

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Luis Enrique
Brossard González E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 17/06/2001


ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ALIMENTADOR DE BIOMASSA POLIDISPERSA

Autor: Luis Enrique Brossard González

Orientador: Prof. Dr. Luis Augusto Barbosa Cortez

Co-Orientador: Prof. Dr. Oscar Antonio Braunbeck

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIDADE B.P.
Nº CHAMADA T/UNICAMP
B793a
V EX
TOMBO BC/50441
PROC 16-837102
C DX
PREÇO R\$ 11,00
DATA 20/08/02
Nº CFD

CM00172166-4

BIB ID 252321

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA INTERDISCIPLINAR DE PLANEJAMENTO
ENERGÉTICO

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ALIMENTADOR DE BIOMASSA POLIDISPERSA

Autor: Luis Enrique Brossard González

Orientador: Prof. Dr. Luis Augusto Barbosa Cortez

Co-Orientador: Prof. Dr. Oscar Antonio Braunbeck

Curso: Engenharia Mecânica

Área de concentração: Planejamento Energético

Dissertação de mestrado apresentada à Comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2001 S.P - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

B793d Brossard Gonzáles, Luis Enrique
Desenvolvimento de um protótipo de alimentador de
biomassa polidispersa / Luis Enrique Brossard
González.--Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientadores: Luis Augusto Barbosa Cortez, Oscar
Antonio Braunbeck.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Biomassa. 2. Silos. I. Cortez, Luis Augusto
Barbosa. II. Braunbeck, Oscar Antonio. III.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

Dissertação de Mestrado

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO
DE ALIMENTADOR DE BIOMASSA
POLIDISPERSA**

Autor: Luis Enrique Brossard González

Orientador: Prof. Dr. Luís Augusto Barbosa Cortez

Co-Orientador: Prof. Dr. Oscar Antonio Braunbeck

Prof. Dr. Luís Augusto Barbosa Cortez

Faculdade de Engenharia Agrícola-UNICAMP

Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez

Faculdade de Engenharia Mecânica-UNICAMP

Prof. Dr. Guilherme Bezzon

Universidade Paulista-UNIP



Dedicatória:

A meus pais por ter dado a vida e apoio em todos os momento de minha vida, à minha esposa pelo seu amor e compreensão, à minha irmã e avô por seu carinho e apoio.

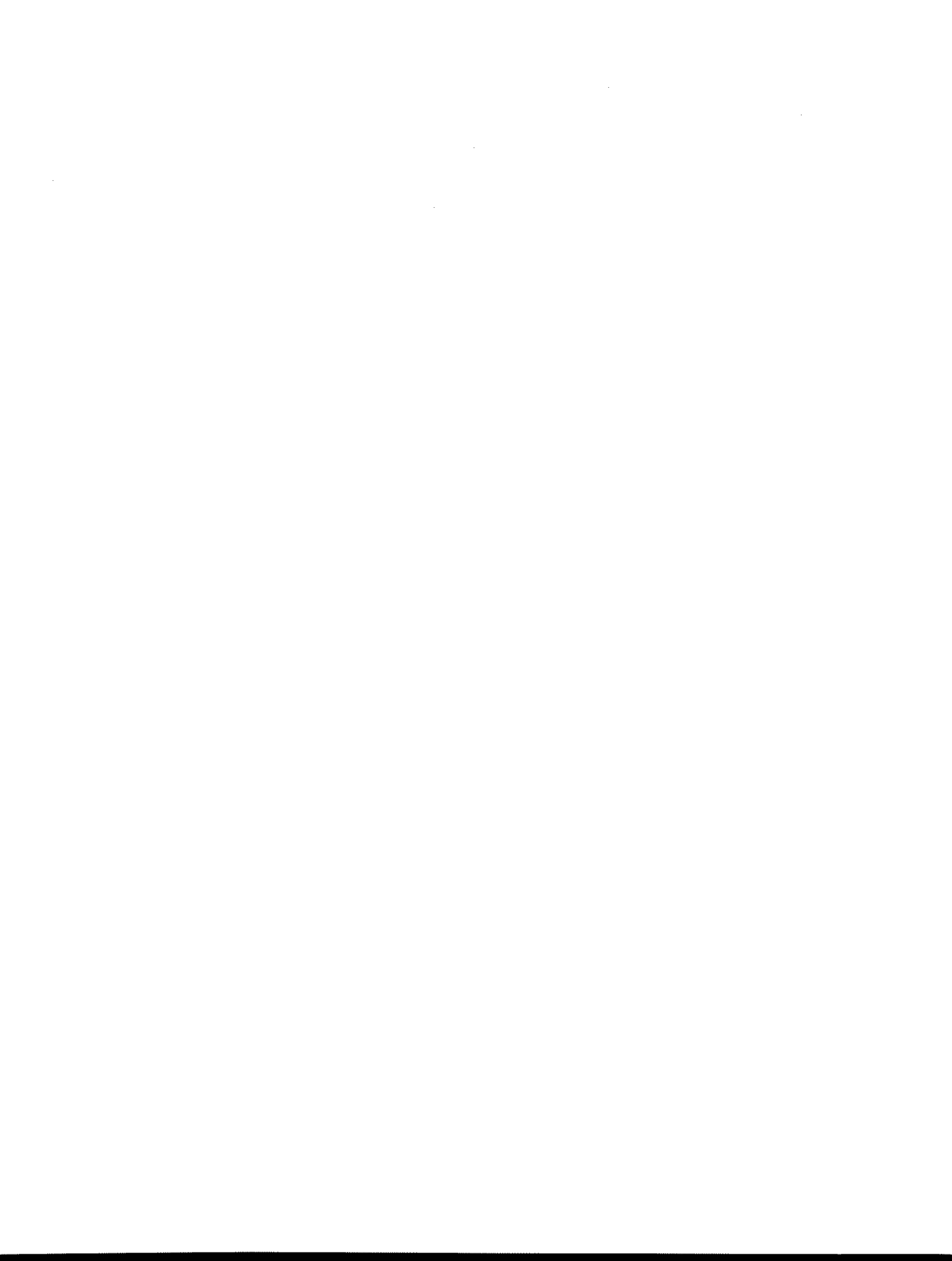


Agradecimentos

A meu orientador e co-orientador por mostrar os caminhos a serem seguidos.

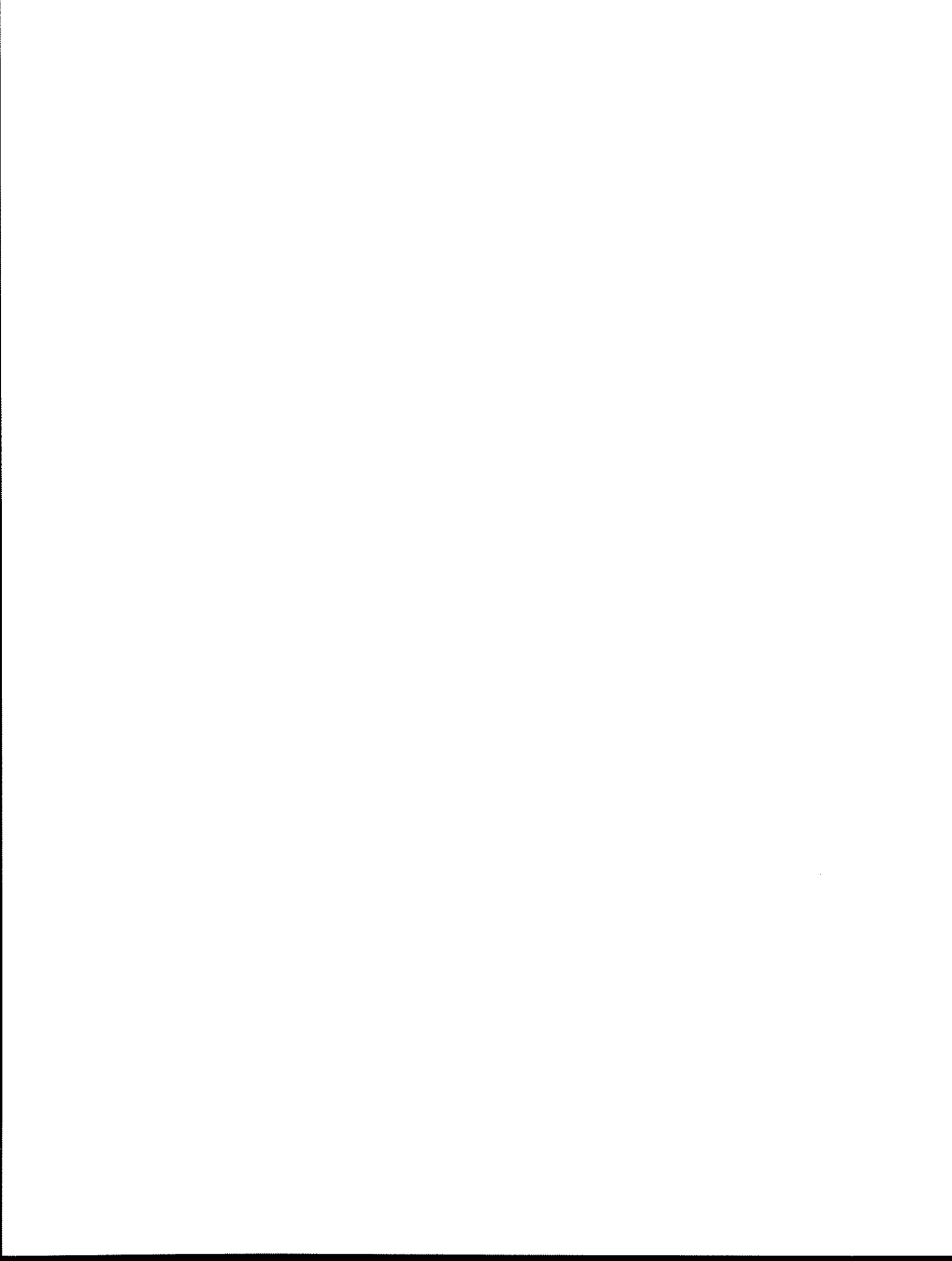
À Fapesp pela ajuda financeira,

A todos meus colegas que de uma forma ou outra ajudaram para a realização deste trabalho



Pensamento

"Nós geralmente descobrimos o que fazer percebendo aquilo que não devemos fazer. E provavelmente aquele que nunca cometeu um erro nunca fez uma descoberta." (Samuel Smiles)



Resumo

BROSSARD, Luis Enrique, *Desenvolvimento de um Protótipo de Alimentador de Biomassa Polidispersa*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001, 57 p. Dissertação (Mestrado)

Através de uma revisão bibliográfica sobre os sistemas de alimentação em geral e de biomassa polidispersa de baixa densidade em particular, estabelecem-se as características funcionais dos mesmos, destacando-se os principais aspectos positivos e negativos. Como parte central dos sistemas de alimentação que analisam-se, os silos são estudados no que se refere ao desenvolvimento de diversas tensões que estão vinculadas em diferentes graus as dificuldades de operação que provocam desde instabilidade até interrupção total do fluxo de alimentação. Partindo-se da base anterior, é realizado o projeto construção e avaliação a frio de um protótipo de um sistema de alimentação de biomassa polidispersa que elimina os silos com tremonha e apresenta uma estrutura de tensões internas favoráveis para o escoamento dos sólidos polidispersos de baixa densidade. Neste trabalho estuda-se a influência da altura da biomassa e a velocidade do removedor do fundo do silo sobre o fluxo de descarga do alimentador. Dos resultados obtidos verificou-se que dos parâmetros estudados, a velocidade do removedor foi o único que teve influência significativa sobre o fluxo de descarga.



Palavras Chave

Silo de paredes negativas, sistema de alimentação convencional, biomassa polidispersa de baixa densidade, alimentador, capim elefante.

Abstract

BROSSARD, Luis Enrique, *Development of a Prototype feeder for polydispersed biomass*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001, 57 p. Dissertação (Mestrado).

Through a general literature review about biomass feeding systems including feeders for low density polydispersed vegetable residues, there were established functional characteristics of these devices, highlighting their main positive and negative aspects. Considering silos as the central component of a feeding system, and their relation to the development of tensions associated to operation difficulties it was verified that they cause instability and eventually interruption of discharge flow. On the basis of this information, it was projected, constructed and evaluated a prototype of a feeding system for low density polydispersed biomass. This new type of feeding systems had a satisfactory performance when working with sugar cane bagasse as evaluated by means of a two factors replicated factorial design. It is was observed that inside the new prototype biomass develop a favorable tension structure pattern that allows a steady discharge flow of polydispersed biomass. This work states the influence of the height of biomass and a rotation removing of silo about the discharge flow of feeding. Among the studied parameter the rotation of removing was the only parameter with significant influence concerning the



discharge flow.

Key Words

Silo negative wall, Screw conveyor, feeding systems, low density Polydispersed biomass, feeder, capim elephant



Índice

<i>Resumo</i>	vii
<i>Abstract</i>	ix
<i>Lista de figuras</i>	xiii
<i>Lista de Tabelas</i>	xiv
<i>Nomenclatura</i>	xv
<i>Capítulo 1</i>	2
<i>Introdução</i>	2
<i>Capítulo 2</i>	6
<i>Estado da arte dos componentes e do funcionamento de sistemas de alimentação</i>	6
2.1 Propriedades da biomassa polidispersa utilizada (capim elefante)	8
2.2 Segregação	9
2.3 Aspectos sobre os silos verticais	9
2.4 Sistemas de alimentação de combustíveis sólidos acoplados a silos verticais	11
2.5 Forças e tensões que ocorrem em silos com tremonha, formação de arcos	12
<i>Capítulo 3</i>	16
<i>Material e métodos</i>	16
3.1 Material	16
3.1.1 Teor de umidade	17
3.1.2 Análise granulométrica	17
3.1.3 Densidade aparente	18
3.2 Protótipo de alimentador de biomassa polidispersa	19
3.3 Cálculo da potência necessária para mover o removedor do fundo do silo.	20
3.4 Roteiro de cálculo e cálculo da rosca-sem-fim segundo Garcia (1987)	24



3.5 Cálculos da rosca-sem-fim	29
3.6 Cálculo das polias e correias segundo Manual da Good Year (1998)	32
3.7 Avaliação do sistema de alimentação desenvolvido	35
<i>Capítulo 4</i>	37
<i>Resultados e discussões</i>	37
4.1 Avaliação do sistema de alimentação	37
4.2 Comprovação da segregação do material na descarga do alimentador	42
4.3 Teor de umidade	43
4.4 Densidade Aparente	44
4.5 Levantamento preliminar de custo do sistema de alimentação desenvolvido	45
<i>Capítulo 5</i>	46
<i>Conclusões e sugestões</i>	46
Recomendações para o desenvolvimento de futuros trabalhos	47
<i>Capítulo 6</i>	48
<i>Referências Bibliográficas</i>	48
<i>9 Anexos</i>	53



Lista de figuras

Figura 1 Problemas mais comuns de diferentes tipos de arcos, fluxo e segregação do material que ocorrem quando utilizam-se silos verticais com tremonha _____	10
Figura 2 Problemas mais comuns que ocorrem quando utilizam-se silos verticais com tremonha Bates (1994). _____	10
Figura 3 Comportamento do capim elefante num sistema de alimentação convencional _____	11
Figura 4 Tensão na tremonha do silo _____	13
Figura 5 Influência do ângulo da tremonha sobre as forças que atuam no material _____	14
Figura 6 Forças em uma tremonha com ângulo de inclinação negativa _____	15
Figura 7 Desenho do protótipo de um sistema de alimentação de biomassa polidispersa _____	19
Figura 8 Protótipo do alimentador construído _____	20
Figura 9 Esquema utilizado para o cálculo do torque do removedor _____	21
Figura 10 Vista superior do protótipo de alimentador de biomassa _____	22
Figura 11 Fotografia do removedor do fundo do silo _____	22
Figura 12 Desenho do raspador _____	23
Figura 13 Fotografia do raspador _____	23
Figura 14 Algoritmo de cálculo dos parâmetros de um transportador de rosca-sem-fim _____	29
Figura 15 Superfície de resposta que mostra o comportamento do fluxo de descarga _____	41
Figura 16 Fotografia do capim elefante, matéria prima utilizada nos testes _____	43



Lista de Tabelas

Tabela 1. Faixa de velocidades de rotação da rosca em função do seu diâmetro _____	25
Tabela 2. Valores do coeficiente K para vários ângulos de inclinação (β) do transportador de rosca-sem-fim. _____	25
Tabela 3. Valores do passo P para diferentes diâmetros de rosca D _____	26
Tabela 4. Classificação dos materiais sólidos _____	27
Tabela 5. Valores dos coeficientes ψ , A e w_0 em função das características do material a transportar _____	27
Tabela 6. Análises de variância 1 _____	39
Tabela 7. Diâmetro médio das partículas _____	43
Tabela 8. Equipamentos e matérias utilizados na construção do protótipo _____	45



Nomenclatura

Letras latinas

A	Coefficiente empírico que depende da densidade aparente e a abrasividade do material	
C	Distância entre os eixos das polias	[mm]
C_w	Coesão	[N/m ²]
D	Diâmetro da rosca-sem-fim	[m]
dd_1	Diâmetro primitivo da polia do motor	[mm]
Dd_1	Diâmetro primitivo da polia na entrada do eixo do redutor	[mm]
Dd_2	Diâmetro primitivo da polia da rosca	[mm]
dd_2	Diâmetro primitivo da polia na entrada do eixo do redutor	[mm]
$D_p(\text{sup})$	Valores da tamanho médio das partículas retidas na peneira superior de cada classe de tamanho	[mm]
d_p	Tamanho médio de partícula	[mm]
D_{pi}	Valores do tamanho médio das partículas retidas na peneira inferior de cada classe de tamanho	[mm]
F	Descarga da rosca-sem-fim medido experimentalmente	[kg/h]
F_{ac}	Fator de correção do arco de contato da polia	
F_c	Estadígrafo calculado	



Fld	Fator de correção do comprimento da correia	
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
HP _r	Potência do redutor	[W]
K	Coeficiente que considera o ângulo de inclinação da rosca-sem-fim com relação à horizontal	
L	Comprimento do transportador	[m]
Ld	Comprimento primitivo	[mm]
Mi	Massa retida na peneira inferior de cada classe ou tamanho	[g]
n	Velocidade de rotação da rosca-sem-fim	[r.p.m]
N	Potência do motor para mover a rosca-sem-fim	[KW]
n-1	Graus de liberdade	
n _{max}	Velocidade máxima permissível	[r.p.m]
n _{nec}	Velocidade de rotação necessária para obter a vazão fixado	[r.p.m]
P	Passo da rosca-sem-fim	[m]
P-value	Probabilidade de obter valores de F _o iguais o maiores que F _t	
Q	Descarga da rosca-sem-fim	[Kg/h]
Q _{max}	Descarga máxima	[Kg/h]
R	força resultante	[N]
R ²	Coeficiente de determinação	
R ² _{adj}	Coeficiente de determinação ajustado	
R _t	Relação de transmissão	
S ² _P	Variância ponderada	
t	Torque	[N.m]
v	Largura do material	[m]
V _L	Velocidade linear da correia	[r.p.m]
V _t	Vazão volumétrica da rosca-sem-fim	[m ³ /h]
W _o	Coeficiente total de resistência ao movimento do material que se transporta	
X ₁ (codificado)	Valor codificado da variável	
X ₁	Velocidade do removedor	[r.p.m]
X ₂	Altura da biomassa no silo	[m]
X _c	Valor central da velocidade do removedor	[r.p.m]



X_i	Fração retida no tamis inferior de cada classe	[g]
X_R	Valor real da velocidade do removedor	
Y	Descarga segundo o modelo obtido	[kg/h]

Letras gregas

$\overline{\sigma}_1$	Tensão de compressão que se estabelece num arco	[N/m ²]
β	Ângulo de inclinação do transportador com a horizontal	[°]
γ	Densidade aparente do material	[kg/m ³]
ρ	Densidade do material	[kg/m ³]
ψ	Coefficiente de eficiência de carga	
σ_1	Tensão principal existente no escoamento	[N/m ²]
σ_c	Tensão necessária para deformar uma amostra não contida	[N/m ²]
ϕ_w	Ângulo de atrito interno do material	[°]
θ_0	Velocidade angular na entrada do eixo do redutor	[r.p.m]
θ_1	Velocidade angular na saída do eixo do motor	[r.p.m]
μ	Coefficiente de atrito entre o material capim elefante e a chapa pintada	
α	Probabilidade fixada pelo pesquisador	

Siglas

ff	Fator fluxo	
FF	Função fluxo	
r.p.m.	Rotações por minuto	[r.p.m]
PCI	Poder calorífico inferior	[MJ/kg]
PCS	Poder calorífico superior	[MJ/kg]
ASTM	American Society For Testing And Materials	



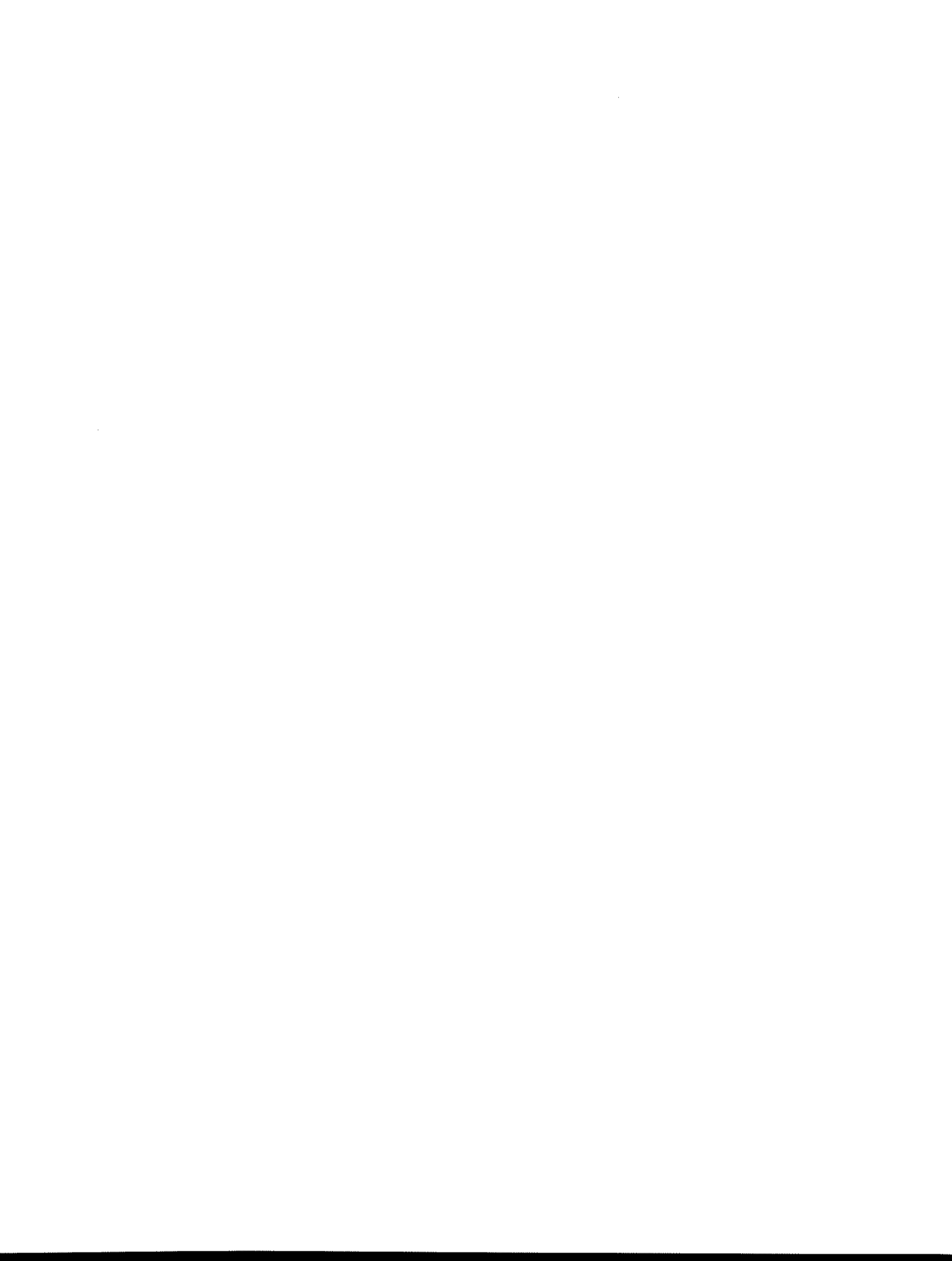
Capítulo 1

Introdução

A biomassa foi a primeira fonte de energia utilizada pelo homem e seu uso foi predominante até meados do século XIX. A partir desse momento o consumo de biomassa como fonte de energia começou a diminuir, consequência do uso de outras fontes de energia como carvão mineral, óleo combustível, gás natural e energia nuclear.

A queima de combustíveis fósseis produz gases com uma grande concentração de compostos de carbono e de enxofre Judkins (1993). Este aumento da quantidade de gás carbônico na atmosfera é o principal causador do chamado efeito estufa, que tem aumentado a temperatura de nosso planeta. A utilização da biomassa para a geração de energia também irá gerar gás carbônico. Porém, esta biomassa é oriunda de plantas que consumiram durante seu crescimento a mesma quantidade de CO₂ que será devolvida à atmosfera após sua utilização Cortez e Silva (1997).

Neste contexto, a biomassa aparece como um atrativo e importante recurso energético, principalmente pelos seguintes fatos:



- Constitui uma fonte de energia renovável,
- Aumenta a oferta de empregos e a riqueza no campo, reduz o gasto de divisas na importação de petróleo, ajudando a equilibrar a balança de pagamentos e contribui para reduzir o efeito estufa ao substituir combustíveis fósseis.
- Fonte de energia “limpa” quando comparada com os combustíveis fósseis.

A biomassa dentre as fontes de energéticas primárias ocupa a quarta posição no mundo, representando 15 % do consumo global de energia Dayton e Chum (1996). No Brasil este valor esta em torno de 25% , equivalente a 0,9 milhões de barris de petróleo por dia Ministério da Infraestructura (1997).

Atualmente, no Brasil, a produção de resíduos agrícolas e florestais é bastante diversificada, dadas as condições geográficas, dimensões do país e suas especificidades regionais. Porém, existem algumas culturas que mesmo produzindo resíduos associados ao produto de interesse, não têm escala que justifique pensar em grandes aproveitamentos Cortez, et al (1998).

Segundo Cortez et al (1998), são produzidas no País entre 270 e 300 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por ano/safra, gerando-se uma quantidade de resíduos agrícolas por ano, que no caso do bagaço de cana varia entre 67,5 e 75,10 milhões t/ano, sendo que entre 60% e 70% desta produção concentra-se no interior do Estado de São Paulo. Neste Estado estima-se em 5-10 % de excedente de bagaço de cana para comercialização e encontrando-se pelo menos em teoria 25 a 50 % da palha da cana no campo Cortez et al (1998).

Existe, portanto, um enorme potencial de subprodutos da cana-de-açúcar, embora a sua utilização como insumo energético é ainda parcial e ineficiente. No caso da palha, para alguns pesquisadores, o mercado simplesmente desconhece por completo o seu potencial Cortez et al (1998). Para ambos subprodutos está faltando tecnologia que permita a sua valorização comercial, a partir da obtenção de outros subprodutos com maior valor agregado, por exemplo, o carvão vegetal e bio-óleo a partir da pirólise, e gás combustível de médio e baixo poder calorífico para produzir gás de síntese e energia elétrica em grande escala, a partir da gaseificação.



Segundo Bridgwater (1991), a gaseificação, a pirólise e a liquefação constituem as principais tecnologias alternativas básicas para a conversão termoquímica da biomassa estudadas hoje no mundo, e com muitas possibilidades futuras.

A biomassa polidispersa de baixa densidade como o bagaço de cana-de-açúcar e o capim elefante são materiais cuja granulometria é muito variada. Fazendo com que seu escoamento dentro dos silos convencionais seja difícil e apresentando uma grande tendência à formação de arcos ou pontes Marinelli e Carson (1992).

Tratando-se das tecnologias de pirólise rápida e gaseificação em reatores de leito fluidizado, um estudo detalhado do sistema de alimentação de biomassa polidispersa de baixa densidade apresenta-se com alta prioridade. A grande maioria das pesquisas nesta área indicam sérios problemas na alimentação das biomassas de baixa densidade Gómez (1996); Sanchez (1994); Neiva (1998), levando em alguns casos a prejudicar as investigações e até desativação de sistemas.

Os sistemas atuais de combustíveis sólidos convencionais estão compostos geralmente de um silo e um transportador no fundo dele. Os silos normalmente utilizados nestes equipamentos tem na saída uma parte convergente chamada de tremonha pela qual escoará por gravidade o material. No escoamento deste material pela tremonha podem ocorrer vários tipos de obstrução como arcos ou formação de um tubo no centro do silo. O arco é um fenômeno que pode interromper completamente a saída do material no silo.

Segundo Gómez (1996), na calibração da rosca-sem-fim comprovou-se a total instabilidade na alimentação quando trabalhou-se com biomassas polidispersas de baixas densidades. Isto por terem estas biomassas, as características antes mencionadas.

Na atualidade, os sistemas de alimentação de combustíveis sólidos não estão sendo eficientes. Eles apresentam diversos problemas na hora do descarregamento do material, desde, instabilidade, segregação do material até interrupção total na descarga, fato que traz como consequência muitas vezes a inviabilidade na utilização da biomassa de baixa densidade como fonte de energia.



Em geral para utilizar a biomassa polidispersa de baixa densidade como fonte de energia é necessário um sistema de alimentação que garanta alguns parâmetros de alimentação como, estabilidade, uniformidade, homogeneidade e continuidade.

Pode-se então verificar a importância deste projeto levando em consideração o caminho selecionado. Procurou-se um sistema em escala industrial para a alimentação de biomassa polidispersa de baixa densidade com um silo de paredes negativas em escala industrial variando alguns parâmetros de operação. O objetivo abrangente do trabalho considera a possibilidade de configurar um conjunto de alimentação que garanta as necessidades de operação de qualquer sistema que trabalhe com biomassa polidispersa de baixa densidade, como matéria-prima em sua alimentação com elevada confiabilidade.

Objetivos

- Como objetivo geral persegue-se o estabelecimento das causas principais das instabilidades e interrupções no funcionamento dos sistemas de alimentação de biomassa polidispersa de baixa densidade com ênfases nos problemas dos silos com tremonha.

Como objetivo específicos temos:

Projeto e construção de um protótipo de alimentador de biomassa polidispersa,

- Avaliação a frio do novo protótipo ao utilizar como material para sua alimentação o capim elefante, um tipo de biomassa vegetal de baixa densidade.



Capítulo 2

Estado da arte dos componentes e do funcionamento de sistemas de alimentação

Da confiabilidade de um sistema de alimentação depende um apropriado funcionamento de um reator de leito fluidizado. O comportamento das reações de pirólise e gaseificação que são desenvolvidas nos reatores estão relacionadas diretamente com a estabilidade da dosagem feita pelo sistema de alimentação. Portanto, as características da qualidade dos produtos finais, assim como a proporção na qual são produzidos, estão determinados, em grande medida pela boa operação do sistema de alimentação de biomassa utilizado.

Segundo Schofield e Sutton (1977), os custos indiretos derivados do mal funcionamento do sistema de manuseio e alimentação de biomassa numa instalação energética podem torná-la inviável.

Segundo Neiva (1998), diversos investigadores têm reportado a influência do teor de umidade e do caráter polidisperso do bagaço e a palha de cana-de-açúcar sobre seus desempenhos de transporte.



De fato, propriedades tais como o ângulo de atrito interno, distribuição granulométrica, densidade aparente, ângulo de atrito com as paredes e ângulo de repouso, apresentam grandes dispersões na sua determinação pelos métodos até agora conhecidos, gerando pouca confiabilidade nos cálculos realizados.

Em geral, o projeto de um sistema convencional de alimentação requer as seguintes etapas Robert (1991):

- ◆ Determinação das características do material referente ao seu escoamento;
- ◆ Estabelecimento da forma geométrica de todas as partes componentes do sistema (alimentação, dutos, silos etc);
- ◆ Estimativa das cargas nas paredes dos componentes do sistema;
- ◆ Dimensionamento e seleção dos equipamentos.

Para realizar o anterior, considera-se indispensável o conhecimento das seguintes propriedades:

1. Densidade aparente;
2. Coeficiente de atrito interno;
3. Coeficiente de atrito entre o material e a parede do silo ou transportador.

Os coeficientes de atrito são utilizados no cálculo da eficiência volumétrica de um transportador e/ou para prever o tipo de escoamento que apresentará um determinado silo.

Os resultados obtidos por Sanchez (1994); Neiva (1998) evidenciam uma série de dificuldades encontradas no cálculo e posterior avaliação de sistemas de alimentação de bagaço de cana-de-açúcar que empregam silos convencionais.

Nestes trabalhos partiu-se da concepção tradicional que contempla uma reserva de material contida num silo. Porém, o estado atual das teorias sobre escoamento de sólidos, desenvolvidas no seu aspecto estático por Janssen (1895) e no seu aspecto dinâmico por outros pesquisadores,



um deles Roscoe (1958), citado por Roberts (1995), está centrada em sólidos com partículas uniformes, que não apresentam anisotropia e que possuem distribuição granulométrica bem definida. O bagaço a palha de cana-de-açúcar e o Capim elefante não apresentam as características antes mencionadas.

Para a medição dos importantes coeficientes de atrito (interno e de parede), os métodos mais utilizados Janssen (1895); Jenike (1992); Jenike e Johanson (1992) ajustam-se muito pouco à heterogeneidade morfológica da biomassa polidispersa como o capim elefante.

De fato as teorias de deformação de materiais mais utilizadas, que são as de Jenike e a de Roscoe, assumem uma característica de escoamento para cada densidade de material considerando-o isotrópico. Esta última consideração não é aplicável às biomassas polidispersas de baixa densidade.

Um outro elemento a se considerar, referente à aplicação da teoria e à prática da medição das propriedades de materiais como o capim elefante, é que como as forças coesivas e a forma de deposição das partículas na célula de ensaio influem no arranjo espacial das partículas, os materiais fibrosos e polidispersos não podem ser apropriadamente avaliados.

O anteriormente apresentado reflete carência de teorias suficientemente confiáveis para o projeto e avaliação de silos e transportadores de biomassa polidispersa de baixa densidade. Se a isto somam-se as sérias dificuldades teóricas e práticas reportadas em recentes pesquisas Sanchez (1994); Neiva (1998). Pelo que neste trabalho foi utilizado um enfoque empírico do problema para obter resultados mais confiáveis.

2.1 Propriedades da biomassa polidispersa utilizada (capim elefante)

A biomassa polidispersa de baixa densidade como o capim elefante é um material que tem uma morfologia muito variada, nele apresentando-se partículas de diferentes tipos e formas, de



larga distribuição granulométrica. Este material, devido ao entrelaçamento das fibras, tem uma grande tendência à formação de arcos ou pontes fenômeno que dificulta ou impede o escoamento do material.

2.2 Segregação

A segregação é uma propriedade dos materiais cuja granulometria é variada e que ocorre durante o carregamento do silo, já que as partículas grossas tem a tendência de escoar para a parede e as partículas mais finas que ficam no centro são compactadas pelas mais grossas durante o carregamento.

Durante o processo de descarregamento pode-se produzir o fluxo funil quando as partículas mais finas compactadas no centro escoam primeiro.

2.3 Aspectos sobre os silos verticais

Silos verticais são construções que tem como finalidade o armazenamento de um produto. A retirada deste produto do silo requer que este escoe para a parte inferior, onde normalmente há uma seção convergente denominada tremonha.

Segundo Ravenet (1992), os limites para ocorrência de cada tipo de escoamento (de massa ou de funil), dependem do ângulo de atrito com as paredes, e do ângulo de atrito interno do material.

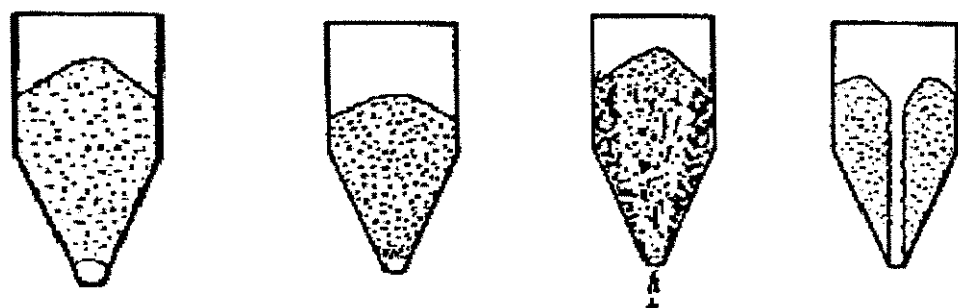
O fluxo funil ocorre quando a parede do silo não é suficientemente íngreme, e sua superfície não é suficientemente lisa. Neste caso, o material da superfície escorrega para um canal central vertical, e cai através deste até a boca de saída.

Quando o ângulo de atrito interno é maior que o ângulo de atrito com a parede produz-se o fluxo de massa. No caso contrario dá-se fluxo é funil.

Nas figuras 1,2 de Bates (1994), mostram-se os principais problemas que ocorrem quando



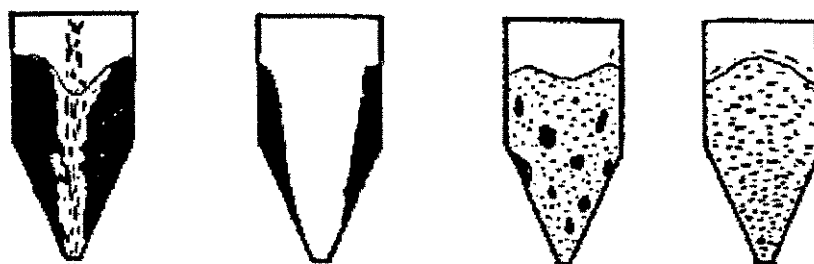
se utilizam silos com tremonha.



Arco coesivo Arco mecânico Segregação do material Fluxo funil

Figura 1 Problemas mais comuns de diferentes tipos de arcos, fluxo e segregação do material que ocorrem quando utilizam-se silos verticais com tremonha

Na figura 1 observam-se vários fenômenos que ocorrem durante o escoamento do material não homogêneo nos silos convencionais com tremonha Bates (1994). Os fenômenos como arco coesivo ou mecânico podem interromper a alimentação do material que sai para o transportador, tornando a mesma intermitente. A biomassa polidispersa de baixa densidade como o capim elefante apresenta grande tendência para a formação de arcos. Isto deve-se à sua variada granulometria, presença de pó e fibras entrelaçadas. A segregação do material segundo Neiva (1998) pode trazer como consequência uma alimentação desigual, afetando as condições das etapas posteriores do processo. O fluxo funil geralmente é errático e propicia o problema antes mencionado.



Região morta Resíduos permanentes Formação de fragmentos Consolidação devido ao tempo

Figura 2 Problemas mais comuns que ocorrem quando utilizam-se silos verticais com tremonha Bates (1994).

Na figura 2 apresentam-se outros tipos de condições que influenciam a alimentação do transportador, como resíduos permanentes, região morta, formação de fragmentos e consolidação



devido ao tempo. Que segundo Marinelli e Carson (1992) ocorrem pela formação do fluxo funil, trazendo como consequência uma vez mas, descontinuidade no processo de escoamento do material.

2.4 Sistemas de alimentação de combustíveis sólidos acoplados a silos verticais

Além dos aspectos assinalados nos itens anteriores, deve-se considerar que os sistemas de alimentação convencionais de combustíveis sólidos são compostos geralmente por um silo e um dosador, o qual geralmente é uma rosca-sem-fim. Dependendo da quantidade de combustível alimentado, pode-se ter uma rosca, ou um pente de rosca no fundo do silo. Na interface entre o silo e o dosador pode-se ter um tambor com pás, o qual tem como objetivo alimentar homogeneamente o parafuso. O silo tem como finalidade armazenar o material que vai ser utilizado. Normalmente há no silo uma seção convergente denominada tremonha. Quando a alimentação do aparelho é feito para materiais não homogêneos como a biomassa polidispersa de baixa densidade, a alimentação apresenta problemas. Isto deve-se principalmente às propriedades do material e à geometria do silo.

Segundo Seye et al (2001) quando se utiliza biomassa polidispersa de baixa densidade como o capim elefante em sistemas de alimentação convencionais, a alimentação apresenta os seguintes problemas: no princípio da alimentação, a vazão do material não é uniforme, o descarregamento é cíclico; depois há um fluxo pobre do material e finalmente falta totalmente material na alimentação, esta interrupção deveu-se à formação do arco. Estes comportamentos são ilustrados nas fotografias da figura 3.

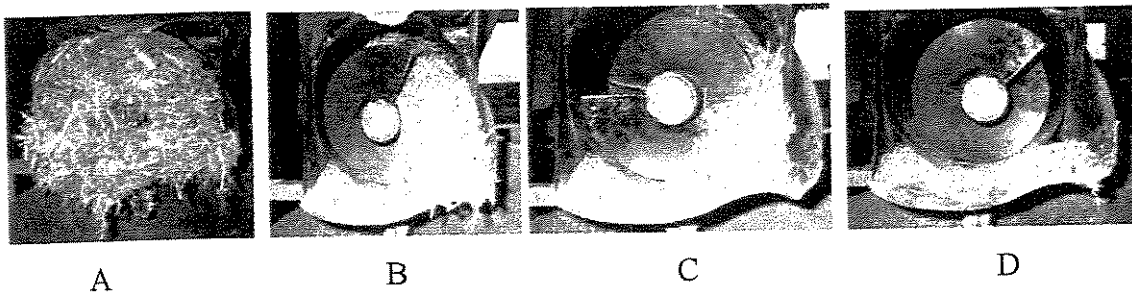


Figura 3 Comportamento do capim elefante num sistema de alimentação convencional
A, B: Alimentação não uniforme
C: Fluxo reduzido



D: Interrupção do fluxo

2.5 Forças e tensões que ocorrem em silos com tremonha, formação de arcos

Na literatura atual existem divergências nas abordagens teóricas para a formação de arcos coesivos segundo as duas teorias apresentadas, a “Teoria da Mecânica Estrutural” e a “Teoria da Mecânica do Continuum”.

A teoria da mecânica estrutural desenvolvida por Jenike (1964), que segundo Descher et al (1995) tem recebido diversas modificações e contribuições, (todas estão contidas na abordagem desta teoria), supõe que o material contido no silo pode ser analisado como uma seqüência de elementos estruturais em forma de arcos, por tanto a formação de um arco estável pode ocorrer se a tensão dos elementos for maior que a carga incidente sobre eles.

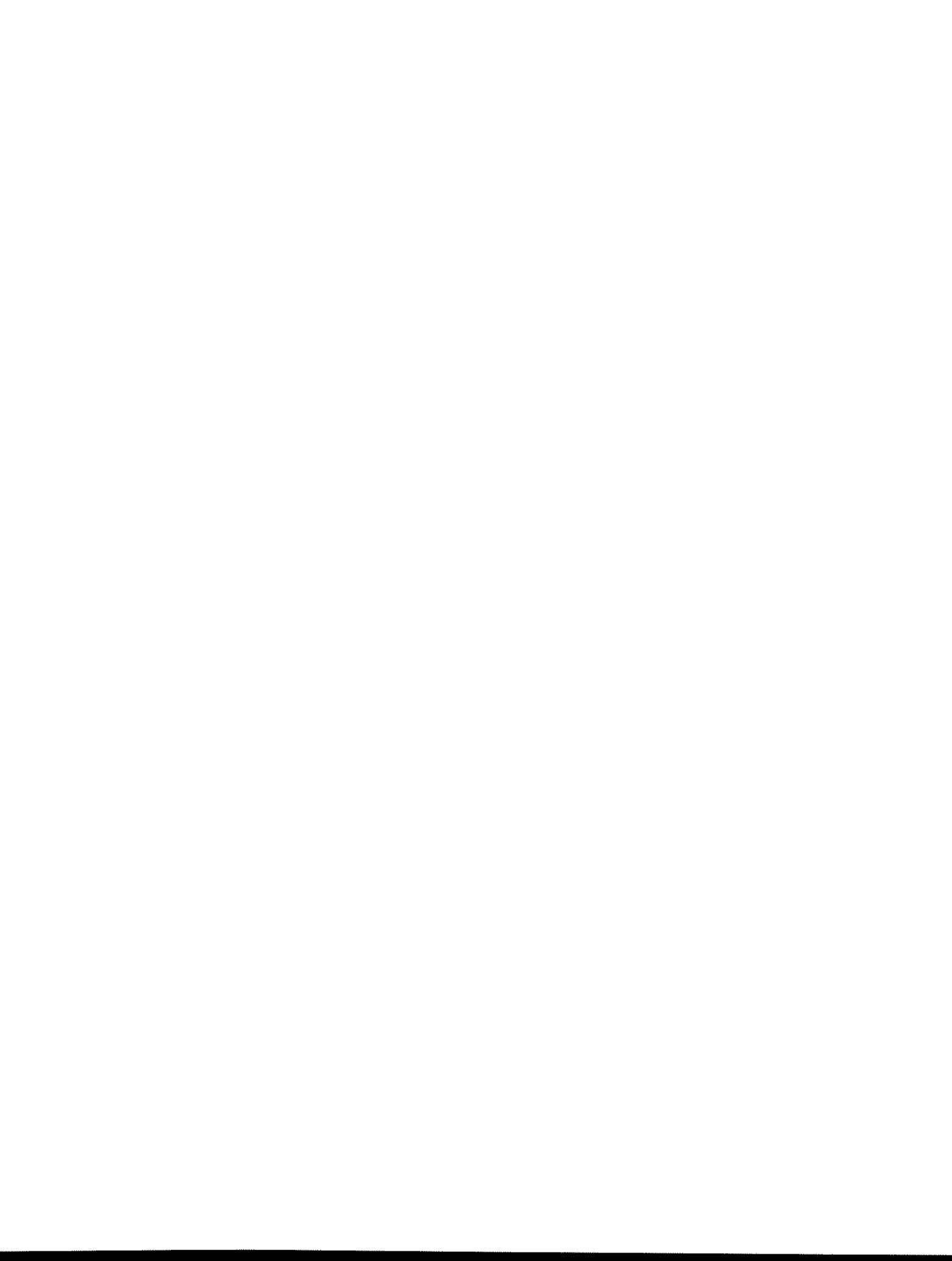
No caso da arco coesivo a escoabilidade de um sólido segundo Jenike (1964) é a relação entre a tensão cisalhante necessária para deformar uma amostra não contida (σ_c) e a tensão principal existente no escoamento (σ_1). Quanto maior a relação ($\frac{\sigma_1}{\sigma_c}$) maior a facilidade de escoamento, esta relação é chamada de função fluxo (FF)

$$FF = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_c} \right). \quad (2.1)$$

O arco é um tipo de estrutura que pode ocorrer na seção convergente de silos verticais, no momento em que se abre sua saída, ou durante o escoamento do material.

JENIKE definiu o fator fluxo (ff) de um canal convergente como a relação entre a tensão principal de consolidação σ_1 e a tensão de compressão que se estabelece em um arco distribuído até as paredes do silo $\bar{\sigma}_1$ mostradas na figura 4 Neiva (1998).

$$ff = \sigma_1 / \bar{\sigma}_1 \quad (2.2)$$



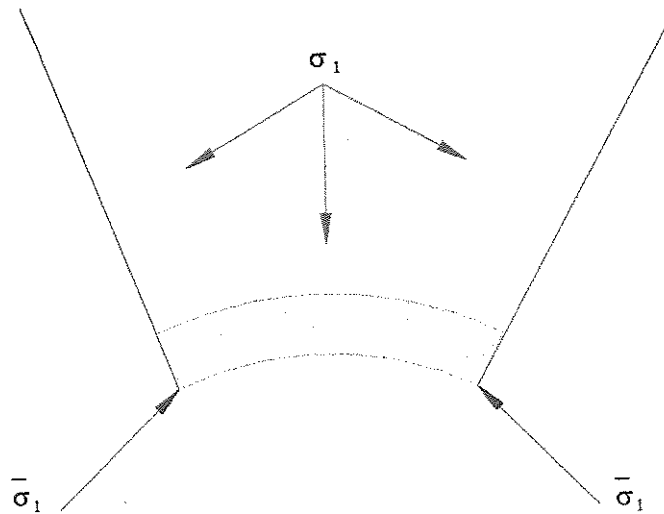


Figura 4 Tensão na tremonha do silo

Para que o escoamento ocorra é necessário a seguinte condição:

$$\bar{\sigma}_1 > \sigma_c \text{ ou } \sigma_1/\sigma_c > \bar{\sigma}_1 \quad (2.3)$$

Segundo Marinelli e Carson (1992) e Cali Jr. (1990) existem dois tipos de arcos que podem-se formar na saída do silo: arco coesivo ou arco intertravante (também chamado arco mecânico). No caso do arco mecânico, a dimensão de saída é diretamente relacionada com a dimensão das partículas.

O ângulo da tremonha influi nas forças adesivas atuando sobre as partículas que estão na superfície de contato que suportará o leito de material na parte convergente do silo. Na figura 5 Bates (1994) apresenta-se o diagrama de forças que atuam na tremonha do silo.



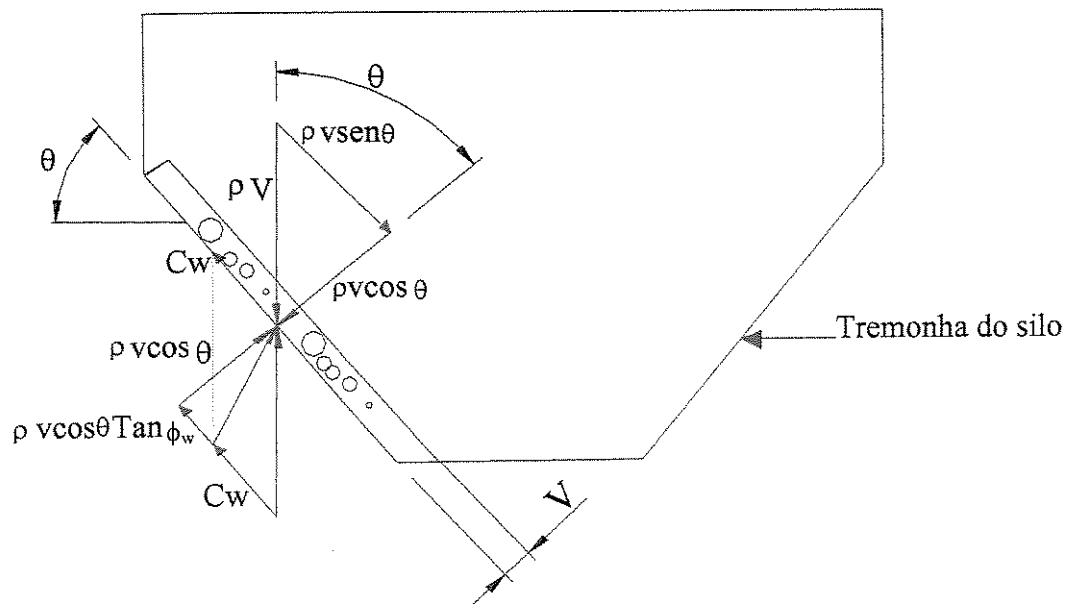


Figura 5 Influência do ângulo da tremonha sobre as forças que atuam no material

ρ : Densidade do material (kg/m^3)

θ : Ângulo de atrito do material com a parede do silo ($^\circ$)

ϕ_w : Ângulo de atrito do material ($^\circ$)

C_w : Tensão de coesão (N/m^2)

v : Largura do material (m)

$\rho v \text{ sen } \theta$: Componente da do peso que provoca o deslizamento na parede (N/m^2)

$\rho v \text{ cos } \theta \text{ tan } \phi_w$: Força de atrito entre o material e a parede (N/m^2)

Para que o deslizamento da biomassa ocorra tem-se que cumprir a seguinte condição:

$$\rho v \text{ sen } \theta > \rho v \text{ cos } \theta \text{ tan } \phi_w + C_w$$

se $\rho v \text{ sen } \theta = \rho v \text{ cos } \theta \text{ tan } \phi_w + C_w$ ou $\rho v \text{ sen } \theta < \rho v \text{ cos } \theta \text{ tan } \phi_w + C_w$ o material fica sem movimento formando o chamado arco.

Fazendo uma análise contrária das forças na tremonha convencional, em um silo com o ângulo de inclinação das paredes negativa e obteremos a figura 6.



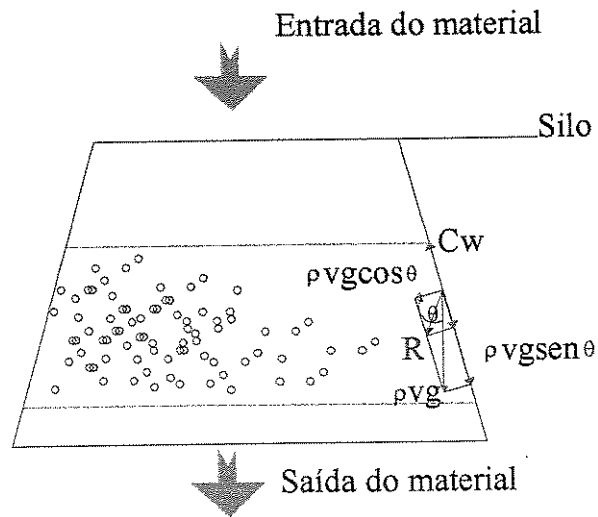


Figura 6 Forças em uma tremonha com ângulo de inclinação negativa

g : aceleração da gravidade (m/s^2)

R : resultante das forças (N/m^2)

Neste diagrama de forças considera-se que o material está em movimento, assim as reações das componentes das forças vão ser nulas e como a inclinação da parede é negativa o ângulo de atrito do material com a parede ϕ_w vai ser zero. Nessas condições o material escoará na direção da resultante R facilitando o funcionamento do equipamento sempre que $\rho v g > C_w$



Capítulo 3

Material e métodos

3.1 Material

O capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum) é um material cuja granulometria é muito variada, com presença de pó, fibras entrelaçadas e de diferentes tamanhos, resultando em uma grande tendência à formação de arcos ou pontes.

O capim elefante utilizado nos testes foi produzido na Estação Experimental Central em Nova Odessa. Estima-se que por um ano um hectare de capim elefante produz no mínimo cerca de 40 toneladas de matéria seca (≈ 536 GJ, PCS = 14,6 MJ/kg, PCI = 13,4 MJ/kg) enquanto que o consumo de energia na preparação da mesma quantidade para torna-la insumo energético (corte uma vez por ano, empilhamento, enfardamento, transporte por 30 km, picagem, moagem e consumo de óleo e eletricidade) fica na faixa de 58 GJ.

Ao contrario do capim elefante, a disponibilidade real do bagaço de cana-de-açúcar para seu aproveitamento através da queima direta, depende das sobras não utilizadas na geração de



vapor nas usinas. Além de que o rendimento energético das usinas influi diretamente nesta sobra.

3.1.1 Teor de umidade

A análise de umidade foi realizada segundo a norma da ASTM “Standard Method For Moisture Analysis Of Particle Wood Fuels” designação: E 871-82, pelo método do forno de secagem, secando-se as amostras em uma estufa com circulação natural de ar à temperatura entre 104°C e 110°C até não ocorrer mais variação do peso Sanchez (1996).

3.1.2 Análise granulométrica

Segundo Rosabal e Valle (1989), para a determinação das características granulométricas, utilizam-se três métodos fundamentais:

- Análise por peneiramento,
- Análise através do microscópio,
- Prova de sedimentação.

As técnicas que utilizam o microscópio baseiam-se na contagem visual das partículas de cada tamanho, usada fundamentalmente para a análise de pó muito fino. A aplicação da técnica de sedimentação requer conhecimento da teoria da queda livre dos corpos no fluido. A análise por peneiramento consiste na separação mecânica das diferentes frações de tamanho do material por meio de um jogo de peneiras.

Para a determinação da distribuição granulométrica do capim elefante optou-se neste trabalho, pelo método das peneiras padronizadas. O resultado da análise por peneiramento é influenciado pelo tamanho relativo da amostra, pelo tempo de peneiramento, ou classificação e pelo equipamento utilizado Meirelles (1984).

Algumas experiências prévias realizadas com o capim elefante, já descrito em material, permitiu comprovar que após 20 minutos de peneiramento o material que ficou nas peneiras não aumenta, pelo que este tempo foi tomado como padrão para este tipo de material.



Foram pesadas as frações retidas em cada peneira numa balança eletrônica de laboratório GEHAKA com uma precisão de duas casas decimais, e posteriormente calculados as porcentagens com relação ao peso total da amostra final.

Comumente calcula-se a dimensão característica (diâmetro de partícula) da enésima fração mássica, considerando a média aritmética entre a abertura de duas peneiras adjacentes. Outras equações para o cálculo deste parâmetro são utilizadas por vários pesquisadores Bernhardt (1993) e Cheremisinoff (1989).

Para o conjunto de partículas (de forma não esférica e de variados tamanhos) que compõem a biomassa, define-se um diâmetro médio. O diâmetro médio definido em termos da área superficial das partículas, que segundo Rosabal e Valle (1989) é calculado a partir da seguinte equação:

$$d_p = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{D_{p_i}}} \quad (3.1)$$

onde: x_i é a fração mássica das partículas com diâmetro médio igual a d_p e D_{p_i} é o diâmetro médio das partículas retidas entre uma peneira e a sua subsequente.

Utilizou-se um vibrador de peneiras PRODUTESTES. As peneiras selecionadas são semelhantes às utilizadas por Neiva (1998). O jogo de peneiras ASTM da série TYLER apresenta-se no anexo com os cálculos dos diâmetros médio das partículas

3.1.3 Densidade aparente

A densidade aparente foi determinada segundo a norma da ASTM "Bulk Density Of Densified Particle Biomass Fuels", designação: E 873-82.



3.2 Protótipo de alimentador de biomassa polidispersa

O sistema de alimentação deste trabalho é composto basicamente por um silo de paredes negativas, um removedor no fundo do silo e um raspador. No fundo tem-se uma pequena janela por onde sai a biomassa. Esta é movida pelo removedor, caindo na rosca-sem-fim. Este sistema conta de um inversor de frequência CFW 09, um motor elétrico de 4 HP e um redutor com relação de transmissão $R_T = 80$. O inversor de frequência visa variar as velocidades da rosca-sem-fim, com o objetivo de poder variar descarga.

O silo de paredes negativas visa eliminar formação de arcos, que vai garantir uma alimentação constante. O removedor do fundo tem como tarefa evitar que o material fique grudado no fundo do silo além de movimentar o material. O raspador alimenta o material, diretamente na janela que esta no fundo do silo caindo na rosca-sem-fim. Este sistema é apreendido nas figuras 7 e 8

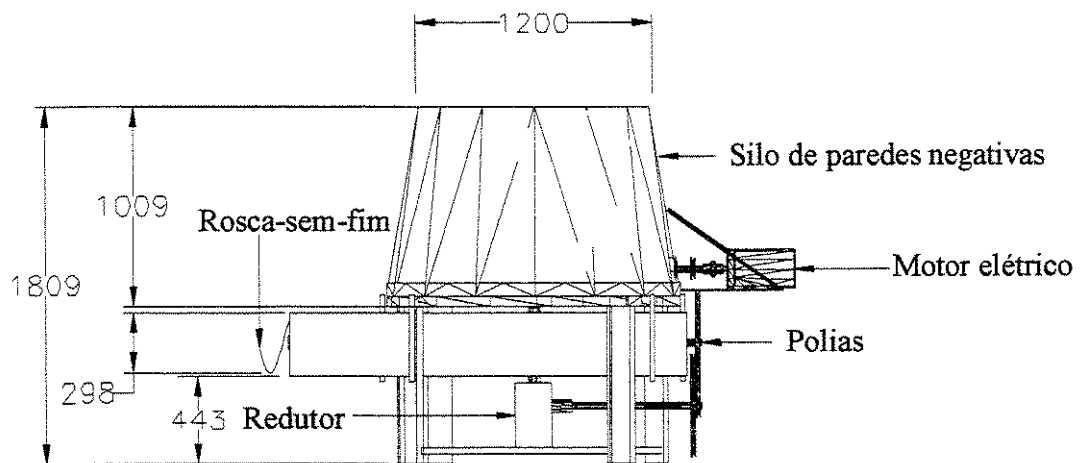


Figura 7 Desenho do protótipo de um sistema de alimentação de biomassa polidispersa



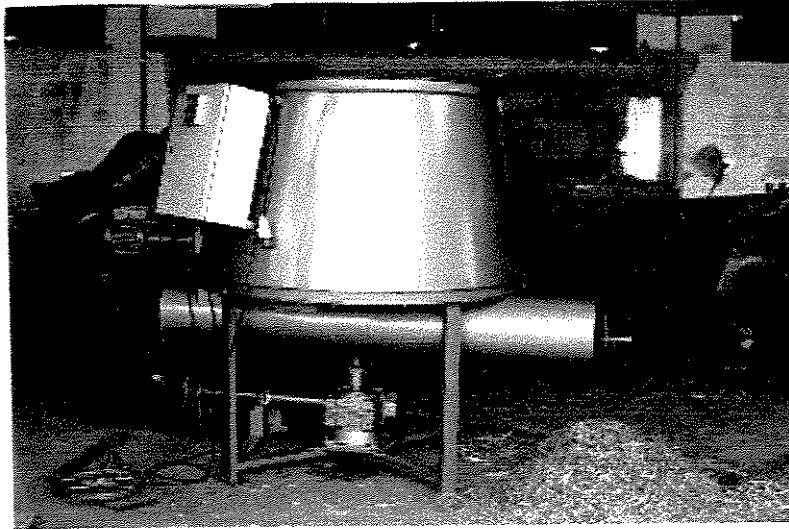


Figura 8 Protótipo do alimentador construído

3.3 Cálculo da potência necessária para mover o removedor do fundo do silo.

A massa total de capim armazenado no silo gira impulsionada pelo removedor, deslizando sobre o fundo do silo. O torque necessário para vencer o atrito da carga sobre o fundo é calculado aplicando o cálculo infinitesimal com auxílio de coordenadas polares pela seguinte equação (3.2)

$$t_r = \int_0^{2\pi} \int_0^r dt = \int_0^{2\pi} \int_0^r r^2 \mu \cdot \rho \cdot h \cdot d\alpha \cdot dr = \frac{r^3}{3} 2 \pi \mu \rho h \quad (3.2)$$

t: Torque (kgf.m)

h: altura da biomassa no silo (m)

n: Velocidade de rotação (r.p.m)

ρ : Densidade do material (kg/m^3)

μ : Coeficiente de atrito capim elefante-chapa pintada

H_{p_r} : Potência do redutor (W)

$$dA = r \cdot dr \cdot d\alpha \quad (3.3)$$

$$dn = \mu \cdot \rho \cdot h \cdot dA \quad (3.4)$$

$$dt = r \cdot dn \quad (3.5)$$

$$t_r = \int_0^{2\pi} \int_0^r dt = \int_0^{2\pi} \int_0^r r^2 \mu \cdot \rho \cdot h \cdot d\alpha \cdot dr = \frac{r^3}{3} 2 \pi \cdot \mu \cdot \rho \cdot h \text{ (kgf.m)}$$



$$H_{Pr} = \frac{2\pi t n}{60} \text{ (W)} \quad (3.6)$$

A seguir apresenta-se a figura utilizada para realizar o cálculo do torque do removedor

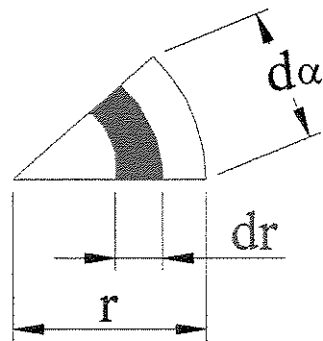


Figura 9 Esquema utilizado para o cálculo do torque do removedor

Dados

$$\rho = 100 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0,4$$

$$t_r = \frac{(0.75)^3}{3} \times 2 \times 3.14 \times 0.4 \times 100 \times 1 = 35.34 \text{ kgf.m}$$

$$H_{Pr} = \frac{2\pi t n}{60} = \frac{2.3,14.36.10}{60} = 37,68 \text{ W} = 0,03 \text{ KW}$$



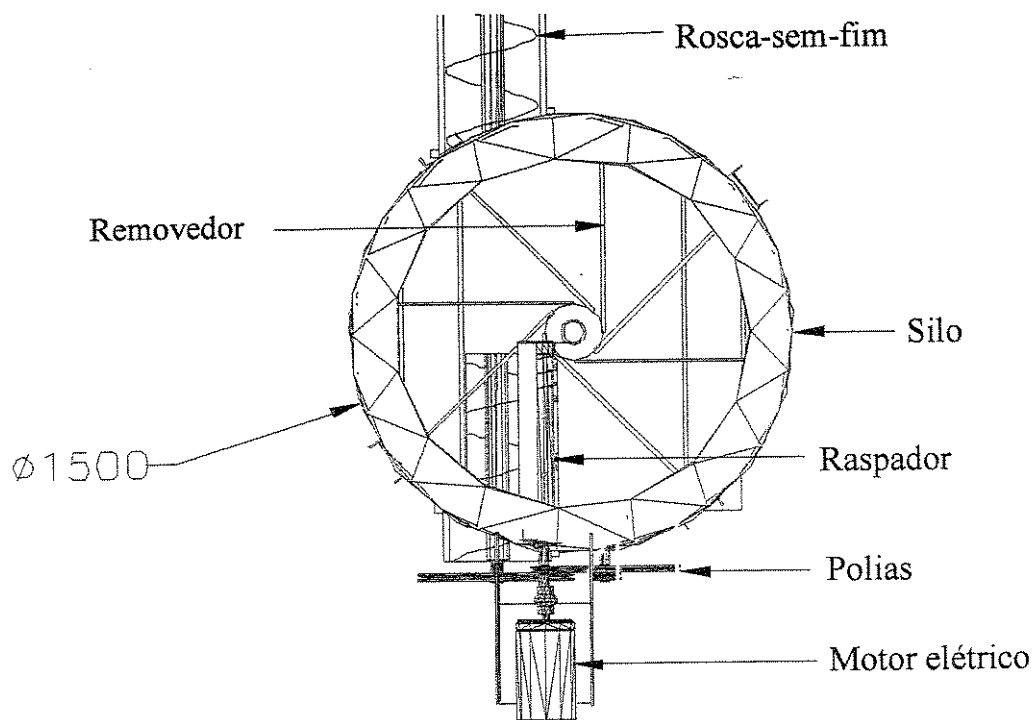


Figura 10 Vista superior do protótipo de alimentador de biomassa



Figura 11 Fotografia do removedor do fundo do silo



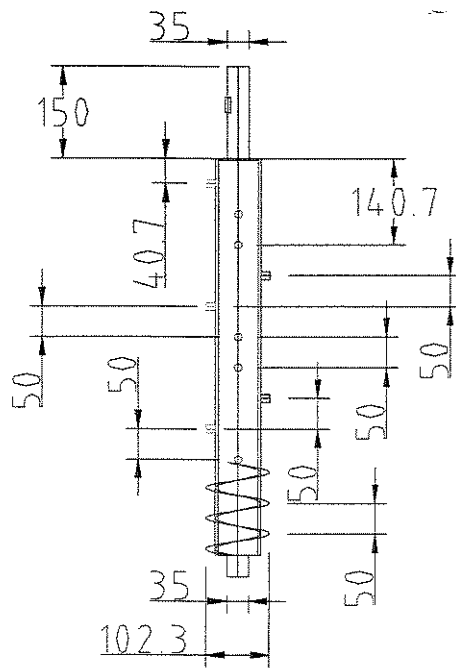


Figura 12 Desenho do raspador

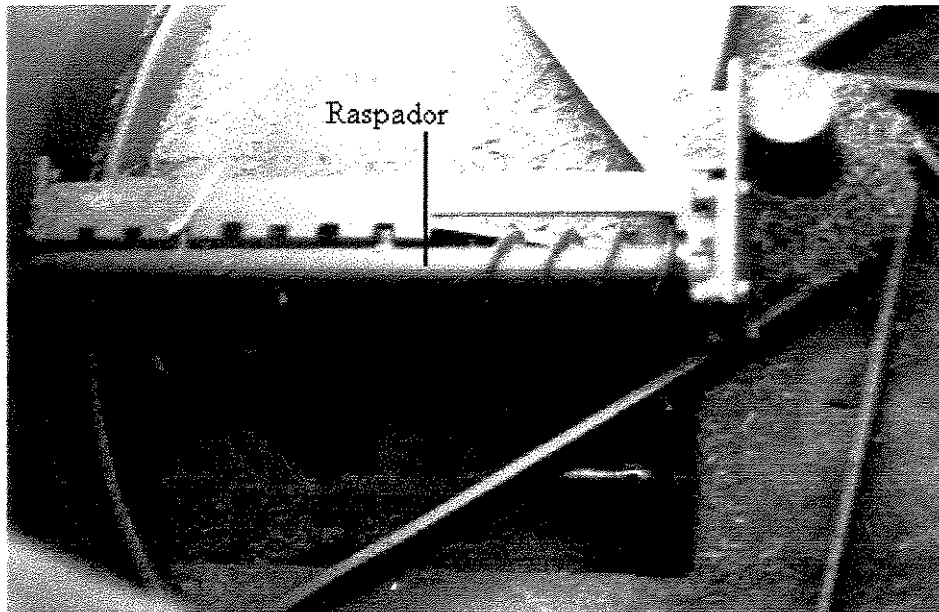


Figura 13 Fotografia do raspador



3.4 Roteiro de cálculo e cálculo da rosca-sem-fim segundo Garcia (1987)

Segundo Schleisenger e Papkov (1997), e Robert (1996), para o cálculo da potência da rosca-sem-fim é necessário conhecer algumas propriedades do material escoado, como ângulo de atrito interno do material e ângulo de atrito do material com a parede do parafuso. Segundo Neiva (1998) nas medições de tais propriedades para materiais polidispersos de baixa densidade encontram-se vários problemas. Na medição do ângulo de atrito interno do material na célula de Jenike os resultados obtidos não são únicos, levando a resultados finais diferentes.

Optou-se neste trabalho pelo conjunto de equações e Tabelas de Garcia (1987) no qual não é preciso conhecer tais propriedades. Esta metodologia leva em conta outras propriedades como: composição granulométrica, densidade aparente, características do material de acordo com sua abrasividade. Com estas características são obtidos alguns coeficientes.

Para levar em conta as resistências ao movimento (atrito interno, atrito com a parede, canal e parafuso), esta metodologia utiliza w_o , denominado coeficiente total de resistência ao movimento do material que se transporta. Este coeficiente é obtido experimentalmente, mas existem alguns critérios gerais por tipo de material que são empregados para calcular a potência a consumida (Tabela 6), Garcia (1987).

A continuação mostra-se o equacionamento e as tabelas utilizadas nos cálculos:

Taxa de descarga da rosca:

$$Q=47.D^2.P.n.\psi.\gamma.K \quad (3.7)$$

Onde:

Q: Taxa de alimentação (kg/h);

D: Diâmetro da rosca (m);

P: Passo da rosca (m);

n: Velocidade de rotação da rosca-sem-fim (r.p.m);



n_{max} : Velocidade de rotação máxima da rosca-sem-fim (r.p.m);

w_o : Coeficiente total de resistência ao movimento;

ψ : Coeficiente de enchimento;

γ : Densidade aparente do material (kg/m^3);

K: Coeficiente que considera o ângulo de inclinação da rosca com relação à horizontal;

Sendo $D = P$, como é usual a equação (3.8) se transforma em:

$$Q = 47. D^3. n. \psi. \gamma. K \text{ (kg/h)} \quad (3.8)$$

As velocidades máximas de rotação da rosca (r.p.m.), são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Faixa de velocidades de rotação da rosca em função do seu diâmetro

Diâmetro da rosca	150	200	250	300	400	500	600
Faixa de velocidade (r.p.m)	24-150	20-180	24-118	19-118	19-95	19-95	15-75

Para o coeficiente K utiliza-se a Tabela 2 a seguir:

Tabela 2. Valores do coeficiente K para vários ângulos de inclinação (β) do transportador de rosca-sem-fim.

ângulo (β)	0	5	10	15	20
K	1	0,9	0,8	0,7	0,6

Para valores típicos de diâmetro D de roscas, a metodologia de Garcia (1987), recomenda valores do passo P da rosca iguais ao diâmetro, ou aproximadamente 0,8 vezes D.

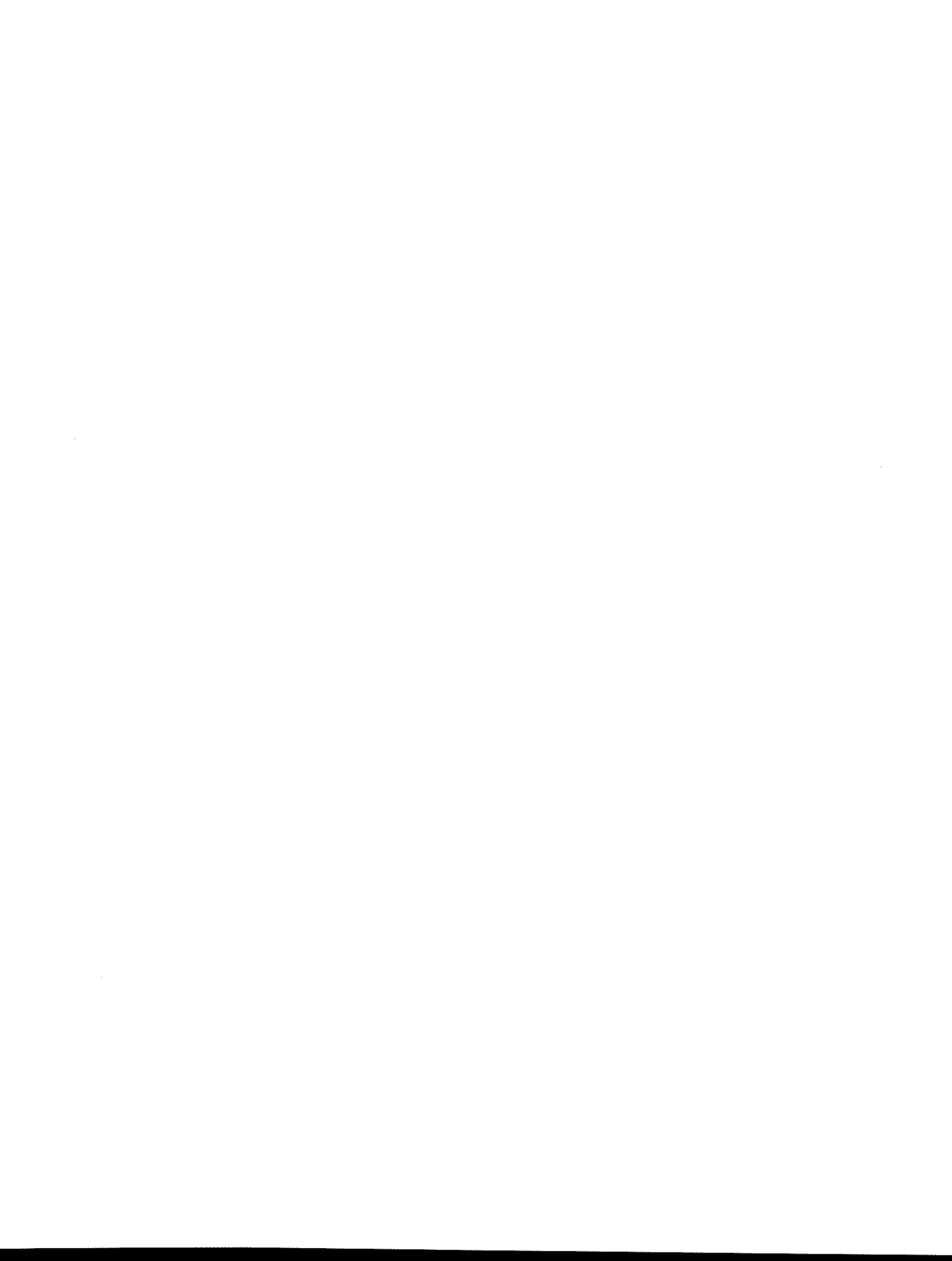


Tabela 3. Valores do passo P para diferentes diâmetros de rosca D

Diâmetro (mm)	100	125	160	200	250	300	400	500
Passo (mm)	100	125	160	200	250	300	400	500
	80	100	125	160	200	250	302	400

O tipo de material a transportar determina que as velocidades de rotação sejam menores conforme aumentam a densidade aparente γ e a sua abrasividade, assim como, o diâmetro D da rosca.

As velocidades máximas permissíveis podem ser calculadas pela seguinte equação:

$$n_{\text{máx}} = \frac{A}{\sqrt{D}} \quad (3.9)$$

onde A é um coeficiente empírico que depende da densidade aparente e a abrasividade do material.

Na tabela 4. apresentam-se os valores da classificação do material segundo seu tamanho ou composição. Na Tabela 5 são apresentados os valores de ψ , A e w_0 para diferentes características do material a ser transportado.



Tabela 4. Classificação dos materiais sólidos

Segundo o tamanho ou composição granulométrica	
Pó muito fino	0,05 (mm)
Pó	0,05-0,50 (mm)
Grão fino	0,5-2,0 (mm)
Grão médio	2,0-10,0 (mm)
Grão grosso	11,0-60,0 (mm)
Pedaços	61 (mm)
Segundo a densidade aparente (kg/m³)	
Leves	<60
Médios	60 a 110
Pesados	110 a 200
Muito Pesados	>200
Segundo a fluidez	
Muito fácil	Até 30°
Livre	De 30° a 45°
Lenta	≥ 45°

Tabela 5. Valores dos coeficientes ψ , A e w_0 em função das características do material a transportar

Características do material	Valores dos Coeficientes		
	ψ	A	w_0
Leves e não abrasivos	0,4	65	1,2
Leves e pouco abrasivos	0,32	50	1,6
Pesados e pouco abrasivos	0,25	45	2,5
Pesados e abrasivos	0,125	30	4,0



A potência (N) do motor para um transportador que opera horizontalmente é dado por :

$$N = \frac{Q.L.w_o}{367.\eta} \text{ (kW)} \quad (3.10)$$

onde:

η é a eficiência da transmissão (usualmente 0,85).

L é o comprimento do transportador (m).

- **Cálculo do diâmetro do eixo da rosca-sem-fim.**

Com os valores assumidos de D e Q, conhecendo-se ψ , γ e K, mediante a equação (3.11), se determinam a velocidade de rotação necessária para obter a descarga:

$$n_{nec} = \frac{Q}{47.D^3.\psi.\gamma.K} \text{ (r.p.m)} \quad (3.11)$$

Por outro lado, a partir de Q e γ calcula-se a vazão volumétrica, V_t , portanto:

$$V_t = \frac{Q}{\gamma} \text{ (m}^3\text{)} \quad (3.12)$$

onde Q é a descarga.

O volume V_t descarregado numa hora é também expresso por:

$$V_t = 15.n_{nec}.P.\pi(D^2-d^2) \text{ (m}^3\text{)}$$

Onde d é o diâmetro do eixo da rosca.

Então:

$$d = \left[D^2 - \frac{V_t}{15.n.P.\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ (m)} \quad (3.13)$$

Para facilitar a seqüência de cálculo dos parâmetros anteriormente expostos, utiliza-se o algoritmo da Figura 14.



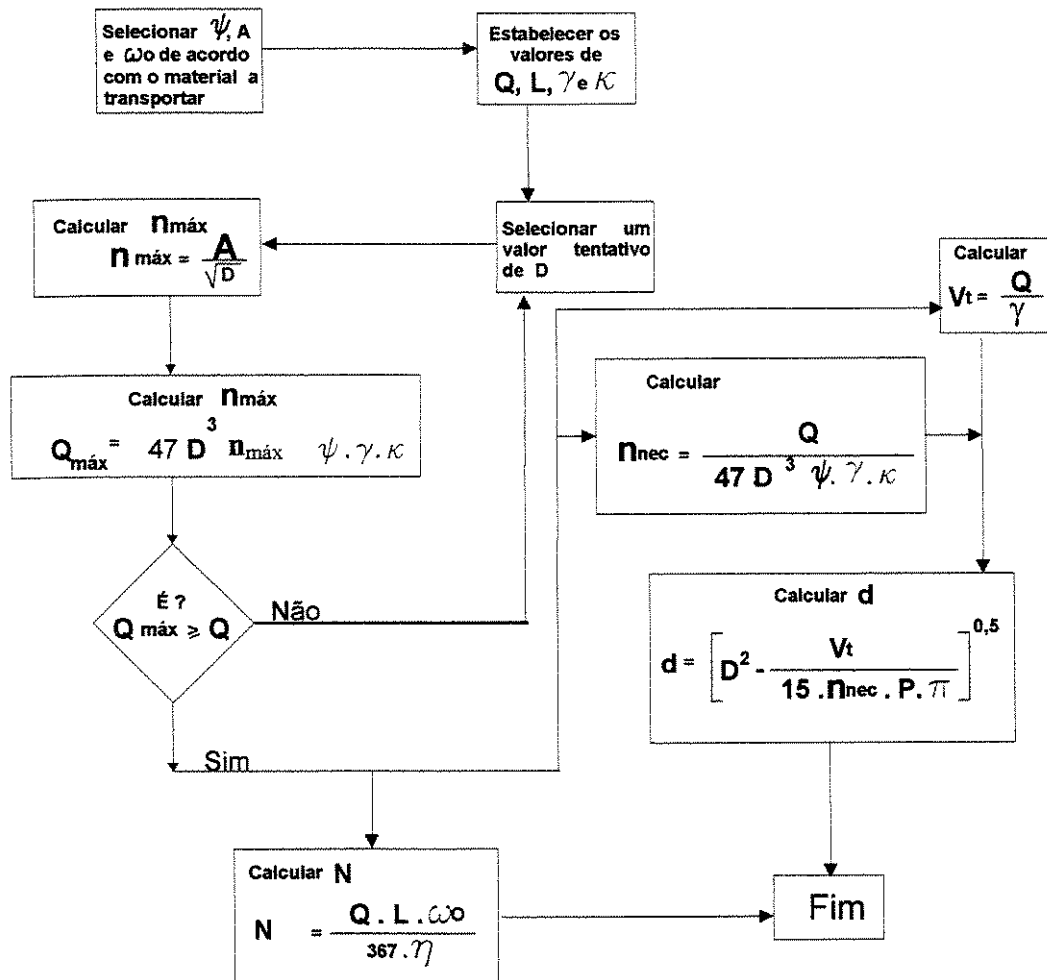


Figura 14 Algoritmo de cálculo dos parâmetros de um transportador de rosca-sem-fim

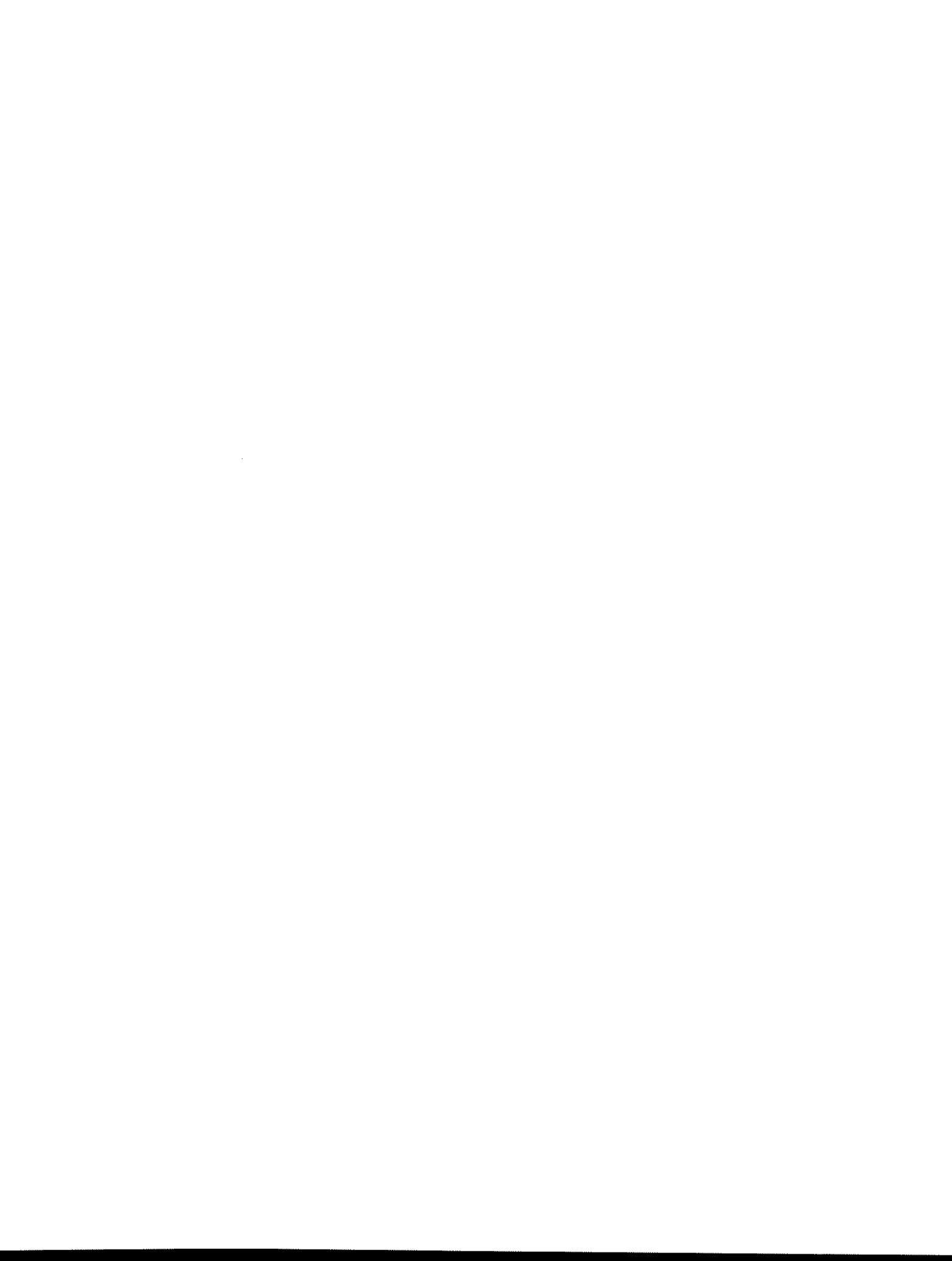
3.5 Cálculos da rosca-sem-fim

Aplicando a metodologia ao transportador de rosca deste projeto e seguindo o algoritmo antes exposto na Figura 14, tem-se que:

1 Da tabela 6 obtemos os valores de ψ , A , ω , considerando o material estudado, (capim elefante), é leve e pouco abrasivo

$$\psi = 0,32$$

$$A = 50$$



$$w_o = 2,0$$

2 Selecciona-se para a instalação de bancada

$$Q = 200 \text{ kg/h}$$

$$L = 2\text{m}$$

$$\gamma = 58 \text{ kg/m}^3 \text{ (capim elefante com 14 \% b.u)}$$

$$K = 1$$

3 Assume-se tentativamente $D = P = 278\text{mm} = 278 \text{ m}$ e mediante a tabela 5 obtém-se o coeficiente A

$$n_{\text{máx}} = \frac{A}{\sqrt{D}} = \frac{50}{\sqrt{0,278}} = 94 \text{ r.p.m}$$

Assume-se $n = 94 \text{ r.p.m}$

Verifica-se estes valores garantindo a capacidade requerida de 200 kg/h

Substituindo-se, em (3.9), os valores de $n_{\text{máx}}$ e D tem-se que:

$$Q_{\text{máx}} = 47 \cdot D^3 \cdot n_{\text{máx}} \cdot \psi \cdot \gamma \cdot K$$

$$Q_{\text{máx}} = 47 \cdot (0,278)^3 \cdot 94 \cdot 0,25 \cdot 58 \cdot 1$$

$$Q_{\text{máx}} = 1,37 \text{ T/h}$$

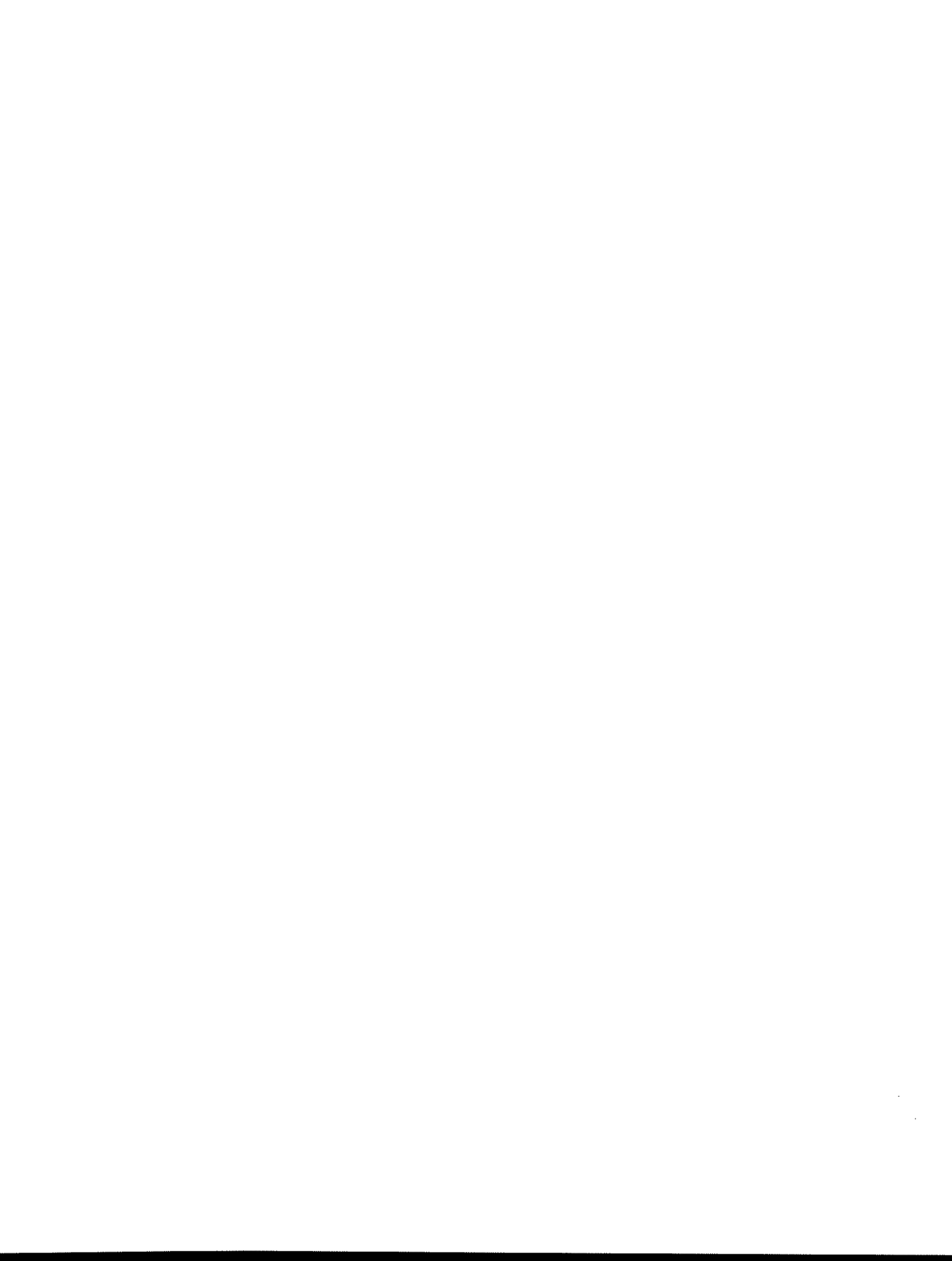
Observa-se que, 94 r.p.m satisfaz a capacidade requerida de 200 kg/h

5 Potência necessária. Utilizando-se a equação (3.10) temos:

$$N = \frac{Q \cdot L \cdot w_o}{367 \cdot \eta} \text{ (kW)}$$

$$N = \frac{200 \cdot 2 \cdot 2,0}{367 \cdot 0,85} = 2,56 \text{ kW}$$

6 Cálculo do diâmetro do eixo da rosca-sem-fim (d):



Assumindo-se um diâmetro da rosca D e um valor de Q determinados, mediante a equação (3.9) determinam-se n_{nec} (r.p.m):

Sendo:

$$Q = 200 \text{ kg/h}$$

$$D = 0.3\text{m}$$

$$Q = 47.D^3.n_{nec}.\psi.\gamma.K$$

$$n_{nec} = \frac{Q}{47.D^3.\psi.\gamma.K} = \frac{200}{47.(0,278)^3.0,32.58.1} = 10,67 \text{ r.p.m}$$

assumindo um valor do coeficiente de enchimento $\psi = 1$

$$n_{nec} = \frac{200}{47.(0,278)^3.1.58.1} = 3,41 \text{ r.p.m}$$

O vazão volumétrica será:

$$V_t = \frac{200\text{kg/h}}{58\text{kg/m}^3} = 3,44 \text{ m}^3/\text{h}$$

No entanto V_t é também calculado por:

$$V_t = 15.n_{nec}.P.\pi.(D^2 - d^2)$$

Cálculo do diâmetro do eixo da rosca de alimentação

$$d = \left[D^2 - \frac{V_t}{15.n.P.\pi} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[0,278^2 - \frac{3,44}{15.14,6.0,278.3,14} \right]^{\frac{1}{2}} = 0,24 \text{ (m)}$$

• **Parâmetros do transportador de rosca-sem-fim:**

- D = 0,278 m
- L = 2m
- Q = 200 Kg/h
- N = 2,58 kW

• **Potência total do sistema de alimentação**

Potência da rosca-sem-fim + Potência do removedor do fundo do silo



$N + HP_r = \text{Potência total}$

$$2,58 + 0,03 = 2,61 \text{ KW} \approx 3 \text{ KW}$$

A potência necessária para mover o removedor e a rosca de injeção é de 3 KW.

3.6 Cálculo das polias e correias segundo Manual da Good Year (1998)

θ_0 : Velocidade angular na entrada do eixo do redutor

θ_1 : Velocidade angular na saída do eixo do motor

Dd_1 : Diâmetro primitivo da polia na entrada do eixo do redutor

Dd_2 : Diâmetro primitivo da polia da rosca-sem-fim

dd_1 : Diâmetro primitivo da polia do motor

dd_2 : Diâmetro primitivo da polia na entrada do eixo do redutor

C : Distância entre as polias

- **Relação de velocidades**

$$R_T = \frac{\theta_1}{\theta_0} \quad (3.14)$$

- **Cálculo de Dd**

$$Dd = R_T dd \quad (3.15)$$

- **Velocidade linear**

$$V_L = 0,262 dd \text{ r.p.m} = 0,262 Dd \text{ r.p.m} \quad (3.16)$$

- **Comprimento datum ou primitivo Ld**

$$Ld = 2C + 1,57 \cdot (Dd + dd) + \frac{(Dd - dd)^2}{4c} \quad (3.17)$$

- **Cálculos**

$$R_T = \frac{800}{160} = 5 \quad R_T = \frac{160}{32} = 5$$



160 r.p.m rotações na qual move-se o eixo da entrada do redutor para garantir baixas rotações no removedor do fundo do silo.

Assume-se o valor do diâmetro primitivo da polia no eixo do motor segundo Manual da Good Year (1998).

$$dd_1 = dd_2 = 101,6 \text{ mm}$$

Escolheu-se $dd_1 = dd_2$ para que o diâmetro da polia da rosca-sem-fim não fosse muito grande, pelo que:

$$Dd_1 = Dd_2 = 5 \times 101,6 = 508 \text{ mm}$$

A rotação da polia de 101,6 mm de diâmetro primitivo está no eixo do motor de 4 HP a 800 r.p.m nominais. Esta rotação entra na polia de 508 mm de diâmetro primitivo a 160 r.p.m segundo os cálculos realizados. Ao lado desta polia no mesmo eixo temos outra de 101,6 mm de diâmetro primitivo. A correia que está nesta polia vai mover a polia de 508 mm de diâmetro primitivo da rosca-sem-fim a 32 r.p.m. Com o inversor de frequência teremos a possibilidade de variar as rotações de saída do motor elétrico. Com estas variações das rotações de saída do motor poderemos variar a vazão mássica da rosca-sem-fim. O inversor de frequência deste protótipo não será utilizado em sua produção em série.

- Velocidade linear da correia $V = (0,262) \times (4) \times (1750) = 9,3 \text{ m/s}$
- Segundo Manual da Good Year (1998) a velocidade calculada tem que ser $< 30,4 \text{ m/s}$

- **Cálculo do comprimento primitivo L_d**

C_1 : Distância entre os eixos das polias no redutor e o motor elétrico,

C_2 : Distância entre os eixos das polias no redutor e rosca-sem-fim

$$L_{d1} = 2 \cdot (697) + 1,57 \cdot (508 + 101,6) + \frac{(508 - 101,6)^2}{4(697)} = 2410,3 \text{ mm} \quad (3.18)$$

$$L_{d2} = 2 \cdot (320) + 1,57 \cdot (508 + 101,6) + \frac{(508 - 101,6)^2}{4(697)} = 1726,1 \text{ mm}$$

Segundo o Manual Good Year (1998), a correia que mais se aproxima ao L_d de 2410,3mm



é a C-91 cujo comprimento datum é 2385mm. Para o Ld de 1726,1mm é C-64

- **Cálculo e determinação do fator de correção do arco de contato Fac**

$$Ac = 180 - \frac{Dd - dd}{c} \times 60 = 180 - \frac{508 - 101,6}{697} \times 60 = 145 \quad (3.19)$$

Segundo Manual Good Year (1998) o valor correspondente ao fator de correção do arco de contato Fac para 145 graus é de Fac=0,91.

- **Determinação do fator de correção do comprimento FLd**

Segundo Manual Good Year (1998) para o comprimento datum Ld=2410,3 mm = 94,8 pulg, correia C-91 o fator de correção=0,918.

- **Potência por correia**

Segundo Manual Good Year (1998) para a correia C-91 a potência é = 11,19HP.

- **Determinação da potência adicional por correia**

Segundo Manual Good Year (1998) o HP adicional é = 3,06

- **Determinação da potência classificado**

$$Hp_{\text{basico}} + Hp_{\text{adicional}} = Hp_{\text{classificado}} \quad (3.20)$$

$$11,19\text{HP} + 3,06\text{HP} = 14,25 \text{ HP}$$

- **Potência efetivo**

$$\text{Potência efetivo} = Hp_{\text{classificado}} \times \text{Fac} \times \text{FLd} \quad (3.21)$$

$$Hp = 14,25 \times 0,916 \times 0,918 = 11,98 \text{ HP}$$

- **Determinação da quantidade de correias**

$$\# \text{ de correias} = \frac{\text{Potência projeto}}{\text{Potência efetivo}} = \frac{3}{11,98} = 0,25 < 1 \text{ por tanto é necessária só uma correia}$$



3.7 Avaliação do sistema de alimentação desenvolvido

Consta de um estudo do efeito dos fatores que influem sobre a homogeneidade do fluxo de descarga da biomassa.

O problema foi tratado mediante a metodologia dos modelos empíricos para o sistema de “caixa preta”, Montgomery (1991), na qual precisam-se identificar os fatores de possível influência sobre as respostas a estudar.

O estudo teórico realizado sobre os problemas antes observados conduz a escolher como fatores principais:

- Velocidade de rotação do removedor do fundo do silo,
- Altura da biomassa no silo.

A velocidade do removedor e a rosca-sem-fim são proporcionais pela relação de transmissão mecânica que existe entre eles.

Como variável independente ou de resposta escolhe-se a vazão mássica.

Realiza-se um planejamento fatorial 2^2 com três repetições e uma replica no ponto central do planejamento.

X_1 = Velocidade de rotação do removedor do fundo do silo

X_2 = Altura da biomassa no silo

Para cada variável independente fixam-se dos níveis:

+1 (nível superior)

-1 (nível inferior)

As replicas são realizadas no ponto central (0 na expressão codificada do planejamento).



Isto se resume na seguinte matriz dos experimentos.

<i>Exp</i>	X_1	X_2
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	0	0
6	-1	-1
7	+1	-1
8	-1	+1
9	+1	+1
10	0	0
11	-1	-1
12	+1	-1
13	-1	+1
14	+1	+1
15	0	0

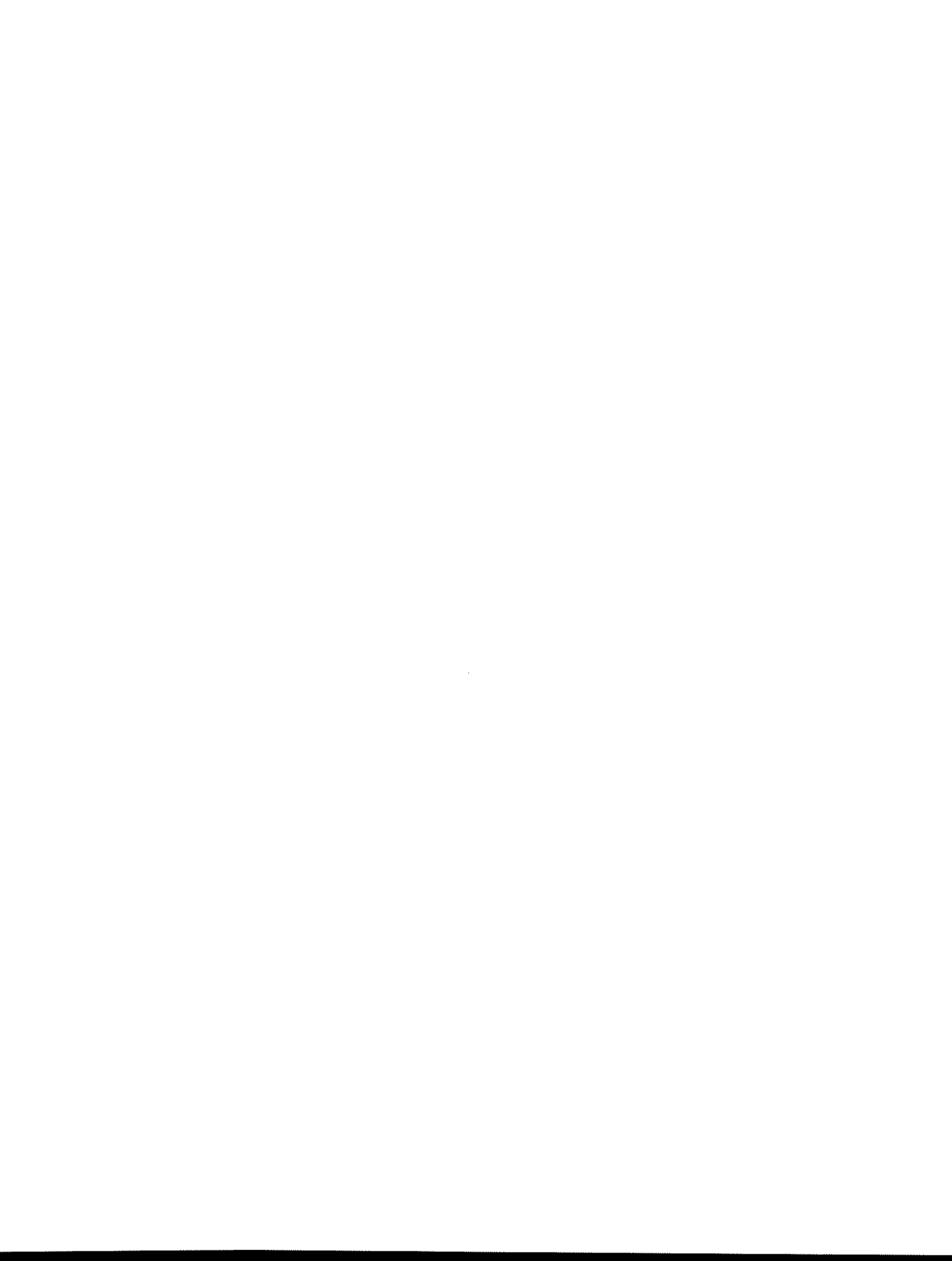
(3.23)

A função objetivo a obter será:

Y= Fluxo de descarregamento

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 \quad (3.24)$$

Para a função objetivo obtida para cada biomassa, foram realizados testes estatísticos para cada significancia dos coeficientes, (análise de variância) e para a qualidade do modelo (falta de ajuste).



Capítulo 4

Resultados e discussões

4.1 Avaliação do sistema de alimentação

Realizaram-se 15 experimentos seguindo a matriz dos experimentos já apresentada, cujos resultados mostram-se a seguir.



Exp	X ₁	X ₂	F =
1	-1	-1	3,05
2	+1	-1	8,5
3	-1	+1	5,10
4	+1	+1	7,4
5	0	0	5,77
6	-1	-1	3,38
7	+1	-1	9,0
8	-1	+1	5,20
9	+1	+1	9,30
10	0	0	5,80
11	-1	-1	3,39
12	+1	-1	9,30
13	-1	+1	4,67
14	+1	+1	6,96
15	0	0	5,30

Para X₁: Velocidade de rotação do removedor do fundo do silo

Os valores +1 (nível superior 0,6 r.p.m. (removedor)) para estas rotações do removedor a rosca-sem-fim gira a 8 rpm.

0 (nível central 0,45 r.p.m. (removedor)) para estas rotações do removedor a rosca-sem-fim gira a 6 rpm.

-1 (nível inferior 0,3 r.p.m. (removedor)) para estas rotações do removedor a rosca-sem-fim gira a 4 rpm.

Para X₂: Altura da biomassa no silo

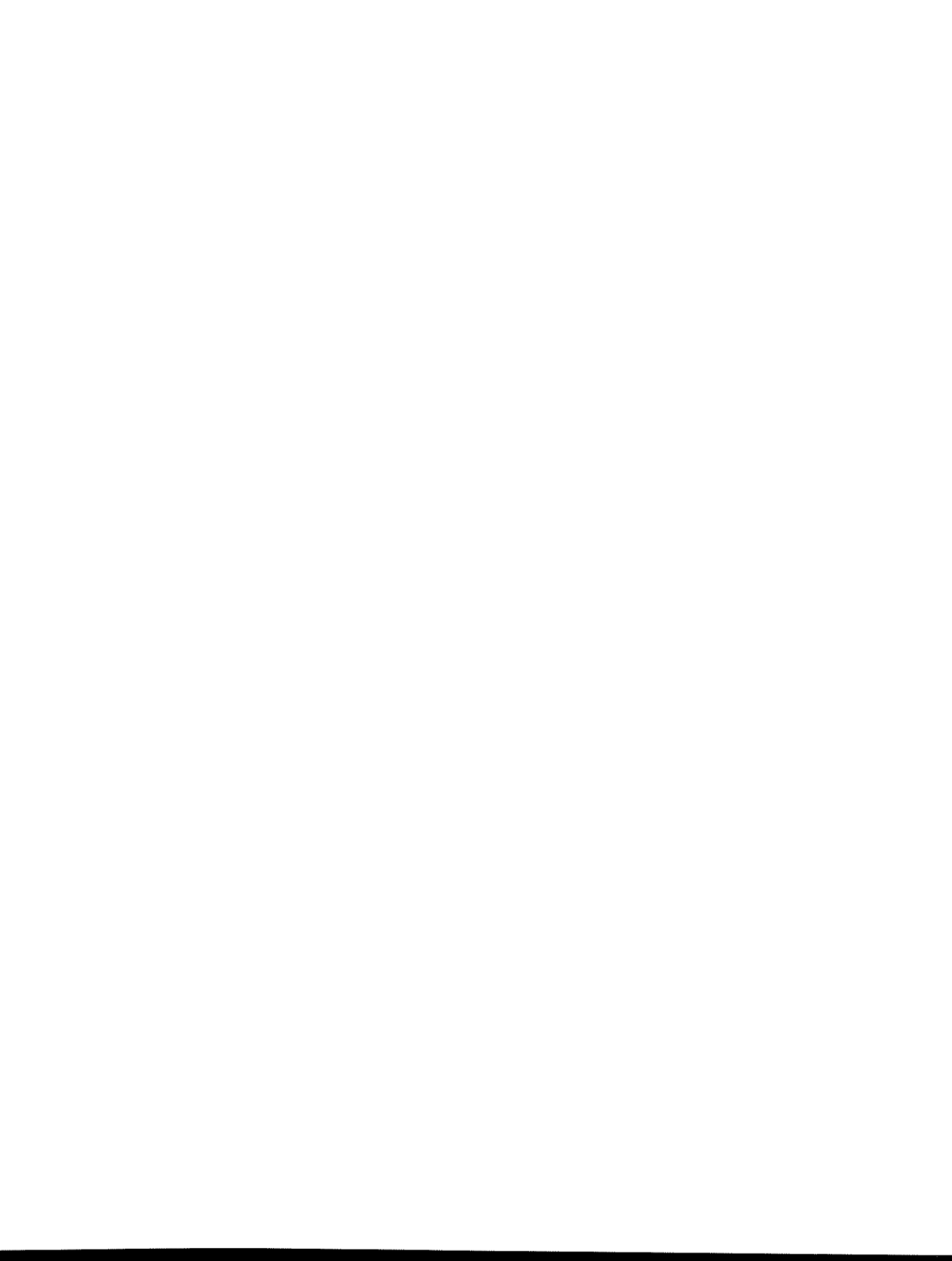
Os valores +1 (nível superior 0,75m)

0 (nível central 0,5 m)

+1 (nível inferior 0,25 m)

O processamento dos dados foi executado utilizando o Software STATGRAPHICS STATISTICAL GRAPHICS SYSTEM.

Na tabela de análises de variância (ANOVA) mostram-se os resultados da significância dos



coeficientes assim como a falta de ajuste do modelo para um 95 % de confiança.

Tabela 6. Análises de variância 1

Fator	Suma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _c	P-value
Velocidade do removedor do fundo do silo (X ₁)	54,91	1	54,91	144,11	0,00
Altura da biomassa no silo	0,33	1	0,33	0,88	0,37
Interação de velocidade com altura	5,72	1	5,72	15,03	0,003
Falta de ajuste	1,00	1	1,00	2,64	0,13
Error Puro	3,81	10	3,81		

$$R^2=0,926$$

$$R^2_{adj} \text{ (ajustado para grau de liberdade)} = 0,9068$$

P-value utiliza-se para decidir si o fator que analisa-se tem cambio significativo sobre a resposta, e interpreta-se como a probabilidade de obter valores de $F_C > F_T$, por exemplo o fator X₂ altura da biomassa no silo apresenta uma probabilidade de (P-value = 0,37) de 63 % de obter que $F_C > F_T$. Se o pesquisador fixo para seus experimentos uma probabilidade de $\alpha = 0,05$ o seja o 95 %, como é o caso deste trabalho, então todos os fatores nos que P-value seja menor que $\alpha = 0,05$ exercem cambio significativo sobre a resposta estudada. No caso contrario conclui-se que o fator que analisa-se não exerce influência significativa sobre a resposta estudada.

A falta de ajuste não é significativa $0,003 > 0,005$ pelo que o modelo encontrado vai predizer o comportamento do fluxo de descarga do alimentador na faixa de velocidades estudadas

Como X₁ (velocidade do removedor do fundo do silo) e a interação da velocidade do removedor com a altura da biomassa (X₁)(X₂) são os únicos coeficientes significativos, o modelo fica segundo a equação (4.1)

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_{12} X_1 X_2 \quad (4.1)$$

Como y = Descarga substituímos F por Y na equação (4.1)

$$F = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (4.2)$$



Valores dos coeficientes de regressão calculados.

$$b_0 = 6,14$$

$$b_1 = 2,13$$

$$b_2 = 0,16$$

$$b_1 b_2 = - 0,69$$

Substituindo em (4.2) os coeficientes obtidos a equação final é a seguinte:

$$F = 6,14 + 2,13 X_1 - 0,69 X_1 X_2$$

A equação (4.1) está codificada, para decodificá-la devemos substituir a $X_1 = \frac{X_R - X_C}{M}$ e

$$X_2 = \frac{X_R - X_C}{M}$$

Onde X_1 = Valor codificado

X_R = Valor real da velocidade de rotação do removedor r.p.m

X_C = Valor central

M = Modulo ($X_R - X_C$)

Onde X_2 = Valor codificado

X_R = Valor real da altura da biomassa no silo (m)

X_C = Valor central

M = Modulo ($X_R - X_C$)

$$F = 6,14 + 2,13 \left(\frac{X_R - X_C}{M} \right) - 0,69 \left(\frac{X_R - X_C}{M} \right) \left(\frac{X_R - X_C}{M} \right) \quad \text{(kg/min)} \quad (4.3)$$

Para o nível superior +1 (0,6 r.p.m)

$$F_1 = 6,14 + 2,13 \left(\frac{0,6 - 0,45}{0,15} \right) - 0,69 \left(\frac{0,6 - 0,45}{0,15} \right) \left(\frac{0,75 - 0,5}{0,25} \right) = 7,58 \text{ (kg/min)} \quad (4.4)$$

Para o nível central 0 (0,45 r.p.m)

$$F_2 = 6,14 + 2,13 \left(\frac{0,45 - 0,45}{0,15} \right) - 0,69 \left(\frac{0,45 - 0,45}{0,15} \right) \left(\frac{0,5 - 0,5}{0,25} \right) = 6,14 \text{ (kg/min)} \quad (4.5)$$

Para nível inferior -1 (0,3 r.p.m)

$$F_3 = 6,14 + 2,13 \left(\frac{0,3 - 0,45}{0,15} \right) - 0,69 \left(\frac{0,5 - 0,375}{0,125} \right) \left(\frac{0,25 - 0,5}{0,25} \right) = 3,32 \text{ (kg/h)} \quad (4.6)$$



O desvio padrão é obtido segundo a equação (4.7)

$$\sqrt{S_p^2} = S \quad (4.7)$$

S: Desvio padrão

Calculando o desvio padrão obtemos

$$\sqrt{3,81} = 1,95$$

Então as equações (4.4), (4.5), (4.6) ficam

$$F_1 = 7,58 \text{ kg/h} \pm 1,95 \text{ kg/h}$$

$$F_2 = 6,14 \text{ kg/h} \pm 1,95 \text{ kg/h}$$

$$F_3 = 3,32 \text{ kg/h} \pm 1,95 \text{ kg/h}$$

Como $R^2 \approx R^2_{\text{adj}}$ e a falta de ajuste não é significativa o modelo encontrado ajusta os dados experimentais com um alto valor do coeficiente de determinação. Pelo que o modelo matemático prediz a resposta. A superfície de resposta que ele gera também, a qual mostrasse a seguir.

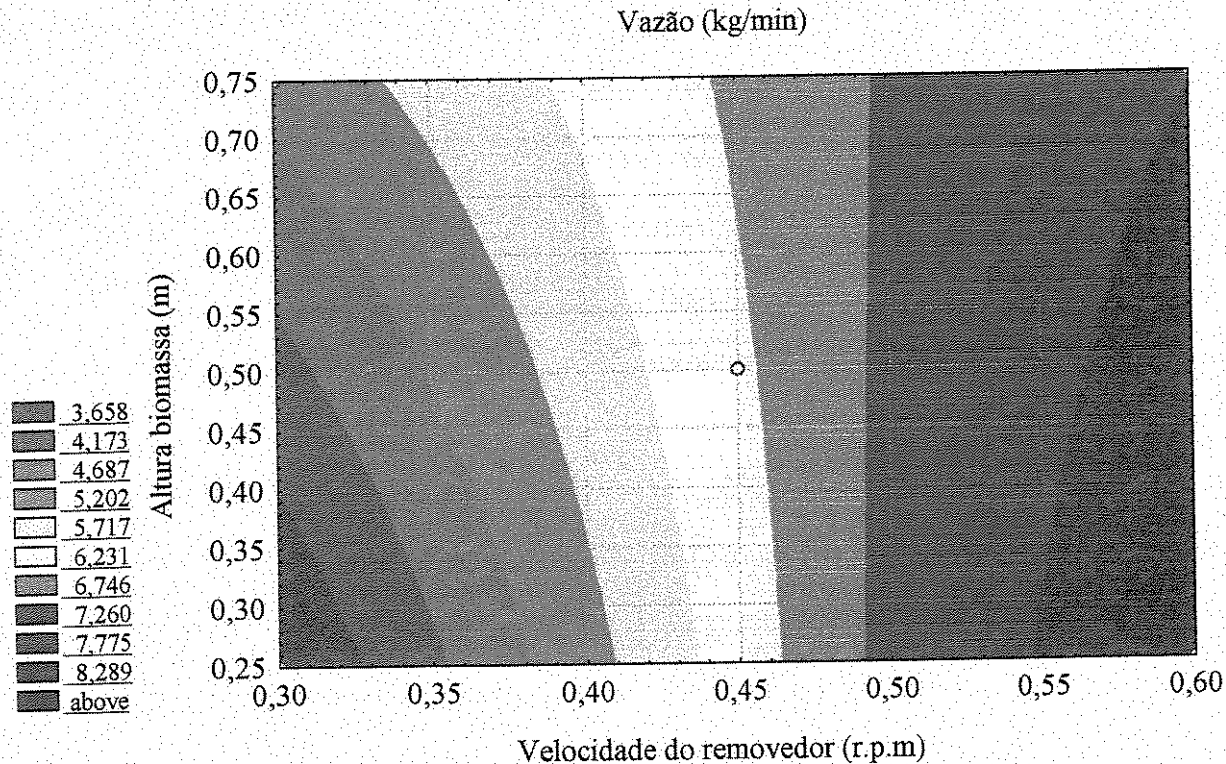


Figura 15 Superfície de resposta que mostra o comportamento do fluxo de descarga



Analisando-se os dados obtidos na tabela de análises de variância (tabelas 7) e a superfície de resposta do modelo verifica-se as variáveis que tem significado no processo de alimentação do sistema. Que são a velocidade do removedor do fundo do silo (X_1) e sua interação com a altura da biomassa no silo (X_1)(X_2).

Durante os experimentos realizados comprovou-se visualmente a continuidade na alimentação da biomassa. A rosca-sem-fim permaneceu cheia nas três velocidades que foi testada 8, 12, 16 r.p.m garantido uma alimentação estável e uniforme, parâmetros muito importantes quando se quer um processo contínuo e controlado.

4.2 Comprovação da segregação do material na descarga do alimentador

Para a comprovação da segregação durante o processo de descarga do novo protótipo escolheram-se 10 amostras do material alimentado. As primeiras 5 amostras foram recolhidas no começo da descarga do sistema de alimentação e as outras 5 amostras foram recolhidas no fim da descarga. O tempo de duração das colheitas em total foi de 10 minutos no total com a rosca girando a 8 r.p.m.

Os resultados obtidos estão na tabela 8 seguinte na qual se compara os diâmetros médios das partículas no início do processo e no fim dele.



O teor de umidade segundo Neiva (1998), é um fator que influencia nas propriedades do material estudado, como a densidade aparente, ângulo de repouso, etc. Porém neste trabalho o teor de umidade medido de 14% b.u se manteve constante durante os testes realizados. O material utilizado nos ensaios sempre esteve dentro de sacos plásticos bem fechados, os quais só eram abertos para a realização dos testes de alimentação.

4.4 Densidade Aparente

A densidade aparente é uma propriedade que depende fortemente do teor de umidade, cuja variação é linear segundo Legros et al (1995).

Para o capim elefante com 14 % b.u de umidade, a densidade aparente foi 58 kg/m³.

Observa-se a baixa densidade do capim elefante para este teor de umidade. Isto, segundo Gómez (1996) é um dos fatores que impossibilita a alimentação estável quando se opera com sistemas de alimentação convencionais.



4.5 Levantamento preliminar de custo do sistema de alimentação desenvolvido

Na seguinte tabela relacionam-se os equipamentos, materiais utilizados e seus preços

Tabela 8. Equipamentos e matérias utilizados na construção do protótipo

Equipamentos e matérias utilizados	Quantidade	Preços R\$
Motor elétrico 4 C.V.	1	498,00
Redutor Magma	1	923,00
Ferro Redondo 3"	1	8,2
Ferro Chato 2 1/2 x 1/2"	1	108,00
Tubo redondo 1 1/2 x 2,25	1	10,2
Chapa 2 mm-300x1200	1	333,00
Chapa 1/4"	1	13,00
Viga U lam 3"	4	118,4
Viga U Dob. 50 x 25x 2,65	4	32,4
Polia 04" A	2	11,9
Polia 20" A	2	30,00
Correia A-88	1	13,76
Total		2099,86

Mão de obra:

Soldador Chaparia R\$ 2,10/h

Ajudante R\$ 1,5/h

Horas trabalhadas 56 horas

$2,10 \cdot 56 = 117,6$ R\$

$1,5 \cdot 56 = 84$ R\$

Total de mão de obra R\$ 201,6

Total de equipamentos e mão de obra utilizada $2099,86 + 201,6 =$ R\$ 2300,86



Capítulo 5

Conclusões e sugestões

A realização deste trabalho permitiu concluir com os seguintes aspectos:

1. Os ensaios realizados com o novo sistema de alimentação permitiram comprovar que é possível conseguir uma alimentação estável e uniforme quando se utilizam silos de paredes negativas nos sistemas de alimentação,
2. O silo de paredes negativas evita a formação de arcos ou pontes, o principal problema durante a operação permanente do sistemas de alimentação convencionais
3. Os resultados experimentais obtidos com o capim elefante de ampla faixa granulométrica e baixa densidade com um teor de umidade de 14% b.u, comprovaram a possibilidade de garantir uma taxa de alimentação estável operando-se o sistema a baixas velocidades de rotação da rosca de injeção,
4. O novo sistema garante parâmetros importantes no processo de alimentação, como continuidade e estabilidade no fluxo de descarga,
5. Houveram dois parâmetros significativos para a resposta estudada: (X_1) velocidade do removedor e a interação da altura com a velocidade do removedor (X_1) (X_2),



6. Para obter a maior eficiência na vazão mássica do sistema de alimentação o alimentador deve operar, segundo o modelo obtido com (X_1) velocidade do removedor no nível inferior e (X_2) altura da biomassa no superior ou realizando a operação contrária

Recomendações para o desenvolvimento de futuros trabalhos

1. Verificar a influência do teor de umidade da biomassa sobre o fluxo de descarga,
2. Aumentar a faixa de velocidade de rotação da rosca , para comprovar a influência deste parâmetro sobre continuidade, estabilidade e uniformidade na descarga,
3. Verificar a importância do removedor e do raspador sobre continuidade da descarga realizando experimentos onde eles fiquem parados a rosca-sem-fim.
4. Realizar testes com outros tipos de biomassas para ver seu comportamento no equipamento.



Capítulo 6

Referências Bibliográficas

American Society For Testing And Materials-ASTM. Philadelphia, Race St. Bulk Density of Densified Particulate Biomass Fuels. Designation: E 873-82. 1916;

American Society For Testing And Materials-ASTM. Philadelphia, Race St. Standar Method Analysis of particulate Wood Fuels. Designation: E 871-82. 1916;

Anderson, P. M. *La combustión de los residuos agrícolas de la caña de azúcar. Parte I Características Combustibles*. Cuba Azúcar:40-47, Ene./mar. 1989;

Araújo, E. C. *Estudo Teórico experimental de tremonhas Piramidais para Silos Metálicos Elevados* São Carlos: EESC, USP, 1997 Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo;

Bates, L. Entrainment Pattern of Screw Hopper Discharges Trans. ASME, *Journal of Eng. for Industry*, vol. 91, n.2, p.295-302, 1969;

Bates, L. The storage, feed and collection of loose solids. *Powder handling & processing*, v.6, n.2; 1994;

Bel, T. A., Ennis, B. J., Grygo R. J., Scholten W. J. F., Schenkel, M. M. Practical Evolution of the Johanson Hang-up Indicizer. *Bulk Solids Handling* v.14, n.1, p.117-125, 1994;



Benedetti, B. C. *Influência do Teor de Umidade sobre Propriedades Físicas*, Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1987; Tese (Mestrado);

Bernhardt, W. H. Shape factor of bagasse particles. Proceeding of the south African technologists association, p. 181-184, jun.1993;

Box, G. E. P., Hunter, W. G. & Hunter, J. S. *Estadística para Investigadores. Introducción al diseño de Experimentos, Análisis de Datos y Construcción de Modelos*, Ed. Reverté S.A. España 1993;

Bridgwater, A. A. Review of thermochemical biomass conversion. Energy Research Group, Aston University, Birmingham, Crow Copyright, p.76, jan, 1991;

Calil, Jr. C. *Recomendações de Fluxo e de Cargas para Projetos de Silos Verticais*. São Carlos: EESC, USP, 1990. Tese (Livre-docência)- Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1990;

Cheremisinoff, N. P., Cheremisinoff, P. N E Ellerbusch, F. *Biomass, application, technology and production*. Ed. Marcel Dekker, New York and base, 1980;

Chrysosteme, G., Lemasle, J. M. Syngas Production From Wood by Oxigen Gasification Under Pressure. *Bioenergy*, 1984;

Cortez, L. A. B., Silva, E. *Impacto ambiental do uso da energia da biomassa e tecnologias para o controle de emissões*. In: Tecnologias de conversão energética de biomassa, Ed. Universidade do Amazonas, p. 509-527, 1997;

Cortez, L. A. B., Bajay, S.W., Braunbeck, O, A. Uso de resíduos agrícolas para fins energéticos: o caso da palha de cana-de-açúcar., Workshop Internacional "Ciencia e Tecnologia para a Civilização Moderna, 1997;

Coulomb, C. A. *Application des Règles des Maxims et Minimis à Quelques Problèmes de Statique relatifs à l' Architecture* Mémoires de savants étrangers de l' Academie de Sciences de Paris, 1773;

Dayton, D., Chum, H. L. Symposium on biomass fuels: an introduction. *Energy&Fuel*, v.10, n.2, 1996;

Drescher, A., Water, A. J., Rhoades, C. A. Arching im hoppers I: Arching theories and bulk material flow properties. *Power Technology* 84, p. 165-176, 1995;

Drescher, A., Water, A. J., Rhoades, C. A. Arching im hoppers II: Arching theories and critical outlet size. *Power Technology* 84, p. 177-183, 1995;

Garcia, A. D. *Equipos para el transporte de materiales de la Industria Azucarera*.



Transportadores y Bombas. Ed. ISPJAM, Santiago de Cuba, Cuba, 1987;

Gómez, E. O. *Projeto, Construção e Avaliação Preliminar de um Reator de Leito Fluidizado para Gaseificação de bagaço de Cana-de-Açúcar*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas-FEAGRI, UNICAMP, 1996;

Gomide, R. *Operações Unitárias -1 Volume: Operações com Sólidos Granulares*. São Paulo: Edição do Autor, p. 293, 1983;

Haaker, G., Van Poppelen, M. P., Jongejan, M. P., And Bekhuis, J. H. A method to optimize screw Feeder Geometry For Equable Draw-Dawn Performance. *Powder Handling & Processing*, v6, n.2, p. 209-214, Apri-Jun 1994;

Janssen, H. A. *Versuche über Getreidedruck in Silozellen (on the Measurement of Pressures in Grain Silos)*. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, p. 1045-1049, 1895;

Jenike & Johanson. Inc. Patent Awarded for Feeding Screw on "Flow of Solids Newsletter", v. XII, n.1, p.2, fev. 1992;

Jenike, A.W. *Storage and Flow of Solids Bulletin 123*, University of Utah, Engineering Experimentation Station, Salt Lake City, nov., 1964;

Judkins, R. R., Fulkerson, W. The dilemma of fossil fuel use and glogal climate change. *Energy&Fuels*, v.7, p.14-22, 1993;

Kamath, S., Puri V.M. - Measurement of Powder Flow Constitutive Model Parameters Using a Cubical Friaxial Fester. *Power Technology*, n.90, p. 59-70, 1997;

Kolzer, J., Novosad J. A Method for Testing the Flowability of Fertilizeres, *Bulk Solids Handling*, v.9, n.1, p. 43-48, Feb. 1989;

Kwade, A., Schulze, D., Schedes J. "Determination of the Stress Rofio in Uni axial Compression Tests", Parts I. *Powder Handling and Processing* v.6, n.1, jan/mar, p. 61-65, 1994;

Kwade, A., Schulze, D., Schedes, J. Determination of the Stress Rofio in Uni axial Compression Tests, Parts II. *Powder Handling and Processing* v.6, n.2, abr/jan, p. 199-204, 1994

Ladipo, D. D., Puri, V. M. - Computer Controlled Shear Cell for Measurement of Flow Properties of Particulate Materiols. *Powder Technology*, n.92, p. 135-146, 1997;

Legros, R., Clift, R., Millington, C. A. Development of a Mobilization Technique for Fibrous Materials. *Power Technology*, n.85, p. 105-114, 1995;

Manton, A. E. Screw Feeder Design. *Powder Handling and Processing*, v.6, n.1, p.87-89, jan/Mar. 1994;

Marinelli, J., Carson, J. W. Characterize Bulk solids to Ensure Smooth Flow. *Chem*



Engineering, p. 78-90, apr. 1994;

Marinelli, J., Carson, J. W. Use Screw Feeders Effectively. *Chem. Eng. Progress*, p. 47-51, Dec 1992;

Marinelli, J., Carson, J. W. Solve solids flow Problems in Bins, Hoppers, and Feeders. *Chem. Eng. Progress*, p. 22-28, May 1992;

Meirelles, A. J. A. *Secagem de bagaço de cana em leito fluidizado*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos. Campinas - FEA, UNICAMP, 1984;

Ministério da Infra-Estrutura. *Balanço energético nacional 1997*;

Manual da Good Year. *Polias e correias*, 1998;

Nebra, S. A. *Secagem Pneumática de Bagaço de Cana*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1985; Tese (Doutorado);

Neiva, A. C. De Barros. *Estudo de Alimentadores de Bagaço de Cana-de-Açúcar para Reatores Atmosféricos*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998, Tese (Mestrado);

Roberts, A. W. Bulk Solids Handling - Recent Developments and Future Directions. *Bulk Solids Handling*, v. 2, n.1, p. 17-35, mar, 1991;

Roberts, A.W. 100 Years of Janssen. *Bulk Solids Handling*, v.15, n 3, p: 369-383, Jul/Sept., 1995;

Ravenet, J. C. *Silos*. Barcelona: ETA, 1992;

Roberts, A.W. Predicting the volumetric and torque characteristics of screw feeders. *Bulk Solids Handling*, v.16n.2, p. 233-244, abr-jun. 1996;

Sanchez, C. G. - *Estudo da Volatilização e da Gaseificação de Biomassa em Leito Fluidizado*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1994, Universidade Estadual de Campinas, 1994; Tese (Doutorado);

Sanchez, C.G. *Gaseificação de biomassa*. Manuscrito de curso, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996;

Schleisenger, D., Papkov, A., Screw Conveyor Calculation Based on Actual Material Properties. *Powder Handling and Processing*, v9, n4, p. 321-325, Oct-Dec 1997

Schofield, C., Sutton, H.M. - Systems Approach for In-Plant Bulk Materials Handling. *Chemical Engineering*, Mar, 1997, p.103-110;

Schwedes, J. Measurement of Flow Properties of bulk Solids. *Powder Technology*, n88, p. 285-290, 1996



Schwedes, J., Schulze, D. - Measurement of Flow Properties of Bulk Solids. *Powder Technology*, v.61, p. 59-69, 1990;

Seye, O., Cortez, L. A. B., Brossard, G. L. Aproveitamento do capim elefante (*Pennisetum purpurem schum*) como insumo energético na indústria da cerâmica vermelha; artigo enviado para publicação. *Revista brasileira de energia*, 2001;



9 Anexos

ANEXO 1

RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL NO INICIO DA DESCARGA. (AMOSTRA 1)

Mi (g)	Xi	Dp(sup)	Dpi	Xi	Yi	Xi/Dpi	1/(Xi/Dpi)
4,86	0,22	4,76	3,38	1,00	0,00	0,07	0,89
10,23	0,47	2,00	1,60	0,78	0,22	0,29	
3,33	0,15	1,19	0,89	0,31	0,69	0,17	
2,25	0,10	0,59	0,40	0,16	0,84	0,26	
0,94	0,04	0,21	0,18	0,06	0,94	0,24	
0,16	0,01	0,15	0,07	0,01	0,99	0,10	
0,15	0,01	0,00	0,00	0,01	0,99	-	
21,92	1,00				1,00	1,12	

Mi(g): Massa retida no tamis inferior de cada classe ou tamanho

Xi(g): Fração retida no tamis inferior de cada classe ex: $Xi = Mi / \text{Massa total da amostra}$

Dp(sup): Valores da abertura do tamis superior de cada classe ou tamanho

Dpi(mm): Valores do tamanho médio das partículas retidas no tamis inferior de cada classe ou tamanho, ex: $Dpi = [Dp(\text{sup}_i) + Dp(\text{sup}_{i+1})] / 2 = (12,7 + 9,52) / 2 = 11,11$

Xi: Valores da função de distribuição acumulativa menor que os tamanhos $Dp(\text{sup}_i)$, ex: $Xi = Xi_{(i-1)} - Xi_{(i-1)} = 0,86 - 0,06 = 0,83$

Yi: Valores da função de distribuição acumulativa maior que os tamanhos $Dp(\text{sup}_i)$,



$1/(X_i/D_{pi})$: Diâmetro médio de partícula.

ANEXO 2

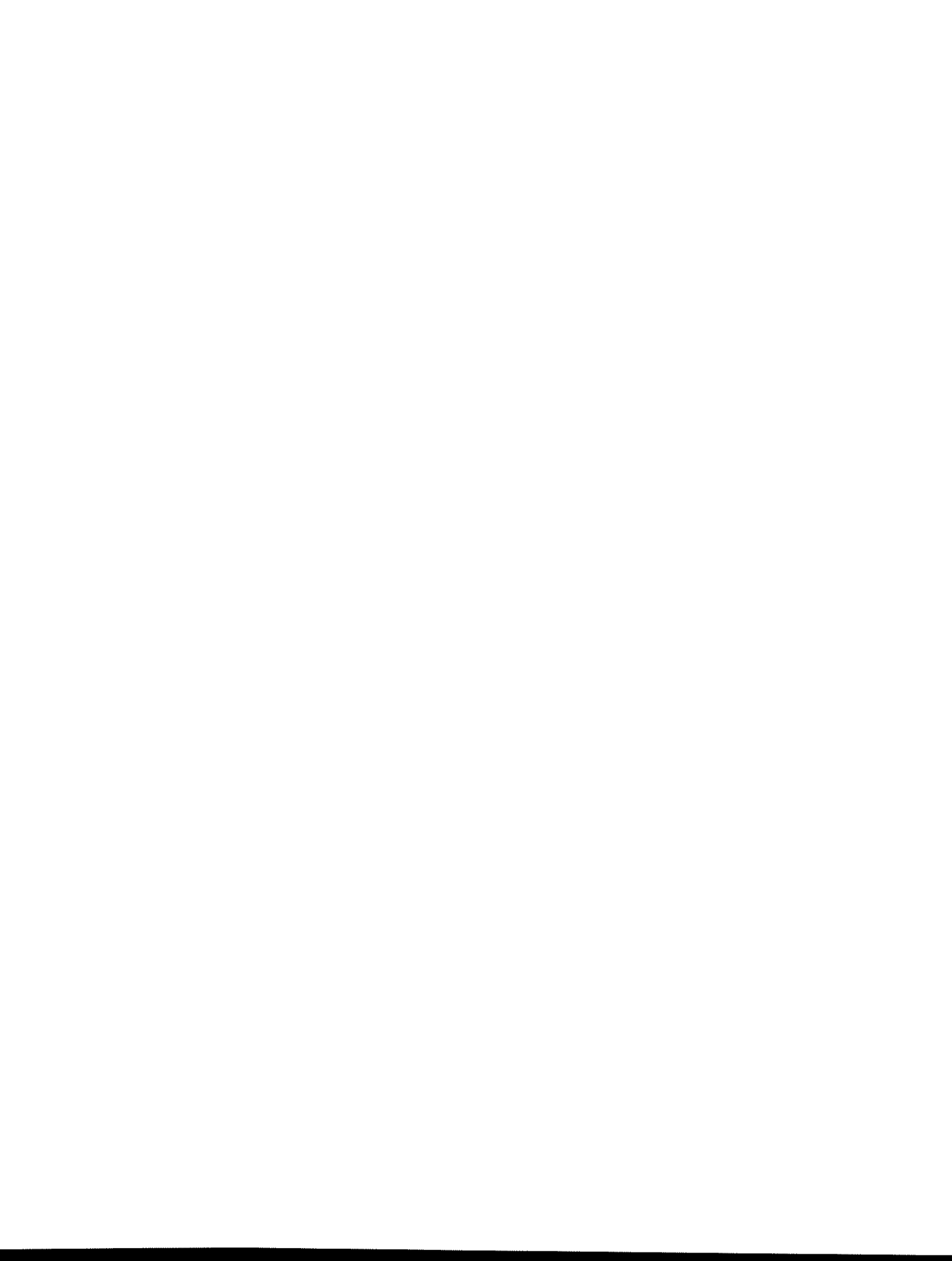
RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL NO INÍCIO DA DESCARGA. (AMOSTRA 2)

Mi (g)	Xi	Dp(sup)	Dpi	Xi	Yi	Xi/Dpi	1/(Xi/Dpi)
4,04	0,23	4,76	3,38	1,00	0,00	0,07	0,86
7,98	0,45	2,00	1,60	0,77	0,23	0,28	
2,71	0,15	1,19	0,89	0,32	0,68	0,17	
1,86	0,10	0,59	0,40	0,17	0,83	0,26	
0,90	0,05	0,21	0,18	0,06	0,94	0,28	
0,12	0,01	0,15	0,07	0,01	0,99	0,09	
0,12	0,01	0,00	0,00	0,01	0,99	-	
17,73	1,00			0,00	1,00	1,16	

ANEXO 3

RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL NO INÍCIO DA DESCARGA. (AMOSTRA 3)

Mi (g)	Xi	Dp(sup)	Dpi	Xi	Yi	Xi/Dpi	1/(Xi/Dpi)
4,04	0,18	4,76	3,38	1,00	0,00	0,05	0,70
10,80	0,49	2,00	1,60	0,82	0,18	0,31	
3,01	0,14	1,19	0,89	0,33	0,67	0,15	
2,10	0,10	0,59	0,40	0,19	0,81	0,24	
1,23	0,06	0,21	0,18	0,10	0,90	0,31	
0,60	0,03	0,15	0,07	0,04	0,96	0,36	
0,30	0,01	0,00	0,00	0,01	0,99	-	
22,08	1,00			0,00	1,00	1,43	



ANEXO 4

RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL NO INÍCIO DA DESCARGA. (AMOSTRA 4)

Mi (g)	Xi	Dp(sup)	Dpi	Xi	Yi	Xi/Dpi	1/(Xi/Dpi)
3,60	0,20	4,76	3,38	1,00	0,00	0,06	0,93
8,69	0,47	2,00	1,60	0,80	0,20	0,30	
3,33	0,18	1,19	0,89	0,33	0,67	0,20	
1,96	0,11	0,59	0,40	0,15	0,85	0,27	
0,60	0,03	0,21	0,18	0,05	0,95	0,18	
0,10	0,01	0,15	0,07	0,01	0,99	0,07	
0,15	0,01	0,00	0,00	0,01	0,99	-	
18,43	1,00			0,00	1,00	1,08	

ANEXO 5

RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL NO INÍCIO DA DESCARGA. (AMOSTRA 5)

Mi (g)	Xi	Dp(sup)	Dpi	Xi	Yi	Xi/Dpi	1/(Xi/Dpi)
3,25	0,15	4,76	3,38	1,00	0,00	0,04	0,88
10,89	0,49	2,00	1,60	0,85	0,15	0,31	
4,60	0,21	1,19	0,89	0,36	0,64	0,23	
2,06	0,09	0,59	0,40	0,15	0,85	0,23	
1,00	0,05	0,21	0,18	0,05	0,95	0,25	
0,10	0,00	0,15	0,07	0,01	0,99	0,06	
0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-	
22,01	1,00				1,00	1,14	



ANEXO 6

RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL NO FINAL DA DESCARGA. (AMOSTRA 6)

Mi (g)	Xi	Dp(sup)	Dpi	Xi	Yi	Xi/Dpi	1/(Xi/Dpi)
3,60	0,20	4,76	3,38	1,00	0,00	0,06	0,93
8,69	0,47	2,00	1,60	0,80	0,20	0,30	
3,33	0,18	1,19	0,89	0,33	0,67	0,20	
1,96	0,11	0,59	0,40	0,15	0,85	0,27	
0,60	0,03	0,21	0,18	0,05	0,95	0,18	
0,10	0,01	0,15	0,07	0,01	0,99	0,07	
0,15	0,01	0,00	0,00	0,01	0,99	-	
18,43	1,00			0,00	1,00	1,08	

ANEXO 7

RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL NO FINAL DA DESCARGA. (AMOSTRA 7)

Mi (g)	Xi	Dp(sup)	Dpi	Xi	Yi	Xi/Dpi	1/(Xi/Dpi)
7,95	0,30	4,76	3,38	1,00	0,00	0,09	0,96
10,90	0,41	2,00	1,60	0,70	0,30	0,26	
3,71	0,14	1,19	0,89	0,29	0,71	0,16	
2,67	0,10	0,59	0,40	0,15	0,85	0,25	
0,91	0,03	0,21	0,18	0,05	0,95	0,19	
0,20	0,01	0,15	0,07	0,02	0,98	0,10	
0,21	0,01	0,00	0,00	0,01	0,99	-	
26,55	1,00			0,00	1,00	1,05	

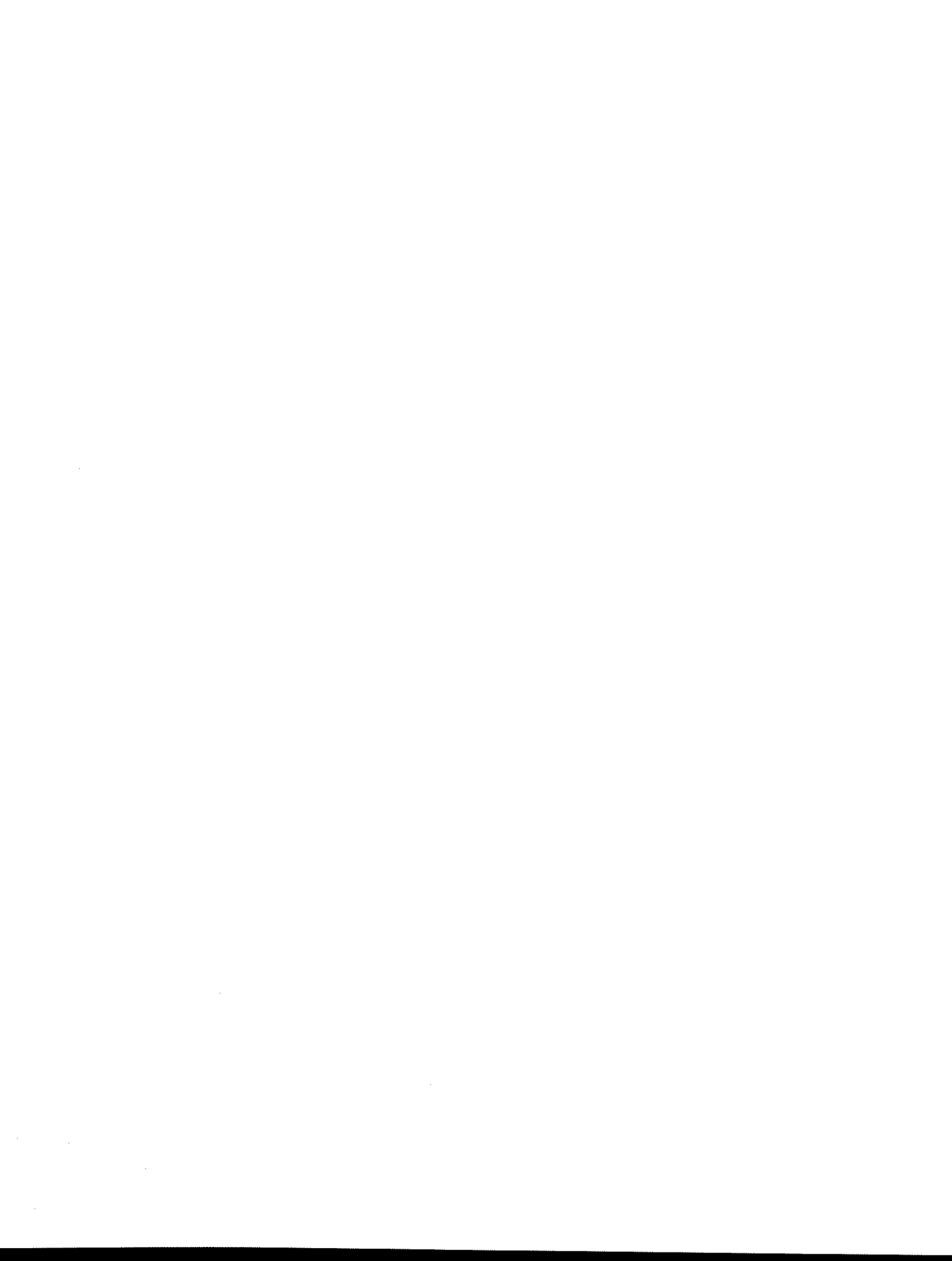


ANEXO 8**RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL NO FINAL DA DESCARGA. (AMOSTRA 8)**

Mi (g)	Xi	Dp(sup)	Dpi	Xi	Yi	Xi/Dpi	1/(Xi/Dpi)
9,12	0,39	4,76	3,38	1,00	0,00	0,11	1,12
8,15	0,35	2,00	1,60	0,61	0,39	0,22	
3,42	0,15	1,19	0,89	0,26	0,74	0,16	
2,09	0,09	0,59	0,40	0,12	0,88	0,22	
0,50	0,02	0,21	0,18	0,03	0,97	0,12	
0,10	0,00	0,15	0,07	0,01	0,99	0,06	
0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-	
23,48	1,00			0,00	1,00	0,89	

ANEXO 9**RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL NO FINAL DA DESCARGA. (AMOSTRA 9)**

Mi (g)	Xi	Dp(sup)	Dpi	Xi	Yi	Xi/Dpi	1/(Xi/Dpi)
6,54	0,34	4,76	3,38	1,00	0,00	0,10	0,86
5,86	0,31	2,00	1,60	0,66	0,34	0,19	
3,20	0,17	1,19	0,89	0,35	0,65	0,19	
2,32	0,12	0,59	0,40	0,18	0,82	0,30	
0,92	0,05	0,21	0,18	0,06	0,94	0,27	
0,15	0,01	0,15	0,07	0,02	0,98	0,11	
0,14	0,01	0,00	0,00	0,01	0,99	-	
19,13	1,00			0,00	1,00	1,16	



ANEXO 10

RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL NO FINAL DA DESCARGA. (AMOSTRA 10)

Mi (g)	Xi	Dp(sup)	Dpi	Xi	Yi	Xi/Dpi	1/(Xi/Dpi)
7,23	0,37	4,76	3,38	1,00	0,00	0,11	0,96
6,02	0,31	2,00	1,60	0,63	0,37	0,19	
2,97	0,15	1,19	0,89	0,32	0,68	0,17	
2,02	0,10	0,59	0,40	0,17	0,83	0,26	
1,03	0,05	0,21	0,18	0,07	0,93	0,29	
0,13	0,01	0,15	0,37	0,01	0,99	0,02	
0,14	0,01	0,60	0,30	0,01	0,99	-	
19,54	1,00			0,00	1,00	1,04	

ANEXO 11

PENEIRAS UTILIZADAS

TYLER	ABERTURA
4	4,76
9	2,00
14	1,19
28	0,6
65	0,21
100	0,149

