, a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) é mais significativa para a resposta temperatura do sólido (T_s).

4.1.2 – Variação do Parâmetro Coeficiente de Calor Perdido (U_p)

As Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam as distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W) em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro coeficiente de calor perdido (U_p) [$\text{kW.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$] estabelecidos pelo PCC e simulados para os testes experimentais nas condições de mínima e máxima secagem, respectivamente.

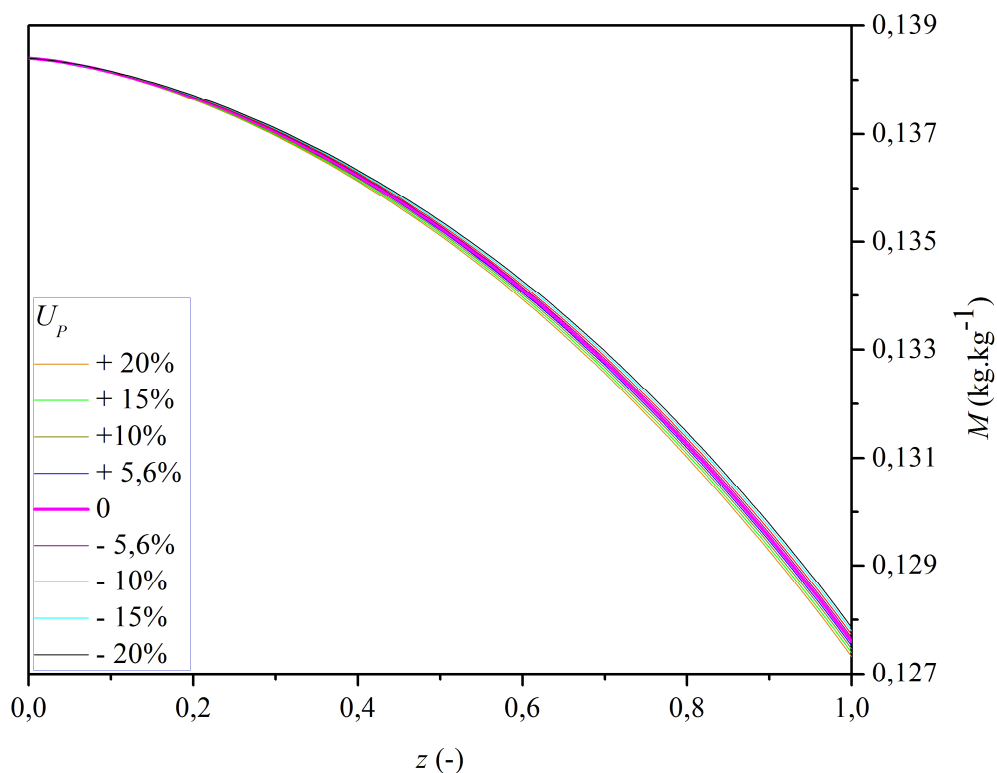


Figura 4.9 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de mínima secagem.

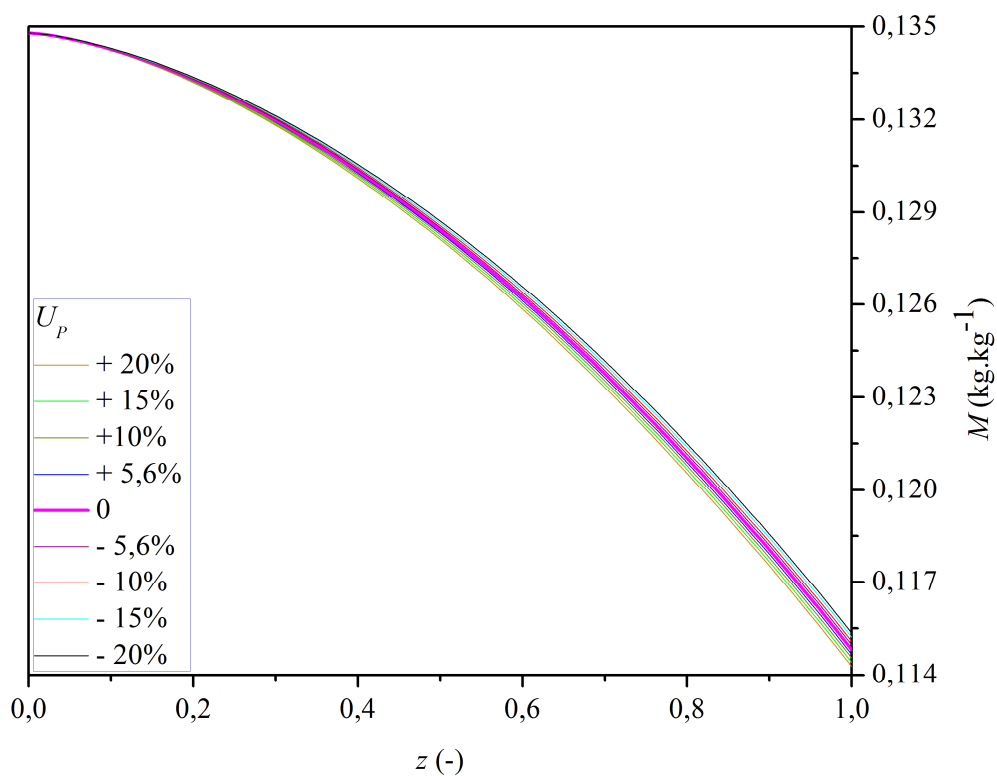


Figura 4.10 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de máxima secagem.

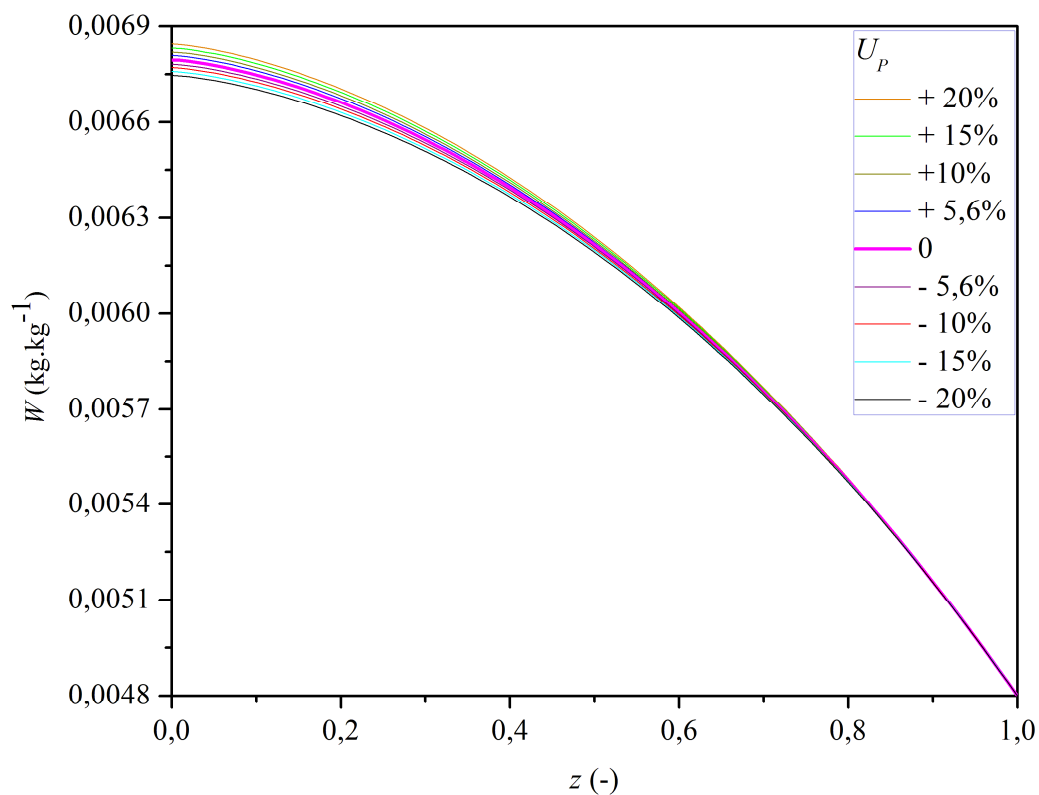


Figura 4.11 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de mínima secagem.

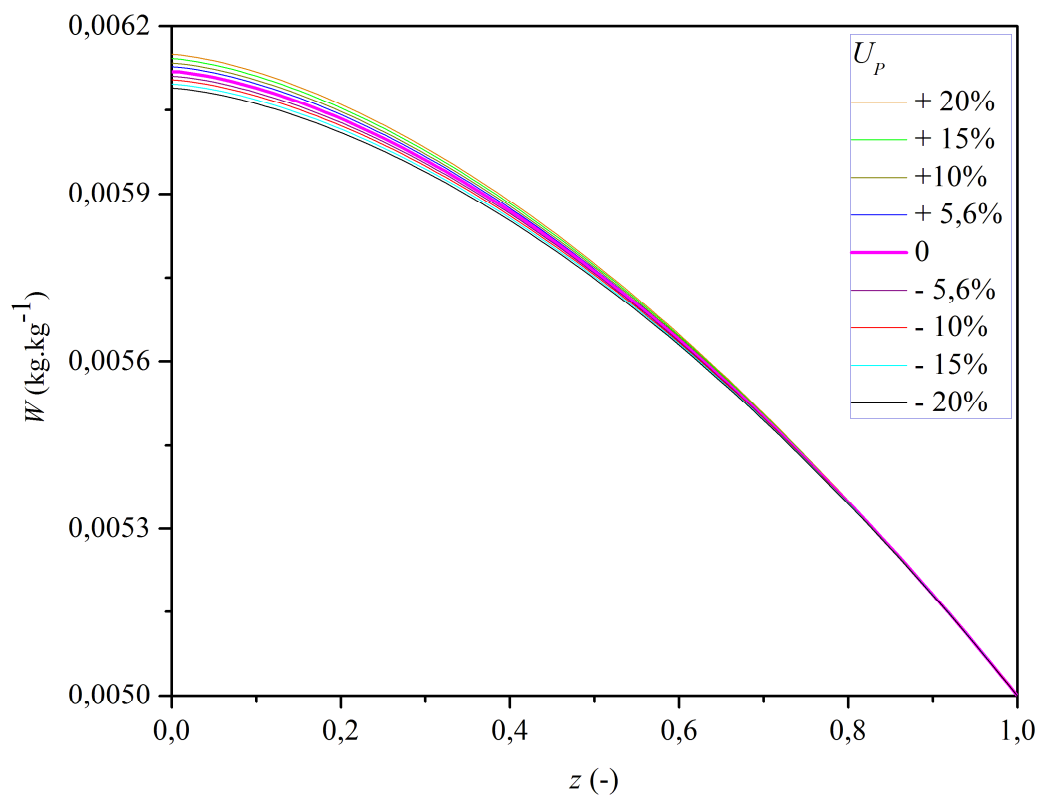


Figura 4.12 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de máxima secagem.

As variações da temperatura do sólido e do ar, na saída do leito, em relação ao ponto central para os valores de U_p são apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6, para as 3 (três) condições experimentais de mínima, central e máxima secagem.

Tabela 4.5 – Variações no parâmetro coeficiente de calor perdido (U_p) para a umidade do sólido (M) em $z = 1$.

VARIAÇÃO U_p (%)	UMIDADE DO SÓLIDO (M)					
	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)
- 20,0	0,1273	-0,2	0,1233	-0,3	0,1143	-0,5
- 15,0	0,1274	-0,2	0,1234	-0,2	0,1144	-0,4
- 10,0	0,1275	-0,1	0,1235	-0,2	0,1145	-0,2
- 5,6	0,1275	-0,1	0,1236	-0,1	0,1147	-0,1
0,0	0,1276	0,0	0,1237	0,0	0,1148	0,0
+ 5,6	0,1277	0,1	0,1238	0,1	0,1150	0,1
+ 10,0	0,1277	0,1	0,1239	0,2	0,1151	0,2
+ 15,0	0,1278	0,2	0,1240	0,2	0,1152	0,3
+ 20,0	0,1279	0,2	0,1241	0,3	0,1153	0,5

Tabela 4.6 – Variações no parâmetro coeficiente de calor perdido (U_p) para a umidade do ar (W) em $z = 0$.

VARIAÇÃO U_p (%)	UMIDADE DO AR (W)					
	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)
- 20,0	0,00685	0,7	0,00985	0,4	0,00615	0,5
- 15,0	0,00683	0,6	0,00984	0,3	0,00614	0,4
- 10,0	0,00682	0,4	0,00984	0,2	0,00613	0,2
- 5,6	0,00681	0,2	0,00983	0,1	0,00613	0,1
0,0	0,00680	0,0	0,00982	0,0	0,00612	0,0
+ 5,6	0,00678	-0,2	0,00981	-0,1	0,00611	-0,1
+ 10,0	0,00677	-0,4	0,00980	-0,2	0,00610	-0,2
+ 15,0	0,00676	-0,5	0,00979	-0,3	0,00610	-0,4
+ 20,0	0,00675	-0,7	0,00978	-0,4	0,00609	-0,5

Os resultados apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6 sobre a variabilidade para os parâmetros umidade do sólido (M) e umidade do ar (W) são muito pequenos ($< 1\%$) quando se considera as imprecisões de medição.

As distribuições de temperatura do sólido (T_s) e do ar (T_f) são apresentados nas Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro coeficiente de calor perdido (U_p) [$\text{kW.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$] estabelecidos pelo planejamento experimental e simulados para as condições experimentais de mínima e máxima secagem, respectivamente.

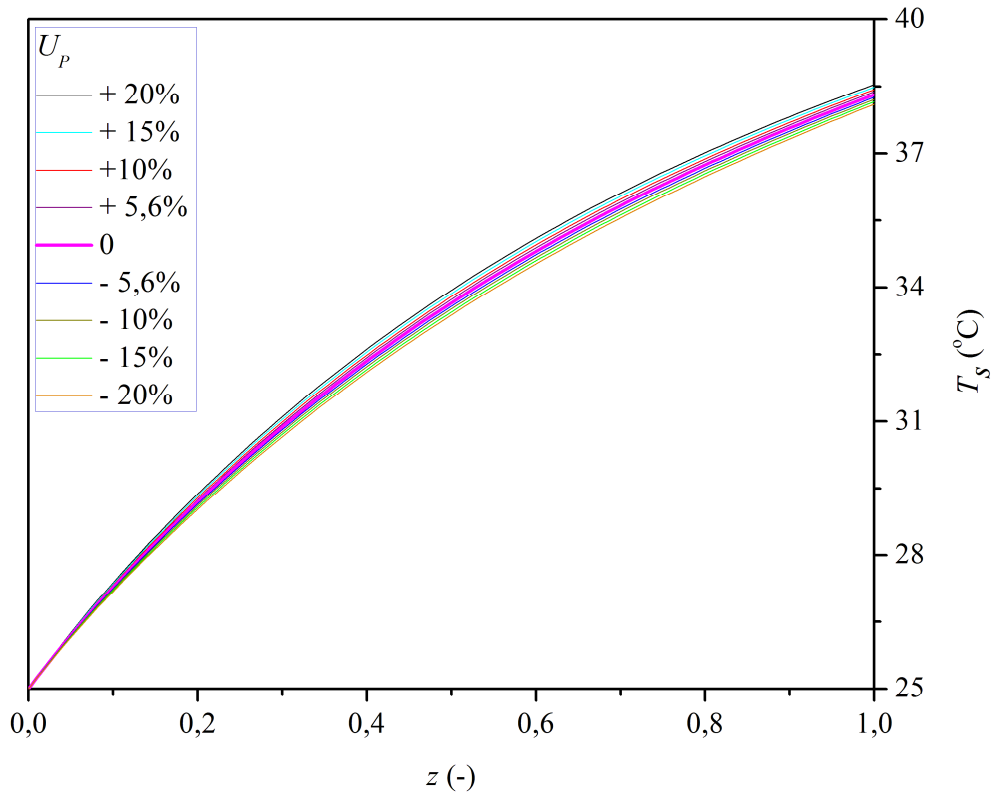


Figura 4.13 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de mínima secagem.

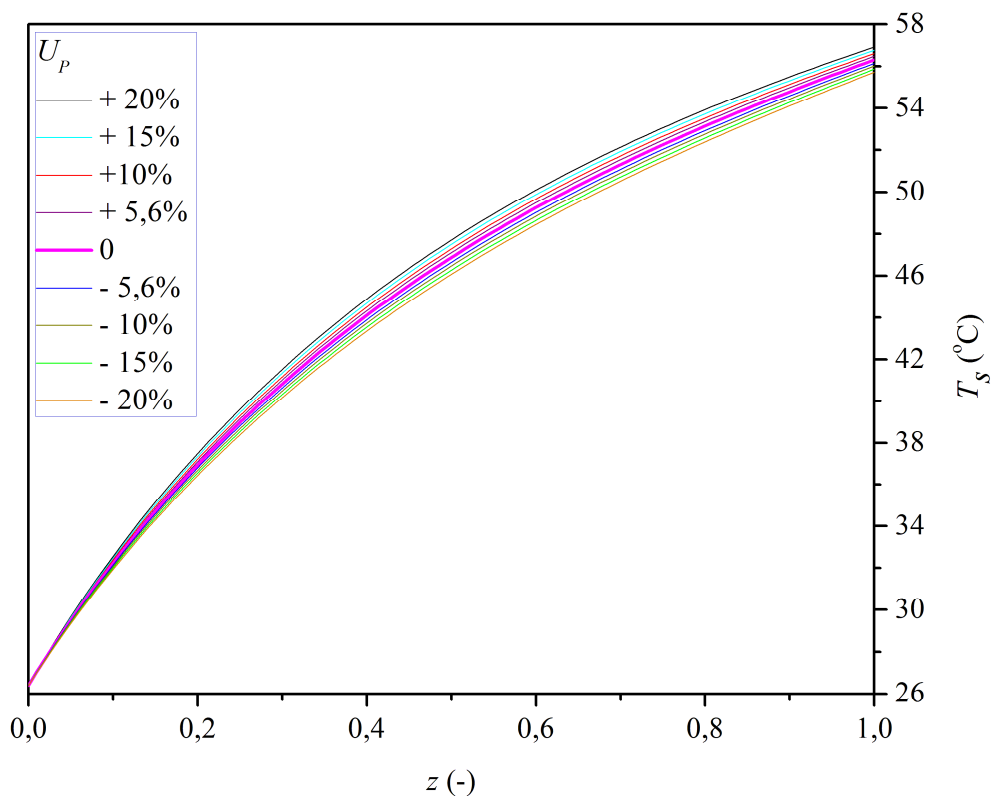


Figura 4.14 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de máxima secagem.

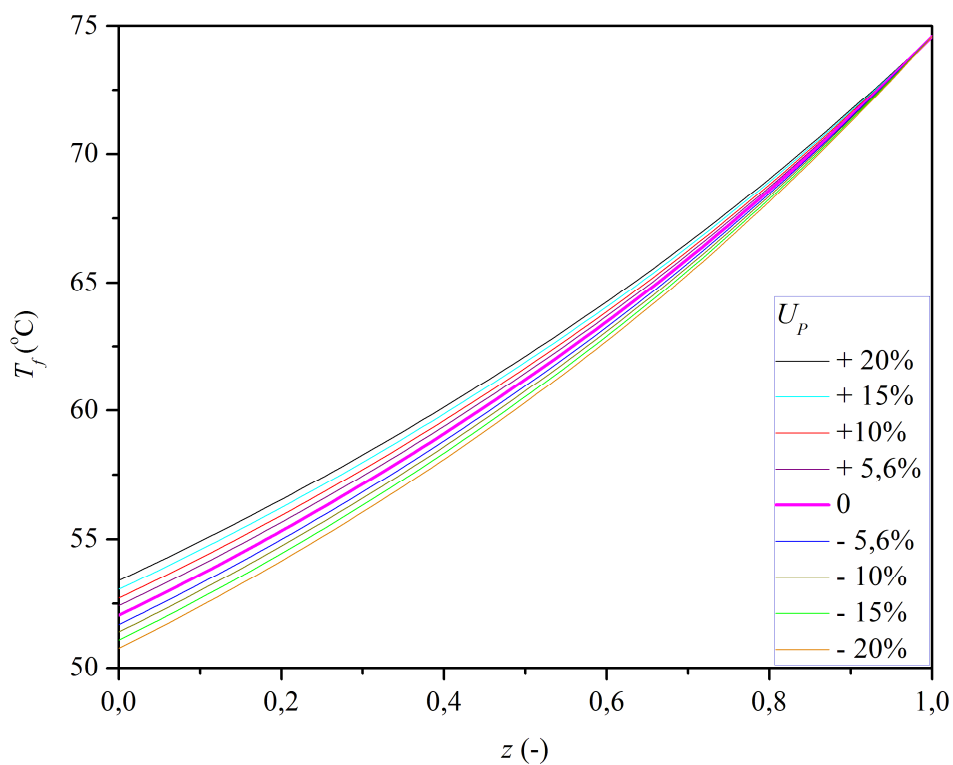


Figura 4.15 – Distribuições da temperatura do ar (T_f) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de mínima secagem.

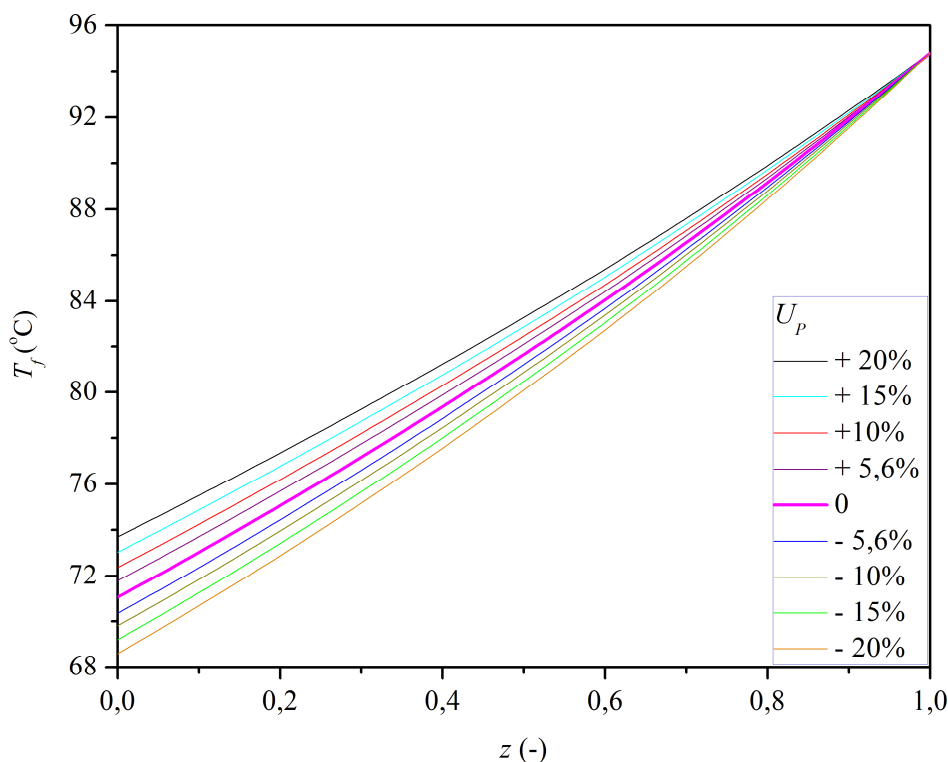


Figura 4.16 – Distribuições da temperatura do ar (T_f) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p) para experimento de máxima secagem.

As variações da temperatura do sólido e do ar, na saída do leito, em relação ao ponto central para os valores de U_p são apresentadas nas Tabelas 4.7 e 4.8 para as 3 (três) condições experimentais que conduzem a uma mínima, ponto central e máxima secagem.

Tabela 4.7 – Variações no parâmetro coeficiente de calor perdido (U_p) para a temperatura do sólido (T_s) em $z = 1$.

VARIAÇÃO U_p (%)	TEMPERATURA DO SÓLIDO (T_s)					
	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
- 20,0	38,5	0,6	48,1	0,9	56,9	1,1
- 15,0	38,5	0,4	48,0	0,7	56,8	0,8
- 10,0	38,4	0,3	47,9	0,4	56,6	0,5
- 5,6	38,4	0,2	47,8	0,2	56,5	0,3
0,0	38,3	0,0	47,7	0,0	56,3	0,0
+ 5,6	38,3	-0,2	47,6	-0,2	56,1	-0,3
+ 10,0	38,2	-0,3	47,5	-0,4	56,0	-0,5
+ 15,0	38,2	-0,4	47,4	-0,6	55,9	-0,8
+ 20,0	38,1	-0,6	47,3	-0,8	55,7	-1,0

Tabela 4.8 – Variações no parâmetro coeficiente de calor perdido (U_p) para a temperatura do ar (T_f) em $z = 0$.

VARIAÇÃO U_p (%)	TEMPERATURA DO AR (T_f)					
	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
- 20,0	53,4	2,6	64,5	3,3	73,7	3,7
- 15,0	53,1	1,9	64,0	2,4	73,0	2,8
- 10,0	52,7	1,3	63,5	1,6	72,4	1,8
- 5,6	52,4	0,7	63,1	0,9	71,8	1,0
0,0	52,0	0,0	62,5	0,0	71,1	0,0
+ 5,6	51,7	-0,7	61,9	-0,9	70,4	-1,0
+ 10,0	51,4	-1,2	61,5	-1,6	69,8	-1,8
+ 15,0	51,1	-1,9	61,0	-2,3	69,2	-2,6
+ 20,0	50,8	-2,5	60,6	-3,1	68,6	-3,5

Verifica-se nas Tabelas 4.7 e 4.8 que as variações do parâmetro coeficiente de calor perdido (U_p) afetaram a temperatura do sólido (T_s) e a temperatura do ar (T_f), com flutuações máximas de 1,1% e 3,7% respectivamente. Observa-se assim um maior efeito deste parâmetro na temperatura do fluido.

4.1.3 – Variação do Parâmetro Taxa de secagem do Material (R_w)

As Figuras 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20 apresentam as distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W) em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro taxa de secagem do material (R_w) [s^{-1}] estabelecidos pelo PCC e simulados para os experimentos de mínima e máxima secagem, respectivamente.

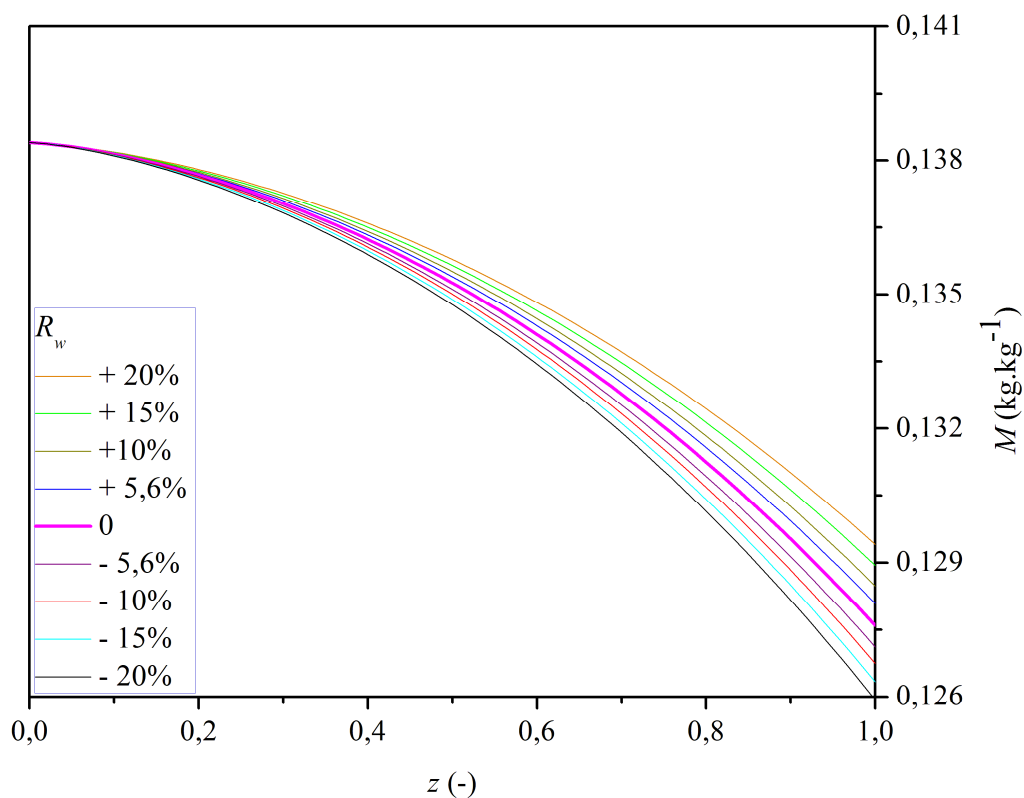


Figura 4.17 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de mínima secagem.

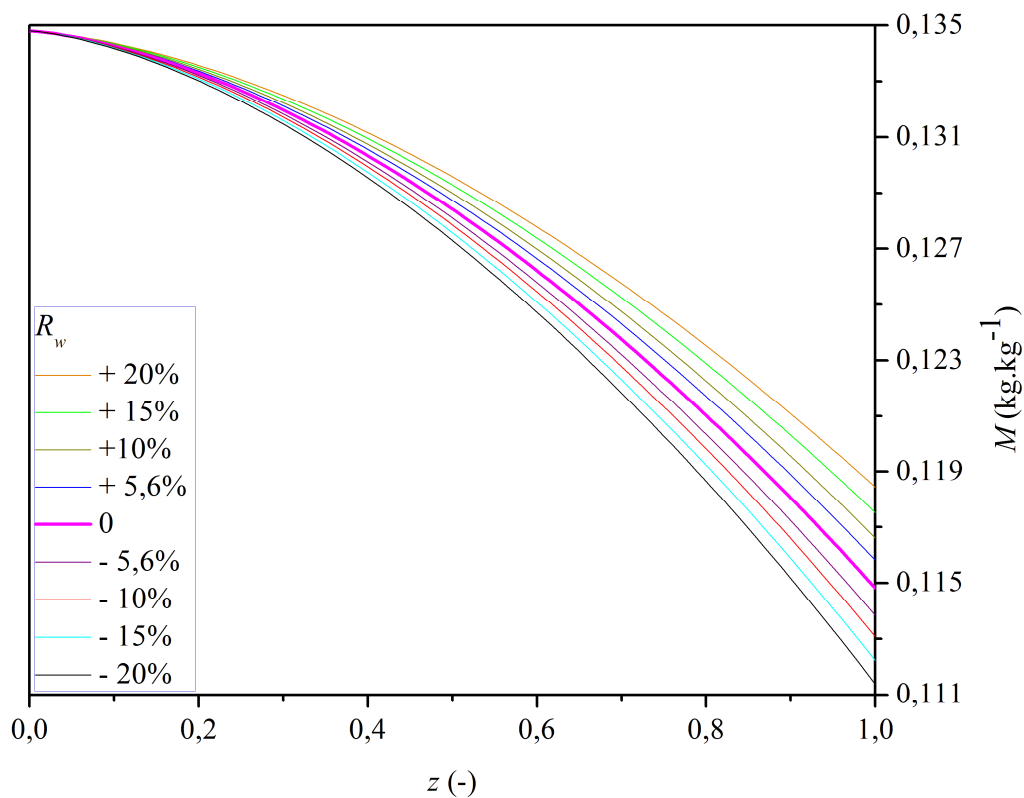


Figura 4.18 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de máxima secagem.

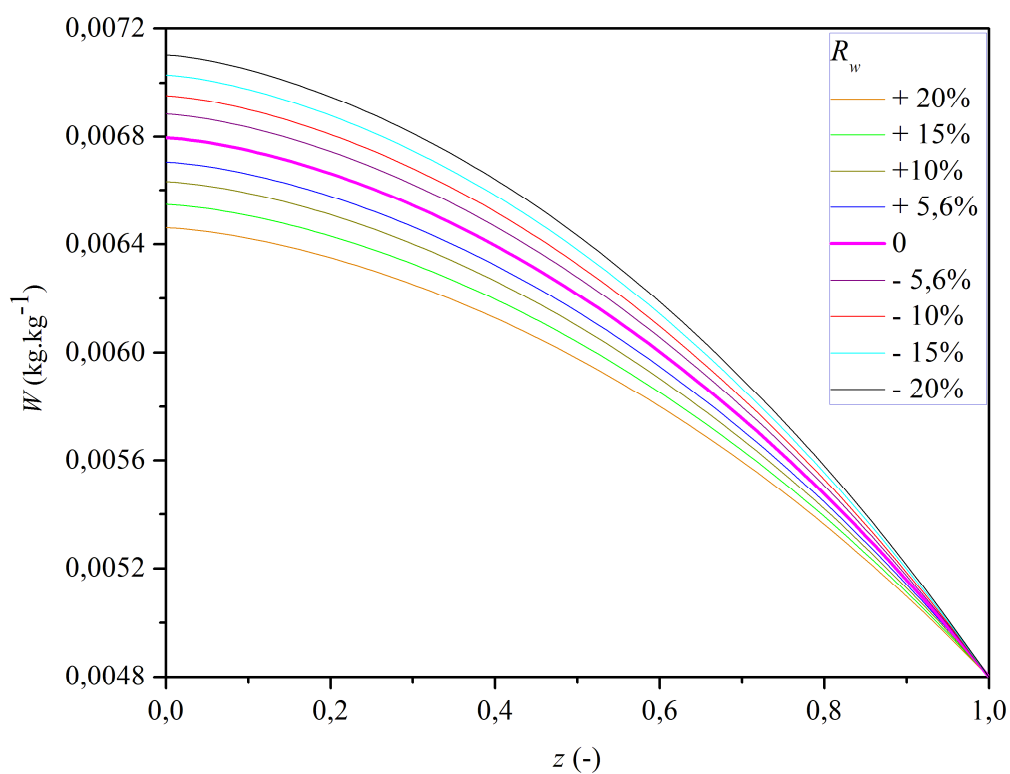


Figura 4.19 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de mínima secagem.

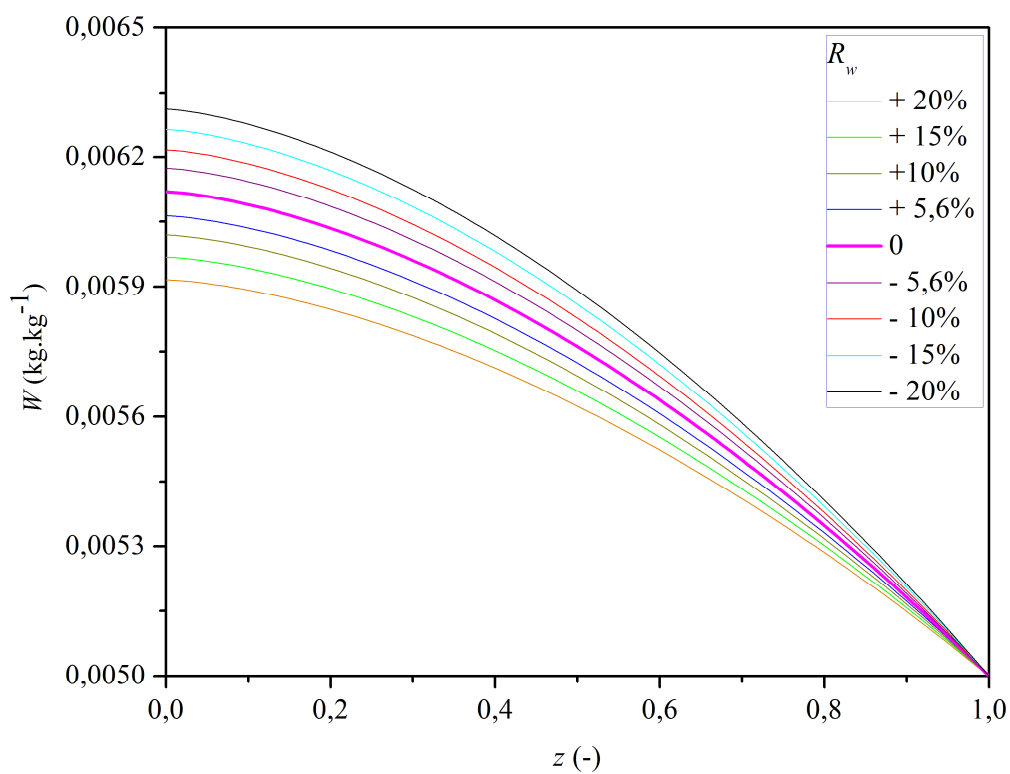


Figura 4.20 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de máxima secagem.

As Tabelas 4.9 e 4.10 apresentam as variações da temperatura do sólido e do ar, na saída do leito, em relação ao ponto central para os valores de R_w para os 3 (três) experimentos de mínima, central e máxima secagem.

Tabela 4.9 – Variações no parâmetro taxa de secagem (R_w) para a umidade do sólido (M) em $z = 1$.

VARIAÇÃO R_w (%)	UMIDADE DO SÓLIDO (M)					
	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)
- 20,0	0,1294	1,4	0,1261	1,9	0,1184	3,2
- 15,0	0,1289	1,1	0,1255	1,4	0,1175	2,4
- 10,0	0,1285	0,7	0,1249	0,9	0,1166	1,6
- 5,6	0,1281	0,4	0,1244	0,5	0,1158	0,9
0,0	0,1276	0,0	0,1237	0,0	0,1148	0,0
+ 5,6	0,1271	-0,4	0,1231	-0,5	0,1138	-0,9
+ 10,0	0,1267	-0,7	0,1226	-0,9	0,1131	-1,5
+ 15,0	0,1263	-1,0	0,1220	-1,4	0,1122	-2,3
+ 20,0	0,1259	-1,3	0,1215	-1,8	0,1114	-3,0

Tabela 4.10 – Variações no parâmetro taxa de secagem (R_w) para a umidade do ar (W) em $z = 0$.

VARIAÇÃO R_w (%)	UMIDADE DO AR (W)					
	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)
- 20,0	0,00646	-4,9	0,00959	-2,3	0,00592	-3,3
- 15,0	0,00655	-3,6	0,00965	-1,7	0,00597	-2,5
- 10,0	0,00663	-2,4	0,00970	-1,1	0,00602	-1,6
- 5,6	0,00670	-1,3	0,00975	-0,6	0,00606	-0,9
0,0	0,00680	0,0	0,00982	0,0	0,00612	0,0
+ 5,6	0,00688	1,3	0,00988	0,6	0,00617	0,9
+ 10,0	0,00695	2,3	0,00992	1,1	0,00622	1,6
+ 15,0	0,00703	3,4	0,00998	1,6	0,00626	2,4
+ 20,0	0,00710	4,5	0,01003	2,2	0,00631	3,1

Observa-se nas Tabelas 4.9 e 4.10 flutuações máximas de 3,2% e 4,9%, respectivamente para umidades do sólido e do ar, ou seja, relevantes à variação do parâmetro taxa de secagem (R_w).

As distribuições de temperatura do sólido (T_s) e do ar (T_f) são demonstrados nas Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 em função do comprimento adimensional do leito (z), para os valores do parâmetro taxa de secagem do material (R_w) [s^{-1}] considerando os testes experimentais nas condições de mínima e máxima secagem, respectivamente.

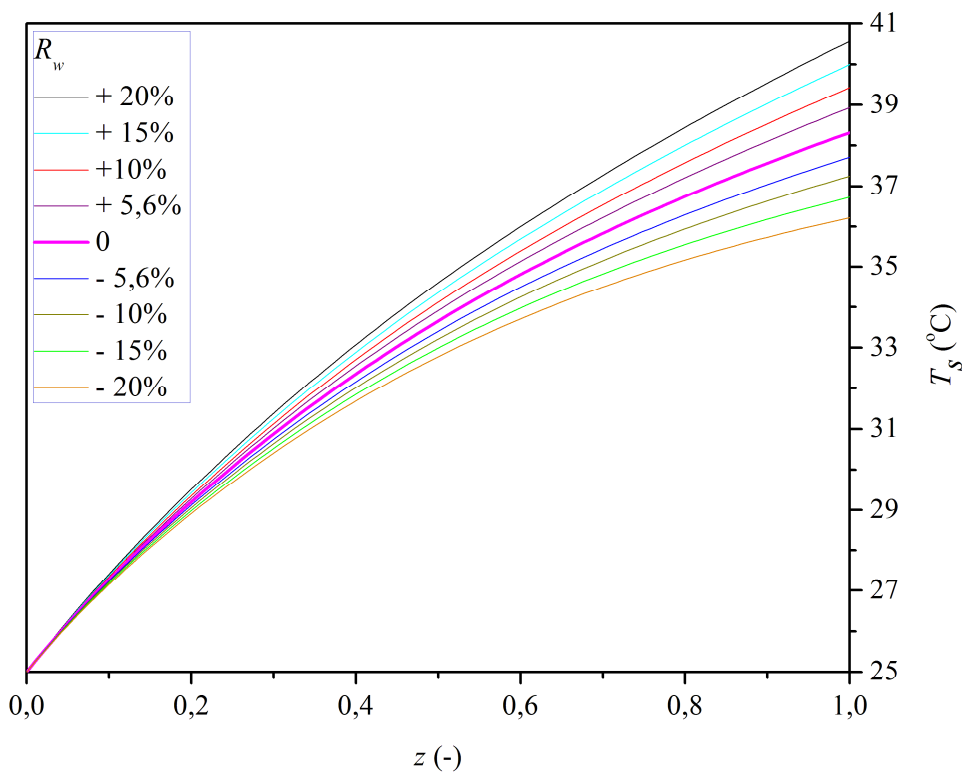


Figura 4.21 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de mínima secagem.

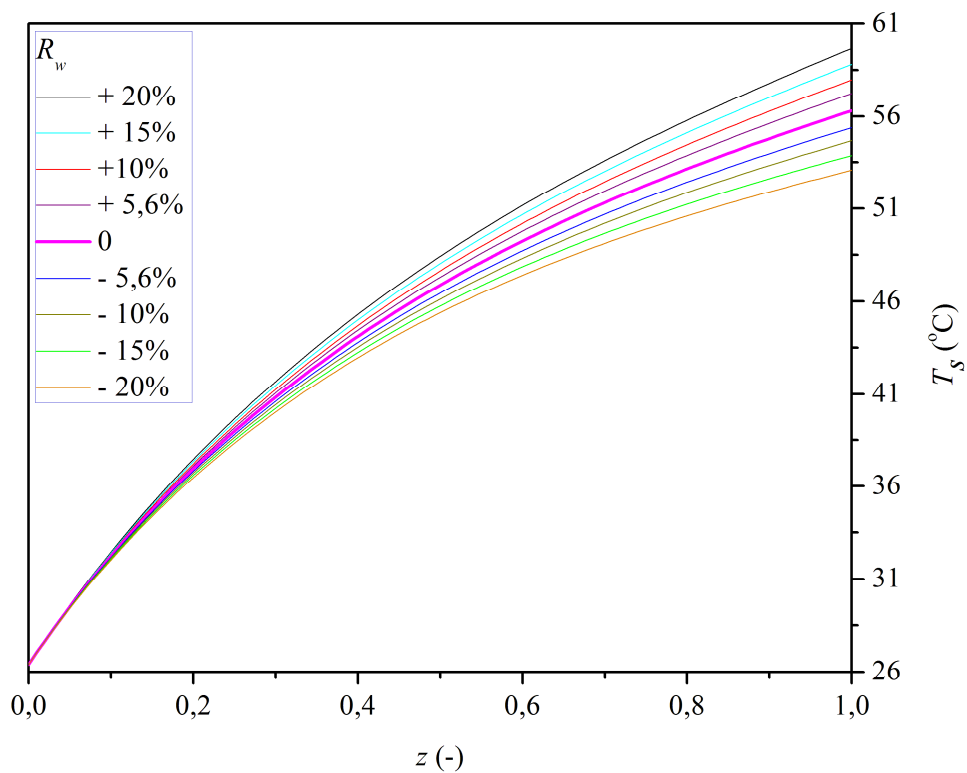


Figura 4.22 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de máxima secagem.

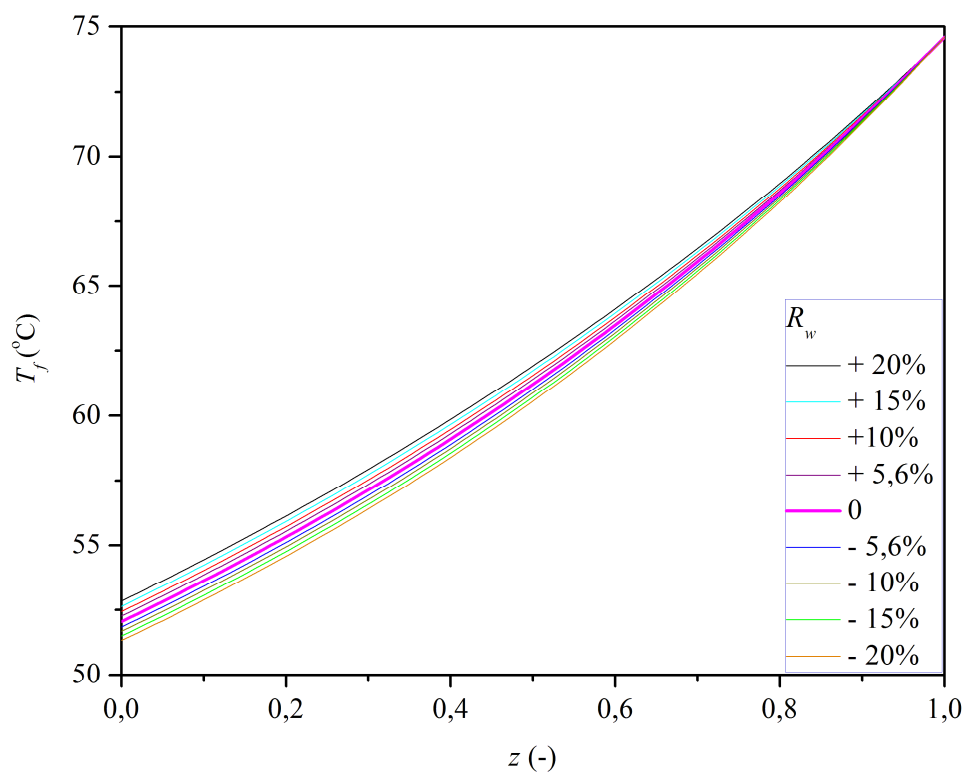


Figura 4.23 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de mínima secagem.

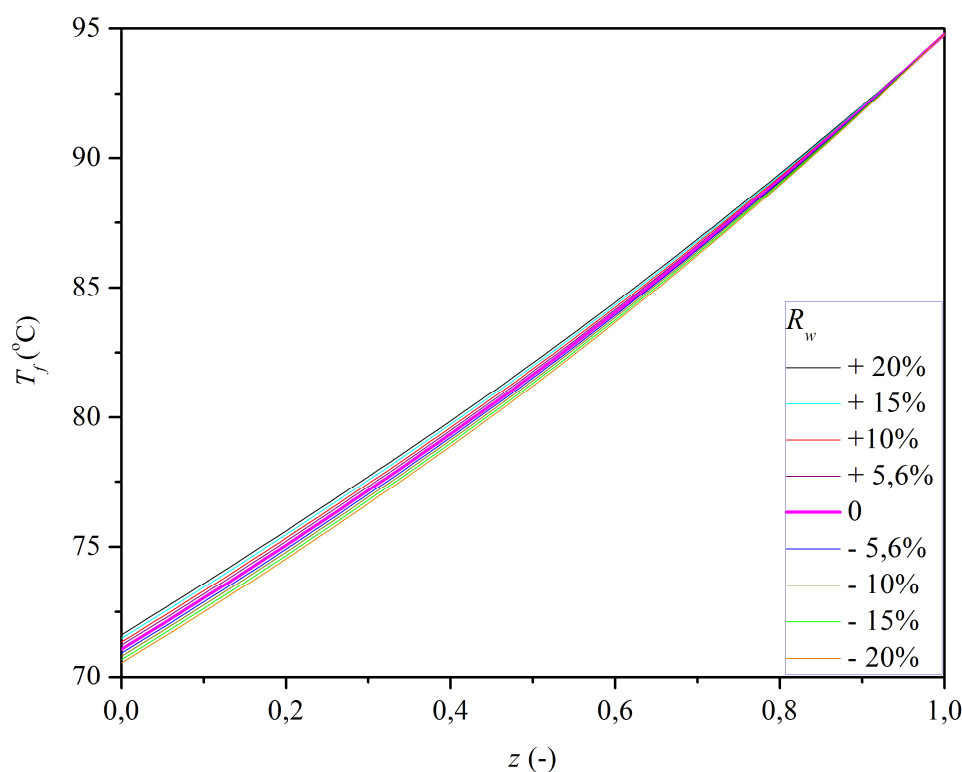


Figura 4.24 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação da taxa de secagem do material (R_w) para experimento de máxima secagem.

Nas Tabelas 4.11 e 4.12 são demonstrados as variações da temperatura do sólido e do ar, na saída do leito, em relação ao ponto central para os valores de R_w para os 3 (três) ensaios de mínima, central e máxima secagem.

Tabela 4.11 – Variações no parâmetro taxa de secagem (R_w) para a temperatura do sólido (T_s) em $z = 1$.

TEMPERATURA DO SÓLIDO (T_s)						
VARIAÇÃO R_w (%)	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
- 20,0	40,6	5,9	50,3	5,3	59,7	6,0
- 15,0	40,0	4,4	49,6	4,0	58,8	4,5
- 10,0	39,4	2,9	49,0	2,6	58,0	3,0
- 5,6	38,9	1,6	48,4	1,5	57,2	1,7
0,0	38,3	0,0	47,7	0,0	56,3	0,0
+ 5,6	37,7	-1,6	47,0	-1,4	55,4	-1,6
+ 10,0	37,2	-2,8	46,5	-2,6	54,7	-2,9
+ 15,0	36,7	-4,1	45,9	-3,8	53,9	-4,3
+ 20,0	36,2	-5,5	45,3	-5,0	53,1	-5,8

Tabela 4.12 – Variações no parâmetro taxa de secagem (R_w) para a temperatura do ar (T_f) em $z = 0$.

VARIAÇÃO R_w (%)	TEMPERATURA DO AR (T_f)					
	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
- 20,0	52,8	1,5	63,1	0,9	71,6	0,8
- 15,0	52,6	1,1	62,9	0,7	71,5	0,6
- 10,0	52,4	0,7	62,8	0,5	71,3	0,4
- 5,6	52,3	0,4	62,7	0,3	71,2	0,2
0,0	52,0	0,0	62,5	0,0	71,1	0,0
+ 5,6	51,8	-0,4	62,3	-0,2	70,9	-0,2
+ 10,0	51,7	-0,7	62,2	-0,4	70,8	-0,4
+ 15,0	51,5	-1,1	62,1	-0,7	70,7	-0,6
+ 20,0	51,3	-1,4	62,0	-0,9	70,5	-0,7

A Tabela 4.11 mostra um resultado mais intenso para o valor previsto da resposta temperatura do sólido (T_s), com variações de até 6,0%. Entretanto, para a resposta temperatura do ar (T_f), a Tabela 4.12 mostra que tal comportamento em relação à variação no parâmetro taxa de secagem (R_w) foi muito menor, estando as variações muito próximas a faixa de precisão da medida (0,1 °C).

4.1.4 – Variação do Parâmetro Calor Específico do Sólido (Cp_s)

As Figuras 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28 apresentam as distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W) em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro Cp_s [$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$] estabelecidos pelo planejamento realizado na presente dissertação e simulados para os testes experimentais de mínima e máxima secagem, respectivamente.

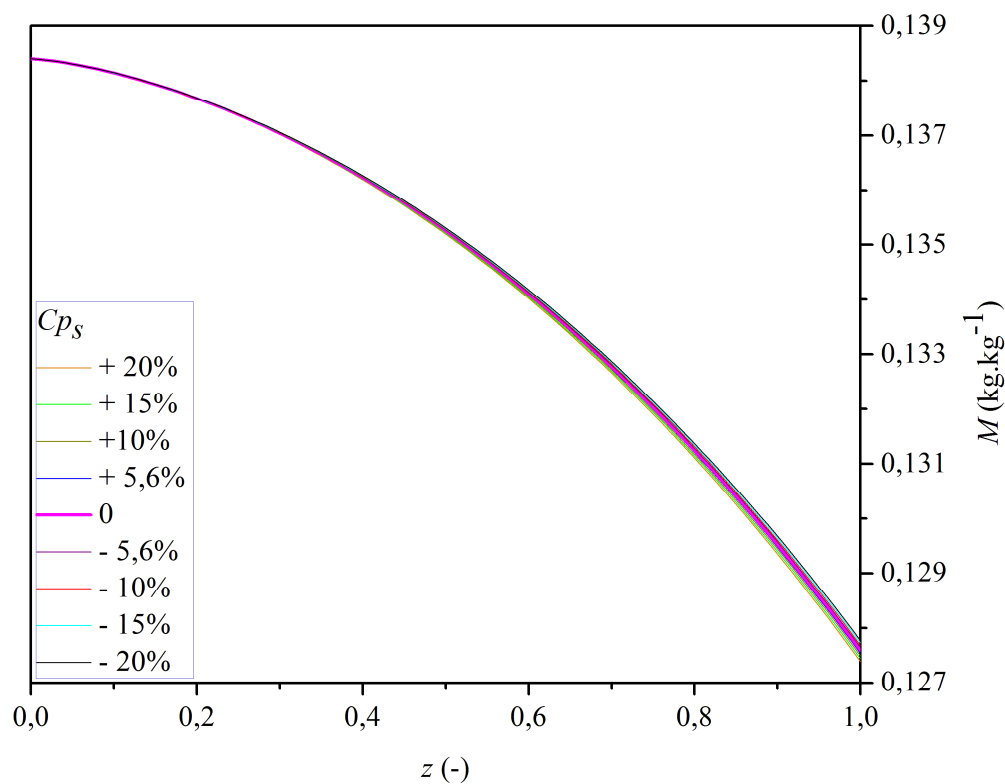


Figura 4.25 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s) para experimento de mínima secagem.

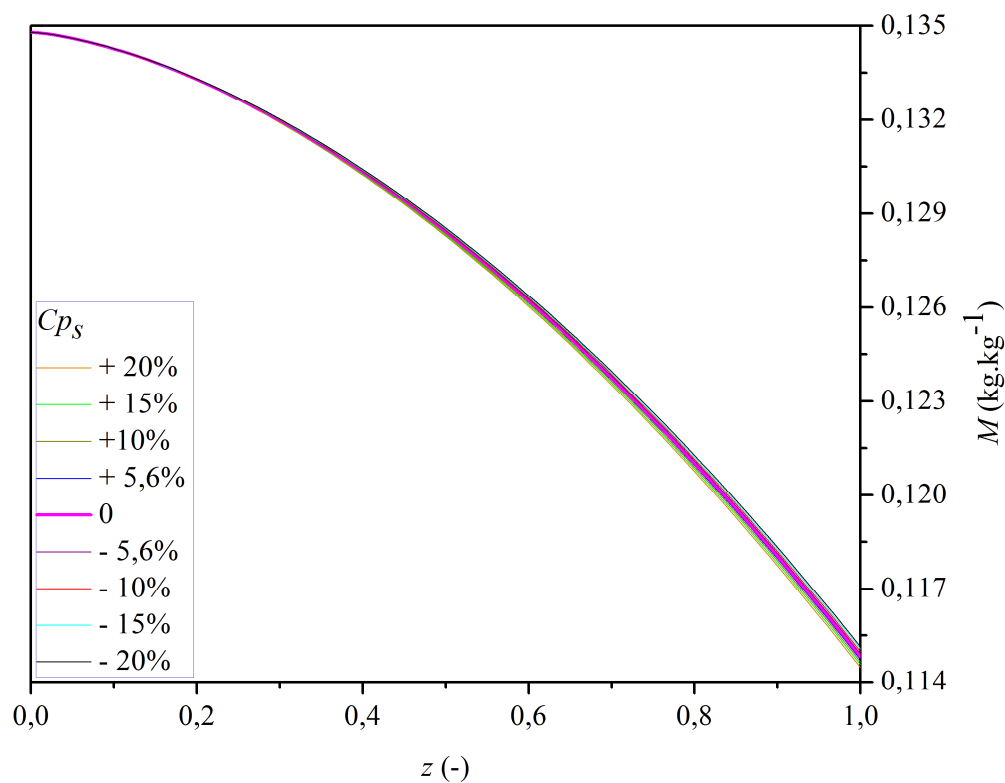


Figura 4.26 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s) para experimento de máxima secagem.

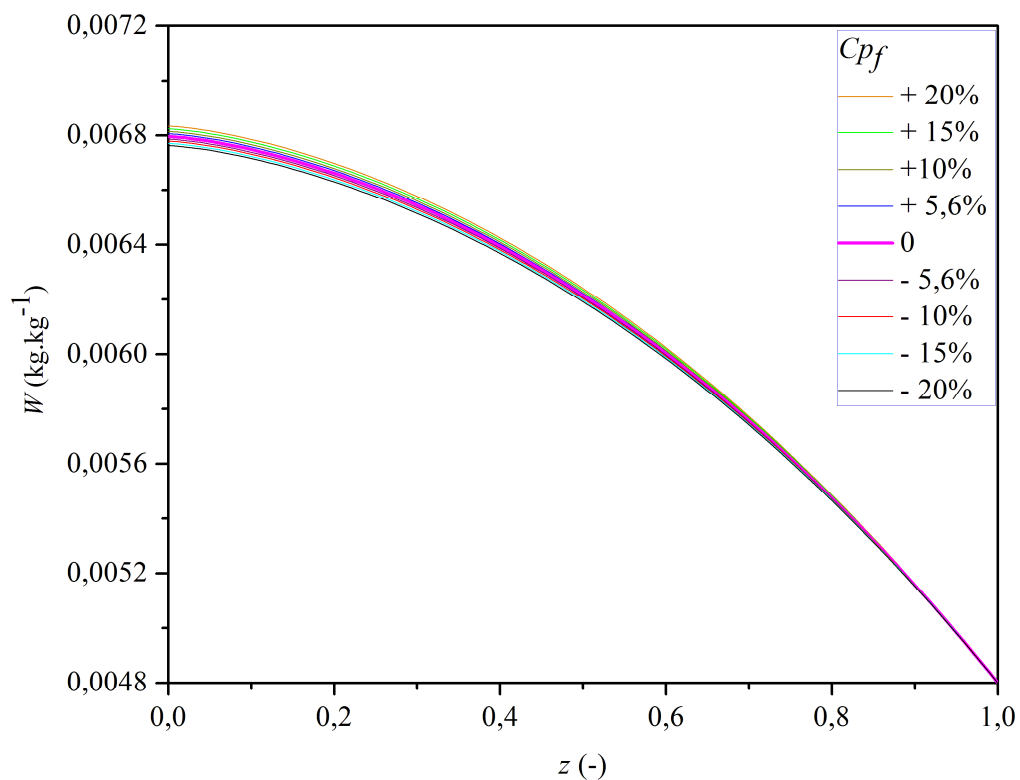


Figura 4.27 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do calor específico do sólido (C_{p_s}) para experimento de mínima secagem.

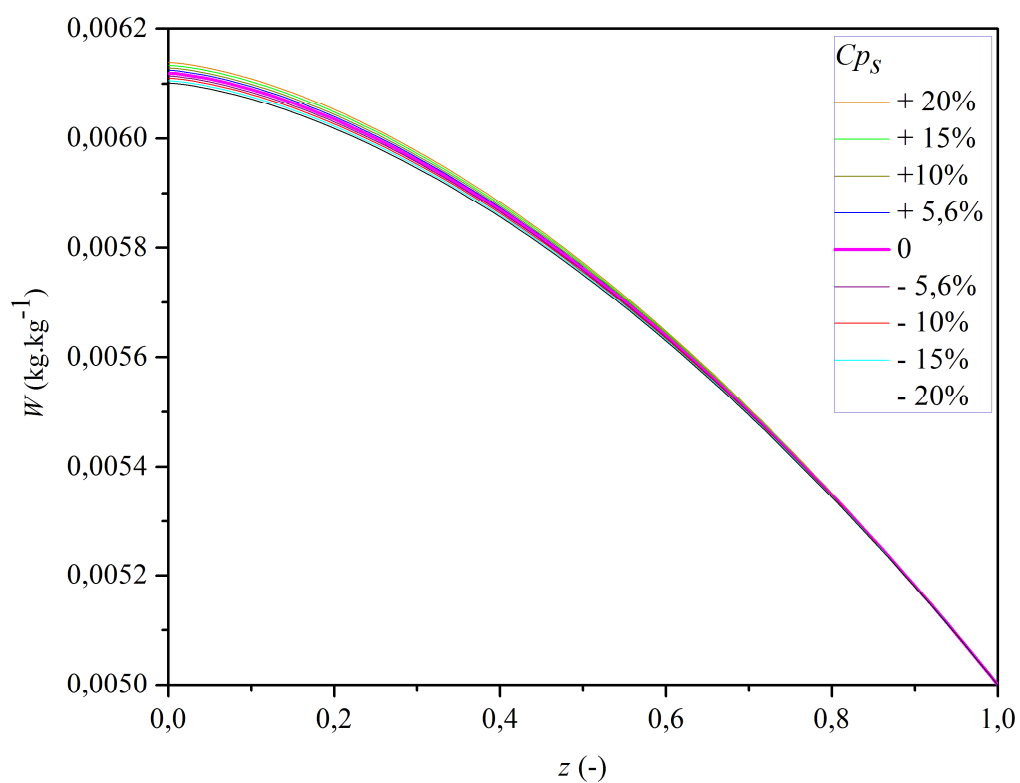


Figura 4.28 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do calor específico do sólido (C_{p_s}) para experimento de máxima secagem.

As variações da temperatura do sólido e do ar, na saída do leito, em relação ao ponto central para os valores de Cp_s são apresentados nas Tabelas 4.13 e 4.14 para os ensaios que levam a uma condição de mínima, central e máxima secagem.

Tabela 4.13 – Variações no parâmetro calor específico do sólido (Cp_s) para a umidade do sólido (M) em $z = 1$.

UMIDADE DO SÓLIDO (M)						
VARIAÇÃO Cp_s (%)	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)
- 20,0	0,1274	-0,2	0,1233	-0,3	0,1145	-0,3
- 15,0	0,1274	-0,1	0,1234	-0,2	0,1146	-0,2
- 10,0	0,1275	-0,1	0,1235	-0,1	0,1146	-0,1
- 5,6	0,1275	0,0	0,1236	-0,1	0,1147	-0,1
0,0	0,1276	0,0	0,1237	0,0	0,1148	0,0
+ 5,6	0,1276	0,0	0,1238	0,1	0,1149	0,1
+ 10,0	0,1277	0,1	0,1239	0,1	0,1150	0,1
+ 15,0	0,1277	0,1	0,1240	0,2	0,1151	0,2
+ 20,0	0,1278	0,1	0,1241	0,3	0,1151	0,3

Tabela 4.14 – Variações no parâmetro calor específico do sólido (Cp_s) para a umidade do ar (W) em $z = 0$.

UMIDADE DO AR (W)						
VARIAÇÃO Cp_s (%)	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)
- 20,0	0,00683	0,6	0,00985	0,4	0,00614	0,3
- 15,0	0,00682	0,4	0,00984	0,3	0,00613	0,2
- 10,0	0,00681	0,3	0,00983	0,2	0,00613	0,2
- 5,6	0,00681	0,1	0,00983	0,1	0,00612	0,1
0,0	0,00680	0,0	0,00982	0,0	0,00612	0,0
+ 5,6	0,00679	-0,1	0,00981	-0,1	0,00611	-0,1
+ 10,0	0,00678	-0,3	0,00980	-0,2	0,00611	-0,1
+ 15,0	0,00677	-0,4	0,00979	-0,3	0,00611	-0,2
+ 20,0	0,00676	-0,5	0,00978	-0,3	0,00610	-0,3

Os valores previstos das respostas umidades do sólido (M) e do ar (W) são muito pouco sensíveis ao variar o parâmetro calor específico do ar (Cp_s), conforme demonstrado nas Tabelas 4.13 e 4.14.

Nas Figuras 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32 são apresentados as distribuições de temperatura do sólido (T_s) e do ar (T_f) em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro Cp_s [$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$] estabelecidos pelo PCC e simulados para os ensaios de mínima e máxima secagem, respectivamente.

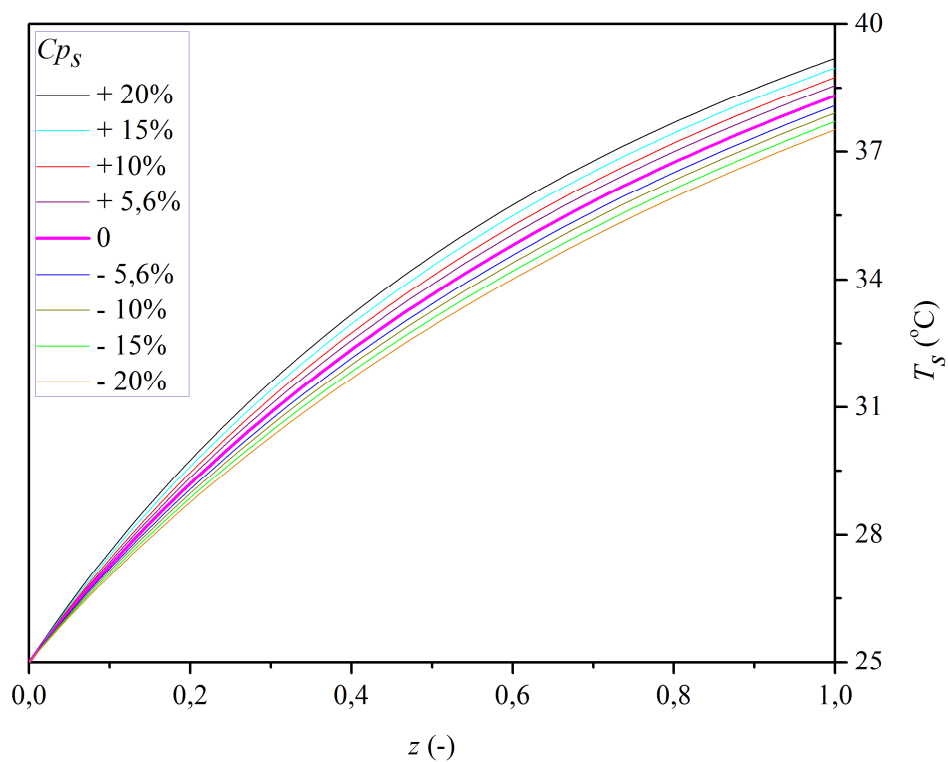


Figura 4.29 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s) para experimento de mínima secagem.

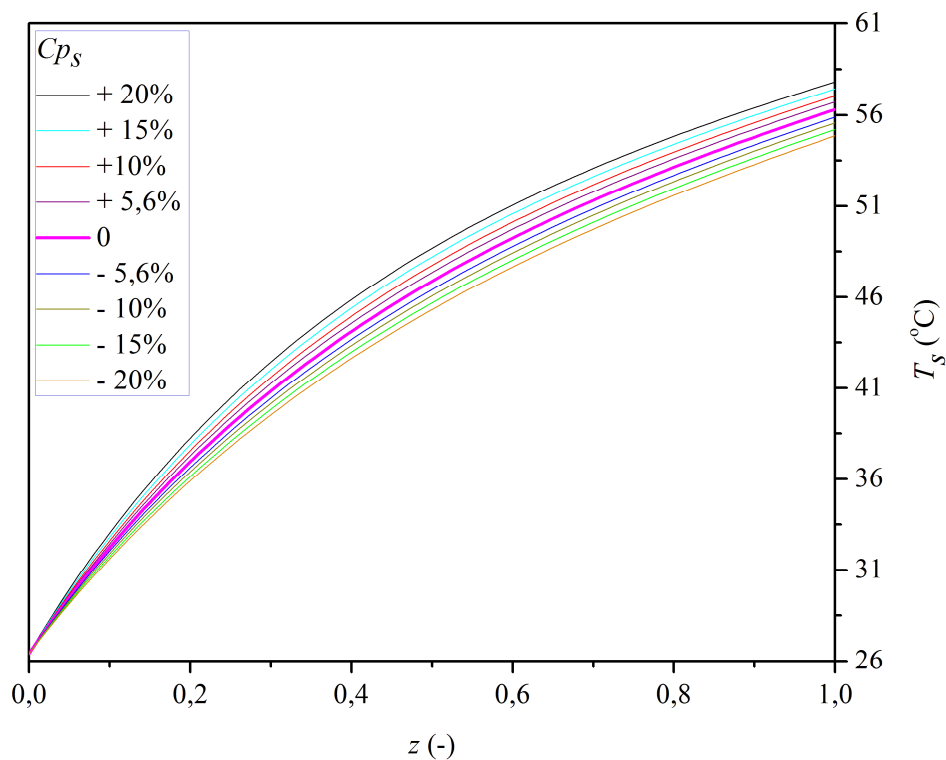


Figura 4.30 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do calor específico do sólido (C_{p_s}) para experimento de máxima secagem.

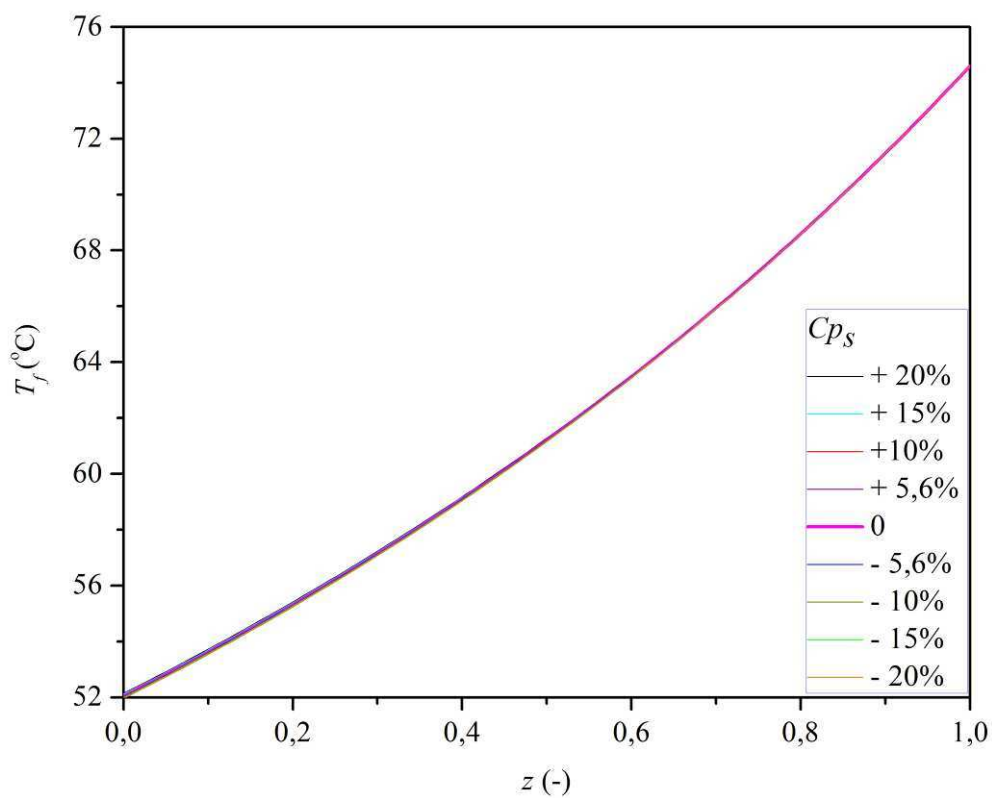


Figura 4.31 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do calor específico do sólido (C_{p_s}) para experimento de mínima secagem.

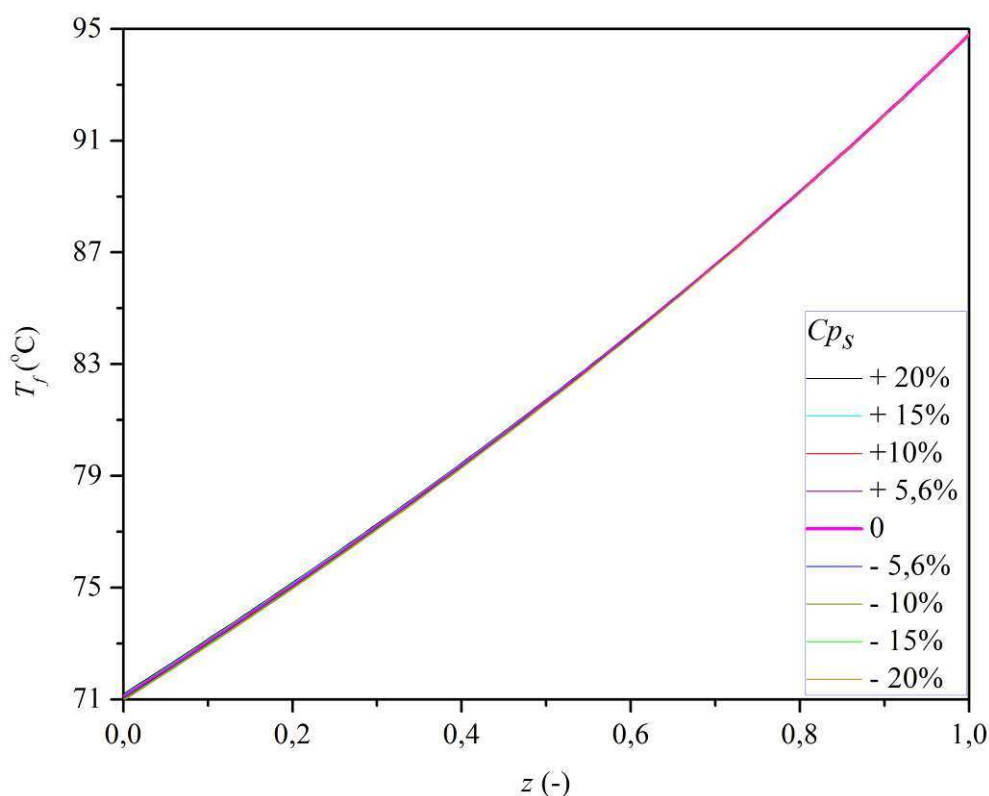


Figura 4.32 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s) para experimento de máxima secagem.

As Tabelas 4.15 e 4.16 apresentam as variações das temperaturas do sólido e do ar, na saída do leito, em relação ao ponto central para os valores de Cp_s para as 3 (três) condições experimentais.

Tabela 4.15 – Variações no parâmetro calor específico do sólido (Cp_s) para a temperatura do sólido (T_s) em $z = 1$.

VARIAÇÃO Cp_s (%)	TEMPERATURA DO SÓLIDO (T_s)					
	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
- 20,0	39,2	2,3	49,0	2,8	57,8	2,7
- 15,0	39,0	1,7	48,7	2,1	57,4	2,0
- 10,0	38,7	1,1	48,4	1,4	57,1	1,3
- 5,6	38,6	0,6	48,1	0,8	56,7	0,7
0,0	38,3	0,0	47,7	0,0	56,3	0,0
+ 5,6	38,1	-0,6	47,4	-0,7	55,9	-0,7
+ 10,0	37,9	-1,1	47,1	-1,3	55,6	-1,3
+ 15,0	37,7	-1,6	46,8	-2,0	55,2	-1,9
+ 20,0	37,5	-2,1	46,5	-2,6	54,9	-2,6

Tabela 4.16 – Variações no parâmetro calor específico do sólido (Cp_s) para a temperatura do ar (T_f) em $z = 0$.

VARIAÇÃO Cp_s (%)	TEMPERATURA DO AR (T_f)					
	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
- 20,0	52,1	0,2	62,6	0,2	71,2	0,2
- 15,0	52,1	0,1	62,6	0,1	71,2	0,1
- 10,0	52,1	0,1	62,5	0,1	71,1	0,1
- 5,6	52,1	0,0	62,5	0,0	71,1	0,0
0,0	52,0	0,0	62,5	0,0	71,1	0,0
+ 5,6	52,0	0,0	62,5	0,0	71,0	0,0
+ 10,0	52,0	-0,1	62,4	-0,1	71,0	-0,1
+ 15,0	52,0	-0,1	62,4	-0,1	71,0	-0,1
+ 20,0	52,0	-0,2	62,4	-0,2	71,0	-0,2

Na Tabela 4.15 observam-se variações de até 2,8% para o valor previsto da resposta temperatura do sólido, entretanto, para os valores da resposta temperatura do ar com a variação no parâmetro taxa de secagem (R_w) nota-se que são pouco sensíveis como mostra os resultados da Tabela 4.16.

4.1.5 – Variação do Parâmetro Calor Específico do Ar (Cp_f)

Nas Figuras 4.33, 4.34, 4.35 e 4.36 são apresentados as distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W) em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro Cp_f [$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$] estabelecidos pelo planejamento experimental e simulados para as condições experimentais de mínima e máxima secagem, respectivamente.

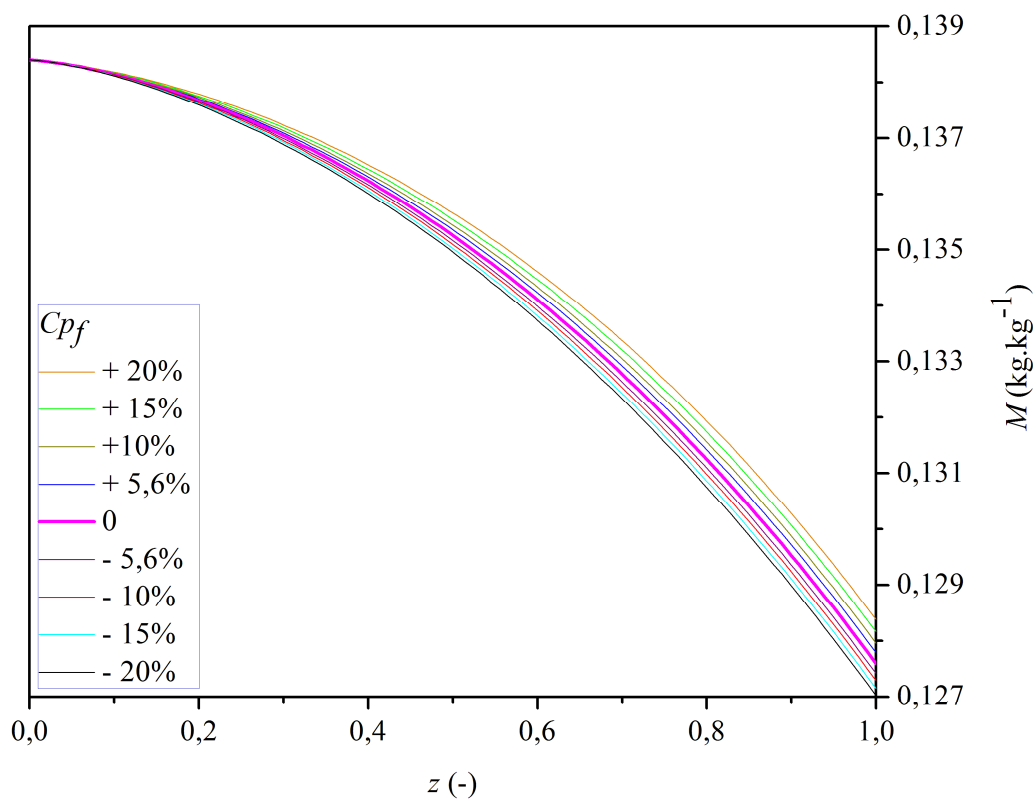


Figura 4.33 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do calor específico do ar (C_{pf}) para experimento de mínima secagem.

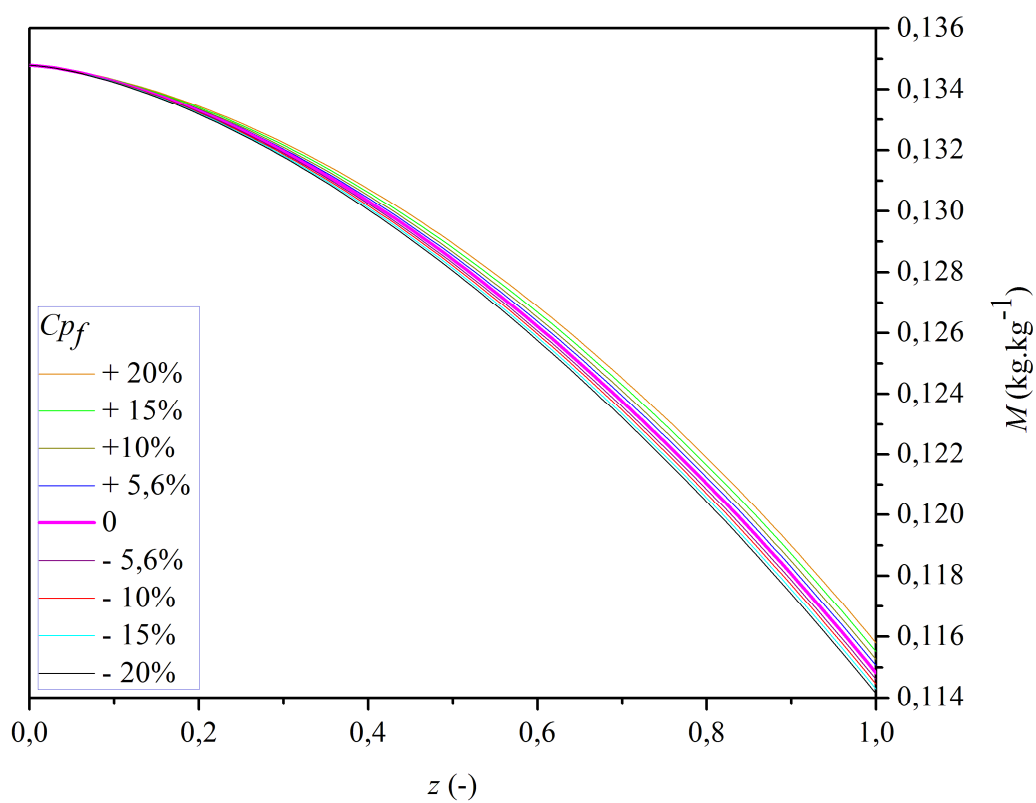


Figura 4.34 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do calor específico do ar (C_{pf}) para experimento de máxima secagem.

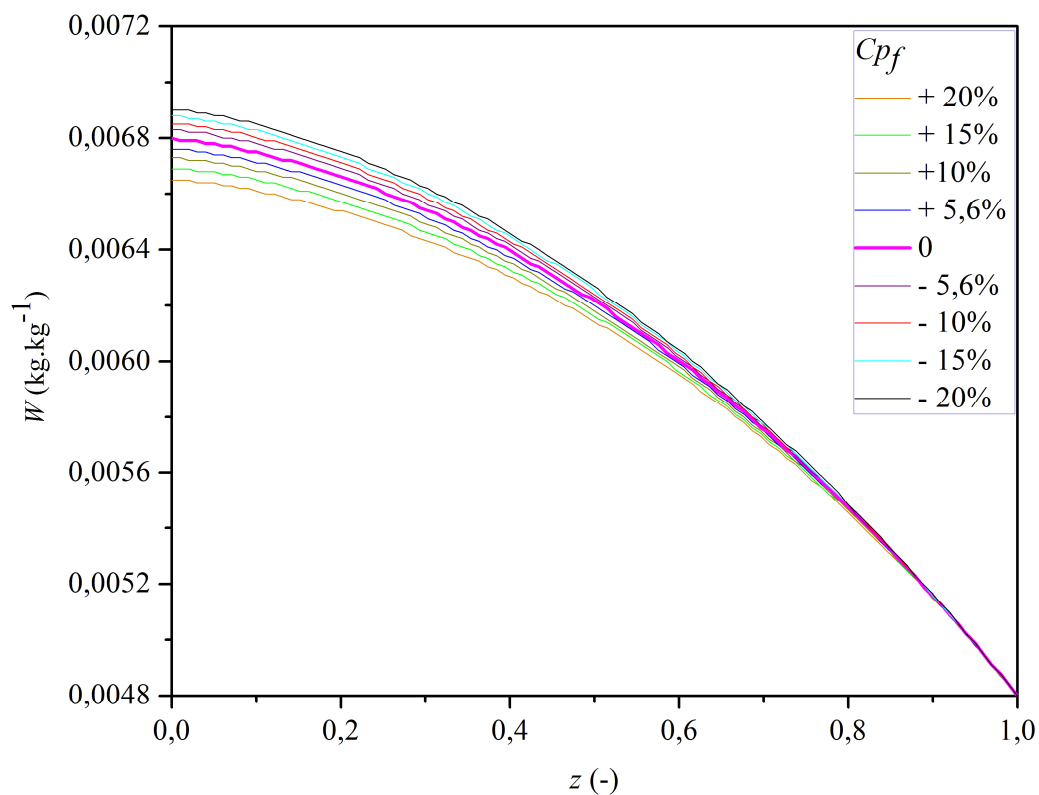


Figura 4.35 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do calor específico do ar (C_{p_f}) para experimento de mínima secagem.

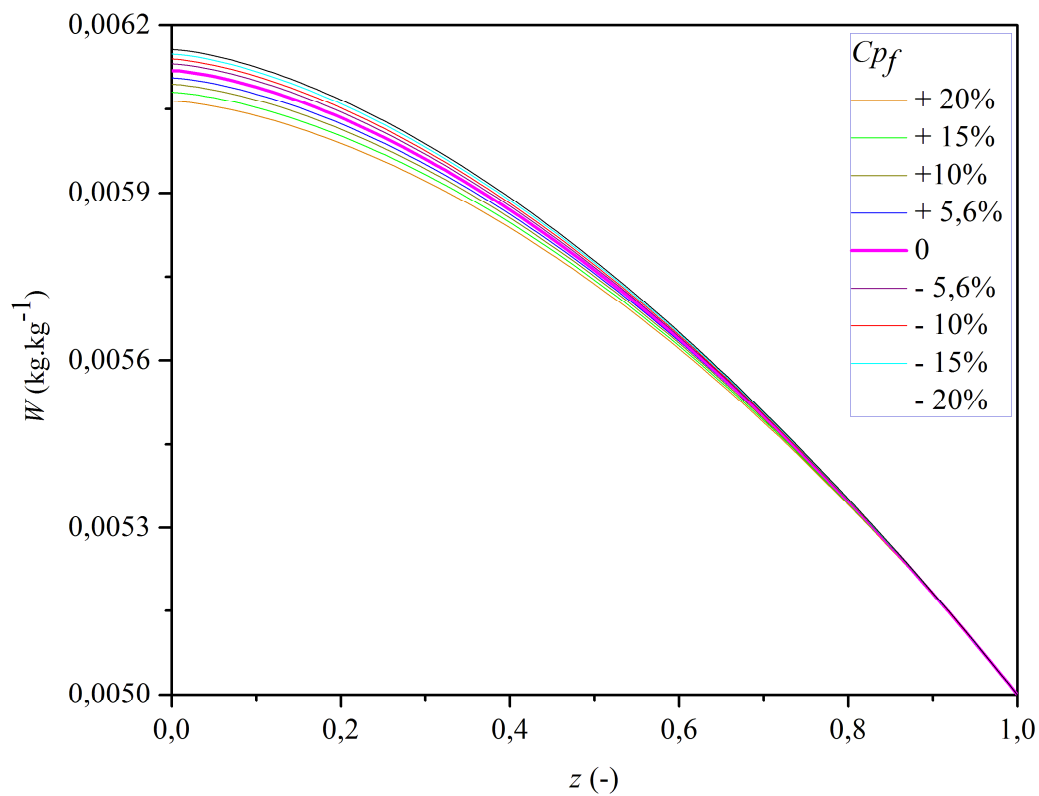


Figura 4.36 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do calor específico do ar (C_{p_f}) para experimento de máxima secagem.

As Tabelas 4.17 e 4.18 apresentam as variações das umidades do sólido e do ar, na saída do leito, em relação ao ponto central para os valores de Cp_f para as 3 (três) condições experimentais estudadas.

Tabela 4.17 – Variações no parâmetro calor específico do ar (Cp_f) para a umidade do sólido (M) em $z = 1$.

UMIDADE DO SÓLIDO (M)						
VARIAÇÃO Cp_f (%)	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)
- 20,0	0,1284	0,6	0,1245	0,7	0,1158	0,8
- 15,0	0,1282	0,4	0,1243	0,5	0,1155	0,6
- 10,0	0,1280	0,3	0,1241	0,3	0,1153	0,4
- 5,6	0,1278	0,2	0,1239	0,2	0,1151	0,2
0,0	0,1276	0,0	0,1237	0,0	0,1148	0,0
+ 5,6	0,1274	-0,1	0,1235	-0,1	0,1146	-0,2
+ 10,0	0,1273	-0,2	0,1234	-0,3	0,1145	-0,3
+ 15,0	0,1271	-0,3	0,1233	-0,4	0,1143	-0,5
+ 20,0	0,1270	-0,4	0,1231	-0,5	0,1141	-0,6

Tabela 4.18 – Variações no parâmetro calor específico do ar (Cp_f) para a umidade do ar (W) em $z = 0$.

UMIDADE DO AR (W)						
VARIAÇÃO Cp_f (%)	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)
- 20,0	0,00665	-2,1	0,00974	-0,8	0,00606	-0,9
- 15,0	0,00669	-1,5	0,00976	-0,6	0,00608	-0,6
- 10,0	0,00673	-1,0	0,00978	-0,4	0,00609	-0,4
- 5,6	0,00676	-0,5	0,00980	-0,2	0,00611	-0,2
0,0	0,00680	0,0	0,00982	0,0	0,00612	0,0
+ 5,6	0,00683	0,5	0,00983	0,2	0,00613	0,2
+ 10,0	0,00685	0,8	0,00985	0,3	0,00614	0,3
+ 15,0	0,00688	1,2	0,00986	0,4	0,00615	0,5
+ 20,0	0,00690	1,6	0,00987	0,6	0,00616	0,6

Nas Tabelas 4.17 e 4.18, observam-se que os valores previstos das respostas temperaturas do sólido e do ar se mostraram com pouca sensibilidade em relação às variações no parâmetro calor específico do ar, próximas à precisão da medida ($0,0001 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$).

As Figuras 4.37, 4.38, 4.39 e 4.40 apresentam as distribuições de temperatura do sólido (T_s) e do ar (T_f) em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro Cp_f [$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$].

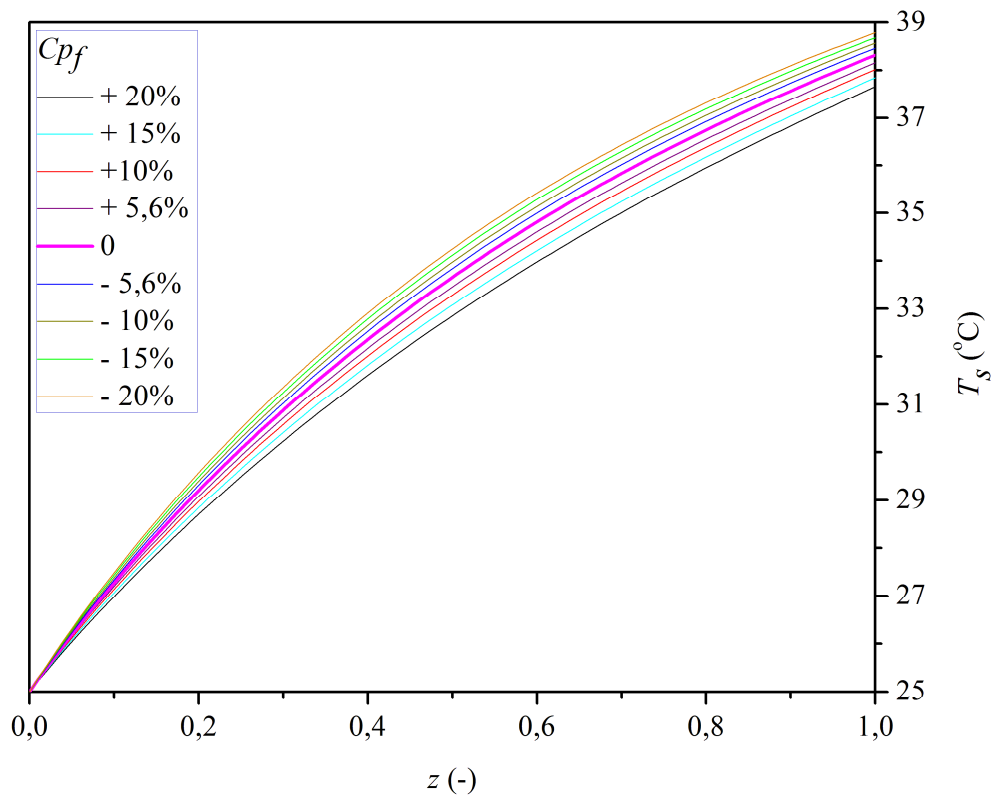


Figura 4.37 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do calor específico do ar (Cp_f) para experimento de mínima secagem.

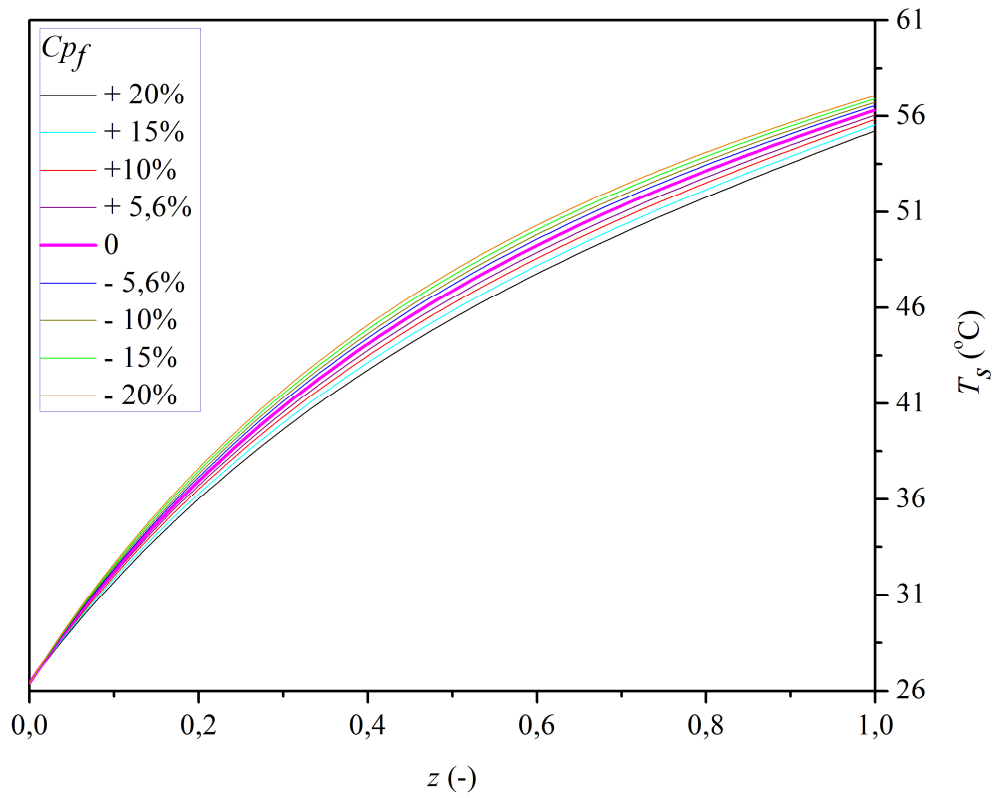


Figura 4.38 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do calor específico do ar (C_{pf}) para experimento de máxima secagem.

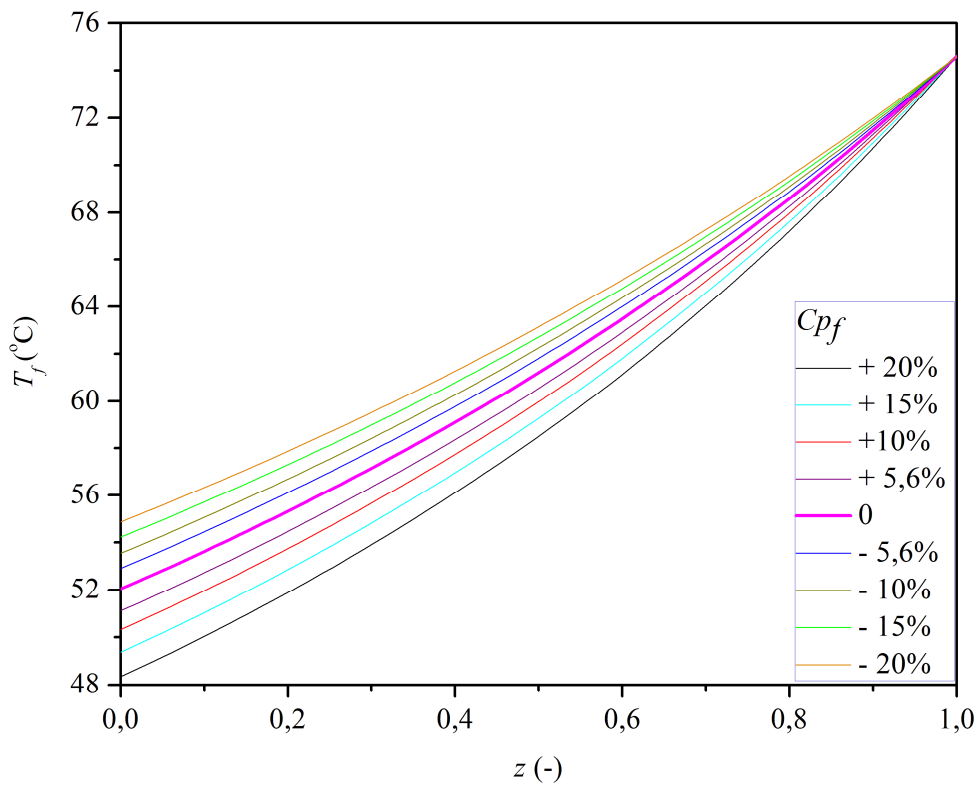


Figura 4.39 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do calor específico do ar (C_{pf}) para experimento de mínima secagem.

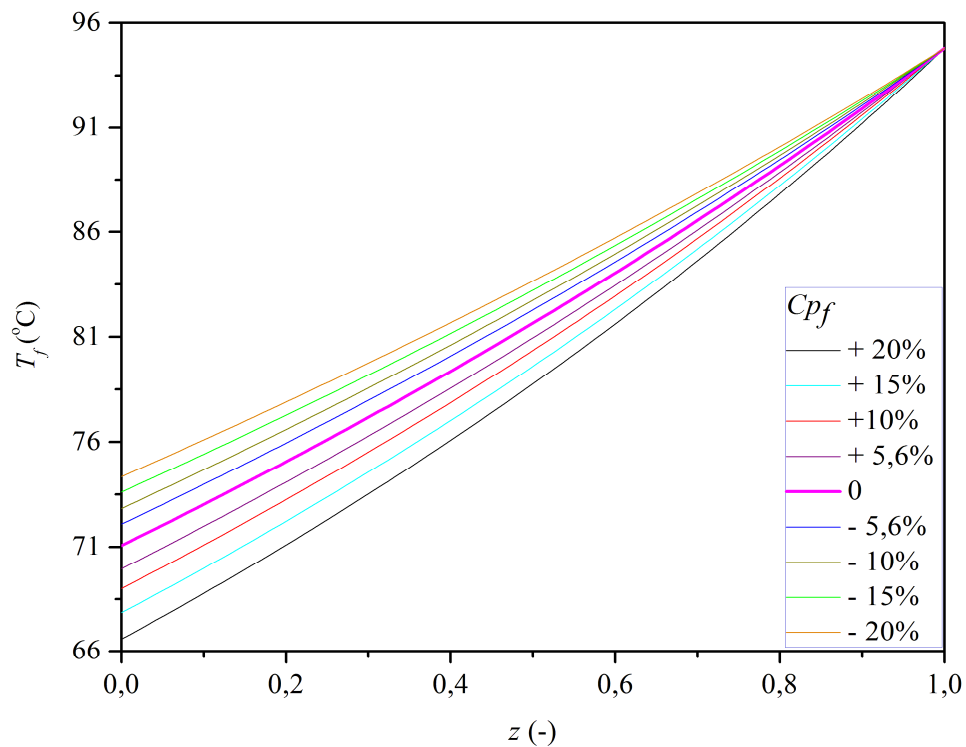


Figura 4.40 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do calor específico do ar (Cp_f) para experimento de máxima secagem.

As variações das umidades do sólido e do ar, na saída do leito, em relação ao ponto central para os valores de Cp_f para as 3 (três) condições experimentais estudadas são demonstrados nas Tabelas 4.19 e 4.20.

Tabela 4.19 – Variações no parâmetro calor específico do ar (Cp_f) para a temperatura do sólido (T_s) em $z = 1$.

TEMPERATURA DO SÓLIDO (T_s)						
VARIAÇÃO Cp_f (%)	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
- 20,0	37,7	-1,7	46,9	-1,8	55,2	-1,9
- 15,0	37,8	-1,2	47,1	-1,3	55,5	-1,4
- 10,0	38,0	-0,8	47,3	-0,8	55,8	-0,9
- 5,6	38,2	-0,4	47,5	-0,4	56,0	-0,5
0,0	38,3	0,0	47,7	0,0	56,3	0,0
+ 5,6	38,5	0,4	47,9	0,4	56,5	0,4
+ 10,0	38,6	0,7	48,0	0,7	56,7	0,7
+ 15,0	38,7	1,0	48,2	1,0	56,9	1,0
+ 20,0	38,8	1,2	48,3	1,3	57,1	1,3

Tabela 4.20 – Variações no parâmetro calor específico do ar (Cp_f) para a temperatura do ar (T_f) em $z = 0$.

VARIAÇÃO Cp_f (%)	TEMPERATURA DO AR (T_f)					
	Mínima Secagem		Ponto Central		Máxima Secagem	
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
- 20,0	48,3	-7,1	58,4	-6,5	66,6	-6,3
- 15,0	49,4	-5,1	59,6	-4,7	67,8	-4,5
- 10,0	50,3	-3,3	60,6	-3,0	69,0	-2,9
- 5,6	51,1	-1,8	61,5	-1,6	70,0	-1,6
0,0	52,0	0,0	62,5	0,0	71,1	0,0
+ 5,6	52,9	1,7	63,4	1,5	72,1	1,4
+ 10,0	53,6	2,9	64,1	2,6	72,8	2,5
+ 15,0	54,2	4,2	64,8	3,7	73,6	3,6
+ 20,0	54,9	5,4	65,5	4,8	74,4	4,6

A Tabela 4.19 mostra que os valores observados para a temperatura do sólido em relação à variação no parâmetro do calor específico do ar (Cp_f) são superiores à precisão da medida, porém ainda são valores de pequena intensidade. Porém a Tabela 4.20 demonstra oscilações de até 7,1% para os valores preditos da resposta temperatura do ar em relação à variação no parâmetro Cp_f . Logo, em relação a temperatura de saída, a variação do calor específico do ar (Cp_f) é mais significativa para a temperatura do ar (T_f).

4.2 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS RESPOSTAS SIMULADAS

A análise estatística dos resultados obtidos pelas simulações feitas conforme PCC foi realizada no *software Statistica* (STATSOFT, 2007) efetuando-se uma análise de variância para cada uma das respostas. Os parâmetros com nível de significância do teste t de *Student* superior a 5% foram desprezados e considerados não relevantes.

A Tabela 4.21 mostra somente os coeficientes de intercepção e os coeficientes relacionados aos parâmetros (U_{va} , U_p , R_w , Cp_s , Cp_f) isolados (lineares) dos resultados da análise de variância que influenciaram de forma significativa a umidade e temperatura do fertilizante SSPG (M e T_s) e do ar (W e T_f) na saída do secador de fluxo contracorrente.

Tabela 4.21 – Análise de variância para as respostas simuladas conforme PCC para o ensaio do ponto central de secagem feito por ARRUDA (2008).

PARÂMETROS / COEFICIENTES	RESPOSTAS			
	M [kg.kg ⁻¹]	W [kg.kg ⁻¹]	T_s [°C]	T_f [°C]
Intercepção	0,1237	0,00982	47,72	62,50
U_{va} (L)	-0,0002	0,00002	1,17	-0,22
U_p (L)	0,0001	-0,00001	-0,12	-0,56
R_w (L)	-0,0006	0,00006	-0,69	-0,16
Cp_s (L)	0,0001	-0,00001	-0,36	-0,03
Cp_f (L)	-0,0002	0,00002	0,20	0,97

Apesar da Tabela 4.21 ter mostrado somente os coeficientes relacionados aos parâmetros isolados, a análise estatística considerou todos os coeficientes significativos sendo eles quadráticos, lineares e de interações conforme demonstrado no Apêndice III.

Para a umidade do sólido M [kg.kg⁻¹], o coeficiente linear relacionado ao parâmetro taxa de secagem do material (R_w) isolado é negativo (– 0,0006) o que indica que a umidade do sólido cairá se a taxa de secagem do material aumentar, como era de esperar para um processo de secagem. A ordem de grandeza para o coeficiente linear relacionado ao parâmetro taxa de secagem do material (R_w) é 3 (três) vezes maior que os coeficientes lineares relacionados aos parâmetros isolados coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) e calor específico do ar (Cp_f) com valores também negativos (– 0,0002), indicando que a umidade do sólido tem uma maior sensibilidade ao parâmetro taxa de secagem.

Resultado análogo também foi observado para a umidade do ar W [kg.kg⁻¹]. O coeficiente linear relacionado ao parâmetro taxa de secagem do material (R_w) isolado é positivo (0,00006) o que indica, como esperado, que a umidade do ar aumentará se a taxa de secagem do material aumentar. Os coeficientes lineares relacionados aos parâmetros coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) e calor específico do ar (Cp_f) isolados também são positivos, com ordem de grandeza também de 3 (três) vezes menores que o coeficiente linear isolado relacionado à taxa de secagem do material (R_w).

Para a temperatura do sólido T_s [$^{\circ}\text{C}$], o coeficiente linear relacionado ao parâmetro coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) isolado é positivo (1,17) o que indica, como esperado, que a temperatura do sólido aumentará se o coeficiente global volumétrico de transferência de calor aumentar. Os coeficientes lineares relacionados aos parâmetros taxa de secagem do material (R_w) e calor específico do sólido (Cp_s) isolados são negativos ($-0,69$ e $-0,36$) com ordem de grandeza de 2 (duas) e 3 (três) vezes menores que o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}), respectivamente.

Para a temperatura do ar T_f [$^{\circ}\text{C}$], o coeficiente linear relacionado ao parâmetro calor específico do ar (Cp_f) isolado é positivo (0,97), indicando a esperada diminuição da temperatura do ar com a diminuição do calor específico do ar. Os coeficientes lineares relacionados aos parâmetros coeficiente de calor perdido (U_p) e coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) isolados são negativos ($-0,56$ e $-0,22$) com ordem de grandeza de 2 (duas) e 4 (três) vezes menores que o calor específico do ar (Cp_f), respectivamente.

As Equações 4.1 a 4.5 apresentam as formas adimensionais dos parâmetros que tiveram a sua sensibilidade estudada.

$$x_1 = \frac{U_{va} - U_{va}(0)}{(U_{va}(1) - U_{va}(-1))/2} \quad (4.1)$$

$$x_2 = \frac{U_p - U_p(0)}{(U_p(1) - U_p(-1))/2} \quad (4.2)$$

$$x_3 = \frac{R_w - R_w(0)}{(R_w(1) - R_w(-1))/2} \quad (4.3)$$

$$x_4 = \frac{Cp_s - Cp_s(0)}{(Cp_s(1) - Cp_s(-1))/2} = \frac{Cp_s - 1,02577}{(1,08321 - 0,96833)/2} = \frac{Cp_s - 1,02577}{0,05744} \quad (4.4)$$

$$x_5 = \frac{Cp_f - Cp_f(0)}{(Cp_f(1) - Cp_f(-1))/2} = \frac{Cp_f - 1,0}{0,056} \quad (4.5)$$

sendo U_{va} expresso em ($\text{kW.m}^{-3}.\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$); U_p em ($\text{kW.m}^{-2}.\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$); R_w em (s^{-1}); Cp_s e Cp_f em ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Para cálculo de U_{va} , U_p e R_w foram utilizadas as Equações (3.8), (3.9) e (3.11) demonstradas no Capítulo 3.

Os valores referentes aos níveis -1 e +1 foram escolhidos de forma que a diferença entre os valores extremos do intervalo e o valor original não ultrapassasse 10% e foram apresentados na Tabela 3.3 conforme planejamento experimental do tipo composto central (PCC) ortogonal elaborado no presente trabalho.

As Equações (4.6) a (4.9) representam as formas matriciais das equações ajustadas para as umidades e temperaturas, do sólido e ar (M, W, T_s e T_f) respectivamente, como funções dos parâmetros de secagem adimensionais, isto é, coeficiente global volumétrico de transferência de calor (x_1), coeficiente de calor perdido (x_2), taxa de secagem do material (x_3), calor específico do sólido (x_4) e calor específico do ar (x_5). Nestas equações estão presentes além dos efeitos isolados, analisados anteriormente, também os efeitos de interações e os termos quadráticos significativos. Para todas as equações ajustadas, o valor de r^2 foi de 0,999.

$$M = 0,1237 + \underline{x}_1' \underline{b}_1 + \underline{x}_1' \underline{B}_1 \underline{x}_1 \quad (4.6)$$

$$\text{na qual } \underline{x}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}; \quad \underline{b}_1 = \begin{bmatrix} -0,000200 \\ +0,000109 \\ -0,000644 \\ +0,000100 \\ -0,000191 \end{bmatrix};$$

$$\underline{B}_1 = \begin{bmatrix} +0,000007 & +0,000001 & -0,000006 & +0,0000005 & -0,00000025 \\ +0,000001 & -0,000001 & +0,0000025 & -0,0000005 & -0,000002 \\ -0,000006 & +0,0000025 & +0,000007 & +0,0000015 & -0,0000055 \\ +0,0000005 & -0,0000005 & +0,0000015 & -0,000002 & +0,0000005 \\ -0,00000025 & -0,000002 & -0,0000055 & +0,0000005 & +0,000009 \end{bmatrix}.$$

$$W = 0,009816 + \underline{x}_1' \underline{b}_1 + \underline{x}_1' \underline{B}_1 \underline{x}_1 \quad (4.7)$$

$$\text{na qual } \underline{x}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}; \quad \underline{b}_1 = \begin{bmatrix} +0,0000191 \\ -0,0000104 \\ +0,0000616 \\ -0,0000095 \\ +0,0000182 \end{bmatrix};$$

$$\underline{B}_1 = \begin{bmatrix} -0,0000006 & -0,0000001 & +0,0000006 & -0,00000005 & +0,00000025 \\ -0,0000001 & +0,0000001 & -0,00000025 & +0,00000005 & +0,0000002 \\ +0,0000006 & -0,00000025 & -0,0000006 & 0,00000015 & +0,0000005 \\ -0,00000005 & +0,00000005 & 0,00000015 & +0,0000001 & -0,00000005 \\ +0,00000025 & +0,0000002 & +0,0000005 & -0,00000005 & -0,0000009 \end{bmatrix}.$$

$$T_s = 47,72 + \underline{x}_1' \underline{b}_1 + \underline{x}_1' \underline{B}_1 \underline{x}_1 \quad (4.8)$$

$$\text{na qual } \underline{x}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}; \quad \underline{b}_1 = \begin{bmatrix} +1,16796 \\ -0,11462 \\ -0,69211 \\ -0,36060 \\ +0,20112 \end{bmatrix};$$

$$\underline{B}_1 = \begin{bmatrix} -0,02749 & -0,00233 & -0,00063 & -0,00478 & +0,005125 \\ -0,00233 & 0 & +0,002335 & 0 & +0,002275 \\ -0,00063 & +0,002335 & +0,00611 & +0,009325 & -0,002925 \\ -0,00478 & 0 & +0,009325 & +0,00360 & 0 \\ +0,005125 & +0,002275 & -0,002925 & 0 & -0,00965 \end{bmatrix}.$$

$$T_f = 62,49 + \underline{x}_1' \underline{b}_1 + \underline{x}_1' \underline{B}_1 \underline{x}_1 \quad (4.9)$$

$$\text{na qual } \underline{x}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}; \quad \underline{b}_1 = \begin{bmatrix} -0,22210 \\ -0,55773 \\ -0,15692 \\ -0,02919 \\ +0,97360 \end{bmatrix};$$

$$\underline{B}_1 = \begin{bmatrix} +0,00607 & +0,00145 & -0,001875 & -0,001955 & +0,00367 \\ +0,00145 & +0,00444 & +0,001465 & 0 & +0,01581 \\ -0,001875 & +0,001465 & +0,00151 & +0,000965 & +0,001825 \\ -0,001955 & 0 & +0,000965 & 0 & 0 \\ +0,00367 & +0,01581 & +0,001825 & 0 & -0,04108 \end{bmatrix}.$$

A partir destas equações, superfícies de resposta foram geradas para as respostas umidade e temperatura do fertilizante SSPG (M e T_s) e do ar (W e T_f) em função dos coeficientes mais relevantes, mostrados na Tabela 4.21 considerando todos os outros coeficientes no nível central do PCC, conforme Tabela 3.3.

As Figura 4.41 e 4.42 mostram as superfícies de resposta da umidade do sólido (M) e do ar (W) em função do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) e da taxa de secagem do material (R_w)

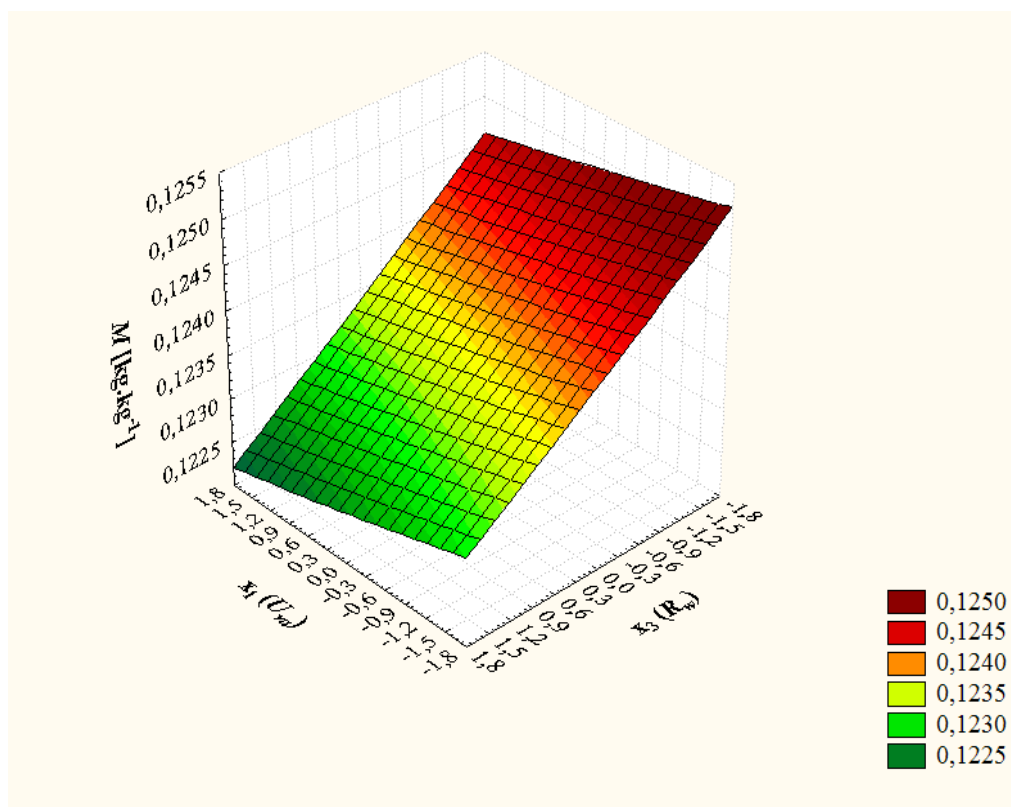


Figura 4.41 – Superfície de resposta da umidade do sólido (M) com a taxa de secagem do material (R_w) e o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}).

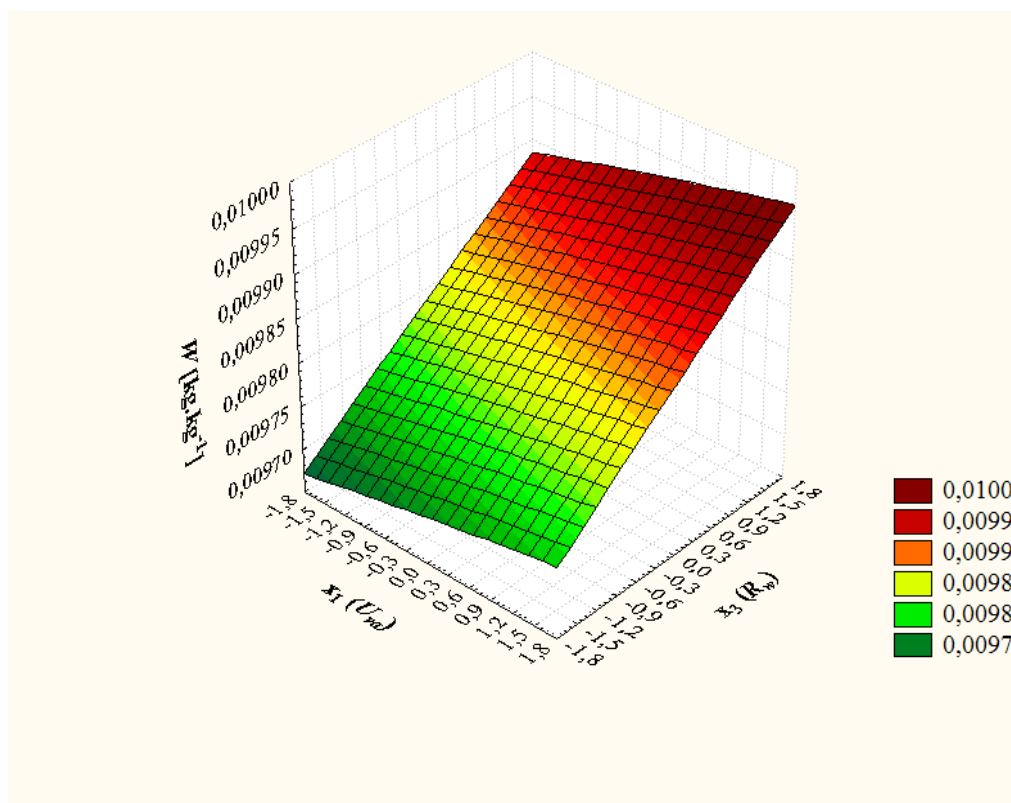


Figura 4.42 – Superfície de resposta da umidade do ar (W) com a taxa de secagem do material (R_w) e o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}).

Como a secagem do sólido se faz através do ar quente, uma diminuição da umidade do sólido gera um aumento da umidade do ar e observa-se na Figura 4.42 que isto ocorre, como esperado, com uma maior intensidade da influência da taxa secagem do que com o coeficiente global volumétrico de transferência de calor.

A superfície de resposta da temperatura do sólido (T_s) em função do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) e da taxa de secagem do material (R_w) é apresentada na Figura 4.43.

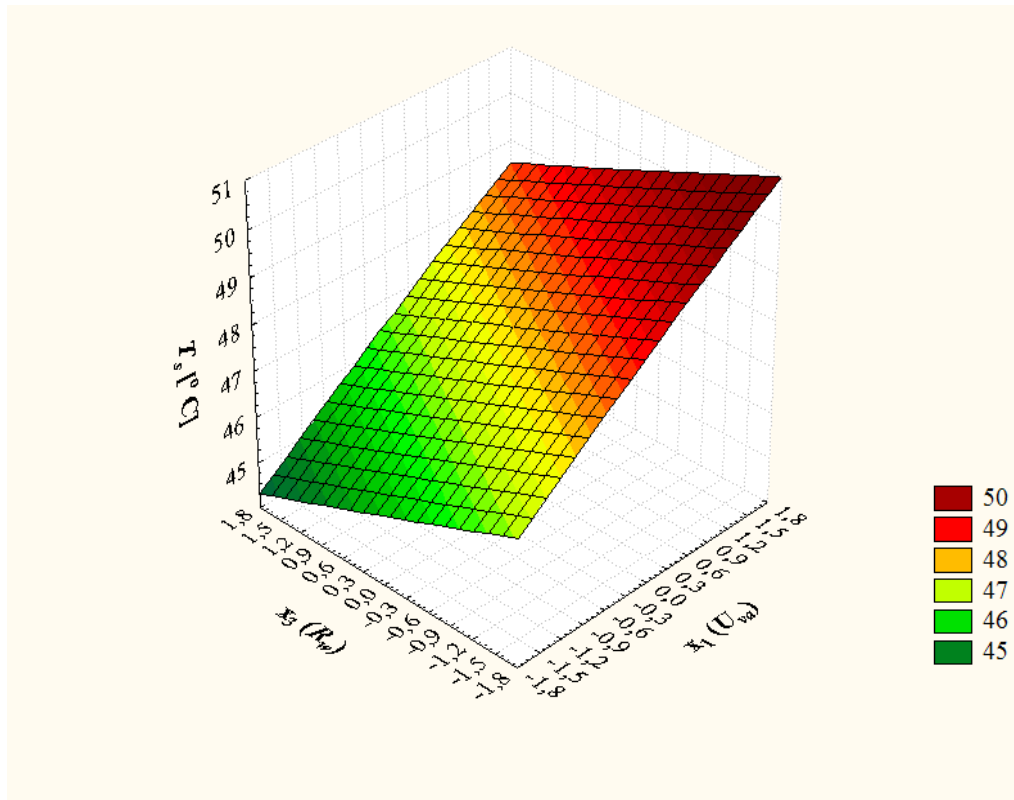


Figura 4.43 – Superfície de resposta da temperatura do sólido (T_s) com a taxa de secagem do material (R_w) e o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}).

Como o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) é o parâmetro relacionado à transferência de calor, observa-se na Figura 4.43 uma maior intensidade do efeito deste parâmetro na variação da temperatura do sólido. Como afirmado anteriormente, em superfícies deste tipo é possível quantificar o efeito da variação destes significativos parâmetros na temperatura do sólido.

A Figura 4.44 mostra a superfície de resposta para a temperatura do sólido (T_s) com o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) e o calor específico do sólido (Cp_s).

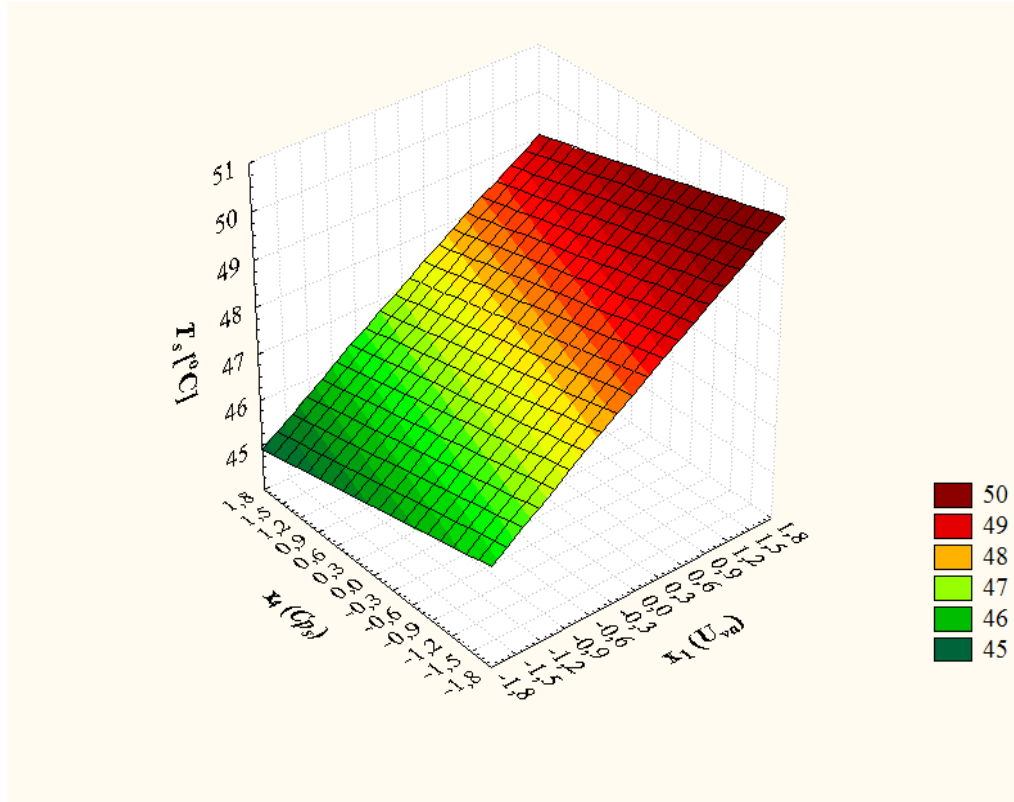


Figura 4.44 – Superfície de resposta da temperatura do sólido (T_s) com o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) e o calor específico do sólido (Cp_s).

Também é possível visualizar nesta figura uma maior intensidade da influência do coeficiente global volumétrico de transferência de calor em relação ao calor específico do sólido.

Na Figura 4.45 visualiza-se a superfície de resposta para a temperatura do ar (T_f) em função do calor específico do ar (Cp_f) e do coeficiente de calor perdido (U_p).

Nesta figura observa-se uma diminuição da temperatura do ar com maior intensidade devido à influência da diminuição do calor específico do ar. O aumento do coeficiente de calor perdido, indicando a energia desperdiçada, também afeta consideravelmente o valor da temperatura do ar. A quantificação destes efeitos é muito importante em um estudo de secagem.

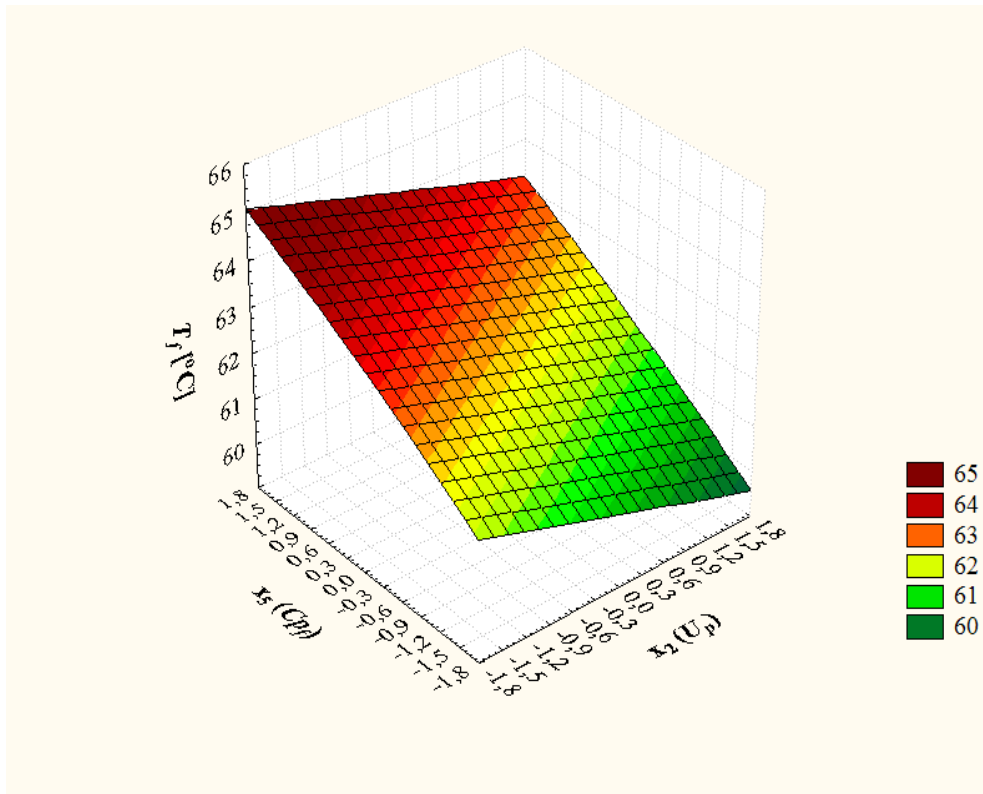


Figura 4.45 – Superfície de resposta da temperatura do ar (T_f) com o calor específico do ar (C_{p_f}) e o coeficiente de calor perdido (U_p).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho teve como objetivo realizar o estudo de sensibilidade paramétrica por planejamento de experimentos na modelagem da secagem de fertilizantes em secador rotatório.

Com base nas análises de variância para as respostas umidade e temperatura do fertilizante SSPG (M e T_s) e do ar (W e T_f) na saída do secador de fluxo contracorrente, foi determinado que todos os parâmetros analisados foram significativos e afetam o modelo da secagem de fertilizantes em secador rotatório.

Os parâmetros analisados foram coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}), coeficiente de calor perdido (U_p), taxa de secagem do material (R_w), calor específico do sólido (Cp_s) e calor específico do ar (Cp_f). Esta análise foi realizada nas previsões das seguintes respostas simuladas, umidades (M e W) e temperaturas (T_s e T_f) do sólido e do ar obtidas pelo modelo do secador rotatório contracorrente aplicado à secagem de fertilizantes. Para todos os parâmetros, a probabilidade de erro do teste de hipótese máxima adotada foi de 5%.

Avaliando as distribuições das respostas simuladas para as variações dos parâmetros estudados e as superfícies de resposta, determinou-se que os 3 (três) parâmetros mais significativos (em ordem decrescente) para cada resposta são:

- $M \rightarrow R_w$ e com mesma importância (U_{va} e Cp_f);
- $W \rightarrow R_w$ e com mesma importância (U_{va} e Cp_f);
- $T_s \rightarrow U_{va}, R_w, Cp_s$;
- $T_f \rightarrow Cp_f, U_p, U_{va}$.

Os resultados do presente trabalho mostram que, a hipótese simplificadora de que as propriedades termodinâmicas do material e do ar são constantes ao longo do tambor utilizada no modelo pode prejudicar uma boa aproximação dos dados previstos em relação aos experimentais.

Portanto, conhecendo os parâmetros mais significativos deve-se descrevê-los com grande acurácia em próximos trabalhos, pois trará melhorias significativas à previsibilidade do modelo e irá contribuir para conhecimento mais apurado do processo de secagem

proporcionando um aumento de eficiência em equipamentos já instalados e de precisão no projeto de novos equipamentos.

Como sugestões para trabalhos futuros têm-se:

- Desenvolver estudos específicos sobre os parâmetros de fluidodinâmica para posterior utilização no modelo proposto por ARRUDA (2008), permitindo, assim, uma comparação com os resultados de unidade industrial obtidos no trabalho de FERNANDES (2008);
- Incorporar os parâmetros das propriedades físicas como funções de temperatura e umidade na modelagem do secador rotatório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDA, Associação Nacional para Difusão de Adubos, www.anda.org.br, 2009 e 2010.

ARRUDA, E. B. Comparação do Desempenho do Secador Roto-Fluidizado com o Secador Rotatório Convencional: Secagem de Fertilizantes, Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia/MG, 2008.

ARRUDA, E. B.; FAÇANHA, J. M. F.; PIRES, L. N.; ASSIS, A. J. and BARROZO, M. A. S.. Fluid Dynamics of Cascading Rotary Dryer with Different Flight Configurations. *Mater. Sci. Forum*, v. 591, p. 368, 2008.

ARRUDA, E. B.; FAÇANHA, J. M. F.; PIRES, L. N.; ASSIS, A. J. and BARROZO, M.A.S.. Conventional and modified rotary dryer: Comparison of performance in fertilizer drying. *Chemical Engineering and Process* Accepted, 2009-b. Inpress.

ARRUDA, E. B.; LOBATO, F. S.; ASSIS, A. J. and BARROZO, M. A. S., Modeling of Fertilizer Drying in Roto-Aerated and Conventional Rotary Dryers. *Drying Technology*, Accepted, 2009-a. Inpress.

ARRUDA, E. B., FAÇANHA, J.M.F., PIRES, L.N., ASSIS, A.J., BARROZO, M.A.S. (2006), Estudo da Fluidodinâmica em Secadores Rotatórios com Cascadeamento, Anais (CD-ROM) do XXXII ENEMP, Maringá.

BARROZO, M. A. S., Transferência de Calor e Massa entre o Ar e Sementes de Soja em Leito Deslizante e Escoamentos Cruzados, Tese de Doutorado, UFSCar, São Carlos/SP, 1995.

BARROZO, M. A. S.; MURATA, V. V. Modelagem e simulação da secagem de sementes de soja em leito deslizante com escoamentos concorrentes e contracorrentes. In: *Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*. Uberlândia: [s.n.], 1996. p. 213–220.

BOX, M. J., HUNTER, W. G. e HUNTER, J. S. Statistics for Experimenters, An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building, John Wiley and Sons, New York, 1978.

CRISTO, H. P., Modelagem, Simulação e Projeto de Secadores Rotatórios Diretos, MSc., Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2004.

DAHER, E. Uma Crise de Demanda, DBO Agrotecnologia/IPT, 2008, 27p..

FERNANDES, N. J. Estudo da Fluidodinâmica e de Secagem de um Secador rotatório da Indústria de Fertilizantes. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/MG, 2008.

FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W., MAUS, L., ANDERSEN, L. B., Princípios das Operações Unitárias. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1982. 670p.

FRIEDMAN, S. J., MARSHAL, W. R., Studies in rotary drying, Part. I: Holdup and Dusting. Chemical Engineering Progress, v.45, p. 482-573, 1949-a.

FRIEDMAN, S. J., MARSHAL, W. R., Studies in rotary drying. Part II: Heat and mass transfer. Chemical Engineering Progress, 45(9), 573–588, 1949-b.

IGUAZ, A., ESNOZ, A., MARTINEZ, G., LÓPEZ, A., VÍRSEDA, P., Mathematical Modelling and Simulation for the Drying Process of Vegetable Wholesale by-products in a Rotary Dryer. Journal of Food Engineering 59, p. 151-160, 2003.

KAMKE, F. A. e WILSON, J. B. Computer simulation of a Rotary Dryer – Part II: Heat and Mass Transfer, AIChE Journal, v. 32, p. 269-275, 1986.

KELLY, J. J.; O'DONNELL, J. P. Chemical Engineering Symposium Series, p. 29 - 38, 1968.

KELLY, J. J., O'DONNELL, P. Residence Time Model for Rotary Rums, Trans IchemE, v 55, p. 243-252, 1977.

LI, S., PETZOLD, L. R. Design of new DASPK for Sensitivity Analysis. Santa Barbara, 1999.

LIRA, T. S. Contribuição à Modelagem da Secagem em Leito Deslizante Concorrente, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/MG, 2008.

LISBOA, M. H. Estudo de Secadores Rotatórios na Secagem de Fertilizantes, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/MG, 2005.

- LISBOA, M. H.; VITORINO, D. S.; DELAIBA, W. B.; FINZER, J. R. D. and BARROZO, M. A. S.. A Study of Particle Motion in Rotary Dryer. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 24, p. 365, 2007.
- MALY, T., PETZOLD, L. R., Numerical Methods and Software for Sensitivity Analysis of Differential-algebraic Systems, Applied Numerical Mathematics, 20, p. 57-79, 1996.
- MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, A Força da Agricultura, Brasília/DF, 2009.
- MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Terra Brasil, v.2, p. 62-63, 2009.
- MATCHETT, A. J., BAKER, C. G. J. Particle residence times in Cascading rotary dryers. Part 2: Application of the two-stream model to experimental and industrial data, Journal of Separation Process Technology, v. 9, 1988.
- MUJUMDAR A. S., Handbook of Industrial Drying, 2ª Edição, Volume 1, Department of Chemical Engineering, Mc Gill University, Montreal, Québec, Canada, 1995.
- MURATA, V. V. Caracterização Simbólica de Equações Algébrico-diferenciais por um Sistema de Álgebra Computacional com Aplicações na Engenharia Química, Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 1996.
- MYERS, R. H. Response Surface Methodology. Ann Arbor, Mich.: Edwards Brothers (Distributors), 1976.
- MYSKLESTAD, O. Heat and Mass transfer in rotary dryers. Chemical Engineering Progress, v. 13, p. 129-137, 1963.
- NONHEBEL, M. A. G. MOSS, A. A. H., Drying of Solids in the Chemical Industry. Butterworths, Londres, Inglaterra, p. 301, 1971.
- PAGE, G. E., Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin-Layer. Indiana-USA, Purdue University, 1949. MSc.
- PERRY, R. H., GREEN, D. W., Perry's Chemical Engineers' Handbook. Mac Graw-Hill, 7 th Cd-ROM, Nova York, Estados Unidos, 1999.

- PETZOLD, L., CAO, Y., LI, S., SERBAN, R., Sensitivity Analysis of Differential-Algebraic and Partial Differential Equations. Lake Louise, Alberta, Canada, 2005.
- PORTER, S. J., The design of Rotary Dryers and Coolers, Transport Institute of Chemical Engineering, v. 41, p. 272-287, 1963.
- RANZ, W. E., MARSHALL, W. R., Evaporation from drops, Chemical Engineering Process, v. 48, p. 141-146, 1952.
- SAEMAN, W. C., MITCHELL, T. R. Jr., Analysis of Rotary Dryer and Cooler Performance, Chemical Engineering Progress, v. 50, p. 467-475, 1954.
- SHAMPINE, L. F., Jacek, K., Mark, W. R. et al., Solving Boundary Value Problems for Ordinary Equations in MATLAB with bvp4c, 2000, 27p..
- SILVÉRIO, B. C. Estudo Fluidodinâmico e de Secagem de Fertilizantes em Secadores Rotatórios Concorrentes, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/MG, 2010.
- VILLADSEN, J., MICHELSEN, M. L., Solution of Differential Equation Models by Polynomial Approximation, Instituttet for Kemiteknik, Denmark, 1978.
- WANG, F. Y., CAMERON, I. T, LITSTER, J. D., DOUGLAS, P. L., A Distributed Parameter Approach to the Dynamics of Rotary Drying Processes, Drying Technology, v. 11 (7), p. 1641-1656, 1993.

**APÊNDICE I – DISTRIBUIÇÕES DAS RESPOSTAS SIMULADAS PARA A
CORRIDA CENTRAL DE SECAGEM**

Variação do Parâmetro Coeficiente Global Volumétrico de Transferência de Calor (U_{va})

As Figuras AP1.1 e AP1.2 apresentam as distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W), respectivamente, em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) [$\text{kW.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}$] estabelecidos pelo planejamento experimental e simulados para as condições experimentais, feitas por ARRUDA (2008), para a corrida de secagem central.

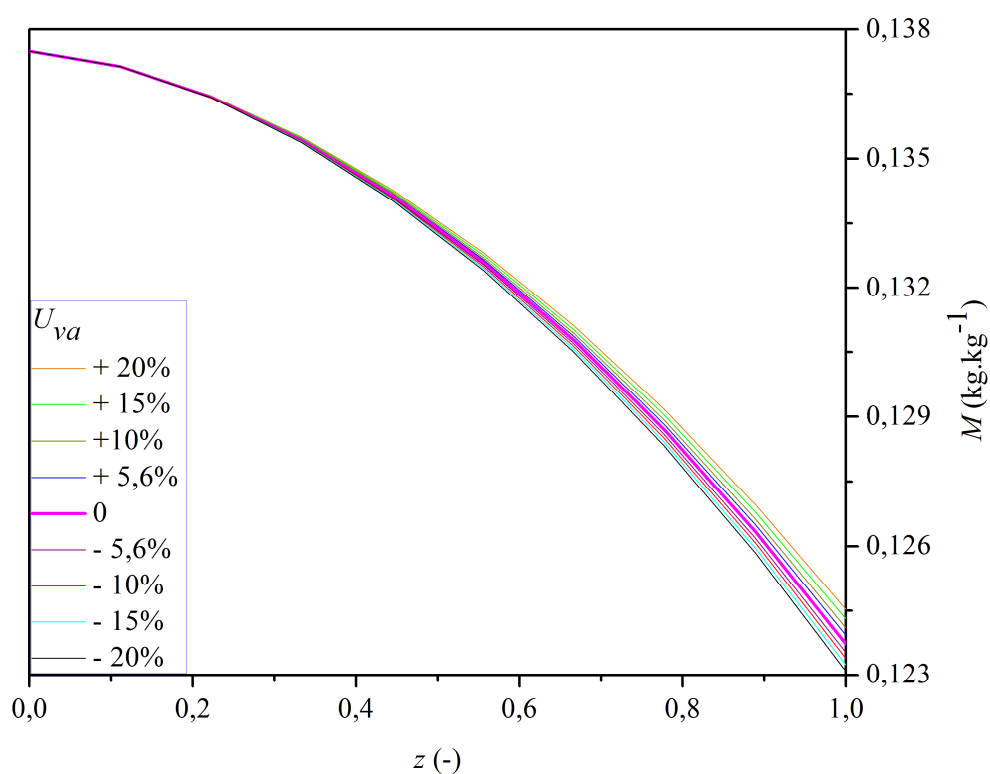


Figura AP1.1 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}).

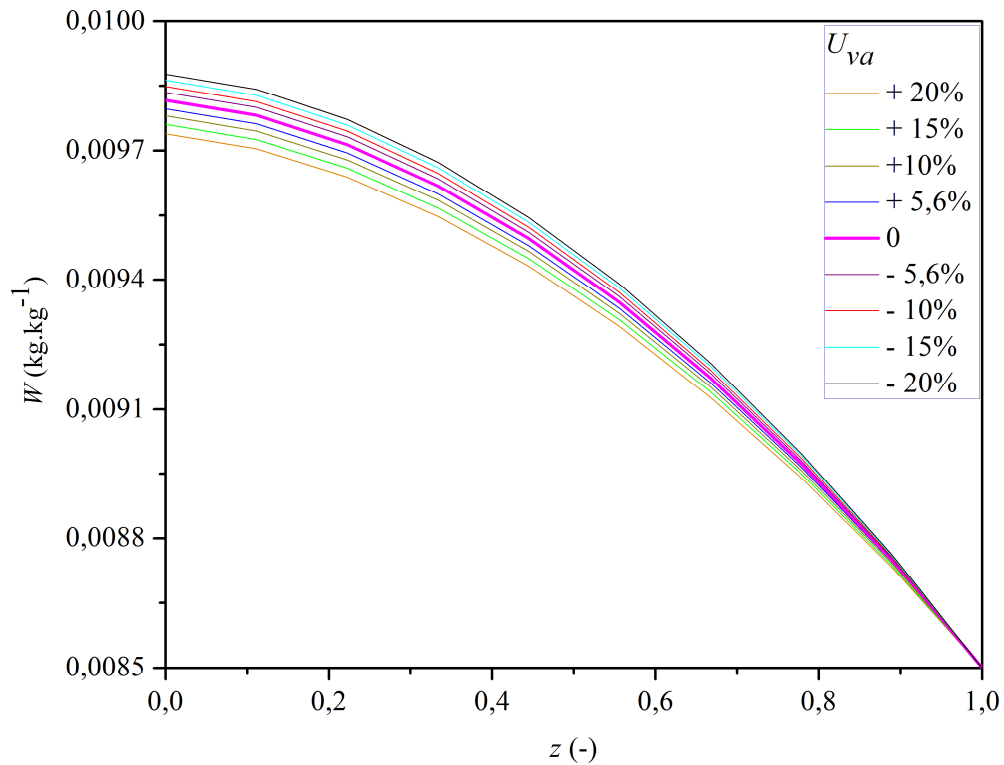


Figura AP1.2 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}).

As Figuras AP1.3 e AP1.4 apresentam as distribuições de temperatura do sólido (T_s) e do ar (T_f), respectivamente, em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) [$\text{kW.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}$] estabelecidos pelo planejamento experimental e simulados para as condições experimentais, feitas por ARRUDA (2008), para a corrida de secagem central.

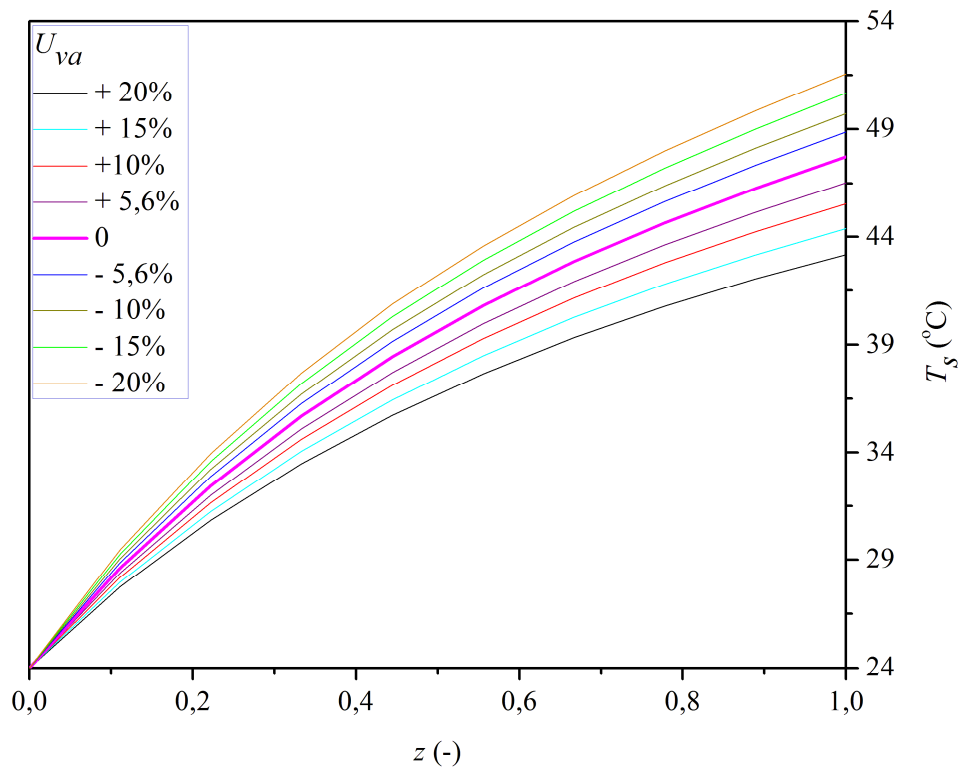


Figura AP1.3 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}).

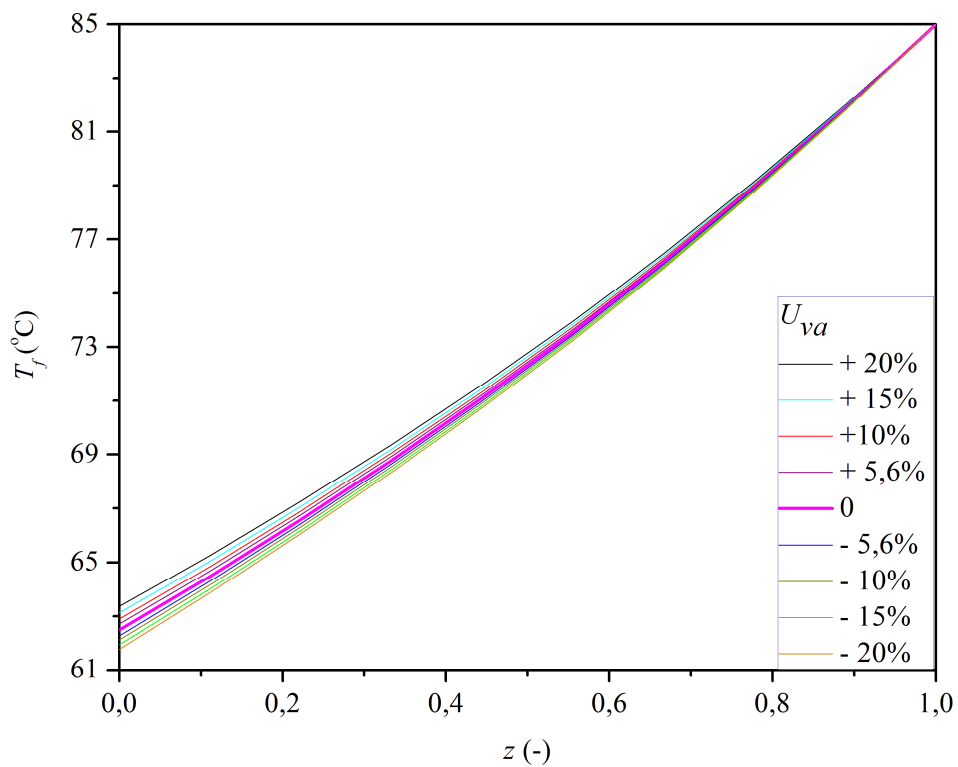


Figura AP1.4 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}).

Variação do Parâmetro Coeficiente de Calor Perdido (U_p)

As Figuras AP1.5 e AP1.6 apresentam as distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W), respectivamente, em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro coeficiente de calor perdido (U_p) [$\text{kW.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$] estabelecidos pelo planejamento experimental e simulados para as condições experimentais, feitas por ARRUDA (2008), para a corrida de secagem central.

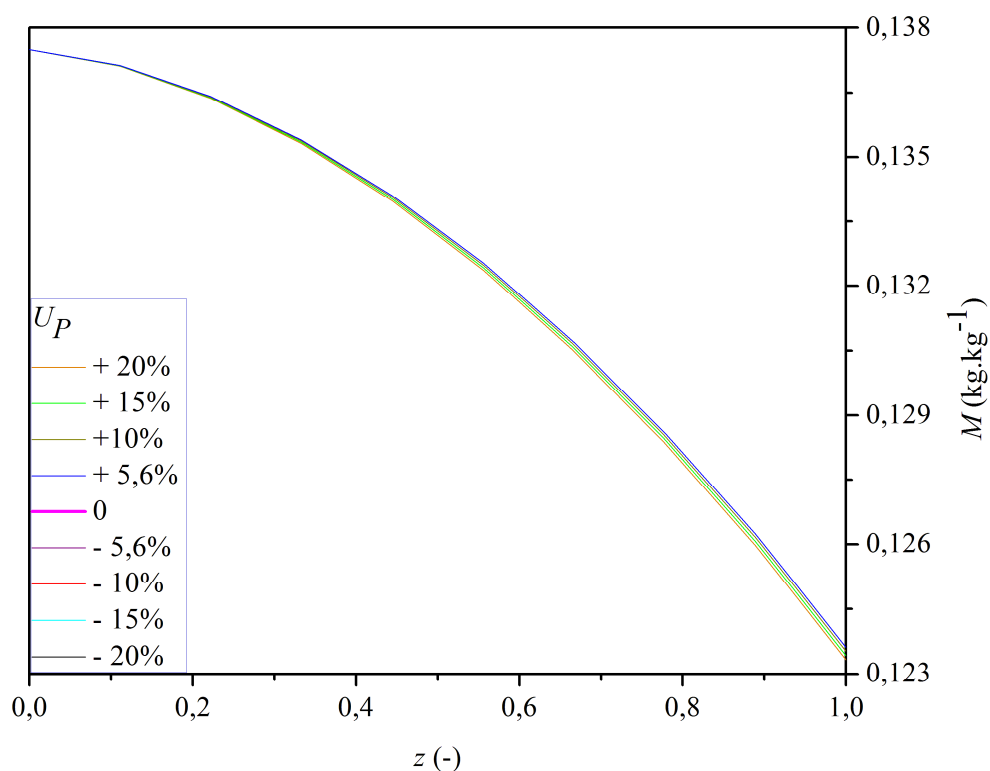


Figura AP1.5 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p).

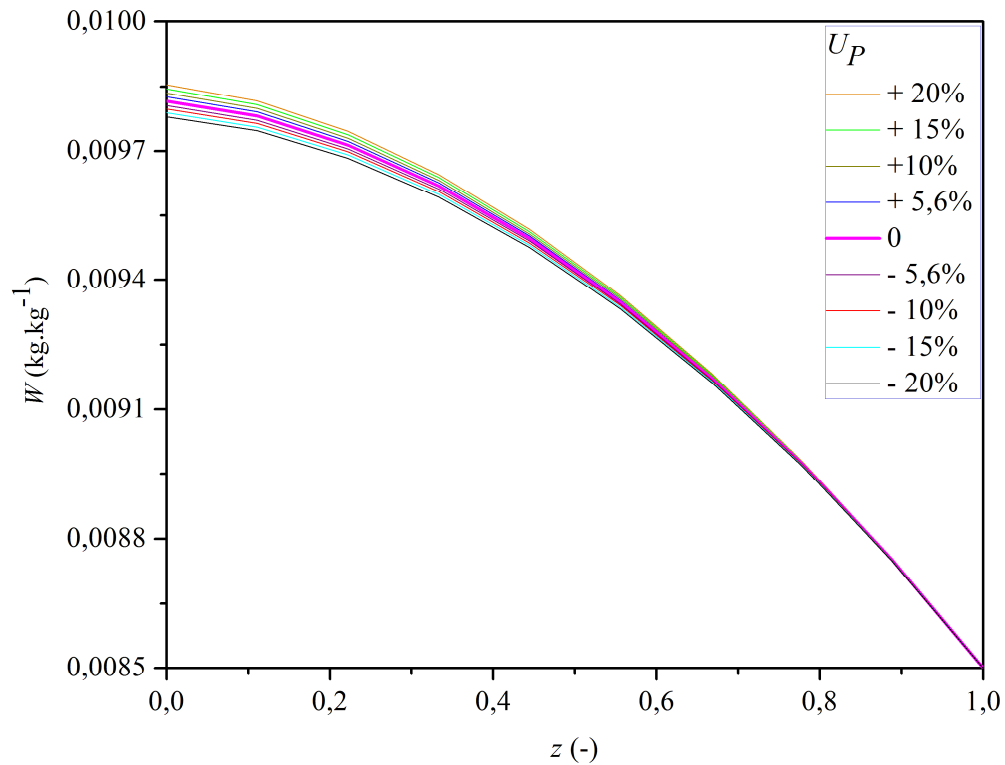


Figura AP1.6 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_p).

As Figuras AP1.7 e AP 1.8 apresentam as distribuições de temperatura do sólido (T_s) e do ar (T_f), respectivamente, em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro coeficiente de calor perdido (U_p) [$\text{kW.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$] estabelecidos pelo planejamento experimental e simulados para as condições experimentais, feitas por ARRUDA (2008), para a corrida de secagem central.

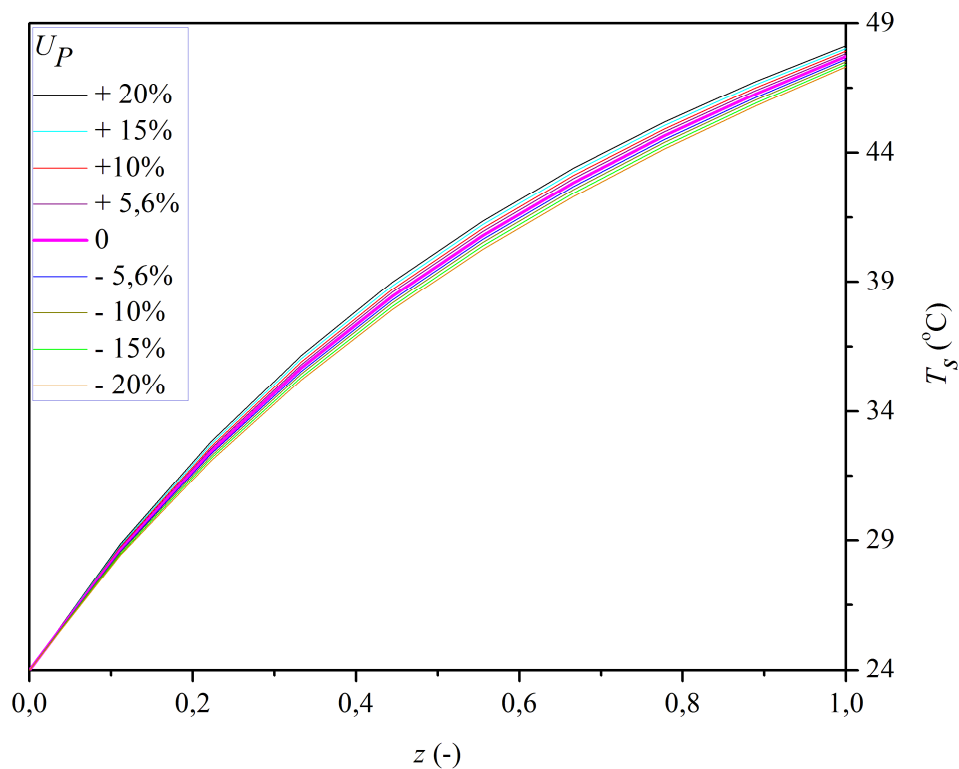


Figura AP1.7 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_P).

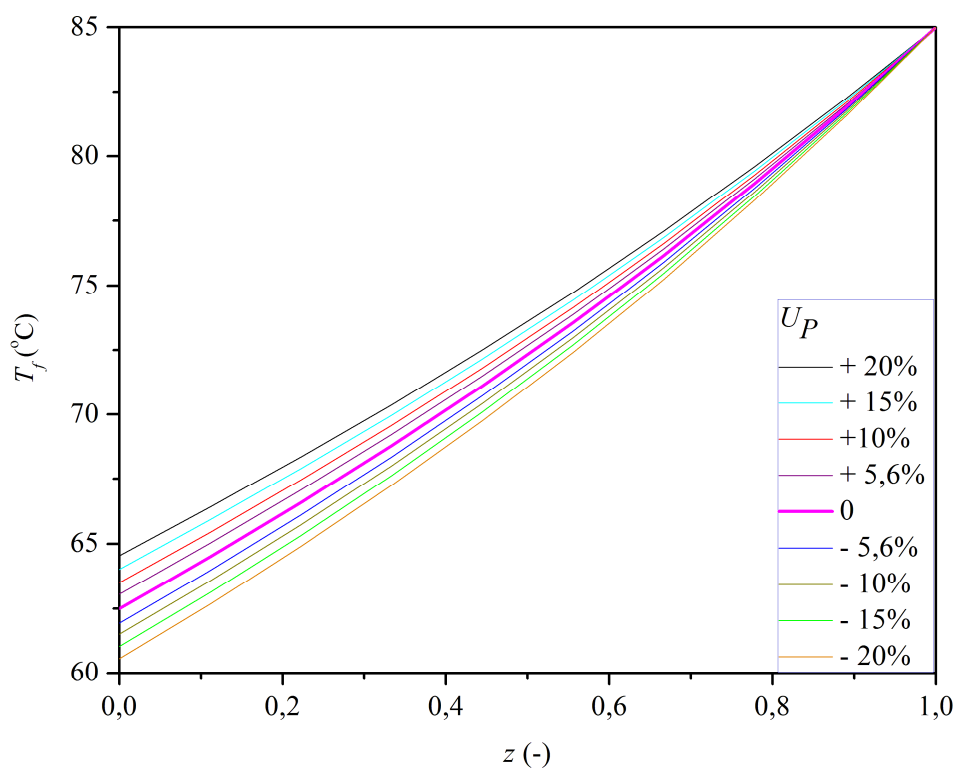


Figura AP1.8 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do coeficiente de calor perdido (U_P).

Variação do Parâmetro Taxa de secagem do Material (R_w)

As Figuras AP1.9 e AP1.10 apresentam as distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W), respectivamente, em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro taxa de secagem do material (R_w) [s^{-1}] estabelecidos pelo planejamento experimental e simulados para as condições experimentais, feitas por ARRUDA (2008), para a corrida de secagem central.

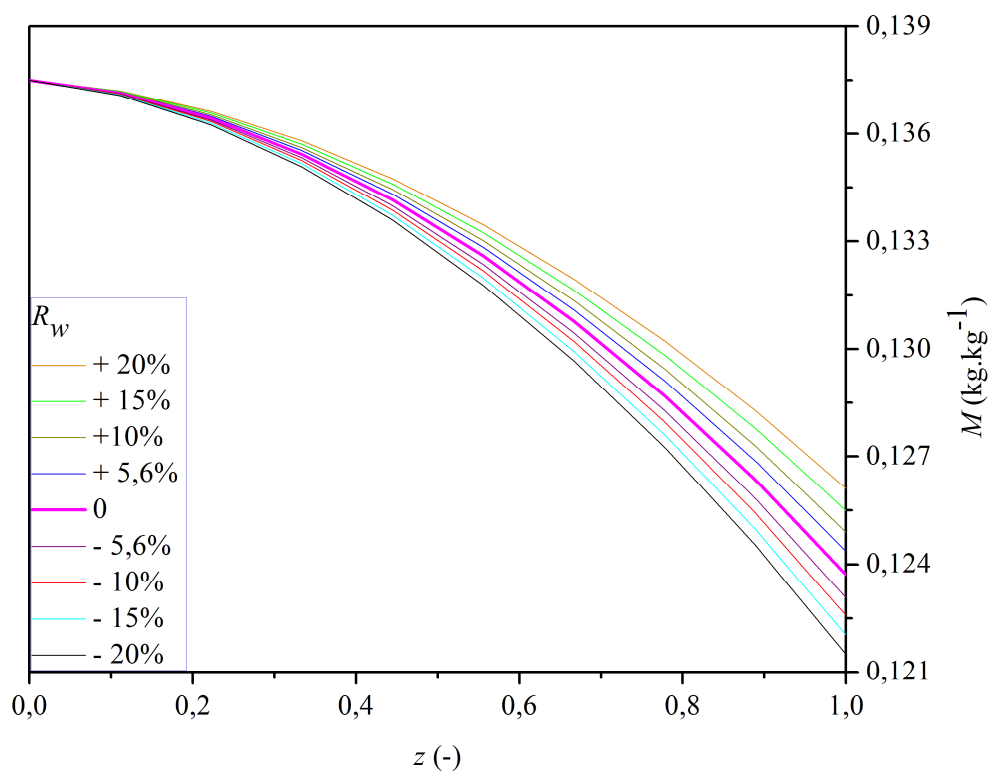


Figura AP1.9 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação da taxa de secagem do material (R_w).

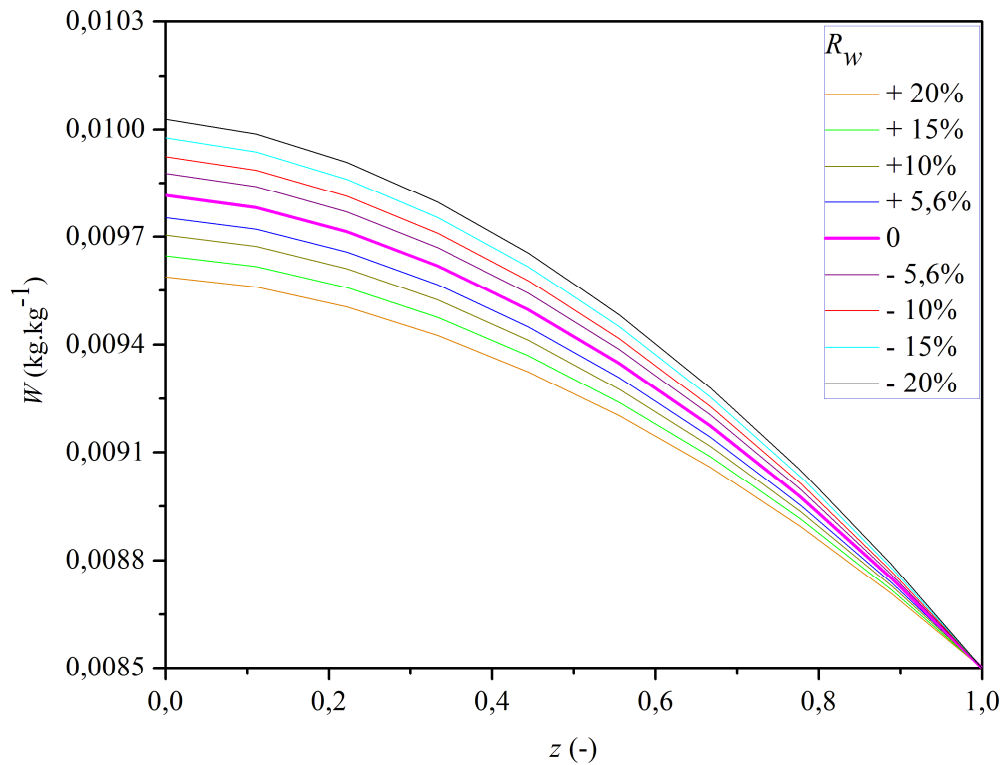


Figura AP1.10 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação da taxa de secagem do material (R_w).

As Figuras AP1.11 e AP1.12 apresentam as distribuições de temperatura do sólido (T_s) e do ar (T_f), respectivamente, em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro taxa de secagem do material (R_w) [s^{-1}] estabelecidos pelo planejamento experimental e simulados para as condições experimentais, feitas por ARRUDA (2008), para a corrida de secagem central.

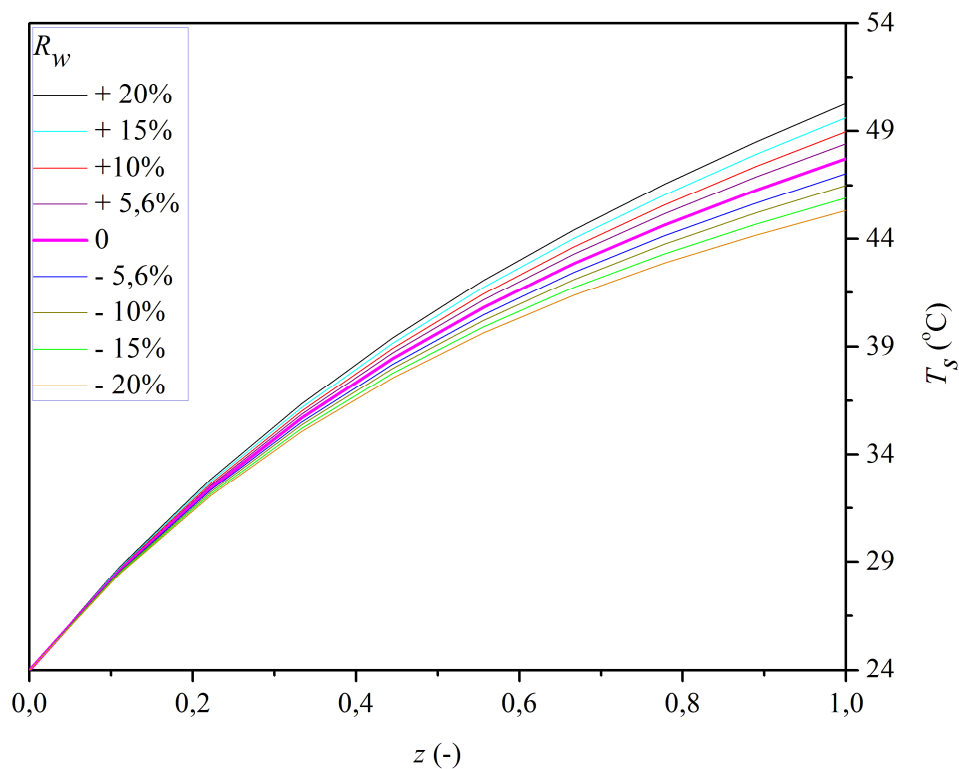


Figura AP1.11 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação da taxa de secagem do material (R_w).

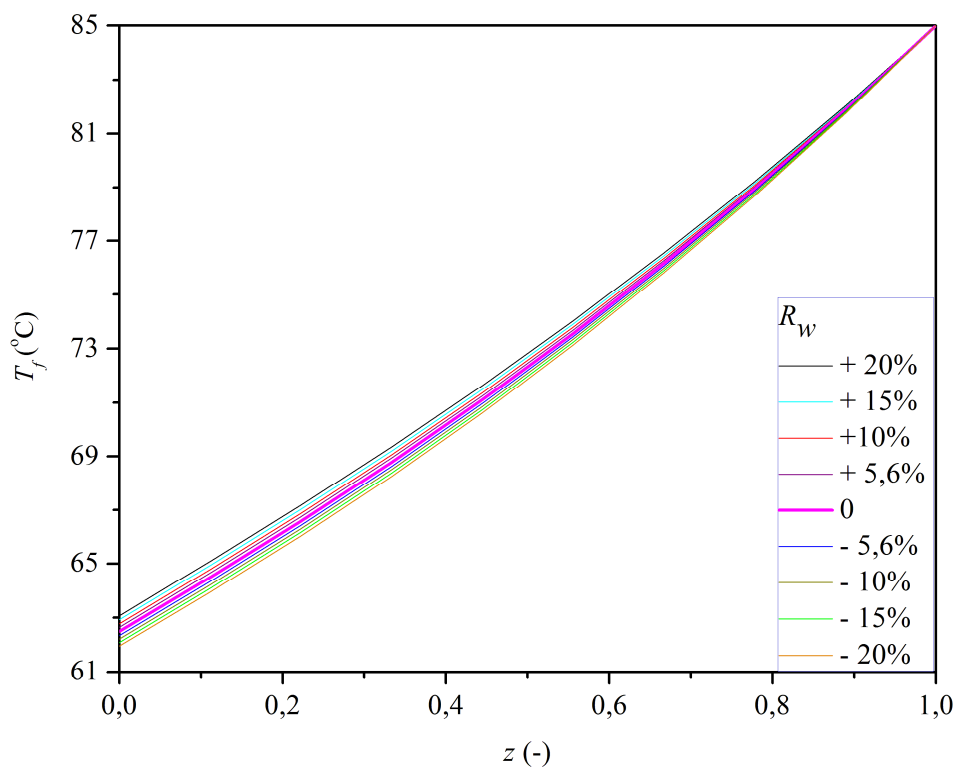


Figura AP1.12 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação da taxa de secagem do material (R_w).

Variação do Parâmetro Calor Específico do Sólido (Cp_s)

As Figuras AP1.13 e AP1.14 apresentam as distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W), respectivamente, em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro Cp_s [$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$] estabelecidos pelo planejamento experimental e simulados para as condições experimentais, feitas por ARRUDA (2008), para a corrida de secagem central.

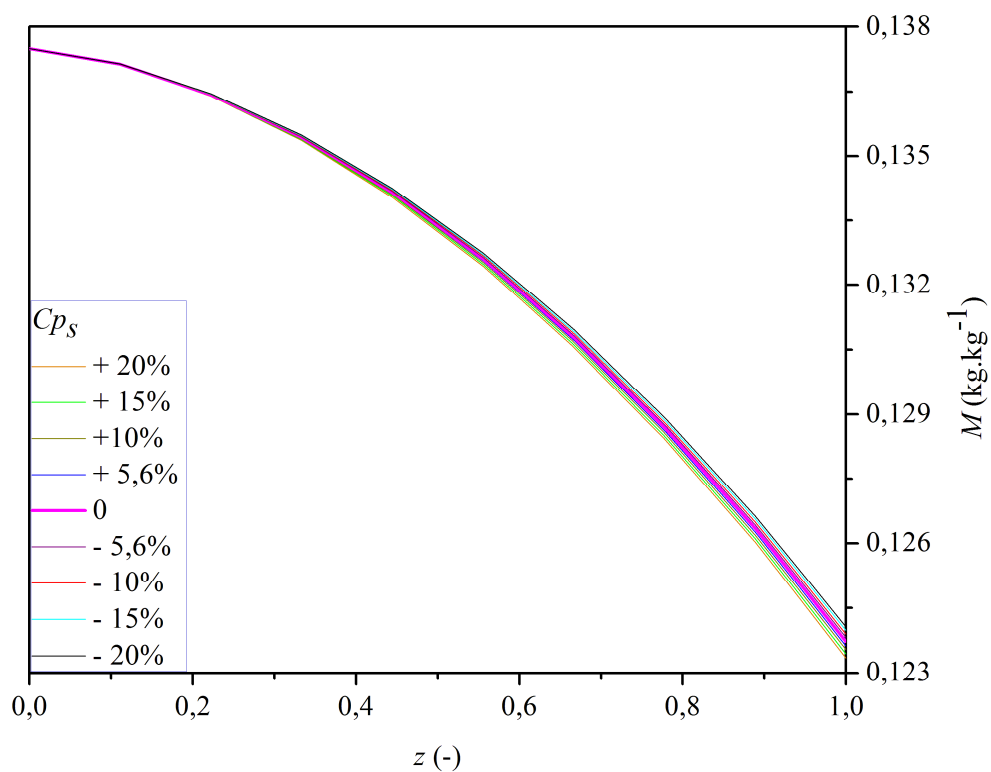


Figura AP1.13 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s).

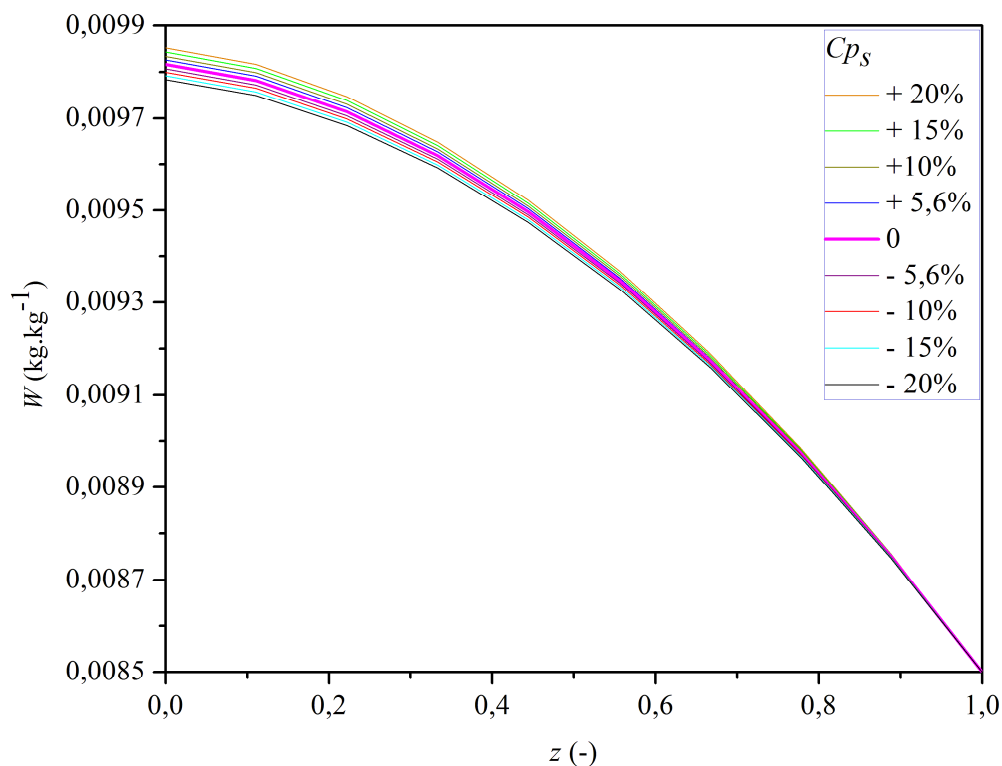


Figura AP1.14 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do calor específico do sólido (Cp_s).

As Figuras AP1.15 e AP1.16 apresentam as distribuições de temperatura do sólido (T_s) e do ar (T_f), respectivamente, em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro (Cp_s) [$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$] estabelecidos pelo planejamento experimental e simulados para as condições experimentais, feitas por ARRUDA (2008), para a corrida de secagem central.

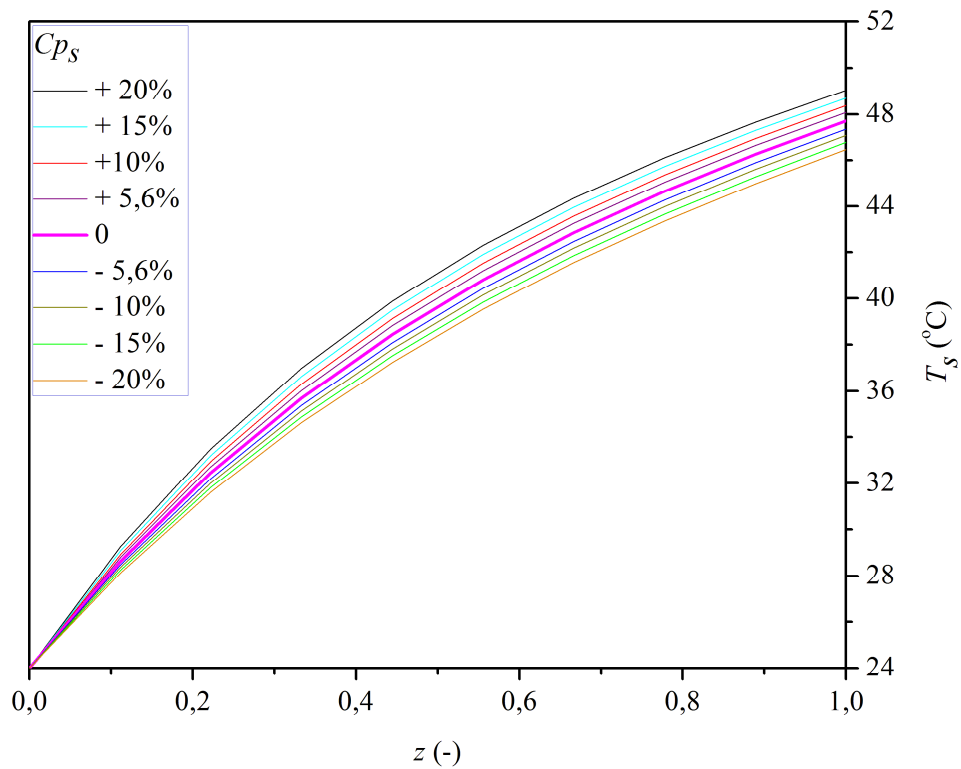


Figura AP1.15– Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do calor específico do sólido (C_{p_s}).

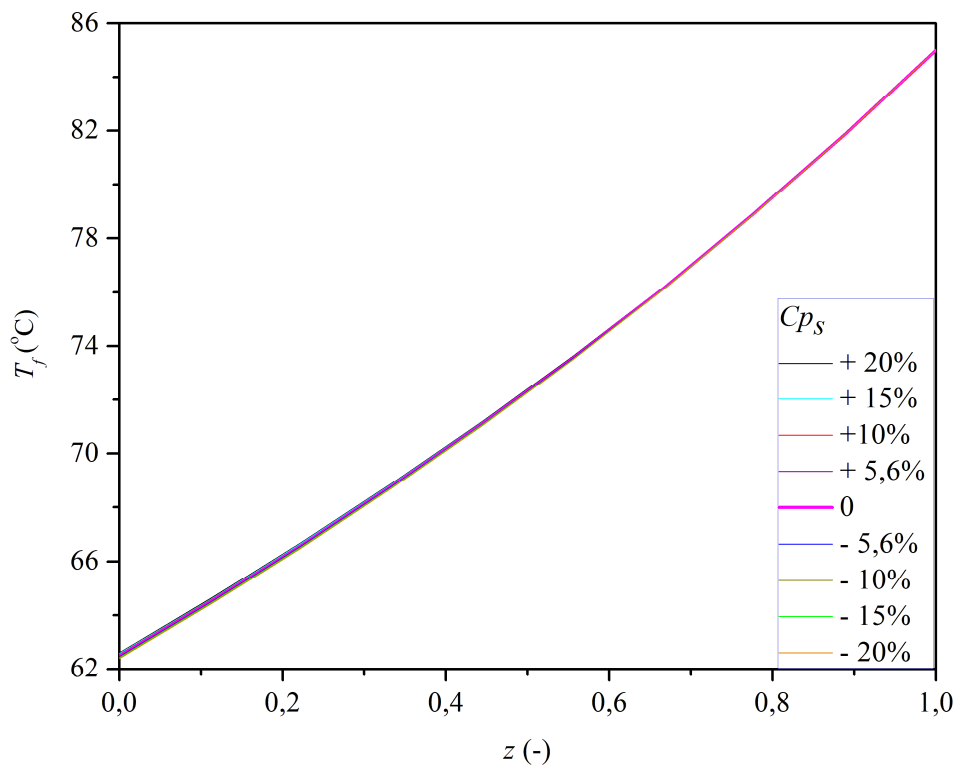


Figura AP1.16 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do calor específico do sólido (C_{p_s}).

Variação do Parâmetro Calor Específico do Ar (Cp_f)

As Figuras AP1.17 e AP1.18 apresentam as distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W), respectivamente em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro Cp_f [$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$] estabelecidos pelo planejamento experimental e simulados para as condições experimentais, feitas por ARRUDA (2008), para a corrida de secagem central.

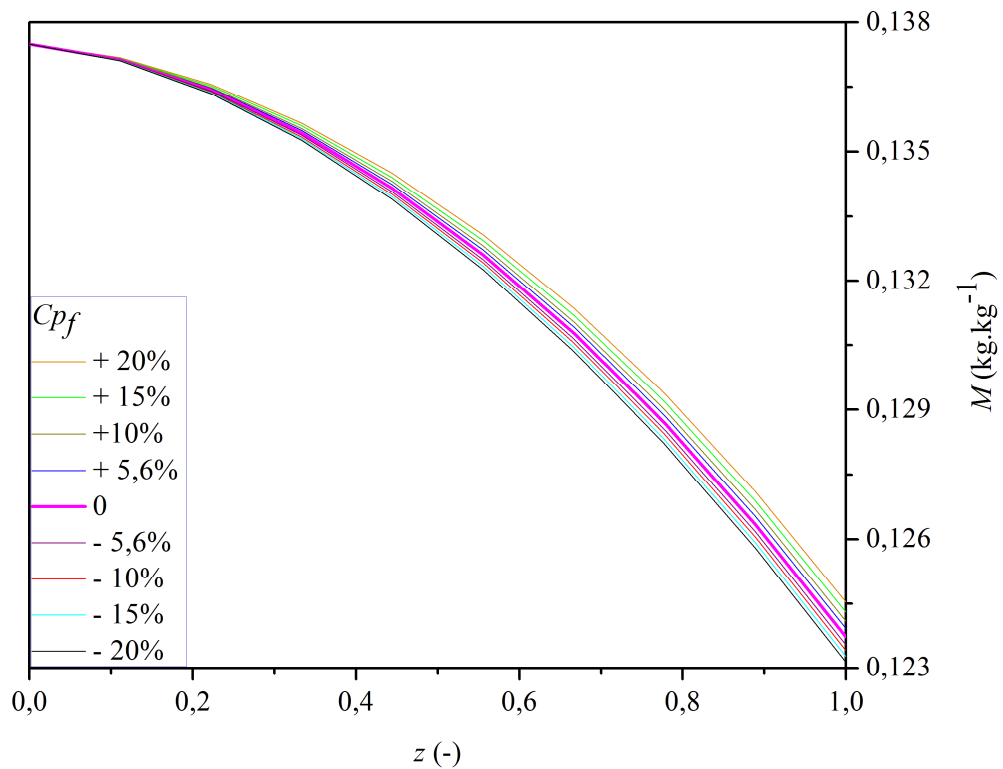


Figura AP1.17 – Distribuições de umidade do sólido (M) para a variação do calor específico do ar (Cp_f).

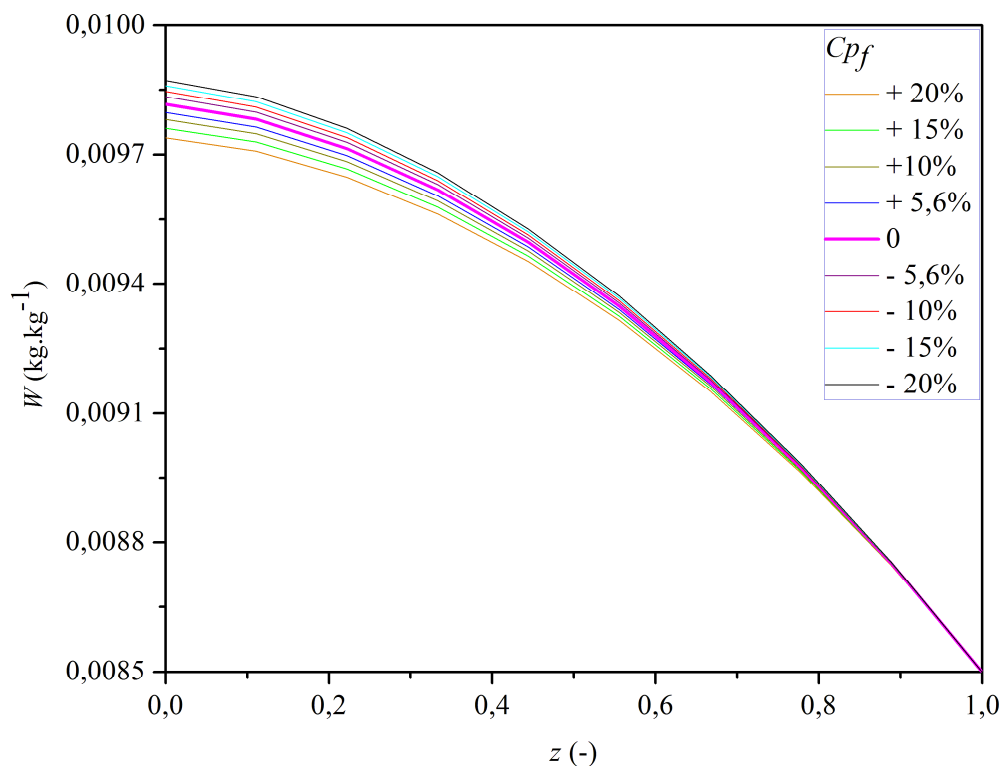


Figura AP1.18 – Distribuições de umidade do ar (W) para a variação do calor específico do ar (C_{pf}).

As AP1.19 e AP1.20 apresentam as distribuições de temperatura do sólido (T_s) e do ar (T_f), respectivamente, em função do comprimento adimensional do leito (z) para os valores do parâmetro C_{pf} [$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$] estabelecidos pelo planejamento experimental e simulados para as condições experimentais, feitas por ARRUDA (2008), para a corrida de secagem central.

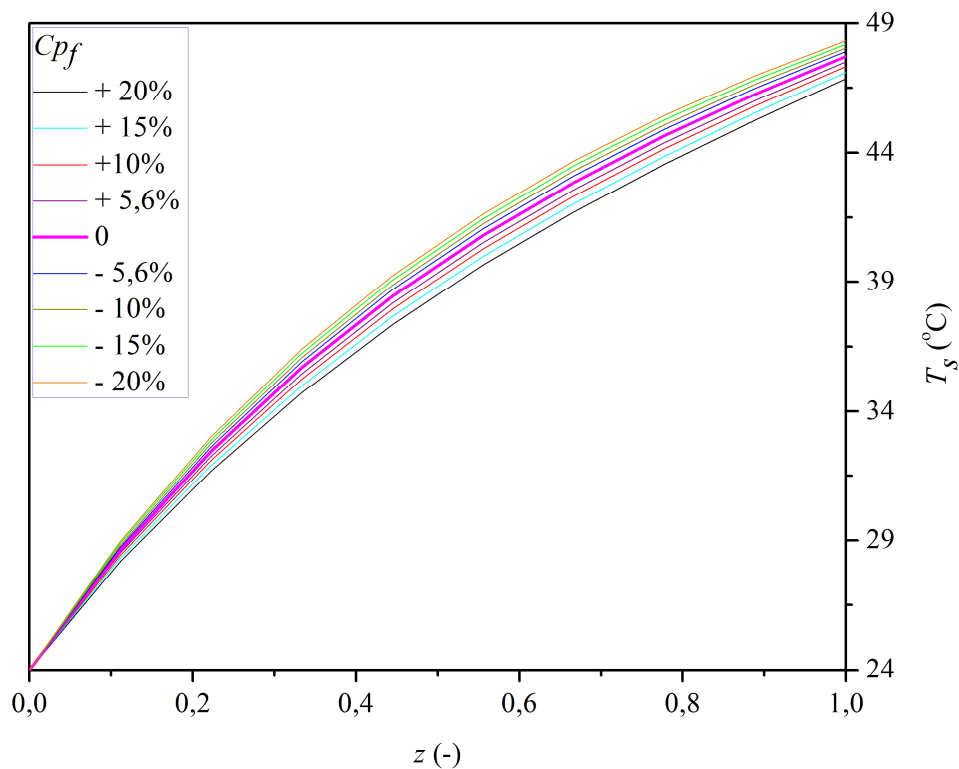


Figura AP1.19 – Distribuições de temperatura do sólido (T_s) para a variação do calor específico do ar (Cp_f).

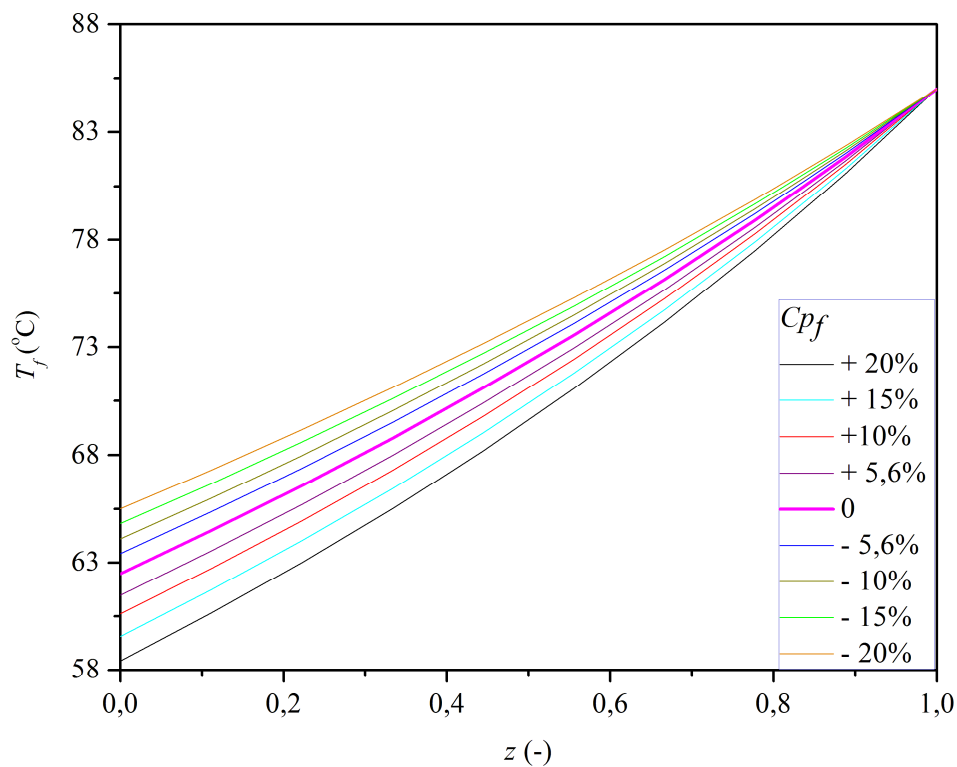


Figura AP1.20 – Distribuições de temperatura do ar (T_f) para a variação do calor específico do ar (Cp_f).

**APÊNDICE II – ROTINA IMPLEMENTADA PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE
PARA UM CASO TÍPICO**

APÊNDICES

% Implementado para MATLAB 7.1

```
clc
close all
clear all
format long
```

% Modificado em 27/11/2009 - VERSÃO FINAL

```
x=[4.5824 0.3022 0.5077] % Uva - conv. 3 segmentos (2x0,7x0,7cm)
xup=[0.2681 1.1202]      % Up - conv. 3 segmentos (2x0,7x0,7cm)
```

% SIMULAÇÕES 43 a 46:

```
fuav=1.0; % Fator para Uav - coef global de transf de calor
fup=1.0;  % Fator para Up - calor perdido
frw=1.0;  % Fator para Rw - taxa de secagem
fcps=1.0; % Fator para Cps - Cp do sólido
fcpf=1.0; % Fator para Cpf - Cp do ar/fluido
```

```
%=====
% Condições de Entrada
%=====
```

```
MMar=28.89; % massa molecular do gás [g/gmol]
R=8.2e-5;   % cte dos gases ideais [atm.m3/mol.K]
P=690/760;  % atm
```

% Características de Projeto do Secador

```
r=0.1485; % Raio do tambor [m]
L=1.40;   % Comprimento efetivo do tambor [m]
A=pi*r^2; % Área da seção transversal do secador [m2]
V=L*A;    % Volume do secador [m3]
D=2*r;
```

```
%=====
% Características Operacionais:
%=====
```

```
Tamb=27; % temperatura ambiente
alpha=3; % inclinação do tambor em graus
Yqmedio=0.209; % altura média de queda
tq=0.209; % tempo médio de queda
```

```
n=1;
TR=327; % Tempo de residência [s]
tr=TR/n; % tempo de residência em cada volume de controle [s]
NR=3.6; % Rotação do tambor [rpm]
```

```
ff=L*tq/(Yqmedio*TR*sin(alpha/180*pi));
```

% Condições de Entrada do Ar:

```
Tfo=74.6; % Temperatura de entrada do gás [oC]
wo=0.0048; % Umidade absoluta de entrada do gás [kgvp/kgarseco]
UR=0.1902; % Umidade relativa do gás [-]
var=1.5; % Velocidade do gás [m/s]
Gf=(var*A*P*MMar/1000)/(R*(Tfo+273.15)*(1+wo)); % Vazão mássica do gás [kg/s]
```

APÊNDICES

% Condições de Entrada do Sólido:

```
Mo=0.1384;          % Umidade do material na entrada [kg vapor/kg de sól.
seco]
Gs=1.2/(60*(1+Mo)); % Vazão mássica de sólido seco [kg/s]
Tso=25;             % Temperatura de entrada do produto [oC]
```

%=====

% Equação para o adimensional de umidade (MR) ajustada pela equação de PAGE:

% taxa 1

```
AA=0.4313;
BB=121.8450;
CC=0.3918;
```

% taxa 2 (-1min)

```
%AA=0.3044;
%BB=127.4621;
%CC=0.4220;
```

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

```
aa=-0.0446;
bb=1.4349;
cc=-2.0795;
```

% Parâmetros de U para suspensores de três segmentos

```
UaV=fuav*(x(1)*(Gf)^x(2)*(Gs)^(x(3)))*V; % [kW/kgm3oC]
Up=fup*xup(1)*(Gf)^(xup(2)); % [kW/kgm2oC]
```

```
%UaV=x(1)*(Gf/A)^(x(2))*V; % [kW/kgK]
```

%=====

% Correlações Termodinâmicas

%=====

```
Cps=fcps*1.02577; % Cp do sólido seco [kJ/kg oC]
Cpf=fcpf*1; % Cp do ar seco [kJ/kg oC]
Cpl=4.1868; % Cp da água líquida [kJ/kg oC]
Cpv=1.1723; % Cp do vapor [kJ/kg oC]
```

```
%har(z)=Cpf*Tf(z)+W(z)*(qlat+Cpv*Tf(z)); % entalpia do ar úmido [kJ/kg]
%hp(z)=Cps*Ts(z)+M(z)*Cpv*Ts(z); % entalpia do sólido úmido
[kJ/kg]
```

%

```
%UaV=0.149054*(Gf/A)^(0.270908)*V; % [kW/kgK]
%UaV=0.52*(Gf/A)^(0.5)*V; % [kW/kgm3oC] - Iguaz
%UaV=0.54*(Gs)^0.268*(Gf)^(0.14)*V; % [kW/kgm3oC]
```

%=====

% pontos de colocação %chute inicial

```
solinit = bvpinit(linspace(1e-5,1,10),[0.1 0.02 25 70]); % chute inicial
```

```
solution = bvp4c(@sys_edo,@boundary_conditions,solinit,[],...)
```

```
MMar,R,P,r,L,A,V,TR,tr,NR,Tfo,Wo,UR,var,Gf,Gs,Tso,Mo,AA,BB,CC,aa,bb,...
cc,UaV,Cps,Cpf,Cpl,Cpv,D,Tamb,Up,alpha,Yqmedio,tq,ff);
```

```

zint = linspace(1e-5,1,100); % interpolação de pontos com 100 pontos em z
Solution = deval(solution,zint) % avalia os pontos de zint na edo
naux=length(zint); % ver a quantidade de elementos que tem o vetor zint

for i=1:naux
    KK(i)=AA*exp(-BB/Solution(4,i));
    MRR(i)=exp(-KK(i)*(ff*TR*zint(i))^CC);
    Meqq(i)=((-exp(aa*Solution(3,i)+cc)/log(UR))^(1/bb));
    taxa(i)=frw*(1-MRR(i))*(Mo-Meqq(i))/(TR*zint(i));
end

Mexp=0.12;
Wexp=0.4;
Tfexp=55;
Tsexp=32;

% Solution(i,j) i=variavel e j=posição (j=naux implica que j aviado no
final)
Erro_M=(Solution(1,naux)-Mexp)/Mexp
Erro_W=(Solution(2,1)-Wexp)/Wexp
Erro_Ts=(Solution(3,naux)-Tsexp)/Tsexp
Erro_Tf=(Solution(4,1)-Tfexp)/Tfexp

fo=(Erro_M)^2+(Erro_W)^2+(Erro_Ts)^2+(Erro_Tf)^2

saida=[zint' Solution(1,:) Solution(2,:) Solution(3,:) Solution(4,:)]';
save perfil02_exp43a46.txt saida -ASCII

figure(1)
subplot(2,2,1)
plot(zint,Solution(1:), 'black.-')
xlabel('z')
ylabel('M')

subplot(2,2,2)
plot(zint,Solution(2:), 'black.-')
xlabel('z')
ylabel('W')

subplot(2,2,3)
plot(zint,Solution(3:), 'black.-')
xlabel('z')
ylabel('Ts')

subplot(2,2,4)
plot(zint,Solution(4:), 'black.-')
xlabel('z')
ylabel('Tf')

figure(2)
plot(zint,taxa, 'black.-')
xlabel('z')
ylabel('Rw')

figure(3)
plot(zint,Solution(1:), 'black.-', zint,Solution(2:), 'black.-')
xlabel('z')
ylabel('M e W')
legend('M', 'W', 0)

```

```

figure(4)
plot(zint,Solution(3,:), 'black.- ', zint,Solution(4,:), 'black.- ')
xlabel('z')
ylabel('Ts e Tf')
legend('Ts', 'Tf', 0)

function dYdZ = sys_edo(z, Y, MMar, R, P, r, L, A, V, TR, tr, NR, Tfo, Wo, UR, var, Gf, ...
Gs, Tso, Mo, AA, BB, CC, aa, bb, cc, UaV, Cps, Cpf, Cpl, Cpv, D, Tamb, Up, alpha, Yqmedio, tq,
ff)

M=Y(1); % solido
W=Y(2); % ar
Ts=Y(3); % temperatura do solido
Tf=Y(4); % temperatura do ar

H=(Gs/(1+Mo))*TR*z; % Holdup de sólido seco no secador [kg]
K=AA*exp(-BB/Tf);
MR=exp(-K*(TR*z*ff)^CC);

Ma=var*A*(TR*z)*(P*(MMar/1000)/(R*(Tfo+273.15))*(1+Wo)); % Holdup de ar
seco [kg]
rhoar=(P*MMar/1000)/(R*(Tf+273.15)); % Densidade do ar [kg/m3]
Meq=(( -exp(aa*Ts+cc)/log(UR))^(1/bb)); % [kg/kg-bs]

Cpfy=Cpf+Cpv*W;
Delta=((Tf-Tso)-0.999*(Tfo-Ts))/(log(0.999*(Tf-Tso)/(Tfo-Ts))); % [oC]
Qp=Up*pi*D*L*(Tf-Tamb); % Calor perdido [kJ/s]

qlat=2492.71-2.144*Ts-0.001577*Ts^2-7.3353e-6*Ts^3; % Calor Lat. de
vaporização da água pura [kJ/kg°C]

% SIMULAÇÕES 43 a 46:
    fuav=1.0; % Fator para Uav - coef global de transf de calor
    fup=1.0; % Fator para Up - calor perdido
    frw=1.0; % Fator para Rw - taxa de secagem
    fcps=1.0; % Fator para Cps - Cp do sólido
    fcpf=1.0; % Fator para Cpf - Cp do ar/fluido

Rw=frw*(1-MR)*(Mo-Meq)/(TR*z); % [1/s]

dYdZ = [ -Rw*H/Gs % solido
        -Rw*H/Gf % ar
          1/(Gs*(Cps+M*Cpl))*(UaV*(Tf-Ts)+Rw*H*Cpl*Ts-Rw*H*(qlat+Cpv*(Tf-
Ts))) % temperatura do solido
          1/(Gf*(Cpf+W*Cpv))*(UaV*(Tf-Ts)+Rw*H*(qlat+Cpv*Tf)+Up*pi*D*L*(Tf-
Tamb)) % temperatura do ar
        ];

function conditions =
boundary_conditions(Ya, Yb, MMar, R, P, r, L, A, V, TR, tr, ...
NR, Tfo, Wo, UR, var, Gf, Gs, Tso, Mo, AA, BB, CC, aa, bb, cc, UaV, Cps, Cpf, Cpl, Cpv, D, Tamb,
Up, alpha, Yqmedio, tq, ff)

conditions = [ Ya(1)-Mo % cond. inicial para o solido em z=0
              Yb(2)-Wo % cond. final para o ar em z=1
              Ya(3)-Tso % cond. inicial para a temp em z=0
              Yb(4)-Tfo % cond. inicial para a temp em z=1 ];

```

**APÊNDICE III – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS RESPOSTAS SIMULADAS
PARA A CORRIDA CENTRAL DE SECAGEM**

As Tabelas AP3.1, AP3.2, AP3.3 e AP3.4 mostram as análises de variância para as respostas umidade e temperatura do fertilizante SSPG (M e T_s) e do ar (W e T_f) na saída do secador de fluxo contracorrente na condição de corrida central de secagem utilizada no PCC feito por ARRUDA (2008); considerando todos os coeficientes, lineares, quadráticos e interações, com nível de significância do teste t de *Student* inferior a 5%. Para todos os parâmetros, a probabilidade de erro do teste de hipótese máxima adotada foi de 5% onde todos os coeficientes que tem significado estatístico estão destacados de vermelho.

Tabela AP3.1 – Análise de variância para a resposta umidade do sólido (M) para a corrida central de secagem.

Factor	Regr. Coefficients; Var.:M; R-sqr=1,; Adj:1, (Spreadsheet1) 5 factors, 1 Blocks, 46 Runs; MS Residual=0 DV: M					
	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(25)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,123719	0,000001	244684,0	0,000000	0,123718	0,123721
(1)Uva (L)	-0,000200	0,000000	-1075,0	0,000000	-0,000200	-0,000199
Uva (Q)	0,000007	0,000000	26,5	0,000000	0,000006	0,000007
(2)Up (L)	0,000109	0,000000	585,5	0,000000	0,000108	0,000109
Up (Q)	-0,000001	0,000000	-2,2	0,035841	-0,000001	-0,000000
(3)Rw (L)	-0,000644	0,000000	-3471,1	0,000000	-0,000645	-0,000644
Rw (Q)	0,000007	0,000000	25,8	0,000000	0,000006	0,000007
(4)Cps (L)	0,000100	0,000000	537,4	0,000000	0,000099	0,000100
Cps (Q)	-0,000002	0,000000	-6,0	0,000003	-0,000002	-0,000001
(5)Cpf (L)	-0,000191	0,000000	-1027,0	0,000000	-0,000191	-0,000190
Cpf (Q)	0,000009	0,000000	35,3	0,000000	0,000008	0,000010
1L by 2L	0,000002	0,000000	9,1	0,000000	0,000001	0,000002
1L by 3L	-0,000012	0,000000	-59,7	0,000000	-0,000013	-0,000012
1L by 4L	0,000001	0,000000	6,5	0,000001	0,000001	0,000002
1L by 5L	-0,000005	0,000000	-25,9	0,000000	-0,000006	-0,000005
2L by 3L	0,000005	0,000000	23,5	0,000000	0,000004	0,000005
2L by 4L	-0,000001	0,000000	-4,2	0,000280	-0,000001	-0,000000
2L by 5L	-0,000004	0,000000	-20,5	0,000000	-0,000005	-0,000004
3L by 4L	0,000003	0,000000	15,0	0,000000	0,000003	0,000003
3L by 5L	-0,000011	0,000000	-51,8	0,000000	-0,000011	-0,000010
4L by 5L	0,000001	0,000000	5,8	0,000005	0,000001	0,000002

Tabela AP3.2 – Análise de variância para a resposta umidade do ar (W) para a corrida central de secagem.

Factor	Regr. Coefficients; Var.:W; R-sqr=1,; Adj:1, (Spreadsheet1) 5 factors, 1 Blocks, 46 Runs; MS Residual=0 DV: W					
	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(25)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,009816	0,000000	203284,0	0,000000	0,009816	0,009817
(1)Uva (L)	0,000019	0,000000	1075,3	0,000000	0,000019	0,000019
Uva (Q)	-0,000001	0,000000	-26,5	0,000000	-0,000001	-0,000001
(2)Up (L)	-0,000010	0,000000	-585,6	0,000000	-0,000010	-0,000010
Up (Q)	0,000000	0,000000	2,2	0,035914	0,000000	0,000000
(3)Rw (L)	0,000062	0,000000	3472,0	0,000000	0,000062	0,000062
Rw (Q)	-0,000001	0,000000	-25,8	0,000000	-0,000001	-0,000001
(4)Cps (L)	-0,000010	0,000000	-537,6	0,000000	-0,000010	-0,000009
Cps (Q)	0,000000	0,000000	6,0	0,000003	0,000000	0,000000
(5)Cpf (L)	0,000018	0,000000	1027,3	0,000000	0,000018	0,000018
Cpf (Q)	-0,000001	0,000000	-35,3	0,000000	-0,000001	-0,000001
1L by 2L	-0,000000	0,000000	-9,2	0,000000	-0,000000	-0,000000
1L by 3L	0,000001	0,000000	59,7	0,000000	0,000001	0,000001
1L by 4L	-0,000000	0,000000	-6,5	0,000001	-0,000000	-0,000000
1L by 5L	0,000001	0,000000	25,9	0,000000	0,000000	0,000001
2L by 3L	-0,000000	0,000000	-23,5	0,000000	-0,000000	-0,000000
2L by 4L	0,000000	0,000000	4,2	0,000281	0,000000	0,000000
2L by 5L	0,000000	0,000000	20,5	0,000000	0,000000	0,000000
3L by 4L	-0,000000	0,000000	-15,0	0,000000	-0,000000	-0,000000
3L by 5L	0,000001	0,000000	51,9	0,000000	0,000001	0,000001
4L by 5L	-0,000000	0,000000	-5,8	0,000005	-0,000000	-0,000000

Tabela AP3.3 – Análise de variância para a resposta temperatura do sólido (T_s) para a corrida central de secagem.

Factor	Regr. Coefficients; Var.:Ts; R-sqr=1,; Adj:1, (Spreadsheet1) 5 factors, 1 Blocks, 46 Runs; MS Residual=,0000029 DV: Ts					
	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(25)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	47,71602	0,000751	63499,97	0,000000	47,71448	47,71757
(1)Uva (L)	1,16796	0,000276	4233,50	0,000000	1,16740	1,16853
Uva (Q)	-0,02749	0,000380	-72,41	0,000000	-0,02827	-0,02671
(2)Up (L)	-0,11462	0,000276	-415,45	0,000000	-0,11518	-0,11405
Up (Q)	0,00057	0,000380	1,49	0,147741	-0,00021	0,00135
(3)Rw (L)	-0,69211	0,000276	-2508,67	0,000000	-0,69268	-0,69154
Rw (Q)	0,00611	0,000380	16,10	0,000000	0,00533	0,00689
(4)Cps (L)	-0,36060	0,000276	-1307,07	0,000000	-0,36117	-0,36003
Cps (Q)	0,00360	0,000380	9,48	0,000000	0,00282	0,00438
(5)Cpf (L)	0,20112	0,000276	729,01	0,000000	0,20056	0,20169
Cpf (Q)	-0,00965	0,000380	-25,41	0,000000	-0,01043	-0,00887
1L by 2L	-0,00466	0,000302	-15,42	0,000000	-0,00528	-0,00404
1L by 3L	-0,00126	0,000302	-4,18	0,000315	-0,00188	-0,00064
1L by 4L	-0,00956	0,000302	-31,66	0,000000	-0,01019	-0,00894
1L by 5L	0,01025	0,000302	33,95	0,000000	0,00963	0,01088
2L by 3L	0,00467	0,000302	15,45	0,000000	0,00404	0,00529
2L by 4L	0,00048	0,000302	1,59	0,123429	-0,00014	0,00110
2L by 5L	0,00455	0,000302	15,05	0,000000	0,00392	0,00517
3L by 4L	0,01865	0,000302	61,73	0,000000	0,01803	0,01927
3L by 5L	-0,00585	0,000302	-19,36	0,000000	-0,00647	-0,00523
4L by 5L	-0,00050	0,000302	-1,65	0,111414	-0,00112	0,00012

Tabela AP3.4 – Análise de variância para a resposta temperatura do ar (T_f) para a corrida central de secagem.

Factor	Regr. Coefficients; Var.:Tf; R-sqr=1,; Adj:,99999 (Spreadsheet1 5 factors, 1 Blocks, 46 Runs; MS Residual=,0000058 DV: Tf					
	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(25)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	62,49385	0,001058	59080,77	0,000000	62,49167	62,49603
(1)Uva (L)	-0,22210	0,000388	-571,89	0,000000	-0,22290	-0,22130
Uva (Q)	0,00607	0,000534	11,35	0,000000	0,00497	0,00717
(2)Up (L)	-0,55773	0,000388	-1436,13	0,000000	-0,55853	-0,55693
Up (Q)	0,00444	0,000534	8,31	0,000000	0,00334	0,00554
(3)Rw (L)	-0,15692	0,000388	-404,07	0,000000	-0,15772	-0,15612
Rw (Q)	0,00151	0,000534	2,83	0,009011	0,00041	0,00261
(4)Cps (L)	-0,02919	0,000388	-75,17	0,000000	-0,02999	-0,02839
Cps (Q)	0,00080	0,000534	1,49	0,149232	-0,00031	0,00190
(5)Cpf (L)	0,97360	0,000388	2506,97	0,000000	0,97280	0,97440
Cpf (Q)	-0,04108	0,000534	-76,88	0,000000	-0,04218	-0,03998
1L by 2L	0,00290	0,000425	6,82	0,000000	0,00202	0,00378
1L by 3L	-0,00375	0,000425	-8,82	0,000000	-0,00463	-0,00287
1L by 4L	-0,00391	0,000425	-9,19	0,000000	-0,00478	-0,00303
1L by 5L	0,00734	0,000425	17,27	0,000000	0,00647	0,00822
2L by 3L	0,00293	0,000425	6,89	0,000000	0,00205	0,00380
2L by 4L	0,00045	0,000425	1,06	0,300562	-0,00043	0,00133
2L by 5L	0,01581	0,000425	37,17	0,000000	0,01493	0,01668
3L by 4L	0,00193	0,000425	4,55	0,000121	0,00106	0,00281
3L by 5L	0,00365	0,000425	8,59	0,000000	0,00278	0,00453
4L by 5L	0,00085	0,000425	2,00	0,056749	-0,00003	0,00173