



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

d



**Dissertação de Mestrado**

**“Influência da Temperatura, Pressão, Produção e Granulometria no Processo de Secagem das Pelotas Cruas”.**



**Autor: Alexandre Portilho Matos**  
**Orientador: Antônio Valadão Cardoso**  
**Co-Orientador: Maurício Cota Fonseca**

**Maio de 2007**



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Alexandre Portilho Matos

“Influência da Temperatura, Pressão, Produção e Granulometria no Processo de Secagem das Pelotas Cruas”.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Antônio Valadão Cardoso

Co-Orientador: Maurício Cota Fonseca

Ouro Preto, maio de 2007.

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais,  
a Adriana,  
e aos meus filhos Alexandre e Mariana.

## ÍNDICE

<b>Resumo</b> .....	<b>ix</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>x</b>
<b>Índice das figuras</b> .....	<b>xi</b>
<b>Índice das tabelas</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1.0 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2.0 - OBJETIVO E RELEVÂNCIA</b> .....	<b>2</b>
<b>3.0 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>2</b>
3.1 - ETAPA DO PELOTAMENTO .....	2
3.2 - PROCESSO SINTERIZAÇÃO DAS PELOTAS.....	4
3.3 – ALGUNS TRABALHOS EM SECAGEM.....	5
3.4 - EFEITO DAS CONDIÇÕES EXTERNAS SOBRE A SECAGEM.....	7
3.4.1 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO .....	7
3.4.2 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO .....	10
3.4.3 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO.....	11
3.5 - O MECANISMO INTERNO DE SECAGEM .....	12
3.5.1 - ADSORÇÃO DE ÁGUA EM SUPERFÍCIES SÓLIDAS.....	13
3.5.2 - ALTERAÇÕES DE VOLUME DE CORPOS PLÁSTICOS DURANTE A SECAGEM.....	13
3.5.3 - DISTRIBUIÇÃO E MOVIMENTO DA UMIDADE .....	14
3.6 - SECAGEM DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO POR CONVECÇÃO <sup>[3]</sup> .....	15
3.6.1 – SECAGEM DE PELOTA INDIVIDUAL .....	16
3.6.1.1 – Efeito da secagem de uma pelota individual.....	19
3.6.2 – SECAGEM DE UMA CAMADA DE PELOTA.....	21
3.6.2.1 - Fatores que Influenciam na Secagem da Camada de Pelotas Cruas.....	23
3.6.3 - SECAGEM ASCENDENTE E DESCENDENTE .....	24
3.6.4 - PRÉ-QUEIMA .....	27
3.6.5 – INVESTIGANDO A SECAGEM E O ESTUDO DE M. COTA <sup>[2]</sup> .....	29
3.7 – EXPERIMENTOS FATORIAIS .....	31
3.7.1 – ANALISANDO UM PLANEJAMENTO DO TIPO “SUPERFÍCIE DE RESPOSTA” .....	32
3.7.2 - TRABALHOS COM STATGRAPHICS.....	34
<b>4 – MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>36</b>

4.1 – TÉCNICA ESTATÍSTICA UTILIZADA .....	36
4.2 - PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO .....	36
4.3 – CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS E DO PELLET FEED .....	39
4.4 - PREPARAÇÃO DA MISTURA E PRODUÇÃO DAS PELOTAS CRUAS EM DISCO PILOTO .....	42
4.5 - SECAGEM DAS PELOTAS NO FORNO DE POT GRATE .....	44
4.5 - SECAGEM DAS PELOTAS NO FORNO DE POT GRATE .....	45
4.6 - TESTES REALIZADOS NAS AMOSTRAS DAS TRÊS CAMADAS .....	47
4.6.1 - ENSAIO DE UMIDADE DE PELOTAS .....	47
4.6.2 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PELOTAS ÚMIDAS (CPCU) E SECAS (CPCS) .....	48
<b>5 – RESULTADOS e DISCUSSÕES .....</b>	<b>49</b>
5.1 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO .....	49
5.1.1 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO DA SECAGEM ASCENDENTE .....	49
5.1.1.0 - Previsão de Umidade nas três Camadas após a Secagem Ascendente - Pelotas Homogêneas utilizando o Statgraphics. ....	53
5.1.1.1 - Previsão de resultados de CPCS das três Camadas após a Secagem Ascendente - Pelotas Homogêneas utilizando o Statgraphics.....	57
5.1.1.2 – Previsão de resultados de CPCU das Três Camadas após a Secagem Ascendente - Pelotas Homogêneas utilizando o Statgraphics.....	64
5.1.1.3 – Resumo dos resultados do experimento da Secagem Ascendente Pelotas Homogêneas .....	67
5.1.1.4 – Previsão de resultados de Umidade das três Camadas após a Secagem Ascendente - Pelotas Heterogêneas utilizando o statgraphics .....	70
5.1.1.5 – Previsão de resultados de CPCS das três Camadas após a Secagem Ascendente - Pelotas Heterogêneas utilizando o statgraphics .....	74
5.1.1.6 – Previsão de resultados de CPCU das Três Camadas após a Secagem Ascendente - Pelotas Heterogêneas utilizando o statgraphics .....	77
5.1.1.7 – Resumo dos resultados do experimento da Secagem Ascendente Pelotas Heterogêneas .....	79
5.1.2 - RESULTADOS DO PROJETO EXPERIMENTO SECAGEM DESCENDENTE.....	81

5.1.2.0 – Previsão de resultados de Umidade das três Camadas após a Secagem Descendente - Pelotas Heterogêneas utilizando o statgraphics .....	83
5.1.2.1 – Previsão de resultados de CPCS das três Camadas após a Secagem Descendente - Pelotas Heterogêneas utilizando o statgraphics .....	87
5.1.2.2 – Previsão de resultados de CPCU das Três Camadas após a Secagem Descendente - Pelotas Heterogêneas utilizando o statgraphics .....	89
5.1.2.3 – Resumo dos resultados do experimento Secagem Descendente Pelotas Heterogêneas .....	90
<b>6 – CONCLUSÕES .....</b>	<b>91</b>
<b>7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>93</b>
<b>8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXO 1 – TESTE PRELIMINAR DA METODOLOGIA .....</b>	<b>99</b>
<b>1.0 – OTIMIZAÇÃO DA SECAGEM ASCENDENTE NO POT GRATE .....</b>	<b>99</b>
1.1 - ASPECTOS VISUAIS DAS PELOTAS DO TESTES PRELIMINARES DA SECAGEM ASCENDENTE	103
1.2 – UMIDADE DAS PELOTAS NAS TRÊS CAMADAS DOS TESTES PRELIMINARES DA SECAGEM ASCENDENTE.....	106
1.3 – RESULTADOS DE CPCU E CPCS DOS TESTES PRELIMINARES DA SECAGEM ASCENDENTE	107
<b>2.0 – OTIMIZAÇÃO DA SECAGEM DESCENDENTE NO POT GRATE .....</b>	<b>108</b>
2.1 - ASPECTOS VISUAIS DAS PELOTAS DOS TESTES PRELIMINARES DA SECAGEM DESCENDENTE	111
2.2 – UMIDADE DAS PELOTAS NAS TRÊS CAMADAS DOS TESTES PRELIMINARES DA SECAGEM DESCENDENTE.....	112
2.3 – RESULTADOS DE CPCU E CPCS DOS TESTES PRELIMINARES DA SECAGEM DESCENDENTE	113
<b>ANEXO 2 – EQUAÇÕES DE PREVISIBILIDADE .....</b>	<b>115</b>

## **Agradecimentos**

Agradeço a todos que participaram deste trabalho em todos os momentos de sua duração. De forma especial, agradeço:

A SAMARCO MINERAÇÃO S.A. pela oportunidade de crescimento profissional através do programa de capacitação e desenvolvimento de pessoas.

Ao Prof. Dr. Antônio Valadão Cardoso pela valiosa orientação, incentivo, e inquestionável dedicação durante todo o desenvolvimento do trabalho, mantendo um elevado nível técnico e científico de abordagem.

Ao Engenheiro M. Sc. Maurício Cota Fonseca pela co-orientação e prontidão em contribuir no desenvolvimento deste trabalho.

Aos Engenheiros M. Sc. Maurício Marcos Otaviano, Vinícius Oliveira Fonseca e Henrique Dias Gatti Turrer pela prontidão em contribuir no desenvolvimento da metodologia e testes, além dos importantes comentários acerca dos resultados.

Ao Engenheiro Maury de Souza Junior, Gerente Geral de Operações da SAMARCO MINERAÇÃO S.A., pelo apoio para a realização dos trabalhos de mestrado.

Ao Engenheiro Kleber Terra, Gerente de Produção da SAMARCO MINERAÇÃO S.A., pelo constante incentivo e apoio para que esse trabalho fosse realizado com elevado nível de discussões, além da disponibilização de todos os recursos necessários.

Aos Engenheiros Adarlan Moreira da Silva, Sérgio Fernando Nunes, Ricardo Vinícius, Vinicius Oliveira Fonseca e Flávio da Silva Lopes, pelo incentivo, pelas importantes contribuições durante o desenvolvimento do trabalho e pela amizade.

A equipe de trabalho do pot grate, em especial ao Técnico de Processo Alaécio Meschiatti pela importante contribuição no desenvolvimento da metodologia, no manuseio das amostras e na dedicação para com o trabalho.

## **RESUMO**

Neste trabalho, investigou-se a capacidade de um modelo estatístico em evidenciar interações entre as variáveis e ajudar na compreensão do processo de secagem de pelotas de minério de ferro. As variáveis estudadas foram pressão, temperatura, produção e granulometria da pelota crua.

Um projeto de experimento foi desenvolvido para determinar as interações entre as variáveis estudadas para a otimização do processo de secagem. O experimento foi dividido em duas etapas: secagem ascendente e secagem descendente. A secagem ascendente foi dividida em dois blocos, com a granulometria das pelotas cruas avaliadas em separado. Depois de realizado e otimizado a etapa da secagem ascendente, o melhor resultado desta etapa serviu de base para a etapa de secagem descendente. A etapa de secagem descendente foi avaliada somente com pelotas na granulometria heterogênea.

Foi constatado que alterações nas variáveis, pressão, temperatura, produção e granulometria das pelotas cruas causam um efeito significativo no processo de secagem ascendente e descendente. Por sua vez, algumas variáveis do processo de secagem como permeabilidade do leito e umidade ideal, que não foram consideradas como parâmetros neste estudo, também influenciam os resultados finais do experimento.

Verificou-se também, que a variável pressão, exerce uma influência significativa na redução da umidade no processo de secagem ascendente pelotas homogêneas e heterogêneas. Em compensação, há um efeito negativo, que é a redução na resistência mecânica das pelotas cruas e secas.

Foi ainda constatado que o fator produção exerce uma influência significativa na redução da umidade nas três camadas de pelotas cruas durante a secagem descendente de pelotas heterogêneas.

## **ABSTRACT**

In this work, the process of drying pellets was investigated using a statistical methodology. The factors studied were pressure, temperature, production and green pellet size.

An experiment project was designed to determine the interactions between the factors and optimize the drying process. The experiment was divided in two stages: up draft drying and down draft drying. The up draft was divided in two blocks. In the first pellets as different sizes were used. After up draft drying optimization, the best test condition was chosen and down draft drying was investigated. The stage of down draft drying was evaluated with only pellets of same size.

The factors pressure, temperature, production and green pellets size caused a significant effect in both up draft drying and down draft drying processes. Some variables of drying process, as permeability of the streambed and ideal moisture, which had not been considered as parameters in this study, had influenced in the final results of the experiment.

Pressure has a significant influence in the moisture decrease in the process of up draught drying with homogeneous and heterogeneous pellets. However, it has a negative effect causing a decrease of green and fired pellets compression strength.

Production has a significant influence in moisture decrease in the three layers of green pellets in the process of down draught drying with heterogeneous pellets.

## ÍNDICE DAS FIGURAS

Figura 3.1 – O disco de pelotamento e seu princípio de funcionamento <sup>[3]</sup> .....	3
Figura 3.2 – Forno de Pelotização <sup>[4]</sup> .....	4
Figura 3.3 – Condições de Equilíbrio para secagem de uma superfície úmida por convecção <sup>[16]</sup> ..	9
Figura 3.4 - Corte transversal de um sistema argila-água em diferentes estágios de secagem <sup>[16]</sup> ..	14
Figura 3.5 - Mecanismo de controle da secagem da pelota. <sup>[17]</sup> .....	17
Figura 3.6 – Diagrama de secagem do material úmido <sup>[3]</sup> .....	18
Figura 3.7 – Estágio de secagem do material úmido <sup>[3]</sup> .....	20
Figura 3.8 - Variação do conteúdo de água numa camada de pelotas cruas durante a secagem <sup>[3]</sup> ..	22
Figura 3.9 – Influência da Temperatura do gás sobre a secagem <sup>[17]</sup> .....	24
Figura 3.10 – Influência do diâmetro das pelotas sobre a secagem <sup>[17]</sup> .....	24
Figura 3.11 – Zona de Secagem Ascendente I do Forno de Pelotização <sup>[21]</sup> .....	25
Figura 3.12 – Zona de Secagem Ascendente II do Forno de Pelotização <sup>[21]</sup> .....	25
Figura 3.13 – Zona de Secagem Descendente do Forno de Pelotização <sup>[21]</sup> .....	26
Figura 3.14 – Zona de Pré-Queima no Forno de Pelotização <sup>[21]</sup> .....	28
Figura 3.15 – Exemplo de diagrama de interação para a CPCS (resistência a compressão das pelotas secas) da camada intermediária, em função da temperatura e pressão utilizando o statgraphics.....	33
Figura 3.16 – Diagrama de interação para a CPCS da camada superior, em função da temperatura e pressão utilizando o statgraphics.....	33
Figura 3.17 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Superior (95% de confiança).....	34
Figura 4.1 – Misturador Eirich modelo R-08W <sup>[34]</sup> .....	43
Figura 4.2 – Disco-piloto utilizado na confecção das pelotas cruas <sup>[34]</sup> .....	43
Figura 4.3 – Visão esquemática do <i>pot grate</i> <sup>[21]</sup> .....	46
Figura 4.4 – Dimensões da panela do <i>pot grate</i> <sup>[35]</sup> .....	46
Figura 4.5 – Estufa <sup>[36]</sup> .....	47
Figura 4.6 – Conceito do fator de força (F) compressiva uniaxial para Esferas <sup>[37]</sup> .....	48
Figura 4.7 – Máquina de Compressão (CPCU E CPCS) <sup>[38]</sup> .....	48

Figura 5.1 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Superior (95% de confiança). .....	53
Figura 5.2 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Intermediária (95% de confiança). .....	54
Figura 5.3 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Inferior (95% de confiança). .....	54
Figura 5.4 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na umidade da camada superior utilizando o Statgraphics. ....	55
Figura 5.5 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na umidade da camada intermediária utilizando o statgraphics. ....	56
Figura 5.6 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na umidade da camada inferior utilizando o statgraphics. ....	56
Figura 5.7 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da CPCS da camada superior (95% de confiança). ....	58
Figura 5.8 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da CPCS da camada intermediária (95% de confiança). ....	58
Figura 5.9 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da CPCS da camada inferior (95% de confiança). .....	59
Figura 5.10 - Superfície de resposta para a CPCS da camada superior, em função da temperatura e pressão. ....	60
Figura 5.12 - Superfície de resposta para a CPCS da camada intermediária, em função da temperatura e pressão. ....	61
Figura 5.13 - Superfície de resposta para a CPCS da camada inferior, em função da temperatura e pressão. ....	61
Figura 5.14 – Diagrama de interação para a CPCS da camada intermediária, em função da temperatura e pressão utilizando o statgraphics. ....	62
Figura 5.15 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na CPCS da camada inferior utilizando o statgraphics. ....	63
Figura 5.16 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na CPCU da camada superior utilizando o statgraphics. ....	65

Figura 5.17 - Superfície de resposta para a CPCU da camada intermediária, em função da temperatura e pressão.....	65
Figura 5.18 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na CPCU da camada inferior utilizando o statgraphics.....	66
Figura 5.19 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Superior (95% de confiança).....	70
Figura 5.20 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Intermediária (95% de confiança).....	71
Figura 5.21 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Inferior (95% de confiança).....	71
Figura 5.22 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na umidade da camada superior utilizando o statgraphics.....	72
Figura 5.23 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na umidade da camada intermediária utilizando o statgraphics. ....	73
Figura 5.24 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na umidade da camada inferior utilizando o statgraphics.....	73
Figura 5.25 – Diagrama de interação para a CPCS da camada superior, em função da temperatura e pressão.....	75
Figura 5.26 – Diagrama de interação para a CPCS da camada intermediária, em função da temperatura e pressão.....	75
Figura 5.27 – Diagrama de interação para a CPCS da camada inferior, em função da temperatura e pressão.....	76
Figura 5.28 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na CPCU da camada superior.....	77
Figura 5.29 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na CPCU da camada intermediária.....	78
Figura 5.30 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção CPCU da camada inferior.....	78
Figura 5.31 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Superior (95% de confiança).....	83
Figura 5.32 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da .....	84

Umidade Camada Intermediária (95% de confiança).....	84
Figura 5.33 - Superfície de resposta para a umidade da camada superior, em função da produção e pressão.....	85
Figura 5.34 – Diagrama de interação para a umidade da camada superior, em função da produção e pressão.....	85
Figura 5.35 – Diagrama de interação para a umidade da camada intermediária, em função da produção e pressão.....	86
Figura 5.36 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção CPCS da camada Superior utilizando o statgraphics.....	87
Figura 5.37 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção CPCS da camada Intermediária utilizando o statgraphics.....	88
Figura 5.38 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção CPCS da camada inferior utilizando o statgraphics.....	88
Figura 1.0 – Pelota Heterogênea, Temperatura de 250°C e na pressão de 250 mmca.....	100
Figura 1.1 – Pelota Heterogênea, Temperatura de 350°C e na pressão de 450 mmca.....	100
Figura 1.2 – Pelota Heterogênea, Temperatura de 450°C e na pressão de 650 mmca.....	101
Figura 1.3 – Pelota Homogênea, Temperatura de 250°C e na pressão de 250 mmca.....	101
Figura 1.4 – Pelota Homogênea, Temperatura de 350°C e na pressão de 450 mmca.....	102
Figura 1.5 – Pelota Homogênea, Temperatura de 450°C e na pressão de 650 mmca.....	102
Figura 1.6 – Pelota Heterogênea, T = 250°C, P = 250 mmca, camada inferior, intermediária e superior.....	104
Figura 1.7 – Pelota Heterogênea, T = 350°C, P = 450 mmca, camada inferior, intermediária e superior.....	104
Figura 1.8 – Pelota Heterogênea, T = 450°C, P = 650 mmca, camada inferior, intermediária e superior.....	104
Figura 1.9 – Pelota Homogênea, T = 250°C, P = 250 mmca, camada inferior, intermediária e superior.....	105
Figura 1.10 – Pelota Homogênea, T = 350°C, P = 450 mmca, camada inferior, intermediária e superior.....	105
Figura 1.11 – Pelota Homogênea, T = 450°C, P = 650 mmca, camada inferior, intermediária e superior.....	105

Figura 1.12 – Resistência à compressão a úmido (CPCU) das camadas superior, intermediária e inferior para as diferentes condições de temperatura e pressão para fluxo de gás Ascendente. ....	107
Figura 2.1 – Pelota Heterogênea, temperatura de 380°C e na pressão de 650 mmca secagem ascendente, 200°C e na pressão de 250 mmca secagem descendente.....	110
Figura 2.2 - Pelota Heterogênea, temperatura de 380°C e na pressão de 650 mmca secagem ascendente, 450°C e na pressão de 650 mmca secagem descendente.....	110
Figura 2.3 - Pelota Heterogênea, T = 380°C e P = 650 mmca secagem ascendente, T = 200°C e P = 250 mmca secagem descendente, camada inferior, intermediária e superior. ....	111
Figura 2.4 - Pelota Heterogênea, T = 380°C e P = 650 mmca secagem ascendente, T = 450°C e P = 650 mmca secagem descendente, camada inferior, intermediária e superior. ....	112
Figura 2.5 – Resistência à compressão a úmido (CPCU) das camadas superior, intermediária e inferior para as diferentes condições de temperatura e pressão para fluxo de gás ascendente e descendente. ....	113
Figura 2.6 – Resistência à compressão a seco (CPCS) das camadas superior, intermediária e inferior para as diferentes condições de temperatura e pressão para fluxo de gás ascendente e descendente. ....	114

## ÍNDICE DAS TABELAS

Tabela 4.1 – Distribuição Granulométrica - Pelota Homogênea .....	37
Tabela 4.2 – Distribuição Granulométrica - Pelota Heterogênea.....	37
Tabela 4.3 - Planejamento do Projeto Experimento da Secagem Ascendente.....	38
Tabela 4.4 - Planejamento do Projeto Experimento da Secagem Descendente.....	38
Tabela 4.5 - Caracterização química das amostras de calcário e carvão utilizadas no estudo.....	40
Tabela 4.6 - Caracterização química e mineralógica das amostras de Pellet feed utilizadas no estudo. ....	40
Tabela 4.7 - Caracterização física das amostras de Pellet feed utilizadas no estudo. ....	41
Tabela 4.8 - Caracterização física das amostras de carvão e calcário utilizadas no estudo. ....	41
Tabela 4.9 – Distribuição do peso por faixa granulométrica. ....	44
Tabela 5.0 – Resultados dos testes da secagem ascendente para uma pelota heterogênea. ....	51
Tabela 5.1 – Resultados dos testes da secagem ascendente para uma pelota homogênea. ....	52
Tabela 5.2 – Influência dos fatores sobre as variáveis respostas secagem ascendente para pelotas homogêneas. ....	67
Tabela 5.3 – Influência dos fatores sobre as variáveis respostas secagem ascendente para pelotas heterogêneas. ....	80
Tabela 5.4 – Resultados dos testes da secagem descendente para uma pelota heterogênea. ....	82
Tabela 5.5 – Influência dos fatores sobre as variáveis respostas secagem descendente para pelotas heterogêneas. ....	90
Tabela 1.0 – Umidade das pelotas dos testes preliminares da secagem ascendente. ....	106
Tabela 2.0 – Umidade das pelotas dos testes preliminares da secagem descendente. ....	112

## 1.0 - INTRODUÇÃO

O processo de formação das pelotas cruas inicia-se na preparação e produção da sua matéria prima principal, o *pellet feed*. Na usina de concentração da Samarco são produzidos dois tipos de concentrados de minério de ferro, *CNS* (sílica normal) e *CLS* (baixa sílica) <sup>[1]</sup>. O concentrado é transportado até a usina de pelletização através do mineroduto e tratado por diversos processos de separação sólido-líquido. Este material é armazenado em tanques homogeneizadores e bombeado para a área de filtração, onde se separa o líquido do sólido através de filtros a vácuo, obtendo-se o *pellet feed* com umidade adequada ao processo de pelletamento. A umidade ideal do *pellet feed* é uma das variáveis mais importantes para a aglomeração das partículas.

A implementação de uma nova etapa no processo produtivo em maio de 2003, o *roller press*, anterior ao processo de aglomeração, alterou as características do *pellet feed* modificando assim o valor de umidade ótima para aglomerar.

Uma outra característica importante alterada foi o aumento da densidade a granel (*bulk density*) das pelotas cruas, ocasionando um aumento de produtividade. Este aumento de produtividade afetou diretamente algumas variáveis do processo de sinterização e principalmente aquela que se refere ao processo de secagem, em especial:

- i - tempo de residência das pelotas cruas nas etapas de secagem ascendente e descendente;
- ii - temperatura;
- iii - pressões nos dutos dos ventiladores responsáveis pelo processo de secagem.

Buscando entender melhor este processo de secagem e gerar um maior conhecimento do fenômeno de secagem em fornos de sinterização de pelotas de minério de ferro, o presente estudo propôs avaliar os efeitos da temperatura, pressão, produção (tempo) e granulometria da pelota seca no processo de secagem ascendente e descendente, separadamente, e o impacto desta otimização no processo produtivo da Samarco Mineração S/A. Devido às pressões e temperaturas das duas etapas de secagem serem diferentes, optou-se por otimizar a etapa da secagem ascendente e utilizar o melhor resultado para otimizar o processo de secagem descendente.

Um projeto de experimento foi desenvolvido para determinar as interações entre as variáveis estudadas para a otimização do processo de secagem. Finalizando o trabalho, foram obtidos, com base nos resultados experimentais, modelos empíricos capazes de descrever o comportamento do processo estudado.

## **2.0 - OBJETIVO E RELEVÂNCIA**

O objetivo do presente trabalho é investigar a capacidade de um modelo estatístico em evidenciar interações entre as variáveis estudadas e ajudar na compreensão do processo de secagem de pelotas. Utilizou-se, como estudo de caso, o forno II da planta da Samarco Mineração S/A localizada em Ponta Ubu, Espírito Santo, Brasil.

Em 2004, um teste exploratório foi realizado buscando identificar a origem das trincas nas pelotas queimadas a partir de alguns testes de secagem ascendente e descendente. Em resumo, detectou-se uma influência da pressão e temperatura de secagem na resistência física da pelota queimada <sup>[2]</sup>.

Buscando avançar o conhecimento sobre o fenômeno de secagem da pelota, este estudo concentra-se no processo de secagem ascendente e descendente, interrompendo-se os testes após o término de cada etapa.

## **3.0 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O efeito das condições externas e o mecanismo interno de secagem serão analisados aqui em maiores detalhes, por representar a linha central desta pesquisa.

### **3.1 - ETAPA DO PELOTAMENTO**

Na etapa de aglomeração do minério de ferro denominada de pelotamento, ocorre a formação das pelotas cruas. As pelotas devem ser produzidas com granulometria apropriada e resistência mecânica suficiente para suportar as etapas de transferência e transporte do pelotamento ao forno de sinterização.

Entre os fatores importantes para a formação das pelotas cruas, podemos citar: a forma, o tamanho médio, a mineralogia, distribuição granulométrica do minério e aditivos, a estrutura de poros, a molhabilidade das partículas, o teor de umidade, as características químicas da mistura, o tipo e quantidade de aglomerante utilizado, as condições operacionais dos equipamentos utilizados, os parâmetros operacionais dos discos pelletizadores (inclinação, tempo de residência, rotação), etc. O desenho da Figura 3.1 mostra os principais componentes de um disco pelletizador e ilustra o processo de formação das pelotas cruas.

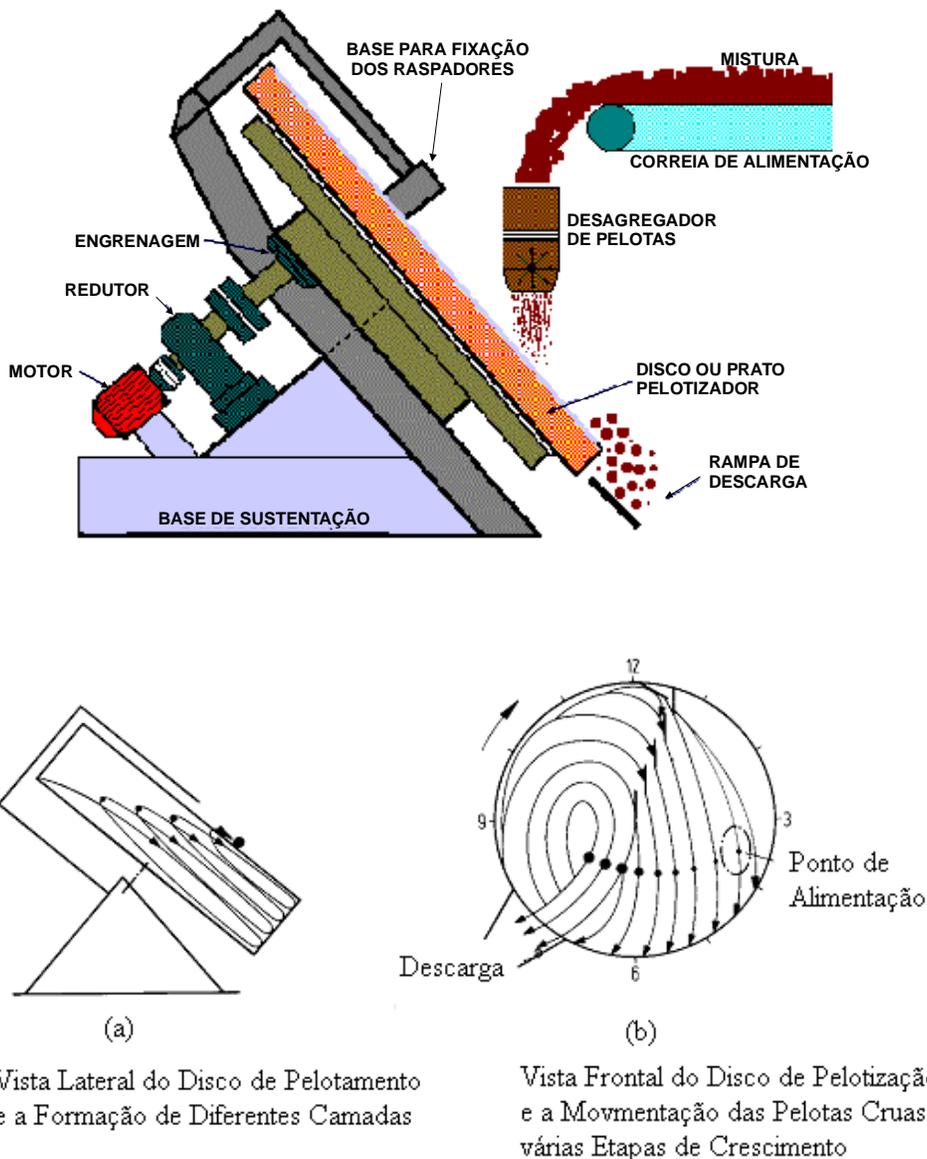


Figura 3.1 – O disco de pelletamento e seu princípio de funcionamento [3].

### 3.2 - PROCESSO SINTERIZAÇÃO DAS PELOTAS

As pelotas formadas nos discos de pelotização passam por um sistema de peneiramento de mesa de rolos, onde 85 a 95% do material passante encontram-se na faixa  $-16\text{mm} + 9,0\text{ mm}$ . Este material antes de entrar no Forno de Pelotização passa por uma nova etapa de peneiramento através de um sistema de peneira *duplo deck*, cujo objetivo principal é retirar os finos gerados na descarga dos discos, e não eliminados nas peneiras anteriores (pelotamento), mais os finos gerados durante o transporte e queda das pelotas cruas.

A figura 3.2 apresenta o desenho esquemático de um forno de sinterização do tipo grelha móvel similar ao da Samarco Mineração S/A.

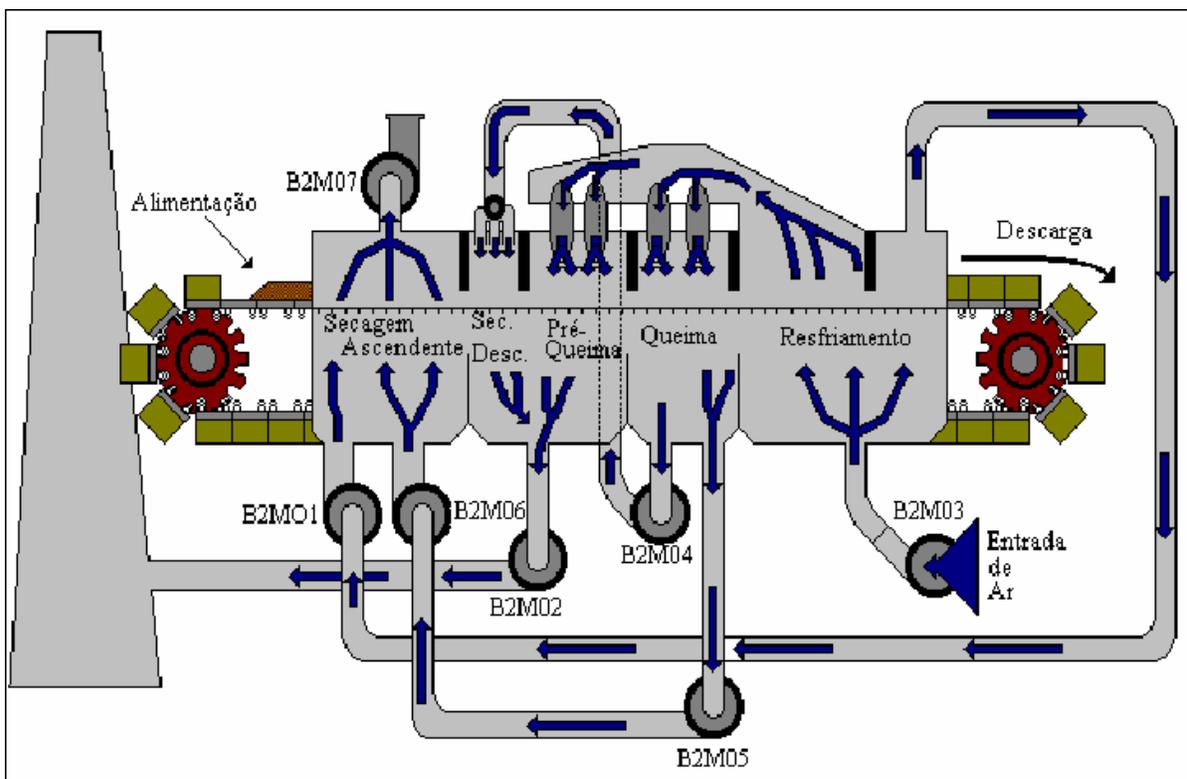


Figura 3.2 – Forno de Pelotização<sup>[4]</sup>.

Algumas variáveis são importantes no processo de secagem e sinterização, tais como:

- Finos na entrada da grelha porque interferem negativamente no processo de secagem e na queima das pelotas cruas, impermeabilizando o leito.
- Umidade da pelota crua porque interferem negativamente no processo de secagem das pelotas cruas.
- Granulometria das pelotas cruas porque as pelotas heterogêneas interferem negativamente no processo de secagem das pelotas cruas.

- Granulometria das pelotas queimadas da camada de fundo porque as pelotas heterogêneas interferem negativamente no processo de secagem e sinterização das pelotas cruas.

### **3.3 – ALGUNS TRABALHOS EM SECAGEM**

A secagem industrial é descrita pela passagem de ar ou gases de combustão aquecidos sobre os produtos a serem desidratados. Neste contato, a temperatura de condensação da água, a quantidade e a velocidade dos gases de secagem têm caráter fundamental.

O intuito dos pesquisadores da área de secagem é a busca de teorias mais abrangentes a fim de obter equações que se ajustem aos dados experimentais, mas que também propiciem uma interpretação física do fenômeno <sup>[5]</sup>.

As variáveis de controle do processo industrial de desidratação (secagem), em geral, alteram pouco entre os diversos tipos de produtos desenvolvidos. Na conservação de alimentos, por exemplo, a operação de desidratação ou secagem é apontada como um dos procedimentos mais importantes para a diminuição da atividade de água ( $a_w$ ), favorecendo o transporte e a manipulação do produto, além de prolongar sua vida de prateleira <sup>[6]</sup>.

O fluxo de ar é o fator mais importante, principalmente na secagem em baixa temperatura ou ao ar, pois quanto maior for a quantidade de ar forçada a passar pela massa, mais rapidamente a frente de secagem se desloca, diminuindo o tempo de secagem e tornando o processo mais seguro <sup>[7]</sup>.

A secagem de milho em espigas ocorre em secadores estacionários, os quais devem ser corretamente operados, no intuito de evitar a secagem excessiva das camadas inferiores e permitir que a camada superior seque de maneira suficientemente rápida para que não ocorra redução na qualidade das sementes. Desse modo, algumas precauções são necessárias quanto aos fatores que possam influenciar a operação de secagem, tais como o fluxo de ar, temperatura e altura da camada de espigas <sup>[8]</sup>.

Krokida et al. <sup>[9]</sup> verificaram, para maçãs, que a cinética de secagem foi grandemente afetada pelo tamanho das amostras e pela temperatura do ar de secagem. Um modelo empírico de transferência de massa envolvendo uma ampla escala de dimensões das amostras e condições do ar de secagem (temperatura, umidade relativa e velocidade superficial) foi desenvolvido.

Na mesma linha de pesquisa, Kiranoudis et al. <sup>[10]</sup> desenvolveram um estudo com maçã, pêra, kiwi e banana no qual estabeleceram a constante de secagem como uma função das variáveis do processo e verificaram, também, que os parâmetros do modelo considerado foram muito afetados pelas dimensões das amostras e pela temperatura do ar de secagem.

Em sementes, Lasseran <sup>[11]</sup> sugeriu que o fluxo de água do interior para a superfície, durante a secagem, é ocasionado por um derramamento hidrodinâmico sob a ação da pressão total interna e/ou por um processo de difusão resultante de gradientes internos de temperatura e teor de água ou de um gradiente de pressão osmótica.

As sementes, em geral, apresentam o período de secagem à velocidade constante muito curto, ou inexistente, porque, nas condições operacionais de secagem, as resistências às transferências de água encontram-se essencialmente no seu interior, tornando a taxa de evaporação superficial acentuadamente superior à taxa de reposição de água do interior para a superfície <sup>[12,13,14]</sup>.

Cada uma dessas teorias apresenta restrições quanto ao seu uso, de forma que mesmo as mais abrangentes não conseguem descrever todos os mecanismos que estão atuando no transporte de umidade, forçando a busca de mecanismos predominantes ou a utilização de parâmetros efetivos que englobam todos os mecanismos, sem distinção.

Quanto à busca de mecanismos predominantes, esta pode responder de forma correta no que concerne ao comportamento físico do processo, desde que a teoria utilizada represente ao menos o mecanismo que esteja atuando. Porém, este fato não garante que o modelo se ajustará adequadamente aos dados experimentais.

A utilização de modelos matemáticos, para simular o processo de secagem em secadores que operam em alta temperatura, tem se tornado uma ferramenta importante para os engenheiros que trabalham na área de secagem e armazenagem de grãos <sup>[15]</sup>.

A partir de parâmetros efetivos, a possibilidade de um melhor ajuste do modelo é maior, mas a representação do fenômeno físico poderá estar comprometida caso não haja distinção de mecanismos. Modelos desta natureza usados de forma indiscriminada podem trazer interpretações errôneas do processo, estando o parâmetro obtido restrito ao material e às condições operacionais utilizadas na sua determinação.

### **3.4 - EFEITO DAS CONDIÇÕES EXTERNAS SOBRE A SECAGEM**

O modo pelo qual o processo de secagem é influenciado por condições externas como temperatura, umidade e fluxo de ar é obviamente importante. O calor necessário para a evaporação da água pode ser obtido por convecção, radiação ou condução, ou até, o que é mais comum, por uma combinação desses três processos. O que se segue é uma compilação do trabalho teórico do autor Ford <sup>[16]</sup>, que se trata de uma abordagem muito próxima do objetivo deste trabalho.

#### **3.4.1 - Transferência de calor por Convecção**

Na maioria dos casos industriais, a secagem é realizada pela passagem de uma corrente de ar quente sobre a superfície do material úmido. A corrente de ar desempenha duas funções: I - fornece calor necessário para evaporar a água e; II - retira o vapor da superfície, transportando-o para fora do sistema de secagem. Para que a secagem continue a uma taxa razoável, o vapor deve evidentemente ser removido assim que se formar.

Consideremos agora os fatores que influenciam a evaporação de uma superfície de água livre quando exposta a uma corrente de ar paralela a ela. Quando um gás é forçado a passar em uma superfície úmida, *dois tipos de fluxos* devem ser diferenciados e que dependem da velocidade média de fluxo e da distância relativa da superfície da posição considerada. Em velocidades altas, o fluxo de ar será turbulento, ou seja, o fluxo não será estratificado e firme, e em uma única direção. Por outro lado, em velocidades baixas, o fluxo de ar tende a ser em corrente, ou seja, estratificado, como pouca ou nenhuma interferência entre as faixas.

Mesmo quando a velocidade média da corrente de ar que passa sobre a superfície é alta, devido ao atrito, a velocidade será muito pequena em posições próximas à superfície. Na superfície a velocidade tende a zero. Quando o fluxo for turbulento, no seu contato com a superfície há sempre uma fina camada ou camada limítrofe de ar parado. Próximo a essa camada limítrofe, o fluxo tende a ser em corrente, mas torna-se turbulento à medida que aumenta a distância da superfície. De fato, a superfície é protegida por uma camada de ar parado e qualquer quantidade de vapor de água formada nessa superfície só pode ser transferida através desta camada para a corrente de ar principal por difusão lenta. Semelhantemente, se a única fonte de calor disponível para evaporação for o ar de secagem, esse calor tem que ser conduzido através da camada de ar até a superfície a ser seca, já que dentro da camada parada não pode ocorrer convecção.

Quando uma superfície úmida, com isolamento térmico a não ser pelo ar em contato com ela, é submetida a uma corrente de ar de *velocidade, temperatura e umidade constantes*, um taxa constante de evaporação é *rapidamente* atingido, o que mostra que o estado de equilíbrio foi atingido entre o fluxo de calor para a superfície e as demandas energéticas (calor latente) da água que evapora. Quando a evaporação começa, a temperatura na superfície cai, devido a perda de calor na forma de calor latente da água evaporada. Esta queda da temperatura não continua indefinidamente, já que qualquer diferença de temperatura entre a superfície e o ar ao redor faz com que o calor seja transferido do ar para a superfície. À medida que a diferença de temperatura aumenta, o taxa de transferência de calor aumenta também até que se iguale exatamente com o calor latente do vapor de água que está sendo removido da superfície. Neste estágio que a temperatura da superfície fica constante é chamada de *temperatura úmida*.

As condições de equilíbrio são mostradas na Figura 3.3, onde uma corrente de ar de temperatura  $t_a$  está passando sobre a superfície que está sendo seca. Esse ar contém uma certa quantidade de vapor de água que exerce uma pressão parcial  $p_a$ ; a temperatura na superfície de evaporação é a temperatura úmida  $t_w$ ; portanto a pressão do vapor da água na superfície será  $p_w$ , ou seja, a *pressão do vapor de saturação* a uma temperatura  $t_w$ .

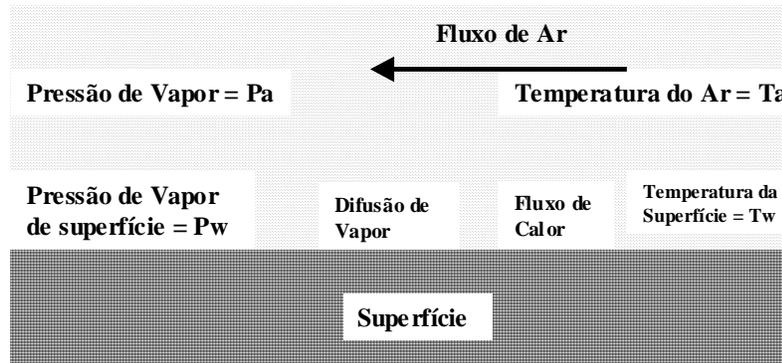


Figura 3.3 – Condições de Equilíbrio para secagem de uma superfície úmida por convecção [16].

A superfície de secagem só elevará o valor da temperatura úmida se estiver comportando-se como uma superfície de água livre, ou seja, durante o período de taxa constante de secagem (unidades: peso/tempo). O fim do período de taxa constante coincide como um aumento de temperatura na superfície, e significa o começo do período de queda da taxa. Durante o primeiro período de queda, a taxa de secagem ainda é proporcional à diferença de temperatura entre a superfície e a corrente de ar mas é sensível às alterações na velocidade do ar; isso evidencia o fato de que, durante este período, a evaporação está acontecendo somente na superfície.

Durante o período de taxa constante, a taxa de evaporação é proporcional à depressão úmida ( $t_a - t_w$ ) da corrente de ar principal somente se essa corrente for a única fonte de calor da superfície, o que na prática quase nunca ocorre. Qualquer energia adicional que a superfície receba por *radiação eletromagnética* direta ou por *condução* através da vibração térmica das moléculas e átomos que constituem a superfície aumentará a temperatura, e, portanto a pressão do vapor, da água naquela posição, o que resulta em um taxa de secagem maior. Assim, a taxa de evaporação não é mais proporcional à depressão úmida ( $t_a - t_w$ ) do ar ao redor.

Aumentar a velocidade da corrente de ar que passa sobre uma superfície úmida leva ao aumento da taxa de evaporação a partir dessa superfície. Qualquer aumento no fluxo de ar diminuirá a espessura da camada de ar parado sobre a superfície de secagem e isso diminuirá a resistência à transferência de calor e vapor através da camada.

Relações empíricas entre a velocidade do ar e o taxa de evaporação já foram propostas. Embora as diferentes fórmulas não sejam exatamente iguais nos seus detalhes, provavelmente devido a diferenças no procedimento experimental, todas indicam que um aumento na velocidade do ar está associado com um aumento proporcionalmente menor na taxa de evaporação; por exemplo, dobrar a velocidade do ar resulta em um *aumento menor* que o dobro na taxa de secagem.

Ao se considerar o efeito da velocidade do ar, é necessário fazer diferença entre fluxo paralelo e fluxo perpendicular à superfície de secagem. Com as outras coisas iguais, o maior grau de turbulência na superfície gerado pelo fluxo perpendicular dá coeficientes de transferência de massa e de calor mais altos do que com o fluxo paralelo e resulta em secagem mais rápida. Deve-se observar que esta diferença entre os dois tipos de fluxo é menos marcante no caso de velocidades mais altas.

### **3.4.2 - Transferência de calor por Radiação**

A maioria dos tipos de secadores usados nas indústrias dependem principalmente da convecção de calor para o material a ser seco, sendo o ar aquecido do sistema de secagem responsável por fornecer a energia necessária para a evaporação. Em certos tipos de secador, no entanto, o ar é eliminado como veículo pelo qual o calor é transferido da fonte principal para a superfície de evaporação, usando-se a energia irradiada de um corpo quente próximo ao material a ser seco.

#### *A Propagação da Radiação*

Para o nosso propósito aqui, a radiação pode ser definida como a transferência de calor de um corpo com alta temperatura para outro com baixa temperatura sem que haja aquecimento do ar entre eles. Em sentido amplo, a energia irradiada está associada com a propagação de ondas eletromagnéticas e, sob condições fixas, um corpo pode emitir radiações em vários comprimentos de onda.

Em problemas de transferência de calor, nos ocuparemos apenas com a faixa de radiação chamada “infravermelho”, com comprimentos de onda dentro da faixa 0,7 – 1000  $\mu\text{m}$ .

### *Secagem por Calor Irrradiado*

A energia da radiação que atinge um corpo é absorvida em sua superfície e convertida em calor. Não é de se estranhar então que um material úmido, quando exposto a radiação térmica, sofra processo semelhante àquele da transferência por convecção. A principal diferença é que, com a radiação, o calor pode ser transferido *mais rapidamente*. A taxa de transferência por convecção a uma superfície *depende* da velocidade e da temperatura do ar. Em muitos casos, no entanto, a evaporação rápida em altas temperaturas associadas com esta rápida transferência de calor danificam o produto sob secagem, e na prática este é o fator que limita o acréscimo de calor.

Em qualquer instalação de secagem, evidentemente, o vapor de água tem que ser removido da superfície de evaporação assim que for produzido. Com a secagem infravermelha, isso é feito por correntes de convecção natural que sobem da superfície ou forçando uma corrente de ar sobre a superfície. No último caso, a superfície esfria se a temperatura do ar é mais baixa do que a da superfície, e a taxa de evaporação tende a diminuir com o aumento na velocidade do ar. Isso é o contrário do que acontece quando a secagem se dá somente por convecção, em que o aumento da velocidade do ar invariavelmente aumenta o taxa de evaporação.

Ao contrário do que ocorre no caso da secagem por convecção, na secagem por radiação a umidade da atmosfera ao redor tem pouco efeito sobre a taxa de evaporação a partir da superfície irradiada, o que é compreensível, pois a quantidade de calor que está sendo transferida depende totalmente da energia térmica recebida da fonte de radiação e não é afetada pelo teor de umidade do ar através do qual a radiação é transmitida. Na secagem por convecção, por outro lado, o calor transferido para a superfície de secagem, e daí a taxa de evaporação, está diretamente relacionado com a umidade do ar na sua vizinhança.

### **3.4.3 - Transferência de calor por Condução**

A transferência de calor a partir de uma fonte externa por convecção e por radiação para um corpo sólido está restrita essencialmente à superfície. Qualquer distribuição posterior do calor a partir dessa superfície através do corpo tem que ser por condução, que é definida como

sendo o fluxo de calor *através* de um corpo aquecido de forma não-homogênea a partir de regiões com temperatura maior para regiões com temperatura menor.

Ao considerarmos o efeito da condução térmica na taxa de secagem, só estamos preocupados com o calor que é transmitido para o local em que a evaporação está acontecendo. É necessário diferenciar entre os casos em que a evaporação está ocorrendo também *dentro* de um corpo poroso e aqueles em que ela ocorre somente a partir de sua superfície. No primeiro caso, todo o calor necessário para a evaporação tem que *alcançar* o interior por condução a partir da superfície. Na evaporação da superfície, as necessidades de calor podem ser satisfeitas por convecção, radiação, condução ou uma combinação dessas três. Dependendo das condições, o calor pode ser conduzido para ou da superfície.

Por exemplo, se a temperatura da superfície for mais alta do que a temperatura inicial do corpo (o que é provável acontecer no caso da secagem infravermelho), o calor será conduzido da superfície e a temperatura do interior aumenta. Da mesma forma acontece com a secagem por convecção, se a temperatura inicial do corpo for menor do que a temperatura úmida do ar, o calor é conduzido para longe da superfície sob secagem e assim, quando a secagem começa, há um período durante o qual a temperatura do corpo e da superfície aumentam. Para o período durante o qual a temperatura da superfície sob secagem aumenta, a taxa de evaporação aumenta até um valor constante que depende da depressão úmida ( $t_a - t_w$ ) do ar.

### **3.5 - O MECANISMO INTERNO DE SECAGEM**

O comportamento geral da secagem de sistemas com partículas e água é mais ou menos o mesmo e independe do material. A secagem pode ser dividida em dois estágios: i-para começar, a evaporação ocorre somente na superfície do objeto, sendo que a água evaporada é substituída até certo ponto por água líquida que migra para a superfície. ii-à medida que a secagem prossegue, a água líquida não consegue se mover mais até a superfície e, assim, tem que evaporar dentro do sistema de poros, havendo difusão do vapor resultante para a superfície antes que possa ser removido.

A migração de água através do sistema, como líquido ou como vapor, pode ser considerada como o “mecanismo interno” da secagem. As forças que produzem essa transferência de massa podem surgir de várias formas e sua importância relativa depende, em grande parte, do *tipo* de material e do teor real de umidade do sistema. Por exemplo, é necessário diferenciar um material granular, cuja superfície dos grãos interage físico-quimicamente pouco (caráter hidrofóbico) com a água e outro que interage fortemente (caráter hidrofílico).

### **3.5.1 - Adsorção de água em superfícies sólidas**

Em qualquer superfície sólida umedecida pela água, há interação entre valências não-satisfeitas dos átomos da superfície do sólido e a molécula polar de água. Esta interação cria na superfície de cada partícula uma camada adsorvida (imobilizada) de água na qual as moléculas de H<sub>2</sub>O estão alinhadas, organizadas e *presas* à superfície. Esta água chamada “de adesão” difere da água normal pois sua pressão de vapor é *menor* e sua viscosidade é muito *maior*.

A resistência mecânica desta camada de água adsorvida é mantida varia de acordo com o tipo de superfície. As moléculas de água tendem a ser mais fortemente adsorvidas na superfície de uma substância com a qual a água tem semelhanças químicas. Sílica gel, por exemplo, adsorve água bem devido aos seus nano e micro-poros revestidos com grupos hidroxila, estes com forte afinidade por moléculas de água. A água é também fortemente adsorvida na superfície do quartzo, pois as moléculas de água formam ligações (pontes) de hidrogênio com os átomos de oxigênio disponíveis.

### **3.5.2 - Alterações de Volume de Corpos Plásticos durante a Secagem**

Uma peça cerâmica úmida consiste de partículas discretas separadas pela água. As moléculas de água próximas a uma partícula de argila são fortemente atraídas para sua superfície, e essa água, devido à sua alta viscosidade e baixa pressão de vapor, pode ser chamada de “água de adesão”.

A Figura 3.4 (A) representa um corte transversal através da argila plástica e mostra que as partículas estão separadas.

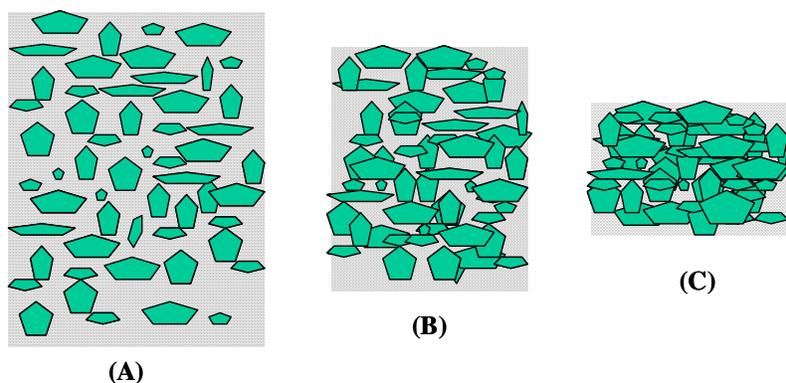


Figura 3.4 - Corte transversal de um sistema argila-água em diferentes estágios de secagem<sup>[16]</sup>.

Qualquer água evaporada da superfície é substituída por uma água “não-adesiva” que migra do interior, e, conseqüentemente, as partículas se ajuntam ainda mais e a massa como um todo se contrai. Durante este estágio de secagem, a diminuição de volume é obviamente igual ao volume de água evaporado.

Finalmente, as partículas de argila, cada uma ainda rodeada por sua fina camada de “água de adesão”, entram em contato, Figura 3.4(B). A continuidade do processo de secagem resulta na evaporação da água mantida na rede de poros formada pelas partículas e esta água é então substituída pelo ar, que começa a penetrar no sistema na superfície de secagem, Figura 3.4(C). A remoção desta água dos poros não pode, por si só, produzir alteração volumétrica no sistema; mas durante este estágio a massa geralmente apresenta uma leve contração. As causas destas alterações no tamanho não são completamente entendidas, mas podem ocorrer devido ao fato de que às camadas de “água de adesão” ao redor das partículas ficarem mais finas à medida que a água dos poros é evaporada e a pressão de vapor dentro do poro for reduzida. Uma outra causa pode ser uma pequena reorganização das partículas, maior empacotamento e densificação, produzido pela tensão superficial que age nos capilares entre os poros.

### 3.5.3 - Distribuição e Movimento da Umidade

Durante a secagem, a distribuição de umidade dentro de um corpo é importante, particularmente se queremos evitar trincas e deformações. A distribuição de água muda à medida que a secagem avança e depende do estado físico em que a água se encontra. A água pode migrar por todo o sistema como líquido ou como vapor, sendo que a primeira forma

ocorre durante o período de taxa constante e a segunda durante o período de taxa decrescente. É então conveniente considerar os dois períodos em separado.

#### *Durante o período de taxa constante*

A evaporação a partir da superfície reduz o teor de umidade na superfície. Esta água é substituída por líquido que migra da camada logo abaixo da superfície; que, por sua vez, é substituído por água proveniente de uma camada mais abaixo e assim sucessivamente. Desta forma, a evaporação a partir da superfície acaba por reduzir o teor de umidade em todo o sistema.

#### *Durante o período de taxa decrescente*

Ao fim do período de taxa constante, o teor de umidade da superfície da peça atinge o ponto de saturação. O teor de umidade entre as partículas vizinhas e o sistema de poros está completamente saturado de água. Após este estágio, a água líquida pode continuar por algum tempo a chegar até a superfície *proveniente do interior* da peça. A migração continua de água líquida em direção à superfície de secagem, juntamente com a diminuição do taxa de evaporação durante o primeiro período de taxa decrescente, o que causa um desnível na curva de distribuição de umidade neste estágio. Assim, quando o segundo período de taxa começar, o sistema de poros na superfície e próximo a ela não vai ter água suficiente para continuar com a migração de líquido a água que migrar depois disso o fará sob a forma de vapor.

Quando a água estiver evaporando dentro da estrutura porosa formada pelo esvaziamento progressivo dos interstícios, a tensão que ocasiona a evaporação é determinada pela diferença entre a pressão de vapor e a umidade no ar de secagem.

### **3.6 - SECAGEM DE PELotas DE MINÉRIO DE FERRO POR CONVECÇÃO <sup>[3]</sup>**

Durante a secagem, a umidade contida nas pelotas cruas é evaporada através do fluxo de gases quentes que atravessam a camada de pelotas. A água que se encontra nas pelotas cruas sai sob forma de vapor dos seguintes locais:

1. A água encontrada nos poros e capilares.
2. No minério poroso, a água pode estar *dentro* dos poros dos grãos individuais do minério.

3. A água quimicamente combinada como hidrato (Goethita) ou outros minerais que acompanham o óxido de ferro.
4. A água dos aglomerantes, tais como bentonita e as argilas.
5. A água quimicamente combinada como hidrato nos aglomerantes que formam hidratos, por exemplo,  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{Mg(OH)}_2$ .

A umidade contida nas *pelotas verdes* pode assim ser composta de água contida nos minérios e matérias-primas ou da água adicionada no pelotamento.

A maior parcela de água contida nas pelotas cruas evapora a  $100^\circ\text{C}$ . Os minérios hidratados perdem sua água de cristalização à temperatura elevada. Como exemplo de minério hidratado temos os limoníticos ou goethíticos que possuem a fórmula estrutural  $\text{FeO(OH)}$  ou  $\text{Fe}^{3+}\text{O(OH)}$ , com 90,0% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 10,0% de  $\text{H}_2\text{O}$ .

Durante a secagem da camada de pelotas de uma determinada altura, ocorrem duas operações: i-secagem em cada pelota individualmente; ii-secagem através da camada de leito de pelotas.

### **3.6.1 – Secagem de Pelota Individual**

A secagem começa quando o ar ou os gases de combustão aquecidos flui sobre as pelotas cruas úmidas. Neste contato, a temperatura de condensação da água, a quantidade e a velocidade do gás de secagem têm papel importante. A umidade contida nas pelotas cruas começa evaporar uniformemente na superfície inteira. Após esta evaporação, a água do interior da pelota é suprida pelos capilares à superfície. Durante este procedimento, a velocidade de secagem permanece constante e pode-se dizer que a secagem é controlada pela transferência de massa através da camada limite e a taxa de secagem é constante.

Contudo, se a velocidade de secagem na superfície for maior do que a emissão da água do interior da pelota, à frente de secagem penetra no interior da pelota. O vapor de água que se forma tem que percorrer uma distância *sempre crescente* através dos capilares secos até que alcance a superfície da pelota onde pode se expelido junto com o fluxo de ar. Durante esta fase de secagem, a velocidade de secagem é decrescente. Assim que a água do capilar evaporar, o procedimento de secagem está terminado.

Nessa segunda etapa, a secagem é controlada pela difusão do vapor de água no interior da pelota e a taxa de secagem passa a ser decrescente.

Se a pelota contiver água higroscópica ou quimicamente combinada, o procedimento de secagem continua somente quando a temperatura do meio de secagem estiver alta o suficiente para dissociar estes compostos. A velocidade desta terceira fase de secagem é ainda menor que na segunda fase. Nessa terceira etapa, a secagem é controlada pela transferência de calor até a frente de vaporização, sendo a taxa calculada admitindo-se que apenas uma fração do calor transferido para a pelota é utilizada na secagem.

A Figura 3.5 ilustra estas etapas.

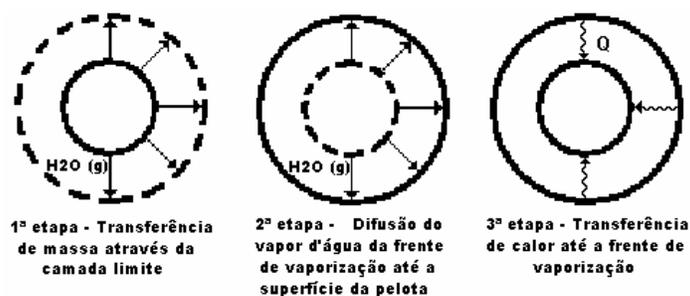


Figura 3.5 - Mecanismo de controle da secagem da pelota. [17]

O procedimento de secagem de uma pelota crua, que contém também a água higroscópica, foi descrito por Krischer e por Jaeschke conforme modelo proposto na Figura 3.6. A velocidade de secagem foi plotada na ordenada. Ela é medida pela quantidade de água evaporada, referente à superfície de secagem, durante um dado período. O tempo foi plotado sobre a abscissa para as várias fases da secagem.

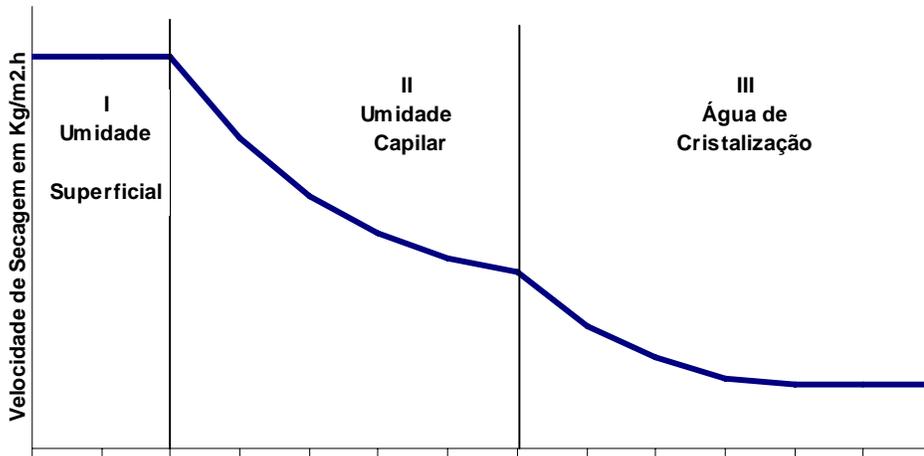


Figura 3.6 – Diagrama de secagem do material úmido <sup>[3]</sup>.

Existem três diferentes períodos de velocidade de secagem conforme indicadas nas três partes da curva:

*Período I:* A água evaporada por velocidade constante ao longo de toda a superfície exterior da pelota. Este procedimento continua enquanto a umidade no interior da pelota é impulsionada pela tensão superficial e a força dos capilares para a superfície da pelota. A velocidade constante de secagem é influenciada pelos seguintes fatores:

- Temperatura e taxa de umidade (ponto de orvalho) dos gases de secagem;
- Volume e velocidade dos gases de secagem, por unidade de tempo, sobre a superfície da pelota;
- Área superficial da pelota.

Este período é caracterizado pela evaporação da água de superfície.

*Período II:* Se a umidade do interior da pelota é emitida para a superfície mais lentamente do que a água é evaporada, o movimento do nível da evaporação (nível de secagem) move-se para o centro da pelota. A água então evapora dentro da pelota, à distância a ser coberta pelo vapor de água torna-se mais longa e a velocidade de secagem diminui. É determinada agora pelo:

- Pressão no interior dos capilares;
- Diâmetro da pelota.

O período II de é caracterizado pela evaporação dos capilares do interior da pelota. Após este estágio, as pelotas estão normalmente secas.

*Período III:* Se a pelota contém outra umidade além da água de superfície e dos capilares, o procedimento de secagem continua sob outras circunstâncias. Neste caso, a temperatura da secagem é importante para a dissociação dos compostos. Esta dissociação tem que ser considerada e conseqüentemente o aumento no tempo necessário para a operação de secagem. É no período III que a evaporação da água higroscópica ou quimicamente combinada ocorre.

Em geral, observa-se que a secagem se dá em duas etapas: na primeira, sob condições isotérmicas, a taxa de secagem é constante; na segunda, é decrescente <sup>[17]</sup>.

Hasenack <sup>[18]</sup> propõem um mecanismo pelo qual na primeira etapa a secagem é controlada pela transferência de massa através da camada limite. Na segunda etapa o controle é feito pela difusão do vapor d'água no interior da pelota e numa terceira etapa, o controle seria realizado pela transferência de calor até a frente de vaporização no interior da pelota.

Thurlby <sup>[19]</sup> admite uma primeira etapa controlada pela transferência de massa através da camada limite e uma segunda etapa controlada pela transferência de calor. Como Thurlby <sup>[19]</sup> supõe que a temperatura é mesma em toda pelota, no seu modelo à segunda etapa é considerada tomando-se uma fração do calor transferido para a pelota.

Voskamp <sup>[20]</sup> utiliza um modelo mais simplificado baseado unicamente na transferência de calor. Na primeira etapa todo calor transferido para a pelota é utilizado na secagem, enquanto na segunda etapa apenas uma fração do calor transferido para a pelota, decrescente com o tempo, é utilizado na secagem da pelota.

### **3.6.1.1 – Efeito da secagem de uma pelota individual**

O termo umidade não é uniformemente definido na literatura. Uma versão se refere à quantidade de água da substância seca. Na prática, a substância úmida é freqüentemente usada como valor de referência.

A umidade é definida de acordo com a seguinte fórmula:

$$Umidade = [(P_u - P_s) \times 100] / P_u \quad (3.1)$$

$P_u$  = Massa das pelotas úmidas

$P_s$  = Massa das pelotas secas

A Figura 3.7 mostra o efeito da secagem de uma pelota individual feita numa termo-balança. O minério hematítico com 67,5% de Fe, 1,2 %  $Al_2O_3$  e 0,7%  $SiO_2$ , 1,2% de perda ao fogo, que foi pelletizado com 0,8% de bentonita e 8.2% de água, e seca lentamente em uma estufa com balança, sob fluxo de ar a 400°C.

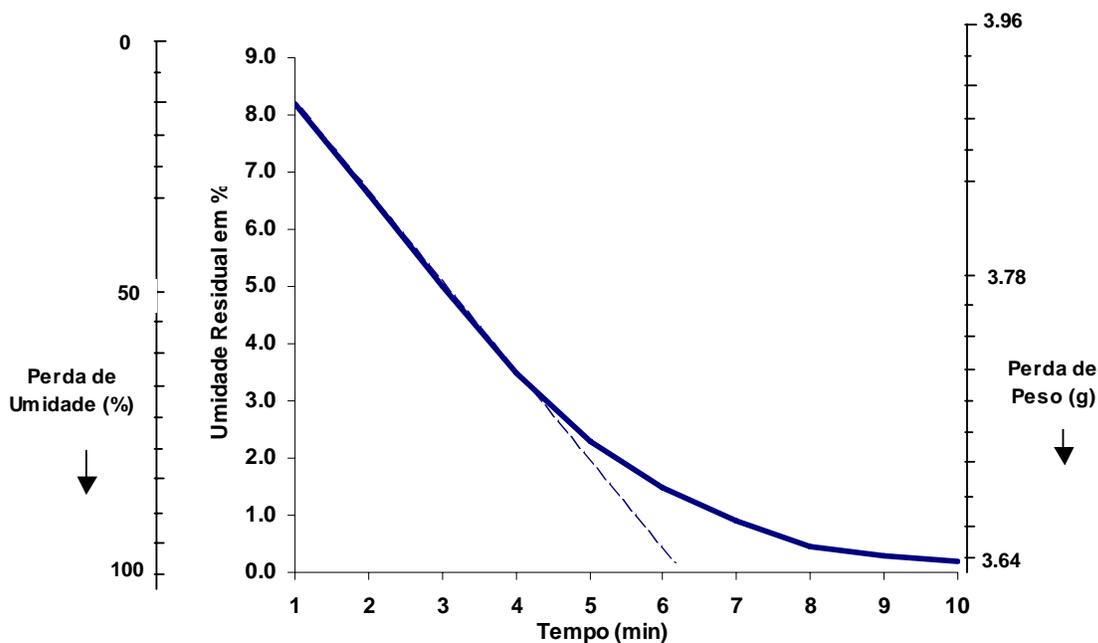


Figura 3.7 – Estágio de secagem do material úmido [3]

A ordenada esquerda mostra a taxa de água restante na pelota bem como a perda de umidade em porcentagem, enquanto a ordenada direita indica a perda em peso. Até uma certa umidade, aproximadamente 67% e durante os primeiros 4,5 minutos a curva de secagem é linear. A velocidade de secagem até esta umidade é constante e representa aproximadamente 2/3 da

água da superfície da pelota. Após este ponto, a secagem prossegue mais lentamente até que a umidade do centro da pelota evapore.

O calor do gás de secagem deve ter o volume e temperatura adequados ao processo de secagem para que o movimento da água e vapor através dos capilares não afete mecanicamente a pelota conformada. Se a formação do vapor de água for muito rápida, rachaduras/trincas ou mesmo crepitação podem ocorrer (temperatura de choque).

As propriedades do minério, tamanho de grão, distribuição granulométrica, a densidade e a compactação dos grãos possuem um papel importante na secagem de pelotas cruas. Embora o procedimento de secagem de uma pelota individual possa ainda ser examinado, as condições de secagem de pelotas cruas na camada é um fenômeno complexo. Trata-se de um sistema e existe um grande número de fatores que afetam a secagem.

### **3.6.2 – Secagem de uma Camada de Pelota**

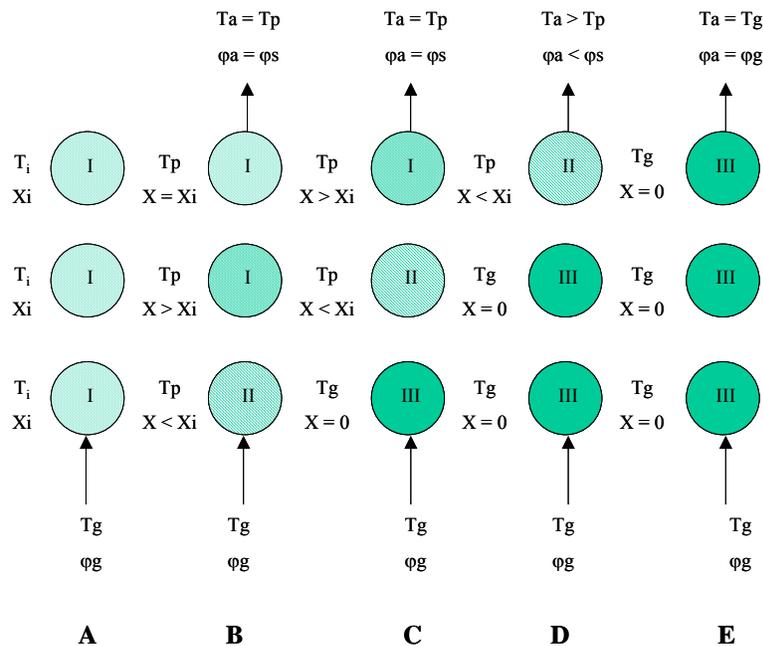
Na Secagem Descendente os gases de secagem são sugados através da camada da pelota em sentido descendente. O fluxo do gás pode também ser forçado em sentido ascendente através da camada de fundo das pelotas (Secagem Ascendente). Uma combinação dos métodos acima também é possível e, é adotada na prática pela Samarco S.A. Quando o fluxo de ar de secagem encontra a primeira camada da pelota, absorve umidade até sua saturação (ponto de orvalho). Durante esta operação, o ar de secagem perde temperatura ficando abaixo da temperatura de evaporação.

Este ar saturado água-vapor molha e resfria as camadas superiores. Neste momento, parte da água da primeira camada condensa na segunda camada, que é, ao mesmo tempo, aquecida. A energia requerida para a evaporação da água das pelotas das camadas superiores está sendo suprida pelos gases de secagem quentes do processo. Mais uma vez, os gases esfriam outra vez abaixo da temperatura de evaporação. E assim sucessivamente.

Neste processo de secagem, um umedecimento superficial pode acontecer enfraquecendo a estrutura da pelota, podendo assim, ocorrer uma redução temporária da resistência da pelota.

Durante a Secagem Descendente, a camada inferior pode ser deformada de tal maneira que o leito de pelotas torne-se impermeável e impeça a passagem dos gases. Durante a Secagem Ascendente o ar de secagem flui de baixo para cima através do leito de pelotas. Nesta ocasião as gotículas de água podem condensar sobre a superfície do leito.

Num processo de secagem ascendente e descendente é possível fornecer maior resistência às camadas inferiores. A Figura 3.8 mostra um diagrama com a variação do teor de água na camada.



$T_i$  = Temperatura inicial das pelotas cruas  
 $T_g$  = Temperatura dos gases de secagem  
 $X_i$  = umidade inicial das pelotas cruas  
 $\phi_g$  = Umidade do gás de secagem  
 $\phi_s$  = Umidade do gás saturado

$T_a$  = Temperatura dos gases de saída  
 $T_p$  = Temperatura da superfície das pelotas durante secagem  
 $X$  = umidade das pelotas durante a secagem  
 $\phi_a$  = Umidade do gás de saída

Figura 3.8 - Variação do conteúdo de água numa camada de pelotas cruas durante a secagem [3]

No estágio inicial (A), toda a camada está com a umidade ( $X_i$ ) e temperatura ( $T_i$ ) uniformes. Na etapa seguinte (B), o gás com a temperatura  $T_g$  e uma umidade  $\phi_g$  flui no sentido ascendente do leito. A umidade da parte inferior do leito é expelida das pelotas e o teor de

umidade das pelotas da parte inferior do leito reduz. O ar de secagem fica saturado com vapor e ao entrar em contato com a parte superior do leito (que está na mesma temperatura inicial) condensa, deixando as pelotas muito úmidas. A temperatura da superfície das pelotas aumenta de  $T_i$  para  $T_p$  pela condensação do vapor e o gás de exaustão fica saturado. Na etapa seguinte (C), a camada inferior está seca, a camada do meio está parcialmente seca e a camada superior está muito úmida, e o gás de exaustão continua ainda saturado. Nas etapas (D) e (E), o leito tende a ficar completamente seco e a temperatura do gás a igualar-se com a temperatura das pelotas. Ao final deste estágio, a temperatura e umidade do ar de entrada devem ser iguais à temperatura e umidade do gás de exaustão. Esta seria a condição ideal.

### **3.6.2.1 - Fatores que Influenciam na Secagem da Camada de Pelotas Cruas**

Os fatores que influenciam no processo de secagem são: temperatura, velocidade do fluxo do ar (pressão das caixas de vento da região da secagem), tempo de secagem e o diâmetro da pelota crua. Estes fatores não somente influenciam na qualidade das pelotas cruas, mas também influencia o processo de sinterização, a qualidade física da pelota queimada e capacidade produtiva do forno. Listamos abaixo a importância de cada uma destas variáveis:

- Temperatura: A temperatura da secagem é limitada pela resistência ao choque térmico. Quanto maior a diferença de temperatura entre o gás de secagem e a pelota crua, menor é o tempo requerido para a secagem (Figura 3.9).
- Velocidade do fluxo do ar (pressão das caixas de vento da região da secagem): é um fator que interfere no dimensionamento dos ventiladores nas duas regiões de secagem. O dimensionamento dos ventiladores para cada minério é feito através de testes em escala de laboratório.
- Diâmetro da Pelota Crua: O diâmetro e a granulometria das pelotas que alimenta o forno de sinterização é importante no processo de secagem e queima. Conforme já mencionado no item 3.2, pelotas com granulometria heterogênea podem afetar negativamente a permeabilidade da camada de pelota crua (Figura 3.10).

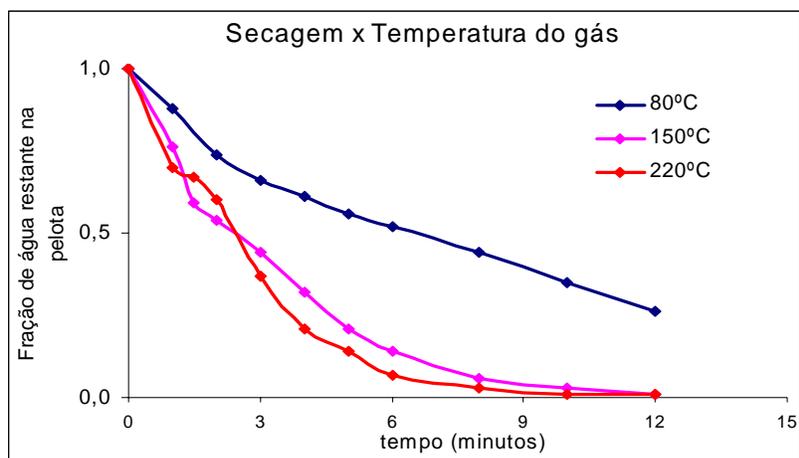


Figura 3.9 – Influência da Temperatura do gás sobre a secagem<sup>[17]</sup>

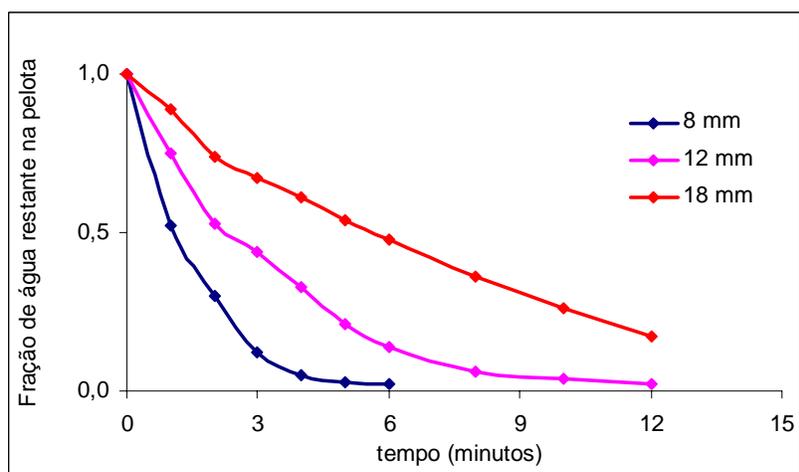


Figura 3.10 – Influência do diâmetro das pelotas sobre a secagem<sup>[17]</sup>

### 3.6.3 - Secagem Ascendente e Descendente

Nestas etapas, a umidade contida nas pelotas cruas que alimentam o forno de sinterização é evaporada através do fluxo de gases quentes que atravessa o leito de pelotas.

Existem três zonas no forno de pelotização na planta da Samarco responsáveis pela secagem:

- Zona de secagem ascendente I (figura 3.11)
- Zona de secagem ascendente II (figura 3.12)
- Zona de secagem descendente (figura 3.13)

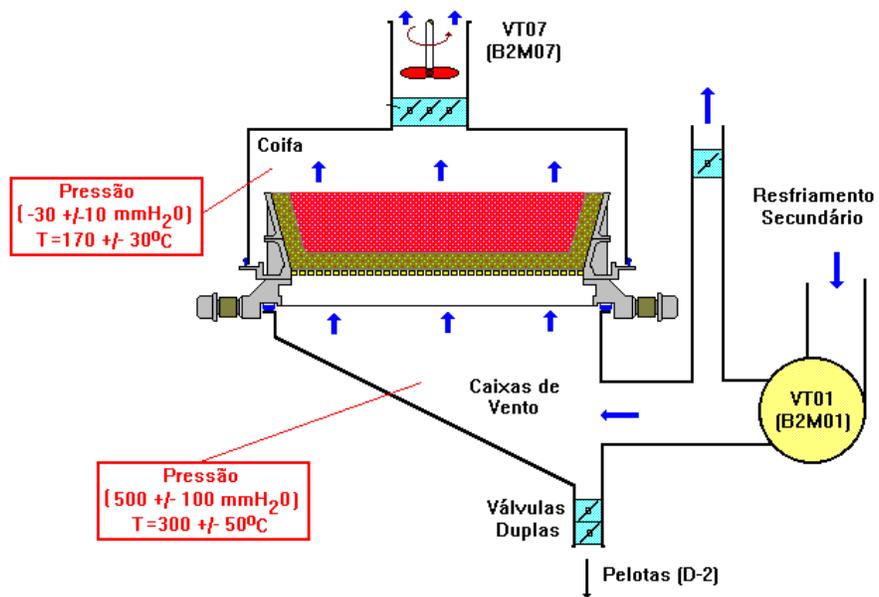


Figura 3.11 – Zona de Secagem Ascendente I do Forno de Pelotização<sup>[21]</sup>

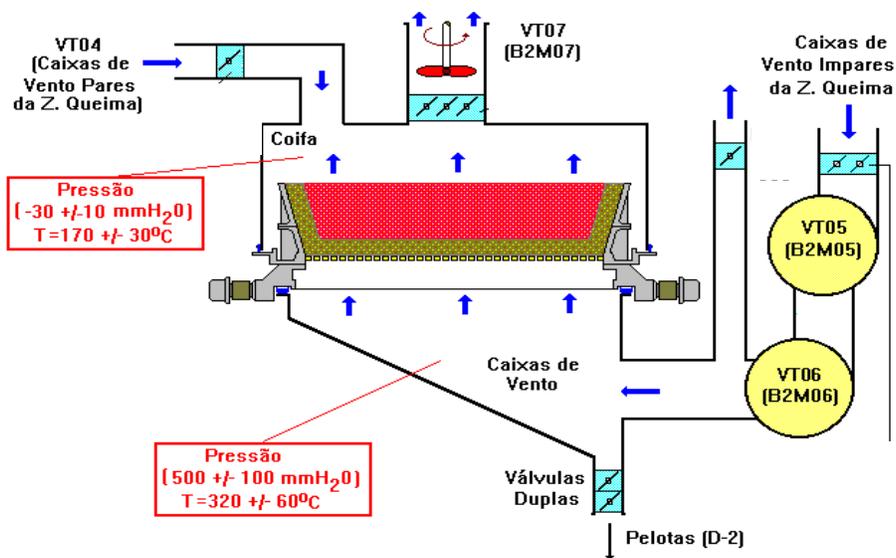


Figura 3.12 – Zona de Secagem Ascendente II do Forno de Pelotização<sup>[21]</sup>

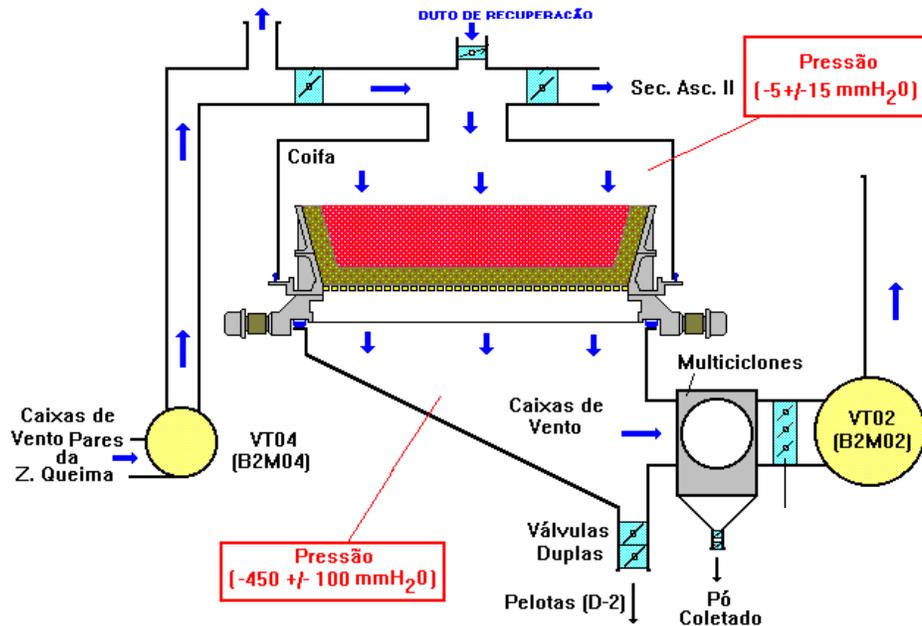


Figura 3.13 – Zona de Secagem Descendente do Forno de Pelotização <sup>[21]</sup>

Existem razões para que a seqüência de secagem nos fornos de pelotizações siga sistematicamente primeiro uma secagem ascendente e depois uma secagem descendente.

Sob o efeito do fluxo de gases quentes que atravessam a camada de pellets no sentido ascendente, aquelas que ficam úmidas se mantêm nas camadas superiores de pellets. Por ficarem na região superior, as pellets mais úmidas não precisam suportar um peso excessivo, o qual as levaria a se deformarem, impermeabilizando o leito de pellets. Um outro motivo é o fato de que as pellets em contato com temperaturas elevadas estão sujeitas ao choque térmico. Ao entrar na zona de pré-queima a temperatura elevada levaria as pellets a trincar ou degradar, devido ao desprendimento rápido do vapor de água do interior da pelota <sup>[3]</sup>.

Quanto maior a quantidade de água retirada da superfície da pelota até a mesma alcançar a temperatura de 100°C, menor será a quantidade de água contida no interior da pelota, reduzindo assim o tempo de secagem.

Mantendo-se uma velocidade baixa do desprendimento de vapor pode-se evitar uma degradação maior das pelotas. Uma vez que a pelota de topo esteja seca, a temperatura de aquecimento pode ser aumentada, proporcionando uma maior área de queima.

Quanto maior a temperatura do ar ascendente, maior será a quantidade de água removida das pelotas das camadas inferiores e intermediárias, mas esta quantidade de água irá se depositar na camada de topo e se não tiver um tempo expressivo não será removida pelo o ar ascendente. Esta condição irá, em alguns casos, prejudicar a permeabilidade do leito de pelota, e na maioria das vezes o tempo de secagem descendente tem que ser prolongado.

O ponto crítico da secagem descendente é garantir que a taxa de transferência de calor para a pelota seja suficiente baixa a fim de evitar que o vapor seja liberado rapidamente do centro da pelota. Mantendo-se baixa a velocidade inicial (pressões na coifa da secagem descendente), o dano às pelotas às altas temperaturas da etapa de pré-queima pode ser evitado.

Portanto, existe para cada tipo de minério e para cada tipo de pelota (diferentes dosagem de insumos), uma temperatura, pressão e tempo de secagem ascendente e descendente.

#### **3.6.4 - Pré-Queima**

A etapa de pré-queima (ou de pré-aquecimento) é a fase intermediária às fases de secagem e queima, onde as pelotas são expostas a um fluxo descendente de gases a temperaturas da ordem de 500 a 900°C. Nestas condições, as pelotas sofrem um aquecimento adequado antes de serem submetidas às rigorosas temperaturas de sinterização na zona de queima. Nesta zona ocorre a decomposição dos hidratos, carbonatos ou sulfatos. Neste estágio de temperatura do processo de sinterização todos os óxidos de ferro, com exceção da hematita, são convertidos a óxidos.

A zona de pré-queima encontra-se esquematizada na Figura 3.14.

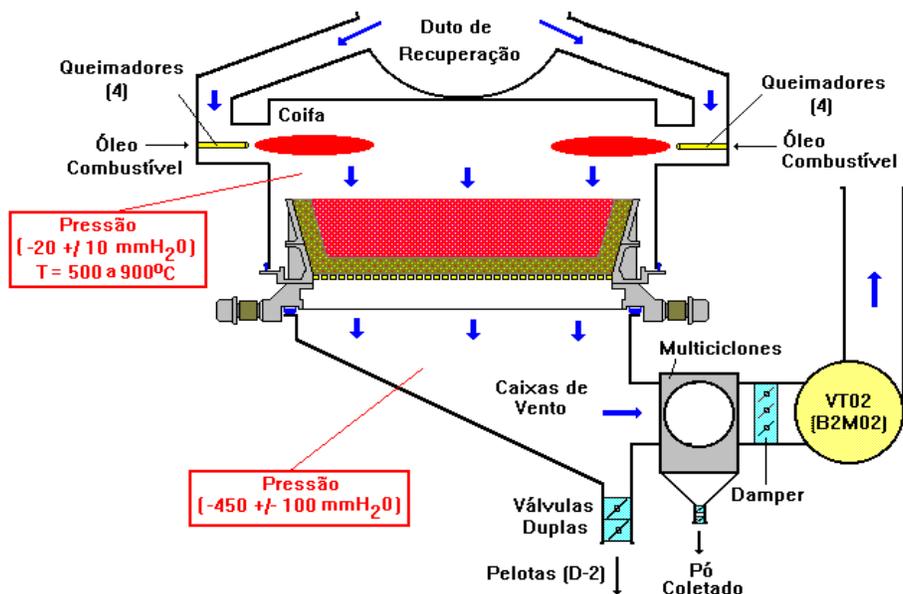


Figura 3.14 – Zona de Pré-Queima no Forno de Pelotização <sup>[21]</sup>

Esta é uma etapa crítica na *formação de trincas e degradação de pelotas* como foi confirmado por Cota <sup>[2]</sup> nos testes realizados no pot grate.

Nestes estudos observou-se que o efeito da degradação ficou mais evidente quando a umidade da pelota crua não foi totalmente removida.

Observou-se uma grande quantidade de trincas térmicas após esta etapa. Segundo Cota <sup>[2]</sup> à medida que a superfície do pellet feed aumenta, para o mesmo nível de umidade, a quantidade de trincas aumenta. Este fato pode ser facilmente observado no item 3.6.1 na qual Meyer <sup>[3]</sup> analisou a secagem de uma pelota individual. A dificuldade de retirada da água nos capilares após a secagem superficial de uma pelota individual é aumentada quando ocorre uma redução na porosidade da pelota.

Se na etapa de secagem ascendente e descendente esta água, proveniente da umidade ideal para o processo de aglomeração, não for toda retirada, ao entrar no processo de pré-queima, processo este que possui temperaturas elevadas, as chances de surgimento de trincas aumentam muito.

Neste mesmo estudo, Cota <sup>[2]</sup> observou que ao aumentar a temperatura da pré-queima e manter todas as outras variáveis constantes, o efeito da degradação bem como a quantidade de trincas aumenta consideravelmente.

### **3.6.5 – Investigando a secagem e o estudo de M. Cota <sup>[2]</sup>**

Buscando avaliar a eficiência de secagem no processo de sinterização no forno II da Samarco Mineração S/A, foram realizados experimentos no pot grate nos quais variou-se a pressão e temperatura dos gases de secagem ascendente e descendente com objetivo de identificar as causas prováveis da degradação da pelota queimada no pátio dos clientes, após o embarque.

Nestes estudos observou-se que o efeito da degradação ficou mais evidente quando a superfície específica ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) do minério aumentou. Este aumento de superfície específica levou a um aumento da densidade a granel (*bulk density*) da pelota crua e conseqüentemente da produção.

Na Samarco Mineração S/A, este aumento de superfície específica se deve à introdução de um novo processo, o *roller press*.

Foi observado, após interromper o teste no pot grate na secagem ascendente I, que a umidade foi transferida para a parte superior do leito e que nesta região ocorreu uma perda de resistência das pelotas. As pelotas apresentavam-se plásticas e deformadas, com a presença de trincas.

Esta mesma conclusão chegou Meyer <sup>[3]</sup> no experimento realizado em tubo de vidro. A geração de lama ou polpa é agravada quando a velocidade do ar quente é excessivamente alta, quando a temperatura do gás também é muito alta e o tempo de secagem for muito longo.

Após a etapa de secagem ascendente II, interrompeu-se novamente o processo de secagem e avaliou-se a temperatura das pelotas nas camadas. Foi observado que a parte inferior do leito estava completamente seca (0,52%), entretanto a parte superior apresentava uma umidade

elevada (8,45%). As pelotas apresentavam-se deformadas e com a presença de trincas de resiliência.

Prosseguindo o experimento, interrompeu-se o teste no final da secagem descendente. Foi observado que a parte inferior do leito estava completamente seca (0,50%), entretanto a parte superior e intermediária apresentava ainda umidade (5,43%, 5,85%).

Outros testes foram realizados seguindo o mesmo procedimento, o seja, interrompendo o teste em cada etapa de secagem, mas variando também a temperatura e pressão de trabalho nos dutos de secagem.

Após todos os testes realizados, observou que o processo de secagem nos fornos de pelletização interfere na integridade física das pelotas queimadas, podendo gerar trincas e deformações.

Buscando entender melhor este processo de secagem e gerar um maior conhecimento do fenômeno de secagem em fornos de sinterização de pelotas de minério de ferro, o presente estudo investigou a capacidade do modelo estatístico em evidenciar interações entre as variáveis estudadas e como isto ajudar na compreensão do processo de secagem de pelotas.

### 3.7 – EXPERIMENTOS FATORIAIS

O Planejamento de Experimentos é constituído de um conjunto de técnicas estatísticas que proporcionam um método estruturado para planejar, executar e analisar experimentos. O Planejamento de Experimentos é usado para determinar qual a combinação ótima de variáveis na obtenção da resposta desejada. A resposta é a *variável dependente*, enquanto as variáveis que influenciam, são as *variáveis independentes*, denominadas de *fatores*. Os principais tipos de Planejamentos de Experimentos são: *Fatorial e Superfície de Resposta* <sup>[22]</sup>.

R. Fisher, citado por Juran <sup>[23]</sup>, no início da década de 20 do século passado, idealizou uma metodologia para variar todos os fatores simultaneamente, o que ele chamou de Planejamento Fatorial. O Planejamento Fatorial permite estimar os efeitos de vários fatores e suas interações sobre a variável resposta, para isto, devemos selecionar os níveis em que cada fator irá atuar. O planejamento fatorial permite fazer experimentos com todas as possíveis combinações entre níveis dos fatores.

Por um planejamento fatorial cada tentativa completa ou *réplica* do experimento, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigados <sup>[24]</sup>.

A técnica estatística de “*superfície de resposta*” é uma técnica de otimização de experimentos baseada em planejamentos fatoriais e foi introduzida por G.E.P.Box <sup>[25]</sup> nos anos cinquenta do século XX. O experimento consiste na observação isolada de cada uma das possíveis combinações de níveis, os quais podem ser formados a partir dos diferentes fatores <sup>[26]</sup>.

### 3.7.1 – Analisando um Planejamento do tipo “Superfície de Resposta”

Quando vários fatores são de interesse em um experimento, um planejamento fatorial de experimentos deve ser utilizado. Conforme já mencionado no item 3.6, os fatores são variados conjuntamente nesses experimentos. Assim, se houver dois fatores *A* e *B*, com *a* níveis do fator *A* e *b* níveis do fator *B*, então cada *réplica* conterà todas as *ab* combinações de tratamento.

A replicação é a repetição de uma observação ou medição de forma a aumentar a precisão ou fornecer os meios para se medir esta precisão. Proporciona uma oportunidade para que se minimizem os efeitos de fatores incontroláveis ou de fatores desconhecidos pelo experimentador e, assim como a aleatorização, atua como ferramenta diminuidora de tendências. A réplica também ajuda a detectar erros graves nas medições.

O efeito de um fator é definido como a variação na resposta, produzida pela mudança de nível do fator. Ele é chamado *efeito principal* porque ele se refere a fatores primários no estudo. Em alguns experimentos, a diferença na resposta entre os níveis de um fator não é a mesma em todos os níveis dos outros fatores. Quando isso ocorre, há uma *interação* entre os fatores.

O conceito de interação pode ser ilustrado graficamente de várias maneiras. Tais gráficos são chamados de *gráficos de interação entre dois ou mais fatores, de Pareto e gráficos tridimensionais de superfície de resposta*.

Os gráficos de interação entre dois ou mais fatores são freqüentemente úteis na apresentação dos resultados dos experimentos. Muitos programas computacionais usados para analisar dados a partir de experimentos planejados construirão esses gráficos automaticamente.

Quando as linhas plotada dos dois fatores não se cruzam, indica que os fatores não interagem significativamente. Quando as linhas dos dois fatores se cruzam, indica a interação dos fatores<sup>[24]</sup>. Estas observações podem ser exemplificadas nos gráficos dos diagramas de interações da temperatura e pressão da CPCS (resistência à compressão das pelotas cruas e secas) da camada intermediária e superior Figuras 3.15 e 3.16. Observa-se que no gráfico da

Figura 3.15 as linhas dos dois fatores não se cruzam, indicando que os fatores temperatura e pressão não se interagem, sendo que no gráfico da Figura 3.16 as linhas dos dois fatores se cruzam, indicando interação dos fatores temperatura e pressão.

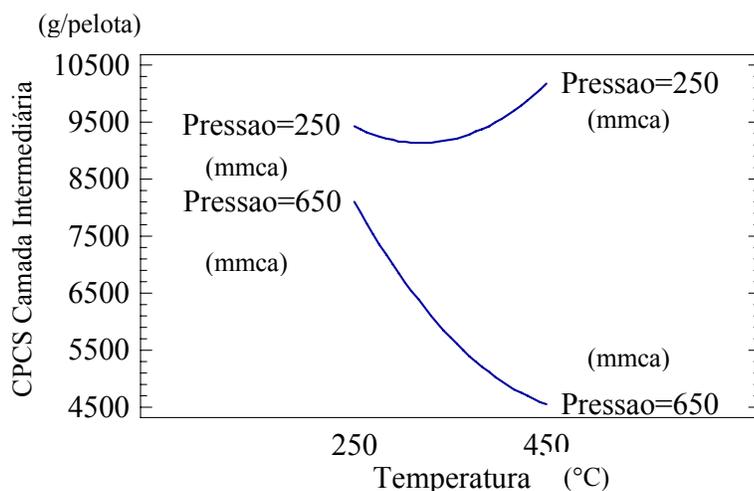


Figura 3.15 – Exemplo de diagrama de interação para a CPCS (resistência a compressão das pelotas secas) da camada intermediária, em função da temperatura e pressão utilizando o statgraphics.

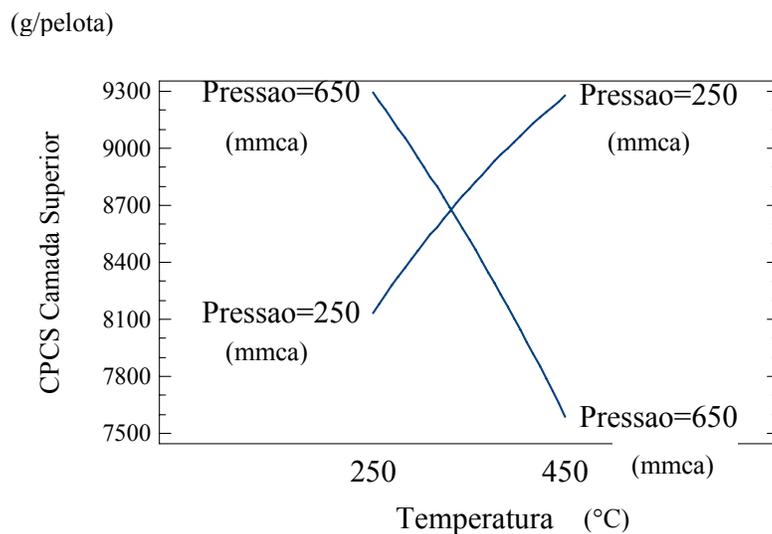


Figura 3.16 – Diagrama de interação para a CPCS da camada superior, em função da temperatura e pressão utilizando o statgraphics.

No gráfico de Pareto temos os efeitos dos fatores em ordem de significância. Os itens, cujas barras estiverem acima da linha vermelha são os itens com efeitos significantes <sup>[22]</sup>. Essa observação pode ser exemplificada no gráfico de Pareto da Figura 3.17. Observa-se que os fatores, pressão, produção, temperatura e as interações destes três fatores são significativas na umidade camada superior.

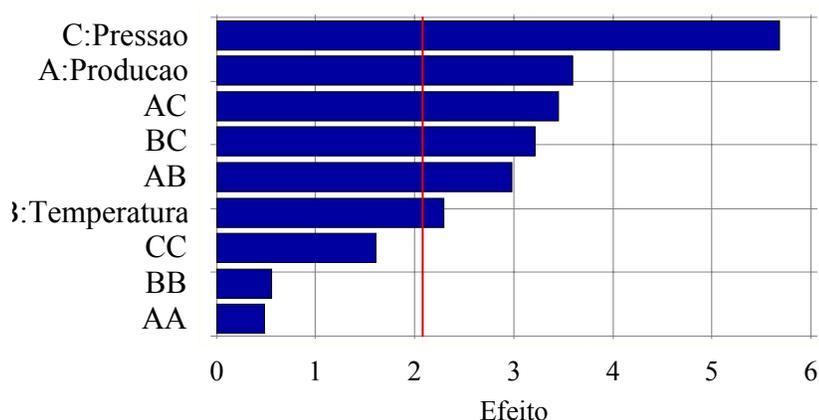


Figura 3.17 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Superior (95% de confiança).

### 3.7.2 - Trabalhos com Statgraphics

Diversos autores utilizaram o software statgraphics como ferramenta na avaliação e interpretação dos resultados obtidos nos testes experimentais, porém nenhum trabalho sobre secagem de pelotas de minério de ferro foi encontrado.

Dyshlovenko <sup>[27]</sup> utilizou um planejamento fatorial para encontrar efeitos de quatro parâmetros principais: energia elétrica, composição do gás, taxa de fluxo do gás, densidade do laser na microestrutura de revestimentos do hidróxido-hapatita (HA) e a profundidade da zona derretida pelo laser. Os modelos gerados, a predição do índice do  $\alpha$ -TCP e a profundidade da zona derretida, foram satisfatórios. Para as duas outras respostas, tais como o índice do HA e de TTCP, somente algumas tendências foram observadas. Os dois fatores mais importantes

que influenciaram foram a energia elétrica e a densidade do laser. A densidade do laser foi muito importante para a profundidade da zona derretida pelo laser.

Bes-Piá <sup>[28]</sup> estudou a influência do pH e de quatro coagulantes no tratamento físico-químico da água de reuso usando um projeto experimento com o auxílio do statgraphics. As concentrações utilizadas foram 1000, 1300 e 1600 mg/l em diferentes pH (9, 10.5 e 12). De acordo com o statgraphics as melhores condições de operação foi com o pH 9 e o coagulante na concentração de 1000 mg/l. Além disso, o volume da lama reduziu nesta concentração.

Lopes <sup>[29]</sup>, através da metodologia de projeto de experimento, avaliou as influências da temperatura de redução, composição química através da variação dos teores de CaO e MgO, além da mineralogia do minério, no índice de colagem das amostras de pelotas de minério de ferro. Como resultado, verificou-se que a temperatura de redução e a basicidade binária, relação entre %CaO e %SiO<sub>2</sub>, foram os fatores que mais influenciaram na colagem das pelotas, sendo a temperatura com uma contribuição negativa e a basicidade binária uma contribuição positiva.

## **4 – MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo serão descritos os Materiais e Métodos que foram utilizados para condução dos experimentos realizados para investigar a influência da temperatura, pressão, tempo (ritmo de produção) e a distribuição granulométrica no processo de secagem no forno II da Samarco Mineração S/A.

### **4.1 – TÉCNICA ESTATÍSTICA UTILIZADA**

A metodologia de *superfície de resposta*, isto é, o plano onde se movem as variáveis em estudo, tem duas etapas distintas: modelagem e deslocamento, que são repetidas tantas vezes quantas forem necessárias, com o objetivo de se atingir uma região ótima da superfície investigada. A modelagem normalmente é feita ajustando-se modelos simples (em geral, lineares ou quadráticos) a respostas obtidas com planejamentos fatoriais ou com planejamentos fatoriais ampliados. O deslocamento se dá sempre ao longo do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo, que é a trajetória na qual a resposta varia de forma mais pronunciada <sup>[22]</sup>.

### **4.2 - PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO**

O experimento foi dividido em duas etapas: secagem ascendente e secagem descendente.

A secagem ascendente foi dividida em dois blocos, no qual a granulometria das pelotas cruas foram avaliadas em separado. Depois de realizado e otimizado a etapa da secagem ascendente, o melhor resultado desta etapa serviu de base para a etapa de secagem descendente. A etapa de secagem descendente foi avaliada somente com pelotas na granulometria heterogênea.

As Tabelas 4.1 e 4.2 mostram as faixas granulométricas utilizada para granulometria homogênea e heterogênea.

Tabela 4.1 – Distribuição Granulométrica - Pelota Homogênea

GRANULOMETRIA HOMOGÊNEA	
	%
-16.0 +12,5 mm	50,0
-12.0 +10.0 mm	50,0

Tabela 4.2 – Distribuição Granulométrica - Pelota Heterogênea

GRANULOMETRIA HETEROGÊNEA	
	%
+ 19.0 mm	0,5
- 19.0 +16.0 mm	4,5
- 16.0 +14.0 mm	15,0
- 14.0 +12.5 mm	25,0
- 12.5 + 9.0 mm	45,0
- 9.0 + 8.0 mm	5,0
- 8.0 + 6.3 mm	2,0
- 6.3 mm	3,0
<b>TOTAL</b>	<b>100,0</b>

O experimento da secagem ascendente e secagem descendente empregado foram do tipo *composto central de face centrada* com três variáveis em dois níveis mais um ponto central com uma réplica. A etapa de secagem ascendente totalizou sessenta e quatro experimentos, sendo trinta e dois experimentos para cada tipo de granulometria (Dois blocos - Homogênea e Heterogênea), enquanto a etapa de secagem descendente totalizou trinta e dois experimentos (Um bloco - Heterogênea).

Utilizou-se o software Statgraphics para desenvolvimento do planejamento e das análises.

Os fatores com seus respectivos níveis com um ponto central para a etapa da secagem ascendente são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Planejamento do Projeto Experimento da Secagem Ascendente.

Pelotas Heterogêneas						Pelotas Homogêneas					
Bloco	Réplica	Teste	Tempo (seg.)	Temperatura (°C)	Pressão (mmH2O)	Bloco	Réplica	Teste	Tempo (seg.)	Temperatura (°C)	Pressão (mmH2O)
1	1	1	332	450	450	1	1	1	332	450	450
1	1	2	388	450	250	1	1	2	388	450	250
1	1	3	292	450	650	1	1	3	292	450	650
1	1	4	332	350	250	1	1	4	332	350	250
1	1	5	292	350	450	1	1	5	292	350	450
1	1	6	332	350	650	1	1	6	332	350	650
1	1	7	388	250	650	1	1	7	388	250	650
1	1	8	292	450	250	1	1	8	292	450	250
1	1	9	332	350	450	1	1	9	332	350	450
1	1	10	332	350	450	1	1	10	332	350	450
1	1	11	388	450	650	1	1	11	388	450	650
1	1	12	388	250	250	1	1	12	388	250	250
1	1	13	388	350	450	1	1	13	388	350	450
1	1	14	292	250	650	1	1	14	292	250	650
1	1	15	332	250	450	1	1	15	332	250	450
1	1	16	292	250	250	1	1	16	292	250	250
1	2	17	332	450	450	1	2	17	332	450	450
1	2	18	388	450	250	1	2	18	388	450	250
1	2	19	292	450	650	1	2	19	292	450	650
1	2	20	332	350	250	1	2	20	332	350	250
1	2	21	292	350	450	1	2	21	292	350	450
1	2	22	332	350	650	1	2	22	332	350	650
1	2	23	388	250	650	1	2	23	388	250	650
1	2	24	292	450	250	1	2	24	292	450	250
1	2	25	332	350	450	1	2	25	332	350	450
1	2	26	332	350	450	1	2	26	332	350	450
1	2	27	388	450	650	1	2	27	388	450	650
1	2	28	388	250	250	1	2	28	388	250	250
1	2	29	388	350	450	1	2	29	388	350	450
1	2	30	292	250	650	1	2	30	292	250	650
1	2	31	332	250	450	1	2	31	332	250	450
1	2	32	292	250	250	1	2	32	292	250	250

Os fatores com seus respectivos níveis com um ponto central para a etapa da secagem descendente são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Planejamento do Projeto Experimento da Secagem Descendente.

Pelotas Heterogêneas					
Bloco	Réplica	Teste	Tempo (seg.)	Temperatura (°C)	Pressão (mmH2O)
1	1	1	125	250	450
1	1	2	125	350	250
1	1	3	146	250	250
1	1	4	125	450	450
1	1	5	146	350	450
1	1	6	146	450	650
1	1	7	146	450	250
1	1	8	109	450	250
1	1	9	109	450	650
1	1	10	109	350	450
1	1	11	125	350	450
1	1	12	146	250	650
1	1	13	125	350	450
1	1	14	109	250	650
1	1	15	109	250	250
1	1	16	125	350	650
1	2	17	125	250	450
1	2	18	125	350	250
1	2	19	146	250	250
1	2	20	125	450	450
1	2	21	146	350	450
1	2	22	146	450	650
1	2	23	146	450	250
1	2	24	109	450	250
1	2	25	109	450	650
1	2	26	109	350	450
1	2	27	125	350	450
1	2	28	146	250	650
1	2	29	125	350	450
1	2	30	109	250	650
1	2	31	109	250	250
1	2	32	125	350	650

Determinou-se combinações dos fatores temperatura, pressão, produção (tempo) e granulometria da pelota crua (secagem ascendente) nas variáveis respostas estudadas, que foram:

- Resistência à Compressão das Pelotas após o teste de Secagem Ascendente e Descendente (CPCU)
- Resistência à compressão das Pelotas após o teste de Secagem Ascendente e Descendente e depois de levadas a estufa (CPCS);
- Umidade das pelotas cruas após o teste de Secagem Ascendente e Descendente.

#### **4.3 – CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS E DO PELLET FEED**

As amostras de pellet feed utilizadas nos experimentos foram coletadas na planta industrial, após a etapa de filtragem e roller press. Optou-se por um pellet feed com baixo nível de hematita especular, em torno de 31%, devido às dificuldades na etapa de secagem apresentadas por este minério.

As amostras foram homogeneizadas e separadas em lotes de 250 kg. Cada lote foi preparado para a etapa de pelotamento no disco piloto.

Os insumos utilizados na composição das misturas (calcário, carvão e aglomerante orgânico) <sup>[30]</sup> foram coletados nas linhas de mistura das usinas de pelotização da Samarco e caracterizados conforme Tabela 4.5.

Para a caracterização das amostras de pellet feed, do carvão e do calcário realizou-se análise química e física. As análises químicas foram realizadas pelo laboratório químico da Samarco, seguindo-se as normas e procedimentos padronizados. Para determinação do FeO e do Fe<sub>total</sub>, utilizou-se análise química por *via úmida*; enxofre, carbono e PCI (Poder Calorífico Inferior) <sup>[31]</sup> do carvão, foram determinados em equipamento LECO. Sílica, alumina, fósforo, manganês, titânio, cálcio, etc foram analisados por espectrometria de emissão atômica, via plasma (ICP) <sup>[32]</sup>.

A Tabela 4.6 mostra a caracterização química e mineralógica da amostra de pellet feed.

Tabela 4.5 - Caracterização química das amostras de calcário e carvão utilizadas no estudo.

DESCRIÇÃO	Calcário Cacítico	Carvão
FeT	-	5,58
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	
SiO <sub>2</sub>	6,83	47,47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	28,03
CaO	48,36	4,97
MgO	3,39	1,10
PPC	39,48	--
S	--	
K <sub>2</sub> O	--	1,83
TiO <sub>2</sub>	--	1,39
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	--	37,40
Carbono Fixo	--	70,32
Matérias Voláteis	--	12,09
Cinzas	--	17,59
PODER CALORÍFICO ( cal / g )	--	6563

Tabela 4.6 - Caracterização química e mineralógica das amostras de Pellet feed utilizadas no estudo.

FeT	67,27
FeO	1,56
SiO <sub>2</sub>	1,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,34
CaO	0,07
MgO	0,02
PPC	2,29
P	0,038
Zn	0,004
S	0,005
Cu	0,005
K <sub>2</sub> O	0,005
TiO <sub>2</sub>	0,018
Mn	0,018
HEMATITA ESPECULAR ( % )	31,32
HEMATITA POROSA ( % )	50,46
GOETHITA ( % )	15,12
MAGNETITA ( % )	2,73
QUARTZO TOTAL ( % )	0,27

As análises granulométricas dos insumos e do pellet feed foram realizadas por peneiramento a úmido, com peneiras circulares, 8” (203mm) de diâmetro por 2” (50 mm) de altura, com telas fabricadas em aço inox.

A determinação da superfície específica foi realizada utilizando-se o permeabilímetro do tipo Blaine e o peso específico dos materiais foi determinado através do procedimento interno, com a utilização do picnômetro a hélio.

As análises físicas dos insumos e do pellet feed são mostradas nas Tabelas 4.7 e 4.8.

Tabela 4.7 - Caracterização física das amostras de Pellet feed utilizadas no estudo.

<b>ANÁLISE GRANULOMÉTRICA ( % )</b>	
<b>+ 100 #</b>	0,4
<b>- 100 + 200 #</b>	1,6
<b>- 200 + 325 #</b>	7,8
<b>- 325 + 400 #</b>	9,2
<b>- 400 #</b>	81,0
<b>TOTAL</b>	100
<b>- 325#</b>	90,2
<b>UMIDADE ( % )</b>	9,97
<b>P.E. ( g / cm<sup>3</sup> )</b>	4.953
<b>S.E. Blaine ( cm<sup>2</sup> / g )</b>	1953

Tabela 4.8 - Caracterização física das amostras de carvão e calcário utilizadas no estudo.

<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>Calcário Cacítico</b>	<b>Carvão</b>
<b>PENEIRAS ( MALHA )</b>	<b>( % )</b>	<b>( % )</b>
<b>+ 100 #</b>	7,8	10,0
<b>- 100 + 200 #</b>	16,8	14,5
<b>- 200 + 325 #</b>	12,2	13,0
<b>- 325 + 400 #</b>	8,2	3,5
<b>- 400 #</b>	55,0	59,0
<b>TOTAL</b>	100,0	100,0
<b>UMIDADE</b>	0,30	0,94
<b>SUPERFÍCIE ESPECÍFICA ( cm<sup>2</sup> / g )</b>	4141	6452

#### **4.4 - PREPARAÇÃO DA MISTURA E PRODUÇÃO DAS PELOTAS CRUAS EM DISCO PILOTO**

Utilizando os resultados obtidos na etapa de caracterização do pellet feed e insumos (item 4.3), um balanço de massas desenvolvido em planilha Excel foi utilizado para determinação da quantidade de cada constituinte para as misturas estabelecidas.

Parâmetros do teste de pelotamento no disco piloto:

- Rotação do disco: 15 rpm;
- Inclinação do disco: 45°;
- Alimentação do disco: centro/borda esquerda.

Adição de insumos: Pelotas PDR/MX (Redução Direta)<sup>[33]</sup>

- Calcário para CaO = 0,80% na pelota queimada;
- Carvão Mineral para um carbono total de 1,00% na mistura;
- Aglomerante marca comercial CMC = 0,035%;
- NaOH = 0,029%.

Todos os insumos, conforme já mencionado, foram coletados nas linhas de mistura industrial da Samarco Mineração S/A considerando como premissa para a coleta, que todos os parâmetros operacionais e do processo industrial de moagem estivessem em condições normais. Os insumos coletados foram guardados para evitar efeitos de contaminação ou da umidade relativa do ar.

As misturas de pellet feed com os aditivos foram preparadas no misturador marca *Eirich* modelo R-08W, de propriedade da Samarco, ilustrado na Figura 4.1.

Na avaliação da etapa de pelotamento em disco piloto, foram utilizados 240 kg de cada amostra de pellet feed para composição da mistura a aglomerar, conforme a proposta de testes das Tabelas 4.3 e 4.4.

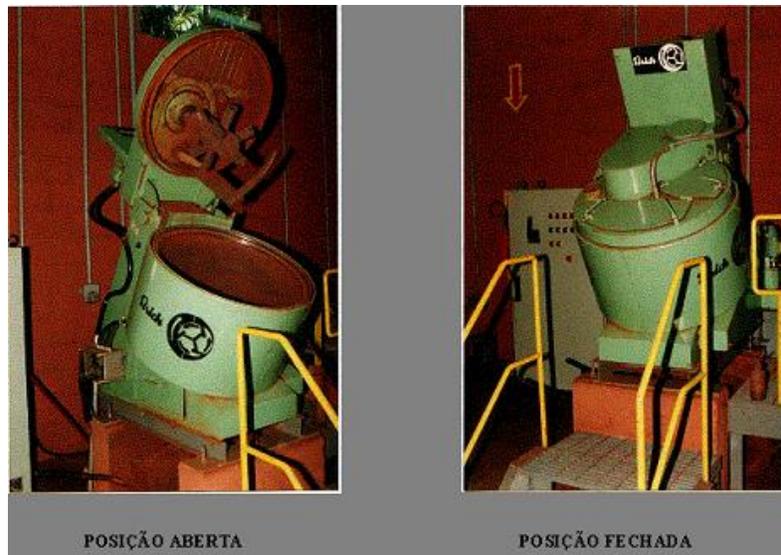


Figura 4.1 – Misturador Eirich modelo R-08W<sup>[34]</sup>.

Para cada amostra gerada de pellet feed, produziu-se em um disco de pelotamento piloto, as pelotas cruas ou verdes. O disco piloto, ilustrado na Figura 4.2, possui um diâmetro de 1 metro e a profundidade da panela é de 20 cm. A inclinação foi fixada em 45° e a alimentação nominal ficou em torno de 0,8 t/h/m<sup>2</sup>. O mesmo possui três raspadores, sendo dois raspadores de fundo e um raspador lateral. A rotação foi fixada em 15 rpm. O sistema de alimentação é móvel, permitindo alterar o ponto de alimentação do disco quando necessário.

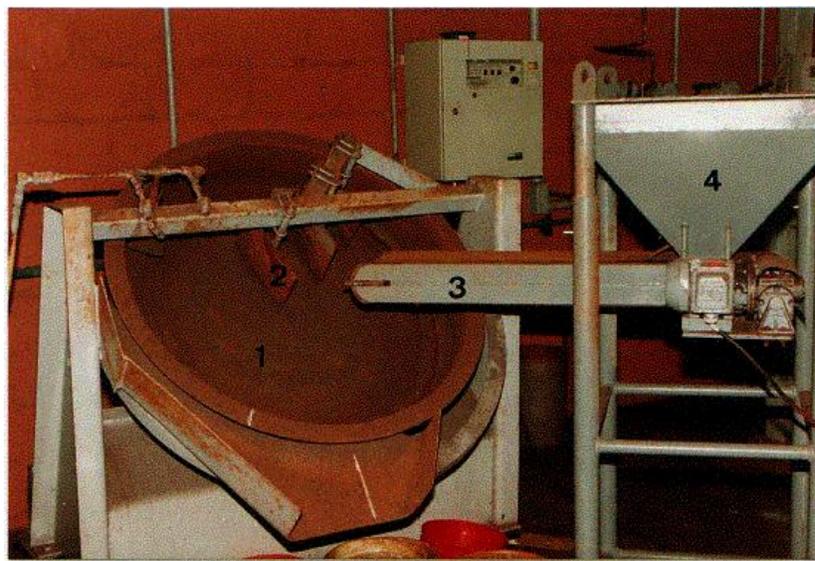


Figura 4.2 – Disco-piloto utilizado na confecção das pelotas cruas<sup>[34]</sup>.

Os números na Figura 4.2 indicam:

1. A panela do disco de 1m de diâmetro (com rotação e inclinação variáveis).
2. Os raspadores fixos.
3. A correia de alimentação (com controle de velocidade).
4. O sistema de alimentação posicionado na região entre a borda esquerda e o centro do disco.

A umidade da mistura foi mantida fixa em 9,50%, por ser uma variável extremamente importante no processo de formação das pelotas cruas e para evitar diferenças significativas entre as misturas pelletizadas.

A quantidade de pelotas cruas preparadas para a secagem ascendente (Homogênea e Heterogênea) e descendente (Heterogênea) foi de 40 kg para cada teste e seguindo a distribuição em faixas de tamanho conforme Tabela 4.9:

Tabela 4.9 – Distribuição do peso por faixa granulométrica.

<b>GRANULOMETRIA HOMOGÊNEA</b>		
	<b>%</b>	<b>kg</b>
<b>-16.0 +12,5 mm</b>	<b>50,0</b>	<b>20,000</b>
<b>-12.0 +10.0 mm</b>	<b>50,0</b>	<b>20,000</b>

<b>GRANULOMETRIA HETEROGÊNEA</b>		
	<b>%</b>	<b>kg</b>
<b>+ 19.0 mm</b>	<b>0,5</b>	<b>0,20</b>
<b>- 19.0 +16.0 mm</b>	<b>4,5</b>	<b>1,80</b>
<b>- 16.0 +14.0 mm</b>	<b>15,0</b>	<b>6,00</b>
<b>- 14.0 +12.5 mm</b>	<b>25,0</b>	<b>10,00</b>
<b>- 12.5 + 9.0 mm</b>	<b>45,0</b>	<b>18,00</b>
<b>- 9.0 + 8.0 mm</b>	<b>5,0</b>	<b>2,00</b>
<b>- 8.0 + 6.3 mm</b>	<b>2,0</b>	<b>0,80</b>
<b>- 6.3 mm</b>	<b>3,0</b>	<b>1,20</b>
<b>TOTAL</b>	<b>100,0</b>	<b>40,00</b>

#### **4.5 - SECAGEM DAS PELOTAS NO FORNO DE POT GRATE**

O pot grate é um equipamento piloto, planejado para simular o processo de secagem e endurecimento das pelotas cruas em escala de laboratório. A Figura 4.3 ilustra o equipamento com seus principais componentes.

Os principais componentes do pot grate são:

- Câmara de combustão, onde o GLP (gás liquefeito de petróleo) é queimado para o aquecimento do ar de processo. O ar aquecido é direcionado à panela em fluxo ascendente ou descendente, dependendo da etapa do processo em simulação.
- Panela – é o recipiente onde as pelotas cruas são depositadas para a simulação da queima. A mesma é revestida internamente por refratários, e a mesma possui 3 termopares em pontos diferente da camada de pelotas para a medição da temperatura durante o processo.
- Caixa de vento – é à parte sob a panela, por onde passa o ar quente responsável pela secagem ascendente, o ar frio utilizado no resfriamento e os gases provenientes do processo de secagem descendente e da queima.
- Coifa – é a parte sobre a panela e sua função é canalizar o ar aquecido sobre a camada de pelotas cruas durante as etapas de secagem descendente e queima, e o fluxo de ar ascendente das etapas de secagem e resfriamento para um sistema de exaustão e descarga para atmosfera.
- Sistema de controle – programa computacional que permite a simulação do tempo de permanência das pelotas nas zonas de secagem, queima e resfriamento, em função do ritmo de produção que se que estabelecer e do perfil de temperaturas em cada etapa, de forma a simular o processo industrial.
- Sistema de medição de temperaturas - composto de um conjunto de termopares para medição de temperaturas em todas as regiões do forno. Os termopares T4, T5, T6, T7 e T8 medem a temperaturas da coifa, das camadas que compõem o leito de pelotas, e da caixa de vento respectivamente.

- Válvulas de controle de fluxo gasoso, para simulação do processo de queima.

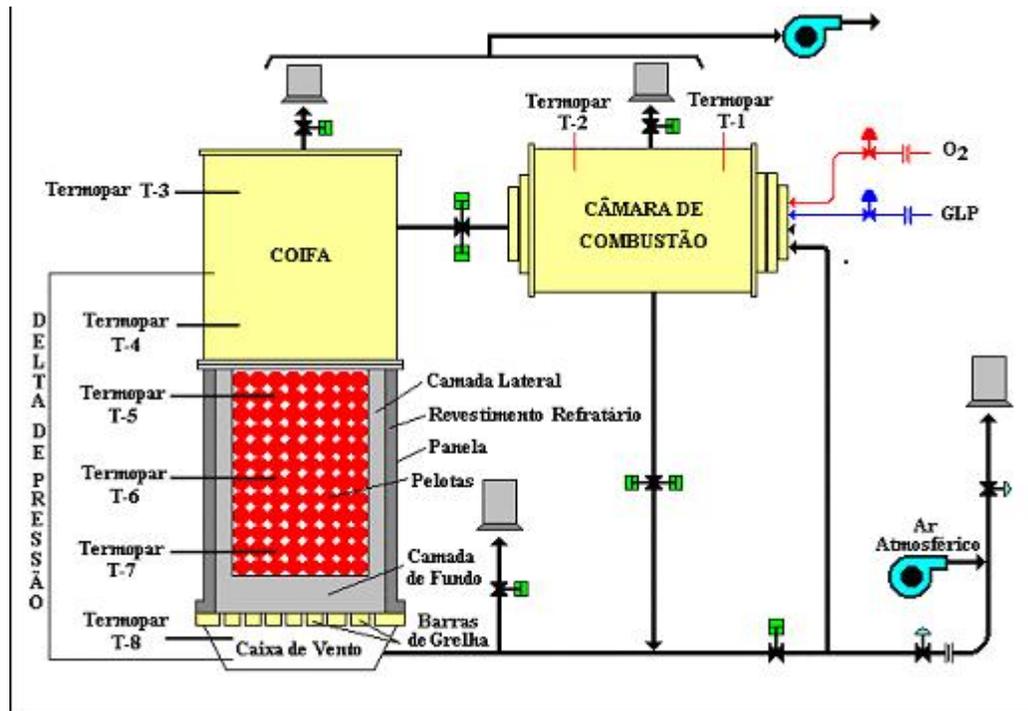


Figura 4.3 – Visão esquemática do *pot grate* <sup>[21]</sup>

A Figura 4.4 mostra um desenho esquemático das dimensões da panela do pot grate com as divisões das camadas de pelotas.

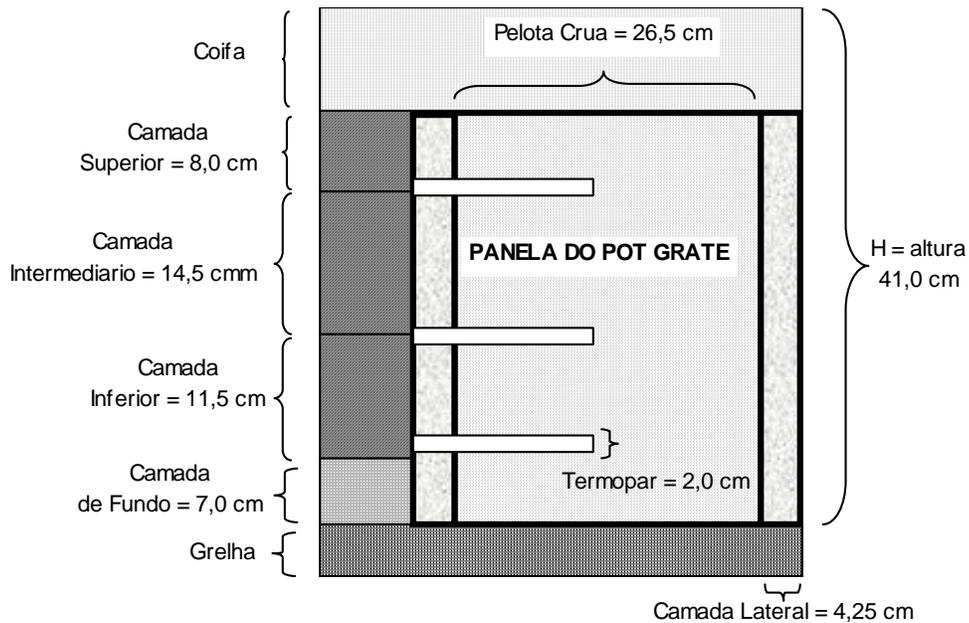


Figura 4.4 – Dimensões da panela do *pot grate* <sup>[35]</sup>.

## 4.6 - TESTES REALIZADOS NAS AMOSTRAS DAS TRÊS CAMADAS

As amostras coletadas nas três camadas, superior, intermediária e inferior foram separadas em bandejas e levadas para análise. Todas as camadas foram testadas quanto a Umidade, Compressão das Pelotas após o teste de Secagem Ascendente e Compressão das Pelotas após o teste de Secagem Ascendente e depois de levadas a estufa.

### 4.6.1 - Ensaio de Umidade de Pelotas

Para o teste de umidade 300 gramas de pelotas inteiras provenientes das bandejas foram colocadas em estufa elétrica a 100°C por 2 horas. Após este procedimento, por diferença de peso obteve-se, em porcentagem, o valor da umidade. O cálculo do percentual de umidade foi realizado através da expressão mostrada na equação 4.1, conforme o padrão ISO3087.

$$\text{Umidade} = [(P_u - P_s) \times 100] / P_u \quad (4.1)$$

Onde:

$P_u$  = Massa das pelotas úmidas

$P_s$  = Massa das pelotas secas

A Figura 4.5 mostra uma foto da estufa elétrica utilizada para o teste de umidade.



Figura 4.5 – Estufa <sup>[36]</sup>

#### 4.6.2 - Ensaio de Resistência à Compressão das Pelotas Úmidas (CPCU) e Secas (CPCS)

Para a determinação da resistência à compressão das pelotas cruas utilizamos uma prensa manual. As pelotas são individualmente submetidas à ação de uma força compressiva uniaxial, como mostrado na Figura 4.6. Este ensaio consiste em colocar uma pelota entre duas placas paralelas e comprimi-las até que ocorra a ruptura da mesma.

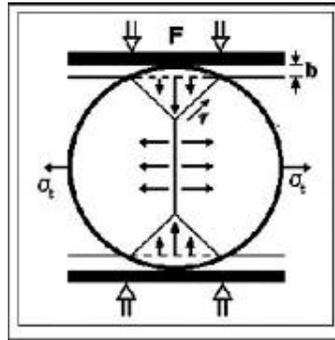


Figura 4.6 – Conceito do fator de força ( $F$ ) compressiva uniaxial para Esferas <sup>[37]</sup>.

No final de cada teste de secagem ascendente e descendente, 20 pelotas entre -16 + 12 mm sem trincas foram separadas, por camada. Metade destas pelotas, ainda úmidas, é levada imediatamente para a máquina de compressão manual. Este teste em pelotas úmidas é denominado de resistência à compressão das pelotas cruas úmidas (CPCU). A outra metade após passar por uma etapa de secagem em uma estufa, durante duas horas, é levada para a máquina de compressão manual. Em pelotas secas, é denominado de resistência à compressão das pelotas cruas secas (CPCS). A Figura 4.7 mostra uma foto da máquina de compressão utilizada para os testes de CPCU e CPCS.



Figura 4.7 – Máquina de Compressão (CPCU E CPCS) <sup>[38]</sup>

## **5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são apresentados os resultados do experimento da secagem ascendente e descendente, seguidos de análise e discussão.

### **5.1 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO**

Os resultados obtidos no experimento da secagem ascendente e descendente foram tratados estatisticamente, através da metodologia de superfícies de resposta, conforme proposto no item 4.1. Iremos abordar inicialmente os resultados do experimento da secagem ascendente e posteriormente os resultados da secagem descendente.

#### **5.1.1 - Resultados do experimento da Secagem Ascendente**

As Tabelas 5.0 e 5.1 apresentam os resultados obtidos para as variáveis respostas estudadas, umidade nas três camadas (superior, intermediária e inferior), CPCU e CPCS, após o teste da secagem ascendente para uma pelota heterogênea e homogênea. A interpretação dos dados foi realizada utilizando o software Statgraphics.



Tabela 5.0 – Resultados dos testes da secagem ascendente para uma pelota heterogênea.

Pelotas Heterogêneas														
Bloco	Réplica	Teste	Tempo (seg.)	Temperatura (°C)	Pressão (mmca)	CPCU Superior (g/pelota)	CPCU Intermediária (g/pelota)	CPCU Inferior (g/pelota)	CPCS Superior (g/pelota)	CPCS Intermediária (g/pelota)	CPCS Inferior (g/pelota)	UMIDADE Superior (%)	UMIDADE Intermediária (%)	UMIDADE Inferior (%)
1	1	1	332	350	450	2688	2756	2166	9134	7741	2102	8,99	3,80	0,00
1	1	2	292	250	250	1916	1975	2860	8603	8358	6978	9,45	9,41	3,43
1	1	3	388	450	250	2084	2347	3764	10229	9162	2983	9,28	8,37	0,00
1	1	4	332	250	450	2038	2379	3909	8363	8027	4322	9,39	8,37	0,00
1	1	5	292	450	250	2642	2806	5030	8526	8631	6075	9,34	8,88	0,68
1	1	6	388	250	650	1943	3559	4917	8903	9162	5026	8,60	2,31	0,00
1	1	7	388	450	650	2265	3623	2288	8240	3001	1398	8,35	0,10	0,00
1	1	8	388	250	250	2324	2356	4935	7995	9134	6774	9,28	8,90	0,97
1	1	9	292	450	650	2343	4136	2157	8413	4286	1752	7,82	0,03	0,00
1	1	10	332	450	450	2206	3101	3092	7945	7809	2787	8,89	3,86	0,00
1	1	11	332	350	450	2502	3151	4245	7605	8740	4803	8,99	7,29	0,00
1	1	12	332	350	650	2161	4476	4140	10356	6710	3301	7,30	2,64	0,00
1	1	13	332	350	250	2411	2270	4372	9035	8744	5711	9,27	8,66	1,12
1	1	14	292	250	650	2002	2633	4372	10052	7881	4713	8,88	4,45	0,00
1	1	15	388	350	450	2116	3918	2620	8408	6392	2738	9,18	1,89	0,00
1	1	16	292	350	450	2138	2143	3341	8308	9502	3373	9,21	7,24	0,00
1	2	17	332	350	450	1861	1444	4336	8028	5675	3255	9,16	4,70	0,26
1	2	18	292	250	250	1861	1952	4281	7055	6805	6165	8,78	8,63	0,93
1	2	19	388	450	250	2152	2538	2487	8358	8081	5053	8,83	8,76	2,15
1	2	20	332	250	450	1807	1880	4585	7051	6869	4140	8,95	5,14	0,00
1	2	21	292	450	250	2057	2243	2556	7191	7577	4163	8,91	8,20	0,07
1	2	22	388	250	650	1721	1775	3909	7763	7564	4228	9,00	3,53	0,00
1	2	23	388	450	650	2152	3201	1643	6973	1970	1317	8,15	0,00	0,00
1	2	24	388	250	250	1598	1730	4581	7173	8658	3932	9,22	7,91	0,26
1	2	25	292	450	650	1843	1975	2229	7046	6174	1920	10,27	4,00	0,10
1	2	26	332	450	450	2070	2751	2987	7700	6933	2297	8,36	5,61	0,00
1	2	27	332	350	450	1884	1641	2679	8240	5947	2324	8,91	3,29	0,00
1	2	28	332	350	650	1707	2184	2202	7582	5802	2197	8,40	2,58	0,07
1	2	29	332	350	250	2011	2084	3487	9035	7214	7141	8,88	8,82	2,28
1	2	30	292	250	650	1930	1830	4127	7037	5611	4762	9,35	6,62	0,85
1	2	31	388	350	450	1898	2665	2983	6697	5108	1884	9,17	2,47	0,00
1	2	32	292	350	450	1671	2179	3986	7745	6628	3419	9,18	8,15	0,33

Tabela 5.1 – Resultados dos testes da secagem ascendente para uma pelota homogênea.

Pelotas Homogêneas														
Bloco	Réplica	Teste	Tempo (seg.)	Temperatura (°C)	Pressão (mmca)	CPCU Superior (g/pelota)	CPCU Intermediária (g/pelota)	CPCU Inferior (g/pelota)	CPCS Superior (g/pelota)	CPCS Intermediária (g/pelota)	CPCS Inferior (g/pelota)	UMIDADE Superior (%)	UMIDADE Intermediária (%)	UMIDADE Inferior (%)
1	1	1	332	450	450	2116	1489	2229	8867	7872	2470	8,86	5,17	0,03
1	1	2	388	450	250	2311	2810	5439	9194	10519	5121	9,12	8,57	0,16
1	1	3	292	450	650	1998	4154	2020	8553	5784	1693	7,76	0,23	0,00
1	1	4	332	350	250	2456	2611	5316	9920	10006	5711	8,87	8,06	0,30
1	1	5	292	350	450	2234	2406	4499	8708	8068	3727	8,78	4,61	0,00
1	1	6	332	350	650	2166	3973	1962	8458	3709	2293	5,35	0,00	0,00
1	1	7	388	250	650	2247	6365	3559	9738	7223	3046	5,74	0,16	0,00
1	1	8	292	450	250	2315	2488	3927	8522	8572	4572	9,61	7,81	0,10
1	1	9	332	350	450	2184	2833	2592	8485	7664	2447	8,92	3,12	0,00
1	1	10	332	350	450	2175	4862	2856	8317	5807	3450	8,79	0,36	0,03
1	1	11	388	450	650	5475	2906	2070	6252	2152	1545	0,97	0,00	0,00
1	1	12	388	250	250	2265	2365	5280	9248	10042	6243	9,47	7,63	0,76
1	1	13	388	350	450	2190	4713	2878	9466	5207	2588	8,53	0,16	0,00
1	1	14	292	250	650	2601	3160	6079	9316	8440	5507	8,82	3,57	0,15
1	1	15	332	250	450	2647	3037	6669	9702	8621	5711	8,72	3,14	0,00
1	1	16	292	250	250	2719	2334	4826	7995	9148	7228	9,25	8,74	1,49
1	2	17	332	450	450	2157	3500	2551	9257	7287	2111	8,76	2,30	0,00
1	2	18	388	450	250	2538	2565	3083	9293	8989	2492	9,06	5,54	0,10
1	2	19	292	450	650	2257	6388	2265	8880	5925	1902	8,04	0,13	0,07
1	2	20	332	350	250	2324	2527	6406	8286	9475	6215	9,09	8,44	0,30
1	2	21	292	350	450	2161	2561	5321	7881	8322	4726	9,24	5,83	0,00
1	2	22	332	350	650	2370	4576	3028	9116	6742	2043	8,94	0,95	0,00
1	2	23	388	250	650	2029	3614	5030	7804	6910	5176	8,78	1,88	0,00
1	2	24	292	450	250	2234	2733	3736	8140	8917	3487	9,33	8,54	0,53
1	2	25	332	350	450	2211	3741	3137	7332	7891	3001	9,02	2,69	0,00
1	2	26	332	350	450	1993	3251	4354	7869	7010	3010	9,01	2,94	0,00
1	2	27	388	450	650	3723	2806	1734	4767	1757	1335	0,63	0,00	0,00
1	2	28	388	250	250	2265	2742	4231	7441	8304	6256	8,72	7,81	1,31
1	2	29	388	350	450	3105	5071	2588	8213	4472	4867	7,92	0,03	0,00
1	2	30	292	250	650	2878	3414	4867	9234	8245	4268	7,53	2,56	0,10
1	2	31	332	250	450	2138	2066	4631	7346	7323	4740	7,98	4,04	0,00
1	2	32	292	250	250	2125	2492	2951	6724	7527	7110	8,66	8,27	1,78

### 5.1.1.0 - Previsão de Umidade nas três Camadas após a Secagem Ascendente - Pelotas Homogêneas utilizando o Statgraphics.

Os gráficos das Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 prevêm a influência da pressão, temperatura e produção na umidade das pelotas das camadas superior, intermediária e inferior.

Para facilitar a construção gráfica, os fatores estudados foram padronizados com as seguintes denominações:

A – Produção (toneladas/ano);

B – Temperatura (°C);

C – Pressão (mmca);

AA, AB, AC, BB, BC e CC – Interações ente os fatores.

Todos os fatores ou interações de fatores, cujas barras forem superiores a delimitação da linha vertical, no gráfico de Pareto, são considerados efeitos significativos para a variável resposta em questão.

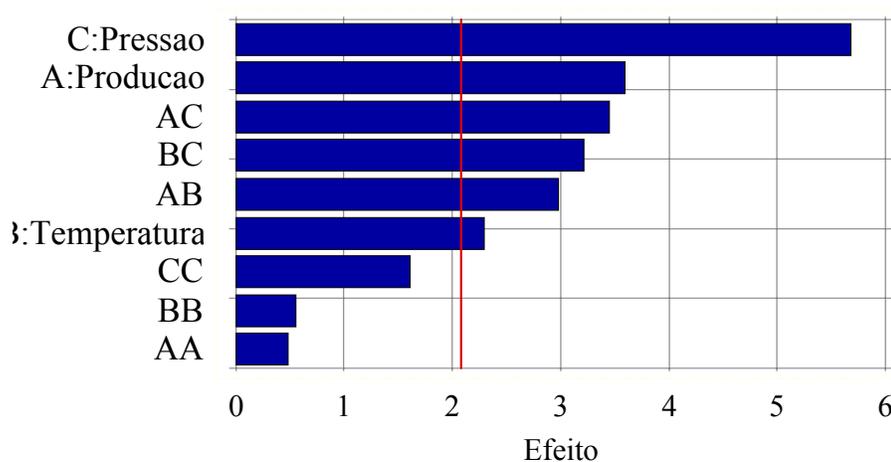


Figura 5.1 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Superior (95% de confiança).

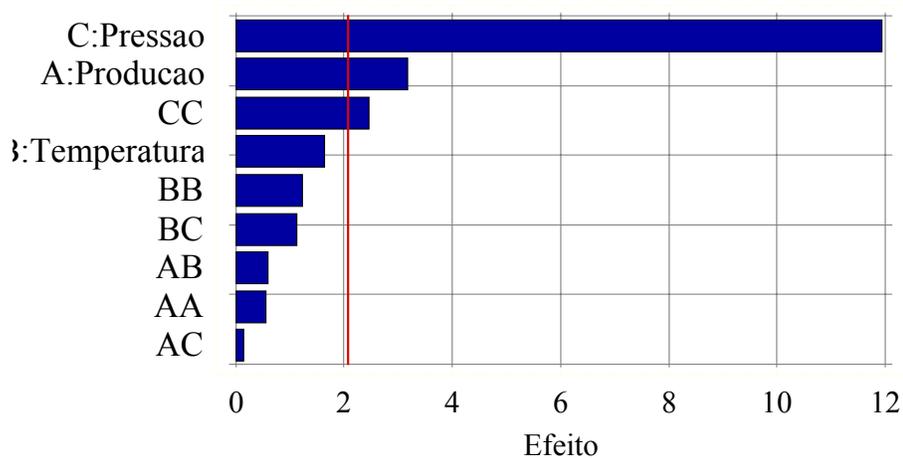


Figura 5.2 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Intermediária (95% de confiança).

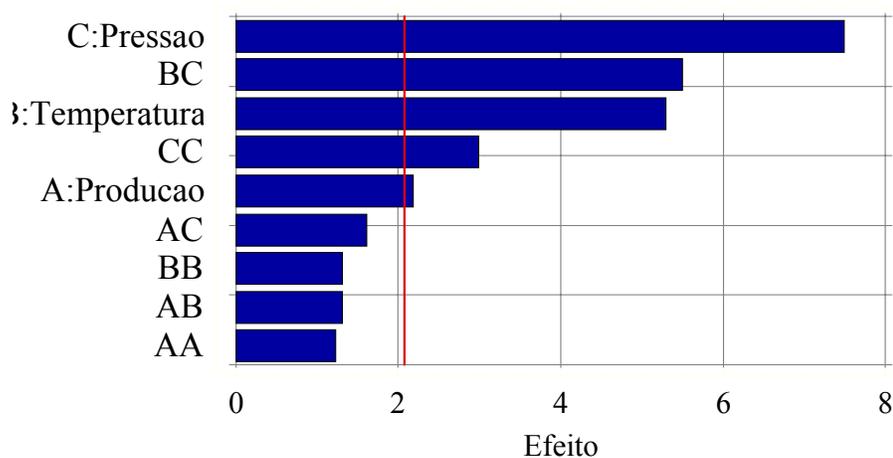


Figura 5.3 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Inferior (95% de confiança).

Nota-se nos gráficos de Pareto prevêem que o fator pressão exerce grande influência nas variáveis respostas umidade camadas superior, intermediária e inferior. Observa-se que o fator produção e as interações dos três fatores são significativa na umidade camada superior. O fator temperatura é significativo na umidade da camada inferior e pouco significativo na camada superior.

As interações entre os fatores principais, pressão, temperatura e produção serão analisadas através do desdobramento dos diagramas de interações dos principais efeitos.

Observa-se no gráfico da Figura 5.4 prevêem que o aumento da pressão e temperatura reduziram a umidade da camada superior. O acréscimo da produção, ocasionando uma redução no tempo de secagem, elevou os valores de umidade na camada superior. O efeito da temperatura e pressão na redução da umidade foi semelhante ao observado nos testes preliminares.

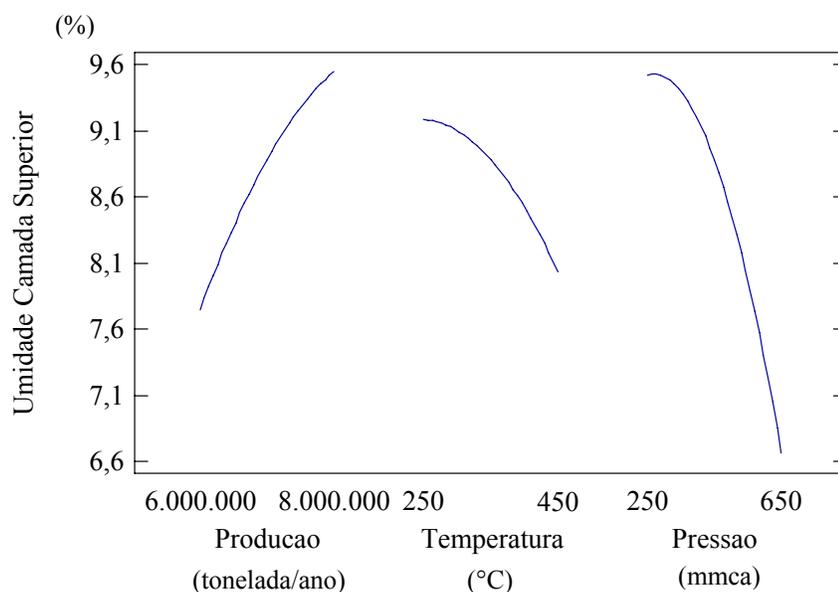


Figura 5.4 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na umidade da camada superior utilizando o Statgraphics.

Estes três fatores influenciaram também na umidade das camadas intermediária e inferior conforme pode ser observado nos gráficos da Figura 5.5 e 5.6.

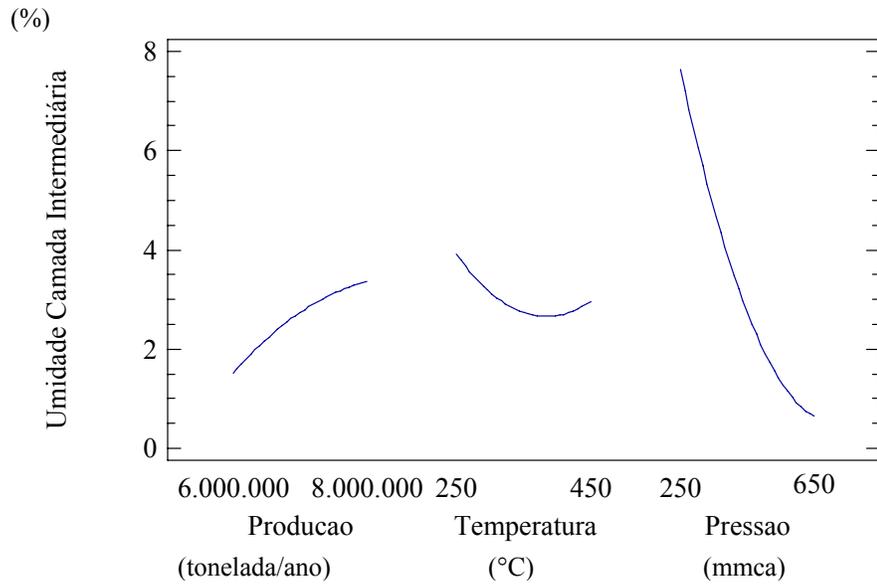


Figura 5.5 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na umidade da camada intermediária utilizando o statgraphics.

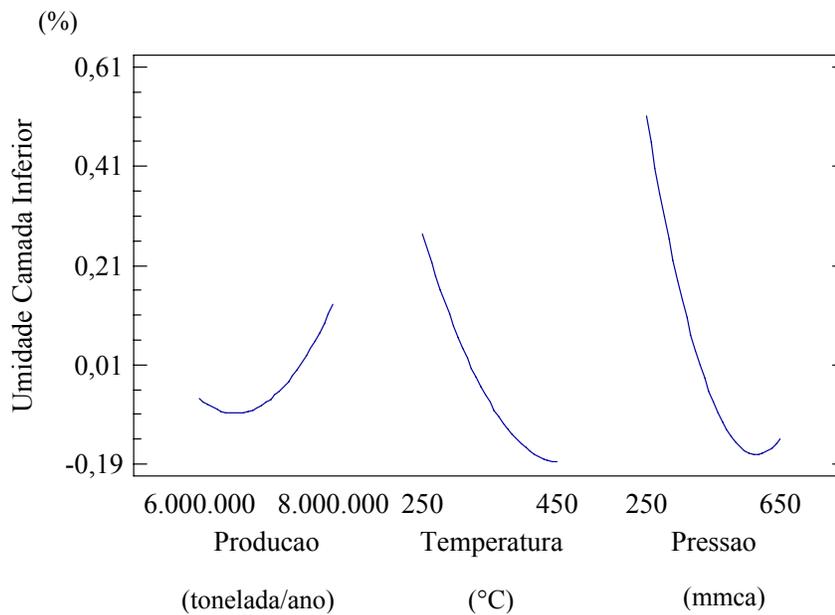


Figura 5.6 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na umidade da camada inferior utilizando o statgraphics.

Observa-se no gráfico da Figura 5.5 que se prevê o aumento da pressão influenciou fortemente na redução da umidade da camada intermediária. Já a temperatura e produção, não influenciaram significativamente na umidade. No gráfico da Figura 5.6, observa-se novamente um grande efeito da pressão na redução da umidade da camada inferior, acompanhado pela temperatura, sendo que a produção influenciou pouco.

Quanto à influência da pressão, temperatura e produção, os resultados obtidos foram de acordo ao que a teoria diz. O aumento da pressão e temperatura levou a uma redução da umidade das pelotas nas camadas superior, intermediária e inferior. O aumento da produção, por sua vez, elevou a umidade das pelotas nas camadas superior, intermediária e inferior.

#### **5.1.1.1 - Previsão de resultados de CPCS das três Camadas após a Secagem Ascendente - Pelotas Homogêneas utilizando o Statgraphics.**

Os gráficos das Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 mostram a influência da pressão, temperatura e produção (tempo) na resistência à compressão das pelotas cruas secas (CPCS) das camadas superior, intermediária e inferior.

Os fatores estudados foram padronizados com as seguintes denominações:

A – Produção (toneladas/ano);

B – Temperatura (°C);

C – Pressão (mmca);

AA, AB, AC, BB, BC e CC – Interações ente os fatores.

Todos os fatores ou interações de fatores, cujas barras forem superiores a delimitação da linha vertical, no gráfico de Pareto, são considerados efeitos significativos para a variável resposta em questão.

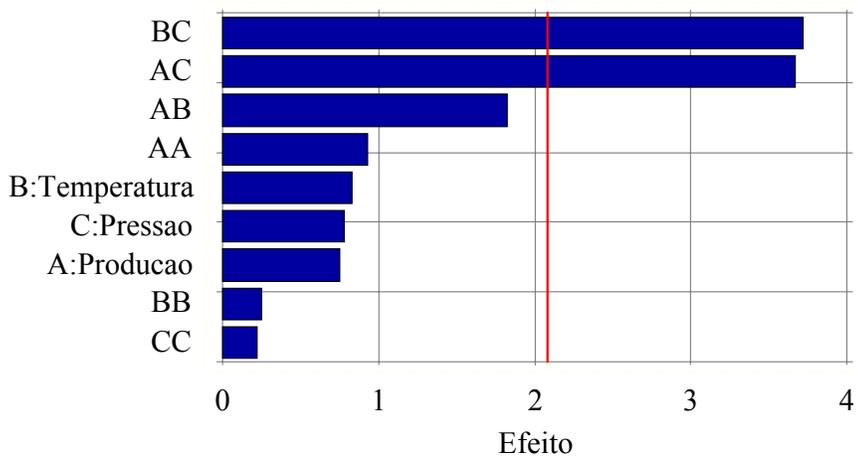


Figura 5.7 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da CPCS da camada superior (95% de confiança).

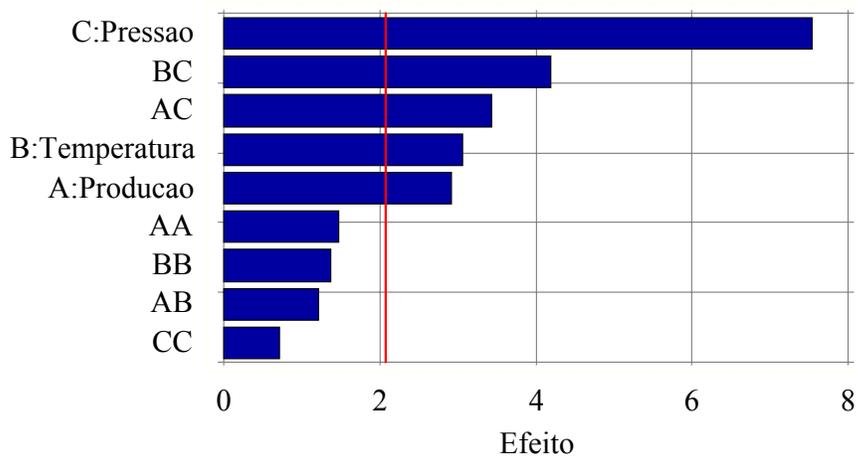


Figura 5.8 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da CPCS da camada intermediária (95% de confiança).

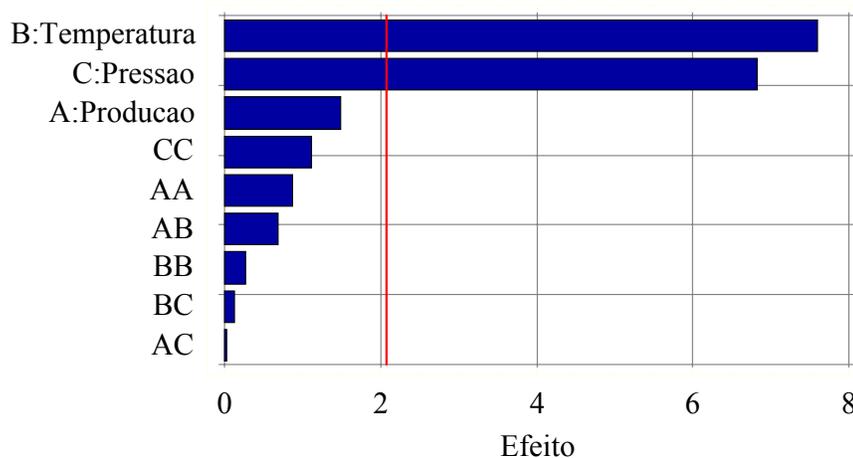


Figura 5.9 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da CPCS da camada inferior (95% de confiança).

Nota-se nos gráficos de Pareto que o fator pressão, temperatura e a interação dos dois fatores exercem maior influência nas variáveis respostas CPCS das camadas superior, intermediária e inferior. Observa-se que a interação do fator produção com pressão é significativa nas CPCS das camadas superior e intermediária.

As interações entre os fatores principais, pressão e temperatura serão analisadas através do desdobramento das superfícies de resposta e dos diagramas de interações dos principais efeitos.

Observa-se no gráfico da Figura 5.10 que o aumento da pressão e temperatura reduziu a CPCS da camada superior. Nota-se que para obter uma maior resistência à compressão, as pelotas cruas e secas foram submetidas às seguintes condições:

- 1) Alta pressão com baixa temperatura;
- 2) Alta temperatura com baixa pressão;

Esta observação pode ser visualizada no gráfico do diagrama de interações da temperatura e pressão da CPCS da camada superior Figura 5.11.

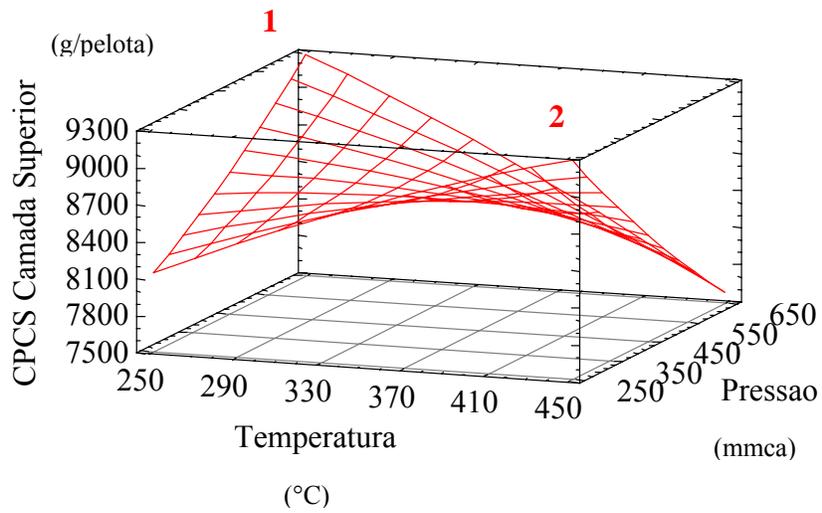


Figura 5.10 - Superfície de resposta para a CPCS da camada superior, em função da temperatura e pressão.

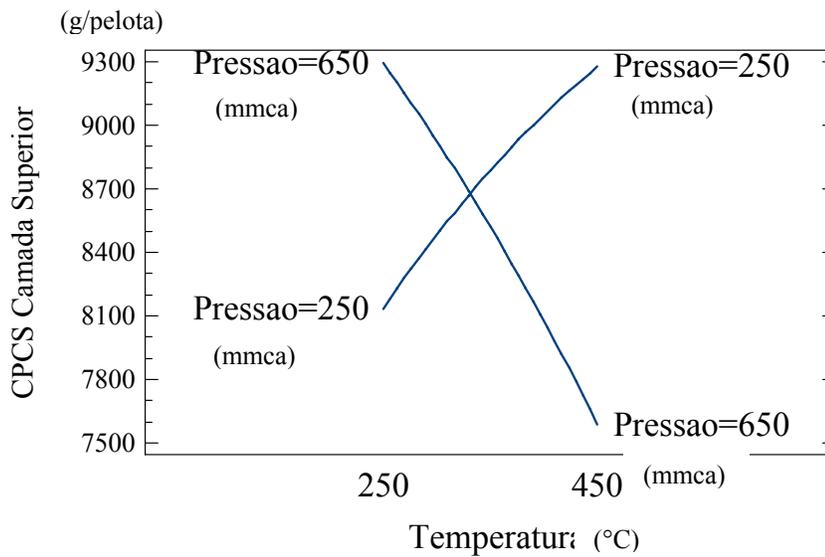


Figura 5.11 – Diagrama de interação para a CPCS da camada superior, em função da temperatura e pressão utilizando o statgraphics.

Nota-se que para uma alta temperatura e alta pressão a resistência à compressão das pelotas cruas e secas ficou baixa. Isto pode ser devido à alta taxa de secagem nestas condições de temperatura e pressão podendo gerar trincas e fraturas.

Os gráficos das Figuras 5.12 e 5.13 mostram a previsão da influência da pressão e temperatura na resistência à compressão das pelotas cruas secas (CPCS) da camada intermediária e inferior.

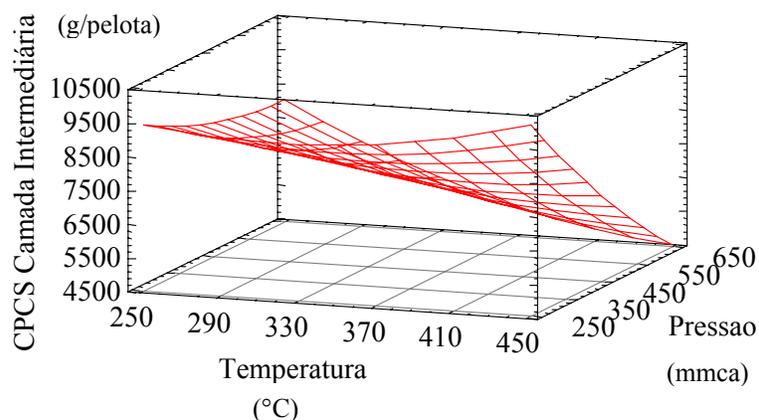


Figura 5.12 - Superfície de resposta para a CPCS da camada intermediária, em função da temperatura e pressão.

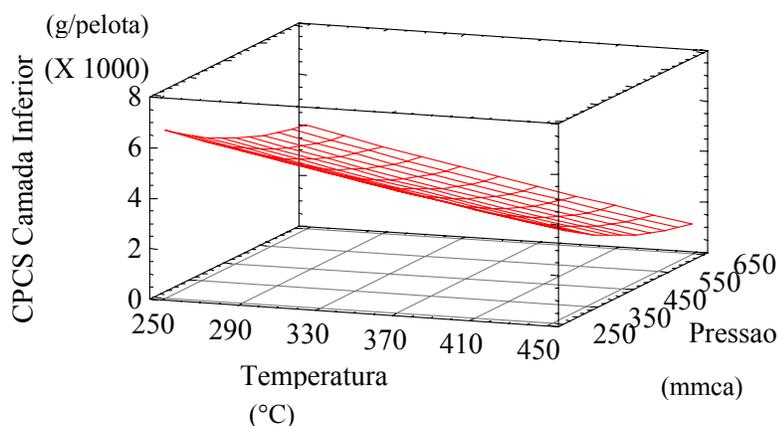


Figura 5.13 - Superfície de resposta para a CPCS da camada inferior, em função da temperatura e pressão.

Nota-se no gráfico da Figura 5.12 que existe uma forte interação entre a pressão e a temperatura quando a temperatura é elevada (450°C). Observa-se nesta condição, que para uma pressão elevada a CPCS da camada intermediária é baixa, sendo que para uma pressão reduzida a CPCS é alta. Este mesmo comportamento já foi identificado na CPCS da camada superior. Na condição de baixa temperatura (250°C) o efeito da pressão não foi expressivo.

Esta observação pode ser melhor visualizada no gráfico do diagrama de interações da temperatura e pressão da CPCS da camada intermediária Figura 5.14.

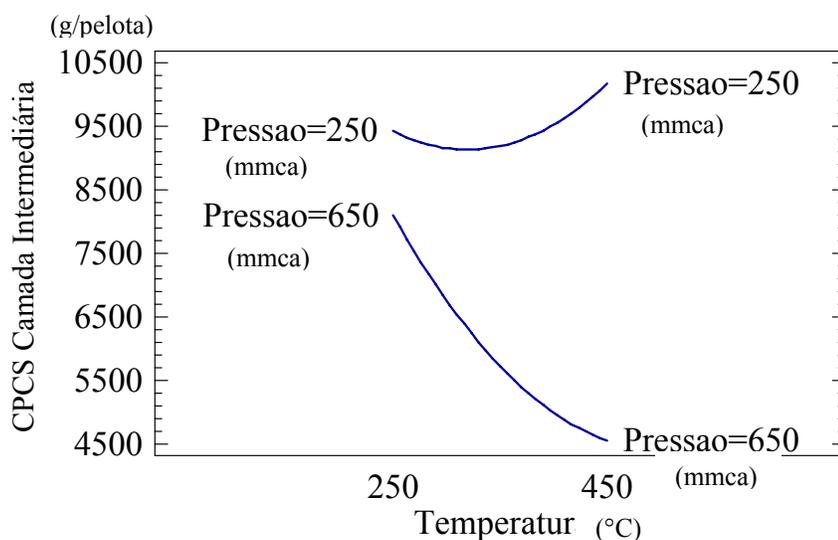


Figura 5.14 – Diagrama de interação para a CPCS da camada intermediária, em função da temperatura e pressão utilizando o statgraphics.

Para a CPCS da camada inferior, observa-se uma maior influência da temperatura e pressão, como pode ser observado no gráfico do diagrama de interações da temperatura, pressão e produção da Figura 5.15.

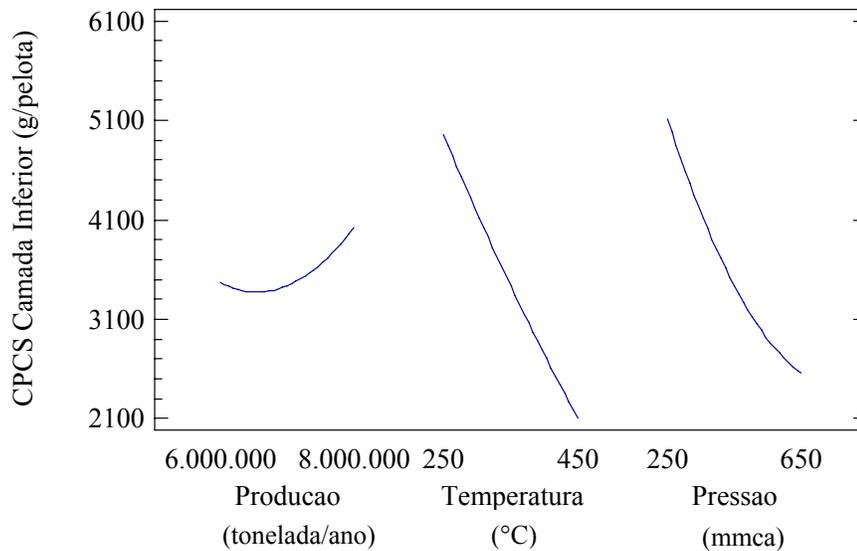


Figura 5.15 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na CPCS da camada inferior utilizando o statgraphics.

Quanto à influência da pressão e temperatura, os gráficos de previsão foram de acordo com a teoria. Para uma alta temperatura (450°C) a influência da pressão foi observada, ou seja, alta temperatura e alta pressão (650 mmca) reduziram a CPCS; uma alta temperatura e baixa pressão (250 mmca) elevaram a CPCS das camadas superior, intermediária e inferior.

No caso de baixa temperatura (250°C), a influência da alta ou baixa pressão nos resultados da CPCS das camadas superior, intermediária e inferior não foi muito evidenciada.

Simulando uma condição ideal de operação e respeitando algumas limitações dos ventiladores de processo, temperatura máxima de 380°C e pressão de 650 mmca (maior eficiência de secagem), os valores da CPCS para as camadas superiores, intermediária e inferior para uma produção de 7.000.000 ton/ano seriam: **7958 g/pelota**, **4890 g/pelota** e **1764 g/pelota** respectivamente.

### **5.1.1.2 – Previsão de resultados de CPCU das Três Camadas após a Secagem Ascendente - Pelotas Homogêneas utilizando o Statgraphics.**

Para analisar os resultados da resistência à compressão das pelotas cruas úmidas (CPCU), utilizou-se o desdobramento da superfície de resposta e dos diagramas de interações dos principais efeitos.

Observa-se no gráfico da Figura 5.16 que o aumento da pressão e temperatura aumentou a CPCU da camada superior. O aumento da produção, ocasionando uma redução no tempo de secagem, reduziu os valores de CPCU da camada superior. O efeito da temperatura, pressão e produção na resistência à compressão das pelotas cruas úmidas (CPCU) da camada superior foi o inverso do observado na resistência à compressão das pelotas cruas secas (CPCS) da camada superior. Este fato pode estar relacionado com a umidade ideal das pelotas cruas.

Meyer <sup>[3]</sup>, através de alguns testes determinou qual era a umidade ideal das pelotas cruas e sua influência na resistência a compressão a úmido e a resistência à queda, *teste de resiliência*. A resistência das pelotas cruas decresce a valores abaixo e acima da umidade ideal ao passo que a resistência à queda aumenta progressivamente. Segundo Meyer <sup>[3]</sup>, a umidade ideal depende da granulometria e da tipologia do minério. Para o caso de minérios hematíticos, esta umidade ideal ficou em torno de 8,5% a 9,5%.

Conforme já comentado no capítulo 3.5.2, o aumento da pressão e temperatura em um fluxo ascendente, transfere uma porcentagem da umidade da camada inferior para as camadas intermediária e superior. Analisando os resultados de umidade da camada superior, percebe-se que os valores ficaram bem próximos da umidade ideal, ocasionando um aumento da CPCU.

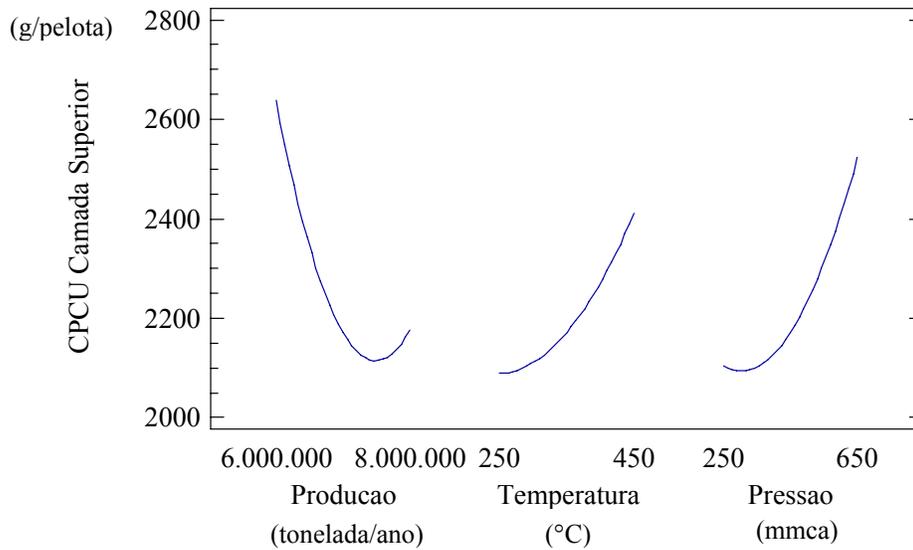


Figura 5.16 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na CPCU da camada superior utilizando o statgraphics.

Para a CPCU da camada intermediária, observa-se uma maior influência da pressão, conforme pode ser observado no gráfico da superfície de resposta da Figura 5.17.

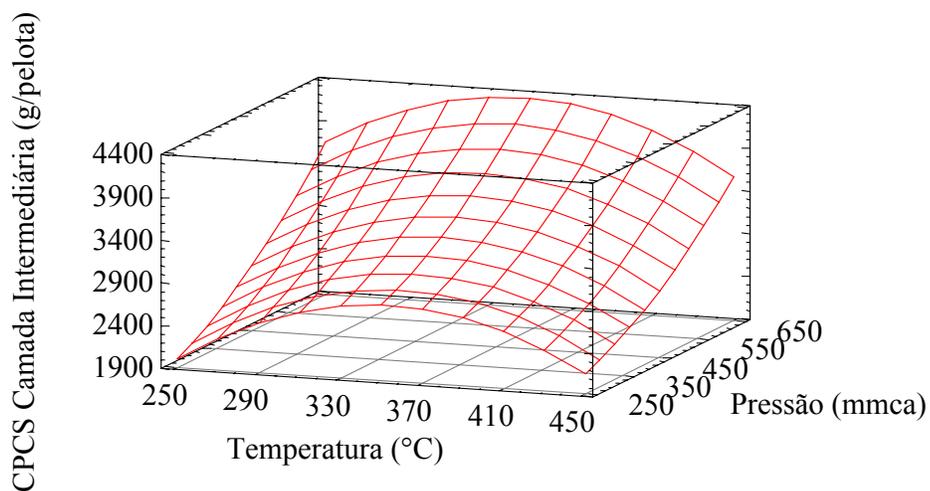


Figura 5.17 - Superfície de resposta para a CPCU da camada intermediária, em função da temperatura e pressão.

Observa-se que o aumento da pressão aumentou a CPCU da camada intermediária. Esta mesma conclusão foi observada na CPCU da camada superior.

Não foi observado influência significativa da temperatura e produção na resistência a compressão a úmido da camada intermediária.

O gráfico da Figura 5.18 mostra a influência da temperatura, pressão e produção na CPCU da camada inferior. Observa-se que o aumento da pressão e temperatura reduziu a CPCU da camada inferior. O aumento da produção, ocasionando uma redução no tempo de secagem, aumentou os valores de CPCU da camada inferior. O efeito da temperatura, pressão e produção na resistência à compressão das pelotas cruas úmidas (CPCU) da camada inferior foi igual ao observado na resistência à compressão das pelotas cruas secas (CPCS) da camada inferior, gráfico da Figura 5.15. Isto pode ser devido à alta taxa de secagem nestas camadas quando sujeitas a condições de temperatura e pressão elevadas, ocasionando trincas e fraturas.

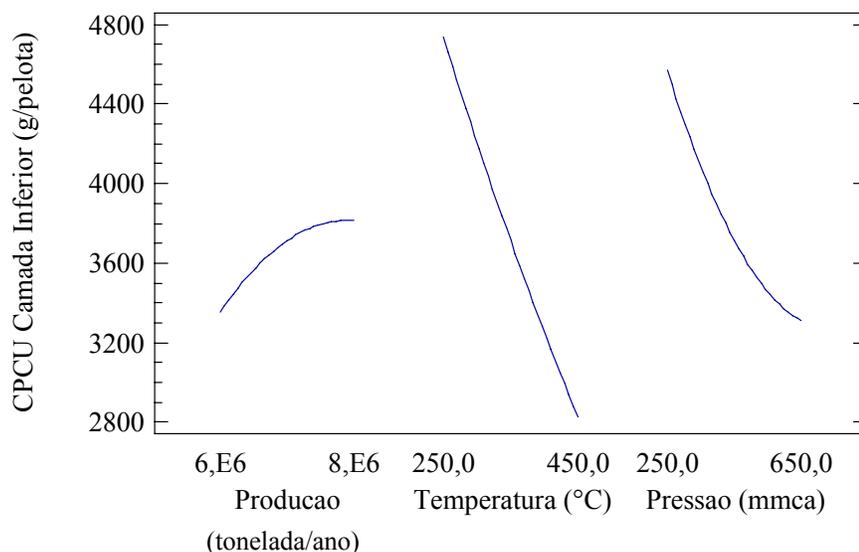


Figura 5.18 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na CPCU da camada inferior utilizando o statgraphics.

### 5.1.1.3 – Resumo dos resultados do experimento da Secagem Ascendente Pelotas

#### Homogêneas

Para facilitar a interpretação dos resultados obtidos nos experimentos utilizou-se a tabela 5.2, onde:

- Os números 1, 2 e 3 significam qual fator influenciou mais fortemente a variável resposta em ordem crescente;
- O (\*) se ele é significativo ou não;
- As setas se o fator tem influência positiva (↑) ou negativa (↓) na variável resposta.

Tabela 5.2 – Influência dos fatores sobre as variáveis respostas secagem ascendente para pelotas homogêneas.

Pelotas Homogêneas		Umidade (%)					
		Camada Superior		Camada Intermediária		Camada Inferior	
	Produção (tons/ano)	↓	2*	↓	2*	↓	3*
	Temperatura (°C)	↑	3*	↑	3	↑	2*
	Pressão (mmca)	↑	1*	↑	1*	↑	1*
		CPCS (g/pelota)					
		Camada Superior		Camada Intermediária		Camada Inferior	
	Produção (tons/ano)	↑	3	↑	3*	↑	3
	Temperatura (°C)	↓	1	↓	2*	↓	1*
	Pressão (mmca)	↓	2	↓	1*	↓	2*
	CPCU (g/pelota)						
	Camada Superior		Camada Intermediária		Camada Inferior		
Produção (tons/ano)	↓	1*	↑	2	↑	3	
Temperatura (°C)	↑	3	↓	3	↓	1*	
Pressão (mmca)	↑	2	↑	1*	↓	2*	

Observa-se que o fator pressão tem influência significativa na redução da umidade das camadas superior, intermediária e inferior. Conforme comentado no item 3.5 do Capítulo 3, o aumento da pressão (fluxo) ascendente transfere a umidade das pelotas da camada inferior para as pelotas das camadas intermediárias e superiores. Observa-se também, que o aumento da temperatura favorece a redução da umidade nas camadas superior, intermediária e inferior sendo que este efeito é maior e mais significativo na camada inferior. Como o fluxo é ascendente o impacto da temperatura e pressão na camada inferior é mais rápida.

Esta mesma condição foi observada por Cota <sup>[2]</sup> e Meyer <sup>[3]</sup>, quanto maior a temperatura do ar ascendente, maior será a quantidade de água removida das pelotas das camadas inferiores e

intermediárias. Esta quantidade de água irá depositar-se na camada de topo e não será totalmente removida pelo o ar ascendente. Esta condição irá, em alguns casos, prejudicar a permeabilidade do leito de pelota, e na maioria das vezes, o tempo de secagem descendente tem que ser prolongado.

Já a redução da produção, aumentando o tempo de secagem ascendente, reduziu a umidade nas três camadas.

Muitas vezes, nos processos industriais, a combinação dos três fatores é bastante utilizada para reduzir a umidade nas camadas. Isto depende diretamente da potência dos ventiladores, no tamanho das zonas de secagem ascendente e principalmente da produção e da qualidade física exigida. Esta qualidade física está relacionada com a resistência a compressão das pelotas cruas e secas (CPCS) e com a resistência compressão das pelotas cruas e úmidas (CPCU).

O aumento da pressão e da temperatura reduziu a resistência à compressão das pelotas cruas e secas das camadas superior, intermediária e inferior, sendo que foi mais significativo nas camadas intermediária e inferior. Como o impacto do fluxo ascendente é maior nas camadas inferior e intermediária, a velocidade de secagem das pelotas nestas camadas é maior. Conforme o item 3.5.1.1, o fluxo de gás de secagem ascendente necessita ter a pressão e temperatura adequada para que o movimento da água e vapor através dos capilares não afete mecanicamente a pelota conformada. Se a formação do vapor de água for muito rápida, rachaduras/trincas ou mesmo crepitação podem ocorrer (temperatura de choque).

Para a resistência a compressão das pelotas cruas e úmidas, observou-se que o aumento da temperatura e da pressão aumentou a CPCU da camada superior, ou seja, efeito contrário ao observado na CPCS da camada superior. Já o aumento da produção, reduziu a CPCU da camada superior. Este fato pode estar relacionado com a umidade ideal das pelotas cruas.

Meyer<sup>[3]</sup>, através de alguns testes determinou qual era a umidade ideal das pelotas cruas e sua influência na resistência a compressão a úmido e a resistência à queda, o chamado *teste de resiliência*. A resistência das pelotas cruas reduziu para valores abaixo e acima da umidade

ideal ao passo que a resistência à queda aumenta progressivamente. Segundo Meyer <sup>[3]</sup>, a umidade ideal depende da granulometria e da tipologia do minério. Para o caso de minérios hematíticos, esta umidade ideal ficou em torno de 8,5% a 9,5%.

O aumento da pressão e temperatura em um fluxo ascendente transfere uma porcentagem da umidade da camada inferior para as camadas intermediária e superior. Analisando os resultados de umidade da camada superior, percebe-se que os valores ficaram bem próximos da umidade ideal, ocasionando um aumento da CPCU.

Para a resistência das pelotas cruas e úmidas da camada intermediária o resultado não foi evidenciado. Por existir pelotas com diferentes valores de umidade não foi possível identificar um efeito significativo dos fatores pressão, temperatura e produção.

Para a resistência das pelotas cruas e úmidas da camada inferior, o resultado ficou igual à resistência das pelotas cruas e secas. Como os valores de umidade nestas camadas ficaram bem baixas devido à eficiência de secagem, o efeito da umidade ideal não foi percebido. É fácil compreender que pelotas das camadas intermediárias e, principalmente das inferiores, sofrem uma influência maior de secagem, obtendo valores baixos de umidade. Quando comparamos a resistência à compressão das pelotas cruas e secas com a resistência a compressão das pelotas cruas e úmidas das camadas inferiores e intermediárias os fatores pressão, temperatura e a produção têm influências iguais, ou seja, influência negativa na resistência física.

#### 5.1.1.4 – Previsão de resultados de Umidade das três Camadas após a Secagem

##### Ascendente - Pelotas Heterogêneas utilizando o statgraphics

Os gráficos das Figuras 5.19, 5.20 e 5.21 mostram a influência da pressão, temperatura e produção na umidade das pelotas das camadas superior, intermediária e inferior.

Para facilitar a construção gráfica, os fatores estudados foram padronizados com as seguintes denominações:

A – Produção (toneladas/ano);

B – Temperatura (°C);

C – Pressão (mmca);

AA, AB, AC, BB, BC e CC – Interações ente os fatores.

Todos os fatores ou interações de fatores, cujas barras forem superiores a delimitação da linha vertical, no gráfico de Pareto, são considerados efeitos significativos para a variável resposta em questão.

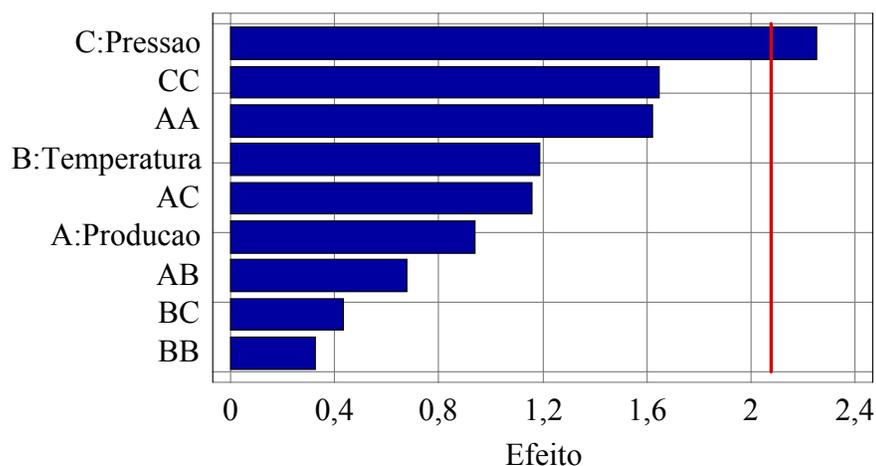


Figura 5.19 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Superior (95% de confiança).

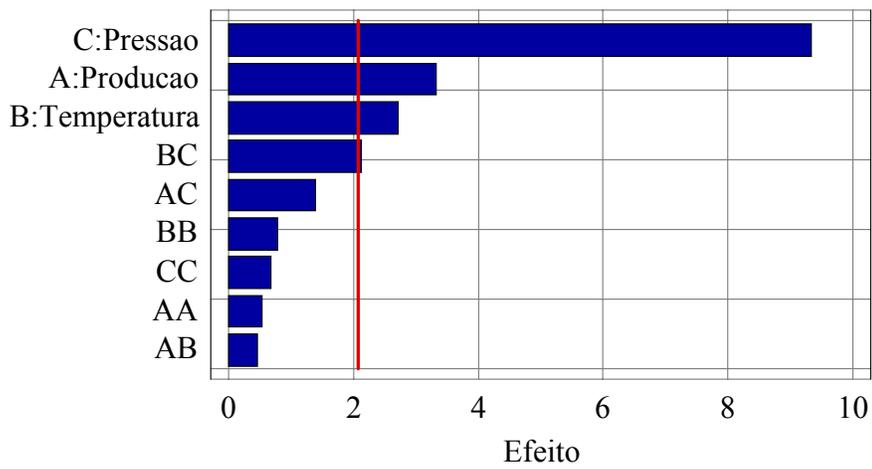


Figura 5.20 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Intermediária (95% de confiança).

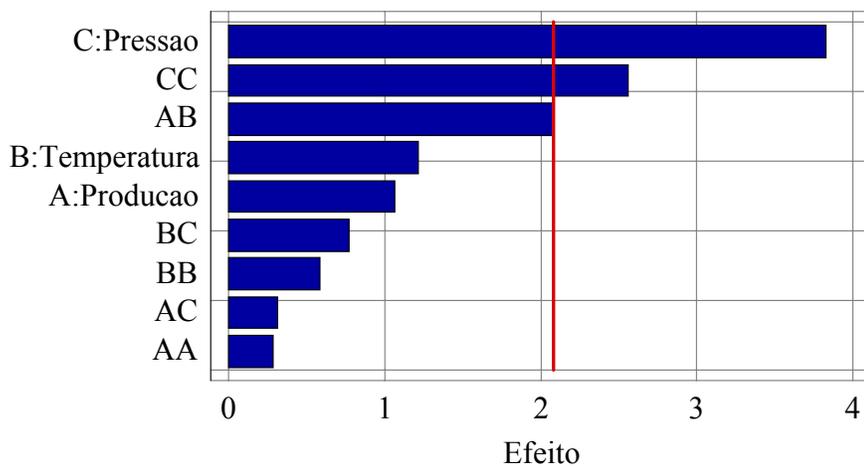


Figura 5.21 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Inferior (95% de confiança).

Nota-se nos gráficos de Pareto que o fator pressão exerce grande influência nas variáveis respostas umidade camadas superior, intermediária e inferior. Observa-se que o fator produção e temperatura são significativos na umidade camada intermediária. Não foi observado efeito significativo da temperatura e produção nas variáveis respostas umidade camada superior e inferior.

As interações entre os fatores principais, pressão, temperatura e produção serão analisadas através do desdobramento dos diagramas de interações dos principais efeitos.

Observa-se no gráfico da Figura 5.22 que o aumento da pressão e temperatura reduziu a umidade da camada superior. Já o acréscimo da produção, ocasionando uma redução no tempo de secagem, elevou os valores de umidade na camada superior. O efeito da temperatura, pressão e produção na redução da umidade foram semelhantes ao observado para as pelotas homogêneas, sendo que, o efeito da temperatura, pressão e produção foram mais evidentes para as pelotas homogêneas. Este efeito pode estar relacionado com a melhor permeabilidade do leito devido a granulometria das pelotas homogêneas.

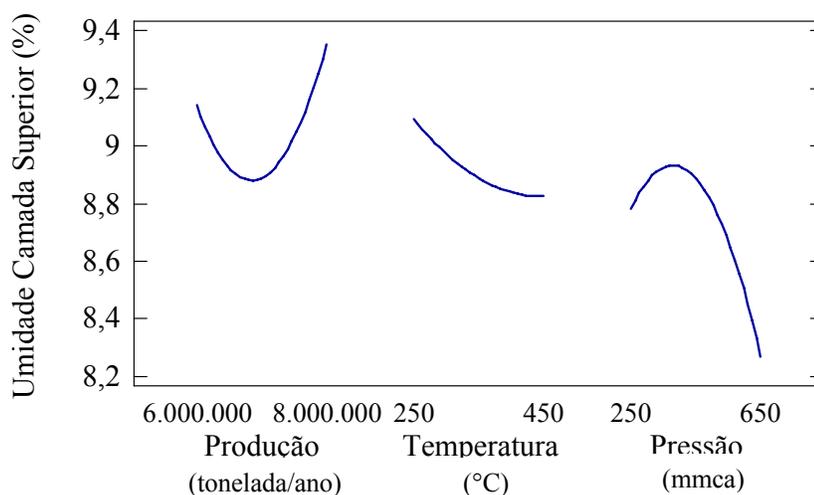


Figura 5.22 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na umidade da camada superior utilizando o statgraphics.

Estes três fatores influenciaram também na umidade das camadas intermediária e inferior conforme pode ser observado nos gráficos da Figura 5.23 e 5.24.

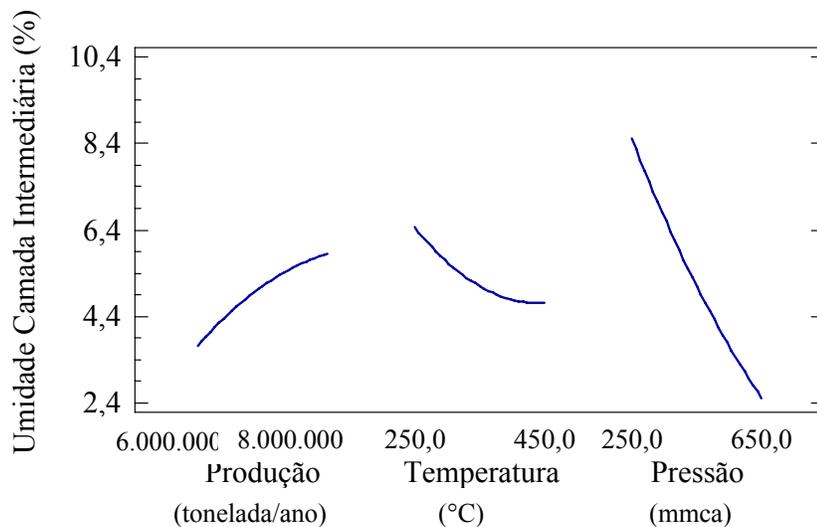


Figura 5.23 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na umidade da camada intermediária utilizando o statgraphics.

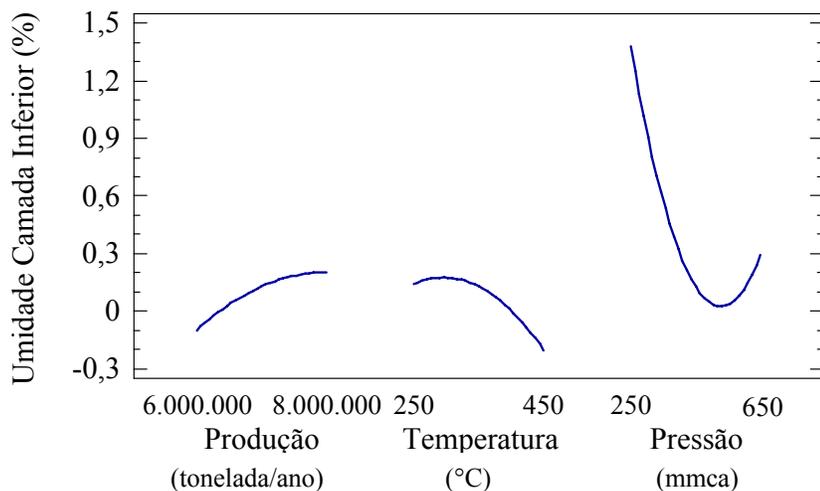


Figura 5.24 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na umidade da camada inferior utilizando o statgraphics.

Observa-se nos gráficos das Figuras 5.23 e 5.24 que o aumento da pressão influenciou fortemente na redução da umidade das camadas intermediária e inferior. Já a temperatura e produção, não influenciaram significativamente na umidade.

Quanto à influência da pressão, temperatura e produção, as previsões foram de acordo com a teoria. O aumento da pressão e temperatura levou a uma redução da umidade das pelotas nas camadas superior, intermediária e inferior. O aumento da produção, por sua vez, elevou a umidade das pelotas nas camadas superior, intermediária e inferior.

#### **5.1.1.5 – Previsão de resultados de CPCS das três Camadas após a Secagem Ascendente - Pelotas Heterogêneas utilizando o statgraphics**

Para analisar os resultados da resistência à compressão das pelotas cruas secas (CPCS), utilizou-se os diagramas de interações dos principais efeitos.

Nota-se no gráfico da Figura 5.25 que para uma alta temperatura e alta pressão a resistência à compressão das pelotas cruas e secas ficou baixa. Isto pode ser devido à alta taxa de secagem nestas condições de temperatura e pressão podendo gerar trincas e fraturas. Este mesmo resultado foi percebido para a resistência à compressão das pelotas cruas secas da camada superior para pelotas homogêneas.

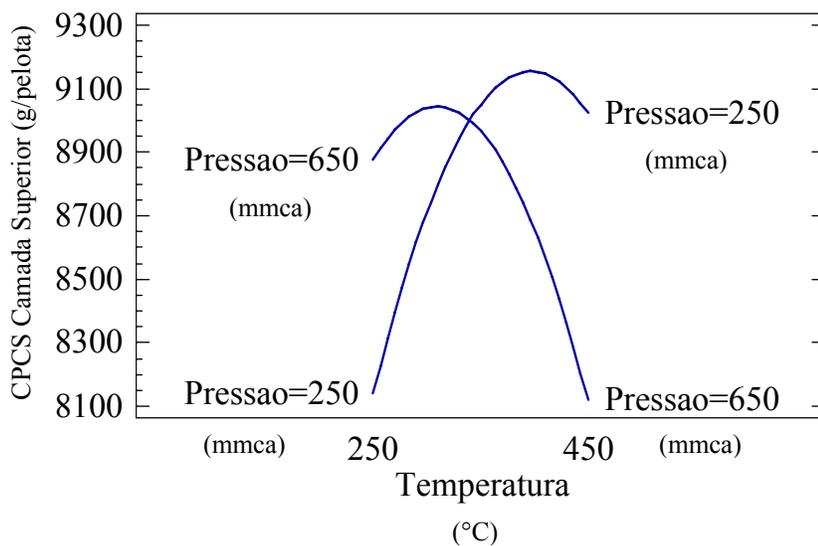


Figura 5.25 – Diagrama de interação para a CPCS da camada superior, em função da temperatura e pressão.

Os gráficos das Figuras 5.26 e 5.27 mostram a influência da pressão e temperatura na resistência à compressão das pelotas cruas secas (CPCS) da camada intermediária e inferior.

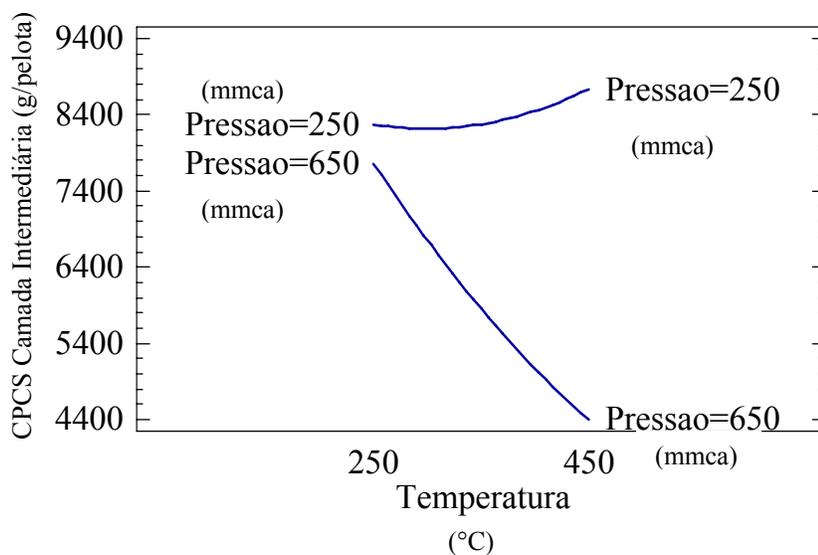


Figura 5.26 – Diagrama de interação para a CPCS da camada intermediária, em função da temperatura e pressão.

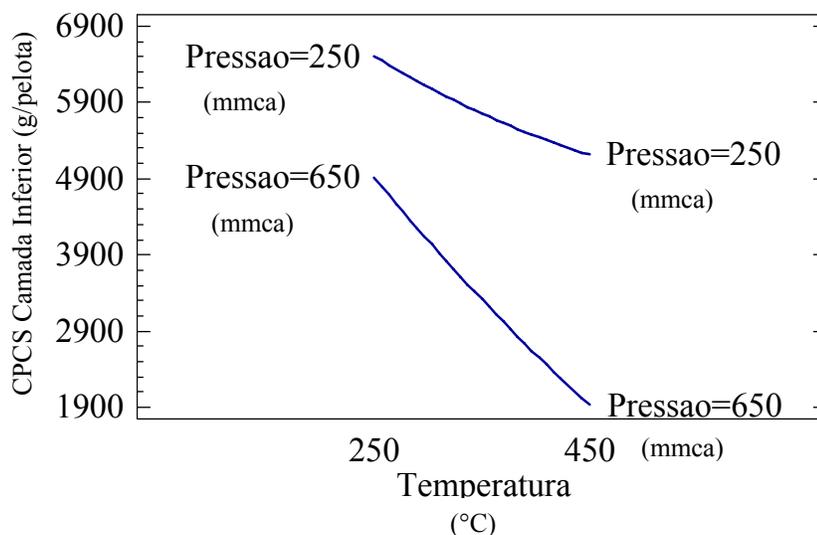


Figura 5.27 – Diagrama de interação para a CPCS da camada inferior, em função da temperatura e pressão.

Nota-se no gráfico da Figura 5.26 que existe uma forte interação entre a pressão e a temperatura quando a temperatura é elevada (450°C). Observa-se nesta condição, que para uma pressão elevada a CPCS da camada intermediária é baixa, sendo que para uma pressão reduzida a CPCS é alta. Na condição de baixa temperatura (250°C) o efeito da pressão não foi expressivo. Este mesmo comportamento pode ser observado na CPCS da camada inferior conforme gráfico da Figura 5.27.

### 5.1.1.6 – Previsão de resultados de CPCU das Três Camadas após a Secagem Ascendente - Pelotas Heterogêneas utilizando o statgraphics

Para analisar os resultados da resistência à compressão das pelotas cruas úmidas (CPCU), utilizou-se os diagramas de interações dos principais efeitos.

Observa-se no gráfico da Figura 5.28 que o aumento da temperatura aumentou a CPCU da camada superior. Já o efeito da produção e pressão não foram evidenciado nos valores de CPCU da camada superior. Este efeito da temperatura na resistência à compressão das pelotas cruas úmidas (CPCU) da camada superior foi observado também para as pelotas homogêneas.

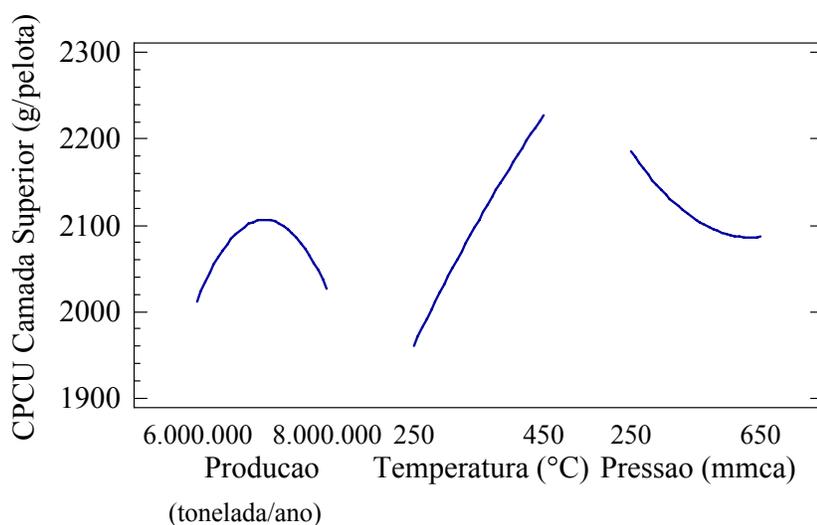


Figura 5.28 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na CPCU da camada superior.

Os gráficos das Figuras 5.29 e 5.30 mostram a influência da produção, pressão e temperatura na resistência à compressão das pelotas cruas úmidas (CPCU) da camada intermediária e inferior.

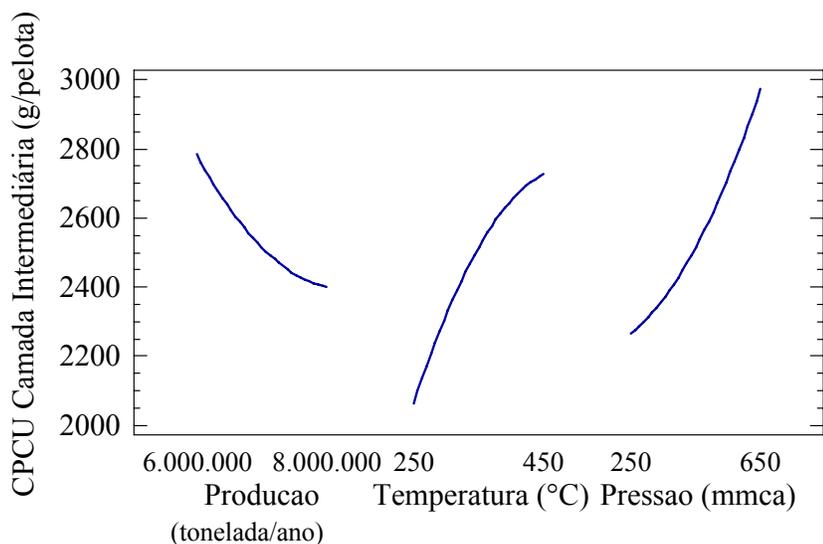


Figura 5.29 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção na CPCU da camada intermediária.

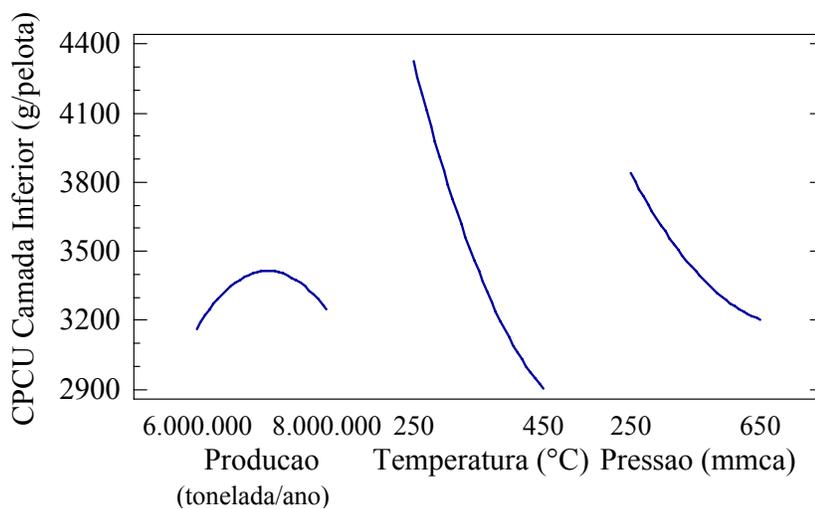


Figura 5.30 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção CPCU da camada inferior.

Observa-se no gráfico da Figura 5.29 que o aumento da pressão e temperatura aumentou a CPCU da camada intermediária. O aumento da produção, ocasionando uma redução no tempo de secagem, reduziu os valores de CPCU da camada intermediária. O efeito da temperatura, pressão e produção na resistência à compressão das pelotas cruas úmidas (CPCU) da camada intermediária foi o mesmo observado na resistência à compressão das pelotas cruas úmidas (CPCU) da camada superior e intermediária para pelotas homogêneas.

Para a CPCU da camada inferior o efeito da pressão, temperatura e produção foram o mesmo encontrado para a CPCU da camada inferior pelotas homogêneas, conforme podemos observar nos gráficos das Figuras 5.18 e 5.30.

Conforme já mencionado no item 5.1.1.2, o aumento da pressão e temperatura em um fluxo ascendente, transfere uma porcentagem da umidade da camada inferior para as camadas intermediária e superior. Analisando os resultados de umidade da camada superior, percebe-se que os valores ficaram bem próximos da umidade ideal, ocasionando um aumento da CPCU.

#### **5.1.1.7 – Resumo dos resultados do experimento da Secagem Ascendente Pelotas Heterogêneas**

Para facilitar a interpretação dos resultados obtidos nos experimentos utilizou-se a tabela 5.3, onde:

- Os números 1, 2 e 3 significam qual fator influenciou mais fortemente a variável resposta em ordem crescente;
- O (\*) se ele é significativo ou não;
- As setas se o fator tem influência positiva (↑) ou negativa (↓) a variável resposta.

Tabela 5.3 – Influência dos fatores sobre as variáveis respostas secagem ascendente para pelotas heterogêneas.

Pelotas Heterogêneas		Umidade (%)					
		Camada Superior		Camada Intermediária		Camada Inferior	
	Produção (tons/ano)	↓	3	↓	2*	↓	3
	Temperatura (°C)	↑	2	↑	3*	↑	2
	Pressão (mmca)	↑	1*	↑	1*	↑	1*
		CPCS (g/pelota)					
		Camada Superior		Camada Intermediária		Camada Inferior	
	Produção (tons/ano)	↑	3	↑	3	↑	3*
	Temperatura (°C)	↓	1*	↓	2*	↓	1*
	Pressão (mmca)	↓	2	↓	1*	↓	2*
	CPCU (g/pelota)						
	Camada Superior		Camada Intermediária		Camada Inferior		
Produção (tons/ano)	↓	3	↑	3	↑	3	
Temperatura (°C)	↑	1*	↑	2*	↓	1*	
Pressão (mmca)	↓	2	↑	1*	↓	2	

Os resultados encontrados no experimento da secagem ascendente de pelotas heterogêneas seguiram a mesma tendência dos resultados do experimento para pelotas homogêneas como pode ser observado na tabela 5.3. Todos os fatores tiveram o mesmo comportamento e influência nas variáveis respostas sendo que a significância e a importância foram distintas para cada experimento, com exceção do CPCU.

Para as pelotas heterogêneas a média de umidade da camada superior ficou em 8,93%, da camada intermediária em 5,46% e da camada inferior em 0,42%, sendo que para pelotas homogêneas estes valores ficaram em 8,07%, 3,85% e 0,23% respectivamente. Isto pode estar relacionado à permeabilidade do leito de pelota. Testes já foram realizados no processo industrial onde se procurou trabalhar com pelotas em faixas granulométricas muito estreitas buscando uma maior permeabilidade do leito. Os resultados foram bem satisfatórios no aspecto de umidade e da qualidade física final do produto.

### **5.1.2 - Resultados do projeto experimento Secagem Descendente**

Conforme item 4.2 do Capítulo 4.0, a condição de pressão e temperatura da secagem ascendente, utilizada para os dois testes preliminares da secagem descendente, foi 650 mmca e 380°C respectivamente. Esta condição de pressão e temperatura foi assumida em função dos resultados do experimento da secagem ascendente e dos limites de operação dos ventiladores em uso.

A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos para as variáveis respostas estudadas, umidade nas três camadas (superior, intermediária e inferior), CPCU e CPCS, após o teste da secagem ascendente e descendente para uma pelota heterogênea. A interpretação dos dados foi realizada utilizando o software Statgraphics.

Tabela 5.4 – Resultados dos testes da secagem descendente para uma pelota heterogênea.

Pelotas Heterogêneas														
Bloco	Réplica	Teste	Tempo (seg.)	Temperatura (°C)	Pressão (mmca)	CPCU Superior (g/pelota)	CPCU Intermediária (g/pelota)	CPCU Inferior (g/pelota)	CPCS Superior (g/pelota)	CPCS Intermediária (g/pelota)	CPCS Inferior (g/pelota)	UMIDADE Superior (%)	UMIDADE Intermediária (%)	UMIDADE Inferior (%)
1	1	1	125	250	-450	1439	2179	1902	6274	4386	2152	5,28	1,53	0,07
1	1	2	125	350	-250	1249	2719	2306	6379	4145	2157	6,70	1,06	0,10
1	1	3	146	250	-250	1966	3705	1870	6347	3341	1866	6,08	0,00	0,00
1	1	4	125	450	-450	1825	3278	1911	6215	3282	1752	4,77	0,47	0,00
1	1	5	146	350	-450	2611	2629	1771	6342	2334	1830	2,71	0,00	0,00
1	1	6	146	450	-650	3369	3832	2038	3696	2683	1993	0,63	0,00	0,00
1	1	7	146	450	-250	2315	4277	2238	6706	4681	2306	4,30	0,37	0,00
1	1	8	109	450	-250	2016	3927	3546	7505	5094	2361	6,09	1,83	0,07
1	1	9	109	450	-650	2066	2665	2479	5775	5661	2638	4,84	3,08	0,07
1	1	10	109	350	-450	2306	3414	2025	5634	5139	2715	5,64	0,86	0,00
1	1	11	125	350	-450	1925	3223	2048	5857	4508	2129	6,23	0,69	0,00
1	1	12	146	250	-650	2329	4290	1775	6955	4254	1930	3,09	0,00	0,00
1	1	13	125	350	-450	2270	3105	1893	7305	4772	1603	3,23	0,86	0,00
1	1	14	109	250	-650	1870	3133	2202	6406	3882	2856	4,13	0,13	0,07
1	1	15	106	250	-250	1934	3814	2088	8154	6047	1907	6,27	0,89	0,00
1	1	16	125	350	-650	3096	3110	2306	5448	3301	1707	1,72	0,13	0,00
1	2	17	125	250	-450	2275	3746	1643	8476	5062	1616	5,56	0,76	0,07
1	2	18	125	350	-250	1939	3727	1771	7405	5416	1984	5,69	0,59	0,00
1	2	19	146	250	-250	2388	3459	1625	7378	4045	1889	5,37	0,10	0,00
1	2	20	125	450	-450	2075	4068	1889	5943	5357	2116	3,38	0,62	0,00
1	2	21	146	350	-450	3101	4558	1925	5825	4726	2129	2,75	0,03	0,00
1	2	22	146	450	-650	2079	3469	2016	5062	4844	1807	1,84	0,30	0,00
1	2	23	146	450	-250	2206	3845	1916	7927	5693	1934	7,24	1,08	0,00
1	2	24	109	450	-250	1703	4263	3659	7786	4554	3596	5,84	1,59	0,00
1	2	25	109	450	-650	1653	3133	3973	6869	6742	3055	4,89	1,65	0,00
1	2	26	109	350	-450	1993	4086	2529	6869	4835	2361	5,71	0,16	0,00
1	2	27	125	350	-450	2225	3328	1925	7073	4776	2020	6,61	1,11	0,03
1	2	28	146	250	-650	3151	2928	1870	6578	3482	1775	1,41	0,03	0,00
1	2	29	125	350	-450	1562	3854	2175	7091	4635	2374	5,41	0,10	0,00
1	2	30	109	250	-650	1630	4567	2025	6787	5203	1816	5,60	0,73	0,00
1	2	31	106	250	-250	1834	3555	1739	7387	4781	1457	4,85	0,56	0,00
1	2	32	125	350	-650	2084	3832	2052	6120	4095	2297	2,89	0,13	0,03

### 5.1.2.0 – Previsão de resultados de Umidade das três Camadas após a Secagem

#### Descendente - Pelotas Heterogêneas utilizando o statgraphics

Os gráficos das Figuras 5.31 e 5.32 mostram a influência da pressão, temperatura e produção na umidade das pelotas das camadas superior e intermediária. Como os valores de umidade da camada inferior ficaram próximos, não foi evidenciado a influência dos fatores sobre esta variável resposta.

Para facilitar a construção gráfica, os fatores estudados foram padronizados com as seguintes denominações:

A – Produção (toneladas/ano);

B – Temperatura (°C);

C – Pressão (mmca);

AA, AB, AC, BB, BC e CC – Interações ente os fatores.

Todos os fatores ou interações de fatores, cujas barras forem superiores a delimitação da linha vertical, no gráfico de Pareto, são considerados efeitos significativos para a variável resposta em questão.

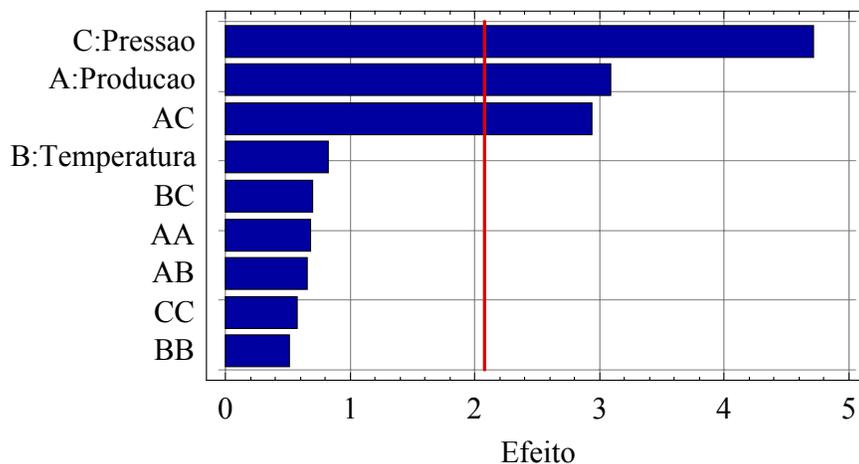


Figura 5.31 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Superior (95% de confiança).

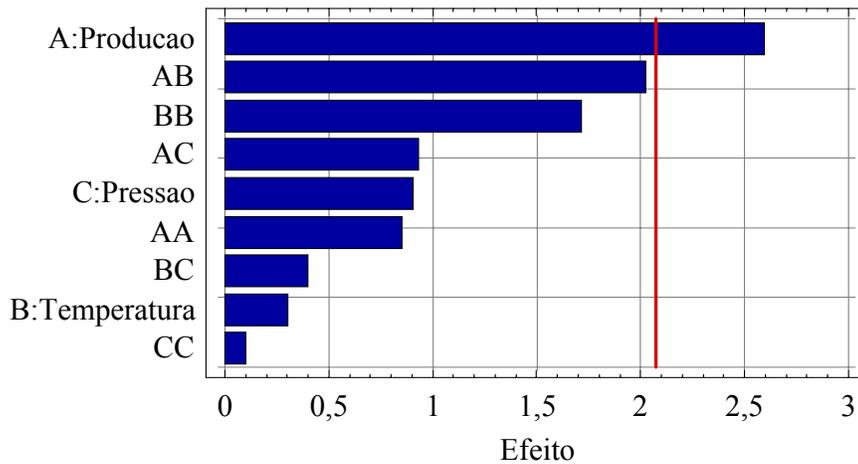


Figura 5.32 - Gráfico de Pareto padronizado para os efeitos significativos para variação da Umidade Camada Intermediária (95% de confiança).

Nota-se nos gráficos de Pareto que os fatores pressão, produção e interação destes dois fatores exerce influência na variável resposta umidade camada superior. Observa-se que o fator produção é significativa na umidade camada intermediária. Não foi observado efeito significativo da temperatura nas variáveis respostas umidade camada superior e intermediária.

As interações entre os fatores principais, pressão e produção serão analisadas através do desdobramento das superfícies de resposta e dos diagramas de interações dos principais efeitos.

Observa-se no gráfico da superfície de resposta da Figura 5.33 que o aumento da pressão, para uma produção baixa (6.000.000 toneladas/ano), reduziu a umidade da camada superior. Já o acréscimo da produção, ocasionando uma redução no tempo de secagem, elevou os valores de umidade na camada superior, independente da pressão exercida.

Esta observação pode ser melhor visualizada no gráfico do diagrama de interações da pressão e produção da Umidade Camada Superior Figura 5.34.

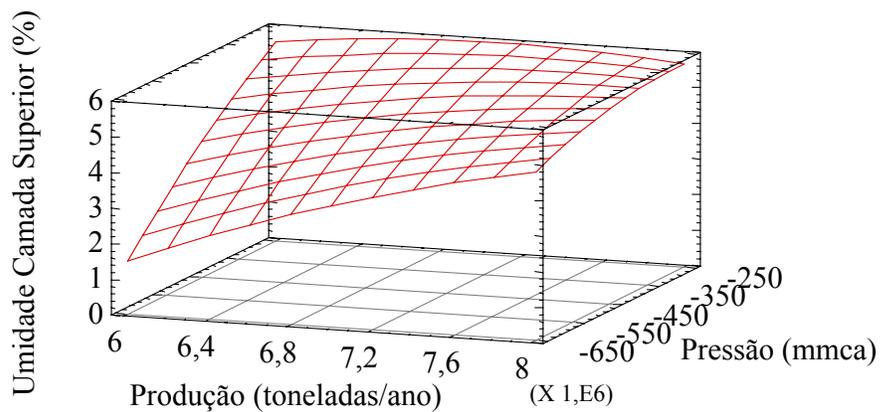


Figura 5.33 - Superfície de resposta para a umidade da camada superior, em função da produção e pressão.

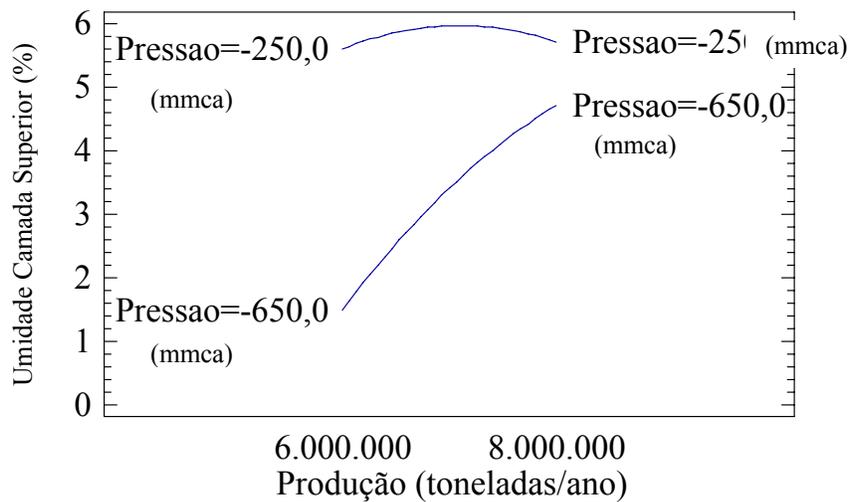


Figura 5.34 – Diagrama de interação para a umidade da camada superior, em função da produção e pressão.

O fator produção influencia também na umidade das camadas intermediária conforme pode ser observado no gráfico do diagrama de interações da pressão e produção da Figura 5.35.

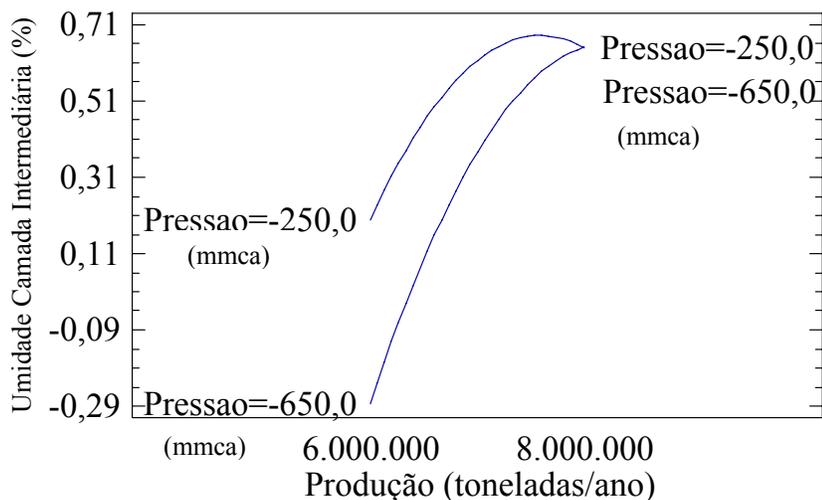


Figura 5.35 – Diagrama de interação para a umidade da camada intermediária, em função da produção e pressão.

Nota-se no gráfico da Figura 5.35 que existe uma interação entre a pressão e a produção quando a produção é baixa (6.000.000 toneladas/ano). Observa-se nesta condição, que para uma pressão elevada a umidade da camada intermediária reduziu. Na condição de alta produção (8.000.000 toneladas/ano) o efeito da pressão não foi notado. Este mesmo comportamento foi observado na umidade da camada superior conforme gráficos das Figuras 5.33 e 5.34.

Quanto à influência da pressão e produção, os resultados obtidos foram de acordo ao que a teoria diz. O aumento da pressão levou a uma redução da umidade das pelotas nas camadas superior e intermediária. Já o aumento da produção, por sua vez, elevou a umidade das pelotas nas camadas superior e intermediária.

### 5.1.2.1 – Previsão de resultados de CPCS das três Camadas após a Secagem Descendente - Pelotas Heterogêneas utilizando o statgraphics

Para analisar os resultados da resistência à compressão das pelotas cruas secas (CPCS), utilizou-se os diagramas de interações dos principais efeitos.

Nota-se no gráfico da Figura 5.36 que para uma alta temperatura e alta pressão a resistência à compressão das pelotas cruas e secas ficou baixa. Isto pode ser devido à alta taxa de secagem nestas condições de temperatura e pressão podendo gerar trincas e fraturas. Como o fluxo de gás é descendente, o impacto da pressão e temperatura na camada superior é maior. Este mesmo resultado foi percebido para a resistência à compressão das pelotas cruas secas da camada inferior, pelotas homogêneas e heterogêneas da secagem ascendente (fluxo ascendente).

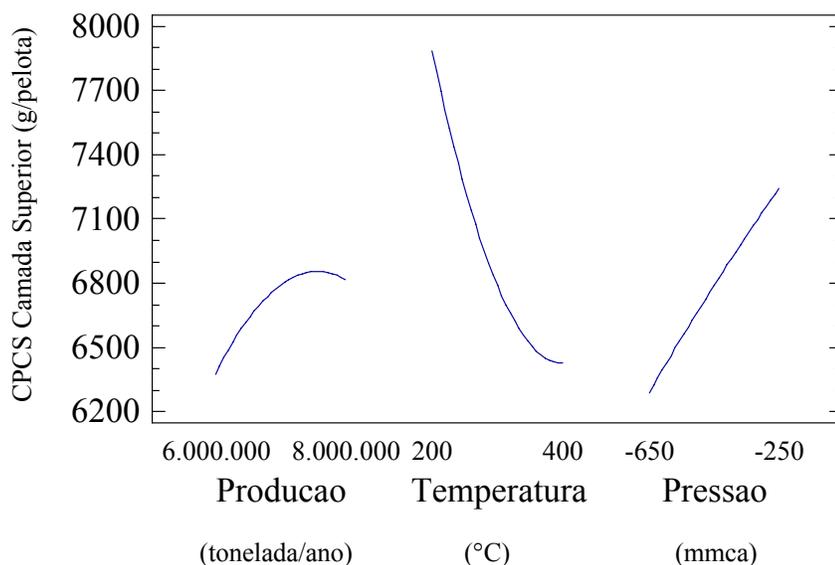


Figura 5.36 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção CPCS da camada Superior utilizando o statgraphics.

Os gráficos das Figuras 5.37 e 5.38 mostram a influência da produção, pressão e temperatura na CPCS da camada intermediária e inferior.

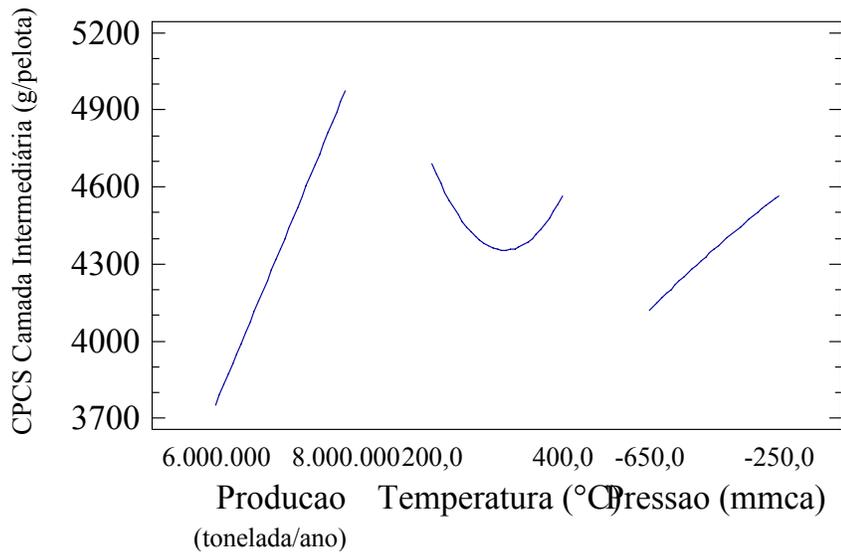


Figura 5.37 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção CPCS da camada Intermediária utilizando o statgraphics.

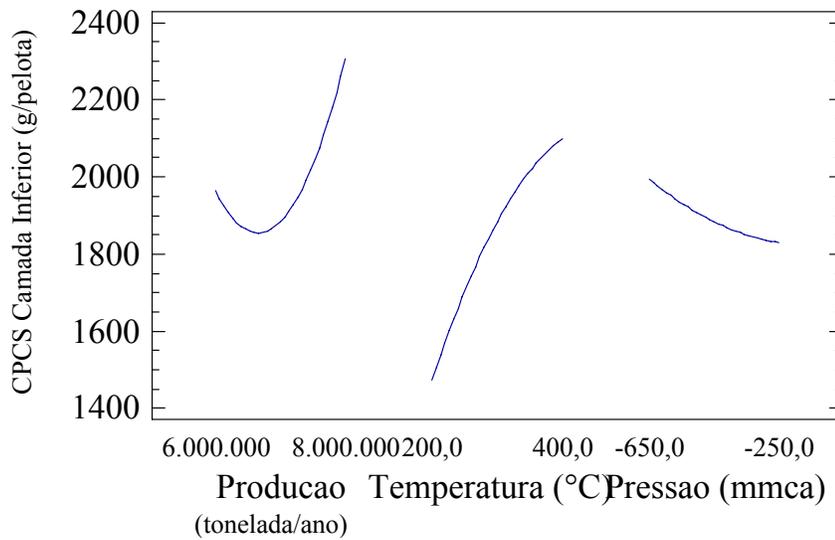


Figura 5.38 – Influência dos fatores pressão, temperatura e produção CPCS da camada inferior utilizando o statgraphics.

Observa-se no gráfico da Figura 5.37 que o aumento da produção aumentou a CPCS da camada intermediária. Não foi observado efeito significativo da temperatura e pressão na variável resposta umidade camada intermediária.

O efeito da temperatura e pressão na resistência à compressão das pelotas cruas secas (CPCS) da camada inferior foi o inverso observado na resistência à compressão das pelotas cruas secas (CPCS) das camadas superior e intermediária. Isto pode ser justificado pela queda da taxa de secagem das camadas superior e intermediária quando se trabalhou com temperatura e pressão reduzidas no fluxo descendente. O aumento da produção, reduzindo o tempo de secagem, também influenciou no aumento da resistência à compressão das pelotas cruas e secas da camada inferior. O efeito da impermeabilidade do leito e da secagem ascendente anterior ao processo de secagem descendente podem ter influenciado na taxa de secagem e conseqüentemente na resistência a compressão das pelotas cruas e secas.

#### **5.1.2.2 – Previsão de resultados de CPCU das Três Camadas após a Secagem**

##### **Descendente - Pelotas Heterogêneas utilizando o statgraphics**

Não foi encontrado evidências significativas do efeito da temperatura, pressão e produção na resistência a compressão das pelotas cruas e úmidas das camadas superior, intermediária e inferior.

A baixa influência dos fatores e suas interações na resistência à compressão da pelotas cruas e úmidas pode ser um ruído atribuído aos seguintes fatores:

- Impermeabilidade do leito de pelotas (Pelotas Heterogêneas);
- Efeito da secagem ascendente anterior ao processo de secagem descendente;
- Dificuldade em obter 20 pelotas da mesma camada com valores próximos de umidade para realização do teste de compressão a úmido;
- Necessidade de uma maior rapidez (perda rápida de umidade) na coleta das pelotas para a realização dos testes de compressão a úmido;
- Umidade de algumas pelotas cruas e úmidas (grau de umidade ideal), principalmente na camada superior (de 0,5% até 7,0%);
- Contaminação de pelotas cruas secas com pelotas cruas úmidas, principalmente nas camadas intermediária e inferior.

### 5.1.2.3 – Resumo dos resultados do experimento Secagem Descendente Pelotas

#### Heterogêneas

Para facilitar a interpretação dos resultados obtidos nos experimentos utilizou-se a tabela 5.4, onde:

- Os números 1, 2 e 3 significam qual fator influenciou mais fortemente a variável resposta;
- O (\*) se ele é significativo ou não;
- As setas se o fator tem influência positiva (↑) ou negativa (↓) a variável resposta.

Tabela 5.5 – Influência dos fatores sobre as variáveis respostas secagem descendente para pelotas heterogêneas.

Pelotas Heterogêneas		Umidade (%)					
		Camada Superior		Camada Intermediária		Camada Inferior	
	Produção (tons/ano)	↓	2*	↓	1*	↓	1
	Temperatura (°C)	↑	3	↑	3	↑	3
Pressão (mmca)	↑	1*	↑	2	↑	2	
		CPCS (g/pelota)					
		Camada Superior		Camada Intermediária		Camada Inferior	
	Produção (tons/ano)	↑	3	↑	1*	↑	3
	Temperatura (°C)	↓	1*	↓	3	↑	1
Pressão (mmca)	↓	2*	↓	2	↑	2	

Observa-se que os fatores pressão e produção têm influência significativa na redução da umidade da camada superior. O fator produção favoreceu a redução da umidade nas camadas intermediária e inferior, sendo que este efeito é maior e mais significativo na camada intermediária. O fator temperatura não foi evidenciado na redução da umidade na secagem descendente.

O aumento da temperatura e pressão reduziu a resistência das pelotas cruas e secas da camada superior. Como o fluxo de gás é descendente, o impacto da pressão e temperatura na camada superior é maior. Na camada intermediária somente o fator produção foi evidenciado.

Para a resistência das pelotas cruas e úmidas o resultado não foi evidenciado. Por existir pelotas com valores de umidade bem próximos de zero, não foi possível identificar um efeito significativo dos fatores pressão, temperatura e produção.

## 6 – CONCLUSÕES

Em relação aos resultados obtidos pela utilização do software Statgraphics, podemos destacar alguns pontos relacionados:

1. Os modelos gerados podem ser utilizados somente para ajudar a investigar como o processo de secagem ocorre dentro dos parâmetros pré-fixados e estabelecidos nos testes. Não existe entendimento completo do processo de secagem em fornos de pelotização com o qual os modelos poderão ser comparados.
2. Alterações no processo de secagem nos fornos de pelotização necessitam de investimentos elevados e de interrupções prolongadas de produção. Para verificar possíveis melhorias deste processo, manipulando algumas das variáveis significativas, seria menos dispendioso utilizar modelos simulados no Statgraphics.
3. Diversos parâmetros influenciam o processo de secagem em fornos de pelotização, e uma validação completa dos modelos gerados pode ser impossível de se alcançar.
4. Os modelos foram gerados dentro de parâmetros conhecidos. A utilização destes modelos em outros processos produtivos, onde existe interferência de outras variáveis, poderão interferir nos resultados finais.

Em relação aos resultados obtidos nos experimentos, podemos destacar:

1. Os resultados encontrados após o processo de secagem ascendente e descendente estão em acordo com as teorias de secagem de pelotas, ou seja, foi observado uma influência dos fatores pressão, temperatura, produção e granulometria da pelota crua nas variáveis respostas estudadas (umidade, resistência a compressão das pelotas cruas e secas (CPCS) e a resistência a compressão das pelotas cruas e úmidas (CPCU).
2. Mesmo minimizando os ruídos operacionais do pot grate, alguns resultados obtidos no experimento foram afetados conforme observado nos modelos gerados pelo Statgraphics.
3. Algumas variáveis do processo de secagem, como permeabilidade do leito e umidade ideal, que não foram consideradas como parâmetros neste estudo efetivamente influenciaram os resultados finais do experimento.
4. Os resultados obtidos permitem concluir que a utilização de minérios com baixos

valores de hematita especular (32%) necessitam de pressões e temperaturas baixas e produções reduzidas para que sejam alcançados níveis de umidade e qualidade físicas satisfatórias no processo final de secagem. Em compensação, não foi observado trincas e deformações significativas nas pelotas nos três níveis de pressão, temperatura e produção utilizados no experimento.

5. Os resultados obtidos no processo de secagem ascendente de pelotas homogêneas e heterogêneas permitem concluir que o fator pressão exerce uma influência significativa na redução da umidade nas três camadas de pelotas cruas. Em compensação, há um efeito negativo de menor gravidade, que é a perda de qualidade física, reduzindo a resistência das pelotas cruas e secas.
6. Foi observado uma baixa eficiência de secagem das pelotas da camada superior principalmente para altas produções. Este resultado afetou a secagem descendente como o resultado final do processo de secagem.
7. Os resultados obtidos no processo de secagem descendente permitem concluir que o fator *produção* exerce, se comparado com os fatores, temperatura e pressão, uma influência maior na redução da umidade nas três camadas de pelotas cruas.
8. Não foi evidenciado o efeito da temperatura no processo de secagem descendente.
9. Devido às dificuldades de repetibilidade do método de coleta das amostras das três camadas alguns resultados foram afetados, principalmente os resultados da resistência à compressão das pelotas cruas e úmidas.

## **7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com base nas conclusões apresentadas no item 6 e nas oportunidades de desenvolvimento identificadas durante a elaboração do presente trabalho, como sugestão principal, seria validar o modelos gerados pelo Statgraphics. Esta verificação se torna necessária, pois em alguns casos não foram encontradas evidencias significativas do efeito da temperatura, pressão e produção nas variáveis respostas estudadas.

Outras variáveis importantes comentadas nos resultados, a permeabilidade do leito de pelotas e a umidade ideal deveriam ser pesquisadas para identificar possíveis correlações com as variáveis respostas estudadas.

Minérios com diferentes níveis de hematita especular e teores elevados de PPC (perdas por calcinação), por apresentarem dificuldades nos processo de filtragem e conseqüentemente no processo de secagem, deveriam ser avaliados com uma maior atenção, identificando possíveis melhorias de processo.

Devido à dificuldade encontrada na amostragem das três camadas de pelotas no pot grate, interferindo em alguns resultados, seria necessária desenvolver uma metodologia mais confiável para não comprometer nos resultados finais.

## 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. TORIBIO, N. M. - *Estudo das características intrínsecas dos concentrados do minério de ferro do Complexo Alegria* – 101 páginas. Dissertação de Mestrado, REDEMAT - Ouro Preto, 2001.
2. FONSECA, M.C – *Influência da Distribuição Granulométrica do Pellet Feed no Processo de Aglomeração e na Qualidade da Pelota de Minério de Ferro para Redução Direta* - 126 páginas. Dissertação de Mestrado, REDEMAT – Ouro Preto, 2004.
3. MEYER, K. - *Pelletizing of Iron Ores* - Springer - Verlag Berlin, Heidelberg, and Verlag Stahleissen mbH, Düsseldorf, Germany, 21-205, 1980.
4. ARAÚJO, D. R - *Influência das Condições de Queima na Liberação de Enxofre durante Redução de Pelotas de Minério de Ferro*. 1997. 257 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – UFMG, 1997.
5. ARNOSTI, S. JR; M. INNOCENTINI, D. M; PANDOLFELLI, V. C.. - *Variáveis críticas no processo de secagem de concretos refratários*. Cerâmica v.45 n.292-293 São Paulo mar./jun. 1999.
6. GABAS, A.L. - *Secagem de uva Itália em leito fixo*. Campinas: UNICAMP, 1998. 135p. Dissertação Mestrado.
7. QUEIROZ, D.M.; PEREIRA, J.A.M. - *Secagem à baixa temperatura*. Viçosa: UFMG/CENTREINAR, 1987, 30p.
8. VILLELA, F.A; PESKE, S.T. - *Secagem de Sementes*. In: PESKE, S.; ROSENTHAL, M; ROTA G. (Ed.) Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos. Pelotas: UFPel, 2003. p. 283-321.
9. KROKIDA, M.K.; KIRANOUDIS, C.T.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. - *Drying related properties of apple*. Drying Technology, New York, v.18, n.6, p.1251-1267, 2000.
10. KIRANOUDIS, C.T.; TSAMI, E.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. - *Drying kinetics of some fruits*. Drying Technology, New York, v.15, n.5, p.1399-1418, 1997.

11. LASSERAN, J.C. - *Princípios gerais de secagem*. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, 3(3): 17-45, 1978.
12. HALL, C.W. - *Drying and storage of agricultural crops*. Westport, AVI Publishing, 1980. 382p.
13. KREYGER, J. - *Practical observations on the drying of seed*. Seed Science and Technology. Zurich, 1:645-70, 1973.
14. BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEM A, F.W.; HALL, C.W. - *Drying cereal grains*. Westport, AVI Publishing, 1974. 265p.
15. QUEIROZ, D.M.; CORRÊA, P.C.; SOUZA, C.M.A. SIMSEC - *Um programa para simulação de secagem*. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE PÓS-COLHEITA, 1., Porto Alegre, 1999. Anais. Passo Fundo: Abrapós; Cesa; Embrapa Trigo, 1999. p.248.
16. FORD, R. W. - *Drying – Institute of Metals* - 62 páginas. Maclaren and Sons LTD – London, England.
17. PEREIRA, R. O. S; SESHADRI, V. – *Secagem de pelotas de minério de ferro – Metalurgia – ABM*, V. 41, n. 328, p.141-144, 1985.
18. HASENACK, N.A; LEBELLE, P. A. M.; KOOY, J. J. – *The Induration process of pellets on a moving strand. In: Mathematical Process Models in Iron and Steelmaking*. London, Metals Society, 1975, p. 6-16.
19. THURLBY, J. A; BATHERHAM, R. J. – *Transactions of Institution of Mining and Metallurgy*, London, v. 89, p. C125-C131, set. 1980.
20. VOSKAMP, J. H; BRASZ, J. – *Measurement and Control*, v. 8, p. 23-32, jan. 1975.
21. FONSECA, V. O – *Envelhecimento de pelotas de minério de ferro com diferentes basicidades e teores de MgO* - 253 páginas. Dissertação de Mestrado, REDEMAT – Ouro Preto, 2003.
22. CAMPOS, M. S – *Desvendando o Minitab* – 259 páginas - Rio de Janeiro, Qualitymark, 2003.
23. JURAN.J.M, M. GRZYNA F., *Juran's Quality Handbook*. McGraw Hill, 4ª edição, 1988.
24. MONTGOMERY, D. C; RUNGER, G. C. – *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros* – 463 páginas, John Wiley & Sons, Inc.
25. BOX, G.E.P., HUNTER, W.G., HUNTER, S. J., *Statistics For Experimenters, An*

- Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*, John Wiley & Sons, Inc. 1978, p. 510-535.
26. NETO, B. B; SCARMINIO, I. S; BRUNS, R. E. – *Como Fazer Experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria* – 2ªed. – Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003.
27. DYSHLOVENKO, S; PIERLOT, C; PAWLOWSKI, L; TOMASZEK, R; CHAGNON, P. - *Experimental design of plasma spraying and laser treatment of hydroxyapatite coatings*. Surface & Coatings Technology 201 (2006) 2054–2060.
28. BES-PIÁ, A; IBORRA-CLAR, M.I.; IBORRA-CLAR, A.; MENDOZA-ROCA, J.A; CUARTAS-URIBE, B; ALCAINA-MIRANDA, M.I; - *Nanofiltration of textile industry wastewater using a physicochemical process as a pre-treatment*. Desalination 178 (2005) 343-349.
29. LOPES, F. S; *Estudo do Fenômeno de Colagem das Pelotas Samarco durante o Processo de Redução Direta*. – 134 páginas. Dissertação de Mestrado, REDEMAT - Ouro Preto, 2004.
30. ARAGÃO, R.V., PEREIRA, H.C., ARAUJO, D.R. GOUVEIA, J.F., RANGEL, E.P., FONSECA, M.C., COSTA R.V.P. *Desenvolvimento de aglomerantes orgânicos na Samarco Mineração S/A.In: XXXI Seminário de Redução de Minério de Ferro, XV Seminário de Controle Químico em Metalurgia e XI Seminário de Carboquímicos* - Santos - SP, 2000. pp. 147-157.
31. LIMA, S. L. – *Treinamento em combustão – SLL Consultoria e Projetos* – Samarco Mineração S/A, Anchieta, 2004.
32. COSTA R. V. P. – *Relatório Interno da Samarco Mineração S/A*, Anchieta, ES, 2001.
33. SÁ K. G. - *Estudo da influência da mineralogia dos tipos de minério da samarco mineração sobre a resistência a compressão de pelotas para processos de redução direta* – 86 páginas. Dissertação de Mestrado, REDEMAT - Ouro Preto, 2003.
34. OTAVIANO, M.M – *Estudo Fenomenológico da Deposição de Carbono no Ferro-esponja Produzido a Partir de Pelotas de Minério de Ferro* - 122 páginas. Dissertação de Mestrado, REDEMAT – Ouro Preto, 2004.

35. MESCHIATTI, A. – *Relatório Interno da Samarco Mineração S/A*, Anchieta, ES, 2005.
36. GOULART, C.L. – *Otimização as Operações Unitárias de Espessamento e Filtragem da Samarco através de MSR*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, outubro, 1997.
37. WYNNYCKYJ, J.R., FAHIDY, T., Z., *Solid state sintering in the induration of iron ore*. Metallurgical Transactions, Volume 5, 1974. p. 991 - 999.
38. MATOS, A. P. - *Proposta de Dissertação de Mestrado apresentada a REDEMAT*, Ouro Preto – MG, março de 2005.

# **ANEXOS**

## **ANEXO 1 – TESTE PRELIMINAR DA METODOLOGIA**

Para verificar a aplicabilidade da metodologia proposta e o funcionamento dos equipamentos, bem como desenvolver novos métodos necessários à consecução do presente trabalho, foram realizados alguns testes preliminares para a secagem ascendente e descendente.

### **1.0 – OTIMIZAÇÃO DA SECAGEM ASCENDENTE NO POT GRATE**

Para otimizar o controle de temperatura e pressão na secagem ascendente, alguns testes preliminares foram realizados no pot grate variando três temperaturas (250°C, 350°C e 450°C) e três pressões (250mmca, 450mmca e 650mmca) nas duas granulometrias (Homogênea e Heterogênea conforme mostrado anteriormente nas tabelas 4.1 e 4.2). A variável produção (tempo) foi mantida constante em 332 segundos em todos os testes, o equivalente a um ritmo de produção de 7.000.000 de toneladas de pelotas/ano.

Os gráficos das Figuras 1.0 a 1.5 mostram o perfil de temperatura e pressão da secagem ascendente nas seguintes condições:

- 1.0: Pelota Heterogênea, temperatura de 250°C e na pressão de 250 mmca.
- 1.1: Pelota Heterogênea, temperatura de 350°C e na pressão de 450 mmca.
- 1.2: Pelota Heterogênea, temperatura de 450°C e na pressão de 650 mmca.
- 1.3: Pelota Homogênea, temperatura de 250°C e na pressão de 250 mmca.
- 1.4: Pelota Homogênea, temperatura de 350°C e na pressão de 450 mmca.
- 1.5: Pelota Homogênea, temperatura de 450°C e na pressão de 650 mmca.

O controle do sistema de temperatura ficou em manual no período de realização dos testes buscando-se reduzir ao máximo o tempo inicial de ajuste.

## Secagem Ascendente/Pelotas Heterogêneas

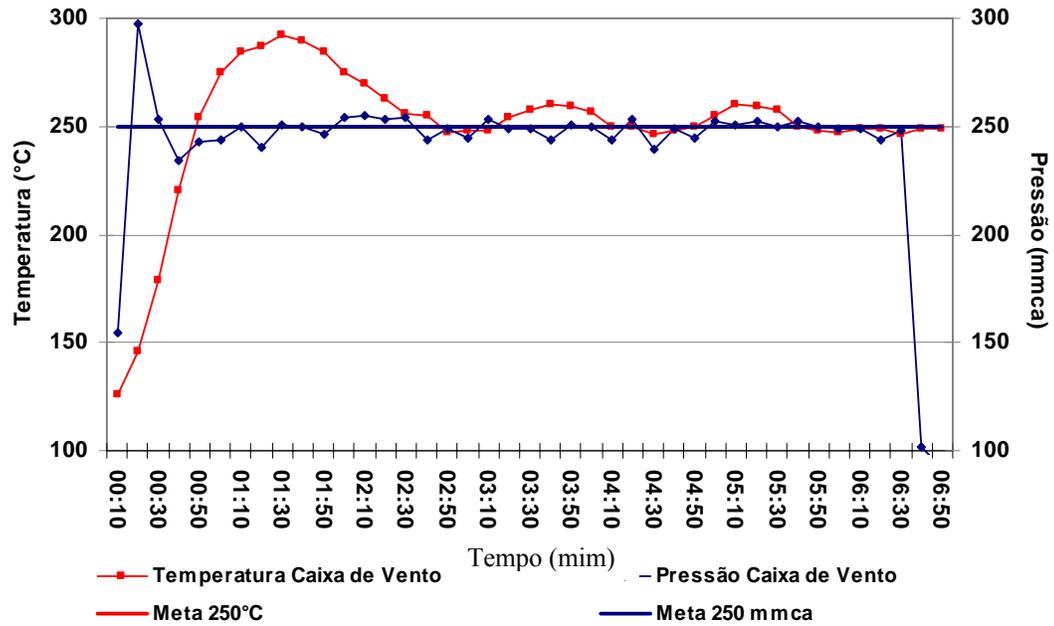


Figura 1.0 – Pelota Heterogênea, Temperatura de 250°C e na pressão de 250 mmca.

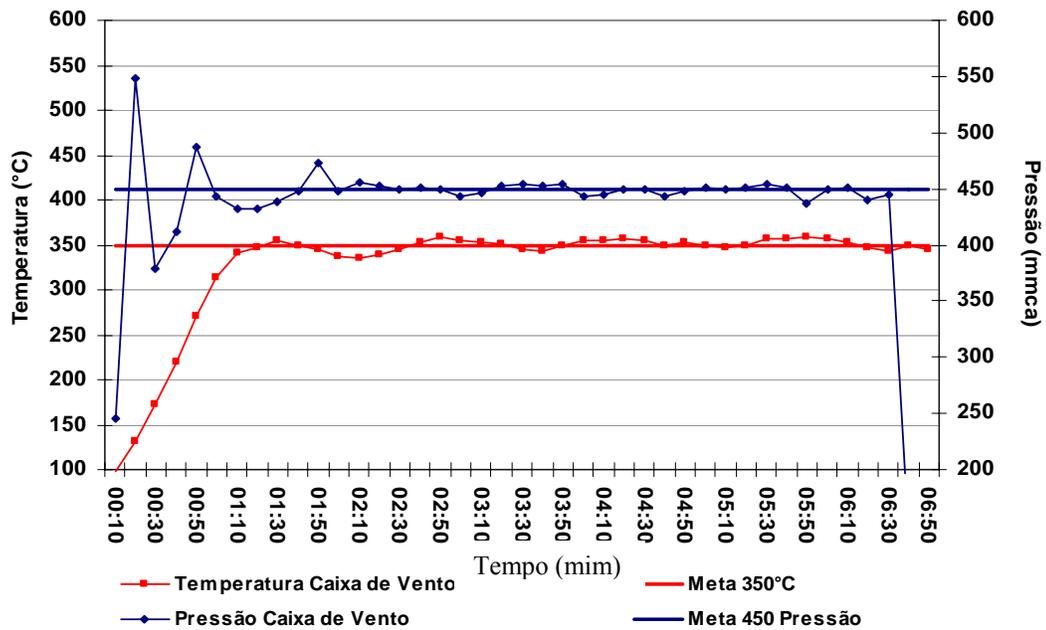


Figura 1.1 – Pelota Heterogênea, Temperatura de 350°C e na pressão de 450 mmca.

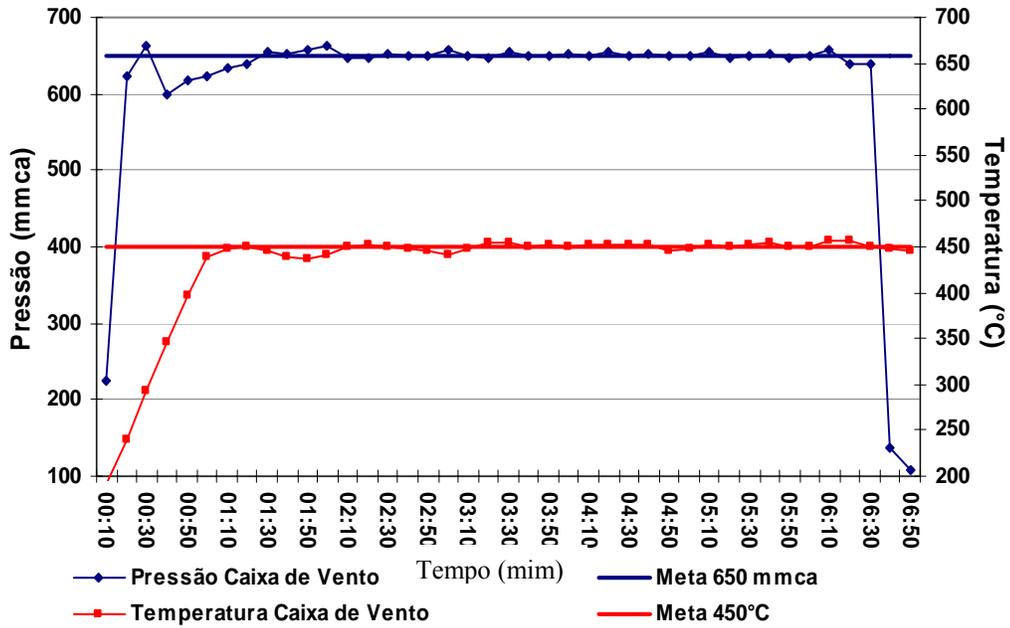


Figura 1.2 – Pelota Heterogênea, Temperatura de 450°C e na pressão de 650 mmca.

### Secagem Ascendente/Pelotas Homogêneas

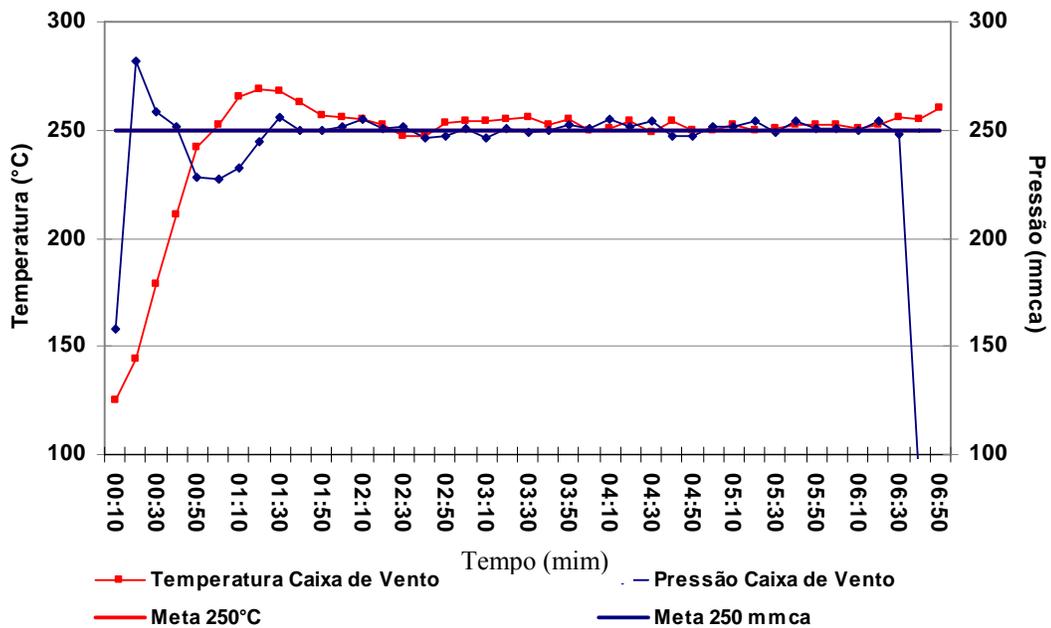


Figura 1.3 – Pelota Homogênea, Temperatura de 250°C e na pressão de 250 mmca.

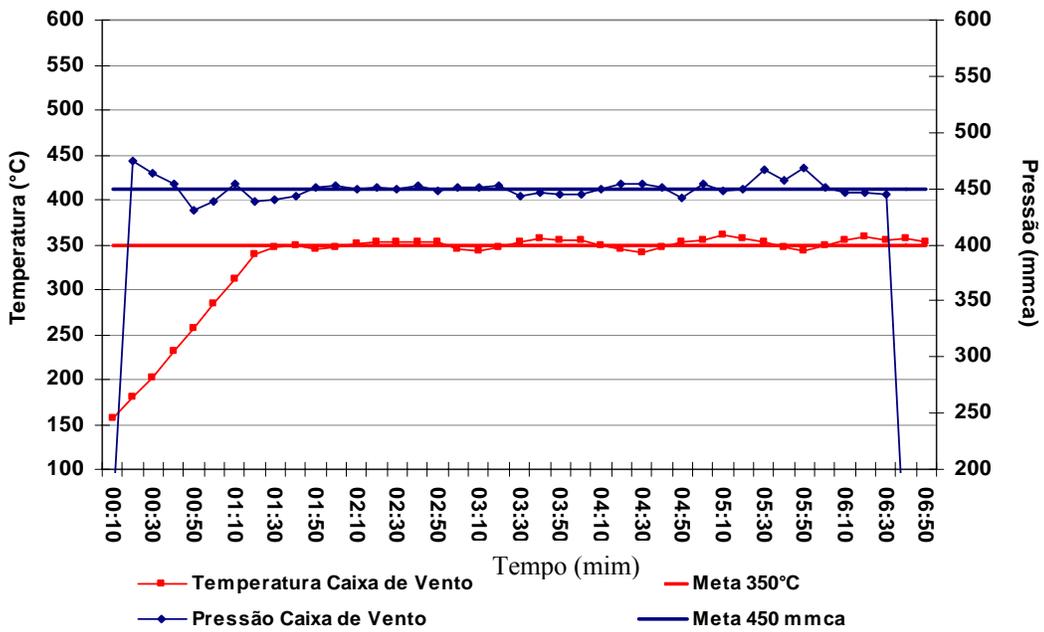


Figura 1.4 – Pelota Homogênea, Temperatura de 350°C e na pressão de 450 mmca.

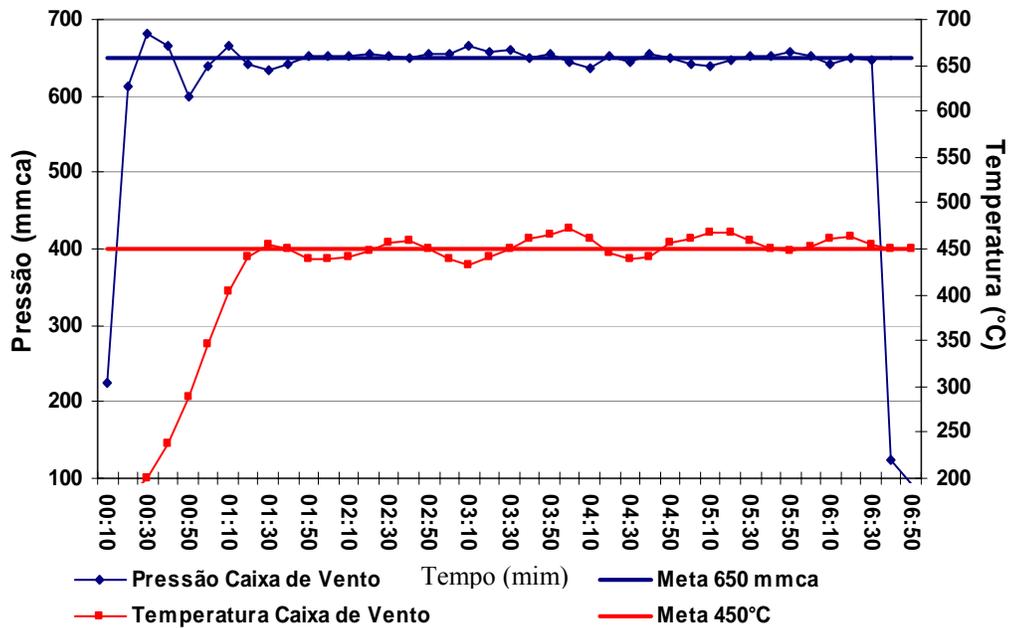


Figura 1.5 – Pelota Homogênea, Temperatura de 450°C e na pressão de 650 mmca.

Nota-se nos gráficos das Figuras 1.0, 1.1 e 1.2 referentes às pelotas Heterogêneas e nos gráficos das Figuras 1.3, 1.4 e 1.5 referentes às pelotas Homogêneas que existe um período inicial de 60 +/- 20 segundos, independente da granulometria, para que a temperatura e pressão cheguem à meta estabelecida.

Este período, considerado como o período de ajuste do sistema de controle, será utilizado para todos os testes do projeto experimento da secagem ascendente. O tempo real para avaliar os parâmetros de temperatura e pressão foi 332 segundos (referente a uma produção de 7.000.000 toneladas/ano), sendo que os 60 segundos iniciais e os 20 segundos finais foram utilizados para ajustar o sistema.

### **1.1 - Aspectos Visuais das Pelotas do Testes Preliminares da Secagem Ascendente**

As amostras de pelotas coletadas nas três camadas foram separadas em bandejas e levadas para análise visual, umidade, CPCU e CPCS. As Figuras 1.6 a 1.11 mostram as fotos das pelotas nas seguintes condições:

1.6: Pelota Heterogênea, T = 250°C, P = 250 mmca, camada inferior, intermediária e superior.

1.7: Pelota Heterogênea, T = 350°C, P = 450 mmca, camada inferior, intermediária e superior.

1.8: Pelota Heterogênea, T = 450°C, P = 650 mmca, camada inferior, intermediária e superior.

1.9: Pelota Homogênea, T = 250°C, P = 250 mmca, camada inferior, intermediária e superior.

1.10: Pelota Homogênea, T = 350°C, P = 450 mmca, camada inferior, intermediária e superior.

1.11: Pelota Homogênea, T = 450°C, P = 650 mmca, camada inferior, intermediária e superior.



**Camada Inferior**



**Camada Intermediária**



**Camada Superior**

Figura 1.6 – Pelota Heterogênea,  $T = 250^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 250$  mmca, camada inferior, intermediária e superior.



**Camada Inferior**



**Camada Intermediária**



**Camada Superior**

Figura 1.7 – Pelota Heterogênea,  $T = 350^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 450$  mmca, camada inferior, intermediária e superior.



**Camada Inferior**



**Camada Intermediária**



**Camada Superior**

Figura 1.8 – Pelota Heterogênea,  $T = 450^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 650$  mmca, camada inferior, intermediária e superior.



**Camada Inferior**

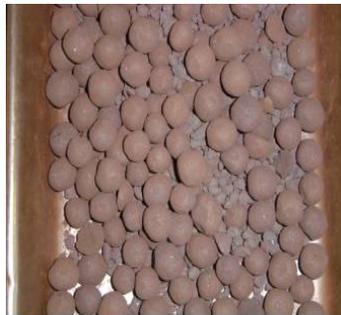


**Camada Intermediária**



**Camada Superior**

Figura 1.9 – Pelota Homogênea,  $T = 250^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 250$  mmca, camada inferior, intermediária e superior.



**Camada Inferior**



**Camada Intermediária**



**Camada Superior**

Figura 1.10 – Pelota Homogênea,  $T = 350^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 450$  mmca, camada inferior, intermediária e superior.



**Camada Inferior**



**Camada Intermediária**



**Camada Superior**

Figura 1.11 – Pelota Homogênea,  $T = 450^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 650$  mmca, camada inferior, intermediária e superior.

Considerando as fotos das Figuras 1.6 a 1.11, cabem os seguintes comentários:

- Observa-se uma diferença na coloração das pelotas entre camadas, principalmente quando o efeito da pressão e temperatura são levados em consideração.
- Não foi observado trincas e deformações nas pelotas, nas condições de pressão e temperatura estabelecidas nos testes.
- Não foi possível identificar pelo método visual a influência da granulometria no processo de secagem.

## 1.2 – Umidade das Pelotas nas Três Camadas dos Testes Preliminares da Secagem Ascendente

Após a análise visual da pelotas, realizou-se o teste de umidade seguindo o procedimento descrito no item 4.6.1. A Tabela 1.0 mostra os resultados de umidade das pelotas das três camadas nas condições de temperatura, pressão e granulometria estabelecidas para os testes preliminares.

Tabela 1.0 – Umidade das pelotas dos testes preliminares da secagem ascendente.

<b>Heterôgeneas</b>				
	P = 250 mmca T = 250°C	P = 450 mmca T = 350°C	P = 650 mmca T = 450°C	
Camada Superior	9,00	9,05	8,32	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div style="display: flex; align-items: center;"><span style="width: 15px; height: 10px; background-color: #cccccc; margin-right: 5px;"></span> Umidade &lt; 2,00%</div> <div style="display: flex; align-items: center;"><span style="width: 15px; height: 10px; background-color: #ffff00; margin-right: 5px;"></span> Umidade entre 2,00 e 8,00%</div> <div style="display: flex; align-items: center;"><span style="width: 15px; height: 10px; background-color: #f4a460; margin-right: 5px;"></span> Umidade &gt; 8,00%</div> </div>
Camada Intermediária	9,43	7,09	0,00	
Camada Inferior	2,97	0,03	0,00	
<b>Homogêneas</b>				
	P = 250 mmca T = 250°C	P = 450 mmca T = 350°C	P = 650 mmca T = 450°C	
Camada Superior	8,77	7,62	7,75	
Camada Intermediária	9,09	3,16	0,00	
Camada Inferior	1,40	0,00	0,00	

Analisando os resultados de umidade da Tabela 1.0, cabem os seguintes comentários:

- O aumento da umidade nas camadas intermediárias e inferiores estão provavelmente associados a uma menor temperatura e/ou pressão do gás de secagem (P = 250 mmca e T = 250°C).

- Observa-se um menor valor de umidade quando se compara o efeito da granulometria das pelotas.
- Observa-se uma redução significativa nos valores de umidade quando se trabalhou com valores elevados de pressões e temperaturas ( $P = 650 \text{ mmca}$  e  $T = 450^\circ\text{C}$ ).

### 1.3 – Resultados de CPCU e CPCS dos Testes Preliminares da Secagem Ascendente

O Gráfico da Figura 1.12 mostra um resumo dos resultados de resistência à compressão a úmido (CPCU) nas três camadas (camada superior, camada intermediária e camada inferior) para as diferentes condições de temperatura e pressão.

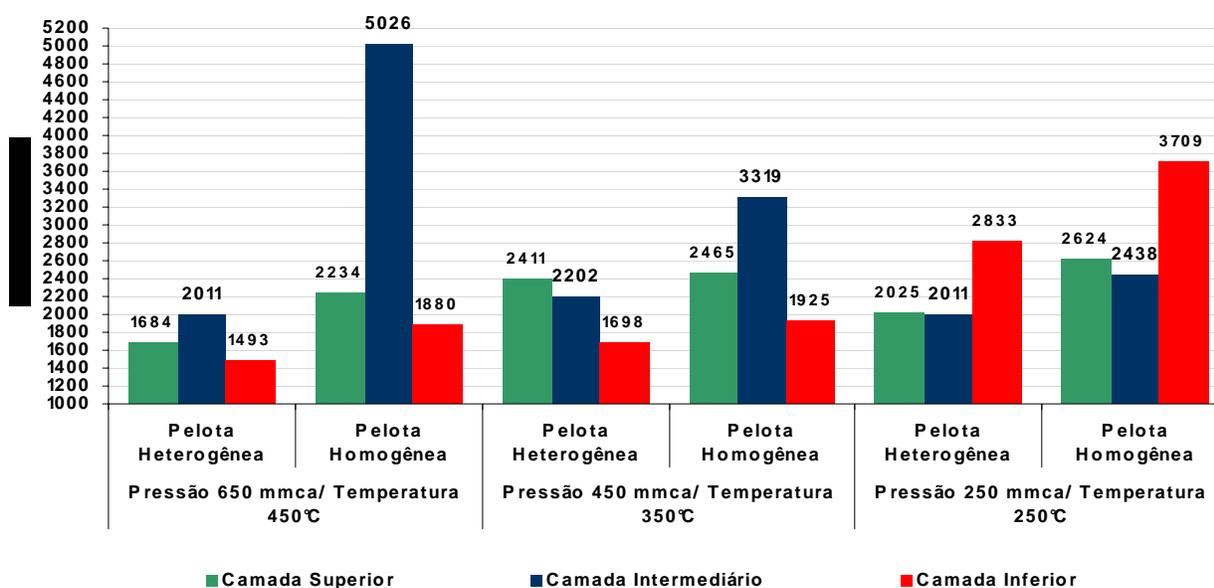


Figura 1.12 – Resistência à compressão a úmido (CPCU) das camadas superior, intermediária e inferior para as diferentes condições de temperatura e pressão para fluxo de gás Ascendente.

Considerando os resultados de resistência a compressão do gráfico da figura 1.12, cabem os seguintes comentários:

- O aumento da resistência à compressão principalmente nas camadas inferiores está provavelmente associado a uma menor temperatura e/ou pressão do gás de secagem.
- Observa-se uma pequena melhora na resistência a compressão das Pelotas Homogêneas quando comparado com as Pelotas Heterogêneas.

O Gráfico da Figura 1.13 mostra um resumo dos resultados de resistência à compressão a seco (CPCS) nas três camadas (camada superior, camada intermediária e camada inferior) para as diferentes condições de temperatura e pressão.

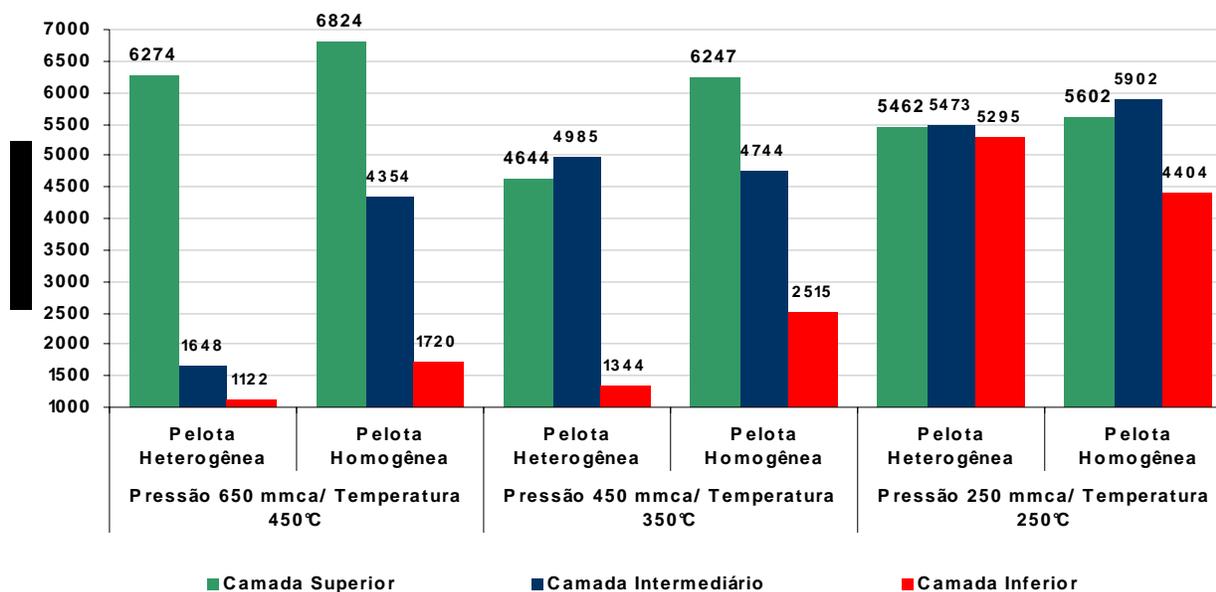


Figura 1.13 – Resistência à compressão a seco (CPCS) das camadas superior, intermediária e inferior para as diferentes condições de temperatura e pressão para fluxo de gás Ascendente.

Em relação o gráfico da Figura 5.13, cabe os seguintes comentários:

- O aumento da resistência à compressão nas camadas intermediárias e inferiores está provavelmente associado a uma menor temperatura e/ou pressão do gás de secagem.
- Observa-se uma pequena melhora na resistência a compressão das Pelotas Homogênea quando comparado com as Pelotas Heterogêneas.
- Quanto maior a temperatura e/ou pressão dos gases de secagem menor a resistência à compressão a seco (CPCS) das camadas inferiores.

## 2.0 – OTIMIZAÇÃO DA SECAGEM DESCENDENTE NO POT GRATE

Para otimizar o controle de temperatura e pressão na secagem descendente, dois testes preliminares foram realizados no pot grate variando duas temperaturas (250°C e 450°C) e

duas pressões (200mmca e 650mmca) na granulometria Heterogênea. A variável tempo foi mantido constante em 125 segundos nos dois testes, o equivalente a um ritmo de produção de 7.000.000 de toneladas de pelotas/ano.

Conforme item 4.2, a condição de pressão e temperatura da secagem ascendente, utilizada para os dois testes preliminares da secagem descendente, foi 650 mmca e 380°C respectivamente. Esta condição de pressão e temperatura foi considerada devido aos melhores resultados dos testes preliminares da secagem ascendente e condições limites de operação dos ventiladores de processo atuais.

Os gráficos das Figuras 2.1 e 2.2 mostram o perfil de temperatura e pressão da secagem ascendente e descendente nas seguintes condições:

2.1: Pelota Heterogênea, temperatura de 380°C e na pressão de 650 mmca secagem ascendente, temperatura de 200°C e na pressão de 250 mmca secagem descendente.

2.2: Pelota Heterogênea, temperatura de 380°C e na pressão de 650 mmca secagem ascendente, temperatura de 450°C e na pressão de 650 mmca secagem descendente.

O controle do sistema de temperatura ficou em manual no período de realização dos testes buscando-se reduzir ao máximo o tempo inicial de ajuste.

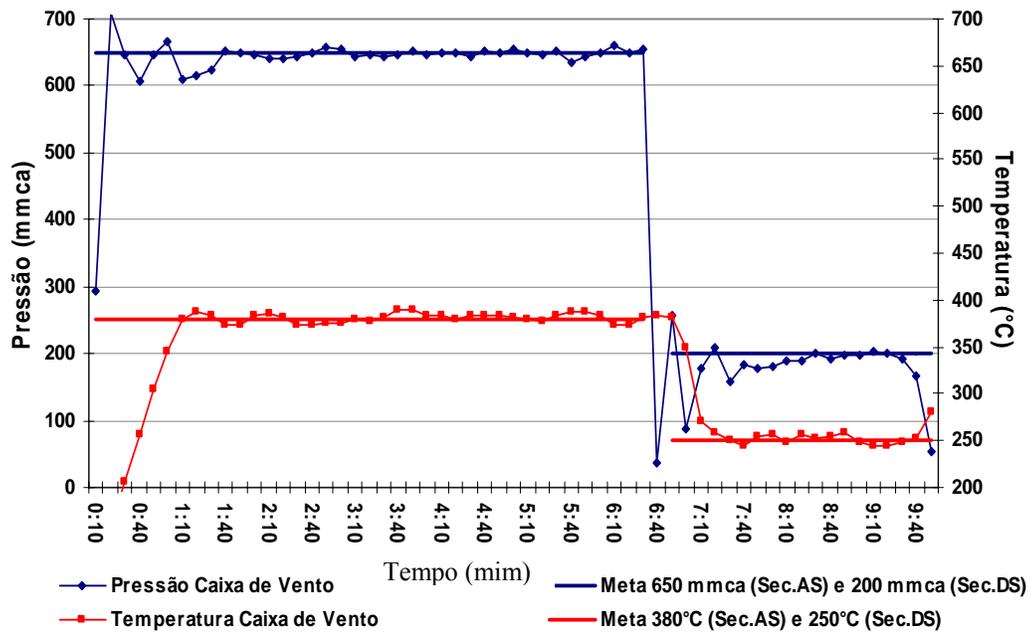


Figura 2.1 – Pelota Heterogênea, temperatura de 380°C e na pressão de 650 mmca secagem ascendente, 200°C e na pressão de 250 mmca secagem descendente.

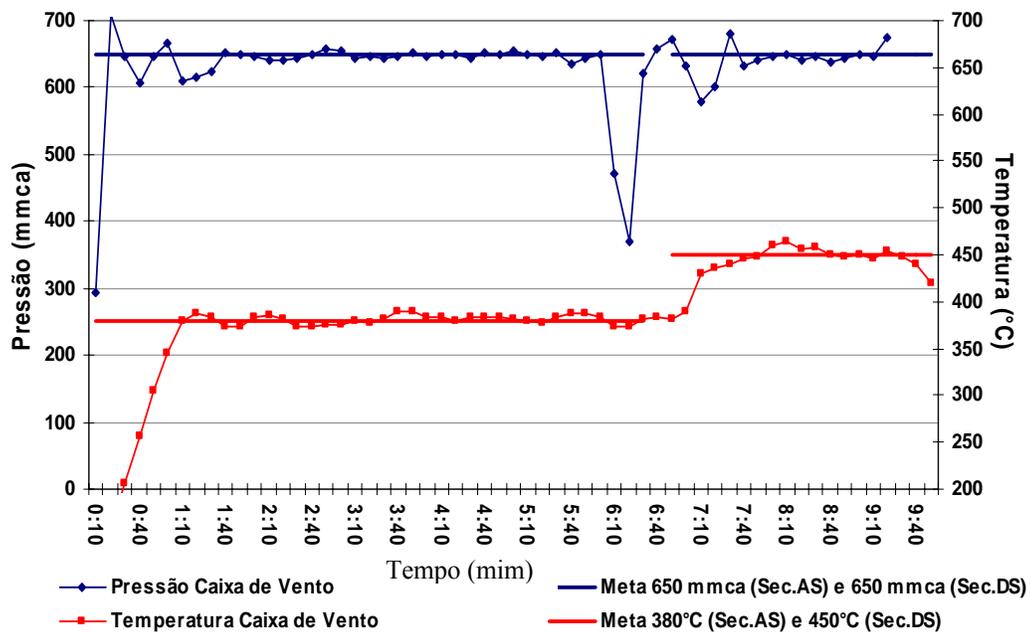


Figura 2.2 - Pelota Heterogênea, temperatura de 380°C e na pressão de 650 mmca secagem ascendente, 450°C e na pressão de 650 mmca secagem descendente.

Nota-se nos gráficos das Figuras 2.1 e 2.2 que existe um período inicial de 60 +/- 20 segundos para que a temperatura e pressão cheguem à meta estabelecida na secagem ascendente. Para a secagem descendente este tempo foi de 20 +/- 10 segundos.

Este período, considerado como o período de ajuste do sistema de controle, será utilizado para todos os testes do projeto experimento da secagem ascendente e descendente. O tempo real para avaliar os parâmetros de temperatura e pressão foi 332 segundos para a secagem ascendente e 125 segundos para a secagem descendente (referente a uma produção de 7.000.000 Toneladas/ano).

### **2.1 - Aspectos Visuais das Pelotas dos Testes Preliminares da Secagem Descendente**

As amostras de pelotas coletadas nas três camadas foram separadas em bandejas e levadas para análise visual, umidade, CPCU e CPCS. As Figuras 2.3 a 2.4 mostram as fotos das pelotas após os testes de secagem:



**Camada Inferior**



**Camada Intermediária**



**Camada Superior**

Figura 2.3 - Pelota Heterogênea, T = 380°C e P = 650 mmca secagem ascendente, T = 200°C e P = 250 mmca secagem descendente, camada inferior, intermediária e superior.



**Camada Inferior**



**Camada Intermediária**



**Camada Superior**

Figura 2.4 - Pelota Heterogênea, T = 380°C e P = 650 mmca secagem ascendente, T = 450°C e P = 650 mmca secagem descendente, camada inferior, intermediária e superior.

Considerando as fotos das Figuras 2.3 a 2.4, cabem os seguintes comentários:

- Não foi observado trincas e deformações nas pelotas, nas condições de pressão e temperatura estabelecidas nos testes.
- Não foi possível distinguir através de uma análise visual o efeito da pressão e temperatura no processo de secagem.

## 2.2 – Umidade das Pelotas nas Três Camadas dos Testes Preliminares da Secagem Descendente

Após a análise visual da pelotas, realizou-se o teste de umidade. A Tabela 2.0 mostra os resultados de umidade das pelotas das três camadas nas condições de temperatura, pressão e granulometria estabelecidas para os testes preliminares.

Tabela 2.0 – Umidade das pelotas dos testes preliminares da secagem descendente.

<b>Heterôgeneas</b>		
<b>Secagem Ascendente P = 650 mmca e T = 380°C</b>		
<b>Secagem Descendente</b>	<b>P = 250 mmca T = 200°C</b>	<b>P = 650 mmca T = 450°C</b>
Camada Superior	5,34	2,37
Camada Intermediária	1,14	1,10
Camada Inferior	0,13	0,10

Umidade < 2,00%

Umidade entre 2,00 e 8,00%

Umidade > 8,00%

Observa-se na Tabela 2.0 uma redução nos valores de umidade da camada superior quando se trabalhou com valores maiores de pressão e temperatura na secagem descendente (P = 650 mmca e T = 450°C).

### 2.3 – Resultados de CPCU e CPCS dos Testes Preliminares da Secagem Descendente

Os Gráficos das Figuras 2.5 e 2.6 mostram um resumo dos resultados de resistência à compressão a úmido (CPCU) e de resistência à compressão a seco (CPCS) nas três camadas (camada superior, camada intermediária e camada inferior) para as diferentes condições de temperatura e pressão da secagem descendente.

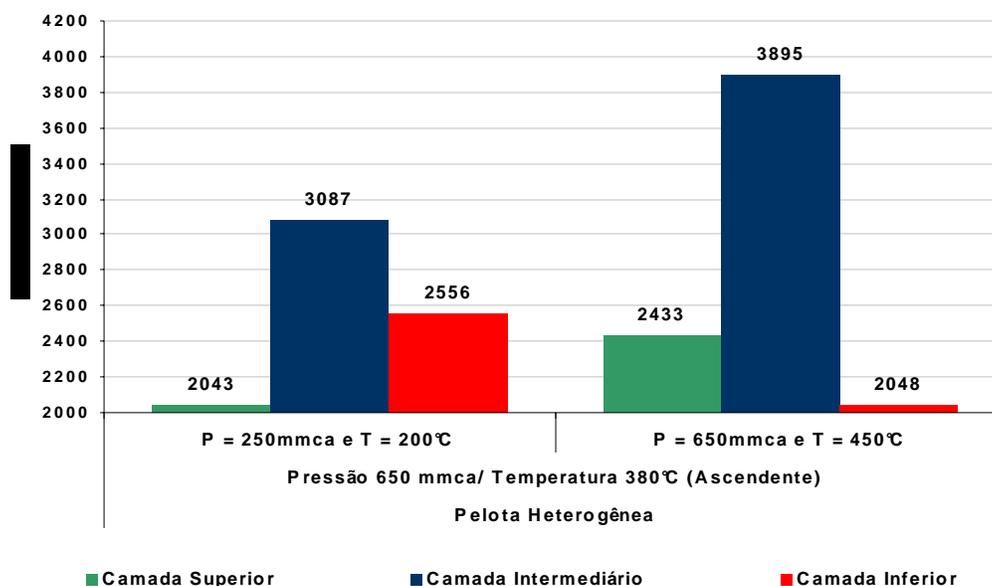


Figura 2.5 – Resistência à compressão a úmido (CPCU) das camadas superior, intermediária e inferior para as diferentes condições de temperatura e pressão para fluxo de gás ascendente e descendente.

Conforme pode ser observado no gráfico da Figura 2.5, para as camadas intermediárias, independentes da pressão e temperatura, os valores de CPCU são maiores em relação às outras camadas.

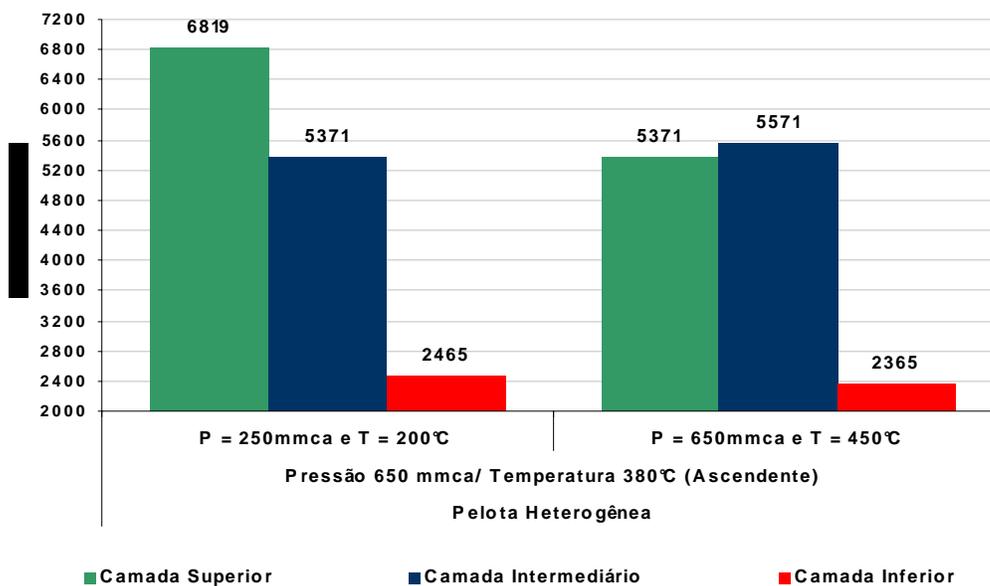


Figura 2.6 – Resistência à compressão a seco (CPCS) das camadas superior, intermediária e inferior para as diferentes condições de temperatura e pressão para fluxo de gás ascendente e descendente.

No gráfico da Figura 2.6 não foi observado uma diferença significativa nos resultados de CPCS das três camadas, nas duas condições estabelecidas para o teste.

## ANEXO 2 – EQUAÇÕES DE PREVISIBILIDADE

Equações de Previsibilidade		R	R <sup>2</sup>
<b>Secagem Ascendente - Pelotas Homogêneas</b>	Umidade camada superior = $17,7482 - (9,4788 \times 10^{-7} \times A) - (0,0250908 \times B) - (0,0075821 \times C) + (0,0 \times A^2) + (8,38128 \times 10^{-9} \times A \times B) + (4,85937 \times 10^{-9} \times A \times C) - (0,0000270948 \times B^2) - (0,0000452812 \times B \times C) - (0,0000197112 \times C^2)$	81	79
	Umidade camada intermediária = $-0,608025 + (0,00000581591 \times A) - (0,031978 \times B) - (0,0439509 \times C) + (0,0 \times A^2) - (1,91251 \times 10^{-9} \times A \times B) + (2 \times 10^{-9} \times A \times C) + (0,0000697069 \times B^2) - (0,0000181875 \times B \times C) + (0,0000349267 \times C^2)$	89	84
	Umidade camada inferior = $7,81123 - (9,49816 \times 10^{-7} \times A) - (0,0116161 \times B) - (0,00925439 \times C) + (0,0 \times A^2) - (6,3125 \times 10^{-10} \times A \times B) - (3,90635 \times 10^{-10} \times A \times C) + (0,0000110431 \times B^2) + (0,0000133438 \times B \times C) + (0,00000632328 \times C^2)$	88	83
	CPCS camada superior = $6768,97 + 0,00162932 \times A - 4,0419 \times B - 14,3542 \times C - 3,12866 \times 10^{-10} \times A^2 + 0,00000346937 \times A \times B + 0,00000350532 \times A \times C - 0,00807241 \times B^2 - 0,0355656 \times B \times C + 0,0017819 \times C^2$	67	54
	CPCS camada intermediária = $-1313,35 + 0,00676376 \times A - 46,6751 \times B - 27,6211 \times C - 6,60293 \times 10^{-10} \times A^2 + 0,00000306249 \times A \times B + 0,00000438813 \times A \times C + 0,0605526 \times B^2 - 0,053675 \times B \times C + 0,0078194 \times C^2$	84	77
	CPCS camada inferior = $24286,8 - 0,00361439 \times A - 10,5977 \times B - 15,0134 \times C + 3,0559 \times 10^{-10} \times A^2 - 0,00000139436 \times A \times B - 5,2969 \times 10^{-9} \times A \times C + 0,00940259 \times B^2 - 0,00111562 \times B \times C + 0,0100381 \times C^2$	84	78
	CPCU camada superior = $3754,52 - 0,00152756 \times A + 20,5589 \times B + 2,03693 \times C + 2,3465 \times 10^{-10} \times A^2 - 0,000004225 \times A \times B - 0,00000117312 \times A \times C + 0,00779224 \times B^2 + 0,0114812 \times B \times C + 0,00356056 \times C^2$	62	46
	CPCU camada intermediária = $31183,0 - 0,008557 \times A + 15,0521 \times B - 3,19397 \times C + 4,36557 \times 10^{-10} \times A^2 + 0,00000522628 \times A \times B + 5,81247 \times 10^{-7} \times A \times C - 0,0716543 \times B^2 - 0,00300625 \times B \times C + 0,00455517 \times C^2$	49	27
	CPCU camada inferior = $1213,06 + 0,00150108 \times A + 4,5742 \times B - 8,81575 \times C - 1,26192 \times 10^{-10} \times A^2 - 6,25625 \times 10^{-7} \times A \times B + 0,00000169719 \times A \times C + 0,00687931 \times B^2 - 0,0323219 \times B \times C + 0,00566983 \times C^2$	50	29
<b>Secagem Ascendente - Pelotas Heterogêneas</b>	Umidade camada superior = $29,7645 - 0,00000554193 \times A - 0,0110867 \times B + 0,0027221 \times C + 0,0 \times A^2 + 8,56261 \times 10^{-10} \times A \times B + 7,34389 \times 10^{-10} \times A \times C + 0,00000709483 \times B^2 - 0,00000271875 \times B \times C - 0,00000910129 \times C^2$	40	15
	Umidade camada intermediária = $-2,43321 + 0,00000503776 \times A - 0,0142603 \times B - 0,0285662 \times C + 0,0 \times A^2 - 1,6125 \times 10^{-9} \times A \times B + 2,49375 \times 10^{-9} \times A \times C + 0,0000484138 \times B^2 - 0,0000379375 \times B \times C + 0,0000103534 \times C^2$	84	78
	Umidade camada inferior = $-9,18536 + 0,0000025026 \times A + 0,0298639 \times B - 0,019048 \times C + 0,0 \times A^2 - 3,30001 \times 10^{-9} \times A \times B - 2,43745 \times 10^{-10} \times A \times C - 0,0000160172 \times B^2 + 0,0000060625 \times B \times C + 0,0000176832 \times C^2$	61	52
	CPCS camada superior = $-20748,1 + 0,00652015 \times A + 57,813 \times B - 16,9979 \times C - 4,51109 \times 10^{-10} \times A^2 - 0,0000022106 \times A \times B + 9,52823 \times 10^{-7} \times A \times C - 0,046856 \times B^2 - 0,0205031 \times B \times C + 0,0192172 \times C^2$	72	60
	CPCS camada intermediária = $14312,2 + 0,000926192 \times A - 46,7359 \times B - 0,813298 \times C - 2,76486 \times 10^{-10} \times A^2 + 0,00000644811 \times A \times B + 0,00000184968 \times A \times C + 0,022669 \times B^2 - 0,0477594 \times B \times C - 0,00163276 \times C^2$	79	71
	CPCS camada inferior = $-12014,0 + 0,00674058 \times A - 10,8127 \times B - 20,5477 \times C - 4,32919 \times 10^{-10} \times A^2 + 3,13092 \times 10^{-7} \times A \times B - 0,00000108159 \times A \times C + 0,0106991 \times B^2 - 0,0211469 \times B \times C + 0,0326998 \times C^2$	81	74
	CPCU camada superior = $-2804,85 + 0,00124419 \times A + 2,07224 \times B - 0,0466196 \times C + 0,0 \times A^2 + 6,81266 \times 10^{-8} \times A \times B - 8,78117 \times 10^{-8} \times A \times C - 0,00127155 \times B^2 - 0,000715625 \times B \times C + 0,000738362 \times C^2$	65	50
	CPCU camada intermediária = $4498,38 - 0,00115539 \times A + 7,99712 \times B + 1,56615 \times C + 0,0 \times A^2 + 3,00617 \times 10^{-7} \times A \times B - 4,96564 \times 10^{-7} \times A \times C - 0,0121241 \times B^2 + 0,00380313 \times B \times C + 0,00261272 \times C^2$	65	51
	CPCU camada inferior = $4126,36 + 0,00181441 \times A - 32,2212 \times B + 0,165466 \times C - 2,11003 \times 10^{-10} \times A^2 + 0,00000280751 \times A \times B + 3,65002 \times 10^{-7} \times A \times C + 0,0202129 \times B^2 - 0,0193375 \times B \times C + 0,00272823 \times C^2$	58	40
<b>Secagem Descendente</b>	Umidade camada superior = $3,37943 + 0,00000292937 \times A - 0,0261865 \times B + 0,0249 \times C + 0,0 \times A^2 + 1,71875 \times 10^{-9} \times A \times B - 3,88438 \times 10^{-9} \times A \times C + 0,0000233793 \times B^2 + 0,00000915625 \times B \times C - 0,00000659267 \times C^2$	73	62
	Umidade camada intermediária = $0,489748 + 0,00000198722 \times A - 0,0437373 \times B + 0,00610386 \times C + 0,0 \times A^2 + 2,6375 \times 10^{-9} \times A \times B - 6,06251 \times 10^{-10} \times A \times C + 0,000038931 \times B^2 - 0,0000025625 \times B \times C + 5,45259 \times 10^{-7} \times C^2$	60	44
	CPCS camada superior = $4774,22 + 0,0022001 \times A - 34,2835 \times B - 1,38805 \times C - 1,9827 \times 10^{-10} \times A^2 + 0,0000019175 \times A \times B - 3,34996 \times 10^{-7} \times A \times C + 0,0366345 \times B^2 + 0,0186938 \times B \times C - 0,000566379 \times C^2$	59	42