



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA



FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**PROJETO, DESENVOLVIMENTO, OTIMIZAÇÃO E SCALE-UP DE UM LEITO FLUIDIZADO
PARA CLASSIFICAÇÃO DE FOSFATO BICÁLCICO MICROGRANULADO**

Uberlândia

2006



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA



FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**PROJETO, DESENVOLVIMENTO, OTIMIZAÇÃO E SCALE-UP DE UM LEITO FLUIDIZADO
PARA CLASSIFICAÇÃO DE FOSFATO BICÁLCICO MICROGRANULADO**

Rogério Marques Ribas

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

Uberlândia - MG

2006

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- R482p Ribas, Rogério Marques, 1975-
Projeto, desenvolvimento, otimização e scale-up de um leito fluidizado
para classificação de fosfato bicálcico microgranulado / Rogério Marques
Ribas. -- 2006.
127 f. : il.
- Orientador: Carlos Henrique Ataíde.
Co-orientador: João Jorge Ribeiro Damasceno.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.
1. 1. Fosfatos - Separação - Teses. 2. Fluidização - Teses. I.
Ataíde, Carlos Henrique. II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 661.635.41

**MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
ROGÉRIO MARQUES RIBAS SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM / /**

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
(Orientador – PPG – FEQUI/UFU)

Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno
(Co-orientador – PPG – FEQUI/UFU)

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

Dr. Roberto Mattioli Silva
(TECPLAN Consultoria)

AGRADECIMENTOS

À Deus, o senhor que se fez presente em todos os momentos firmes ou trêmulos. E, passo a passo, pude sentir a sua mão na minha, transmitindo-me a segurança necessária para enfrentar meu caminho a seguir.

À Minha Família, a vocês que compartilharam meus ideais e os alimentaram, incentivando-me a prosseguir na jornada, fossem quais fossem os obstáculos, lutando comigo. A vocês, que muitas vezes fui motivo de alegrias, outras de tristeza, porém sempre alvo de atenção maior, dedico a minha conquista com a mais profunda admiração e respeito. Sou o que sou hoje a custa de seus sacrifícios. Sejam, pois, estas palavras a expressão de minha gratidão e imenso amor.

Ao Prof. Carlos Henrique Ataíde, agradeço pela valiosa orientação, pela amizade e pelos permanentes incentivos dados durante a realização do presente trabalho, assim, a um mestre ensinar é uma arte, como tal, uma tarefa reservada para poucos, porém privilegiados.

Ao Prof. João Jorge Ribeiro Damasceno, agradeço pela co-orientação didática, pela atenção e amizade demonstrada ao longo da elaboração deste trabalho.

À BUNGE Fertilizantes, por ter cedido as amostras e equipamentos necessários para a realização dos experimentos e análises de caracterização. Agradeço, em especial, ao Eng. Vicente Lôbo pelo incentivo e preocupação com o meu crescimento profissional e pessoal e pelo constante incentivo em aprimorar minha formação científica, ao Eng. Oscar Ordonez pela confiança depositada para o desenvolvimento deste trabalho e ao Eng. Antonio Lourenço Zalla por transformar a idéia do trabalho em realidade ainda na saudosa MANAH.

Ao amigo Dr. Roberto Mattioli Silva, pelos esclarecimentos necessários, colaboração técnica, participação na defesa da tese e ainda pela oportunidade de incluir profissional tão competente entre nós.

A todos os amigos da BUNGE Fertilizantes, professores da FEQUI/UFU, em especial, ao Eng. José Wilson Rosa da Silva pela amizade e companhia compartilhada durante todo o trabalho.

E a Érika, minha namorada, pelo carinho, apoio e companhia compartilhado durante a fase de conclusão do trabalho.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram na execução desse trabalho.

*“Se não podes ser uma árvore sobre a colina, sejas um graveto no vale; Mas, sejas o melhor graveto de todas as léguas em derredor.
Se não podes ser uma estrada, sejas uma vereda. Se não podes ser o sol, sejas uma estrela.
O valor não se mede pelas dimensões.
Seja o que fores que o seja profundamente.”*

Luther King

RESUMO

O Brasil ocupa o segundo lugar na produção de fosfato bicálcico, principal fonte de fósforo para complementação do sal mineral que integra a ração diária dos animais (bovinos, suínos e aves). Levando-se em consideração o crescimento do consumo de fósforo em decorrência do aumento anual do consumo de carne pela população mundial, torna-se imperativo o desenvolvimento de tecnologia para garantir qualidade e produtividade, visando atender a este mercado cada vez mais competitivo. A busca de uma nova tecnologia para a produção de fosfato bicálcico microgranulado originou-se da necessidade da BUNGE Fertilizantes S.A. acompanhar uma tendência mundial atendendo às sugestões de clientes para a venda a granel. Devido às características adversas para uma boa formação do grão do fosfato bicálcico microgranulado (diâmetro da partícula, fosfato monocálcico e acidez residual) faz-se necessário a aplicação de um processo de classificação do produto final para garantir o atendimento às especificações físicas do material no momento da expedição para os clientes. O objetivo deste trabalho é estudar um sistema de separação utilizando a fluidização, buscando informações de “*scale-up*” para o dimensionamento de uma unidade industrial a ser instalada no Complexo Industrial de Cajati da BUNGE Fertilizantes. A fluidização é usada comercialmente em uma grande variedade de processos, tais como: operações catalíticas, resfriamento, secagem, recobrimento, etc, e utiliza o efeito da elutrição, onde os componentes relativamente pequenos são arrastados pelo fluxo de gás, para a separação física dos materiais. Dentro deste conceito, busca-se quantificar os efeitos das variáveis operacionais e dimensionais de um sistema leito fluidizado: porosidade da placa distribuidora, tempo de residência e ângulo da zona de expansão. Conforme os principais resultados experimentais, foi feita uma análise estatística através de regressão múltipla obtendo-se os parâmetros relacionados às variáveis isoladas e interações entre elas. Observou-se que as condições operacionais e dimensionais que atingem as melhores eficiências de Separação e Recuperação para o sistema foram aquelas nas quais a porosidade da placa era de 11 %, o tempo de residência do material no leito de 5,34 minutos e o ângulo da zona de expansão (*freeboard*) de 33,62°. A partir dos dados ótimos obtidos no sistema piloto de fluidização foi dimensionado um sistema industrial para a Unidade da Bunge Fertilizantes em Cajati com capacidade de classificar 100 T/h de fosfato bicálcico microgranulado. Os resultados das eficiências de Separação e Recuperação do sistema industrial demonstram a excelente aplicação da tecnologia para classificação do FBC (fosfato bicálcico), e o modelo obtido no sistema piloto prevê, com uma boa precisão, as eficiências para sistemas industriais. Desta forma o modelo matemático levantado para o sistema piloto de leito fluidizado pode ser usado como referência para o dimensionamento (“*scale-up*”) de unidades industriais de classificação de fosfato bicálcico microgranulado, com características semelhantes ao estudado neste trabalho.

Palavras-chave: Fosfato bicálcico, Eficiência de Separação e Recuperação, Fluidização

ABSTRACT

Brazil holds second place in world production of dicalcium phosphate, which represents the main source of phosphorus for complementing the mineral salt that makes up the daily feed for cattle, hogs and fowls. Considering the fact that the increase in consumption of phosphates due to the increased annual consumption of meat by the world population, development of the technology necessary to guarantee quality and productivity has become imperative in order to supply this competitive market. The requirement for BUNGE Fertilizantes S.A. to accompany the world trend, reflected by client suggestions for sales of bulk quantities, originated the search for a new technology to produce microgranulated dicalcium phosphate. Due to characteristics adverse to forming the microgranulated dicalcium phosphate grain (particle size, monocalcium phosphate and residual acidity), it has become necessary to apply a final product classification process to guarantee compliance with the physical specifications of the material at the moment of expediting to clients. The purpose of this dissertation is to perform a study of the classification system used for fluidization, seeking “scale-up” information for construction of an industrial unit to be installed at the Cajati Facilities of BUNGE Fertilizantes. Fluidization is utilized commercially in a wide range of processes such as: catalytic operations, cooling, drying, recovery, etc, it utilizes the elutriation effect in which the relatively small components are entrained by the gas flow for physical classification of materials. Within this concept an effort was made to quantify the effects of operational and dimensional variables of the fluidized bed system: porosity of the distribution screen, residence time and freeboard angle. In accordance with the main experimental results, a statistical analyses was made by multiple regression, thus obtaining parameters related to the isolated variables and the interactions among them. It was observed that the operational and dimensional conditions that promote the best Separation and Recovery efficiencies for the system were those for which the screen porosity was 11 %, the residence time was 5,34 minutes and the freeboard angle was 33,62°. On the basis of the optimum data obtained from the fluidization pilot system, an industrial system was designed for the Cajati Facilities, having classification capacity of microgranulated dicalcium phosphate of 100 Tons/h. The resultant Separation and Recovery efficiencies of the industrial system demonstrate an excellent application of technology for FBC (dicalcium phosphate) classification and the model obtained from the pilot project precisely predicts the efficiencies for industrial systems. Thus, the mathematic model obtained from the pilot plant can be used as a reference for design and scale-up of microgranulated dicalcium phosphate industrial classification units, having characteristics similar to those studied in this dissertation.

Keywords: Dicalcium phosphate, Separation and Recovery efficiency, Fluidization.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iii
Simbologia.....	v
Resumo	vii
Abstract.....	viii
 CAPÍTULO I.....	 1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1- Algumas informações sobre nutrição animal.....	3
1.2- Fósforo na vida do animal.....	4
1.4- O fosfato bicálcico microgranulado.....	5
1.5- Tipos de reatores para granulação de fosfato bicálcico	6
1.6- O Processo de microgranulação.....	7
1.7- Condições das matérias-primas.....	7
1.7.1- Ácido Fosfórico	7
1.7.2- Calcário.....	8
1.7.3- Reciclo	9
1.7.4- Dureza do grão	9
1.8- Considerações gerais sobre o sistema Spinden.....	10
1.9- Objetivos gerais do trabalho	11
CAPÍTULO II.....	13
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1- Fundamentos da Fluidização.....	13
2.2– Algumas propriedades relevantes de pós e partículas.....	16
2.3– Classificação dos Pós	17
2.4– Aplicações de leitos fluidizados.....	19
2.4.1- Usos em processos físicos	19
2.4.2- Usos em processos químicos	19
2.5- Elutriação	20
2.5.1- Efeito das variáveis de operação do sistema	23
2.5.2- Mecanismo de elutriação de partículas.....	24

2.5.4- Leitos fluidizados em escala industrial.....	28
2.5.4.1- Propriedades dos distribuidores de gases de grande escala.....	29
2.5.4.2- Perda de carga nos distribuidores.....	31
2.5.4.3- Distribuição de tamanhos das partículas	32
2.6- Vantagens quanto ao uso do Fosfato Bicálcico Microgranulado.....	33
CAPÍTULO III	36
MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1- Coleta de amostras	36
3.2- Descrição da unidade experimental de fluidização.....	36
3.2.1- Descrição da tela de dispersão de ar.....	39
3.2.2- Descrição do leito fluidizado.....	41
3.2.2.1- Composição do leito fluidizado.....	41
3.2.2.2- Corpo do leito fluidizado.....	42
3.2.2.3- Distribuidor de ar	42
3.2.3- Filtro de mangas	43
3.2.4- Ventiladores de admissão/exaustão de ar de fluidização.....	48
3.3- Procedimentos preliminares para operação da unidade experimental de fluidização....	49
3.3.1- Calibração do sistema de alimentação.....	49
3.3.2- Caracterização das amostras.....	50
3.4- Planejamento dos testes experimentais.....	51
3.4.1- Escolha das variáveis do sistema.....	54
3.5- Análise global	56
3.6- Avaliação dos resultados.....	56
CAPÍTULO IV	58
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
4.1- Caracterização das amostras	58
4.2- Resultados dos testes.....	63
4.2.1- Análise da influência da porosidade da placa, ângulo da zona de dispersão e tempo de residência do material na eficiência de separação e eficiência de recuperação	70
4.2.2- Resultados globais	73
4.3- Dimensionamento de uma unidade industrial a partir dos resultados obtidos em uma planta piloto.....	78
4.3.1- Resultados das eficiências de separação e recuperação para o sistema industrial...	82
CAPÍTULO V	83

CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	83
5.1- Conclusões	83
5.2- Sugestões para trabalhos futuros.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXO I – FOTOS SISTEMA PILOTO DE FLUIDIZAÇÃO.....	88
ANEXO II – ANÁLISES QUÍMICAS DAS CORRENTES	92
ANEXO III – RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS COM CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS PARA POROSIDADE DE 11 % E ÂNGULO DA ZONA DE EXPANSÃO DE 33,62°.....	95
ANEXO IV – RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS COM CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS PARA POROSIDADE DE 6 % E ÂNGULO DA ZONA DE EXPANSÃO DE 33,62°.....	105
ANEXO V – RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS COM CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS PARA POROSIDADE DE 11 % E ÂNGULO DA ZONA DE EXPANSÃO DE 4,6°.....	115
ANEXO VI – RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS COM CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS PARA POROSIDADE DE 6 % E ÂNGULO DA ZONA DE EXPANSÃO DE 4,6°.....	119
ANEXO VII – SISTEMA INDUSTRIAL DE CAJATI	124
ANEXO VIII – VALORES PREDITOS X OBSERVADOS PARA EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO E EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Produção nacional de fosfato bicálcico.....	2
Figura 1.2 – Produção atual de suplementos para nutrição Animal	2
Figura 1.3 – Vista esquemática da granulação de partículas.....	7
Figura 1.4 – Variação da dureza (Kgf) em função da acidez livre.....	10
Figura 2.1: Queda de pressão <i>versus</i> velocidade do fluido para leitos fluidizados.....	14
Figura 2.2- Diagrama esquemático da elutriação de partículas através de bolhas de gás	25
Figura 2.3- Efeito da estratificação na elutriação de esferas de vidro (Lewis et al., 1962; Wen and Hashinger,1960).....	27
Figura 2.4- Distribuidores de uso comum. (a) e (b) injetores multijet; (c) injetores de alta velocidade de gás; (d) injetores de baixa velocidade de gás; (e) simples orifício; (f) e (g) ranhuras horizontais contínuas; (h) e (j) distribuidores com ranhuras horizontais contínuas e sistema para prevenir o retorno de sólidos;	29
Figura 2.5 – Especificações Técnicas Fosfato Bicálcico – BUNGE Fertilizantes	34
Figura 3.1- Fluxograma simplificado da unidade experimental de fluidização	38
Figura 3.2 - Configuração da tela de dispersão de ar - porosidade 6 %	39
Figura 3.3- Configuração da tela de dispersão de ar – porosidade 11 %	40
Figura 3.4- Fotografia de uma placa de distribuição.	40
Figura 3.5- Fotografia que mostra detalhes do distribuidor (poros).....	40
Figura 3.6- Conjunto corpo do leito fluidizado	43
Figura 3.7- Figura esquemática do filtro mangas	44
Figura 3.8- Curva Característica dos Ventiladores Selecionados	48
Figura 3.9- Fluxograma circuito de sólidos.....	50
Figura 4.1– Superfície de resposta da eficiência de separação do sistema em função da porosidade da placa (X_1) e ângulo da expansão da zona de dispersão (X_2) mantendo-se o tempo de residência (X_3) no nível central.	75
Figura 4.2– Superfície de resposta da eficiência de separação do sistema em função da porosidade da placa (X_1) e tempo de residência do material no leito (X_3) mantendo-se o ângulo de expansão da zona de dispersão (X_2) no nível central.	75
Figura 4.3– Superfície de resposta da eficiência de separação do sistema em função do ângulo de expansão da zona de dispersão (X_2) e tempo de residência do material no leito (X_3) mantendo-se a porosidade da placa (X_1) no nível central.....	76

Figura 4.4– Superfície de resposta da eficiência de recuperação do sistema em função da porosidade da placa (X_1) e ângulo de expansão da zona de dispersão (X_2) mantendo-se o tempo de residência dos sólidos (X_3) no nível central.	76
Figura 4.5– Superfície de resposta da eficiência de recuperação do sistema em função da porosidade da placa (X_1) e tempo de residência do material no leito (X_3) mantendo-se o ângulo de expansão da zona de dispersão (X_2) no nível central.	77
Figura 4.6– Superfície de resposta da eficiência de recuperação do sistema em função do Ângulo de Expansão da Zona de Dispersão (X_2) e Tempo de Residência do material no leito (X_3) mantendo-se a porosidade da placa distribuidora no nível central.	77
Figura 4.7- Fluxograma conceitual para o sistema industrial de Cajati	79
Figura 4.8- Conceitual corpo do leito fluidizado de Cajati	80
Figura 4.9- Conceitual vista frontal do leito fluidizado de Cajati	81
Figura 4.10- Tela de dispersão leito fluidizado industrial de Cajati.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Dados plantel/consumo de fosfato bicálcico - Brasil	3
Tabela 1.2 – Solubilidade de fósforo no sistema digestivo de ruminantes.....	4
Tabela 2.1 – Características dos diversos Grupos de pó, segundo Geldart (1973).	18
Tabela 3.1- Dados técnicos do filtro com mangas selecionadas.	45
Tabela 3.2- Dados técnicos para operação do filtro de mangas.	45
Tabela 3.3- Dados técnicos de construção do filtro de mangas.....	46
Tabela 3.4- Dados técnicos do meio filtrante utilizado.	46
Tabela 3.5- Dados técnicos do sistema de limpeza das mangas.....	47
Tabela 3.6- Dados técnicos da válvula rotativa.....	47
Tabela 3.7- Curva de Calibração do Alimentador	50
Tabela 3.9- Condições Operacionais	54
Tabela 3.10- Variáveis do Planejamento – Influência das variáveis escolhidas	55
Tabela 3.11- Variável x Adimensionalização.....	56
Tabela 4.1- Composição química média das amostras testadas	58
Tabela 4.2- Granulometrias de alimentação do produto-teste.....	59
Tabela 4.3- Resultados Experimentais para ES e ER (6 % porosidade, 33,62° ângulo de expansão)	64
Tabela 4.4- Resultados Experimentais para ES e ER (11 % porosidade, 33,62° ângulo de expansão)	65
Tabela 4.5- Resultados Experimentais para ES e ER (6 % porosidade, 4,6° ângulo de expansão)	66
Tabela 4.6- Resultados Experimentais para ES e ER (11 % porosidade, 4,6° ângulo de expansão)	67
Tabela 4.7- Vazão Ar de Fluidização em função da queda de pressão no ventilador para a porosidade da placa de 6 %.....	68
Tabela 4.8- Vazão Ar de Fluidização em função da queda de pressão no ventilador para a porosidade da placa de 11 %.....	69
Tabela 4.9- Influência da Porosidade da Placa, Ângulo de Expansão e TR na ES	70
Tabela 4.10- Influência da Porosidade da Placa, Ângulo de Expansão e TR na ER.....	71
Tabela 4.11- Resultado do Efeito das Variáveis: Porosidade, ângulo de expansão e TR	72

Tabela 4.12 – Ajustes para as equações que descrevem ES e ER em função dos fatores testados.....	73
Tabela 4.13 – Resultados reais obtidos na Unidade Cajati <i>versus</i> resultados previstos pelo modelo levantado no sistema piloto construído na Unidade Araxá.....	82

SIMBOLOGIA

FBC	-	Fosfato bicálcio
Δp	-	Perda de carga através de um leito fixo
H	-	Altura de leito fixo
A	-	Área transversal de um vaso
ε	-	Porosidade do leito
ρ_p	-	Densidade da partícula
ρ_f	-	Densidade do fluido
g	-	Aceleração da gravidade
U	-	Velocidade superficial do gás
μ	-	Viscosidade do fluido
U _{mf}	-	Velocidade Superficial do gás na mínima fluidização
Re _{mf}	-	Número de Reynolds na mínima fluidização
Ar	-	Número de Arquimedes
x _p	-	Tamanho médio das partículas
m _i	-	Fração mássica das partículas em i
x _i	-	Tamanho das partículas em i
V	-	Velocidade da partícula
V _T	-	Velocidade terminal da partícula
TDH	-	Altura de transporte desimpedido
D _b	-	Diâmetro da bolha
D _{bm}	-	Diâmetro máximo estável da bolha
U _b	-	Velocidade da bolha
H _{mf}	-	Altura do leito na mínima fluidização
d	-	Diâmetro da partícula
D _{bo}	-	Diâmetro da bolha imediatamente acima do prato
N	-	Número de bolhas subindo no leito
J	-	Taxa de sólidos carregados
Δp_D	-	Perda de carga no distribuidor
Δp_B	-	Perda de carga no leito
ES	-	Eficiência de Separação
ER	-	Eficiência de Recuperação

Q	-	Vazão de alimentação do leito
Fr	-	Frequência do inversor do alimentador
ξ_i	-	Valor original da variável selecionada
ξ_1	-	Valor original da variável ao nível 1
ξ_{-1}	-	Valor original da variável ao nível -1
Y	-	Resposta em função das variáveis selecionadas
β	-	Coeficientes do ajuste
Y _{exp}	-	Valor obtido experimentalmente
Y _t	-	Valor previsto pelo modelo
X ₁	-	Variável codificada para porosidade da placa
X ₂	-	Variável codificada para ângulo da zona de expansão
X ₃	-	Variável codificado para o tempo de residência do material

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O Brasil é um País no qual as atividades agropecuárias são fundamentais para seu desenvolvimento. As exportações de carne e de derivados vegetais atingem índices cada vez maiores em nossa balança comercial. A qualidade desses produtos deve atender a padrões internacionais de qualidade, para que tal crescimento seja mantido de forma a atender às constantes exigências de melhoria que os mercados competitivos impõem às indústrias que atuam neste segmento.

Os minerais participam na estrutura dos animais com cerca de 3,5 % do seu peso vivo. São Chamados de *Macrominerais* (Fósforo, Cálcio, Potássio, Sódio, Cloro e Enxofre) e *Microminerais* (Ferro, Zinco, Manganês, Cobre, Cobalto, Iodo e Selênio). Eles entram no balanceamento da alimentação como suplemento a fim de garantir a saúde e produtividade na indústria agropecuária. A avicultura, bovinocultura e suinocultura são os principais mercados a que se destina a produção do fosfato bicálcico que é uma fonte de fósforo para a alimentação animal.

Os *macrominerais* na forma de sais apresentam baixa toxicidade e sua participação no alimento deve ser diária. Já os *microminerais* são elementos que se armazenam no organismo e, portanto podem ser tóxicos, requerendo maiores cuidados nas dosagens. De um modo geral o sal mineralizado que integra a ração diária dos animais apresenta a seguinte composição média:

- 38% Fosfato Bicálcico
- 48 % Cloreto de sódio (sal grosso)
- 10% de Calcário
- 4 % formado por microminerais (Se, I, Co, Fe, Cu, Zn...)

Esse é um mercado sempre em expansão devido ao aumento anual de consumo de carne pela população mundial. A Figura 1.1 apresenta a evolução na produção nacional de fosfato bicálcico nos últimos anos.

A Figura 1.2 apresenta os dez maiores produtores mundiais de fosfato bicálcico e a produção atual de cada um.

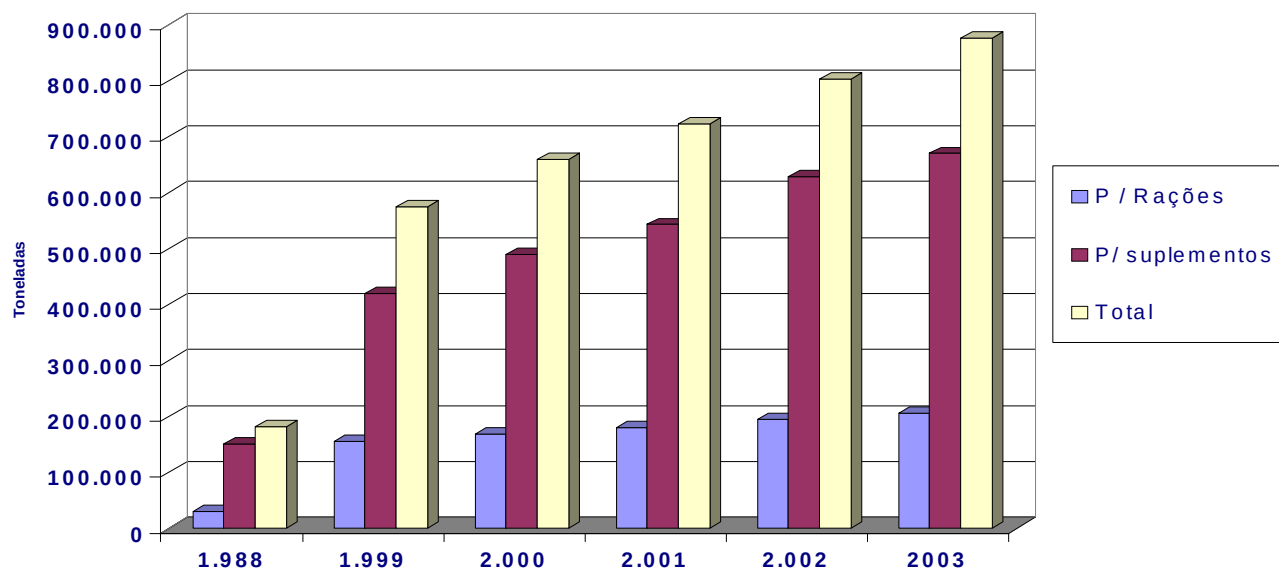


Figura 1.1 – Produção nacional de fosfato bicálcico

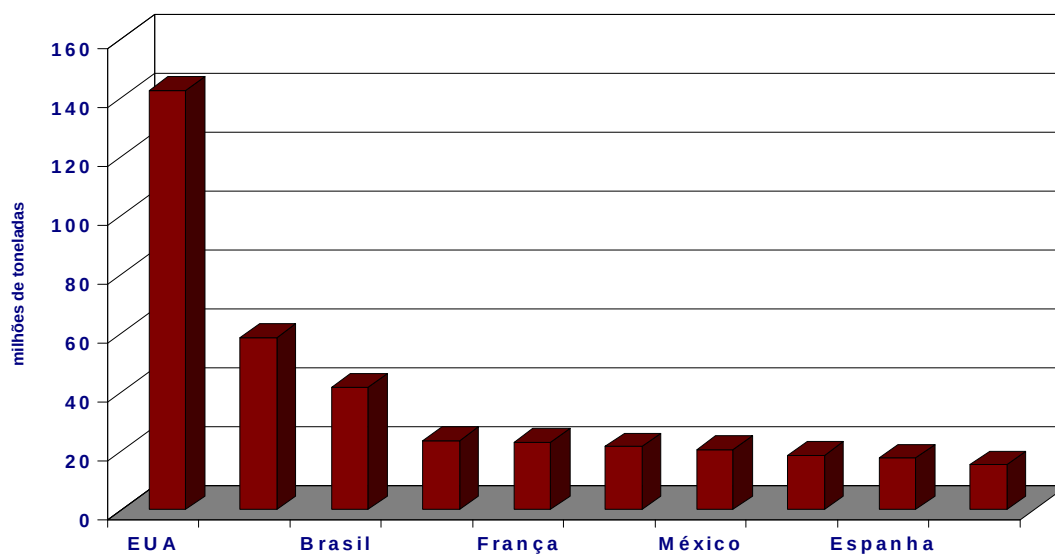


Figura 1.2 – Produção atual de suplementos para nutrição Animal

A tabela 1.1 apresenta números atuais do plantel nacional de bovinos, suínos e aves, bem como relações de consumo de fosfato bicálcico para cada segmento.

Tabela 1.1 – Dados plantel/consumo de fosfato bicálcico - Brasil

	Plantel Nacional (milhões de cabeças)	Consumo Diário p/Cabeça	Consumo Anual de Fosfat Bicálc.	Ração Bicálcico/Ração	Ciclo de Vida
BOVINO	176	0,07 Kg Sal	700 000 T	340 Kg /T sal	3 anos
SUINO	38	1,9 Kg Ração	20 000 T	1,6 Kg / T ração	142 dias
AVES CORTE	3800	0,102 Kg ração	135 000 T	7 g / T ração	45 dias
AVES POSTURA	86	0,110 Kg / Ração	7 600 T	2 g / T ração	364 dias

1.1- Algumas informações sobre nutrição animal

A seguir são apresentados alguns dados importantes sobre a nutrição animal:

a) Bovinos

- Abate com 480 Kg (3 anos)
- Ganho de Peso: 410 g / dia
- Suplemento de Fósforo Via sal Mineral: 4g P/Dia (total: 13g P)
- Consumo de Sal Mineral: 25 Kg / Cabeça / ano
- Consumo de Capim: 30 Kg/Dia (9 g de P)
- Rendimento: 53% Carcaça

b) Aves Poedeiras:

- Produção: 320 ovos em 52 semanas

c) Aves de Corte:

- Abate com 2,52 Kg peso Vivo
- Rendimento: 78% da Carcaça

d) Suínos:

- Consumo de Ração: 270 Kg / 142 dias
- Abate com 92 Kg de Peso Vivo
- Rendimento: 80% da Carcaça

1.2- Fósforo na vida do animal

O fósforo é um elemento vital para os animais, participando em torno de 1% de seu peso vivo. A seguir são enumeradas as funções mais importantes do fósforo nos organismos vivos:

- ◆ Na formação e fortalecimento dos ossos e dentes, onde são encontrados 80% do total deste elemento nos organismos, todo sob a forma de fosfato tricálcico (apatita);
- ◆ Na reprodução e crescimento, sob a forma de fosfoproteínas, estando presente nos núcleos das células (cromossomas e mitocôndrios);
- ◆ Na engorda na forma de fosfolipídios (lecitinas e cefalinas), permitindo a circulação das gorduras no organismo;
- ◆ No metabolismo energético, liberando energia (temperatura corporal do animal);

A deficiência de fósforo no alimento pode provocar um retardo no crescimento, bem como um baixo índice de fertilidade no animal.

O valor da fonte de fósforo no alimento depende do seu aproveitamento biológico, ou seja, da capacidade do animal aproveitar o fósforo presente. Em princípio os fosfatos solúveis (em água, HCl 0,4% ou ácido cítrico 2%) representam uma boa fonte de fósforo. Entretanto alguns animais conseguem solubilizar no seu aparelho digestivo a farinha de osso calcinada, que apesar de não ser solúvel nas soluções citadas, ainda é considerada uma boa fonte de fósforo. Nos ruminantes, que são animais poligástricos, a solubilidade no aparelho digestivo depende do local onde está sendo efetuada a digestão, no rúmem ou no abomaso. A solubilidade do fósforo durante a digestão no rúmem é importante para o desenvolvimento da microflora bacteriana. A Tabela 1.2 apresenta os valores médios da solubilidade dos fosfatos bicálcico, tricálcico e monoamônio no sistema digestivo de ruminantes.

Tabela 1.2 – Solubilidade de fósforo no sistema digestivo de ruminantes

	Solubilidade (%)		
	Rumem	Abomaso	Total
Fosfato Bicálcico	1,50	78,10	79,60
Fosfato tricálcico *	1,0	22,80	23,80
Fosfato Monoamônio	69,1	42,10	111,20

(*) Apatita de araxá

Pelas características biológicas apresentadas na Tabela 1.2 pode-se concluir que o fosfato bicálcico é a fonte de fósforo ideal para a nutrição dos bovinos. O fosfato bicálcico, além de atender a níveis de solubilidade satisfatórios tanto no rúmem como no abomaso, tem outra grande vantagem: a de ser produzido industrialmente, não sendo encontrado na natureza, como as apatitas, podendo ter sua qualidade controlada durante o processo de fabricação.

Os fertilizantes, como fonte de fosfato monocálcico, por serem altamente solúveis, apresentam inconvenientes pelo elevado teor de flúor, altos níveis de contaminantes e outros problemas para o processo de elaboração do sal mineral ou ração. Os derivados de fósforo ricos em fosfato monocálcico favorecem uma rápida absorção na Biota e são destinados aos mercados de aves e suínos, já que esses possuem um ciclo de vida bem menor que o dos bovinos.

A busca de uma nova tecnologia para a produção de fosfato bicálcico microgranulado originou-se da necessidade da BUNGE Fertilizantes S.A. acompanhar uma tendência mundial e atender as sugestões de alguns clientes para a venda granel.

1.4- O fosfato bicálcico microgranulado

A tecnologia de produção de fosfato bicálcico microgranulado consiste em aproveitar o caráter lento da reação entre o ácido fosfórico e o calcário em um reator horizontal com múltiplas pás quebrando as partículas numa agitação intensa. O processo conta ainda com a mistura, no reator, do reciclo (Fosfato bicálcico seco) que, no fundo, age como uma semente para a formação de partículas microgranuladas.

Enquanto o reator Kulman (composto por uma caixa fabricada com material especial anti corrosivo, com agitação vertical por eixo e palhetas) faz o foscálcio em um sistema aberto, no projeto microgranulado o reator Tipo Spinden (reator horizontal com eixo e pás para agitação e transporte) produz em circuito fechado, ou seja uma grande quantidade do produto fabricado é reciclado para o reator para nova aglomeração, mantendo a estabilidade da planta industrial.

O reator Spinden é um equipamento utilizado para aglomerar partículas sólidas com a mínima quantidade de fase líquida possível. Possui um sistema de agitação especial, horizontal, realizado por 39 palhetas, montado sobre um eixo horizontal. Além do reator Spinden, hoje utiliza-se o prato e o tambor granulador em algumas unidades para a produção do fosfato bicálcico microgranulado. Os dois processos fornecem produtos com características

químicas e aspecto físico diferentes. A Unidade da BUNGE de Rio Grande no Rio Grande do Sul, por exemplo, que trabalha com o tambor granulador, produz o fosfato com 20% de fósforo (P).

1.5- Tipos de reatores para granulação de fosfato bicálcico

Abaixo seguem os principais tipos de reatores utilizados industrialmente para a produção de fosfato bicálcico:

- Kullman, conjugado a um prato ou tambor granulador.
- Spinden (BUNGE Cajati)
- Turbulator (BUNGE IAP)
- Pugmill (usado na IFC – Flórida/USA)

O processo “Spinden” selecionado para Cajati apresenta uma configuração mais simples para a produção do microgranulado, possibilitando a reação e granulação em uma mesma etapa, reduzindo assim investimentos iniciais em equipamentos e instalações.

As matérias-primas para a microgranulação são as mesmas do processo Kulman (calcário e ácido) com algumas ressalvas adquiridas na experiência industrial que serão citadas mais adiante. O ácido deve apresentar uma concentração de P_2O_5 de 38%, para manter a fase líquida (cerca de 13% H_2O), no sistema possibilitando a formação dos grânulos.

Atualmente o fosfato bicálcico microgranulado, responde por cerca de 50% da produção total da BUNGE Brasil, sendo que a tendência Mundial é aumentar esta fatia do mercado. Assim o compromisso de ajustar o processo e qualidade do produto é imperioso. O processo de produção do fosfato bicálcico microgranulado é uma tecnologia recente e, no caso da BUNGE, um pouco mais desafiadora, devido ao fato de se ter de manter os mesmos padrões de especificação do produto pó como os teores de acidez e de solubilidade em água, baixos.

Muito se sabe sobre granulação de fertilizantes (fosfato monocálcico) cuja tecnologia já está completamente dominada e em constante melhoria. Mas o que sobra para granulação de fertilizante falta na granulação do fosfato bicálcico: diâmetro da partícula, fosfato monocálcico e acidez residual. A correta escolha e dimensionamento dos reatores são determinantes para a qualidade do microgranulado produzido.

1.6- O Processo de microgranulação

A formação do grão de fosfato bicálcico, nos padrões de qualidade citados anteriormente (Solubilidade em água, solubilidade em ácido cítrico, acidez livre, concentração de fósforo e umidade), requer uma atenção especial a alguns parâmetros importantes. O produto fosfato bicálcico atualmente comercializado em maior quantidade, com 18% de fósforo, 12% solubilidade em água e 0,20% de acidez não está em conformidade com as condições do processo de granulação utilizado pela indústria de fertilizantes, isso porque não apresenta compostos solúveis em água o suficiente para promover o crescimento uniforme e natural das partículas. Esses compostos solúveis em água seriam o fosfato monocálcico, que é medido pelo teor de solubilidade em água do produto e o ácido fosfórico (acidez livre) e outros sais em menor quantidade como os fosfatos de Magnésio, Ferro ou Alumínio.

Cumprе salientar que a granulação se dá pela deposição de camadas de partículas umas sobre as outras, agregadas por substâncias que favorecem essa aderência. O fator reciclo torna-se extremamente importante de modo a propiciar que o grão cresça uniformemente. A Figura 1.3 apresenta uma vista esquemática de duas partículas provenientes da granulação, uma mal formada e outra bem formada.

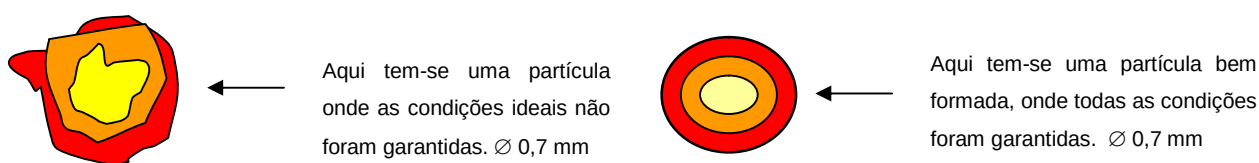


Figura 1.3 – Vista esquemática da granulação de partículas.

A grande diferença, entre as duas partículas esquematizadas na Figura 1.3 está, é claro, além da aparência, na dureza. Quanto mais esférica e uniforme for a partícula, maior sua dureza e estabilidade em todo o processo, inclusive no transporte.

1.7- Condições das matérias-primas

1.7.1- Ácido Fosfórico

O ácido fosfórico ideal para o processo de granulação (produto Padrão BUNGE) é aquele que passou pelo processo de dessulfatação, e possui o mínimo de contaminantes como

Magnésio, Ferro e Alumínio, ou seja, elementos que possam indisponibilizar o fósforo, agir como diluentes ou aumentar a viscosidade do ácido. Como o meio é composto por fase líquida (13% H_2O) formada pelo retorno de produto seco como reciclo, tudo que puder favorecer a difusão do ácido no meio deve ser garantido. Ressalta-se que isso é necessário para que se obtenha um produto com baixo teor de fosfato monocálcico e baixa acidez livre, no caso de concentração de fósforo de 18%. Para garantir a umidade do produto dentro do reator, o ácido fosfórico deve ser diluído à 38% em P_2O_5 .

Outros fatores são igualmente importantes para o processo de granulação, como, por exemplo, a posição de alimentação do ácido, que é específica para cada sistema (reator). A alimentação do ácido não deve ser feita no mesmo local da alimentação do calcário, devendo-se sempre respeitar a distância a ser percorrida pelo produto, uma vez que sendo o fosfato bicálcico úmido um composto tixotrópico, ele pode retornar à fase líquida se empregada mais energia mecânica que o necessário.

Deve-se enfatizar que o processo de microgranulação, usualmente opera em circuito fechado (retornando o reciclo para a fase de reação) e, com isso, o tempo entre reação e a secagem é de 5 minutos (aproximadamente). Assim não há cura do produto, portanto as possibilidades de qualquer correção são reduzidas e os ajustes são mais lentos que o sistema pó.

1.7.2- Calcário

Algo curioso, entretanto compreensível, acontece no processo de microgranulação com relação ao calcário. É que a ausência de alguns contaminantes prejudica a boa formação do grão. Essa foi uma observação feita na prática, mas que fundamenta-se no fato de que, sendo a reação instantânea, a formação de grânulos é muito mais uniforme quando são usados calcários de menor pureza.

Aprofundando-se na questão da influencia de contaminantes na formação dos grãos de fosfato bicalcico microgranulado, pode-se observar que a presença de magnésio no calcário da unidade de Cajati tem um efeito benéfico na formação de grânulos, por auxiliar na plasticidade do produto, ainda que diminuindo um pouco a reatividade do sistema. Por outro lado, o calcário de Arcos/Lavras com baixos teores de magnésio (0,60% MgO), apresentam pouca utilidade para a granulação, no caso do produto com teor de fósforo de 18%. Além dessa questão, outras variáveis devem ser observadas, tais como a temperatura e granulometria do calcário.

1.7.3- Reciclo

Hoje, com o sistema de reação no reator Spinden, numa relação de 2,8/1 em massa (reciclo/produto), pode-se concluir que ainda não se alcançou a condição ideal de granulação mas sim de aglomeração, uma vez que a partícula circula pouquíssimo tempo no sistema, não sendo permitido que a deposição de camadas se faça gradualmente, deixando a partícula pouco uniforme. Essa condição (reciclo 2,8/1), entretanto, favorece uma maior retirada de produto. Por exemplo, se fosse adotado um reciclo de 6/1, como algumas empresas no exterior fazem, a retirada de produto seria 8 ton/h, com o reciclo de 2,8/1 a produção de microgranulado da BUNGE é de 20 ton/h de produto final.

A qualidade do reciclo é vital para a operacionalidade do processo, uma vez que tanto um reciclo “fino”, quanto um reciclo “grosso”, afetam negativamente a produtividade. Geralmente o que provoca a redução das partículas do reciclo é a baixa umidade do material (excesso de secagem), o desequilíbrio da relação cálcio-fósforo (tendendo para o excesso de calcário) e a adição de agentes neutralizantes como Cal Virgem. Por outro lado, a umidade e acidez elevadas fazem com que o reciclo “engrosse”.

1.7.4- Dureza do grão

A dureza do grão é um dos maiores desafios para o produção de fosfato bicálcico com 18 % de fósforo. O ideal é que o grão apresente uma dureza de cerca de 0,8 a 1 Kgf/grão. A dureza obtida atualmente no processo BUNGE é de 0,15 Kgf/grão em decorrência da característica das matérias primas atualmente utilizadas. A dureza é vital para a estabilidade do produto, tanto no processo quanto no carregamento, de modo a não haver fragmentação da partícula gerando pó. O processo de produção envolvendo o calcário leva à formação de grânulos frágeis, que se formam com espaços vazios deixados pela saída do CO_2 do interior do grão formado. Nesse ponto também deve-se considerar a teoria da fase líquida e sais solúveis que foi apresentada anteriormente. O fosfato bicálcico é insolúvel em água, o que é um agravante para o processo pois não há como se estabelecer uma liga que promova a aderência das partículas. Quando se produz o fosfato com 20 % de fósforo observa-se uma grande atenuação no problema pois estão presentes o fosfato monocálcico (50 %) e o H_3PO_4 livre (2 %). Isso é devido ao fato do fosfato monocálcico ser altamente solúvel em água e servir como um excelente aglutinador. A adição de aditivos pode elevar a dureza do grão a níveis satisfatórios mas, o grande diferencial está ligado à qualidade como ao processo, a

acidez livre do produto. Entretanto o máximo que se pode adotar de acidez do microgranulado é 0,40 %. A Figura 1.4 mostra o efeito da acidez livre sobre a dureza dos grânulos.

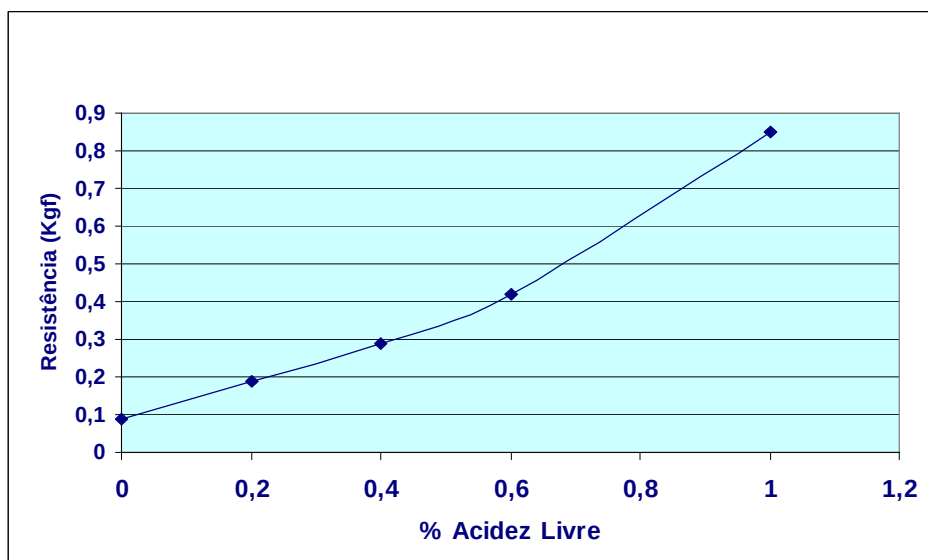


Figura 1.4 – Variação da dureza (Kgf) em função da acidez livre

Com essas observações pode-se concluir que o sistema “aberto” (no qual o produto sofre uma cura nos silos ou galpões de estocagem) é desfavorável pois, aumenta a fragilização da partícula (produto final), devido à movimentação e saída do CO_2 do interior da partícula ainda úmida.

1.8- Considerações gerais sobre o sistema Spinden

Deve-se chamar a atenção para fatores não menos importantes como a qualidade das matérias-primas, que é decisiva para o equilíbrio do processo e para a qualidade final do produto. Tais fatores, apesar de serem elementares, necessitam de uma grande atenção por parte da operação da planta.

a) Condições operacionais do reator

Tanto a geometria quanto a dimensão das palhetas são decisivas para a intensidade do contato do ácido com o calcário, portanto interferem diretamente na reatividade do sistema.

As palhetas devem ser revisadas freqüentemente, de modo a substituir as que estiverem desgastadas.

b) Condições dos transportadores (correias, roscas, bicas)

O sistema com a utilização do reator Tipo Spinden, em circuito fechado, possui um tempo de circulação muito pequeno: o intervalo da saída do reator à entrada do secador, é de apenas 5 minutos. Neste tempo o produto circula por cerca de 50 metros de tapetes que não podem apresentar falhas operacionais ou estruturais, portanto alguns cuidados com o alinhamento do transportador, limpeza dos roletes e raspadores, condição do tapete (furos, rasgos, etc) são considerados imprescindíveis e devem fazer parte da rotina diária da operação da planta.

c) Variação de fluxo das matérias-primas

Um dos grandes motivos de entupimento do reator é a oscilação dos dosadores de ácido e calcário (flow meter ou balanças). O produto que se forma, ora com excesso de cálcio, ora com falta de cálcio, gera incrustações que podem promover um bloqueio da saída do reator ou um excesso de carga.

d) Condições das telas e peneiras

As oscilações no processo podem gerar um produto sem acidez ou com excesso de acidez ou ainda um produto mais fino ou mais grosso, respectivamente. Da mesma forma, a presença de um produto não aderente ou aderente (com acidez) produz conseqüências na operação das peneiras. O produto ácido bloqueia a tela, entupindo a peneira. Produtos com elevado teor de fosfato monocalcico, como o MCPD e o P 20, são extremamente delicados para esta fase da operação, pois o fosfato monocalcico também é aderente. Devido à complexidade das variáveis envolvidas e limites inerentes ao produto torna-se muito difícil garantir uma boa distribuição granulométrica do produto durante o período de produção e armazenagem.

1.9- Objetivos gerais do trabalho

No sentido de adequar fisicamente o produto no momento da expedição para o cliente, a Faculdade de Engenharia Química de Uberlândia e BUNGE Fertilizantes S.A. fizeram uma parceria na tentativa de desenvolver um sistema para classificação que

possibilite um corte fino nas partículas de fosfato bicálcico. Para alcançar tal meta, este trabalho teve como objetivos:

- a) Estudar um sistema de separação utilizando a fluidização, avaliando sua eficiência na separação de finos gerados durante o processo de produção, armazenagem e expedição do fosfato bicálcico microgranulado produzido na Unidade de Cajati/SP da Bunge Fertilizantes S.A.;
- b) Quantificar os efeitos das variáveis dimensionais e operacionais do equipamento, buscando informações para o dimensionamento de unidades industriais no seu ponto ótimo;
- c) Dimensionar um sistema industrial para aplicação na Unidade da BUNGE Fertilizantes em Cajati/SP, atendendo a demanda de carregamento da Unidade em 100 T/h;

No capítulo 2 será feita uma revisão bibliográfica sobre o assunto. No capítulo 3 serão descritos os equipamentos bem como a metodologia aplicada na realização e tratamento dos dados. O capítulo 4 apresenta uma análise dos resultados obtidos. O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho bem como as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Fundamentos da Fluidização

Quando um fluido é passado de forma ascendente através de um leito de partículas, a sua perda de pressão devido à resistência de atrito aumenta com o aumento da velocidade de escoamento do fluido. Este processo continua até o ponto em que a força de arraste ascendente exercida pelo fluido sobre as partículas se tornar igual ao peso aparente das partículas no leito. Neste ponto, as partículas são levantadas pelo fluido, a separação das partículas aumenta, e o leito torna-se fluidizado. O balanço de forças através do leito fluidizado mostra que a queda de pressão do fluido através do leito de partículas é igual ao peso aparente destas por unidade de área do leito.

Deste modo:

$$\text{Queda de pressão} = \frac{\text{Peso das partículas} - \text{Impulso para cima nas partículas}}{\text{Área transversal do leito}}$$

Assim, para um leito com partículas de densidade ρ_p , fluidizado por um fluido com densidade ρ_f para formar um leito de altura H e porosidade ε em um vaso de área transversal A , a equação que descreve a queda de pressão no leito é dada por:

$$\Delta p = \frac{HA(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g}{A} \quad (2.1)$$

ou

$$\Delta p = H(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g \quad (2.2)$$

Um gráfico de perda de pressão através do leito versus velocidade superficial do fluido tem a aparência ao apresentado na Figura 2.1 (Kunii e Levenspiel, 1991).

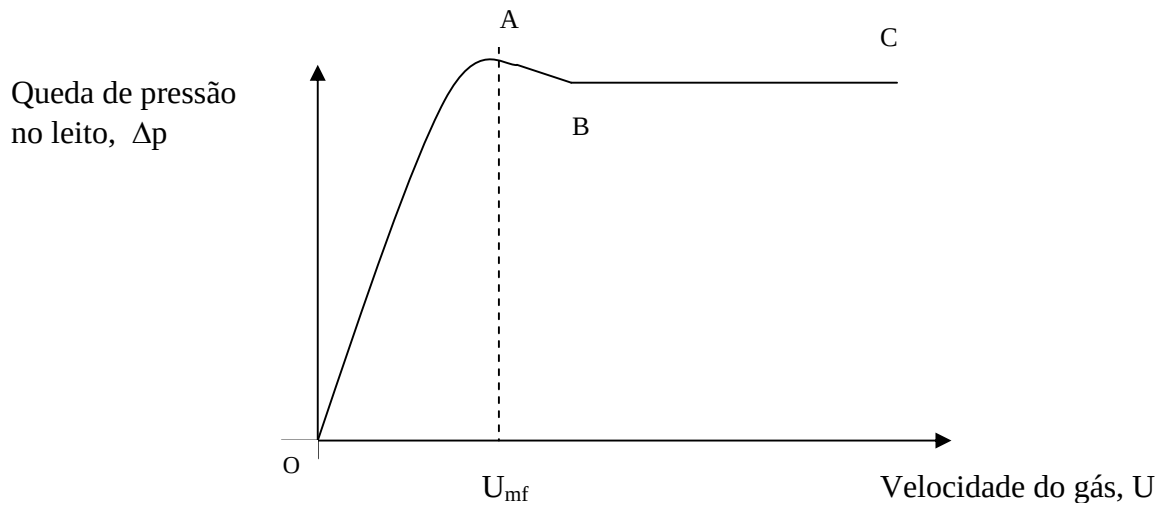


Figura 2.1: Queda de pressão *versus* velocidade do fluido para leitos fluidizados.

A região da linha reta **AO** é a região de leito fixo. Nela, as partículas sólidas não apresentam movimento relativo e o volume é constante. A perda de pressão *versus* velocidade do fluido nesta região é descrita em geral pela equação de Ergun, Equação (2.3).

$$\frac{(-\Delta p)}{H} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U}{x_{sv}^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_f U^2}{x_{sv}} \quad (2.3)$$

A região BC é a região do leito fluidizado, para a qual a Equação (2.1) se aplica. No ponto **A** nota-se que a queda de pressão ultrapassa o valor previsto pela Equação (2.1). Esta elevação é mais marcante em pós que sofreram compactação e está associada à força extra requerida para superar as forças atrativas entre as partículas.

A velocidade superficial do gás a partir do qual o leito compactado torna-se um leito fluidizado é conhecida como velocidade mínima de fluidização, U_{mf} , também conhecida como velocidade de fluidização incipiente. A U_{mf} aumenta com o tamanho e a densidade das partículas e é afetada, também, pelas propriedades físicas do fluido. É possível derivar uma expressão para U_{mf} igualando-se a expressão da perda de pressão em um leito fluidizado, Equação (2.2) à expressão para perda de pressão ao longo de um leito fixo, Equação (2.3):

$$(1-\varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U_{mf}}{x_{sv}^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_f U_{mf}^2}{x_{sv}} \quad (2.4)$$

Rearranjando a equação anterior tem-se:

$$(1-\varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \left(\frac{\mu^2}{\rho_f x_{sv}^3} \right) \left(\frac{U_{mf} x_{sv} \rho_f}{\mu} \right) + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \left(\frac{\mu^2}{\rho_f x_{sv}^3} \right) \left(\frac{\rho_f^2 x_{sv}^2 U_{mf}^2}{\mu^2} \right) \quad (2.5)$$

E então,

$$(1-\varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g \left(\frac{\rho_f x_{sv}^3}{\mu^2} \right) = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \text{Re}_{mf} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \text{Re}_{mf}^2 \quad (2.6)$$

ou ainda

$$\text{Ar} = 150 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \text{Re}_{mf} + 1,75 \frac{1}{\varepsilon^3} \text{Re}_{mf}^2 \quad (2.7)$$

em que Ar é um número dimensional conhecido como Número de Arquimedes e Re_{mf} é o número de Reynolds na fluidização incipiente, Esses números são dados por:

$$\text{Ar} = \frac{\rho_f (\rho_p - \rho_f) g x_{sv}^3}{\mu^2}$$

$$\text{Re}_{mf} = \left(\frac{U_{mf} x_{sv} \rho_f}{\mu} \right)$$

Para obter o valor de U_{mf} através da Equação (2.7), é necessário o conhecimento da porosidade do leito no início da fluidização, $\varepsilon = \varepsilon_{mf}$. Considerando-se o valor de ε_{mf} como uma porosidade do leito fixo, obtém-se uma estimativa para U_{mf} . Entretanto, na prática, porosidades no início da fluidização são ligeiramente maiores que a porosidade do leito fixo. Um típico valor de ε_{mf} freqüentemente usado é 0,4 (Kunii e Levenspiel, 1991). Usando este valor, na Equação (2.7) tem-se:

$$\text{Ar} = 1406 \text{Re}_{mf} + 27,3 \text{Re}_{mf}^2 \quad (2.8)$$

Wen e Yu (1966) propuseram uma expressão matemática para U_{mf} de forma similar à Equação (2.8):

$$Ar = 1652 Re_{mf} + 24,5 Re_{mf}^2 \quad (2.9)$$

ou ainda

$$Re_{mf} = 33,7[(1 + 3,59 \times 10^{-5} Ar)^{0,5} - 1] \quad (2.10)$$

A correlação de Wen e Yu (1996) é válida para esferas na faixa de $0,01 < Re_{mf} < 1000$. Para uma fluidização gasosa, a correlação de Wen e Yu é freqüentemente tomada como sendo mais apropriada para partículas maiores que $100\mu m$.

A correlação de Baeynes (1974), Equação (2.11), é mais apropriada para partículas menores que $100\mu m$.

$$U_{mf} = \frac{(\rho_p - \rho_f)^{0,934} g^{0,934} x_p^{1,8}}{1110 \mu^{0,87} \rho_g^{0,066}} \quad (2.11)$$

2.2– Algumas propriedades relevantes de pós e partículas

O valor da densidade para ser usado em equações de fluidização é o da densidade da partícula, definida como a massa da partícula dividida pelo seu volume total. No cálculo do volume total são computados os volumes de todos os poros abertos e fechados.

Para sólidos não-porosos, a densidade da partícula é facilmente medida mediante o uso de picnômetro a gás ou recipiente de gravidade específica. Entretanto estas técnicas não devem ser usadas para sólidos porosos já que elas levam à densidade verdadeira ou densidade absoluta, ρ_{abs} , do material das quais as partículas são feitas. A Equação (2.12) define a densidade absoluta.

$$\text{Densidade absoluta} = \frac{\text{Massa da partícula}}{\text{Volume do material que compõe a partícula}} \quad (2.12)$$

Para partículas porosas, a densidade da partícula ρ_p (também chamada de densidade aparente ou densidade de invólucro) não é facilmente medida apesar de serem propostos diversos métodos citados por Geldart (1990).

Outra densidade relevante aos leitos fluidizados é a densidade do leito que é definida da forma apresentada na equação (2.13) a seguir:

$$\text{Densidade de leito} = \frac{\text{Massa das partículas em um leito}}{\text{Volume ocupado pelo leito}} \quad (2.13)$$

O tamanho mais apropriado de partículas para usar nas equações relativas às interações de partículas fluidas é um diâmetro hidrodinâmico; isto é, um diâmetro de esfera equivalente derivado de uma técnica de medição envolvendo interações hidrodinâmicas entre as partículas e o fluido. Na prática, entretanto, na maioria das aplicações industriais, a classificação por tamanho é feita usando peneiramento e as correlações utilizam ou diâmetro de peneiras, x_p ou diâmetro de volume, x_v . Para partículas esféricas ou próximas de esféricas, x_v é igual a x_p . Para partículas angulares, $x_v \approx 1,13x_p$.

Para uso nas aplicações de fluidização, começando a partir da análise de uma peneira, o tamanho médio do pó é freqüentemente calculado a partir de:

$$\langle x_p \rangle = 1 / \sum (m_i / x_i) \quad (2.15)$$

em que x_i é a média aritmética das aberturas das peneiras adjacentes entre as quais a fração mássica é coletada.

2.3– Classificação dos Pós

Geldart (1973) classificou os pós dentro de quatro grupos, de acordo com as suas propriedades de fluidização em condições ambientes. A classificação dos pós segundo Geldart é utilizada extensamente em todos os campos relacionados à tecnologia dos pós e está apresentada a seguir:

Grupo A – são pós que, quando fluidizados pelas condições do ar ambiente, criam uma região de fluidização não-borbulhante começando na velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), seguido pela fluidização borbulhante aumentando a velocidade de fluidização.

Grupo B – são pós que geram somente fluidização borbulhante sob condições análogas às do grupo anterior.

Grupo C – são pós muito finos e coesivos, que são incapazes de fluidizar.

Grupo D – são pós compostos por partículas que são distinguíveis pela habilidade de produzir leitos de jorro.

As propriedades de fluidização de um pó no ar podem ser previstas mediante a determinação do grupo em que ele se posiciona. É importante frisar que em temperaturas e pressões de operação superiores a do ambiente os pós poderão demonstrar as características de um grupo diferente daquelas que eles mostrariam em condições ambientes. Este fato ocorre devido ao efeito das propriedades do gás nas propriedades de aglomeração. A Tabela 2.1 apresenta um sumário das propriedades típicas das diferentes classes de pó segundo Geldart (1973).

Tabela 2.1 – Características dos diversos Grupos de pó, segundo Geldart (1973).

GRUPO →	GRUPO C	GRUPO A	GRUPO B	GRUPO D
Características mais evidentes	Coesivo. Difícil de fluidizar	Ideal para fluidização. Exibe uma faixa de fluidização não-borbulhante	Borbulhamento começa na velocidade mínima de fluidização U_{mf}	Sólidos grossos
Sólidos Típicos	Farinha, cimento	Cracking catalisadores	Areia de construção	Cascalho, grão de café
PROPRIEDADES ↓				
Expansão do leito	Baixa, devido à abertura de sulcos	Alta	Moderada	Baixa
Taxa de desaeração	Inicialmente rápida, tornando-se exponencial	Lenta, linear	Rápida	Rápida
Propriedades de Borbulho	Não há bolhas – somente sulcos	Bolhas se dividem e coalescem. Máximo tamanho de bolhas	Não tem limite de tamanho	Não tem limite de tamanho
Mistura de sólidos	Muito baixa	Alta	Moderada	Baixa
Retromistura do gás	Muito baixa	Alta	Moderada	Baixa
Esguichamento	Não	Não	Somente no raso	Sim

2.4– Aplicações de leitos fluidizados

2.4.1- Usos em processos físicos

Os processos físicos que usam leitos fluidizados incluem secagem, mistura, granulação, recobrimento, aquecimento e resfriamento. Todas estas operações aproveitam as vantagens de excelente capacidade de mistura dos leitos fluidos. Uma boa mistura de sólidos promove uma boa transferência de calor, uniformidade de temperatura e facilidade do controle do processo. Uma das mais importantes aplicações de leitos fluidizados é a secagem de sólidos. Os leitos fluidizados são correntemente usados comercialmente para secagem de materiais como minérios triturados, areia, polímeros, farmacêuticos, fertilizantes, alimentos e produtos cristalinos. As razões para a popularidade da secagem em leitos fluidizados são:

- Os secadores são compactos, simples quanto a construção e de custo relativamente baixo.
- A ausência de peças móveis, exceto aquelas relacionadas aos equipamentos de alimentação e aos dispositivos de descarga, leva a uma operação confiável com baixos custos de manutenção.
- A eficiência térmica destes secadores é relativamente alta.

Os leitos fluidizados são freqüentemente usados para resfriar sólidos particulados na etapa seguinte a uma reação. Leitos fluidizados também são usados para recobrimento de partículas na indústria farmacêutica e agrícola.

2.4.2- Usos em processos químicos

O leito fluidizado a gás fornece um bom meio para realização de uma reação química envolvendo um gás e um sólido. As vantagens no uso dos leitos fluidizados para reações químicas incluem:

- O contato gás-sólido é bom.
- A excelente circulação de sólidos no leito promove uma boa transferência de calor entre as partículas do leito bem como nas superfícies de transferência de calor imersas no leito.
- Permite condições quase isotérmicas mesmo quando as reações são fortemente endotérmicas ou exotérmicas.
- A eficiente transferência de calor também promove facilidade no controle da reação.
- A fluidez do leito faz com que haja facilidade de remoção de sólidos do reator.

Entretanto, mesmo com tantas vantagens, os principais problemas surgem a partir da natureza de fase dupla (bolhas e sólidos fluidizados) de tais sistemas. Este problema se torna particularmente severo quando os sólidos no leito são catalisadores para a reação em fase gasosa. Em tal caso, o reator químico ideal de leito fluidizado teria que oferecer excelente contato gás-sólido, nenhuma outra passagem secundária e nenhuma retromistura do gás contra a principal direção do fluxo. Em um leito fluidizado borbulhante parte do gás ultrapassa os sólidos por atravessar o leito em forma de bolhas, isto significa que reagentes não reagidos aparecem no produto, além disso, o caminho de circulação de ar dentro de um leito fluidizado borbulhante é tal que os produtos sofrem retromistura e podem ser submetidos à reações secundárias indesejáveis.

Esses problemas poderão se transformar em sérias dificuldades práticas especialmente na construção em escala industrial do novo processo de leito fluidizado a partir de uma planta piloto. Este assunto é bem tratado com maiores detalhes nas referências: Kunii; Levenspiel (1991), Geldart (1986), Davidson; Harrison (1971)

2.5- Elutriação

Para definir o termo elutriação admite-se um leito de sólidos granulares compostos por uma ampla faixa de tamanhos individuais de partículas. A carga está contida em um recipiente provido de um fundo com um prato poroso e, ar é forçado através do prato na direção da carga. A medida em que a vazão de ar é aumentada além do mínimo valor correspondente de fluidização, a carga torna-se mais intensamente fluidizada e, as partículas relativamente pequenas são arrastadas no ar. Desta forma, tais partículas saem do limite superior da coluna de fluidização.

O fenômeno de elutriação é fundamentalmente diferente do fenômeno de fluidização (fase diluída), pois neste último, toda a carga de sólidos é movimentada pelo fluxo de gás, em contraste, na elutriação, somente os componentes relativamente pequenos são arrastados pelo fluxo de gás.

A elutriação também é conhecida como *entrainment* (arraste) e *carryover* (transporte). Todos estes termos são utilizados na literatura para descrever a ejeção de partículas a partir da superfície de um leito borbulhante e a remoção delas de um vaso mediante a ação do gás fluidizante. A elutriação freqüentemente executa uma função significativa na tecnologia do processo de fluidização. Ela é importante devido ao fato das cargas granulares manuseadas em ambiente industrial são normalmente compostas por uma

ampla faixa de partículas. Além disso, muitos materiais quando fluidizados, sofrem desgaste, o que induz a formação de finos, estes materiais finos são facilmente levados pelo fluido e carregados para fora do sistema. Invariavelmente, seja por razões econômicas, exigências ambientais ou puramente por especificações do processo, estes componentes finos devem ser recuperados ou simplesmente removidos do fluido. Naturalmente para que estes sólidos arrastados possam ser removidos do fluido de maneira eficaz, suas características e principalmente sua concentração no fluido portador deverão ser conhecidas, portanto é desejável ter condições de prever para sistemas fluidizados em geral, o início da elutriação e até que ponto ela ocorre.

Considere-se uma única partícula caindo em queda livre em um ambiente estático de gás na ausência de qualquer limitação sólida. Sabe-se que esta partícula alcançará uma velocidade terminal quando as forças de gravidade (peso), empuxo e arraste estiverem em equilíbrio (Rhodes, 1998). Pode-se concluir que, se o gás de volume infinito se movimenta para cima com uma velocidade igual à velocidade terminal da partícula, a mesma ficará estacionária.

Se, entretanto, o gás estiver se deslocando ascendentemente em um tubo com uma velocidade média igual à velocidade terminal da partícula, o efeito da parede do tubo produzirá um efeito diferente :

- em escoamento laminar, a partícula poderá se deslocar para cima ou para baixo dependendo da sua posição radial devido ao perfil parabólico de velocidade do gás no tubo.
- em escoamento turbulento, a partícula poderá se mover para cima ou para baixo dependendo de sua posição radial. Além disso, as flutuações aleatórias de velocidades superpostas com a velocidade temporal do perfil de velocidade, tornam menos previsível o verdadeiro movimento da partícula.

Se for introduzido na corrente gasosa um número de partículas que variam em tamanho, algumas destas partículas poderão cair e outras podem subir dependendo dos respectivos tamanhos, densidades e posições radiais. Deste modo, o arraste de partículas em uma corrente de gás ascendente, é um processo complexo. Pode ser observado que o arraste e a distribuição de tamanhos das partículas arrastadas dependerá, em geral, do tamanho e densidade das partículas, propriedades do gás, velocidade do gás, regime de escoamento do

gás, perfil radial de velocidade e força de empuxo, bem como do diâmetro do vaso. Em adição pode-se constatar que:

- (i) os mecanismos pelos quais as partículas são ejetadas para dentro do fluxo de gás a partir do leito fluidizado são dependentes das características do leito, em particular, tamanho das bolhas e velocidade na superfície,
- (ii) o perfil de velocidades do gás imediatamente acima da superfície do leito é distorcido pela explosão de bolhas. Então, a previsão do arraste dos sólidos se torna impossível e, na prática, deve-se adotar uma abordagem empírica. Esta aproximação empírica define partículas grossas como partículas cuja velocidade terminal é maior que a velocidade superficial do gás ($V_T > V$) e, partículas finas como aquelas para as quais $V_T < V$. Além disso, considera-se a região acima da superfície do leito fluidizado sendo composta de diversas zonas:

- Zona de *Freeboard* que é toda a região entre a superfície do leito e a saída do gás.
- Zona de esguicho (*Splash*), que é a região exatamente acima da superfície do leito, em que as partículas grossas caem.
- Zona desimpedida (*Disengagement*) que é a região acima da zona de esguicho, em que ambos os fluxos, ascendente e a concentração da suspensão de finas partículas diminuem em função do aumento da altura.
- Zona de transporte de fase diluída (*Dilute-phase*) que é a região acima da zona desimpedida, na qual todas as partículas são carregadas para cima; o fluxo de partículas e a concentração de suspensão são constantes com a altura.

Deve-se observar que, em tese, as partículas finas são arrastadas e deixam o sistema e as partículas grossas permanecem no leito, mas na prática, as partículas finas podem permanecer no sistema em velocidades várias vezes equivalente à sua velocidade terminal e as partículas grossas podem ser arrastadas pelo fluxo de gás ascendente do sistema. A altura, desde a superfície do leito até o topo da zona desimpedida, é conhecida como altura de transporte desimpedido (TDH). Acima do TDH o fluxo de arraste e a concentração das partículas permanecem constantes, desta maneira, do ponto de vista de projeto, para ter um máximo benefício do efeito da gravidade na zona de *freeboard*, a saída do gás deverá ser localizada acima do TDH. Muitas correlações empíricas para TDH são disponíveis na literatura.

2.5.1- Efeito das variáveis de operação do sistema

As taxas de elutriação de leitos fluidizados industriais dependem, de uma forma geral, de muitas variáveis. Esta dependência é, muitas vezes, complexa e os seus efeitos são freqüentemente inter-relacionados, todavia, as seguintes observações gerais sobre estas variáveis, podem ser feitas:

- A) A elutriação é normalmente insignificante no caso dos leitos de sólidos granulados de estreita distribuição de tamanho que são fluidizados com taxas de gás que não ultrapassam a velocidade terminal das partículas menores ou mais leves. Se o leito de sólidos é, entretanto composto de uma larga variedade de tamanhos de componentes, incluindo partículas muito pequenas, uma elutriação significativa destes finos pode ocorrer em velocidades de gás que ultrapassam por pouco a velocidade terminal destas partículas muito pequenas.
- B) Para operação com velocidades de gás significativamente maiores que as velocidades terminais das partículas, a elutriação torna-se apreciável mesmo com leitos de distribuição de tamanhos relativamente estreitos.
- C) O efeito do diâmetro das partículas no leito está ligado predominantemente com a vazão de gás, como foi discutido em A e B. No que diz respeito aos efeitos do diâmetro da coluna na taxa de elutriação, os resultados parecem ser contraditórios, isto é provavelmente devido ao diâmetro da coluna estar relacionado à qualidade de fluidização bem como à distribuição de gás.
- D) Como já foi dito, a taxa de elutriação decresce com o aumento do *freeboard*. Além de uma certa altura de *freeboard*, e com a mesma distribuição de tamanhos e taxas de gás, a elutriação torna-se independente do *freeboard*.
- E) Fatores como forma das partículas, características da superfície, viscosidade do fluido e seus efeitos na taxa de elutriação ainda não foram sistematicamente investigados. Acredita-se que seus efeitos se manifestam na qualidade de fluidização e dispersão geral de gás-sólidos.
- F) Efeitos da dispersão do gás na elutriação não foram investigados sistematicamente. Espera-se que, com a melhoria na dispersão do gás numa fluidização mais homogênea, as taxas de elutriação devam ser aumentadas, entretanto, alguns dados de Kraft *et al.* (1956) obtidos com reator FCC catalítico aparentemente indicam que uma boa fluidização, isto é, pequenas bolhas de gás, promovem taxas de elutriação mais baixas do que a situação de bolhas grandes.

- G) O efeito da pressão nas taxas de elutriação tem sido estudado em relação à fluidização de amostras finas e grossas de FCC catalítico (Gohr, 1956; May e Russel, 1954) utilizando um tubo de 2 polegadas. Os resultados seguiram a previsão do efeito da pressão sobre a fluidização de leitos.
- H) Os efeitos de misturadores mecânicos e outras interrupções dos leitos de bolas de vidro de 75µm tem sido relatados por Lewis, Gilliland and Lang (1962). Surpreendentemente, nos leitos agitados, as taxas de elutriação foram menores que em leitos não agitados, entretanto, isto pode ser devido ao fato de que os sólidos eram de corte fino (*closed-cut*).

2.5.2- Mecanismo de elutriação de partículas

A Elutriação de partículas finas de um leito fluidizado gasoso pode ser explicada baseando-se nas bolhas de gás ascendentes. Tais bolhas de gás, que se formam imediatamente acima do distribuidor sobem arrastando consigo as partículas finas bem como as grossas através do leito fluidizado. Os sólidos localizados ao redor e atrás das bolhas podem ser arrastados ao longo do leito numa velocidade inferior à do gás, pois estão submetidas à forças de atrito maiores devido a sua maior área superficial.

Rowe; Partridge (1965) mostraram que os sólidos levados na nuvem e nas ondas secundárias de turbulência de bolhas gasosas são continuamente trocados com os sólidos novos na fase dispersa. Esse é o principal fator contribuinte para a mistura, bem como a estratificação de sólidos em um leito fluidizado. À medida que as partículas alcançam a superfície do leito, repentinas erupções de bolhas de gás ocorrem, lançando as partículas para cima a partir da superfície do leito, tão logo elas saem do leito. Entretanto, elas entram no *freeboard* acima do leito onde a velocidade do gás é essencialmente igual à velocidade superficial, a energia cinética de cada partícula lançada no *freeboard* pode ser atribuída à inércia das partículas, ao atrito e à força de flutuabilidade do fluxo de gás. As partículas de tamanhos menores podem ser transportadas no sentido ascendente continuamente mas as partículas grossas irão cair de volta no leito.

Para explicar quantitativamente o fenômeno de elutriação baseada nas bolhas de gás, algumas premissas simplificadas são feitas:

- A) Um leito fluidizado pode ser representado pelas fases de bolhas e de emulsão mostradas na Figura 2.1;

B) É pressuposto que a fase de bolhas consiste de bolhas esféricas acompanhadas pelas ondas de turbulência. A fração do volume das bolhas ocupado pelas ondas secundárias é simbolizado por f_w . a velocidade da bolha pode ser calculada conforme sugerido por Davidson; Harrison (1963)

$$U_b = U - U_{mf} + 0.711(D_b g)^{1/2} \quad (\text{unidades no c.g.s.}) \quad (2.16)$$

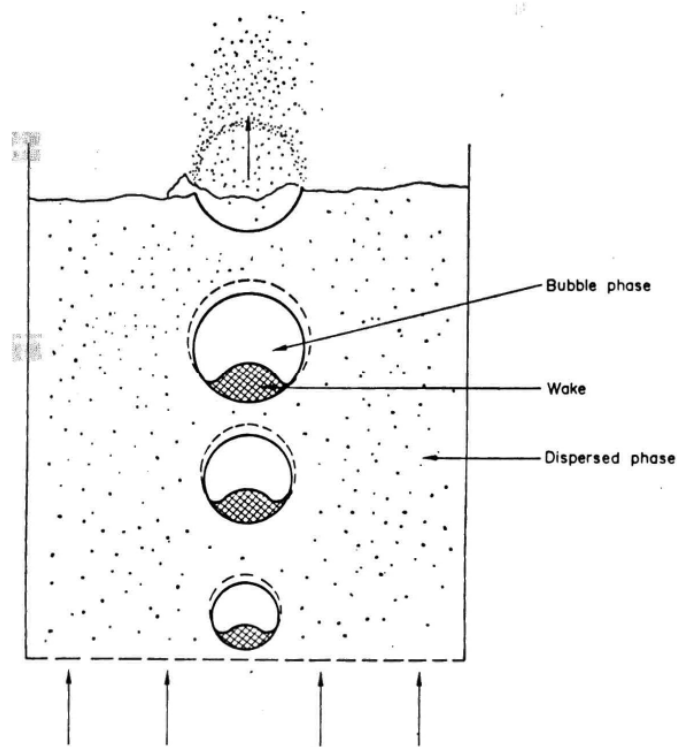


Figura 2.2- Diagrama esquemático da elutriação de partículas através de bolhas de gás

C) Considerando que as bolhas crescem continuamente por coalescência enquanto passam através do leito até que elas ou alcancem o tamanho máximo estável ou alcancem o diâmetro do leito, Harrison *et al* (1961) sugeriu que o máximo diâmetro estável da bolha, D_{bm} pode ser encontrado por:

$$D_{bm} = \left(\frac{U_t}{0.711} \right)^2 \frac{1}{g} \quad (\text{unidades no c.g.s.}) \quad (2.17)$$

D) Quando a velocidade do gás, U , é muito maior que a velocidade terminal da partícula, o máximo diâmetro estável da bolha não é obtido, a velocidade da bolha para este caso pode ser aproximada por:

$$U_b = \frac{H}{H - H_{mf}} (U - U_{mf}) \quad (2.18)$$

E) O tamanho da bolha ao longo da altura do leito a partir do distribuidor pode ser aproximado (Kato; Wen, 1969) por:

$$D_b = 1 \cdot 4 \rho_s d \left(\frac{U}{U_{mf}} \right) H + D_{bo} \quad (\text{unidades no c.g.s.}) \quad (2.19)$$

em que D_{bo} é o diâmetro da bolha imediatamente acima do prato distribuidor, que pode ser aproximado, por exemplo, por:

$$D_{bo} = \left(\frac{6U\rho_g}{\pi} \right)^{0.4} / g^{0.2} \quad (\text{unidade c.g.s.}) \quad (2.20)$$

F) O volume total das bolhas de gás no leito pode ser expresso como $(H-H_{mf})A$. O número de bolhas subindo em determinada altura do leito torna-se:

$$N = \frac{A(U - U_{mf})}{\frac{\pi}{6} D_b^3} \quad (\text{unidades no c.g.s.}) \quad (2.21)$$

Deste modo a quantidade de sólidos carregados para cima nas ondas secundárias das bolhas numa determinada altura torna-se:

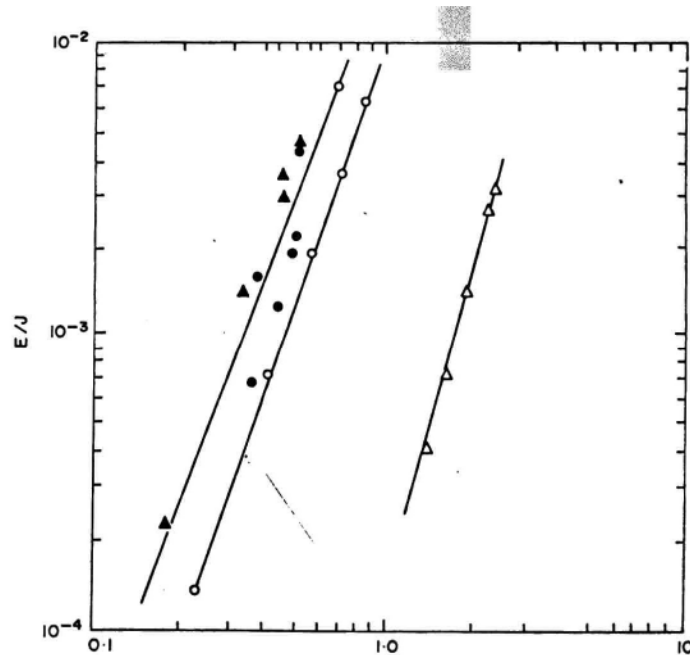
$$f_w \left(\frac{\pi}{6} D_b^3 \right) \rho_s (1 - \varepsilon_{mf}) N \quad (\text{unidades no c.g.s.}) \quad (2.22)$$

A taxa de sólidos sendo carregados para cima pelas ondas secundárias de bolhas por unidade de tempo por unidade de área superficial do leito, J , torna-se:

$$J = f_w \left(\frac{\pi}{6} D_b^3 \right) \rho_s (1 - \varepsilon_{mf}) \left(\frac{N}{A} \right) \quad (2.23)$$

$$= f_w \rho_s (1 - \varepsilon_{mf}) (U - U_{mf}) \quad (\text{unidades no c.g.s}) \quad (2.24)$$

Devido às diferentes distribuições de tamanho dos sólidos entre as fases densas e dispersa (as bolhas se movem na parte superior do leito, quando elas atingem a superfície do leito) a fase densa contém mais partículas finas que a média da composição do leito. O fenômeno de estratificação causa uma distribuição de concentrações de finos no decorrer do leito como mostra a Figura 2.3 a seguir :



- $dp = 0,0098$ cm, esfera de vidro, $U_T = 57,3$ cm/s;
- ▲ $dp = 0,0094$ cm, esfera de vidro, $U_T = 53,0$ cm/s;
- $dp = 0,0074$ cm, esfera de vidro, $U_T = 37,0$ cm/s;
- △ $dp = 0,0051$ cm, esfera de vidro, $U_T = 18,5$ cm/s;

Figura 2.3- Efeito da estratificação na elutriação de esferas de vidro (Lewis et al., 1962; Wen and Hashinger, 1960)

2.5.4- Leitos fluidizados em escala industrial

A extensa literatura existente sobre o comportamento de sistemas fluidizados mostra que é possível prever o comportamento de pequenos equipamentos em condições ideais, isto é, quando o controle total pode ser exercido sobre o tamanho das partículas no leito e crescimento da bolha e as restrições econômica têm pouca importância. Como acontece com a maioria dos sistemas gás-sólido, prever os resultados alcançados em equipamentos de porte industrial apresenta muitas dificuldades e algumas vezes se torna impossível.

A Fluidização é usada comercialmente em uma grande variedade de processos, tais como: operações catalíticas, resfriamento de alimentos, secagem, recobrimento plástico de objetos imersos, tratamento térmico, separação física, separação mineral, absorção e recuperação de solventes, micro encapsulação de medicamentos etc. Esta diversidade de aplicações resulta em uma larga faixa de condições operacionais, bem como em geométricas. Tais leitos podem apresentar faixas de comprimentos de 2 – 30 ft, áreas de seção transversal de 1 – 100 ft², vazão de gás de 1,5 U_{mf} – 100 U_{mf} , e temperaturas de operação de 0°C em operações de resfriamento até 1200°C em unidades de tratamento térmico. Os gases usados podem ser desde hidrogênio de baixa densidade até hidrocarbonetos de alta densidade.

A falta de literatura sobre problemas associados com fluidização em grande escala é um contraste marcante com a quantidade de informações publicadas sobre pequenos sistemas trabalhando com condições de fluidização incipiente. Pode-se citar três principais razões para um número pequeno de publicações:

- a) Proteção de segredos industriais e manutenção de *know-how*;
- b) A falta de conhecimento do comportamento do sistema torna bastante difícil o levantamento de medidas em um ambiente normalmente agressivo;
- c) A tendência natural de interromper um trabalho de desenvolvimento quando um sistema particular apresenta um retorno econômico já satisfatório, sem a preocupação de estudar o comportamento do sistema que possa ser aplicado em outros conceitos de leito fluidizado;

O problema associado com sistemas industriais de fluidização pode ser dividido em duas classes: aquelas específicas aos sistemas, considerando as reações químicas envolvidas, e aquelas de natureza geral encontradas nas formas modificadas de outros sistemas.

O comportamento do sistema de fluidização em escala industrial pode ser resumido ao estudo de três tópicos :

- (a) Propriedades dos distribuidores de gás,
- (b) Movimento da bolha,
- (c) Movimento do sólido.

2.5.4.1- Propriedades dos distribuidores de gases de grande escala

A) Tipos de distribuidores e funções

Vários tipos diferentes de distribuidores de gases têm sido descritos na literatura e provavelmente muito mais são usados em aplicações práticas industriais. Uma seleção representativa é mostrada na Figura 2.4. Vale ressaltar que o bom conhecimento do processo a que se destina a fluidização, bem como das condições operacionais bem estabelecidas são fundamentais para uma boa escolha do distribuidor a ser aplicado.

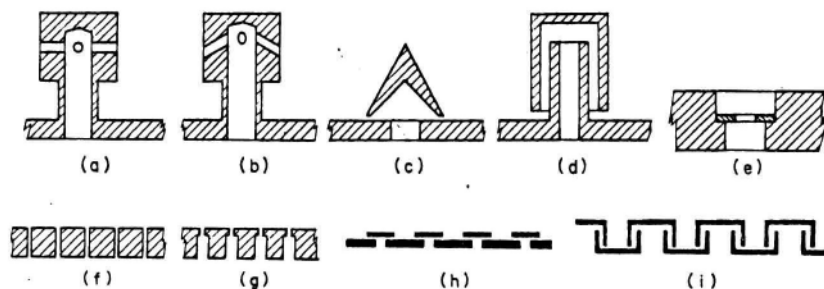


Figura 2.4- Distribuidores de uso comum. (a) e (b) injetores multijet; (c) injetores de alta velocidade de gás; (d) injetores de baixa velocidade de gás; (e) simples orifício; (f) e (g) ranhuras horizontais contínuas; (h) e (i) distribuidores com ranhuras horizontais contínuas e sistema para prevenir o retorno de sólidos;

Algumas características importantes nos distribuidores são citadas a seguir:

- a. Eles podem induzir a fluidização direcionada, fator muito importante em leitos rasos;
- b. Para a completa fluidização os distribuidores devem induzir a partida e manter o leito em movimento constante sobre todos os pontos de entrada de gás durante a operação do sistema;

- c. Os distribuidores devem ser capazes de manter o leito em operação por longos períodos sem nenhum acréscimo significativo na perda de carga do leito de sólidos, este fato tem uma importância particular em operações com múltiplos estágios;
- d. Em muitas operações é necessário impedir que o sólido retorne através do distribuidor, durante as fases de operação: *start – up*, operação normal e parada da planta;
- e. A quantidade de gás na entrada do leito através das várias seções dos distribuidores deve ser controlada e o contato gás – sólido necessário deve ser atingido;
- f. Zonas de estagnação de sólidos devem ser eliminadas;

As principais características de um distribuidor de gases podem ser variadas de acordo com os objetivos do sistema:

- a. Espaçamento entre os pontos de entrada de gás;
- b. Velocidade e direção da corrente de entrada de gás nos pontos de entrada do leito;
- c. Resistência do distribuidor do fluxo de gás;
- d. Geometria da passagem de gases no distribuidor e forma do distribuidor nos pontos de entrada de gás;
- e. Porosidade do conjunto composto pelos injetores;

As extensões nas quais as características supracitadas podem variar, na prática, são usualmente limitadas pelo tipo de processo a ser considerado. Entretanto, operações a alta temperatura em um ambiente corrosivo requerem uma forma simples de construção capaz de acomodar os movimentos decorrentes da expansão térmica. A maioria dos distribuidores é construída em material cerâmico. Os distribuidores contruídos com metais sinterizados ou cerâmicos podem ser problemáticos devido à presença de sólidos finos no ar de fluidização. Tais sólidos eventualmente bloqueiam os poros do distribuidor e pode ser impossível a remoção. Altas velocidades de entrada de gás podem não ser indicadas devido ao atrito severo em alguns materiais do leito.

Um estudo de aplicação dos distribuidores mostrados na figura 2.4 ilustra o desenvolvimento para construção comercial destes equipamentos. Os distribuidores dos tipos

2.4 (a) e 2.4 (b) são exemplos de distribuidores *multijet* encontrados em aplicações em queima de simples estágio. Muitas variáveis relevantes do projeto básico desenvolvido pela DORR COMPANY têm sido descritas por Kozin; Baskakov (1966). Tais distribuidores são usualmente fabricados em aço inoxidável e recobertos em cerâmica. O distribuidor do tipo 2.4 (c) foi descrito por Petrie; Black (1966) e foi desenvolvido para uso em ambientes radioativos onde a eliminação da erosão e impedir o retorno de sólidos pelo distribuidor é importante.

O distribuidor do tipo campânula mostrado na figura 2.4 (d) foi desenvolvido para equipamentos de coluna de destilação na qual a entrada de gás no leito é relativamente baixa.

A necessidade de construir um distribuidor simples para aplicação em sistemas com multi-estágios resultou no arranjo mostrado na figura 2.4 (e). Este consiste de uma placa distribuidora refratária com um determinado número de metais inseridos nos orifícios, projetado no limite de “*build-up*” durante a operação.

Os distribuidores aqui descritos são caracterizados pelo fato de que injetam gás de fluidização dentro do leito em um número discreto de pontos, posicionados de 0,5 – 1,5 ft entre centros.

Outro tipo comum, não ilustrado na Figura 2.4, consiste de uma placa de metal perfurado projetado para acomodar a expansão térmica em aplicações em sistemas de resfriamento e aquecimento. O tamanho e o espaçamento das perfurações são projetados para que a área livre da placa varie entre 0,25 e 15 %.

2.5.4.2- Perda de carga nos distribuidores

Gregory (1967) publicou um trabalho sobre o uso de distribuidores de gases em sistema de pequena escala e atentou para a existência de condições que produziam altas e baixas perdas de carga. Definiu para esses casos, respectivamente, os intervalos em que $\Delta P_D/\Delta P_B$ (Perda de carga no distribuidor/Perda de carga no leito) eram iguais ou maiores que 0,4 ou iguais ou menores que 0,2. Zuiderweg (1967) também estudou o assunto e concluiu que a relação de 0,1 é adequada.

De uma forma geral é arriscado postular algumas regras universais para a perda de carga em distribuidores, relacionados a valores de $\Delta P_D/\Delta P_B$ e tentar aplicá-los para todas as situações. Instalações de leito fluidizados industriais operam com sucesso usando uma faixa de perdas de carga com valores de $\Delta P_D/\Delta P_B$ de 0,02 até 0,5, dependendo do processo envolvido.

O estágio atual de conhecimento sobre a perda de carga em distribuidores somente permite uma generalização qualitativa do assunto. Distribuidores que propiciam baixa perda de carga podem ser usados somente sob circunstâncias especiais ou situações próximas às listadas abaixo:

- a) Quando a fluidização é realizada em sistemas com pequenas áreas de secção transversal, isto é, menores que 16 ft²;
- b) Quando a operação é limitada a leitos rasos;
- c) Quando não são requeridas altas velocidades de entrada de gás no sistema para promover o contato gás-sólido ou movimento do sólido próximo ao conjunto do distribuidor;
- d) Quando elevadas perda de carga no distribuidor impõem uma indesejável alteração térmica no sistema, como por exemplo em instalações de resfriamento;
- e) Quando o estudo econômico não permitir o uso de sopradores, sendo substituídos por ventiladores, reduzindo os custos de instalação e operação;
- f) Quando o retorno de sólidos pelo distribuidor é tolerável ou requerido durante a operação do sistema;

Em outras condições a perda de carga no distribuidor deve ser ajustada/recomendada para um valor determinado em plantas similares que operem com resultados operacionais satisfatórios.

2.5.4.3- Distribuição de tamanhos das partículas

Alguns sólidos com determinados tipos de distribuição de tamanhos de partículas são conhecidos por produzirem uma fluidização mais efetiva que outros. Isto tem sido demonstrado claramente por De Groot (1967) que mostrou que materiais com grandes faixas de tamanhos apresentam um tempo de residência maior que materiais com faixas mais reduzidas, quando fluidizados em um vaso de 5 ft de diâmetro.

Não existe um método específico para se determinar uma distribuição de tamanhos de partículas ótima para instalações industriais, entretanto, existem limites que podem ser aplicados sobre o tamanho das partículas em unidades comerciais, porém a maioria das unidades opera com sólidos cujo tamanho é dependente da fabricação em processos não relacionados ao leito fluidizado. Nos casos em que o tamanho das partículas pode ser

controlado e a atrição e arraste de finos são desejados, altas velocidades de operação produzem um equilíbrio das partículas no leito que pode não ser o ponto ótimo do sistema.

2.6- Vantagens quanto ao uso do Fosfato Bicálcico Microgranulado

A utilização de Fosfato Bicálcico Microgranulado isento de pó, apresenta uma série de vantagens em todos os pontos da cadeia logística, justificado pelo aumento da demanda mundial e nacional nos últimos anos por este insumo. Este incremento se justifica pelos seguintes fatores:

Na Unidade Industrial Produtora, as vantagens são:

- Propicia menor geração de pó com conseqüente melhoria nas condições operacionais para os funcionários (minimiza riscos de saúde ocupacional);
- Possibilita maior fluidez do material nos equipamentos, propiciando ganhos de produtividade nas plantas de microgranulação;
- Permite que se trabalhe com um maior teor de compostos monocálcicos com maior nível de acidez, propiciando melhores condições de granulação, principalmente no Prato Granulador;

Na Fazenda, as vantagens são:

- Propicia um menor índice de perda pela ação eólica (ventos);
- Produz uma secagem mais rápida do sal após incidência de chuvas, ou ação da saliva;
- Diminui a perda de fósforo por lixiviação;
- Diminui o risco de compactação e embocamento;

As principais vantagens para os animais no uso de fosfato bicálcico microgranulado são:

- Maior tempo de permanência do produto no rúmen, com liberação mais lenta dos nutrientes e melhor aproveitamento pelo animal;
- Curva de absorção mais longa e com pico menor, sugerindo maior estabilidade, constância e homogeneidade no rúmen;
- Maior palatabilidade do sal, o que eleva o seu consumo pelo animal;
- Maior biodisponibilidade, principalmente para a biota ruminal, devido ao aumento de acidez e do teor de monocálcico;

O nível de qualidade exigido pelo mercado de nutrição animal, segue o padrão internacional, apresentado na Figura 2.5.

Foscálcio®

NÍVEIS DE GARANTIA:	Porcentagem (%)
Fósforo (Mínimo)	18,00
Cálcio (Máximo)	24,00
Flúor (Máximo)	0,18
Umidade (Máximo)	5,00
Solubilidade do fósforo em ácido cítrico a 2% (Mínimo)	90,0

ASPÉCTOS FÍSICOS:

Coloração	Cinza claro
Forma	Pó
Granulometria .	Retenção máxima 5% na malha 20 mesh (Ø 0,841 mm)
Densidade	0.9 t/m ³

Foscálcio® Microgranulado

Fósforo - Microgranulado

NÍVEIS DE GARANTIA:	Porcentagem (%)
Fósforo (Mínimo)	18,00
Cálcio (Máximo)	24,00
Flúor (Máximo)	0,18
Umidade (Máximo)	5,00
Solubilidade do fósforo em ácido cítrico a 2% (Mínimo)	90,0

ASPÉCTOS FÍSICOS:

Coloração	Cinza claro
Granulometria ...	Retenção de 0% na malha 9 mesh (Ø 2,00 mm)
	Retenção de 97% na malha 100 mesh (Ø 0,149 mm)
Densidade	0,8 t/m ³

Figura 2.5 – Especificações Técnicas Fosfato Bicálcico – BUNGE Fertilizantes

Para alcançar os padrões atuais faz-se necessário uma separação física da fração bastante fina do material (abaixo da malha # 100). Define-se como Eficiência de Separação (ES) a relação entre a quantidade de finos presente na fração elutriada no sistema pela quantidade de finos presente na corrente de alimentação (produto). Outra relação importante é denominada Eficiência de Recuperação (ER) definida pela relação entre a quantidade de material considerado bom (dentro da faixa especificada na Figura 2.5) na corrente de produto classificado pela quantidade de material considerado bom na corrente de alimentação. O

objetivo deste estudo é desenvolver um sistema que consiga balancear estas duas relações, obtendo um produto final dentro da especificação exigida pelo mercado (altas eficiências de separação) com o mínimo de reciclo de produto bom (altas eficiências de recuperação). Deve-se salientar que sistemas convencionais, como peneiras, apresentam o inconveniente de causar a quebra do produto durante a operação elevando assim o reciclo de material ao processo, além de apresentar baixas eficiências de recuperação.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1- Coleta de amostras

Para realização deste estudo foram coletadas amostras do material a ser classificado nos pontos de alimentação, saída e arraste de finos do circuito de sólidos do sistema. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma simplificado da Unidade Experimental de Fluidização bem como as posições de coleta de amostras durante a fluidização. As amostras coletadas eram encaminhadas ao laboratório da BUNGE Fertilizantes onde eram determinadas as distribuições dos tamanhos das partículas nos pontos amostrados.

3.2- Descrição da unidade experimental de fluidização

O sistema experimental de fluidização é composto por um alimentador de correia, com velocidade controlada por um inversor de frequência e quilhotina de ajuste da camada do material, permitindo vazões de alimentação de até 1,0 Ton/h com excelente precisão de controle.

O leito fluidizado recebe o ar de fluidização por um ventilador dimensionado para atender uma capacidade de 900 m³/h e uma pressão estática de 450 mmH₂O. Um outro ventilador similar a este é responsável pela vazão de ar de saída do leito, equilibrando assim as pressões internas do sistema e possibilitando o arraste do material a ser classificado por elutriação. As vazões dos ventiladores são controladas através de *dumpers* manuais tipo veneziana nas tubulações de admissão e de saída de ar. Para distribuição uniforme do ar no interior do leito existe uma câmara inferior com geometria específica para esta finalidade e uma tela de distribuição do ar, apresentando porosidade e geometria previamente caracterizadas (Detalhadas nas Figuras 3.2 e 3.3).

Para controle da estabilidade do leito (manutenção do produto em regime de fluidização) foram instalados indicadores de pressão imediatamente abaixo da placa de distribuição, também são monitoradas as pressões estáticas acima da tela de aeração. Para captação do produto arrastado existe um filtro de mangas projetado para receber vazões de 900 m³/h e com área de filtração de 10 m², tipo jet-venturi, com limpeza automática das

mangas via sistema de válvulas solenóides sendo acionadas por ar comprimido (um temporizador é responsável pelos disparos das solenóides), uma válvula rotativa na descarga do filtro garante a manutenção da pressão interna do sistema, não permitindo a admissão indesejada de ar no interior do filtro. Para alívio de frações que possam sofrer peneiramento na tela de aeração devido a desajustes de processo, outra válvula rotativa está instalada na parte inferior da câmara de distribuição de ar de fluidização. O ar limpo previamente filtrado é descartado para atmosfera através de uma chaminé. Pontos de tomada de temperatura foram instalados para levantamento dos perfis de temperatura do sistema.

Foram levantados dados do sistema de fluidização para caracterização das variáveis dinâmicas do equipamento, bem como levantamento das eficiências de separação e recuperação do sistema. Para isto foram alimentados no leito fluidizado vazões conhecidas de FBC microgranulado, por meio de um alimentador previamente calibrado. Após a estabilidade do leito no regime de fluidização foram amostrados produto na saída do sistema (FBC Classificado), na alimentação (FBC Alimentado) e produto recolhido no filtro de mangas (FBC pó). No **ANEXO I** pode-se verificar algumas fotos do sistema piloto.

Também foram monitoradas as condições de estabilidade do leito: altura de leito fixo, vazões dos ventiladores, pressões internas do sistema (Câmara interior de dispersão, Câmara superior de captação). As medidas de vazão de gás foram obtidas a partir da pressão estática dos ventiladores e leitura da vazão nas curvas dos ventiladores fornecidas pelos fabricantes.

Os testes foram realizados na Unidade de Araxá da BUNGE Fertilizantes, com o FBC microgranulado origem Araxá, classificado no momento do embarque para clientes, isto é, o produto curado (acidez livre abaixo de 0,2, temperatura do produto 28 - 34 °C).

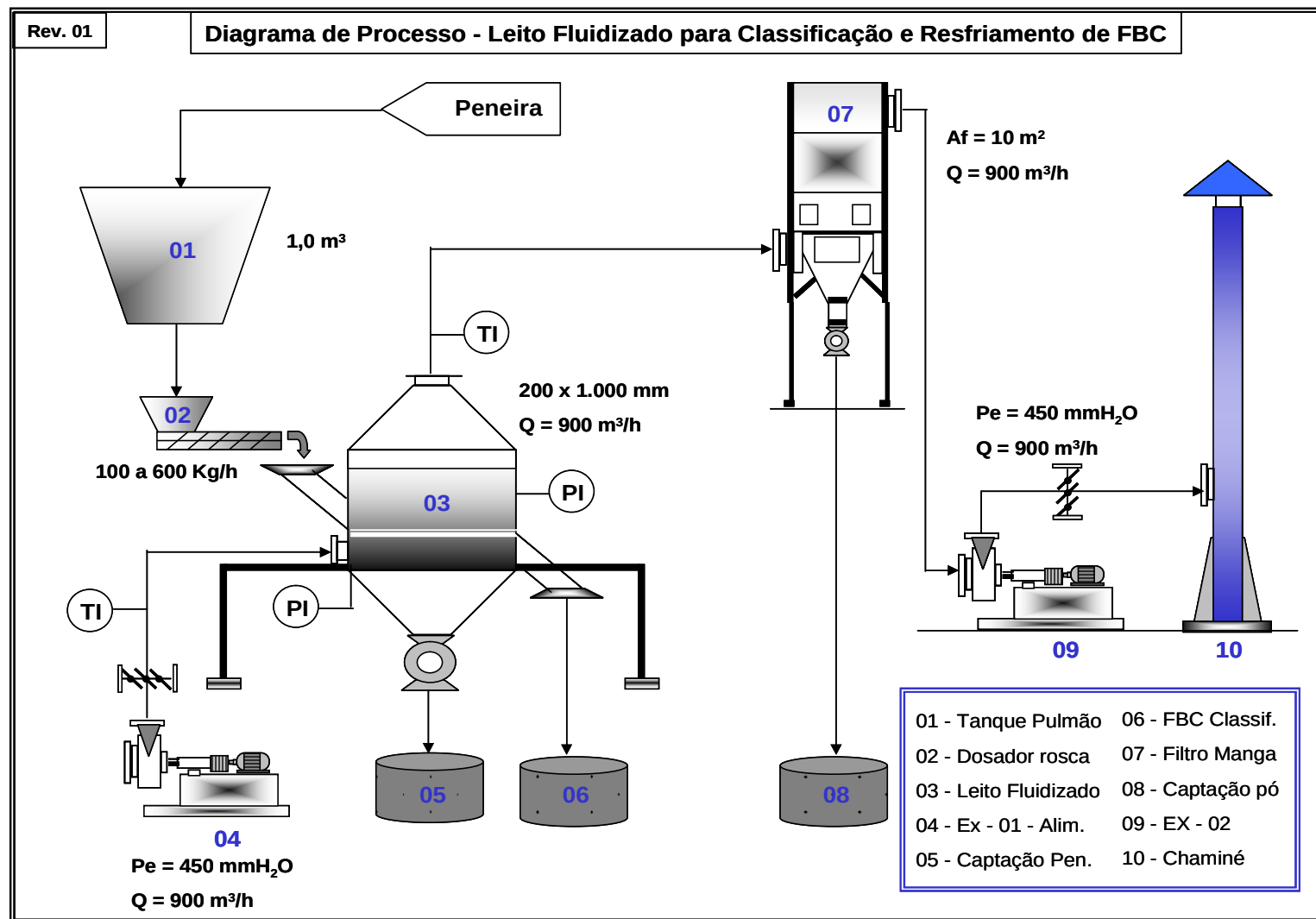


Figura 3.1- Fluxograma simplificado da unidade experimental de fluidização

3.2.1- Descrição da tela de dispersão de ar

A caracterização da tela de dispersão de ar é uma variável extremamente importante para definições de *scale – up* do sistema. As geometrias da tela e de seus poros são responsáveis pelo modelo de transporte do produto no interior do leito, definindo a eficiência de separação do material e determinando as vazões de ar do sistema e o tempo de residência do produto no interior do leito. A Figura 3.2 apresenta o *lay out* da tela de distribuição de ar no leito fluidizado.

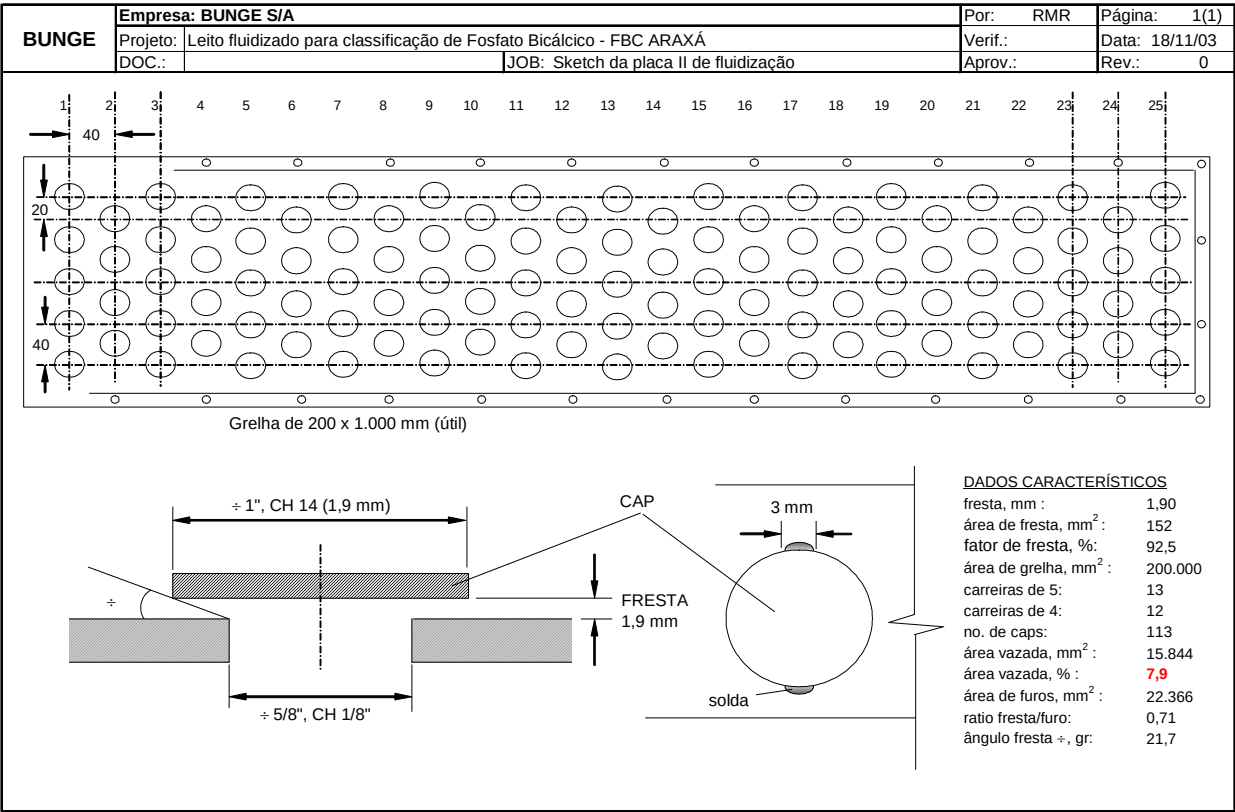


Figura 3.2 - Configuração da tela de dispersão de ar - porosidade 6 %

A medidas apresentadas na Figura 3.2 referem-se a placa de porosidade 6 %, a mesma geometria foi utilizada para o desenho e construção da placa de 11 % de porosidade, mantendo a mesma geometria da placa e configuração dos poros conforme Figura 3.3 a seguir:

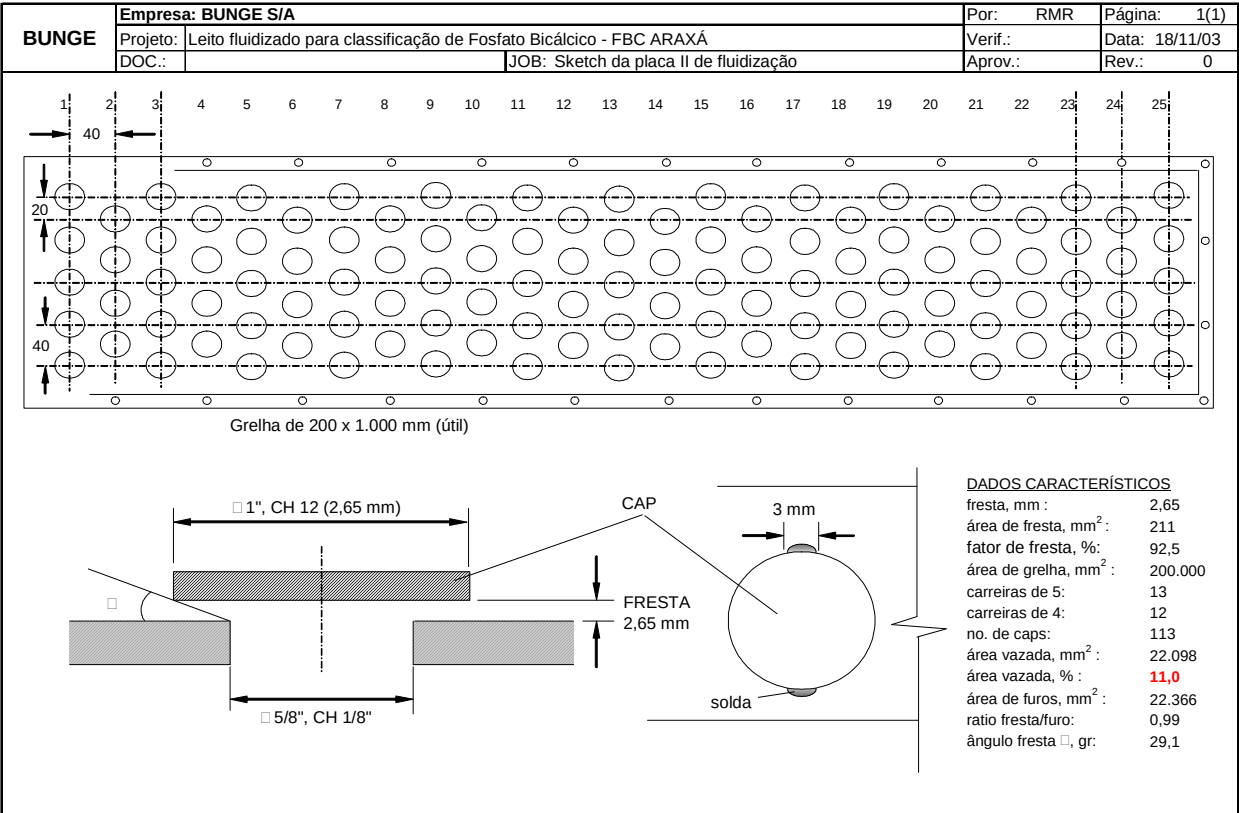


Figura 3.3- Configuração da tela de dispersão de ar – porosidade 11 %

As Figuras 3.4 e 3.5 apresentam fotografias que ilustram a geometria das placas.

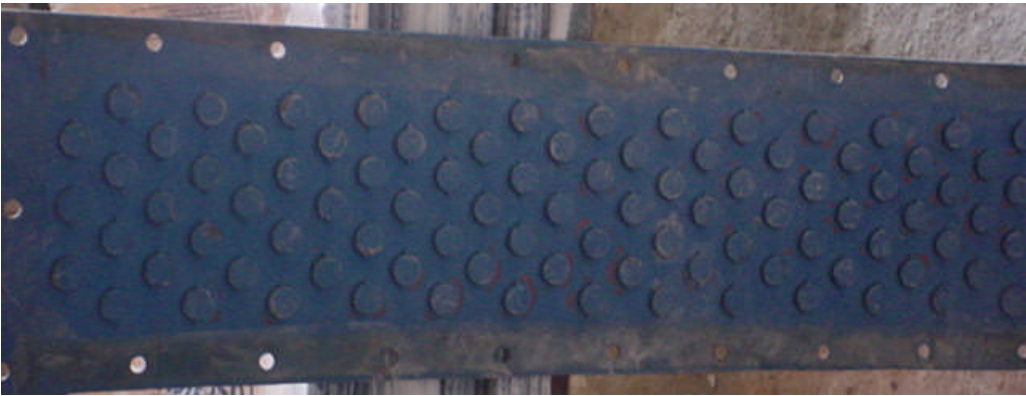


Figura 3.4- Fotografia de uma placa de distribuição.

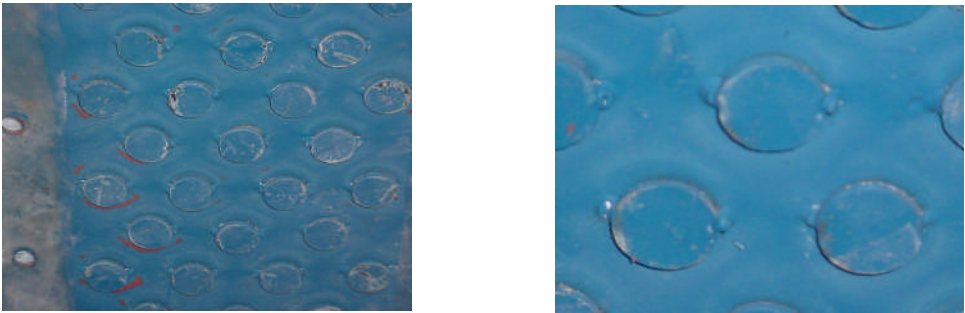


Figura 3.5- Fotografia que mostra detalhes do distribuidor (poros).

3.2.2- Descrição do leito fluidizado

A unidade experimental de fluidização foi desenvolvida e projetada pelo Departamento de Engenharia e Projetos da BUNGE Fertilizantes, com apoio tecnológico e consultoria TECPLAN – Araxá.

O leito fluidizado foi dimensionado para classificação do fosfato bicálcico produzido pela BUNGE Fertilizantes a ser aplicado no momento da expedição do produto para o cliente, eliminando os efeitos de segregação e quebra do material durante a estocagem e movimentação do produto.

Durante o processo contínuo de classificação por leito fluidizado, o produto é alimentado no classificador por meio de uma boca de entrada, que por sua vez recebe o material de uma correia transportadora cuja velocidade pode ser variada.

Dentro do leito, o produto é fluidizado e transportado por meio de ar ambiente. A corrente de ar ambiente é injetada na parte inferior do leito com um pequeno ângulo com relação à vertical e é responsável pelo efeito de fluidização bem como do transporte horizontal dos sólidos.

No extremo oposto da alimentação, esta a boca de descarga, onde o produto, já classificado, é descarregado sendo coletado em bolsões de 1000 Kg, denominados *big bags*.

O ar para fluidização é fornecido através de um ventilador centrífugo o qual está interligado com a tubulação de transporte de ar até as três bocas de entrada na parte inferior do leito, que estão distribuídas ao longo da parte inferior da zona de fluidização.

Cada boca de entrada de ar de fluidização possui um registro do tipo borboleta manual, para regulação da vazão de ar e adequação das pressões do ar ao longo de todo o leito na câmara de admissão.

O ar admitido nesta câmara, passa através de uma chapa perfurada, removível, instalada na parte superior da câmara de admissão, formando o fundo do leito fluidizado e suportando o material a ser classificado.

Na parte superior do leito, encontra-se a boca de saída para o ar contendo partículas finas, que será conduzido até o filtro de mangas.

3.2.2.1- Composição do leito fluidizado

O leito fluidizado apresenta os seguintes componentes:

- Leito Fluidizado com boca de entrada, válvulas internas para ajuste da camada de material, boca de saída do produto;
- Janelas de inspeção com acrílico para observar o comportamento do material dentro do leito fluidizado;
- Válvula de retenção para ajuste manual da altura do leito entre a zona de fluidização e descarga de material. Para o caso de necessidade de aumento da altura do leito pode utilizar uma régua complementar fixadas por parafusos;
- O leito fluidizado tem sua massa inercial suportada em estrutura fixa ao solo;
- As placas perfuradas para fluidização são do tipo com ranhuras horizontais contínuas com sistema para prevenir o fluxo de material através dos poros da placa;

3.2.2.2- Corpo do leito fluidizado

O corpo do leito fluidizado esta seccionado em duas partes: a parte inferior, que suporta a chapa perfurada com a câmara distribuidora de ar, possui a fixação no solo e respectivas tubulações de admissão de ar ambiente para a zona de fluidização.

A parte superior, acoplada a parte inferior por meio de parafusos, que possui a boca ou tubulação de ar de exaustão. Esta parte superior, chamada normalmente de cobertura, tem como função principal, devido a sua forma geométrica e capacidade em volume a tarefa principal de expandir o ar de exaustão e diminuir assim a velocidade do mesmo, evitando que material a ser classificado seja sugado. Esta parte pode ser retirada para trabalhos de troca de fundo (chapa perfurada).

3.2.2.3- Distribuidor de ar

Na parte inferior do duto de fluidização (correspondendo a cada entrada de ar ambiente) encontra-se uma câmara de distribuição de ar, para direcionar o ar em uma área determinada da chapa perfurada, que se encontra diretamente acima desta câmara.

A forma geométrica desta câmara, permite que se evite eventuais incrustações de produto e ao mesmo tempo faz com que o ar seja distribuído de maneira uniforme na área inferior da chapa perfurada. Isto permite uma fluidização apropriada e constante em toda a extensão e largura do leito. A Figura 3.6 apresenta o croqui do corpo do leito fluidizado.

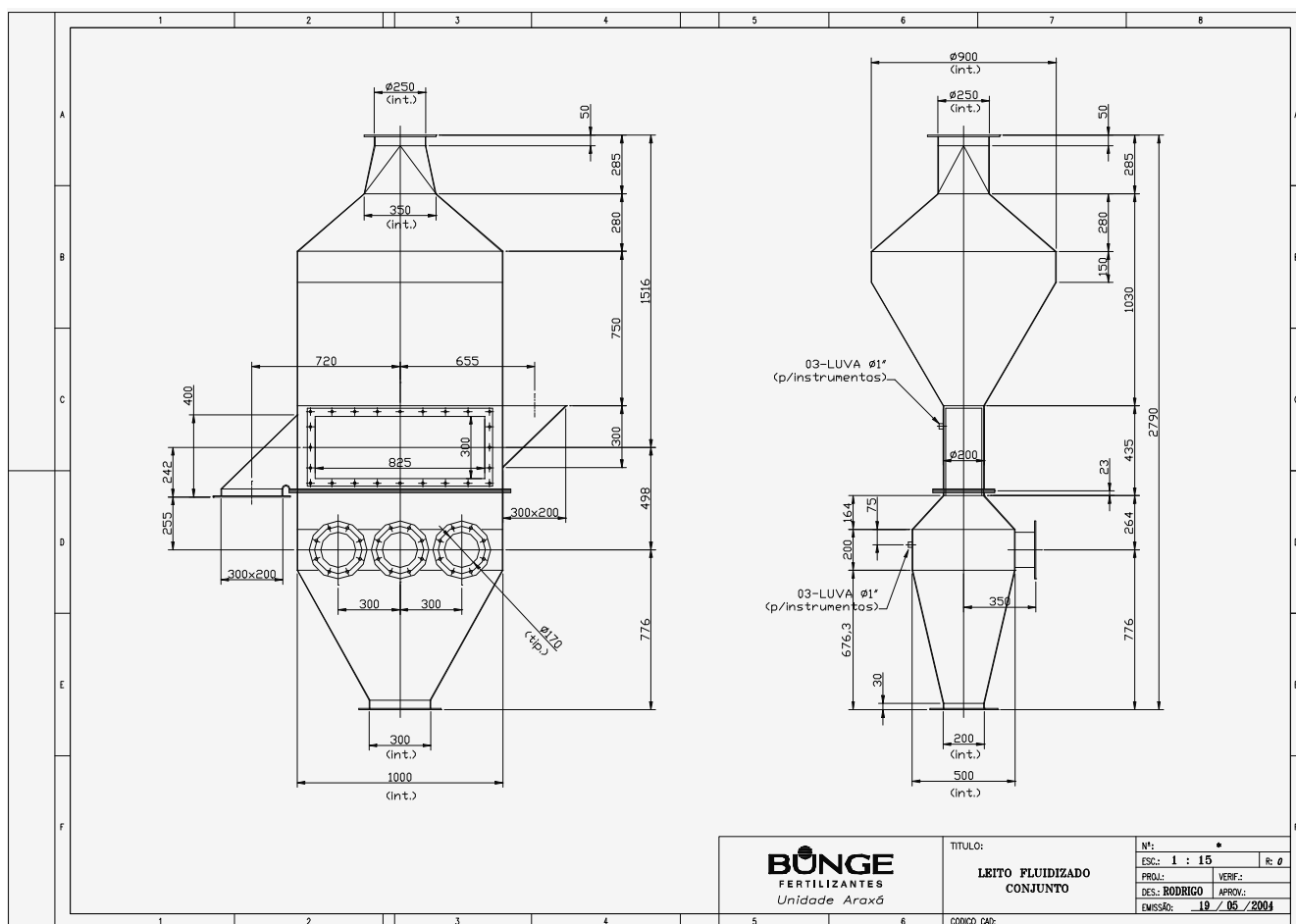


Figura 3.6- Conjunto corpo do leito fluidizado

3.2.3- Filtro de mangas

O sistema de coleta de pó, constitui-se de um conjunto de equipamentos dimensionados em compatibilidade com a zona de fluidização do leito a ser despoeirado. Desta forma cada um dos fatores (vazão, pressão, carga de pó, granulometria, produto processado, etc) deve ser mantido conforme determinado no projeto e nas condições de pré-operação ajustadas. Especial atenção deve ser dada por ocasião da partida do sistema, em particular no período de formação do leito fluidizado, visando-se evitar o arraste do material do leito para o filtro.

Iniciando-se o processo de filtração ou retenção das partículas, o ar carregando o material particulado que se deseja coletar entra por um bocal de entrada, posicionado na parte inferior do filtro. Em seguida o fluido atravessa as mangas e segue em uma corrente ascendente pela parte interna das mangas até a câmara “lado limpo” do filtro .

As partículas são retidas na parede externa da manga, sendo que, em contra corrente os jatos de ar comprimido derrubam permanentemente o material que vai se agregando nas

mangas. O pó acaba precipitando e cai no fundo da moega. O produto é extraído e descarregado da moega por uma válvula rotativa, usada para a vedação da entrada de ar indesejado no sistema. Os jatos de ar comprimido utilizados para limpeza das mangas são disparados por um microprocessador que controla o intervalo e a intensidade dos pulsos de ar.

As mangas filtrantes são vestidas sobre a estrutura metálica, geralmente chamada de gaiola, construída em arame de aço galvanizado. As gaiolas e mangas são montadas no espelho através de sistema aço-mola, que evita o colapso das mesmas e é removido através de portas de acesso existentes no topo do filtro. Os tubos de sopragem com furos (para passagem do ar comprimido) estão localizados exatamente acima do centro dos venturis. O ar carregado com pó entra no filtro sob pressão negativa e o ciclo de limpeza ocorre como se segue:

- O microprocessador (remoto) atua a válvula solenóide que, em repouso, está normalmente fechada, abrindo-a. A válvula de diafragma abre-se em consequência da redução de pressão, causada pela abertura da válvula solenóide. Um jato de ar a pressão de $7 \text{ Kg}_f/\text{cm}^2$ proveniente do “barrilete de ar comprimido”, através do duto de distribuição e sopragem, penetra no topo de cada venturi (da mesma fileira) e daí expande-se dentro de cada manga (da mesma fileira). Dessa forma todas as mangas de uma mesma fileira são limpas individual e simultaneamente.
- O corpo do equipamento está previsto para operação em depressão de até $-300 \text{ mmH}_2\text{O}$, sendo a prova de pó.

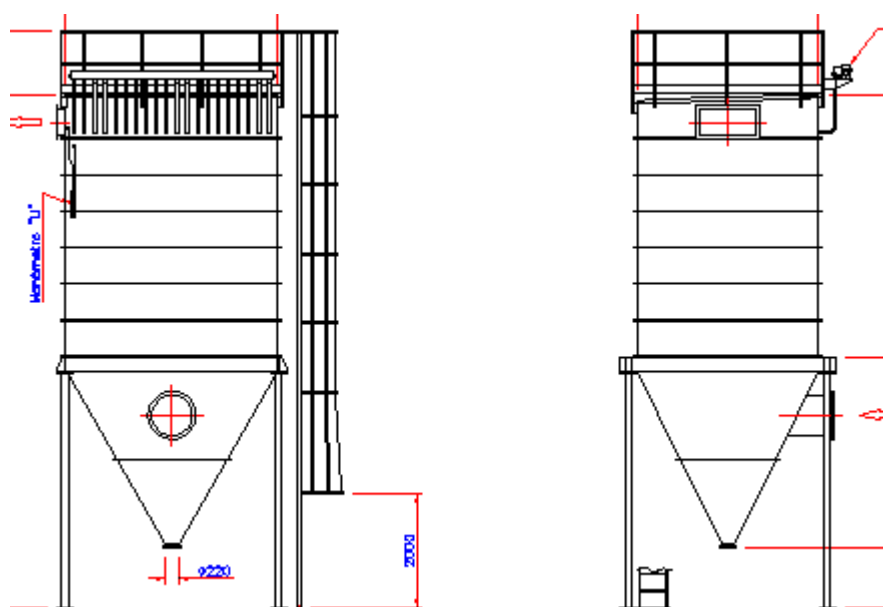


Figura 3.7- Figura esquemática do filtro mangas

O filtro possui um manômetro diferencial, tipo “U”, com leitura local, escala de – 150 mmH₂O a + 150 mmH₂O, para indicação da perda de carga no equipamento. Este acompanhamento é de fundamental importância para garantir a vazão necessária de ar de fluidização para o sistema, mantendo a perda de carga no conjunto (leito + filtro) constante durante toda a operação.

Todo o conjunto de filtração está rigidamente apoiado sobre estrutura metálica. Para acesso ao topo há uma escada tipo marinho, com guarda-corpo, desde o piso.

A Tabela 3.1 apresenta alguns dados técnicos do filtro de mangas. A Tabela 3.2 apresenta alguns dados técnicos referentes à operação do filtro.

Tabela 3.1- Dados técnicos do filtro com mangas selecionadas.

Modelo	FPT 12-149-2134-3
Arranjo	3
Quantidade	01
Fabricante	PDL

Tabela 3.2- Dados técnicos para operação do filtro de mangas.

Vazão	900 m ³ /h
Temperatura de Operação	60 – 70 °C
Pó a ser Filtrado	Fosfato Bicálcico
Carga de Pó Considerada	
Peso Específico	0,8 gr/cm ³
Granulometria	
Área Filtrante Efetiva	12 m ²
Relação Vazão/Área Filtrante	1,25 m ³ /m ² .min
Perda de Pressão (Máxima)	150 mmCA
Concentração de pó na saída	50 mg/Nm ³

A Tabela 3.3 apresenta algumas informações sobre a construção do filtro de mangas, esses dados são necessários para dimensionamento, seleção e scale-up do sistema e a Tabela

3.4 mostra algumas características do meio filtrante utilizado, a correta seleção do meio filtrante minimiza custos operacionais e de manutenção durante o período de operação da planta, seleções incorretas podem acarretar em tempo de vida útil das mangas inferiores ao previstos, elevando os custos da unidade.

Tabela 3.3- Dados técnicos de construção do filtro de mangas.

Pressão de Projeto	450 mmCA
Ângulo de Inclinação da Moega	60°
Remoção das Mangas	Pelo Topo do Filtro

Tabela 3.4- Dados técnicos do meio filtrante utilizado.

Quantidade de Mangas	12
Material	Needlona Renner PP/PP 551 CS60 – 100 % polipropileno original com tela polipropileno multifilamento de alta tenacidade, ou similar
Acabamento	Chamuscado e termofixado
Tratamento	CS60 – Ultra-antiaderente para aplicação em fluxos com condensação, pós aglomerantes e incrustantes, constituído por resinação do feltro através de banho com PTFE (TEFLON)
Diâmetro	149 mm
Comprimento	2.134 mm
Temperatura Máxima de Operação	90° (picos de 95°)
Densidade	550 gr/m ²

A Tabela 3.5 fornece algumas informações necessárias para dimensionamento e seleção do sistema de limpeza das mangas e a Tabela 3.6 apresenta dados sobre a válvula rotativa para descarga de pó do filtro.

Tabela 3.5- Dados técnicos do sistema de limpeza das mangas

Consumo de Ar Comprimido	8,50 Nm ³ /h
Pressão do Ar Comprimido	6,0 – 7,0 Kgf/cm ² efetivos
Qualidade do Ar Comprimido	Limpo e isento de água e óleo
Ciclo de Limpeza	120 s
Tensão/Frequência Solenóides	220 V, 60 Hz

Tabela 3.6- Dados técnicos da válvula rotativa

Modelo	VR Q-300-MRN
Quantidade	01
Fabricante	PDL
Capacidade de Descarga Máxima	15,65 m ³ /h (com 75 % de enchimento)
Diâmetro do Rotor/Número de Palhetas	300 mm / 8
Tipo do Rotor	Fechado, c/ raspadores Neoprene 80 Shore, 75° C
Diâmetro do Eixo	40 mm
Pó a ser Descarregado	Fosfato Bicálcico
Temperatura de Operação	60 – 70° C
Serviço	Contínuo
Vedação Passagem de Eixo/Carcaça	Retentor
Mancais/Rolamentos Externos	2
Acionamento	Direto
Acoplamento	Vulkan
Moto – Redutor de Acionamento	SEW R47DZ80K4
Potência de Entrada do Moto – Redutor	0,55 KW
Rotação de Saída do Moto – Redutor	30 rpm
Características Elétricas Moto – Redutor	440 V, 60 Hz, IP55, Classe Isolamento F

Lubrificação do Moto – Redutor	Óleo
Carcaça	Usinada, Ferro Fundido
Rotor	Usinado, Ferro Fundido
Tampas Laterais	Usinadas, ABNT 1020
Eixo	ABNT 1020
Bocais de Alimentação/Descarga	220 x 220 mm (interno)

3.2.4- Ventiladores de admissão/exaustão de ar de fluidização

Os ventiladores selecionados para atender às necessidades de fluidização para o fosfato bicálcico foram ventiladores centrífugos de alta eficiência, com pressão estática de 450 mmH₂O e vazão de 900 m³/h, atendendo a relação recomendada de 1000 m³ de ar de fluidização por tonelada de produto a ser fluidizado. A Figura 3.8 apresenta a curva característica dos ventiladores selecionados.

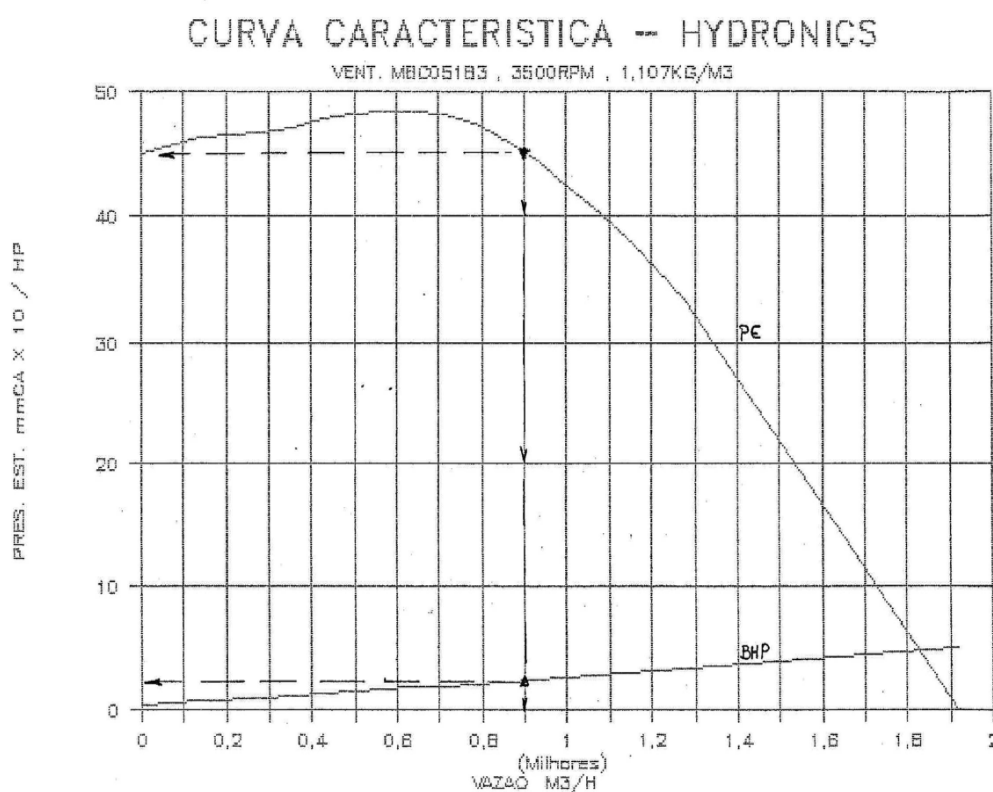


Figura 3.8- Curva Característica dos Ventiladores Selecionados

3.3- Procedimentos preliminares para operação da unidade experimental de fluidização

Antes da utilização do leito fluidizado, eram observados alguns requisitos de instalação para sua operação. Primeiramente o painel de força, onde estavam disponíveis todos os comandos dos equipamentos (ventiladores, alimentador, válvulas rotativas, etc), era energizado. Posteriormente, com os *dumpers* manuais fechados, os ventiladores de admissão e exaustão eram ligados. Em seguida era acionado o sistema pneumático de limpeza dos filtros mangas (abertura da válvula de controle de ar comprimido). Feito isso o alimentador era ligado, inicialmente sem matéria-prima no silo de alimentação, e calibrado o inversor de frequências nas frequências de alimentação previamente estabelecidas para o ajuste da curva de alimentação.

Após a unidade de fluidização estar pronta para início dos testes, começava-se a alimentar o silo e era religado o alimentador de tapete do sistema.

3.3.1- Calibração do sistema de alimentação

Para calibração do alimentador foi utilizado o procedimento padrão listado na sequência que se segue:

1. Fixava-se a frequência do inversor;
2. Fixava-se a posição da guilhotina de descarga do alimentador;
3. Alimentava-se o silo pulmão com a abertura da válvula manual interligada diretamente da unidade de expedição de fosfato bicalcico, com isto garantia-se a manutenção de material no silo de forma contínua;
4. Coletava-se todo o produto descarregado, em recipiente previamente pesado, cronometrando o tempo de coleta;
5. Pesava-se o material coletado;
6. Eram realizadas três amostragem para cada frequência pré-fixada no inversor do alimentador;
7. Realizados os passos supracitados, era feito o levantamento da curva de calibração do equipamento (vazão de sólidos em função da frequência de rotação) por regressão linear;

Os dados obtidos encontram-se resumidos na Tabela 3.7.

Tabela 3.7- Curva de Calibração do Alimentador

Frequência (Hz)	Vazão (Kg/h)
10	172,65
10	168,45
10	---
20	336,3
20	335,8
20	346,5
30	452,4
30	489,39
30	---

Por regressão linear dos dados apresentados na Tabela 3.7 é obtida a curva do Alimentador:

$$Q \text{ (Kg/h)} = 15,017 \times Fr \text{ (Hz)} + 26,65; \quad (3.1)$$

com $R^2 = 0,9948$;

3.3.2- Caracterização das amostras

Após estabilização do leito fluidizado no regime de fluidização foram coletadas amostras nos pontos indicados na Figura 3.9 Foram realizadas amostragens quantitativas, cronometrando o tempo de coleta para determinação da vazão de sólidos no circuito e amostras qualitativas que foram quarteadas em quarteador do tipo Jones e encaminhadas ao Laboratório da BUNGE Fertilizantes – Araxá, para caracterização das amostras.

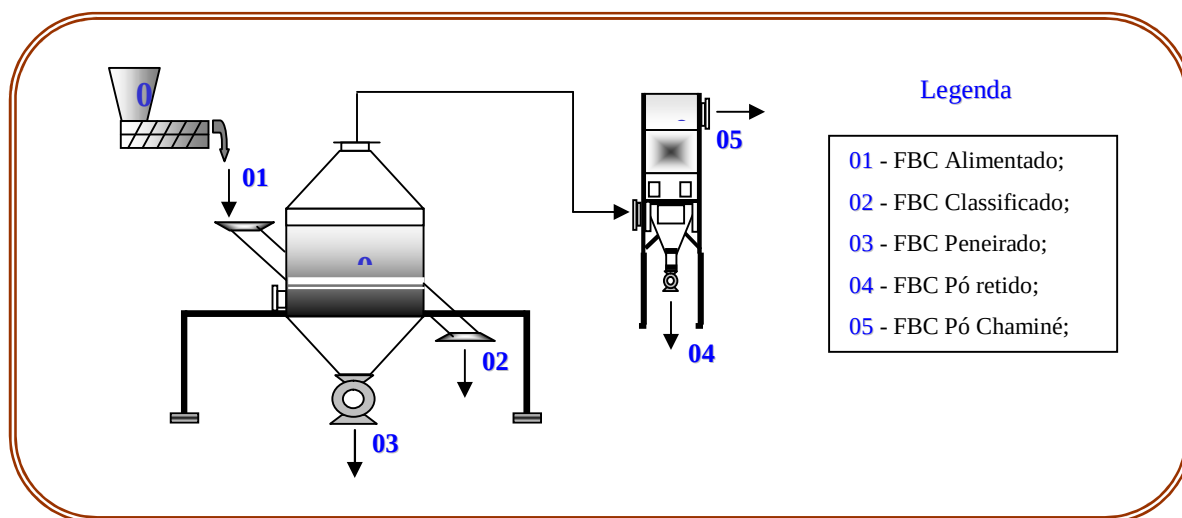


Figura 3.9- Fluxograma circuito de sólidos

Duas considerações sobre as amostragens devem ser feitas:

1. A corrente 05 foi considerada desprezível, por apresentar quantidades insignificantes de material particulado;
2. A corrente 03 não apresentou fluxo de material, resultado esperado devido a manutenção da estabilidade do leito em regime de fluidização;

3.4- Planejamento dos testes experimentais

Para a realização de experimentos significativos e confiáveis, deve-se utilizar um método científico de planejamento. Quando o problema envolve dados que podem conter erros experimentais, um modo adequado de análise é por métodos estatísticos. Em qualquer experimento há duas etapas: o planejamento de experimento e a análise estatística dos resultados obtidos. Estas etapas estão intimamente ligadas, uma vez que o método a ser utilizado para análise depende diretamente do planejamento realizado.

A operação de classificação em leito fluidizado conta com diversas variáveis, assim a análise e planejamento dos experimentos é mais confiável utilizando técnicas estatísticas. A técnica de superfície de resposta, que tem como base o planejamento fatorial dos experimentos, é de fundamental importância neste trabalho, pois permite verificar os efeitos individuais e as interações entre as variáveis, a avaliação de erros experimentais e de regressão e o equacionamento empírico dos resultados em função das variáveis escolhidas (Myers, 1976; Box et. Al., 1978).

A organização de um planejamento fatorial consiste em selecionar os fatores (variáveis independentes do sistema) e escolher níveis (valores assumidos pelas variáveis) que serão estudados. A determinação da quantidade de experimentos é feita de acordo com a quantidade de variáveis estudadas e com os níveis estipulados para essas variáveis. O planejamento é representado na forma de potência, fornecendo assim o número de experimentos a serem realizados. Por exemplo, um planejamento 2^k , sendo $k = 3$, indica que dois níveis foram escolhidos para três variáveis em estudo e que oito experimentos deverão ser realizados.

Quando utiliza-se planejamento de mais que dois níveis, para cumprir a segunda etapa do planejamento, ou seja, a análise dos resultados, torna-se claro a necessidade de adimensionar as variáveis independentes estudadas para efeito de comparação dos resultados. A equação (3.2) mostra a codificação das variáveis (Box & Wilson, 1951):

$$x = \frac{\xi_i - \xi_0}{\frac{(\xi_1 - \xi_{-1})}{2}} \quad (3.2)$$

na qual x é o valor da variável codificada, ξ_i o valor original ou não codificado, ξ_0 representa o valor original no nível central, ξ_1 é o valor original referente ao nível 1, ξ_{-1} é o valor original referente ao nível -1.

A equação (3.3) pode ser usada para representar a resposta em função das variáveis independentes estudadas. Os coeficientes da Equação (3.3) são obtidos pelo método dos mínimos quadrados e a avaliação da correlação é feita estatisticamente através do coeficiente de correlação, com testes de hipótese usando as distribuições F e t de Student e pela análise de resíduos. Com tal metodologia é possível obter valores das variáveis exploradas que maximizem a resposta.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (3.3)$$

O quadrado do coeficiente de correlação múltipla (R^2) compara a variância dos pontos experimentais em relação ao ajuste proposto, com a variância da própria população de pontos experimentais (Box et al., 1978). Um valor do coeficiente de correlação igual a 0,9, indica que 90 % de variabilidade dos dados é explicada pela equação. Um valor zero indica que não existe correlação. Quanto mais próximo da unidade estiver o valor do coeficiente de correlação, melhor será o ajuste proposto.

O resíduo da estimação é definido como a diferença entre os resultados experimentais e os previstos pela Equação (3.3). Na análise dos resíduos os gráficos devem ser aleatórios e independentemente distribuídos para comprovar a validade das equações. Os resíduos são definidos pela Equação (3.4)

$$\varepsilon = Y_{\text{exp}} - Y_t \quad (3.4)$$

O valor da distribuição t de Student é importante para o cálculo da significância dos parâmetros e é definido como a relação entre o valor do parâmetro estimado e o seu desvio padrão. O valor de F (ou do parâmetro de Fisher) é determinado pela razão entre o quadrado médio da equação ajustada (QME) e o quadrado médio do resíduo (QMR), como mostra a

Equação (3.5). O valor obtido para F pode ser usado para a realização de um teste de hipótese para verificação da adequação da equação aos dados experimentais. Quanto maior o valor de F, melhor será o ajuste do modelo em questão.

$$F = \frac{QME}{QMR} \quad (3.5)$$

O quadrado médio da equação (QME) e o quadrado médio do resíduo (QMR), são dados pelas Equações (3.6) e (3.7), respectivamente.

$$QME = \frac{\text{Soma dos quadrados dos valores preditos}}{\text{Número de graus de liberdade da equação}} \quad (3.6)$$

$$QMR = \frac{\text{Soma dos quadrados do resíduo}}{\text{Número de graus de liberdade do resíduo}} \quad (3.7)$$

A soma dos quadrados dos resultados previstos pela equação teórica é dada pela Equação (3.8), na qual n é o número de pontos experimentais.

$$SQE = (Y_{t1})^2 + (Y_{t2})^2 + \dots + (Y_{tn})^2 \quad (3.8)$$

O número de graus de liberdade da equação é igual ao número de parâmetros da mesma reduzido de um, como está mostrado na Equação (3.9)

$$DEF = (n^0 \text{ de parâmetros} - 1) \quad (3.9)$$

A soma dos quadrados dos resíduos (SQR), é obtida pela Equação (3.10).

$$SQR = (Y_{\text{exp } 1} - Y_{t1})^2 + (Y_{\text{exp } 2} - Y_{t2})^2 + \dots + (Y_{\text{exp } n} - Y_{tn})^2 \quad (3.10)$$

O número de graus de liberdade do resíduo é obtido pela diferença entre o número total de experimentos e o número de parâmetros existentes na equação ajustada, como indicado na Equação (3.11).

$$DFR = (n^0 \text{ de pontos exp.} - n^0 \text{ de parâmetros}) \quad (3.11)$$

Com os graus de liberdade do resíduo e da equação, pode ser determinado o valor do parâmetro F de Fisher, para diversos níveis de significância da equação. Estes valores são tabelados em Box et al. (1978).

3.4.1- Escolha das variáveis do sistema

Baseado em estudos preliminares encontrados na literatura, para caracterização do sistema, foram escolhidas quatro variáveis consideradas relevantes para o estudo da operação de classificação granulométrica em leitos fluidizados. Tais variáveis são listadas a seguir:

- Tempo de residência do material no leito;
- Porosidade da tela de dispersão de ar;
- Ângulo de expansão da zona de dispersão;

Para analisar a influência das variáveis a serem estudadas na eficiência de separação e eficiência de recuperação foi utilizado um planejamento fatorial 2K, em que as variáveis e os níveis estudados estão identificados na Tabela 3.10.

As condições operacionais utilizadas nos testes encontram-se na Tabela 3.9.

Tabela 3.9- Condições Operacionais

Condição	Valor
Produto	Fosfato Bicálcico Microgranulado
Densidade Aparente	0,9 g/cm ³
Densidade Real	2,4 g/cm ³
Vazão de ar	1,75 m ³ /h

Tabela 3.10 apresenta os valores adotados para os fatores escolhidos no planejamento.

Não foi possível estabelecer a relação entre as vazões de ar e de sólidos, visto que a baixa perda de carga no sistema não permitiu, mesmo restringindo os *dumpers* de controle manuais dos ventiladores de admissão e retirada. Esta relação somente variou em decorrência da variação da vazão de sólidos no sistema e tal efeito já está implícito no tempo de residência do produto no interior do leito.

Tabela 3.10- Variáveis do Planejamento – Influência das variáveis escolhidas

Teste	Porosidade da Placa (%)	Ângulo Zona Expansão (°)	Tempo Residência (min)	X ₁	X ₂	X ₃
01	6	33,62	5,34	-1	1	1
02	6	33,62	3,72	-1	1	0
03	6	33,62	2,09	-1	1	-1
04	11	33,62	5,34	1	1	1
05	11	33,62	3,72	1	1	0
06	11	33,62	2,09	1	1	-1
07	6	4,60	5,34	-1	-1	1
08	6	4,60	3,72	-1	-1	0
09	6	4,60	2,09	-1	-1	-1
10	11	4,60	5,34	1	-1	1
11	11	4,60	3,72	1	-1	0
12	11	4,60	2,09	1	-1	-1

3.5- Análise global

Todos os ensaios realizados utilizando a combinação das variáveis elencadas foram agrupados e a análise estatística destes resultados foi realizada através de uma regressão múltipla, na qual os parâmetros relacionados às variáveis isoladas, às interações e aos termos quadráticos foram estimados por mínimos quadrados como mostrado anteriormente. As variáveis estudadas, porosidade da placa, ângulo de expansão da zona de dispersão e tempo de residência do material no leito foram adimensionalizadas conforme apresentado na Tabela 3.11. As análises dos resultados obtidos foram feitas com suporte do software STATISTICA®.

Tabela 3.11- Variável x Adimensionalização

Variável	Adimensionalização
Porosidade da Placa (ξ_1)	$X_1 = \frac{(\xi_1 - 8,5\%)}{2,5\%}$
Ângulo de Expansão da Zona de Dispersão (ξ_2)	$X_2 = \frac{(\xi_2 - 19,11^\circ)}{14,51^\circ}$
Tempo de Residência (ξ_3)	$X_3 = \frac{(\xi_3 - 3,72 \text{ min})}{1,625 \text{ min}}$

3.6- Avaliação dos resultados

A avaliação do desempenho do leito fluidizado na classificação granulométrica de fosfato bicálcico foi realizada baseado nas eficiências de separação e eficiências de recuperação do sistema. Como já mencionado, a fração de material fino (passante na malha # 100), é indesejável no produto final, portanto são considerados valores satisfatórios altas eficiências de separação, acima de 95 %, com altas eficiências de recuperação, acima de 95 %. As eficiências de separação e recuperação foram calculadas de acordo com as Equações (3.12) e 3.13):

$$ES = \frac{Q_{F.EL.}}{Q_{F.AI}} \quad (3.12)$$

$$ER = \frac{Q_{PB, Class.}}{Q_{PB, Al.}} \quad (3.13)$$

em que ($Q_{F, EL}$) é a quantidade de finos na corrente elutriada, ($Q_{F, AL}$) é a quantidade de finos na corrente de alimentação, ($Q_{PB, Class.}$) é a quantidade de produto bom na corrente classificada e ($Q_{PB, Al}$) é a quantidade de produto bom na corrente de alimentação.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1- Caracterização das amostras

A composição química das amostras do produto classificado, elutriado e alimentado nos experimentos foi determinada através de ensaios de espectrofotometria realizados no laboratório da empresa BUNGE Fertilizantes.

O resumo dos resultados químicos é apresentado na Tabela 4.1, na qual A representa a corrente alimentada, C a corrente classificada e P a corrente elutriada.

Tabela 4.1- Composição química média das amostras testadas

Ap (Kg/hm ²)	P solúvel em ácido cítrico (%)			P Total (%)			Cv (%)		
	A	C	P	A	C	P	A	C	P
863,25	17,30	17,32	15,75	18,66	18,42	18,60	92,71	94,03	84,68
842,25	17,22	17,31	15,62	18,30	18,34	18,76	94,10	94,38	83,26
1681,50	16,86	17,04	15,99	18,30	18,74	18,91	92,13	90,93	84,56
1679,00	16,77	15,60	15,75	18,65	18,53	18,50	89,92	84,19	85,14
2446,95	18,31	17,87	17,95	18,86	18,75	18,99	97,08	95,31	94,52

Não foram observadas diferenças significativas entre o fosfato bicálcico microgranulado alimentado (A) e o classificado (C), indicando que a classificação não altera o perfil químico do produto final. Já a linha ultrafina (P) obtida apresenta uma queda significativa no teor de P₂O₅ cítrico, reduzindo a conversão para valores em torno de 85 %. Tal fato deve estar associado a secagem mais efetiva da fração mais fina (maior área específica de contato) ou arraste de frações não reagidas (calcário). Conforme padrão de qualidade da linha pó, que exige uma solubilidade mínima em Ácido Cítrico a 2 % de 90 %, este produto deve ser destinado ao reprocesso pois, em princípio, não atende às especificações do produto final.

Não foram verificadas variações na umidade dos produtos alimentados e classificados, caracterizando a não absorção de umidade por parte do produto, devido ao baixo tempo de residência do produto no interior do leito.

As granulometrias de alimentação foram determinadas pelo processo de distribuição por malhas (# 09, # 16, # 32, # 100, F), o produto após homogeneizado e transferido ao silo de alimentação, foi alimentado ao processo e as amostras foram coletadas diretamente no alimentador do leito fluidizado. As amostras, em geral, apresentaram um produto fora das especificações exigidas pelo controle de qualidade da BUNGE Fertilizantes, conforme Tabela 4.2. No **ANEXO II** encontram-se as análises químicas completas das correntes.

Tabela 4.2- Granulometrias de alimentação do produto-teste.

Gran.	A01	A02	A03	A04	A05	A06
# 09	0	0	0	0	0	0,03
# 16	6,31	7,43	10,45	19,03	17,68	32,74
# 32	22,99	23,95	29,32	52,80	39,89	27,69
# 100	66,94	61,83	56,06	27,03	41,41	36,60
F	3,76	6,79	4,17	1,14	1,01	2,94

Gran.	A07	A08	A09	A10	A11	A12
# 09	0,03	0	0	0,03	0,03	0,02
# 16	33,58	33,24	23,69	26,65	30,11	16,67
# 32	41,02	36,44	46,49	32,31	30,85	40,51
# 100	22,62	26,99	27,44	37,76	39,60	42,62
F	2,75	3,34	1,94	3,35	2,41	0,19

Gran.	A13	A14	A15	A16	A17	A18
# 09	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0
# 16	19,32	14,34	15,50	22,21	8,57	7,24
# 32	37,67	35,82	31,89	31,56	20,12	16,34
# 100	36,34	45,83	44,09	46,19	47,81	46,70
F	6,64	4,00	8,51	0,03	23,49	29,71

Gran.	A19	A20	A21	A22	A23	A24
# 09	0	0	0	0,01	0	0
# 16	20,78	11,40	15,25	11,26	11,52	8,79
# 32	32,51	33,91	32,17	18,69	19,42	15,18
# 100	40,12	50,50	43,73	46,42	47,17	54,14
F	6,58	4,19	8,55	23,62	21,88	21,89

Gran.	A25	A26	A27	A28	A29	A30
# 09	0	0	0	0	0	0
# 16	10,36	6,21	11,10	26,05	20,35	4,87
# 32	28,87	25,86	23,10	50,51	36,65	14,74
# 100	49,84	58,74	50,20	23,36	39,56	63,34
F	10,94	9,19	15,59	0,08	3,44	17,05

Gran.	A31	A32	A33	A34	A35	A36
# 09	0	0	0	0	0	0
# 16	12,06	4,30	10,18	10,89	12,03	11,57
# 32	27,29	12,24	21,27	19,42	25,38	24,14
# 100	52,56	65,36	59,88	59,03	52,16	53,74
F	8,09	18,10	8,67	10,66	10,43	10,55

Gran.	A37	A38	A39	A40	A41	A42
# 09	0	0	0	0	0	0
# 16	7,56	5,60	5,72	7,70	5,21	14,74
# 32	28,76	16,97	13,31	25,64	20,79	24,00
# 100	57,09	68,71	60,36	51,16	67,69	53,68
F	6,59	7,58	20,61	15,50	6,31	7,58

Gran.	A43	A44	A45	A46	A47	A48
# 09	0	0	0	0	0	0
# 16	6,05	15,75	12,40	5,77	22,31	10,82
# 32	18,33	20,43	25,09	18,82	31,00	23,86
# 100	63,84	50,34	53,86	62,23	39,33	56,56
F	11,78	13,48	8,65	13,18	7,36	8,76

Gran.	A49	A50	A51	A52	A53	A54
# 09	0	0	0	0	0	0,08
# 16	23,35	19,97	19,53	13,81	21,37	23,76
# 32	35,42	23,36	33,30	26,79	35,30	44,70
# 100	35,73	49,46	40,74	50,89	40,19	30,07
F	5,50	7,21	6,43	8,51	3,14	1,39

Gran.	A55	A56	A57	A58	A59	A60
# 09	0,04	0,04	0,02	0,04	0,06	0,06
# 16	20,01	24,22	21,41	17,30	11,00	23,62
# 32	40,74	32,13	27,73	33,95	26,23	36,82
# 100	37,8	38,45	41,23	46,96	57,57	36,06
F	1,41	5,16	9,61	1,75	5,14	3,44

Gran.	A61	A62	A63	A64	A65	A66
# 09	0,04	0,06	0,05	0,10	0,05	0,08
# 16	22,82	20,76	21,39	13,45	17,46	34,92
# 32	20,62	35,97	30,54	21,04	24,78	33,13
# 100	44,22	41,32	43,02	46,72	47,11	27,93
F	12,3	1,89	5,00	18,69	10,60	3,94

Gran.	A67	A68	A69	A70	A71	A72
# 09	0,11	0,06	0,07	0,05	0,05	0
# 16	34,52	25,02	31,32	37,24	40,46	19,31
# 32	35,66	40,06	37,56	36,25	32,48	31
# 100	26,80	30,38	27,29	23,40	24,67	42,33
F	2,80	4,48	3,76	3,06	3,54	7,36

Observando os valores apresentados na Tabela 4.2 pode-se concluir que grande parte do produto atualmente expedido não atende o padrão de qualidade especificado em 3 % máximo passante na peneira # 100, fato este relacionado a baixa resistência mecânica do grão e à necessidade de movimentação do material desde a produção até o embarque. Os números mostram uma diferença maior ainda quando comparados a padrões internacionais, que especificam 1 % máximo passante na Malha # 100. As amostras (A1 à A72) equivalem a todas as alimentações utilizadas no Planejamento, inclusive as réplicas dos experimentos. O balanço global das correntes para todas as amostras tabeladas (A1 à A72) encontra-se no Anexo II deste trabalho.

4.2- Resultados dos testes

As Tabelas 4.3 a 4.6 apresentam os resultados da eficiência de separação e eficiência de recuperação fixando os parâmetros “porosidade da placa” e “ângulo de expansão da zona de dispersão”, variando o tempo de residência do produto no interior do leito. Nestes ensaios foi variada a abertura do “*dumper*” dos ventiladores, entretanto como mostrado nas Tabelas 4.7 e 4.8, a vazão do sistema permaneceu constante, não podendo seu efeito ser avaliado no referido planejamento. Nos **ANEXOS III, IV, V e VI** encontram-se os resultados das eficiências de separação e recuperação para todos os ensaios realizados.

Tabela 4.3- Resultados Experimentais para ES e ER (6 % porosidade, 33,62° ângulo de expansão)

Porosidade da Placa:				6,0 %		
Ângulo da Zona de Expansão:				33,62°		
	Eficiência de Separação de Finos - ES (%)			Eficiência de Recuperação – ER (%)		
Tempo Residência (min)	5,34	3,72	2,09	5,34	3,72	2,09
A1/A2/A3	NR	90,45	41,01	NR	90,87	97,44
A4/A5/A6	92,80	93,36	79,32	94,78	89,20	94,65
A7/A8/A9	99,02	91,47	90,01	79,22	92,34	95,00
A10/A11/A12	98,25	85,09	83,08	85,19	82,72	93,67
A13/A14/A15	97,07	81,55	82,50	71,89	84,38	91,69
A16/A17/A18	95,86	83,60	44,82	79,49	92,18	91,56
A19/A20/A21	92,98	73,60	74,57	81,85	96,54	89,06
A22/A23/A24	83,51	85,28	32,96	83,69	94,33	97,91
A25/A26/A27	NR	79,81	62,17	NR	94,06	98,66

Os resultados apresentados na Tabela 4.3 indicam boas eficiências de separação para tempos de residências maiores, resultado esperado na prática pois a partícula tem mais chance de se desagregar do corpo do leito e ser arrastada pela corrente de elutriação. As melhores eficiências de recuperação, porém, foram atingidas para menores tempos de residência, fato também explicado pela redução das chances de uma partícula dentro da faixa granulométrica de produto bom ser arrastada pela corrente de gás.

Tabela 4.4- Resultados Experimentais para ES e ER (11 % porosidade, 33,62° ângulo de expansão)

Porosidade da Placa:				11,0 %		
Ângulo da Zona de Expansão:				33,62°		
	Eficiência de Separação de Finos - ES (%)			Eficiência de Recuperação – ER (%)		
Tempo Residência (min)	5,34	3,72	2,09	5,34	3,72	2,09
A28/A29/A30	97,68	94,02	91,04	90,32	94,15	86,08
A31/A32/A33	97,94	89,45	85,40	87,87	94,12	96,25
A34/A35/A36	NR	NR	83,23	NR	NR	97,34
A37/A38/A39	93,33	98,11	81,11	96,13	95,20	91,98
A40/A41/A42	94,33	96,95	NR	96,21	97,49	NR
A43/A44/A45	95,92	97,25	77,69	95,95	94,11	94,95
A46/A47/A48	92,87	NR	90,69	95,51	94,32	96,40
A49/A50/A51	95,58	95,26	95,88	94,93	95,89	95,25
A52/A53/A54	83,93	88,34	92,33	96,23	94,38	93,99

Por análise da Tabela 4.4 percebe-se que o incremento na porosidade da placa propiciou a obtenção de boas eficiências de separação para os tempos de residência de 5,34 e 3,72 min e de boas eficiências de recuperação para os tempos de residência avaliados.

Tabela 4.5- Resultados Experimentais para ES e ER (6 % porosidade, 4,6° ângulo de expansão)

Porosidade da Placa:				6,0 %		
Ângulo da Zona de Expansão:				4,6°		
	Eficiência de Separação de Finos - ES (%)			Eficiência de Recuperação – ER (%)		
Tempo Residência (min)	5,34	3,72	2,09	5,34	3,72	2,09
A55/A56/A57	93,09	88,52	74,49	97,19	97,27	99,46
A58/A59/A60	94,54	84,34	63,05	97,40	97,45	99,64
A61/A62/A63	79,91	63,83	57,82	99,04	99,34	99,03
A64/A65/A66	NR	64,07	80,00	90,33	98,42	97,83

Na Tabela 4.5 percebe-se que a redução do ângulo de dispersão afetou significativamente a eficiência de separação de finos, diminuindo com a diminuição do tempo de residência. Já a eficiência de recuperação apresentou resultados satisfatórios para todos os tempos de residência avaliados, mostrando tendência de melhores resultados para menores tempos de residência.

Tabela 4.6- Resultados Experimentais para ES e ER (11 % porosidade, 4,6° ângulo de expansão)

Porosidade da Placa:				11,0 %		
Ângulo da Zona de Expansão:				4,6°		
	Eficiência de Separação de Finos - ES (%)			Eficiência de Recuperação – ER (%)		
Tempo Residência (min)	5,34	3,72	2,09	5,34	3,72	2,09
A67/A68/A69	98,90	99,03	89,91	89,83	94,62	95,40
A70/A71/A72	99,05	97,89	82,96	90,60	95,08	93,99
A73/A74/A75	99,41	98,98	82,53	90,16	93,46	91,60

Os resultados apresentados na Tabela 4.6 mostram que o acréscimo na porosidade da placa de distribuição de ar com a redução do ângulo da Zona de Dispersão produziu melhores eficiências de separação para maiores tempos de residência e melhores eficiências de recuperação para tempos de residência menores. Resultados esperados fisicamente pelo aumento das chances de uma partícula fina (fora da faixa granulométrica de produto bom) se desprender da massa fluidizada e ser arrastada pela corrente de gás. As melhores eficiências de recuperação para tempos de residência menores também são esperadas pois reduz a possibilidade de partículas dentro da faixa granulométrica serem arrastadas pela corrente de ar em tempos menores.

As Tabelas 4.7 e 4.8 apresentam os resultados da vazão em função da queda de pressão no ventilador para as placas distribuidores de 6 e 11%, respectivamente.

Tabela 4.7- Vazão Ar de Fluidização em função da queda de pressão no ventilador para a porosidade da placa de 6 %.

% VT	VT	ΔP (mmH ₂ O)	Vazão (m ³ /h)	ΔP (mmH ₂ O)	Vazão (m ³ /h)	ΔP (mmH ₂ O)	Vazão (m ³ /h)
100	VT entrada	104	1,710	104	1,710	88	1,750
	VT Saída	98	1,735	100	1,730	70	1,780
66	VT entrada	110	1,700	110	1,700	114	1,700
	VT Saída	66	1,800	60	1,810	66	1,800
33	VT entrada	58	1,780	56	1,815	62	1,800
	VT Saída	64	1,790	70	1,780	72	1,770
100	VT entrada	104	1,710	106	1,720	104	1,710
	VT Saída	68	1,790	72	1,780	68	1,790
66	VT entrada	100	1,730	98	1,735	96	1,740
	VT Saída	72	1,780	70	1,750	66	1,800
33	VT entrada	60	1,810	60	1,810	54	1,820
	VT Saída	68	1,790	60	1,810	64	1,790
100	VT entrada	98	1,735	94	1,740	104	1,710
	VT Saída	92	1,745	92	1,745	80	1,760
66	VT entrada	78	1,765	74	1,780	72	1,780
	VT Saída	72	1,780	64	1,770	68	1,790
33	VT entrada	54	1,820	50	1,830	46	1,845
	VT Saída	68	1,790	68	1,790	68	1,770

Tabela 4.8- Vazão Ar de Fluidização em função da queda de pressão no ventilador para a porosidade da placa de 11 %.

% VT	VT	ΔP (mmH ₂ O)	Vazão (m ³ /h)	ΔP (mmH ₂ O)	Vazão (m ³ /h)	ΔP (mmH ₂ O)	Vazão (m ³ /h)
100	VT entrada	44	1,850	44	1,850	36	1,860
	VT Saída	44	1,850	58	1,765	66	1,780
66	VT entrada	44	1,850	84	1,760	38	1,850
	VT Saída	24	1,880	44	1,850	50	1,840
33	VT entrada	46	1,840	42	1,850	44	1,850
	VT Saída	56	1,810	48	1,840	58	1,780
100	VT entrada	64	1,770	58	1,780	62	1,800
	VT Saída	48	1,840	52	1,820	50	1,830
66	VT entrada	58	1,780	58	1,780	58	1,780
	VT Saída	56	1,815	56	1,815	54	1,820
33	VT entrada	62	1,800	64	1,770	60	1,810
	VT Saída	72	1,780	76	1,760	76	1,760
100	VT entrada	70	1,775	70	1,750	66	1,800
	VT Saída	80	1,760	68	1,790	74	1,780
66	VT entrada	64	1,790	62	1,800	66	1,800
	VT Saída	72	1,780	68	1,790	70	1,775
33	VT entrada	64	1,790	64	1,790	62	1,800
	VT Saída	54	1,820	62	1,800	64	1,790

Observado nas Tabelas 4.7 e 4.8 que a variação da abertura dos “dumpers” dos ventiladores de entrada e saída não afetaram significativamente a vazão de operação dos ventiladores, o que pode ser explicado pela baixa perda de carga no sistema o que faz com

que os ventiladores trabalhem com folga. Esta limitação de condição operacional não permitiu a variação da relação entre as vazões de ar e de sólidos no sistema, sendo esta relação um parâmetro dependente somente da alimentação de sólidos no sistema o que faz com que seu efeito seja indiretamente avaliado pelo tempo de residência do material no interior do leito.

4.2.1- Análise da influência da porosidade da placa, ângulo da zona de dispersão e tempo de residência do material na eficiência de separação e eficiência de recuperação

Conforme descrito no Capítulo III foi feito um planejamento fatorial a dois níveis para analisar a influência da porosidade da placa de dispersão, ângulo da zona de dispersão e tempo de residência do material nas eficiências de separação e de recuperação do leito fluidizado. As Tabelas 4.9 e 4.10, a seguir, apresentam o resumo das médias das respostas encontradas no Planejamento executado:

Tabela 4.9- Influência da Porosidade da Placa, Ângulo de Expansão e TR na ES

Planejamento	Porosidade	Ângulo Expansão	Tempo Residência	ES (%)
01	6 %	33,62°	5,34 min	96,00
02	6 %	33,62°	2,09 min	65,60
03	11 %	33,62°	5,34 min	93,95
04	11 %	33,62°	2,09 min	87,17
05	6 %	4,60°	5,34 min	89,18
06	6 %	4,60°	2,09 min	68,84
07	11 %	4,60°	5,34 min	99,12
08	11 %	4,60°	2,09 min	85,13

Tabela 4.10- Influência da Porosidade da Placa, Ângulo de Expansão e TR na ER

Planejamento	Porosidade	Ângulo Expansão	Tempo Residência	ER (%)
01	6 %	33,62°	5,34 min	82,30
02	6 %	33,62°	2,09 min	94,03
03	11 %	33,62°	5,34 min	94,14
04	11 %	33,62°	2,09 min	94,03
05	6 %	4,60°	5,34 min	95,99
06	6 %	4,60°	2,09 min	98,99
07	11 %	4,60°	5,34 min	90,20
08	11 %	4,60°	2,09 min	93,66

Os resultados apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10 indicam uma sensibilidade maior na dependência das variáveis estudadas na eficiência de separação, indicado pela sensível variação da resposta em função de alteração nas variáveis porosidade da placa, ângulo da zona de expansão e tempo de residência do material no leito. Já as respostas encontradas para a eficiência de recuperação apresentaram uma variação menos significativa com alterações nessas variáveis.

Para recuperação e classificação do material alimentado no leito são considerados satisfatórios resultados de eficiência de separação e de recuperação superiores a 95 %. Baixas eficiências de recuperação indicam industrialmente um acréscimo relevante no reciclo de material para o processo produtivo, acarretando redução da produtividade da planta e acréscimo nos custos de produção.

Os maiores índices de separação de finos são alcançados para o maior tempo de residência do material no sistema (5,34 minutos) relacionados com uma boa escolha de porosidade da placa e ângulo da zona de expansão.

A análise estatística dos resultados foi feita com o objetivo de quantificar os efeitos das variáveis isoladas e interações para cada uma das respostas (eficiência de separação e eficiência de recuperação), conforme apresentado na Tabela 4.11 abaixo. Os parâmetros com

nível de significância superior a 0,10 foram considerados desprezíveis, ou seja, no teste de hipótese com uma t de Student, considera-se uma probabilidade de erro de no máximo 10%.

Tabela 4.11- Resultado do Efeito das Variáveis: Porosidade, ângulo de expansão e TR

	Eficiência de Separação (%)	Eficiência de Recuperação (%)
Variáveis	Efeitos	Efeitos
Média	85,624	92,956
X_1	5,719	0,051
X_2	0,056	-1,831
X_3	8,939	-2,299
X_1X_2	-0,839	2,909
X_1X_3	-3,746	1,461
X_2X_3	0,356	-0,606

Através do cálculo dos efeitos, apresentado na Tabela 4.11, é possível avaliar a influência das variáveis independentes nas respostas estudadas. Uma alteração da variável independente, ou de suas interações, do nível -1 para o nível 1, caso as mesmas sejam significativas, provoca uma variação correspondente ao valor do efeito na resposta. Por exemplo, o valor 8,939 do efeito da variável X_3 (Tempo de residência do material no leito) na separação, significa que quando se passa do nível -1 (2,09 minutos) desta variável para o nível 1 (5,34 minutos) ocorre um aumento na eficiência de separação de 8,939 pontos percentuais.

Pode ser observado na Tabela 4.11 que, para a faixa experimental estudada, a variável X_2 (Ângulo de Expansão) não apresentou efeito significativo na eficiência de separação, porém causou uma variação significativa na eficiência de recuperação do sistema.

A eficiência de separação também acresce em 5,719 pontos percentuais quando a porosidade da placa passa do nível -1 (6 %) para o nível 1 (11 %) como pode ser confirmado pelo valor do efeito da variável X_1 sobre a separação mostrada na Tabela 4.11.

A interação entre as variáveis X_1 (porosidade da placa) e X_3 (tempo de residência do material no leito) causa uma influência negativa na eficiência de separação do sistema, diminuindo em 3,746 pontos percentuais a resposta.

A variável X_3 (tempo de residência do material no leito) juntamente com a interação entre as variáveis X_1 (porosidade da placa) e X_2 (ângulo de expansão) foram os parâmetros mais significativos na resposta eficiência de recuperação.

Ainda pode ser verificado na Tabela 4.11, quando se observa os sinais das variáveis, que a porosidade da placa e tempo de residência do material no leito aumentam a eficiência de separação do sistema e reduzem a eficiência de recuperação.

4.2.2- Resultados globais

A Tabela 4.12 apresenta as equações de ajustes para a eficiência de separação e eficiência de recuperação do sistema projetado para classificação de fosfato bicálcico. O valor do quadrado do coeficiente de correlação da regressão igual a 0,958, para a eficiência de separação, indica um bom ajuste dos resultados experimentais para a equação empírica proposta. Isto indica que 95,8 % da variabilidade dos dados foram explicados pela equação.

Já o valor do quadrado do coeficiente de correlação da regressão igual a 0,897 para a eficiência de recuperação não mostrou uma correlação tão boa entre os resultados empíricos e previsto pelo modelo. Entretanto, mesmo com este valor para a correlação, a ordem de grandeza dos resultados preditos pelo modelo atende a uma variação aceitável a níveis industriais.

Tabela 4.12 – Ajustes para as equações que descrevem ES e ER em função dos fatores testados

Equação Estimada	R^2
$ES = 85,624 + 5,719X_1 + 0,056X_2 + 8,939X_3 - 0,839X_1X_2 - 3,746X_1X_3 + 0,356X_2X_3$	0,958
$ER = 92,956 + 0,051X_1 - 1,831X_2 - 2,299X_3 + 2,909X_1X_2 + 1,461X_1X_3 - 0,606X_2X_3$	0,897

No **ANEXO VIII** são apresentados os gráficos dos resíduos para as eficiências de separação e de recuperação observadas para o sistema estudado. Para estas respostas, a distribuição dos resíduos foi aleatória em torno do zero, sem nenhuma tendência e os valores observados ficaram próximos dos preditos, levando a uma variância constante e a distribuição normal dos mesmos.

As Figuras 4.1 a 4.6 apresentam as superfícies de resposta para o efeito de duas variáveis mantendo-se a terceira em seu valor central.

Na Figura 4.1 pode-se observar que a eficiência de separação adquire um valor máximo quando se utiliza uma porosidade da placa alta (nível 1 = 11 %) e um ângulo de expansão alto (nível 1 = 33,62°). Este fato é fisicamente esperado, visto que uma maior porosidade do leito promove um maior borbulhamento do material aumentando as chances de uma partícula se desligar do corpo do leito (bulk) e ser arrastado pela corrente do ar de elutriação. Já um maior ângulo de expansão permite que somente as partículas extremamente finas, na faixa de separação, sejam arrastadas pela corrente de gás, baixa velocidade de arraste.

A Figura 4.2 mostra que a eficiência de separação aumenta com o aumento do tempo de residência do material no leito. Este resultado pode ser compreendido analisando que altos tempos de residência resultam em uma maior probabilidade de uma partícula também se desprender do corpo do leito e ser arrastado pela corrente de gás de elutriação.

A Figura 4.3 mostra que melhores valores para eficiência de separação também são obtidos em maiores tempos de residência e maior ângulo de expansão da zona de dispersão, pelas razões já explicadas para as Figuras 4.1 e 4.2.

As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 mostram que altos valores para eficiência de recuperação são obtidos para baixas porosidades da placa (nível -1 = 6 %) e baixos tempos de residência do material no leito, fato este também esperado devido a probabilidade de partículas consideradas como produto bom serem arrastadas pela corrente de gás.

Uma análise conjunta das duas respostas ES (Eficiência de Separação) e ER (Eficiência de Recuperação) indica como condição ótima os resultados obtidos com uma placa de porosidade 11%, ângulo da zona de expansão de 33,62° e um tempo de residência de 5,34 minutos (Condições do experimento 4).

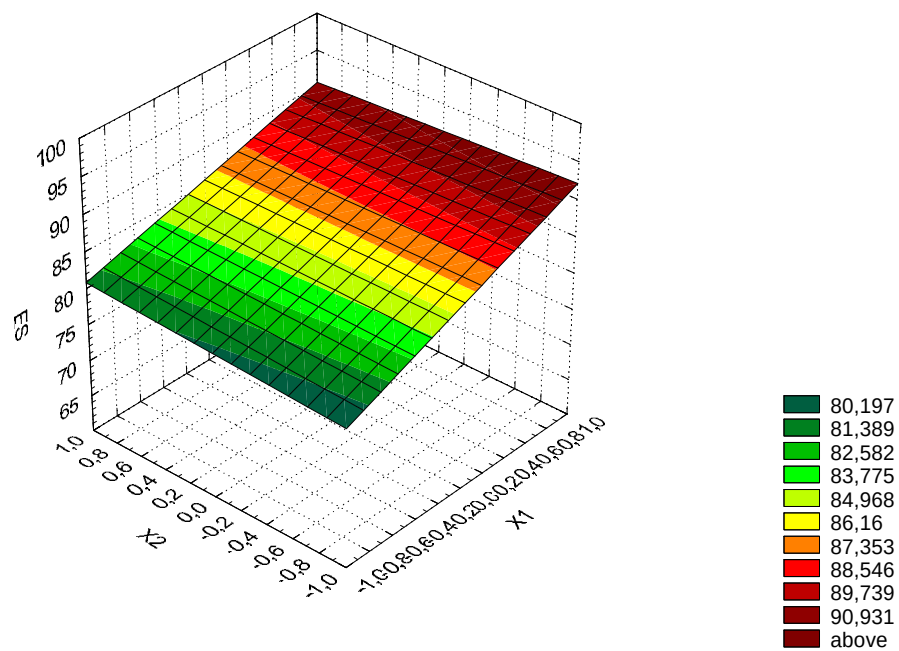


Figura 4.1– Superfície de resposta da eficiência de separação do sistema em função da porosidade da placa (X_1) e ângulo da expansão da zona de dispersão (X_2) mantendo-se o tempo de residência (X_3) no nível central.

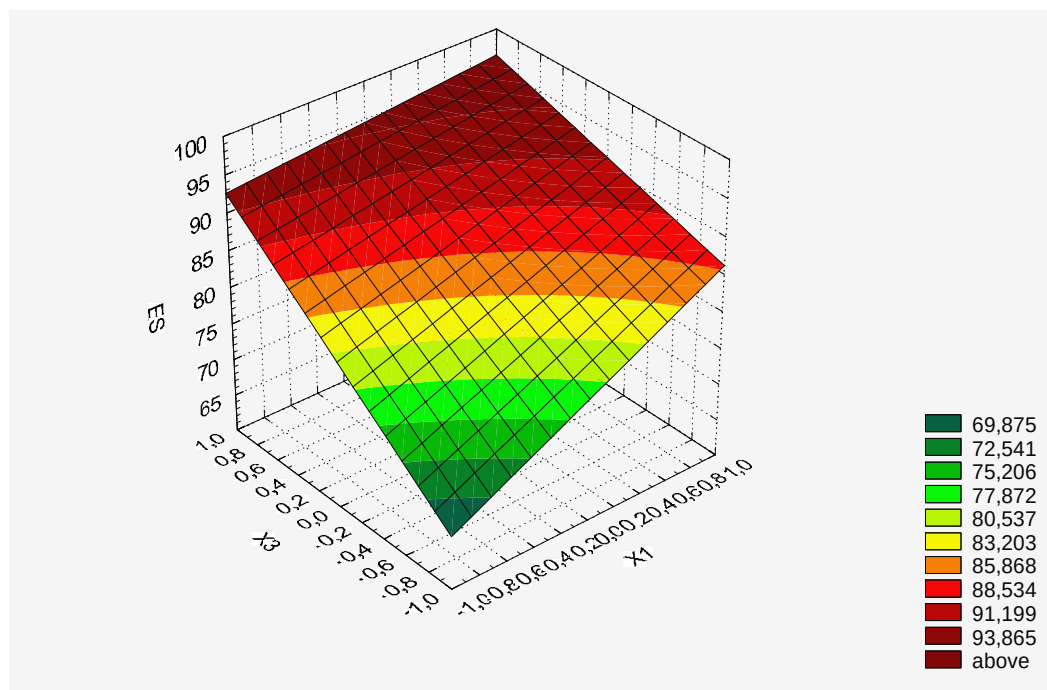


Figura 4.2– Superfície de resposta da eficiência de separação do sistema em função da porosidade da placa (X_1) e tempo de residência do material no leito (X_3) mantendo-se o ângulo de expansão da zona de dispersão (X_2) no nível central.

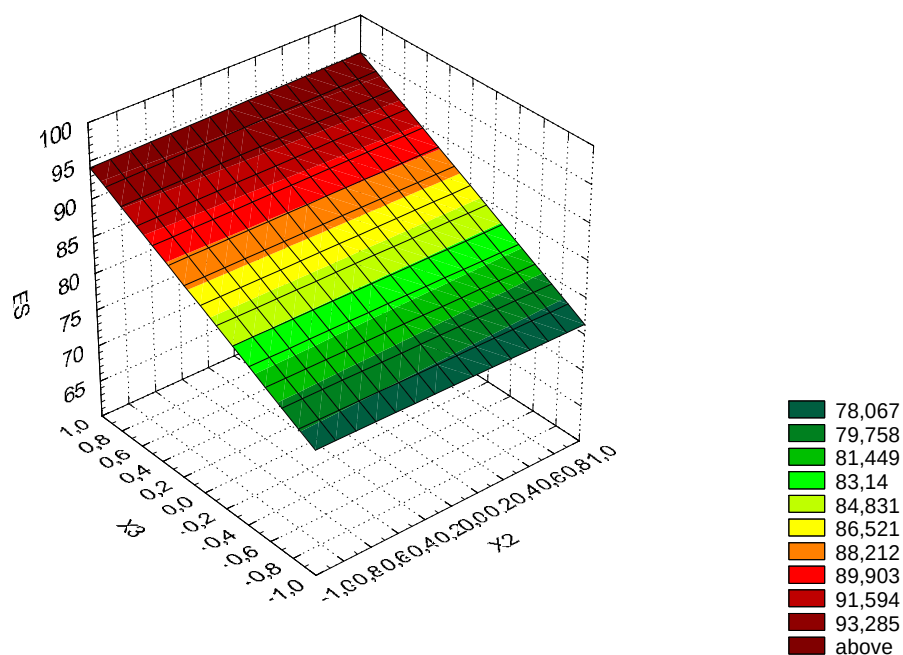


Figura 4.3– Superfície de resposta da eficiência de separação do sistema em função do ângulo de expansão da zona de dispersão (X_2) e tempo de residência do material no leito (X_3) mantendo-se a porosidade da placa (X_1) no nível central.

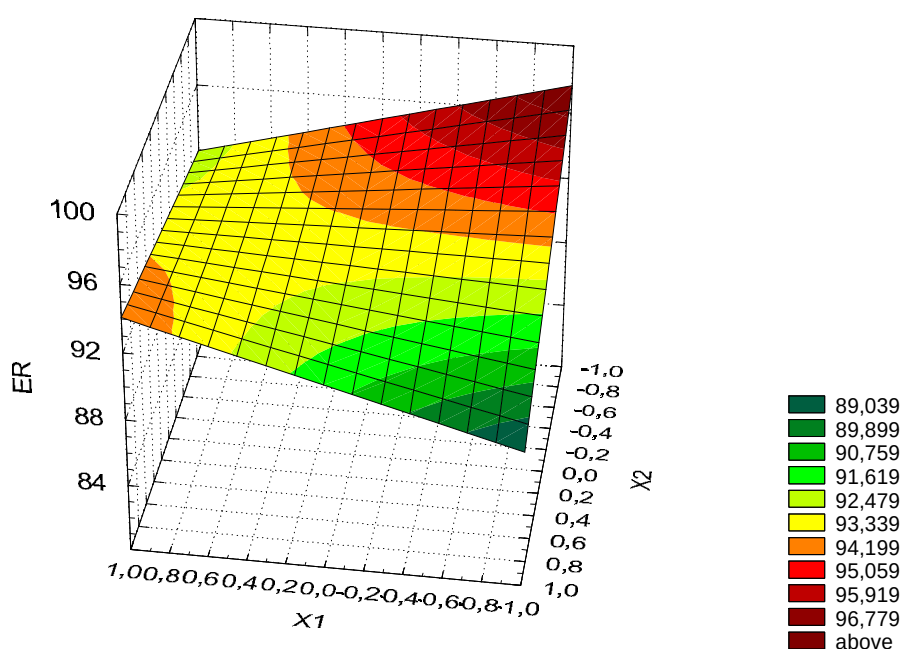


Figura 4.4– Superfície de resposta da eficiência de recuperação do sistema em função da porosidade da placa (X_1) e ângulo de expansão da zona de dispersão (X_2) mantendo-se o tempo de residência dos sólidos (X_3) no nível central.

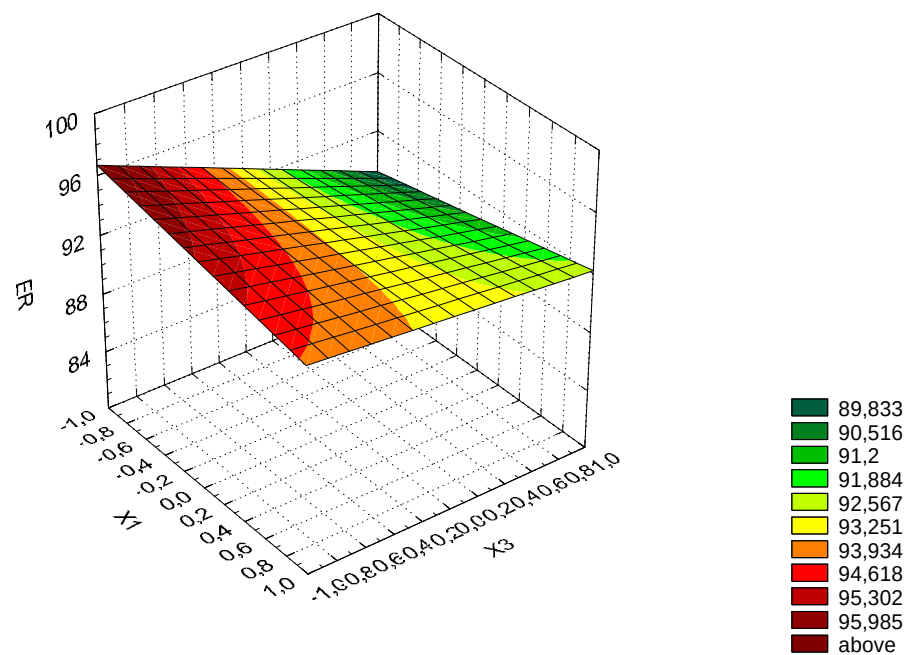


Figura 4.5– Superfície de resposta da eficiência de recuperação do sistema em função da porosidade da placa (X_1) e tempo de residência do material no leito (X_3) mantendo-se o ângulo de expansão da zona de dispersão (X_2) no nível central.

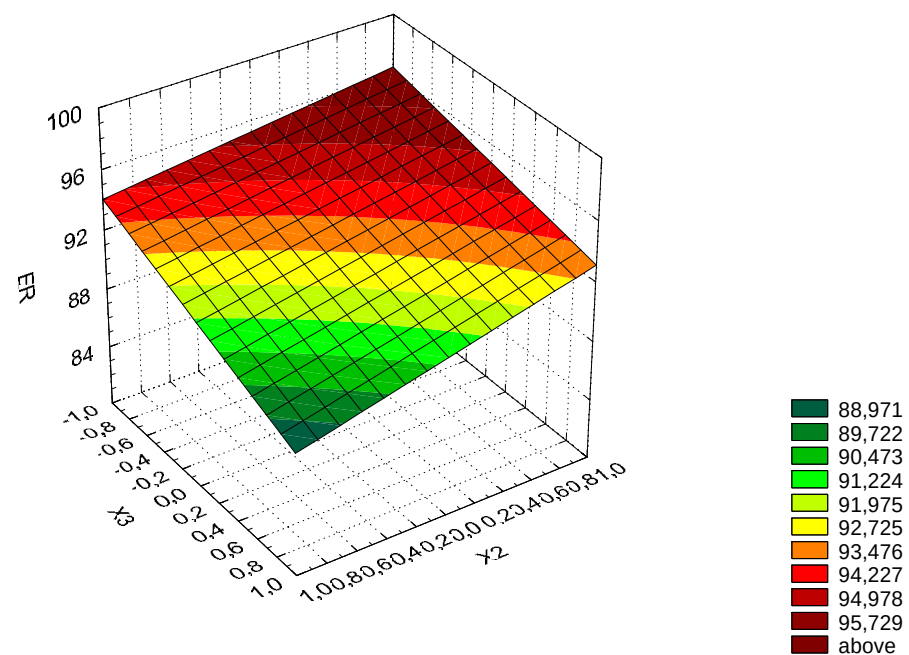


Figura 4.6– Superfície de resposta da eficiência de recuperação do sistema em função do Ângulo de Expansão da Zona de Dispersão (X_2) e Tempo de Residência do material no leito (X_3) mantendo-se a porosidade da placa distribuidora no nível central.

4.3- Dimensionamento de uma unidade industrial a partir dos resultados obtidos em uma planta piloto.

Para atender às necessidades de expedição de fosfato bicálcico do Complexo Industrial de Cajati, foi proposta a instalação de uma unidade de leito fluidizado dimensionada para a classificação em processo contínuo de 100 T/h de alimentação.

A instalação foi projetada prevendo a montagem do leito fluidizado no último nível do novo prédio. Desta forma o produto, após classificação, não sofrerá movimentações que possam causar a quebra dos grânulos classificados e conseqüentemente uma nova geração de finos e poeira após classificação. Todo o sistema de alimentação e descarga do leito fluidizado foi composto por correias transportadoras. Estas correias transportadoras retomam o material, via pá-carregadeira, dos boxes de estocagem e após classificação o produto é direcionado para o silo de carregamento.

A Figura 4.7 mostra o fluxograma conceitual de processo montado para o projeto de Cajati. As demais variáveis de dimensionamento foram escolhidas nas condições consideradas ótimas no estudo no sistema piloto de fluidização montando na Unidade Araxá da BUNGE Fertilizantes, ou seja, porosidade da placa de dispersão de 11 %, tempo de residência de 5,0 minutos e ângulo de dispersão de projeto de 45° (com sistema interno de ajuste do ângulo para o valor ótimo operacional de 33°). A relação entre as vazões de Ar e de produto também foi fixada a partir dos resultados levantados no estudo piloto, mantendo o valor de 1000 m³ de ar por tonelada de produto a ser fluidizado. Em decorrência de experiência em sistemas de fluidização industrial nas Unidades da BUNGE em Uberaba, Cubatão e Rio Grande, o tipo de placa escolhido para o sistema industrial apresenta ranhuras direcionadoras no sentido do fluxo, conforme Figura 4.10.

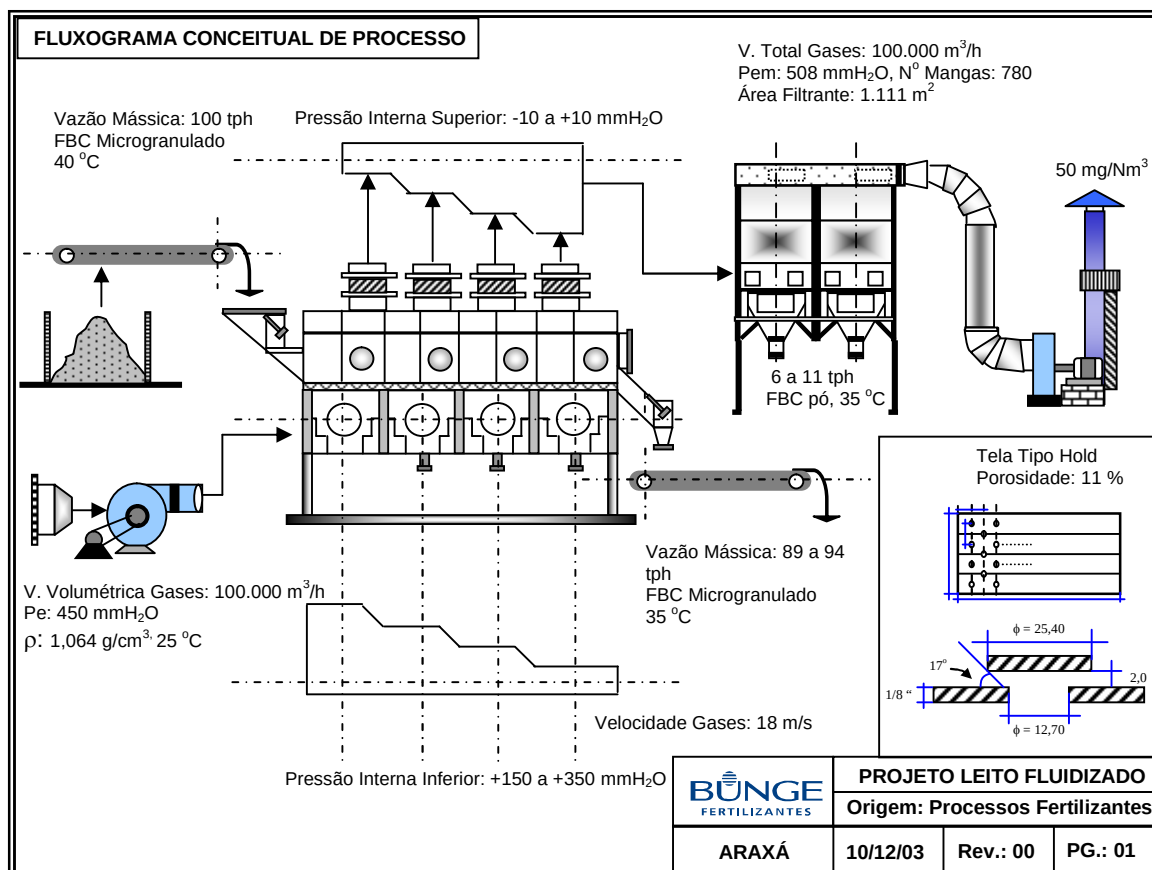


Figura 4.7- Fluxograma conceitual para o sistema industrial de Cajati

Para o desenvolvimento do detalhamento do projeto foi contratada a empresa DELTA DUCON, pioneira no desenvolvimento de tecnologias aplicadas a processos de controle de poluição, sistemas de transporte pneumático e sistemas para processos industriais.

A empresa de Engenharia foi responsável pelos detalhamentos dos projetos civis, estruturais, unifilares de estrutura metálica e também pelo fornecimento dos desenhos técnicos de fabricação, baseado nos conceituais informados e aprovados pela área técnica da BUNGE Fertilizantes. O conceitual desenvolvido para o corpo do leito fluidizado, levando em conta o “*know how*” adquirido no sistema piloto é mostrado nas Figuras 4.8 e 4.9.

Na Figura 4.8, observa-se a similaridade nos pontos de admissão de ar, fator importante para uma boa equalização da pressão na zona inferior do leito. Nesta câmara também foi detalhado um sistema de geometria definida para a correta expansão do gás, evitando zonas de alta velocidade de gás e zonas de estagnação no leito. As Unidades Industriais da BUNGE Fertilizantes de Cubatão, Uberaba e Rio Grande apresentam esta geometria. Para sistemas industriais é importante se prever sistemas que não permitam a admissão de ar indesejável no leito, evitando perda de vazão para a fluidização. Os sistemas de alimentação e descarga de material foram dimensionados com sistema de vedação

pendular, sendo o peso do próprio material o responsável por manter os pontos de alimentação e descarga selados.

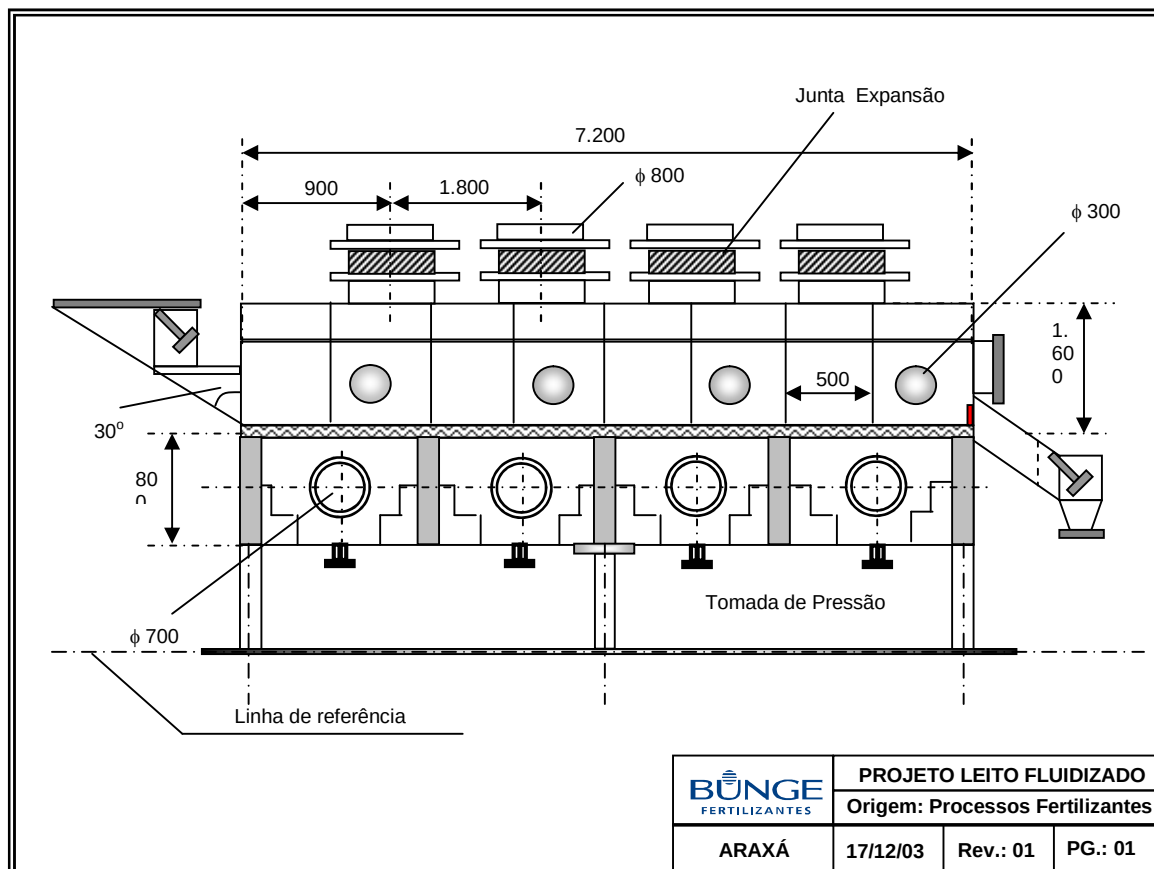


Figura 4.8- Conceitual corpo do leito fluidizado de Cajati

Tomadas de pressão foram instaladas em quatro pontos, distribuídos linearmente no comprimento do leito. O correto acompanhamento dos valores de pressões diferenciais é o principal fator responsável pelo controle da fluidização, indicando a necessidade de maior ou menor admissão de ar no sistema. Visores em acrílico, isolados interna e externamente, foram instalados também no comprimento do leito, para o acompanhamento visual do comportamento do material na zona de fluidização.

A Figura 4.9 mostra uma vista frontal em corte da unidade de fluidização Industrial. Fatores já aplicados industrialmente também foram levados em conta no dimensionamento do sistema, na zona de redução após a expansão foi considerado um ângulo de inclinação mínimo de 15°, minimizando a formação de zonas de turbulência no arraste de particulados o que poderia causar o retorno de material arrastando para o corpo do leito.

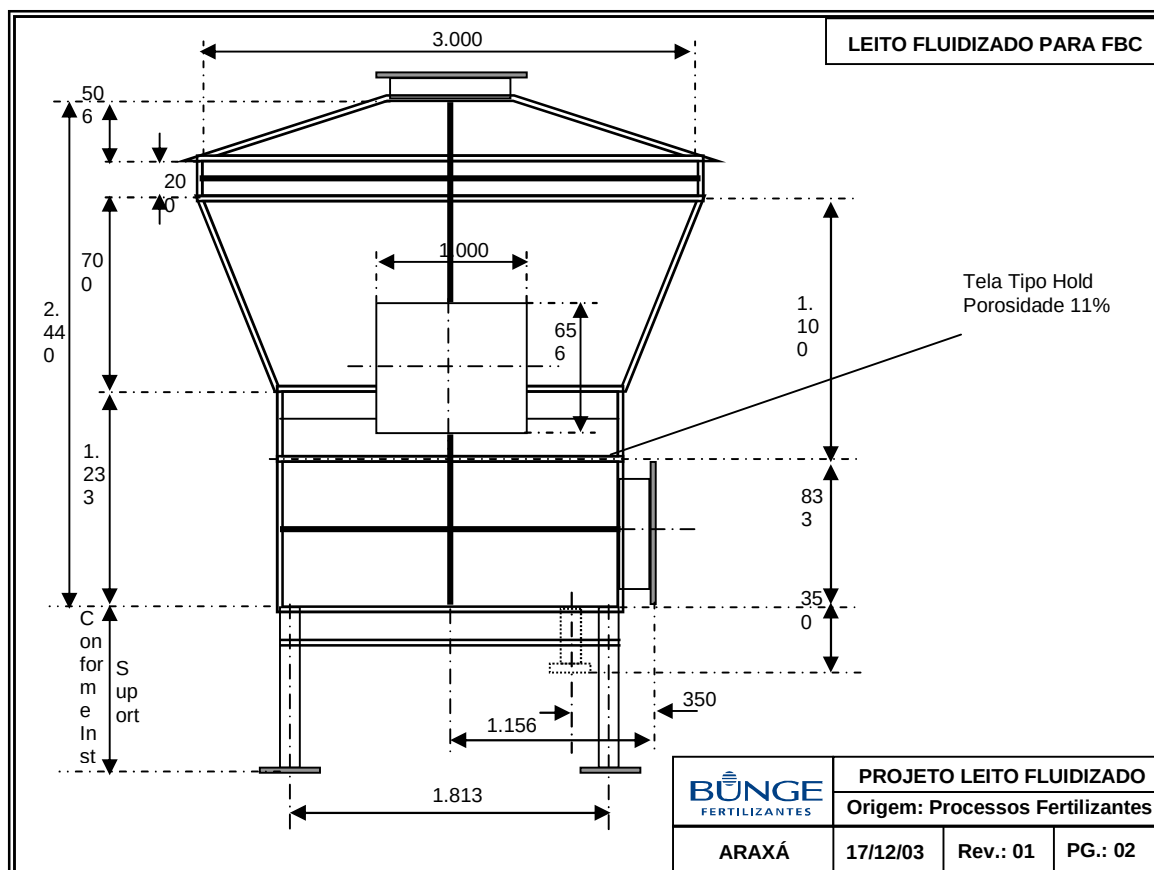


Figura 4.9- Conceitual vista frontal do leito fluidizado de Cajati

O sistema possui ajuste de régua na descarga do leito podendo assim alterar o volume de material e o tempo de residência no interior do leito. O sistema de fixação das placas é modular permitindo a troca de partes danificadas das placas em intervalos rápidos, não comprometendo a disponibilidade operacional da unidade, fato bastante relevante na época de safra, na qual o volume de expedição aumenta sensivelmente e qualquer parada na unidade pode não ser recuperada no restante do mês.

O **ANEXO VII**, resume o “lay-out” final aprovado da unidade, bem como o acompanhamento de sua montagem. Constam também no Anexo VII fotos da unidade em operação e fotos de detalhes do equipamento.

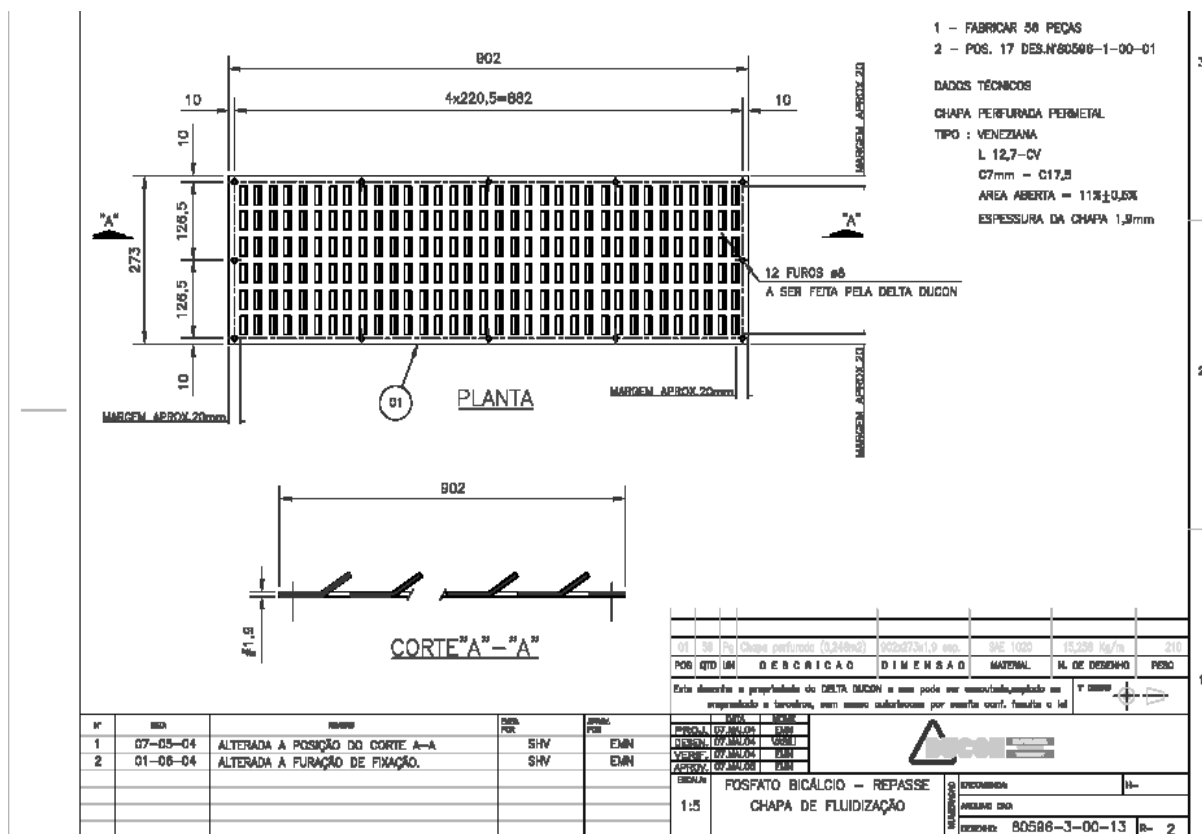


Figura 4.10- Tela de dispersão leito fluidizado industrial de Cajati

4.3.1- Resultados das eficiências de separação e recuperação para o sistema industrial

Após o “start-up” da Unidade Industrial de Cajati, foram realizadas algumas amostragens no sistema para verificação das eficiências de separação e recuperação.

Tabela 4.13 – Resultados reais obtidos na Unidade Cajati *versus* resultados previstos.

Amostra	ES – Empírico (%)	ER – Empírico (%)	ES – Modelo (%)	ER – Modelo (%)
01	100	92,81	99,11	92,64
02	93,74	97,29	99,11	92,64
03	93,38	94,35	99,11	92,64

Os resultados mostram uma boa concordância das estimativas obtidas a partir do modelo obtido a partir dos experimentos na unidade piloto com os resultados reais obtidos na unidade industrial. Deve-se observar também que os resultados reais estão dentro de faixas necessárias para o atendimento aos padrões de qualidade definidos pela BUNGE Fertilizantes para o fosfato bicálcico microgranulado.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1- Conclusões

Com base nos resultados experimentais obtidos nos ensaios conduzidos na unidade piloto de leito fluidizado e resultados preliminares levantados na Unidade Industrial de Cajati podemos concluir que:

- A utilização de um sistema de leito fluidizado para separação da fração fina (passante na malha # 100) de fosfato bicálcico microgranulado, leva a ótimos resultados tanto para a eficiência de separação quanto para a eficiência de recuperação.
- A utilização de uma placa de fluidização com porosidade de 11 % favoreceu a obtenção das melhores eficiências de separação do sistema.
- Maiores tempos de residência do material no interior do leito (dentro da faixa estudada neste trabalho) promovem acréscimos na eficiência de separação do sistema.
- O melhor resultado obtido neste trabalho, tanto para a eficiência de separação quanto para a eficiência de recuperação, foi obtido fixando a porosidade da placa em 11 %, o tempo de residência do material no leito em 5,34 minutos e um ângulo de dispersão da zona de expansão de 33,62°;
- Observando os sinais das variáveis na equação que descreve a dependência das respostas com relação aos fatores, percebeu-se que as condições de porosidade da placa e tempo de residência do material no leito aumentam a eficiência de separação e reduzem a eficiência de recuperação do sistema. Para o dimensionamento industrial há necessidade de verificar os impactos de custos de reprocesso para a melhor escolha das variáveis de projeto;
- O modelo matemático levantado para o sistema piloto de leito fluidizado pode ser utilizado como referência para o dimensionamento (“*scale-up*”) de unidades industriais de classificação de fosfato bicálcico com características semelhantes ao estudado neste trabalho.

Diante do exposto e dos resultados apresentados neste trabalho fica demonstrado que o leito fluidizado, pode ser aplicado, com uma relação custo-benefício bastante competitiva para classificação de fosfato bicálcico microgranulado, adequando o produto final aos padrões internacionais de qualidade exigidos.

5.2- Sugestões para trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, pode se sugerir:

- Estudar os coeficientes de troca térmica do sistema, aproveitando o sistema de leito fluidizado, dimensionado para classificação, como um sistema de resfriamento do produto, verificando suas vantagens em relação aos sistemas convencionais de resfriamento (Tambores Rotativos).
- Estudar a utilização da tecnologia de leito fluidizado para eliminação de pó em fertilizantes, reduzindo a necessidade de consumo de óleo hidromineral utilizado para recobrimento do grão.
- Realizar testes em escala industrial, aumentando a faixa de aplicação do modelo, para verificar possibilidade de aplicação extrapolando as condições estudadas no sistema piloto de fluidização.
- Estudar e propor um modelo de transferência de quantidade de movimento para o sistema, em função de alguns números adimensionais relevantes (Re , Fr , etc).
- Definir as condições ótimas de operação da Unidade Industrial de Cajati, com relação ao consumo de energia elétrica e reciclo atendendo as especificações da área de qualidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAEYNES, J.; GELDART D., 1974, An investigation into slugging fluidized beds, Chem. Eng. Science, 29, 255-265.
- BOUILLARD, J. X.; GIDASPOW, D.; LYCZKOWSKI, R. W. Hydrodynamics of fluidization: fast-bubble simulation in a two-dimensional fluidized bed, Powder Technology, 66, p. 107 – 118, 1991.
- DAVIDSON, J.F.; HARRISON, D., Fluidization Particles, Cambridge University Press, New York, 1963.
- DAVIDSON, J.F.; HARRISON, D., Fluidization, London, Academic Press Inc. LTD, 1971.
- DE GROOT, J.H.; International Symposium on Fluidization, Eindhoven (1967).
- DING, J.; GIDASPOW, D. A bubbling fluidization model using Kinetic theory of granular flow, AIChE J. 36, 1990, 523 – 538.
- GELDART, D., Gas Fluidization Technology, Wiley, New York, 468 p., 1986.
- GELDART, D.; HARNBY, N.; JONG, A. C. L. Fluidization of cohesive powders, Powder Technology, 37, p. 25 – 37, 1984.
- GELDART, D., Types of Gas Fluidization. Powder Technology, v.7, pp. 285-292, 1973.
- GIDASPOW, D. Multiphase Flow and Fluidization. Continuum and Kinetic Theory Descriptions, Academic Press, 1994.
- GOHR, E.J., 1956, Fluidization Reinhold Publishing; New York, NY.
- GREGORY, S.A. (1967). Proc. Intern. Symp. On Fluidization, Eindhoven, Netherlands Univ. Press, Amsterdam, p.751.
- HARRISON, D.; DAVIDSON J.; DE KOCK, J.W. On the nature of aggregative and particulate fluidization. Trans. Inst. Chem. Engrs. 39:202-211, 1961.

- HEINRICH, S.; MORL, L. Fluidized bed spray granulation – A new model for the description of particle wetting and of temperature and concentration distribution, Chemical Engineering and Processing, 38, p. 635 – 663, 1999.
- KATO, K.; WEN, C.Y., “Bubble assemblage model for fluidization bed catalytic reactors”, Chem. Eng. Sci. 24 (1969), 1351-69.
- KONO, H. O.; HUANG, C. C.; MORIMOTO, E.; NAKAYAMA, T.; HIKOSAKA, T. segregation and agglomeration of type C powders from homogeneously aerated type a-c powder mixtures during fluidization, Powder Technology, 53, p. 163 – 168, 1987.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. Fluidization Engineering, 2 ed., Butterworth Heinemann, 1991.
- LEWIS et al., Entrainment from Fluidized Beds. Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.58:65-72, 1962..
- MATSEN, J. M. Scale-up of fluidized bed processes: principle and pratice, Powder Technology, 88, p. 237 – 344, 1996.
- MAY, W.G.; RUSSEL, F.R., Paper Presented at the North Jersey Section of the A.C.S., Jan (1954).
- RHODES, M.J. (1998). Introduction to Particle technology, John Wiley, Chichester.
- ROWE, P.N.; PARTRIDGE B.A.; CHENEY, A.G.; HENWOOD, G.A., “The mechanics of Solids Mixing in Fluidized Beds”, Transactions Institution Chemical Engineers, 43 (1965), 271-286.
- SHEN, L.; ZHANG, M.; XU, Y. Solids mixing in fluidized beds, Powder Technology, 84, p. 297 – 312, 1995.
- WEN, C.Y.; HASHINGER, R.F. Elutriation of solids particles from a dense phase fluidized bed. AIChE Journal 6:220-226, 1960.
- WEN, C.H.; YU, Y.H., Generalized method for predicting the minimum fluidization velocity, AIChE, v.12, p.610, 1966.

ZUINDERWEG. In: Drinkenburg, ed. Prod. Int. Symp. On Fluidisation. Netherlands University Press, 1967, p.739.

ANEXO I

FOTOS SISTEMA PILOTO DE FLUIDIZAÇÃO



Figura A1.1- Unidade Piloto de Fluidização



Figura A1.2- Vista Lateral do Leito Fluidizado e Alimentador



Figura A1.3- Filtro Manga e Ventilador de Ar de Fluidização



Figura A1.4- Painel de Força e Controle do Sistema de Fluidização



Figura A1.5- Válvula Rotativa para Selagem do Circuito de Ar do Sistema

ANEXO II
ANÁLISES QUÍMICAS DAS CORRENTES

Tabela A2.1- Amostra 01: 28/10/2003 - Frequência de Alimentação 10 Hz

Análises	FBC Alimentado	FBC Classificado	FBC pó
Acidez Livre	0,09	0,07	0,11
Umidade	2,36	2,25	2,15
P H ₂ O	2,72	2,45	2,24
P Cítrico	17,30	17,32	15,75
P Total	18,66	18,42	18,60

Tabela A2.2- Amostra 02: 28/10/2003 - Frequência de Alimentação 10 Hz

Análises	FBC Alimentado	FBC Classificado	FBC pó
Acidez Livre	0,10	0,18	0,15
Umidade	2,27	2,36	2,12
P H ₂ O	2,49	2,38	2,08
P Cítrico	17,22	17,31	15,62
P Total	18,30	18,34	18,76

Tabela A2.3- Amostra 03: 27/10/2003 - Frequência de Alimentação 20 Hz

Análises	FBC Alimentado	FBC Classificado	FBC pó
Acidez Livre	0,09	0,15	0,09
Umidade	2,37	2,30	2,33
P H ₂ O	2,65	2,77	1,74
P Cítrico	16,86	17,04	15,99
P Total	18,30	18,74	18,91

Tabela A2.4- Amostra 04: 28/10/2003 - Frequência de Alimentação 20 Hz

Análises	FBC Alimentado	FBC Classificado	FBC pó
Acidez Livre	0,18	0,10	0,10
Umidade	2,30	2,02	1,88
P H ₂ O	2,51	2,47	2,33
P Cítrico	15,73	17,19	17,27
P Total	18,32	18,44	18,57

Tabela A2.5- Amostra 05: 28/10/2003 - Frequência de Alimentação 20 Hz

Análises	FBC Alimentado	FBC Classificado	FBC pó
Acidez Livre	0,12	0,14	0,10
Umidade	2,20	2,24	1,78
P H ₂ O	2,20	2,72	2,31
P Cítrico	16,77	15,60	15,75
P Total	18,65	18,53	18,50

Tabela A2.6- Amostra 06: 30/10/2003 - Frequência de Alimentação 30 Hz

Análises	FBC Alimentado	FBC Classificado	FBC pó
Acidez Livre	0,09	0,02	0,10
Umidade	2,42	2,15	2,06
P H ₂ O	2,21	2,37	1,84
P Cítrico	18,31	17,87	17,95
P Total	18,86	18,75	18,99

Tabela A2.7- Amostra 07: 30/10/2003 - Frequência de Alimentação 30 Hz

Análises	FBC Alimentado	FBC Classificado	FBC pó
Acidez Livre	0,04	0,13	0,11
Umidade	2,08	2,19	2,32
P H ₂ O	1,95	2,02	1,37
P Cítrico	17,87	17,79	18,55
P Total	18,71	18,69	19,12

ANEXO III

RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS COM CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS PARA

POROSIDADE DE 11 % E ÂNGULO DA ZONA DE EXPANSÃO DE 33,62°

Tabela A3.1- Perfil Granulométrico das correntes e cálculo das eficiências. (TR = 5,34 min)

F = 10 Hz-3\3 ABERTO-1ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0	0					#DIV/0!
# 16	6,31	7,24	0					
# 32	22,99	43,02	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		3,71488	0,086	3,59936	97,684986
# 100	66,94	49,64	71,88					
F	3,76	0,1	28,12	Acm # 100	96,24	Alim.	A (Kg/hm2)	494
				Acm # 100	99,9	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	90,323786			
98,8	86	12,8						

F = 10 Hz-3\3 ABERTO-2ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0	0					#DIV/0!
# 16	7,43	6,16	0					
# 32	23,95	23,11	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		6,87148	0,1411	6,7613	97,946585
# 100	61,83	70,56	62,85					
F	6,79	0,17	37,15	Acm # 100	93,21	Alim.	A (Kg/hm2)	506
				Acm # 100	99,83	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	87,873551			
101,2	83	18,2						

F = 10 Hz-3\3 ABERTO-3ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0							#DIV/0!
# 16	10,45							
# 32	29,32			Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0				4,01988	0	0	100
# 100	56,06							
F	4,17			Acm # 100	95,83	Alim.	A (Kg/hm2)	482
				Acm # 100	0	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	100			
96,4	86	10,4						

F = 10 Hz-2\3 ABERTO-1ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	19,03	28,21	0
# 32	52,8	51,08	0
# 65	0	0	0
# 100	27,03	20,64	76,9
F	1,14	0,08	23,1

Q alim.	Q Class.	Q pó.
88,4	84	4,4

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	1,00776	0,0672	1,0164	93,331746

Acm # 100	98,86	Alim.	A (Kg/hm2)	442
-----------	-------	-------	------------	-----

Acm # 100	99,93	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	96,12826
------------	----------

F = 10 Hz-2\3 ABERTO-2ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	17,68	16,59	0
# 32	39,89	48,25	0
# 65	0	0	0
# 100	41,42	35,1	80,8
F	1,01	0,06	19,2

Q alim.	Q Class.	Q pó.
124,8	119	5,8

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	1,26048	0,0714	1,1136	94,335491

Acm # 100	98,99	Alim.	A (Kg/hm2)	624
-----------	-------	-------	------------	-----

Acm # 100	99,94	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	96,206558
------------	-----------

F = 10 Hz-2\3 ABERTO-3ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0,03	0	0
# 16	32,74	24,63	0
# 32	27,69	34,68	0
# 65	0	0	0
# 100	36,6	40,57	62,82
F	2,94	0,13	37,18

Q alim.	Q Class.	Q pó.
120,4	111	9,4

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	3,53976	0,1443	3,49492	95,923452

Acm # 100	97,06	Alim.	A (Kg/hm2)	602
-----------	-------	-------	------------	-----

Acm # 100	99,88	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	94,946887
------------	-----------

F = 10 Hz-1\3 ABERTO-1ª AMOSTRA

Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0,03	0	0
# 16	33,58	41,31	0
# 32	41,02	43,87	0
# 65	0	0	0
# 100	22,62	14,61	65,91
F	2,75	0,21	34,09

Q alim.	Q Class.	Q pó.
99,6	93	6,6

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	2,739	0,1953	2,24994	92,86966

Acm # 100	97,25	Alim.	A (Kg/hm2)	498
-----------	-------	-------	------------	-----

Acm # 100	99,79	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	95,508966
------------	-----------

F = 10 Hz-1\3 ABERTO-2ª AMOSTRA

Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	33,24	31,63	0
# 32	36,44	43,08	0
# 65	0	0	0
# 100	26,99	25,13	62,92
F	3,34	0,16	37,09

Q alim.	Q Class.	Q pó.
105,2	97	8,2

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	3,51368	0,1552	3,04138	95,582979

Acm # 100	96,67	Alim.	A (Kg/hm2)	526
-----------	-------	-------	------------	-----

Acm # 100	99,84	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	94,926647
------------	-----------

F = 10 Hz-1\3 ABERTO-3ª AMOSTRA

Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	23,69	29,86	0
# 32	46,96	46,03	0
# 65	0	0	0
# 100	27,44	23,78	66,89
F	1,94	0,33	33,1

Q alim.	Q Class.	Q pó.
104,8	99	5,8

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	2,03312	0,3267	1,9198	83,931101

Acm # 100	98,09	Alim.	A (Kg/hm2)	524
-----------	-------	-------	------------	-----

Acm # 100	99,67	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	96,225989
------------	-----------

Tabela A3.2- Perfil Granulométrico das correntes e cálculo das eficiências. (TR = 3,72 min)

F = 20 Hz-3\3 ABERTO-1ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,03	0,04	0					#DIV/0!
# 16	26,65	23,7	0					
# 32	32,31	36,6	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		7,2896	0,4356	7,29512	94,024363
# 100	37,76	39,44	62,78					
F	3,35	0,22	37,22	Acm # 100	96,75	Alim.	A (Kg/hm2)	1088
				Acm # 100	99,78	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	94,155229			
217,6	198	19,6						

F = 20 Hz-3\3 ABERTO-2ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,03	0,04	0					#DIV/0!
# 16	30,11	8,93	0					
# 32	30,85	39,49	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		5,14776	0,5432	4,96496	89,447838
# 100	39,6	51,26	71,79					
F	2,41	0,28	28,21	Acm # 100	100,59	Alim.	A (Kg/hm2)	1068
				Acm # 100	99,72	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	94,119415			
213,6	194	17,6						

F = 20 Hz-3\3 ABERTO-3ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,02	0	0					#DIV/0!
# 16	16,67	17,26	0					
# 32	40,51	39,36	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		0,4066	4,8114	5,4736	-1083,3251
# 100	42,62	40,95	65,79					
F	0,19	2,43	34,21	Acm # 100	99,82	Alim.	A (Kg/hm2)	1070
				Acm # 100	97,57	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	95,072252			
214	198	16						

F = 20 Hz-2\3 ABERTO-1ª AMOSTRA

Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0,02	0,05	0
# 16	19,32	21,85	0
# 32	37,67	40,42	0
# 65	0	0	0
# 100	36,34	37,54	42,63
F	6,64	0,14	57,37

Q alim.	Q Class.	Q pó.
254,8	228	26,8

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	16,91872	0,3192	15,37516	98,113332

Acm # 100	93,35	Alim.	A (Kg/hm2)	1274
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	99,86	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	95,196737
------------	-----------

F = 20 Hz-2\3 ABERTO-2ª AMOSTRA

Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0,01	0	0
# 16	14,34	17,71	0
# 32	35,82	45,7	0
# 65	0	0	0
# 100	45,83	34,43	38,83
F	4	0,13	61,17

Q alim.	Q Class.	Q pó.
290	272	18

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	11,6	0,3536	11,0106	96,951724

Acm # 100	96	Alim.	A (Kg/hm2)	1450
-----------	----	-------	------------	------

Acm # 100	97,84	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	97,48944
------------	----------

F = 20 Hz-2\3 ABERTO-3ª AMOSTRA

Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0,01	0,03	0
# 16	15,5	18,85	0
# 32	31,89	36,42	0
# 65	0	0	0
# 100	44,09	44,43	40,03
F	8,51	0,27	59,97

Q alim.	Q Class.	Q pó.
302,8	262	40,8

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	25,76828	0,7074	24,46776	97,254764

Acm # 100	91,49	Alim.	A (Kg/hm2)	1514
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	99,73	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	94,10456
------------	----------

F = 20 Hz-1\3 ABERTO-1ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,01	0,04	0					#DIV/0!
# 16	22,21	21,99	0					
# 32	31,56	35,86	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		0,06012	0,5642	7,02512	-838,45642
# 100	46,19	41,8	61,82					
F	0,03	0,31	38,18	Acm # 100	99,97	Alim.	A (Kg/hm2)	1002
				Acm # 100	99,69	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	94,322209			
200,4	182	18,4						

F = 20 Hz-1\3 ABERTO-2ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,01	0	0					#DIV/0!
# 16	8,57	14,26	0					
# 32	20,12	33,79	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		46,5102	2,2052	43,775	95,258674
# 100	47,81	50,46	12,45					
F	23,49	1,49	87,55	Acm # 100	76,51	Alim.	A (Kg/hm2)	990
				Acm # 100	98,51	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	95,890812			
198	148	50						

F = 20 Hz-1\3 ABERTO-3ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0,03	0					#DIV/0!
# 16	7,24	1,11	0					
# 32	16,34	22,35	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		65,24316	7,6076	56,93424	88,339621
# 100	46,7	71,57	13,21					
F	29,71	4,94	86,79	Acm # 100	70,28	Alim.	A (Kg/hm2)	1098
				Acm # 100	95,06	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	94,385093			
219,6	154	65,6						

Tabela A3.3- Perfil Granulométrico das correntes e cálculo das eficiências. (TR = 2,09 min)

F = 30 Hz-3\3 ABERTO-1ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0	0					#DIV/0!
# 16	20,78	24,07	0					
# 32	32,51	39,01	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		21,34552	1,9126	18,22872	91,039806
# 100	40,12	36,19	69,82					
F	6,58	0,73	30,18	Acm # 100	93,41	Alim.	A (Kg/hm2)	1622
				Acm # 100	99,27	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	86,083098			
324,4	262	60,4						

F = 30 Hz-3\3 ABERTO-2ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0	0					#DIV/0!
# 16	11,4	16,04	0					
# 32	33,91	34,37	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		14,96668	2,1846	13,3751	85,403576
# 100	50,5	48,92	48,95					
F	4,19	0,66	51,05	Acm # 100	95,81	Alim.	A (Kg/hm2)	1786
				Acm # 100	99,33	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	96,252586			
357,2	331	26,2						

F = 30 Hz-3\3 ABERTO-3ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0	0					#DIV/0!
# 16	15,25	21,6	0					
# 32	32,17	35,47	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		26,9496	4,5188	21,5496	83,232404
# 100	43,73	41,35	26,2					
F	8,55	1,58	73,8	Acm # 100	91,15	Alim.	A (Kg/hm2)	1576
				Acm # 100	98,42	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	97,337183			
315,2	286	29,2						

F = 30 Hz-2\3 ABERTO-1ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0,01	0	0
# 16	11,26	16,25	0
# 32	18,69	25,92	0
# 65	0	0	0
# 100	46,42	51,9	24,74
F	23,62	5,93	75,26

Q alim.	Q Class.	Q pó.
398,8	300	98,8

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	94,19656	17,79	74,35688	81,11396

Acm # 100	76,38	Alim.	A (Kg/hm2)	1994
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	94,07	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	91,975429
------------	-----------

F = 30 Hz-2\3 ABERTO-2ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	11,52	11,52	0
# 32	19,42	19,42	0
# 65	0	0	0
# 100	47,17	54,14	19,32
F	21,88	21,86	80,68

Q alim.	Q Class.	Q pó.
378,8	362	16,8

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	82,88144	79,1332	13,55424	4,5224118

Acm # 100	78,11	Alim.	A (Kg/hm2)	1894
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	85,08	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	98,903017
------------	-----------

F = 30 Hz-2\3 ABERTO-3ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	8,79	13,64	0
# 32	15,18	22,6	0
# 65	0	0	0
# 100	54,14	57,62	19,37
F	21,89	6,14	80,63

Q alim.	Q Class.	Q pó.
331,6	264	67,6

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	72,58724	16,2096	54,50588	77,668802

Acm # 100	78,11	Alim.	A (Kg/hm2)	1658
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	93,86	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	94,944604
------------	-----------

F = 30 Hz-1\3 ABERTO-1ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	10,36	13,46	0
# 32	28,87	27,71	0
# 65	0	0	0
# 100	49,84	57,66	24,66
F	10,94	1,17	75,34

Q alim.	Q Class.	Q pó.
344,8	300	44,8

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	37,72112	3,51	33,75232	90,694868

Acm # 100	89,07	Alim.	A (Kg/hm2)	1724
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	98,83	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	96,402735
------------	-----------

F = 30 Hz-1\3 ABERTO-2ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	6,21	4,33	0
# 32	25,86	38,3	0,04
# 65	0	0	0
# 100	58,74	49,93	31,01
F	9,19	0,44	68,91

Q alim.	Q Class.	Q pó.
348,4	300	48,4

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	32,01796	1,32	33,35244	95,877314

Acm # 100	90,81	Alim.	A (Kg/hm2)	1742
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	92,56	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	95,249983
------------	-----------

F = 30 Hz-1\3 ABERTO-3ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	11,1	22,22	0
# 32	23,1	42,08	0,08
# 65	0	0	0
# 100	50,2	34,21	25,63
F	15,59	1,49	74,31

Q alim.	Q Class.	Q pó.
358,8	288	70,8

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	55,93692	4,2912	52,61148	92,328501

Acm # 100	84,4	Alim.	A (Kg/hm2)	1794
-----------	------	-------	------------	------

Acm # 100	98,51	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	93,989087
------------	-----------

ANEXO IV

RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS COM CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS PARA

POROSIDADE DE 6 % E ÂNGULO DA ZONA DE EXPANSÃO DE 33,62°

Tabela A4.1- Perfil Granulométrico das correntes e cálculo das eficiências. (TR = 5,34 min)

F = 10 Hz-3\3 ABERTO-1ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0	0					#DIV/0!
# 16	26,05	13,12	0					
# 32	50,51	29,32	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		0,0784	0,8692	7,0608	-1008,6735
# 100	23,36	56,5	55,77					
F	0,08	1,06	44,13	Acm # 100	99,92	Alim.	A (Kg/hm2)	490
				Acm # 100	98,94	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	90,887404			
98	82	16						

F = 10 Hz-3\3 ABERTO-2ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0	0					#DIV/0!
# 16	20,35	17,25	0					
# 32	36,65	40,11	0,02	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		3,41248	0,2457	3,20456	92,799958
# 100	39,56	42,37	60,9					
F	3,44	0,27	39,08	Acm # 100	96,56	Alim.	A (Kg/hm2)	496
				Acm # 100	99,73	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	94,784874			
99,2	91	8,2						

F = 10 Hz-3\3 ABERTO-3ª AMOSTRA								
Gran.				Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0,01	0					#DIV/0!
# 16	4,87	13,99	0					
# 32	14,74	31,7	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		17,391	0,17	16,422	99,022483
# 100	63,34	54,05	51,7					
F	17,05	0,25	48,3	Acm # 100	82,95	Alim.	A (Kg/hm2)	510
				Acm # 100	99,75	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	79,224432			
102	68	34						

F = 10 Hz-2\3 ABERTO-1ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	12,06	16,62	0
# 32	27,29	34,64	0
# 65	0	0	0
# 100	52,56	48,56	63,29
F	8,09	0,18	36,71

Q alim.	Q Class.	Q pó.
117,2	92	25,2

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	9,48148	0,1656	9,25092	98,253437

Acm # 100	91,91	Alim.	A (Kg/hm2)	586
-----------	-------	-------	------------	-----

Acm # 100	99,82	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	85,193744
------------	-----------

F = 10 Hz-2\3 ABERTO-2ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	4,3	6,76	0
# 32	12,24	17,71	0
# 65	0	0	0
# 100	65,36	74,67	60,08
F	18,1	0,86	39,92

Q alim.	Q Class.	Q pó.
152,4	94	58,4

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	27,5844	0,8084	23,31328	97,069358

Acm # 100	81,9	Alim.	A (Kg/hm2)	762
-----------	------	-------	------------	-----

Acm # 100	99,14	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	71,889155
------------	-----------

F = 10 Hz-2\3 ABERTO-3ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0,02	0
# 16	10,18	17,98	0
# 32	21,27	33,12	0
# 65	0	0	0
# 100	59,88	48,39	70,21
F	8,67	0,49	29,79

Q alim.	Q Class.	Q pó.
136,4	100	36,4

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	11,82588	0,49	10,84356	95,856545

Acm # 100	91,33	Alim.	A (Kg/hm2)	682
-----------	-------	-------	------------	-----

Acm # 100	99,51	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	79,484952
------------	-----------

F = 10 Hz-1\3 ABERTO-1ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0,01	0
# 16	10,89	19,51	0
# 32	19,42	31,95	0,01
# 65	0	0	0
# 100	59,03	47,52	62,55
F	10,66	1,01	37,44

Q alim.	Q Class.	Q pó.
108	80	28

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!
Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	11,5128	0,808	10,4832	92,981725
Acm # 100	89,34	Alim.	A (Kg/hm2)	540
Acm # 100	98,99	Class.		

Efic. Rec.	81,845468
------------	-----------

F = 10 Hz-1\3 ABERTO-2ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	12,03	10,41	0
# 32	25,38	25,57	0
# 65	0	0	0
# 100	52,16	61,76	61,19
F	10,43	2,26	38,81

Q alim.	Q Class.	Q pó.
115,6	88	27,6

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!
Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	12,05708	1,9888	10,71156	83,505127
Acm # 100	89,57	Alim.	A (Kg/hm2)	578
Acm # 100	97,74	Class.		

Efic. Rec.	83,68943
------------	----------

F = 10 Hz-1\3 ABERTO-3ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09		0	0
# 16		10,63	0
# 32		31,26	0
# 65		0	0
# 100		55,94	44,13
F		2,17	55,87

Q alim.	Q Class.	Q pó.
112	90	22

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!
Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	0	1,953	12,2914	#DIV/0!
Acm # 100	0	Alim.	A (Kg/hm2)	560
Acm # 100	97,83	Class.		

Efic. Rec.	#DIV/0!
------------	---------

Tabela A3.2- Perfil Granulométrico das correntes e cálculo das eficiências. (TR = 3,72 min)

F = 20 Hz-3\3 ABERTO-1ª AMOSTRA								
Gran.				Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0	0					#DIV/0!
# 16	11,57	11,87	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 32	24,14	28,18	0		22,9146	2,1894	21,462	90,445393
# 65	0	0	0					
# 100	53,74	58,72	45,25					
F	10,55	1,23	54,75	Acm # 100	89,45	Alim.	A (Kg/hm2)	1086
				Acm # 100	98,77	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	90,870132			
217,2	178	39,2						

F = 20 Hz-3\3 ABERTO-2ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0,04	0					#DIV/0!
# 16	7,56	14,29	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 32	28,76	36,05	0		13,78628	0,9152	12,1014	93,361516
# 65	0	0	0					
# 100	57,09	49,1	63,55					
F	6,59	0,52	36,45	Acm # 100	93,41	Alim.	A (Kg/hm2)	1046
				Acm # 100	99,48	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	89,203112			
209,2	176	33,2						

F = 20 Hz-3\3 ABERTO-3ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0	0					#DIV/0!
# 16	5,6	7,26	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 32	16,97	25,49	0		16,70632	1,425	14,98112	91,470294
# 65	0	0	0					
# 100	68,71	66,5	50,72					
F	7,58	0,75	49,28	Acm # 100	91,28	Alim.	A (Kg/hm2)	1102
				Acm # 100	99,25	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	92,335822			
220,4	190	30,4						

F = 20 Hz-2\3 ABERTO-1ª AMOSTRA

Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	5,72	5,89	0
# 32	13,31	17,38	0
# 65	0	0	0
# 100	60,36	72,3	44,79
F	20,61	4,43	55,21

Q alim.	Q Class.	Q pó.
250,8	174	76,8

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	51,68988	7,7082	42,40128	85,087603

Acm # 100	79,39	Alim.	A (Kg/hm2)	1254
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	95,57	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	82,723771
------------	-----------

F = 20 Hz-2\3 ABERTO-2ª AMOSTRA

Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	7,7	5,64	0
# 32	25,64	17,98	0
# 65	0	0	0
# 100	51,16	72,54	51,65
F	15,5	3,84	48,35

Q alim.	Q Class.	Q pó.
255,2	190	65,2

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	39,556	7,296	31,5242	81,555263

Acm # 100	84,5	Alim.	A (Kg/hm2)	1276
-----------	------	-------	------------	------

Acm # 100	96,16	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	84,383614
------------	-----------

F = 20 Hz-2\3 ABERTO-3ª AMOSTRA

Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	5,21	8,06	0
# 32	20,79	24,72	0
# 65	0	0	0
# 100	67,69	66,04	59,55
F	6,31	1,18	40,45

Q alim.	Q Class.	Q pó.
221,2	194	27,2

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	13,95772	2,2892	11,0024	83,599041

Acm # 100	93,69	Alim.	A (Kg/hm2)	1106
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	98,82	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	92,18422
------------	----------

F = 20 Hz-1\3 ABERTO-1ª AMOSTRA

Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0,02	0
# 16	14,74	10,28	0
# 32	24	27,61	0
# 65	0	0	0
# 100	53,68	59,9	37,1
F	7,58	2,19	62,9

Q alim.	Q Class.	Q pó.
236,4	216	20,4

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	17,91912	4,7304	12,8316	73,601382

Acm # 100	92,42	Alim.	A (Kg/hm2)	1182
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	97,81	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	96,535898
------------	-----------

F = 20 Hz-1\3 ABERTO-2ª AMOSTRA

Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	6,05	11,92	0
# 32	18,33	30,23	0
# 65	0	0	0
# 100	63,84	55,8	32,41
F	11,78	2,05	67,59

Q alim.	Q Class.	Q pó.
217,6	184	33,6

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	25,63328	3,772	22,71024	85,284755

Acm # 100	88,22	Alim.	A (Kg/hm2)	1088
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	97,95	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	94,327267
------------	-----------

F = 20 Hz-1\3 ABERTO-3ª AMOSTRA

Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	15,75	16,58	0
# 32	20,43	34,95	0
# 65	0	0	0
# 100	50,34	45,25	33,21
F	13,48	3,22	66,79

Q alim.	Q Class.	Q pó.
224,8	190	34,8

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	30,30304	6,118	23,24292	79,810606

Acm # 100	86,52	Alim.	A (Kg/hm2)	1124
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	96,78	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	94,057964
------------	-----------

Tabela A3.3- Perfil Granulométrico das correntes e cálculo das eficiências. (TR = 2,09 min)

F = 30 Hz-3\3 ABERTO-1ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0	0					#DIV/0!
# 16	12,4	7,65	0					
# 32	25,09	19,43	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		30,448	17,9612	11,762	41,010247
# 100	53,86	67,51	41,19					
F	8,65	5,41	58,81	Acm # 100	91,35	Alim.	A (Kg/hm2)	1760
				Acm # 100	94,59	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	97,43805			
352	332	20						

F = 30 Hz-3\3 ABERTO-2ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0	0					#DIV/0!
# 16	5,77	10,84	0					
# 32	18,82	25,2	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		44,23208	9,1485	35,02532	79,317048
# 100	62,23	60,75	30,78					
F	13,18	3,21	69,22	Acm # 100	86,82	Alim.	A (Kg/hm2)	1678
				Acm # 100	96,79	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	94,654635			
335,6	285	50,6						

F = 30 Hz-3\3 ABERTO-3ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0	0					#DIV/0!
# 16	22,31	13,33	0					
# 32	31	43,23	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		21,60896	2,158	19,98864	90,013402
# 100	39,33	42,61	40,44					
F	7,36	0,83	59,49	Acm # 100	92,64	Alim.	A (Kg/hm2)	1468
				Acm # 100	99,17	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	95,004306			
293,6	260	33,6						

F = 30 Hz-2\3 ABERTO-1ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0,04	0
# 16	10,82	25,37	0
# 32	23,86	29,64	0
# 65	0	0	0
# 100	56,56	43,25	44,97
F	8,76	1,7	55,03

Q alim.	Q Class.	Q pó.
374	326	48

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	32,7624	5,542	26,4144	83,084267

Acm # 100	91,24	Alim.	A (Kg/hm2)	1870
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	98,3	Class.		
-----------	------	--------	--	--

Efic. Rec.	93,67432
------------	----------

F = 30 Hz-2\3 ABERTO-2ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0	0
# 16	23,35	20,19	0
# 32	35,42	34,02	0
# 65	0	0	0
# 100	35,73	44,69	62,82
F	5,5	1,1	37,18

Q alim.	Q Class.	Q pó.
352	308	44

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	19,36	3,388	16,3592	82,5

Acm # 100	94,5	Alim.	A (Kg/hm2)	1760
-----------	------	-------	------------	------

Acm # 100	98,9	Class.		
-----------	------	--------	--	--

Efic. Rec.	91,690476
------------	-----------

F = 30 Hz-2\3 ABERTO-3ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0,02	0
# 16	19,97	14,7	0
# 32	23,36	26,2	0
# 65	0	0	0
# 100	49,46	54,3	71,79
F	7,21	4,78	28,21

Q alim.	Q Class.	Q pó.
341,2	284	37,2

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	24,60052	13,5752	10,49412	44,817427

Acm # 100	92,79	Alim.	A (Kg/hm2)	1706
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	95,22	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	91,564775
------------	-----------

F = 30 Hz-1\3 ABERTO-1ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0,02	0
# 16	19,53	18,54	0
# 32	33,3	33,36	0
# 65	0	0	0
# 100	40,74	46,15	66,9
F	6,43	1,93	33,03

Q alim.	Q Class.	Q pó.
316,4	268	48,4

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	20,34452	5,1724	15,98652	74,575955

Acm # 100	93,57	Alim.	A (Kg/hm2)	1582
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	98,07	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	89,062996
------------	-----------

F = 30 Hz-1\3 ABERTO-2ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0,03	0
# 16	13,81	12,56	0
# 32	26,79	22,77	0
# 65	0	0	0
# 100	50,89	58,64	38,83
F	8,51	6	61,17

Q alim.	Q Class.	Q pó.
329,2	313	16,2

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	28,01492	18,78	9,90954	32,964292

Acm # 100	91,49	Alim.	A (Kg/hm2)	1646
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	94	Class.		
-----------	----	--------	--	--

Efic. Rec.	97,91143
------------	----------

F = 30 Hz-1\3 ABERTO-3ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0	0,02	0
# 16	21,37	18,37	0
# 32	35,3	31,62	0
# 65	0	0	0
# 100	40,19	48,76	37,8
F	3,14	1,23	62,16

Q alim.	Q Class.	Q pó.
362,4	350	12,4

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
				#DIV/0!

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	11,37936	4,305	7,70784	62,168347

Acm # 100	96,86	Alim.	A (Kg/hm2)	1812
-----------	-------	-------	------------	------

Acm # 100	98,77	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	98,664694
------------	-----------

ANEXO V

RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS COM CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS PARA
POROSIDADE DE 11 % E ÂNGULO DA ZONA DE EXPANSÃO DE 4,6°

Tabela A5.1- Perfil Granulométrico das correntes e cálculo das eficiências. (TR = 5,34 min)

F = 10 Hz - 1ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,08	0,1	0,02		2,548504	0,055181	2,438	97,834769
# 16	34,92	38,44	0,06					
# 32	33,13	38,29	0,1	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	25,13	23,05	52,76		3,5861092	0,039415	3,298614	98,900898
# 100	2,8	0,07	20					
F	3,94	0,05	27,06	Acm # 100	96,06	Alim.	A (Kg/hm2)	455,09
				Acm # 100	99,95	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	89,8305			
91,018	78,83	12,19						

F = 10 Hz - 2ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,11	0,09	0,02		3,02346	0,024249	2,987138	99,197972
# 16	34,52	35,44	0,04					
# 32	35,66	42,8	0,07	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	23,5	21,61	49,74		2,56536	0,024249	2,416876	99,054753
# 100	3,3	0,03	27,71					
F	2,8	0,03	22,42	Acm # 100	97,09	Alim.	A (Kg/hm2)	458,1
				Acm # 100	99,97	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	90,598357			
91,62	80,83	10,78						

F = 10 Hz - 3ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,06	0,09	0,04		3,2406	0,077238	2,948952	97,616552
# 16	25,02	36,39	0,06					
# 32	40,06	43,26	0,06	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	27,08	20,14	46,76		4,39936	0,025746	4,153152	99,414779
# 100	3,3	0,09	22,04					
F	4,48	0,03	31,04	Acm # 100	95,52	Alim.	A (Kg/hm2)	491
				Acm # 100	99,97	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	90,163342			
98,2	85,82	13,38						

Tabela A5.2- Perfil Granulométrico das correntes e cálculo das eficiências. (TR = 3,72 min)

F = 20 Hz - 1ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,07	0,05	0,03		4,341576	0,38203	4,294797	91,200661
# 16	31,32	28,92	0,05					
# 32	37,56	44,53	0,1	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	25,01	26,24	32,93		7,159792	0,06946	6,922656	99,02986
# 100	2,28	0,22	25,61					
F	3,76	0,04	41,28	Acm # 100	96,24	Alim.	A (Kg/hm2)	952,1
				Acm # 100	99,96	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	94,626578			
190,42	173,65	16,77						

F = 20 Hz - 2ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,05	0,12	0,06		5,71914	0,544908	5,254425	90,472204
# 16	37,24	36,13	0,05					
# 32	36,25	40,94	0,09	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	20,88	22,48	31,85		6,94467	0,146706	6,54849	97,887502
# 100	2,52	0,26	30,25					
F	3,06	0,07	37,7	Acm # 100	96,94	Alim.	A (Kg/hm2)	1134,75
				Acm # 100	99,93	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	95,081251			
226,95	209,58	17,37						

F = 20 Hz - 3ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,05	0,12	0,02		5,441792	0,229944	5,097472	95,77448
# 16	40,46	39,47	0,04					
# 32	32,48	36,69	0,09	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	22,11	23,56	40,35		7,524978	0,076648	7,373728	98,981419
# 100	2,56	0,12	24,32					
F	3,54	0,04	35,18	Acm # 100	97,66	Alim.	A (Kg/hm2)	1062,85
				Acm # 100	99,96	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	93,455423			
212,57	191,62	20,96						

Tabela A5.3- Perfil Granulométrico das correntes e cálculo das eficiências. (TR = 2,09 min)

F = 30 Hz - 1ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0	0		123,01098	110,786	12,37464	9,938121
# 16	19,31	13,33	0					
# 32	31	43,23	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		21,38816	2,158	18,20394	89,910306
# 100	42,33	42,61	40,44					
F	7,36	0,83	59,49	Acm # 100	92,64	Alim.	A (Kg/hm ²)	1453
				Acm # 100	99,17	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	95,403382			
290,6	260	30,6						

F = 30 Hz - 2ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0,04	0		171,8064	140,13	20,2365	18,437264
# 16	20,82	25,37	0					
# 32	23,86	29,64	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		32,3244	5,508	24,7635	82,960241
# 100	46,56	43,25	44,97					
F	8,76	1,7	55,03	Acm # 100	91,24	Alim.	A (Kg/hm ²)	1845
				Acm # 100	98,3	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	93,989318			
369	324	45						

F = 30 Hz - 3ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0	0	0		134,7804	114,5776	27,6408	14,98942
# 16	23,35	27,19	0					
# 32	32,42	34,02	0	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	0	0	0		19,14	3,344	16,3592	82,528736
# 100	38,73	37,69	62,82					
F	5,5	1,1	37,18	Acm # 100	94,5	Alim.	A (Kg/hm ²)	1740
				Acm # 100	98,9	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	91,594964			
348	304	44						

ANEXO VI

RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS COM CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS PARA

POROSIDADE DE 6 % E ÂNGULO DA ZONA DE EXPANSÃO DE 4,6°

Tabela A6.1- Perfil Granulométrico das correntes e cálculo das eficiências. (TR = 5,34 min)

F = 10 Hz - 1ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,08	0,02	0		1,48341	0,600007	0,839188	59,55218
# 16	23,76	22,71	0,06					
# 32	44,7	37,53	0,07	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	28,1	38,81	41,18		1,04667	0,07229	0,927381	93,093334
# 100	1,97	0,83	27,88					
F	1,39	0,1	30,81	Acm # 100	98,61	Alim.	A (Kg/hm ²)	376,5
				Acm # 100	99,9	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	97,195252			
75,3	72,29	3,01						

F = 10 Hz - 2ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,04	0,05	0		2,06745	0,801192	1,10064	61,247334
# 16	20,01	25,37	0					
# 32	40,74	41,56	0,08	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	34,5	31,61	20,95		0,883365	0,048192	0,79464	94,544497
# 100	3,3	1,33	45,86					
F	1,41	0,08	33,11	Acm # 100	98,59	Alim.	A (Kg/hm ²)	313,25
				Acm # 100	99,92	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	97,400927			
62,65	60,24	2,4						

F = 10 Hz - 3ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,04	0,05	0		2,49243	1,893736	0,582736	24,020494
# 16	24,22	19,63	0					
# 32	32,13	32,38	0,04	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	35,14	44,24	3,42		3,88548	0,780624	2,503718	79,9092
# 100	3,31	2,62	19,36					
F	5,16	1,08	83,18	Acm # 100	94,84	Alim.	A (Kg/hm ²)	376,5
				Acm # 100	98,92	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	99,038176			
75,3	72,28	3,01						

F = 10 Hz - 4ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,02	0,05	0,04		15,576356	14,430315	0,514839	7,3575681
# 16	21,41	24,3	17,3					
# 32	27,73	31,66	33,95	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	33,05	32,16	44,89		18,299362	6,11248	0,125775	66,597305
# 100	8,18	8,31	3,07					
F	9,61	3,52	0,75	Acm # 100	90,39	Alim.	A (Kg/hm ²)	952,1
				Acm # 100	96,48	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	90,329907			
190,42	173,65	16,77						

Tabela A6.2- Perfil Granulométrico das correntes e cálculo das eficiências. (TR = 3,72 min)

F = 20 Hz - 1ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,04	0,06	0		5,603671	2,6205	3,30426	53,236013
# 16	17,3	19,31	0					
# 32	33,95	41,7	0,04	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	43,89	37,22	20,22		3,194275	0,36687	2,939382	88,514765
# 100	3,07	1,5	42,2					
F	1,75	0,21	37,54	Acm # 100	90,39	Alim.	A (Kg/hm ²)	912,65
				Acm # 100	96,48	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	97,272926			
182,53	174,7	7,83						

F = 20 Hz - 2ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,06	0,02	0		10,969308	6,75135	3,826042	38,452362
# 16	11	13,87	0,02					
# 32	26,23	33,56	0,03	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	51,48	47,63	3,9		9,258168	1,45029	9,063868	84,335022
# 100	6,09	4,05	28,51					
F	5,14	0,87	67,54	Acm # 100	94,86	Alim.	A (Kg/hm ²)	900,6
				Acm # 100	99,13	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	97,450494			
180,12	166,7	13,42						

F = 20 Hz - 3ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,06	0,03	0		6,301633	5,609255	0,87129	10,987279
# 16	23,62	25,49	0					
# 32	36,82	37,66	0,03	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	32,27	32,07	4,18		5,719688	2,06912	3,544629	63,8246
# 100	3,79	3,47	18,9					
F	3,44	1,28	76,89	Acm # 100	96,56	Alim.	A (Kg/hm2)	831,35
				Acm # 100	98,72	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	99,336425			
166,27	161,65	4,61						

F = 20 Hz - 4ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,04	0,03	0		21,817616	18,85367	2,414544	13,585105
# 16	22,82	24,84	0					
# 32	20,62	24,17	0,04	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	32,48	35,01	0,97		22,85832	8,21348	13,562442	64,067876
# 100	11,74	11,11	14,96					
F	12,3	4,84	84,03	Acm # 100	87,7	Alim.	A (Kg/hm2)	929,2
				Acm # 100	95,16	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	98,418498			
185,84	169,7	16,14						

Tabela A6.3- Perfil Granulométrico das correntes e cálculo das eficiências. (TR = 2,09 min)

F = 30 Hz - 1ª AMOSTRA								
Gran.	Alim.	Class.	Pó	Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 09	0,06	0,02	0		7,117815	5,220286	1,112	26,658869
# 16	20,76	15,86	0					
# 32	35,97	36,17	0,04	Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
# 65	38,61	45,44	5,53		4,964085	1,266307	3,6095	74,490626
# 100	2,71	2,02	22,24					
F	1,89	0,49	72,19	Acm # 100	75,96	Alim.	A (Kg/hm2)	1313,25
				Acm # 100	84,05	Class.		
Q alim.	Q Class.	Q pó.		Efic. Rec.	99,46039			
262,65	258,43	5						

F = 30 Hz - 2ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0,05	0,03	0
# 16	21,39	16,53	0
# 32	30,54	31,91	0,03
# 65	39,22	46,24	0,4
# 100	3,8	3,38	10
F	5	1,91	89,57

Q alim.	Q Class.	Q pó.
292,77	283,16	9,61

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	11,12526	9,570808	0,961	13,972276

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	14,6385	5,408356	8,607677	63,053892

Acm # 100	95	Alim.	A (Kg/hm2)	1463,85
-----------	----	-------	------------	---------

Acm # 100	98,09	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	99,639623
------------	-----------

F = 30 Hz - 3ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0,1	0,01	0
# 16	13,45	14,84	0
# 32	21,04	25,28	0,02
# 65	35,92	39,75	1,12
# 100	10,8	11,2	5,63
F	18,69	8,92	93,23

Q alim.	Q Class.	Q pó.
309,04	273,13	35,9

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	33,37632	30,59056	2,02117	8,3465163

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	57,759576	24,363196	33,46957	57,819642

Acm # 100	81,31	Alim.	A (Kg/hm2)	1545,2
-----------	-------	-------	------------	--------

Acm # 100	91,08	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	99,032782
------------	-----------

F = 30 Hz - 4ª AMOSTRA			
Gran.	Alim.	Class.	Pó
# 09	0,05	0,04	0
# 16	17,46	18,88	0,02
# 32	24,78	28,11	0,02
# 65	38,11	43,27	2,05
# 100	9	8,32	15,68
F	10,6	2,38	82,23

Q alim.	Q Class.	Q pó.
288,55	257,11	31,45

Malha 100	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	25,9695	21,391552	4,93136	17,628172

Fundo	Finos Al.	Finos Class.	Finos Pó	Efc.
	30,5863	6,119218	25,861335	79,993598

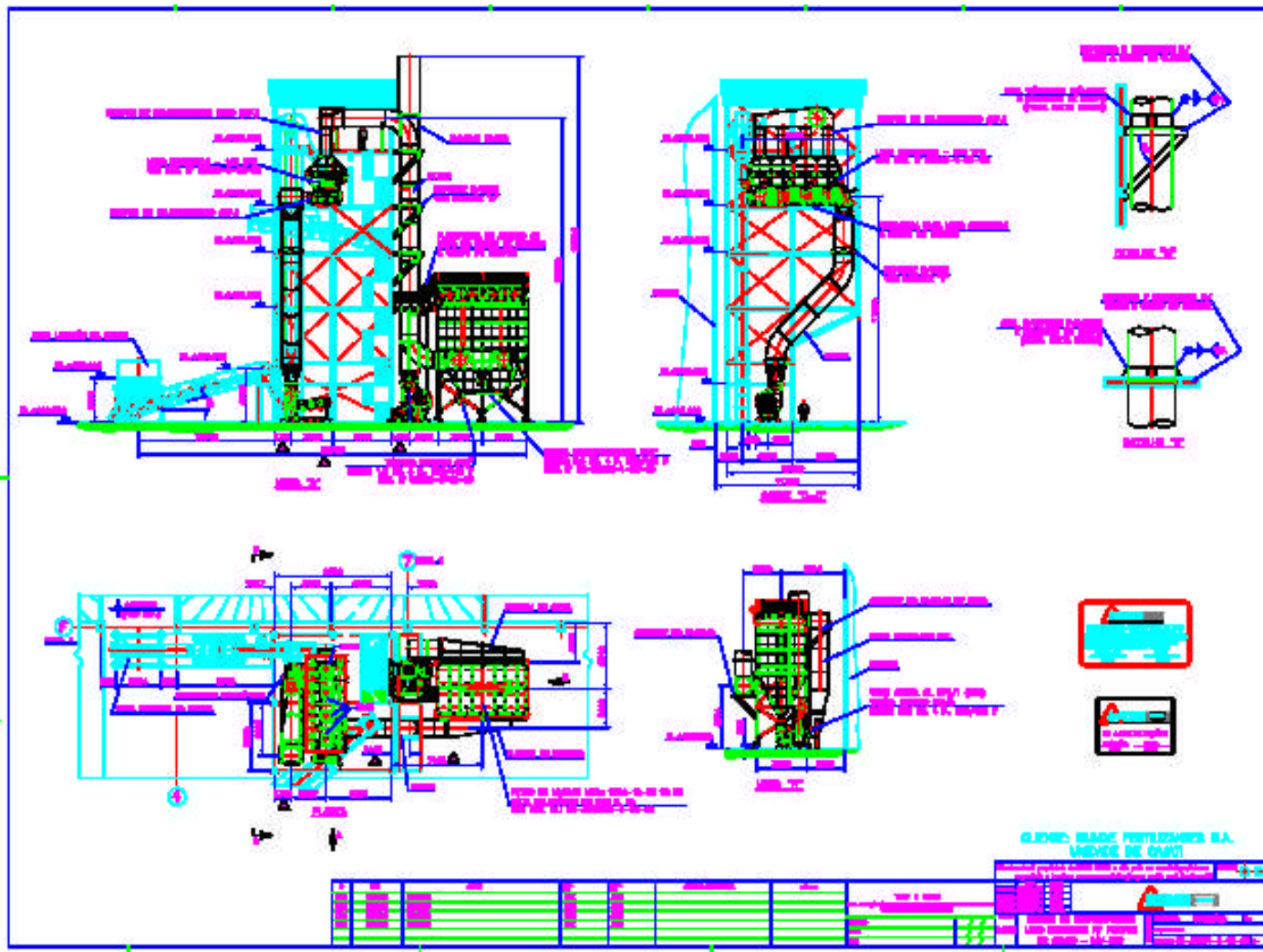
Acm # 100	89,4	Alim.	A (Kg/hm2)	1442,75
-----------	------	-------	------------	---------

Acm # 100	98,62	Class.		
-----------	-------	--------	--	--

Efic. Rec.	97,833546
------------	-----------

ANEXO VII

SISTEMA INDUSTRIAL DE CAJATI



Sistema de Despolimento Lento Fluidizado para Forno de Cálculo
 Composto de:
 Filtro de 780 Menges;
 Leito Fluidizado - 100 TPH;
 Ventilador Centrífugo 200 CV

BUNGE - CAJATI





Figura A7.1- Vista Lateral do Corpo do Leito Fluidizado Industrial



Figura A7.2- Pó Elutriado – Sistema em Operação com Alimentação de 60 Ton/h

ANEXO VIII

VALORES PREDITOS x OBSERVADOS PARA EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO E EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO

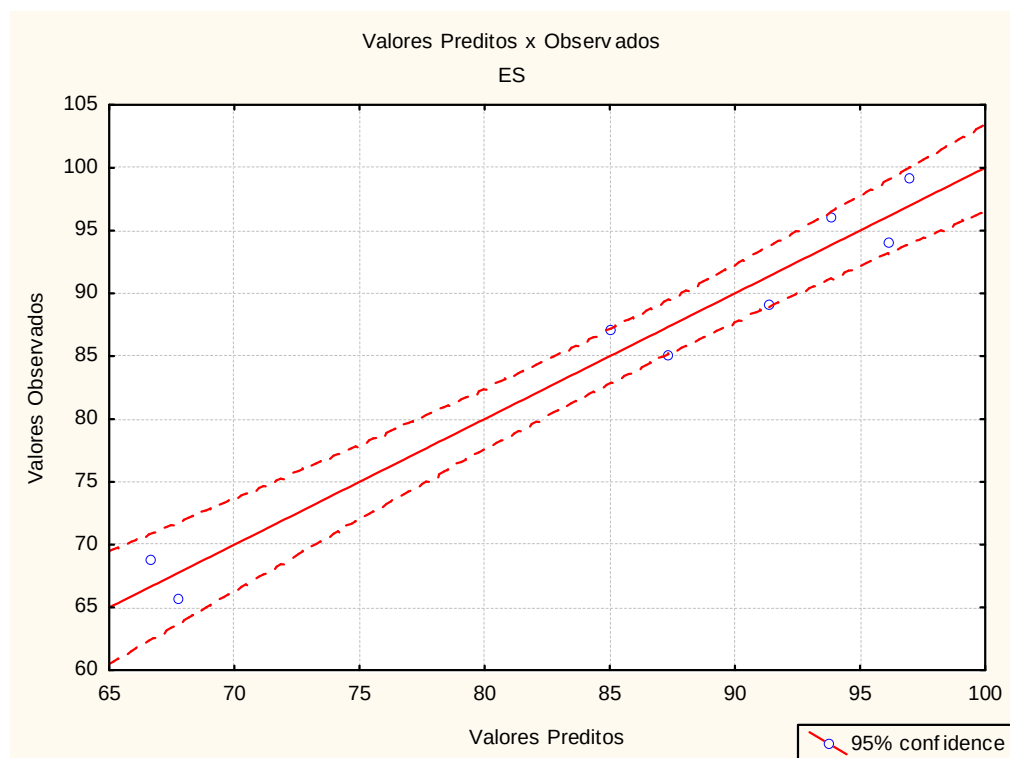


Figura A8.1 – Valores Preditos x Observados para a Eficiência de Separação (ES)

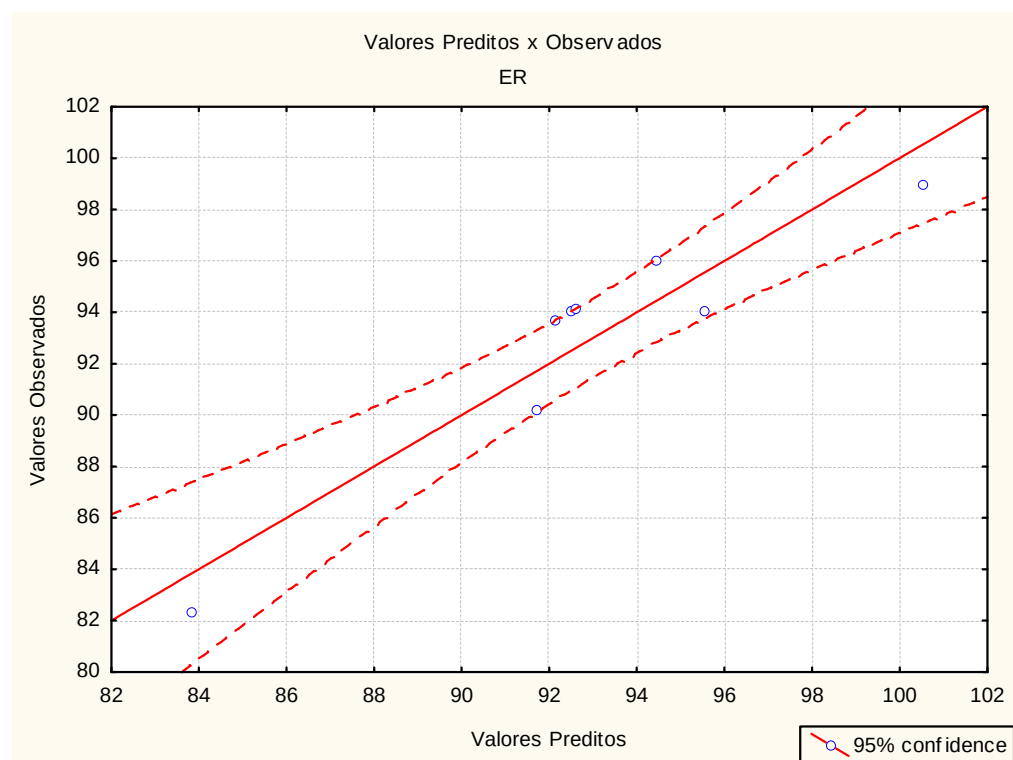


Figura A8.2 – Valores Preditos x Observados para a Eficiência de Recuperação (ER)