

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
NÍVEL MESTRADO

7706 27 22 5261

**OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE A GRANEL DE
RAÇÃO**

MESTRADO

DANIEL TEIXEIRA LUCAS

Autor

Campina Grande – Paraíba
Novembro – 1999

**Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências e Tecnologia
Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

Otimização do Transporte a Granel de Ração

Daniel Teixeira Lucas

Campina Grande, PB

Novembro 1999



L933o Lucas, Daniel Teixeira
Otimizacao do transporte a granel d racao / Daniel
Teixeira Lucas. - Campina Grande, 1999.
65 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Agricola) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

1. Caminhos Graneleiros 2. Dissertacao I. Nascimento,
Jose Wallace Barbosa do II. Universidade Federal da Paraiba
- Campina Grande (PB) III. Título

CDU 629.1-445.7(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

COPEAG - PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

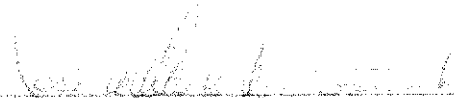
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

DANIEL TEIXEIRA LUCAS

Título: "Otimização do transporte a granel de ração".

BANCA EXAMINADORA

PARECER


Prof. Dr. José Wallace B. do Nascimento-Orientador


Prof. Dr. Antônio Almeida Silva-Examinador


Prof. Dr. Ademar Petelli Milani-Examinador







Campina Grande, 18 de novembro de 1999

Dedico

A meus pais, Manoel Teixeira de Almeida e Alinete Lucas Teixeira, in memoriam, pelos esforços com que conseguiram manter meus estudos e por todo sacrifício dedicado a minha vida.

Ofereço

A minha esposa, Maria do Socorro Araújo Teixeira, aos meus filhos Thompson Yoge Araújo Teixeira e Thomerson Roncally Araújo Teixeira, pelo sentido que dão a minha vida.

Agradeço

Ao orientador, José Wallace B. do Nascimento, pela dedicação, paciência e valiosa orientação que recebi, o mais sincero “obrigado”.

À coordenação do curso, em nome do professor Carlos Alberto Azevedo e em especial a sua secretária, Rivanilda Diniz Sobreira de Almeida.

À CAPES, pelo apoio financeiro sem o qual não seria possível a realização desta pesquisa.

Ao professor Romildo Dias de Toledo Filho, pela colaboração na ampliação dos meus conhecimentos na área.

Ao chefe do departamento, Prof. Dermeval Araújo Furtado e seus funcionários, pelo apoio e incentivo a esta pesquisa.

Ao professor Francisco Monte A. de S. Sampaio, junto a empresa AVISA Ltda., pela sua colaboração com o produto para a realização dos ensaios, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

À granja AZEVEM Ltda pela colaboração com os produtos doados para a realização deste trabalho.

A todos que de forma direta ou indireta conseguiram me auxiliar no andamento da pesquisa.

Daniel Teixeira Lucas

Otimização do Transporte a Granel de Ração

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento as exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Área de Concentração: Construções Rurais

Orientador: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento

Bis
699.1-1143.3 (043)
19330

Campina Grande, PB

Novembro 1999

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE QUADROS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	v
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	04
2.1 Fluxo de massa no interior da caçamba.....	06
2.2 Lugar geométrico e função fluxo.....	09
2.3 Determinação da geometria do silo para fluxo de massa.....	11
2.4 Modelo teórico para os transportadores helicoidais.....	12
2.4.1 Transportador com passo e diâmetros interno e externo constante.....	13
2.4.2 Transportador com passo crescente e diâmetro interno constante.....	16
2.4.3 Fatores que influenciam no comportamento do transportador.....	17
2.5 Otimização do volume.....	24
2.6 Sistema pneumático.....	26

3 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.1 Local dos ensaios.....	32
3.2 Produtos utilizados.....	32
3.3 Modelo reduzido utilizando as equações matemáticas dimensionais.....	33
3.4 Procedimentos para confecção da caçamba transportadora.....	36
3.4.1 Preparação do modelo base.....	36
3.4.2 Confecção dos modelos reduzidos.....	37
3.4.3 Confecção dos transportadores.....	39
3.4.4 Velocidade dos transportadores.....	41
3.4.5 Vazão.....	41
3.4.6 Instalação dos bicos injetores.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1 Análise do volume transportado.....	43
4.2 Vazão de descarga.....	46
4.2.1 Caçamba padrão com transportador de passos constantes.....	49
4.2.2 Caçamba padrão com transportador de passos variados.....	50
4.2.3 Caçamba proposta com transportador de passos constantes.....	51
4.2.4 Caçamba proposta com transportador de passos variados.....	52
4.3 Tipos de fluxo.....	53
4.4 Utilização de bicos injetores.....	58
5 CONCLUSÕES.....	60
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.01 Modelos básicos de um fluxo.....	06
FIGURA 2.02 Silos típicos de fluxo de massa.....	07
FIGURA 2.03 Limites para os modelos de fluxo de massa e funil.....	08
FIGURA 2.04 Tensões de consolidação.....	09
FIGURA 2.05 Funções fluxo típicas dos grãos.....	10
FIGURA 2.06 Condição de fluxo de massa.....	11
FIGURA 2.07 Transportador com diâmetros interno, externo e passos constantes...13	
FIGURA 2.08 Conservação da massa dentro e fora da pequena secção infinitesimal.....	14
FIGURA 2.09 Crescimento no passo do transportador.....	16
FIGURA 2.10 Forças na superfície de cisalhamento.....	17
FIGURA 2.11 Forças na superfície do eixo.....	18
FIGURA 2.12 Forças de arraste do filete.....	19
FIGURA 2.13 Forças na direção do lado do filete.....	19
FIGURA 2.14 A influência dos valores das razões c/D em k	21
FIGURA 2.15 A influência de μ_w em k	22
FIGURA 2.16 A influência de δ em k	23
FIGURA 2.17 A influência de μ_f em k	23
FIGURA 2.18 A influência de C_d em k	24

FIGURA 2.19 Secção transversal da caçamba padrão.....	25
FIGURA 2.20 Secção transversal da caçamba otimizada.....	25
FIGURA 2.21 Instalação típica da técnica de bicos injetores.....	26
FIGURA 2.22 Aplicação de expansão do ar nas almofadas.....	27
FIGURA 2.23 Aplicações de aerações.....	29
FIGURA 2.24 Descarga do diafragma de ar.....	30
FIGURA 2.25 – Aplicação da penetração e injeção do ar.....	30
FIGURA 3.01 – Caminhão comercializado no Brasil (padrão).....	33
FIGURA 3.02 – Caçamba da TRIEL em perspectiva.....	37
FIGURA 3.03 – Modelo da caçamba de geometria padrão.....	37
FIGURA 3.04 – Modelo da caçamba de geometria proposta.....	37
FIGURA 3.05 – Caçamba de geometria padrão.....	38
FIGURA 3.06 – Caçamba de geometria proposta.....	38
FIGURA 3.07a – Transportador convencional.....	40
FIGURA 3.07b – Transportador com passos, diâmetros interno e externo constantes.....	40
FIGURA 3.08a – Transportador com diâmetro externo constante, interno cônico e passos variados.....	40
FIGURA 3.08b - Transportador com passos variados, diâmetro externo constante e interno cônico.....	40
FIGURA 3.09 – Gráfico ilustrativo das variações dos diâmetros externo e interno dos filetes para confecção do transportador de passos crescentes.....	40

FIGURA 4.01 – Modelo de geometria padrão.....	44
FIGURA 4.02 – Modelo de geometria proposta.....	45
FIGURA 4.03 – Comportamento referente aos ensaios da caçamba padrão com transportador de passos constantes.....	50
FIGURA 4.04 – Comportamento referente aos ensaios da caçamba padrão com transportador de passos variados.....	51
FIGURA 4.05 – Comportamento referente aos ensaios da caçamba proposta com transportador de passos constantes.....	51
FIGURA 4.06 – Comportamento referente aos ensaios da caçamba proposta com transportador de passos variados.....	52
FIGURA 4.07 – Tipo de fluxo numa caçamba padrão com transportador de passos, diâmetro externo e diâmetro do eixo constantes.....	54
FIGURA 4.08 – Tipo de fluxo realizado em uma caçamba padrão com transportador de passos, diâmetros externo e interno constantes. Ilustrando uma situação típica de arqueamento e efeito tubo.....	54
FIGURA 4.09 – Modelo de fluxo indeterminado utilizando transportador com passos variados, diâmetro externo constante e o eixo cônico.....	55
FIGURA 4.10 – Modelo de fluxo massa utilizando transportador com passos variados, diâmetro externo constante e o eixo cônico.....	58
FIGURA 4.11 – Seqüência fotográfica ilustra o comportamento do fluxo da caçamba proposta.....	56
FIGURA 4.12 – Determinação do tipo de fluxo.....	57
FIGURA 4.13 – Seqüência fotográfica do tipo de fluxo em caçamba proposta com a ação dos bicos injetores.....	59

LISTA DE QUADROS

QUADRO 3.01- Especificação e cotas da caçamba padrão.....	38
QUADRO 3.01- Especificação e cotas da caçamba proposta.....	39
QUADRO 4.01- Comportamento do farelo de trigo submetido as condições pré estabelecidas.....	47
QUADRO 4.02- Comportamento da ração 1 submetida as condições pré estabelecidas.....	48
QUADRO 4.03- Comportamento da ração 2 submetida as condições pré estabelecidas.....	48
QUADRO 4.04- Comportamento da ração 3 submetida as condições pré estabelecidas.....	49

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo de inclinação da parede da tremonha
α_c	Ângulo do filete sobre a superfície do eixo
α_o	Ângulo do filete sobre a superfície do diâmetro externo
α_r	Ângulo do filete sobre o raio
β	Ângulo de repouso do produto
δ	Ângulo de atrito interno
ϕ_e	Ângulo efetivo de atrito interno
ϕ	Ângulo de atrito na parede
ϕ_p	Ângulo de atrito do produto com a superfície do filete
ϕ_h	Ângulo de atrito do produto com a parede da tremonha
ϕ_w	Ângulo de atrito do produto com a parede da calha
g	Aceleração da gravidade
ΔA	Área horizontal através da qual o produto escoará para dentro do silo numa secção elementar do transportador
μ	Coefficiente de atrito do produto
θ	Coordenada polar
μ_d	Coefficiente do ângulo efetivo de atrito interno
μ_e	Coefficiente de atrito equivalente

μ_w	Coefficiente de atrito do produto com a parede da calha
μ_f	Coefficiente de atrito do produto com a superfície do filete
C_p	Coefficiente entre o passo e o diâmetro do transportador
C_d	Coefficiente entre o diâmetro do eixo e o diâmetro do transportador
k_u	Constante (2) pag. 18
k_c	Constante (3) pag. 18
k_l	Constante (4) pag. 19
k_t	Constante (5) pag. 19
K_o	Constante (7) pag. 20
K	Constante (9) pag. 20
C	Cota da caçamba
H	Cota da caçamba
B	Cota da caçamba
b_1	Cota da caçamba
b_2	Cota da caçamba
G	Cota da caçamba
F	Cota da caçamba
ρ	Densidade
K_s	Derivação da força tangencial que age sobre a lateral do filete
d	Diâmetro do eixo
D	Diâmetro do transportador
DE	Diâmetro externo do transportador
$DI(x)$	Diâmetro interno do transportador como função de "x" até uma determinada distância ao longo do comprimento do transportador

x	Distância ao longo do transportador
Δx	Distância incremental ao longo do comprimento do transportador
ff	Fator fluxo
F_{ua}	Força axial total que age sobre o filete ao longo do transportador
F_{ca}	Força axial total que age no centro do eixo do transportador
F_{Iz}	Força axial resistente ao arraste do filete
F_{ta}	Força axial resistente sobre a superfície da calha
F_{da}	Força axial sobre o lado do filete
FF	Função fluxo
w	Largura do silo
P	Passo do transportador
γ	Peso específico
R	Raio do filete
R_c	Raio do centro do eixo
R_o	Raio externo do filete
R_t	Raio interno da calha
C_t	Razão do raio interno da calha pelo raio externo do transportador
K_u	Referente a contribuição de torque da superfície de cisalhamento
K_c	Referente a contribuição de torque da superfície interna do eixo
K_l	Referente a contribuição de torque de arraste do filete
K_t	Referente a contribuição de torque da superfície da calha
$q(x)$	Taxa de fluxo volumétrico na distância x ao longo do comprimento do transportador

$q(x + \Delta x)$	Taxa do fluxo volumétrico na distância $x + \Delta x$ ao longo do comprimento do transportador
B	Tamanho da abertura de descarga da tremonha
λ_s	Tensão de deslizamento do produto na superfície
σ_c	Tensão do produto confinado
σ_1	Tensão de maior consolidação
σ_2	Tensão de menor consolidação
$\bar{\sigma}_1$	Tensão nos apoios do arco
σ_a	Tensão sobre o lado do filete
v	Velocidade inferior do fluxo do produto que flui dentro do transportador
ω	Velocidade angular do transportador

RESUMO

LUCAS, Daniel Teixeira. **Otimização do Transporte a Granel de Ração em Caçambas**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1999. 81p. Dissertação Mestrado.

Com o intuito de analisar o comportamento do fluxo para vários tipos de ração e farelo de trigo, confeccionou-se dois modelos reduzidos de caçamba transportadoras de ração em acrílico transparente. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o volume real transportado e fazer a comparação com o volume do modelo proposto, bem como avaliar o comportamento do fluxo analisando os problemas ocorridos na caçamba e utilizar o sistema pneumático com a finalidade de melhorar o escoamento do produto. Na obtenção dos resultados para análise de fluxo foram realizadas seqüências fotográficas do produto com intercalação de camadas tingidas. Os resultados obtidos mostraram que o comportamento do fluxo dos produtos estudados na caçamba proposta proporciona fluxo de massa.

ABSTRACT

LUCAS, Daniel Teixeira. Optimization of the Transport Barn of Ration in Scoop. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1999. 81p. Dissertação Mestrado.

With the intuitive of analyzing the behavior of the flow for several ration types and wheat bran, it was made two reduced models of scoop ration carriers in acrylic transparent. The present work had as objective to evaluate the transported real bulk and to do the comparison with the bulk of the proposed model, as well as to evaluate the behavior of the flow analyzing the problems happened in the scoop and to use the pneumatic system with the purpose of improving the flowing of the product. In the obtaining of the results for it analyzes of flow photographic sequences of the product they were accomplished with collation of colored layers. The obtained results showed that the behavior of the flow of the products studied in the caçamba proposal provides mass flow.

1 Introdução

No Brasil, um dos segmentos mais importantes para a sua estrutura agropecuária é a avicultura que teve um crescimento econômico paralelo ao desenvolvimento da genética, nutrição e manejo resultando assim, na terceira maior avicultura de corte do mundo que representou ao país um crescimento de 7,5% no setor PAINEL (1997).

Dentro da moderna estrutura avícola, a produção de frango de corte e postura constitui um dos segmentos mais importantes e, em grande parte, responsável pelo surgimento e crescimento da indústria avícola brasileira e mundial. Contudo, ao grande crescimento das fronteiras mercadológicas e ao extraordinário progresso científico verificado na avicultura contrapõe-se a pouca atenção dispensada a outros setores que fazem parte da cadeia produtiva do frango, como por exemplo, os constantes problemas com fluxo de ração em silos e caçambas dos caminhões transportadores, como também a segregação que ocorre nos processos de carga e descarga. Como este setor participa com mais de 2,5% do PIB do Brasil e emprega aproximadamente 1,6 milhões de pessoas, radicadas na zona rural, se faz necessário estudar os problemas com transporte de ração para tornar o setor mais competitivo e eficiente.

O setor passou por várias transformações, devido a rápida ascensão da avicultura no país, como a adequação dos equipamentos, modificações constantes nas técnicas de manejo e o transporte das rações.

Até meados dos anos 90, pouca atenção foi dada a forma como é transportada as rações avícolas. O transporte destas rações é feito por caminhões com caçamba transportadora, as quais apresentam falhas no projeto relacionadas ao volume transportado e ao sistema de descarga.

Para amenizar os atuais problemas de descargas dos caminhões comercializados ultimamente no país pode-se utilizar bicos injetores de ar comprimido para quebrar o arqueamento dos produtos transportados evitando desta forma a obstrução do escoamento.

Os caminhões apresentam problemas no descarregamento quanto a segregação do produto e a formação de arcos coesivos sobre a calha provocando, posteriormente, o efeito tubo.

Com o aumento da competição no mercado, ou seja, do consumo per capita e da demanda de exportação é necessário que a indústria avícola brasileira busque alternativas para manter-se competitiva.

Devido a semelhança que há entre as caçambas utilizadas para o transporte de ração com as tremonhas empregadas para descarga de produtos armazenados em silos utilizar-se-á as recomendações de vários pesquisadores que trabalham com pressões e fluxo em silos.

Diante do exposto, o presente trabalho propõe alterações no projeto, através de modelos reduzidos, com o intuito de reduzir significativamente alguns problemas que foram encontrados no projeto atual.

O modelo reduzido foi totalmente baseado no original respeitando-se todas as medidas em escalas reduzidas.

Com o intuito de contribuir com a avicultura brasileira, mas especificamente com a área de transporte de ração a granel desenvolveu-se o presente trabalho com os seguintes objetivos:

- Avaliar o volume transportado nas atuais caçambas;
- Comparar o transportador helicoidal de passo constante que é utilizado atualmente com o transportador helicoidal de passos variados;
- Utilização de bicos injetores de ar comprimido próximo ao local de extração do produto.

2 Revisão Bibliográfica

O transporte de materiais granulares é um importante processo na agricultura e no processo de alimentação de silos. Os transportadores são usados para transportar produtos de fluxo livre tais como: areia, materiais fibrosos e pós. Devido a seu baixo custo inicial e simplicidade, os transportadores são os métodos preferidos para estocagem de grãos em silos e na distribuição da alimentação.

Muitos estudos foram publicados com dados da performance de um transportador, onde em cada estudo estava incluído a diferente geometria do transportador, propriedades do material e as condições de operação.

MILLIER (1958) pesquisou algumas relações básicas para capacidade de alguns transportadores e comparou a teoria e os valores da capacidade atual como foi sugerido por REHKUGLER (1958) para o trigo e aveia, que em suas análises estudou a consideração das forças nas partículas individuais destes produtos, as quais foram assumidas como esferas inelásticas perfeitas com densidade e diâmetro médio característico. Observou também que as partículas nos transportadores moviam-se numa direção aproximadamente perpendicular a superfície helicoidal do transportador. ROSS & ISAACS (1961) estudaram a capacidade teórica dos transportadores helicoidais completamente cheios.

Recentemente, JONES & KOCHER (1995) descreveram um fluxo não uniforme que ocorria com os transportadores helicoidais convencionais e

apresentaram um projeto de transportador que fornece um descarregamento uniforme de produtos granulares em tremonhas com secções transversais retangulares. Foram descritas três mudanças realizadas no projeto do transportador convencional para encontrar as características de fluxo de massa. Estas três mudanças foram: diâmetro externo do transportador, passos e diâmetro do eixo variados.

Existem várias opções possíveis para se utilizar um transportador com diâmetro externo variável que fornece um descarregamento uniforme na tremonha, mas cada opção apresenta uma desvantagem.

Uma desvantagem é quando um tubo de diâmetro uniforme é usado nos transportadores, uma parte deste tubo não será esvaziado. Um transportador de diâmetro externo variável onde o diâmetro externo máximo é igual a largura da secção transversal retangular poderá ser usado, mas a desvantagem deste transportador é o descarregamento não uniforme transversalmente a largura da tremonha e contrário a saída do transportador, onde o diâmetro externo do filete será menor do que a largura da secção transversal. Um transportador com diâmetro externo mínimo igual a largura da secção transversal retangular apresenta como desvantagem um diâmetro externo maior do que dos outros projetos requerendo mais material e mais espaço abaixo da tremonha.

Testes com transportadores convencionais foram conduzidos, um transportador de passos variados e outra com diâmetro do eixo variável. No transportador convencional observou-se que o descarregamento uniforme com fluxo de massa na tremonha não era produzido com uma secção transversal retangular. Práticas evidenciaram que os transportadores com diâmetro interno e passos variados

produziriam descarregamento uniforme da mesma tremonha (JONES & KOCHER 1995).

2.1 Fluxo de massa no interior da caçamba

Os transportadores são bastante usados no transporte de produtos sólidos, alguns determinam o fluxo de massa. De acordo com o modo de operação, uma das vantagens no descarregamento pelas tremonhas é a boa alimentação volumétrica causada pelo fluxo de massa que permite descarga uniforme (JENIKE, 1961).

Segundo JENIKE (1961), existem dois modelos básicos de fluxo: fluxo de massa e fluxo de funil, que podem ser visualizados nas Figuras 2.01(a) e 2.01(b). O fluxo de massa somente será possível se as paredes da tremonha forem suficientemente lisas. Os dois parâmetros mais importantes para o projeto de silos com fluxo de massa são: JENIKE (1964), ARNOLD & ROBERTS (1980).

i- a inclinação máxima das paredes da tremonha, que é denotada pelo ângulo de inclinação α (com relação ao plano vertical).

ii- a dimensão máxima do orifício de saída terá que ser determinado para evitar o arqueamento.

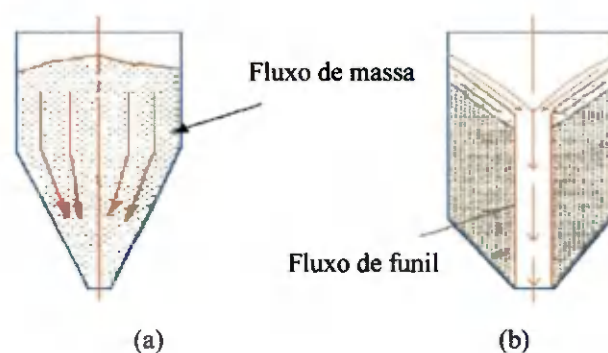


FIGURA 2.01- Modelos básicos de um fluxo

Estão representados na Figura 2.02 os silos para fluxo de massa que são classificados de acordo com a forma do alimentador e o modelo do fluxo associado. Os dois tipos principais são as tremonhas cônicas que operam com fluxo assimétrico, como indicado na Figura 2.02(a), e cuneiforme ou em forma de cunha na qual o fluxo de massa ocorre apresentado na Figura 2.02(b) JENIKE (1961), ARNOLD et al. (1980).

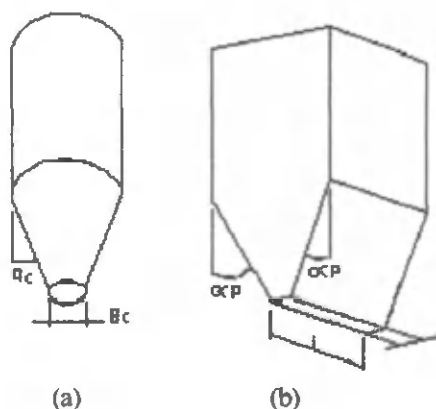


FIGURA 2.02 - Silos típicos de fluxo de massa

Nos silos de fluxo de massa, o ângulo α da parede da tremonha será em média, aproximadamente 10° maior do que aquele correspondente as tremonhas cônicas. Portanto, eles oferecem maior capacidade de estocagem para o mesmo espaço do que o silo cônico, mas esta vantagem é um pouco compensada pela longa fenda que pode causar problemas na descarga. O fluxo de transição é representado por fluxo de massa nas laterais e cônico na saída apresentando um comprimento da fenda do orifício de descarga mais adequada. As tremonhas em forma de pirâmide, apesar da simples fabricação são indesejáveis, devido ao acúmulo do produto que

fica depositado em suas arestas, o qual não flui dificultando assim o seu escoamento ROBERTS, et al. (1979).

Os limites para o fluxo de massa dependem do ângulo de inclinação das paredes da tremonha (α), o ângulo de atrito na parede (ϕ) e o ângulo efetivo de atrito interno (ϕ_e). As relações para tremonhas cônicas e cuneiformes estão ilustradas na Figura 2.03 JENIKE & JOHANSON (1969).

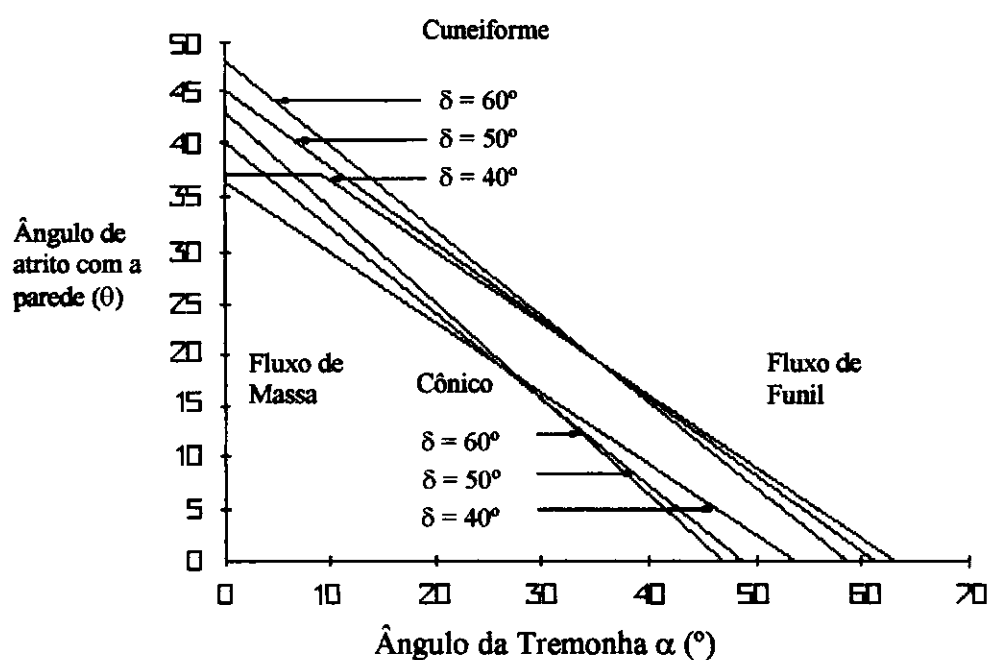


FIGURA 2.03 - Limites para os modelos de fluxo de massa e de funil

No caso das tremonhas cônicas, os limites para o fluxo de massa são claramente definidos, enquanto o fluxo nas tremonhas cuneiformes é de massa ou indeterminado. Considere, por exemplo, uma tremonha cônica no processamento de carvão com $\delta = 45^\circ$. Se a tremonha é de aço de baixo teor de carbono, ela está sujeita a corrosão, o ângulo ϕ é aproximadamente 30° . Com base na Figura 2.03, o valor limite é $\alpha = 13^\circ$. Uma margem de 3° é normalmente admitida, fazendo $\alpha = 10^\circ$ tem-

se uma tremonha muito inclinada. Se a tremonha é revestida com aço inoxidável, o ângulo de atrito ϕ é igual a 20° . Logo, $\alpha = 26 - 3 = 23^\circ$. Isto resulta numa forma de tremonha mais razoável. Os ângulos correspondentes para o fluxo de massa são $\alpha = 22^\circ$ para $\phi = 30^\circ$ e $\alpha = 35^\circ$ para $\phi = 20^\circ$ ROBERTS et al. (1979), COLIJN (1977).

2.2 Lugar geométrico e função fluxo

A resistência e as características do fluxo dos produtos são definidas por sua função fluxo, FF, que é normalmente obtida por teste usando um aparelho de cisalhamento direto. Alternativamente, um anel ou aparelho de teste de cisalhamento de torção ou um teste triaxial podem ser usados. Primeiramente, a função fluxo, para um dado produto é um gráfico da resistência do produto inconfinado, σ_c versus a tensão de consolidação maior, σ_1 . Estes dois parâmetros são obtidos pelo espaço geométrico, como ilustrado na Figura 2.04, as tensões de maior e menor consolidação, σ_1 e σ_2 , respectivamente são traçadas pelo semi-círculo de Mohr que é tangencial ao lugar geométrico WALTERS (1973).

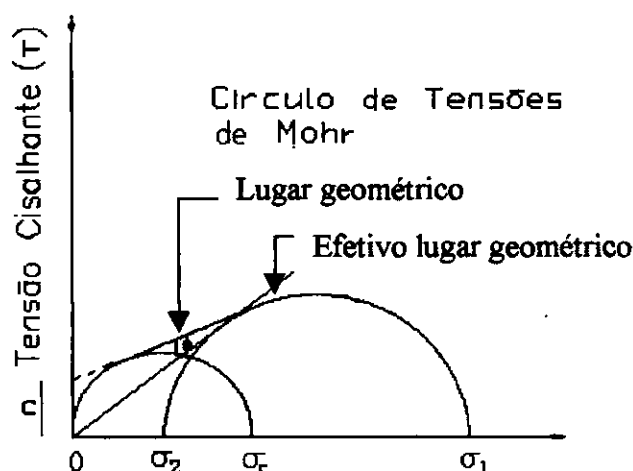


FIGURA 2.04 - Tensões de consolidação

A resistência do produto inconfinado (σ_c) é definida pelo semi-círculo de Mohr através da origem. O efetivo lugar geométrico é a linha reta através da origem tangencial ao maior semi-círculo de Mohr e a inclinação da reta é definida pelo ângulo efetivo de atrito interno (ϕ_c). As funções fluxo típicas estão ilustradas na Figura 2.05 WALTERS (1973), JENIKE et al. (1973).

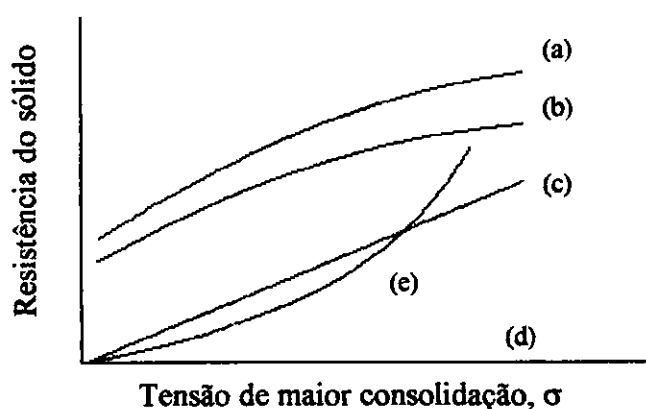


FIGURA 2.05 - Funções fluxo típicas dos grãos.

Para a maioria dos casos, as funções fluxo para grãos coesivos serão convexas na forma das curvas superiores (a) e (b) ou linhas retas através da origem como na curva (c). Grãos representando a última característica são referidos tal qual “grãos simples”. Grãos que fluem livremente não tem coesão e conseqüentemente não tem resistência (isto é, $\sigma_c = 0$), sua função fluxo coincide com o eixo horizontal como no caso da curva (d). A resistência dos mesmos produtos aumenta mais rapidamente quando a tensão de consolidação aumenta e neste caso, a função fluxo representa uma forma côncava como na curva superior (e). Um produto típico exibindo estas características é Nitrato de Amônia, um produto usado como explosivo em operações

minerais. Vários fatores influenciam a resistência e conseqüentemente a função fluxo dos produtos. Dentre eles incluem-se o teor de umidade, temperatura, tempo de estocagem, distribuição do tamanho da partícula e fatores externos como as vibrações mecânicas ROBERTS (1980) e ROBERTS (1984).

2.3 Determinação da geometria do silo para fluxo de massa

Basicamente, o objetivo no projeto de fluxo de massa é determinar a geometria da tremonha, em particular, o ângulo de inclinação da parede da tremonha, α e o tamanho da abertura B, uma vez que um arco coesivo estável não pode se formar sobre o orifício de saída da tremonha. Dois parâmetros são importantes: primeiro, a função fluxo, FF representando a resistência do produto e segundo, o fator fluxo, ff que descreve a condição da tensão na tremonha durante o fluxo. O

fator fluxo é dado por:

$$ff = \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}}$$

O fator fluxo é uma função linear e está ilustrado junto com a função fluxo na Figura 2.06 MOORE & ARNOLD (1984).

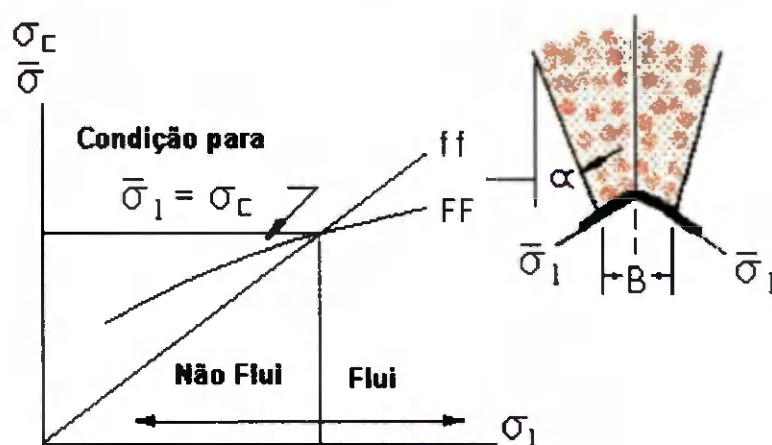


FIGURA 2.06 - Condição de fluxo de massa

O fator fluxo depende do ângulo de atrito do produto com a parede, ϕ_w , da inclinação da parede da tremonha, α e o ângulo efetivo de atrito interno, δ . A determinação dos fatores fluxos também resulta no fator fluxo associado ao projeto.

Para ocorrer fluxo é necessário que $\overline{\sigma}_1 > \sigma_c$. Quanto a Figura 2.06, a condição crítica para o fluxo ocorrer é quando $\overline{\sigma}_1 = \sigma_c$. O tamanho mínimo da abertura é definido por:

$$B = \frac{\overline{\sigma}_1}{\rho g} H(\alpha)$$

2.4 Modelo teórico para os transportadores helicoidais

Os dois modelos básicos para se projetar um transportador são:

- Transportador helicoidal com passo e diâmetros externo e interno constantes.
- Transportador com passo crescente e diâmetros externo e interno constantes.

O primeiro tipo é o modelo convencional já constatado nos projetos dos caminhões.

O segundo foi escolhido devido a facilidade de manuseio na execução do projeto, como também pela apresentação do fluxo de massa facilitando assim, o escoamento do produto.

2.4.1 Transportador com passo e diâmetros interno e externo constantes

O'BRIEN(1965) desenvolveu um projeto de transportador com diâmetros interno, externo e passo constantes. O transportador de O'Brien pode ser visualizado na Figura 2.07.

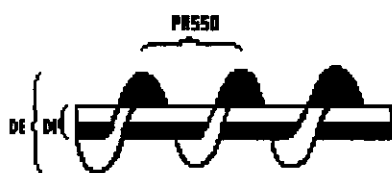


FIGURA 2.07 – Transportador com diâmetros interno, externo e passos constantes.

Segundo ele, o produto penetra no transportador que está sob uma calha em forma de U e a medida que o transportador gira, o produto que entra é conduzido e será o primeiro a sair. Portanto, formar-se-á um fluxo de massa devido ao escoamento uniforme ao longo do transportador O'BRIEN (1965).

Para estes modelos de fluxo nos transportadores, JONES & KOCHER(1995) desenvolveram as equações para o projeto dos transportadores considerando uma secção vertical infinitesimalmente pequena. A velocidade inferior do fluxo do produto dentro do transportador (v) deve ser constante ao longo do seu comprimento para se conseguir um fluxo uniforme. A Figura 2.08 ilustra a conservação da massa dentro e fora da pequena secção infinitesimal JONES & KOCHER (1995).

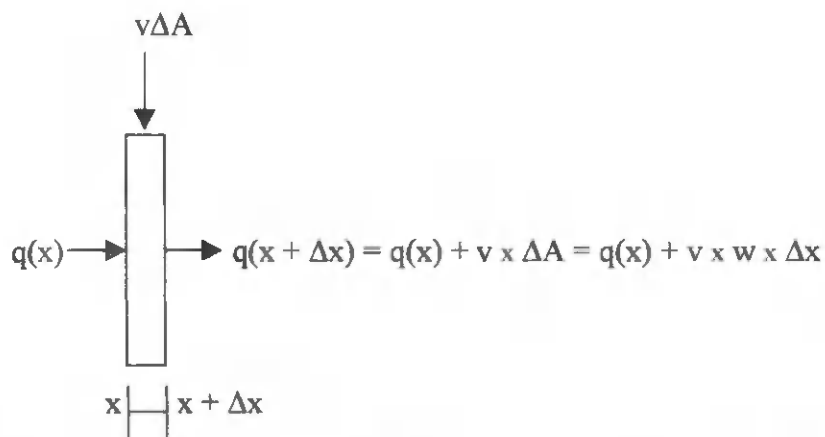


FIGURA 2.08 - Conservação da massa dentro e fora da pequena secção infinitesimal.

JONES & KOCHER (1995) propuseram que $q(x)$ é a taxa de fluxo volumétrico do material no transportador na posição x , portanto:

$$q(x + \Delta x) = q(x) + v \times \Delta A = q(x) + v \times w \times \Delta x \quad (1)$$

Rearranjando a equação (1), fica:

$$\frac{q(x + \Delta x) - q(x)}{\Delta x} = v \times w \quad (2)$$

Fazendo o limite quando Δx aproxima-se de 0, então:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[\frac{q(x + \Delta x) - q(x)}{\Delta x} \right] = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} [v \times w] \quad (3)$$

e usando a definição de derivada resulta

$$\frac{d}{dx} q(x) = v \times w \quad (4)$$

Uma outra expressão para $q(x)$ é encontrada pela determinação do fluxo dentro do transportador como uma função das suas características e a velocidade angular em que o transportador está operando. Segundo SHIVVERS (1973), PARSONS et al. (1969) $q(x)$ pode ser escrito da seguinte forma:

$$q(x) = \frac{\pi}{4} [DE^2 - (DI(x))^2] \omega \times p \quad (5)$$

Diferenciando em relação a x ,

$$\frac{d}{dx} q(x) = \frac{d}{dx} \left\{ \frac{\pi}{4} [DE^2 - (DI(x))^2] \omega \times p \right\} \quad (6)$$

$$\frac{d}{dx} q(x) = -\frac{\pi}{4} \times \omega \times p \times \frac{d}{dx} (DI(x))^2 \quad (7)$$

$$\frac{d}{dx} q(x) = -\frac{\pi}{4} \times \omega \times p \times 2 \times DI(x) \frac{d}{dx} DI(x) \quad (8)$$

Comparando a equação (8) com a equação (4) tem-se:

$$\frac{d}{dx} q(x) = v \times w \quad (9)$$

que dará a equação:

$$v \times w = -\frac{\pi}{4} \times \omega \times p \times 2 \times DI(x) \frac{d}{dx} DI(x) \quad (10)$$

Expressando essa equação como um produto diferencial,

$$v \times w \times dx = -\frac{\pi}{4} \times \omega \times p \times 2 \times DI(x) d[DI(x)] \quad (11)$$

Isolando a variável $DI(x)$:

$$2 \times DI(x) \times d[DI(x)] = \frac{-4 \times v \times w}{\pi \times \omega \times p} dx \quad (12)$$

Integrando a equação diferencial:

$$\int_{DE}^{DI} 2 \times DI(x) \times d[DI(x)] = \int_0^x \frac{-4 \times v \times w}{\pi \times \omega \times p} \quad (13)$$

Fazendo $x = 0$, ou seja, $DI(0) = DE$, a integral acima fica:

$$DI^2(x) - DE^2 = \frac{-4 \times v \times w \times x}{\pi \times \omega \times p} \quad (14)$$

Resolvendo a equação (14) para $DI(x)$,

$$DI(x) = \sqrt{DE^2 - \frac{4 \times v \times w \times x}{\pi \times \omega \times p}} \quad (15)$$

Há situações em que w (largura do silo) é igual ao DE , então a equação (15) torna-se:

$$DI(x) = \sqrt{DE^2 - \frac{4 \times v \times DE \times x}{\pi \times \omega \times p}} \quad (16)$$

2.4.2 Transportador com passo crescente e diâmetro interno constante

O transportador que apresenta um crescimento no passo e mantém o diâmetro interno constante está ilustrado na Figura 2.09 ASAE (1993).



FIGURA 2.09 - Crescimento no passo do transportador.

Para o modelo de fluxo onde o transportador apresenta diâmetros interno e externo constantes com aumento do passo ao longo do comprimento do transportador, a equação (16) assume a forma $w = DE$, então, a nova equação será:

$$p(x) = \frac{4 \times v \times DE \times x}{\pi \times \omega \times ([DE]^2 - [DI]^2)} \quad (17)$$

Entretanto, O'BRIEN (1965) testou a seguinte equação para um transportador com DI e passo constante e DE variável:

$$DE(x) = \sqrt{(DI)^2 - \frac{4 \times v \times w \times x}{\pi \times \omega \times p}} \quad (18)$$

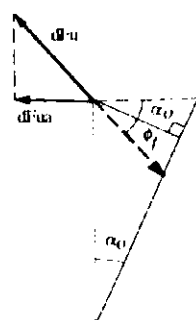
Estas equações foram desenvolvidas para os dois tipos de configurações do transportador. Ambos possuem os diâmetros internos constantes, mas sofrem variações no passo. Estão sobrepostas em uma calha em forma de U. Para o transportador que tem na sua configuração o diâmetro interno constante e o passo crescente, a equação (17) desenvolvida para o projeto do mesmo é função do comprimento PIERCE & MCKENZIE (1984).

2.4.3 Fatores que influenciam no comportamento do transportador

Existem vários fatores que afetam o comportamento dos transportadores. CARLETON et al.(1969) e BURKHARDT (1967) estudaram e analisaram estes fatores concluindo que os mesmos dependem de forças que agem na superfície individual dos transportadores envolvendo o comportamento dos grãos. A seguir, tem-se um resumo dos principais fatores.

Força axial resistente

A força axial resistente agindo no elemento do produto na superfície de cisalhamento está ilustrado na Figura 2.10.



Notação:

- > Direção do elemento do produto movendo-se na superfície
- > Direção da força resistente agindo na superfície

FIGURA 2.10 - Forças na superfície de cisalhamento

A força axial total que age sobre o filete ao longo do transportador pode ser

$$\text{escrita como } F_{ua} = \frac{\pi}{2} \times \mu_e \times c_p \times \cos(\alpha_o + \phi_f) \times \sigma_o \times D^2 = k_u \times \sigma_o \times D^2 \quad (1)$$

$$\text{onde, } k_u = \frac{\pi}{2} \mu_e \times c_p \times \cos(\alpha_o + \phi_f) \quad (2)$$

Na Figura 2.11 tem-se a força axial resistente agindo no elemento do produto.

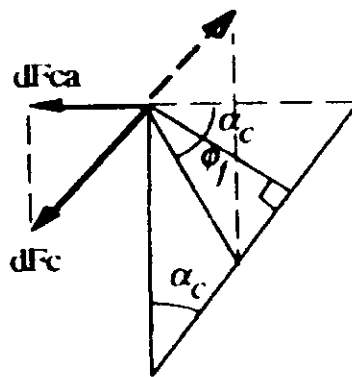


FIGURA 2.11 – Forças na superfície do eixo

A força axial total que age no centro do eixo do transportador é escrita como

$$F_{ca} = \frac{\pi \times c_d (c_t - c_d)}{4} \text{sen } \alpha_c \left[\exp\left(\frac{4 \times \mu_w \times \lambda_s \times c_p}{c_t - c_d}\right) - 1 \right] \sigma_o D^2 = k_c \times \sigma_o \times D^2$$

$$\text{e onde, } k_c = \frac{\pi \times c_d (c_t - c_d)}{4} \text{sen } \alpha_c \left[\exp\left(\frac{4 \times \mu_w \times \lambda_s \times c_p}{c_t - c_d}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

A Figura 2.12 representa a força axial resistente que age no arraste do filete

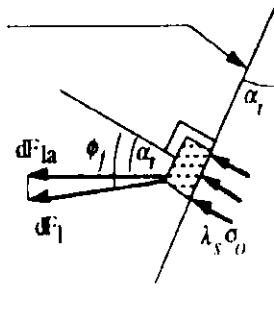


FIGURA 2.12 – Forças de arraste do filete

Força axial resistente ao arraste do filete

$$F_{ia} = \lambda_s \left[\frac{\pi}{4} (1 - c_d^2) + \frac{\mu_f \times c_p}{2} (1 - c_d) \right] \sigma_0 \times D^2 = k_l \times \sigma_0 \times D^2$$

$$\text{onde, } k_l = \lambda_s \left[\frac{\pi}{4} (1 - c_d^2) + \frac{\mu_f \times c_p}{2} (1 - c_d) \right] \quad (4)$$

Força axial resistente sobre a superfície da calha

$$F_{ia} = \frac{\pi}{8} c_t (c_t - c_d) \times \cos(\alpha_0 + \phi_f) \left[\exp\left(\frac{4\mu_w \times \lambda_s \times c_p}{c_t - c_d}\right) - 1 \right] \sigma_0 \times D^2 = k_t \times \sigma_0 \times D^2$$

$$\text{onde, } k_t = \frac{\pi}{8} c_t (c_t - c_d) \times \cos(\alpha_0 + \phi_f) \left[\exp\left(\frac{4\mu_w \times \lambda_s \times c_p}{c_t - c_d}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

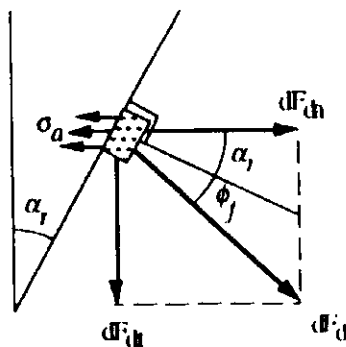


FIGURA 2.13 – Forças na direção do lado do filete

Força axial e tensão sobre o lado do filete

$$F_{da} = F_{ua} + F_{ca} + F_{la} + F_{ia} \quad (6)$$

A tensão axial pode ser determinada por

$$\sigma_a = \frac{F_{da}}{\pi(R_0^2 - R_c^2)} = \frac{4(k_u + k_c + k_l + k_i)}{\pi(1 - c_d^2)} \sigma_0 = K_\sigma \times \sigma_0$$

onde,
$$K_\sigma = \frac{4(k_u + k_c + k_l + k_i)}{\pi(1 - c_d^2)} \quad (7)$$

O torque requerido para o giro do transportador

$$T = 2 \times \pi \times \sigma_a \times \int_{R_c}^{R_0} r^2 \times \tan(\alpha_r + \phi_f) dr$$

$$K_s = \frac{2 \times \pi}{D^3} \times \int_{R_c}^{R_0} r^2 \times \tan(\alpha_r + \phi_f) dr \quad (8)$$

O fator K_s é derivado da força tangencial que age sobre a curva lateral do filete.

$$K = K_s \times K_\sigma = \frac{4K_s}{\pi(1 - c_d^2)} \times (k_u + k_c + k_l + k_i) \quad (9)$$

$$K_u = \frac{4k_u \times K_s}{\pi \times (1 - c_d^2)} \quad (10)$$

K_u reflete a contribuição de torque da superfície de cisalhamento.

$$K_c = \frac{4k_c \times K_s}{\pi \times (1 - c_d^2)} \quad (11)$$

K_c reflete a contribuição de torque da superfície interna do eixo.

$$K_l = \frac{4k_l K_s}{\pi(1 - c_d^2)} \quad (12)$$

K_l reflete a contribuição de torque de arraste do filete.

$$K_t = \frac{4 \times k_t \times K_s}{\pi \times (1 - c_d^2)} \quad (13)$$

K_t reflete a contribuição de torque de superfície da calha.

Influência da liberação do torque

É necessário uma certa liberação entre a calha e os tipos de filetes para prevenir o contato do transportador com a calha durante a rotação, isto ocorre devido a vários fatores adversos tais como: deflexão, menores excentricidades e tolerância do transportador e da calha. Ela também é essencial para evitar arranhão ou cunhamento de partículas prevenindo danos e a geração de pressão de contato extremo e, conseqüentemente, altos torques resistentes à rotação. A Figura 2.14 ilustra a influência dos valores das razões c/D e p/D no requerimento de torque proposta por ROBERTS & MANJUNATH (1994).

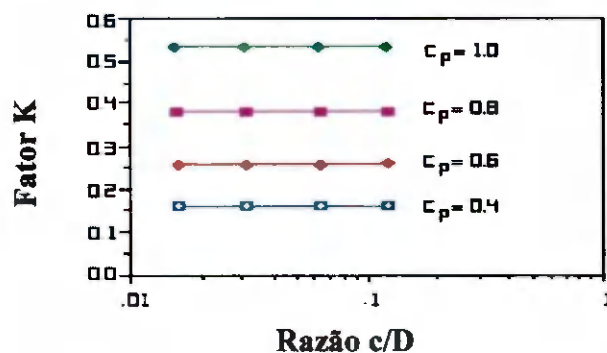
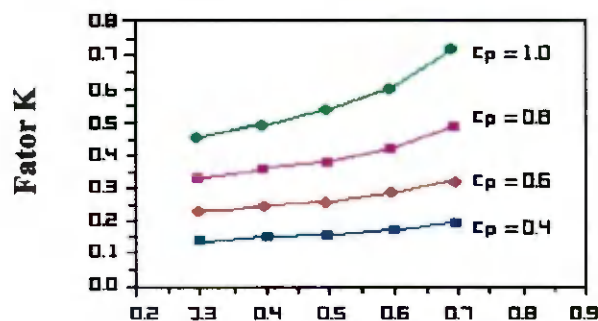


FIGURA 2.14 - A influência dos valores das razões c/D em K .

Influência do coeficiente de atrito na parede da calha.

A Figura 2.15 ilustra o efeito do coeficiente de atrito do produto com a parede da calha no fator k . Verificou-se que o k aumenta com o aumento do coeficiente de

atrito do produto com a parede da calha μ_w . Este aumento ocorre devido a duas influências. Primeiro, a pressão radial ao longo do comprimento do passo que aumenta com o aumento no μ_w . Segundo, a resistência do torque aumenta com ambos a pressão radial e o coeficiente de atrito. Além disso, o efeito é forte com o maior comprimento do passo RAUTENBACH & SCHUMACHER (1987).



Coefficiente de atrito na parede da calha μ_w

FIGURA 2.15 - Influência de μ_w em k

Influência do ângulo efetivo de atrito interno

A influência do ângulo efetivo de atrito interno é relatada pela razão da tensão, força de cisalhamento na parte superior do transportador e a pressão radial na parte inferior. A razão da tensão e a da pressão radial diminui com o aumento do ângulo efetivo de atrito interno, embora o aumento da força de cisalhamento causada pelo coeficiente do ângulo efetivo de atrito interno não seja suficiente para compensar o decréscimo da razão da tensão e a pressão radial. A Figura 2.16 ilustra bem o efeito do ângulo efetivo de atrito interno no fator k Mc LEAN & ARNOLD (1979).

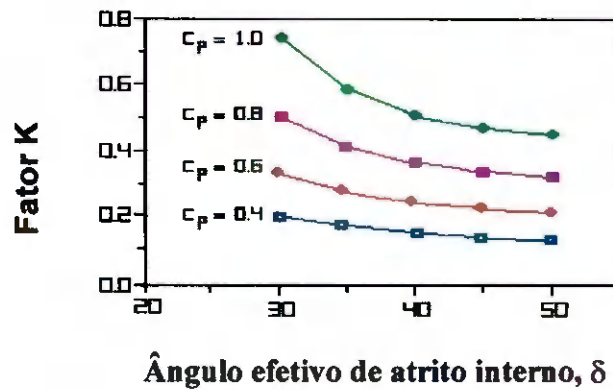


FIGURA 2.16 – A influência de δ em K.

Influência do coeficiente de atrito do filete

A Figura 2.17 ilustra os resultados de k com variação de μ_f de 0,3 a 0,7. Nela pode ser visualizado que k torna-se maior com o aumento do coeficiente de atrito do filete. As forças que agem em ambos os lados, o que arrasta e o que aciona os filetes aumentam com o aumento do coeficiente de atrito entre o produto e o filete resultando assim, num aumento de requerimento do torque ROBERTS et al. (1984).

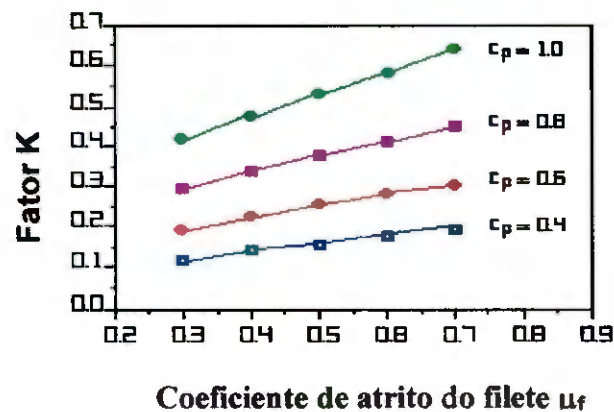


FIGURA 2.17 - A influência de μ_f em K.

Influência da razão d/D

O aumento de C_d , a razão do diâmetro no centro do eixo, d pelo diâmetro do transportador, D , resultará num aumento da tensão que afetará a pressão radial especialmente para extensos comprimentos do passo do transportador. A força resistente e o torque na superfície do eixo também aumentam com o aumento da razão C_d . A Figura 2.18 ilustra a influência da razão C_d em K MANJUNATH & ROBERTS (1986).

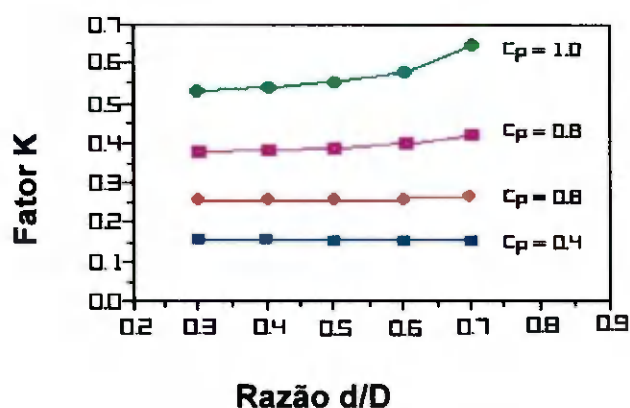


FIGURA 2.18 - A influência de C_d em K

2.5 Otimização do volume

CALIL e DIAS (1997) realizaram um estudo para determinação da melhor secção transversal da caçamba nos caminhões graneleiros. Conforme a Figura 2.19 vários problemas foram verificados na sua operação: compactação do produto, problemas no fluxo durante a descarga e a perda de volume real.

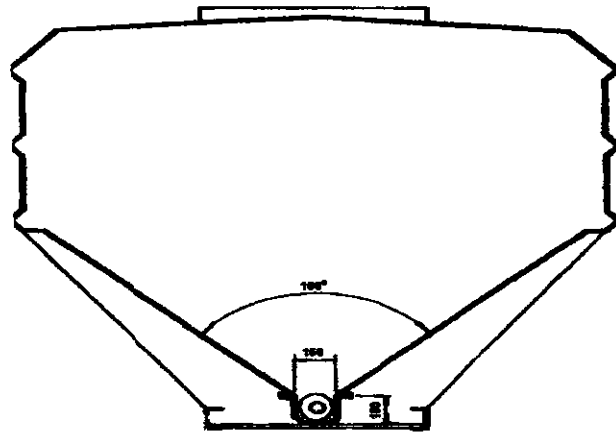


FIGURA 2.19 - Seção transversal da caçamba padrão.

Com a obtenção dos resultados determinou-se o fator fluxo da tremonha fornecendo uma melhor geometria da secção transversal.

Para evitar a formação de taludes naturais do produto foi proposto o modelo que pode ser visualizado na Figura 2.20, onde o volume real deve ser igual ao nominal.

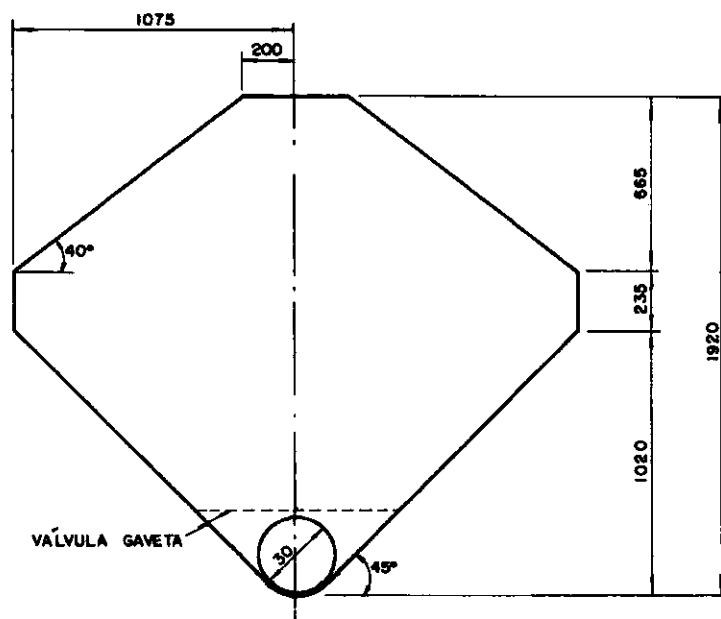


FIGURA 2.20 - Seção transversal da caçamba otimizada.

2.6 Sistema pneumático

Segundo JOHANSON (1981) os projetos para promoção de fluxo podem ser categorizados como passivo ou ativo. O projeto passivo não requer energia, enquanto o ativo requer energia para operá-lo. Os projetos ativos podem ser arranjados em três grupos principais: mecânico, pneumático e vibrações.

Esquema pneumático para ocorrência de fluxo

- Explosão do ar

Os métodos de promoção de fluxo por explosão do ar usam principalmente para iniciar o fluxo a expansão do ar. O ar à altas pressões (acima de 700 kPa) é introduzido repentinamente para dentro da massa do produto em discretos pontos das paredes da tremonha. Sugestões de um fabricante indicam locais que são preferidos como ilustra a Figura 2.21. A localização e número de bicos injetores dependerá da aplicação particular.

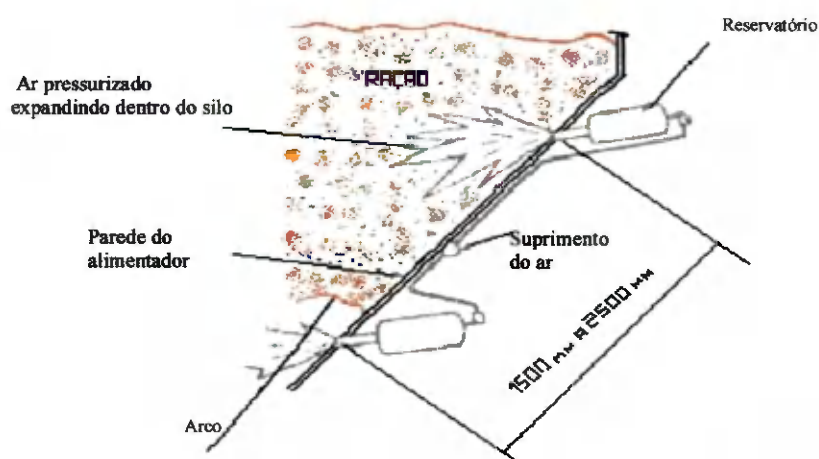


FIGURA 2.21 - Instalação típica da técnica de bicos injetores.

Os benefícios oferecidos por este tipo de dispositivo de promoção de fluxo são principalmente a fácil instalação e o baixo custo, particularmente onde o ar comprimido é prontamente utilizável.

Isto é importante para estimar um possível dano estrutural que pode resultar do súbito colapso do produto suportado por um arco coesivo. Por outro lado, tem sido avaliado que danos as paredes da tremonha tenham ocorrido quando a explosão do ar não deslocava a massa do produto, mas tinha sua energia dissipada nas paredes da tremonha. O uso de dispositivo a ar comprimido é considerado um substituto que aproxima-se da solução de problemas de fluxo e a mais permanente e segura alternativa que será instalada em lugares apropriados.

- Expansão de Ar

Almofadas com ar expansivo são bolsas de elastômeros infláveis montados no interior da tremonha, assim como representado na Figura 2.22.

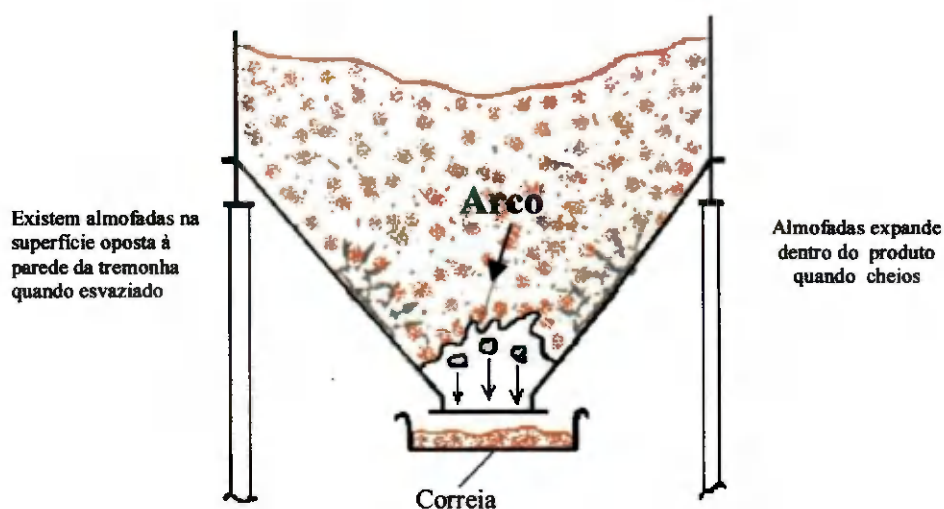


FIGURA 2.22 - Aplicação de expansão do ar nas almofadas

Durante o fluxo, as posições das almofadas são esvaziadas contra as paredes da tremonha. Quando forma-se um arco ou quando o produto sofre uma parada ou ocorre interrupção inesperada, o ar comprimido é usado para inflar as almofadas. Estes produtos são deslocados longe das paredes da tremonha e tem colapsos para o efeito tubo ou arco. A localização mais efetiva para a almofada no interior da tremonha é numa região próxima a formação de arcos. Esta região é variável e dependerá de cada aplicação particular.

As almofadas com expansão de ar são úteis para colapso em arcos e efeito tubo em produtos coesivos. Os dispositivos não são tão efetivos para produtos coesivos que tendem a formar arcos. Produtos abrasivos podem reduzir a vida das almofadas, particularmente onde são armazenados partículas grandes. Estes dispositivos são recomendados e somente serão ativados quando o produto sólido está na situação de um fluxo potencial.

- Aeração

Aeração de pós finos em silos de estocagem e tremonhas é um método utilizado para promoção de fluxo. Existem basicamente três métodos de aeração que diferem principalmente em:

- ponto de aplicação do ar
- volume do ar e
- a pressão do ar.

Uma aproximação, como mostra a Figura 2.23 é para reduzir o atrito com a parede injetando uma quantidade de ar na parede do alimentador / interface do produto sólido para causar fluxo. O efeito de fluidização na coluna do produto

localizada causa perda de resistência do produto e fluxo. Um fabricante recomenda o arranjo como ilustra a Figura 2.23(a). Para um reservatório cônico onde a parede da tremonha é de 3m de altura, recomenda-se um total de 40 aeradores. Sobre a pressão do ar é recomendado 20 KPa, o volume total de ar requerido é aproximadamente 17 m³/min.

Um resultado similar é concluído com uma semi-permeabilidade na superfície da tremonha representado na Figura 2.23 (b). Este método de promoção de fluxo tem sido usado com sucesso para pós finos e secos. É aconselhável usar cautela quando grande quantidade de ar flui pelo produto causando um escoamento descontrolado.

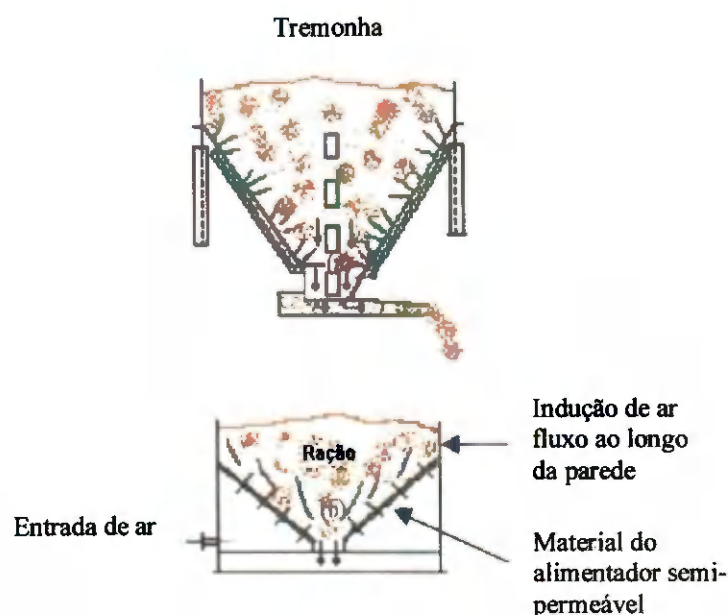


FIGURA 2.23 – Aplicações de aerações

Um diafragma de borracha como mostra a Figura 2.24 foi usado com um material refratário chamado pirofilita. O melhoramento no fluxo controlado está representado também na Figura 2.24 como uma função do volume de ar usado.

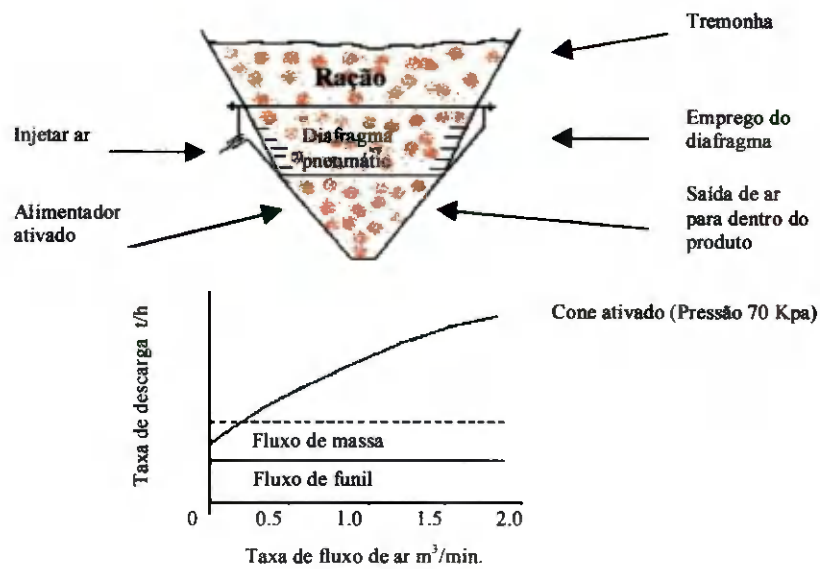


FIGURA 2.24 - Descarga do diafragma de ar

Um segundo método para usar aeração no auxílio da promoção de fluxo está representado na Figura 2.25. Quando pós finos de baixa permeabilidade são armazenados nos silos, as forças de consolidação tendem a compactar o produto e minimizar o tamanho dos poros entre as partículas.

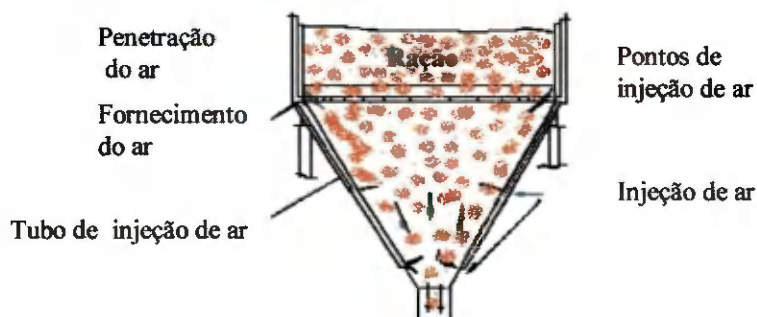


FIGURA 2.25 - Aplicação da penetração e injeção do ar

Como o produto flui rumo a saída da tremonha na calha, ele expande na descarga. Devido a baixa permeabilidade destes pós, um gradiente de pressão se desenvolverá com a pressão do ar, onde este será maior na saída do que as pressões nos poros. Esta força para cima unida com a resistência entre as partículas desenvolvida durante a consolidação com o tempo de estocagem é suficiente para garantir a ocorrência de fluxo constante REED & DUFFEL (1980).

Este método para conseguir um fluxo confiável tem obtido sucesso com pós finos e secos de $150\mu\text{m}$ ou menor. Baixa pressão de ar será preservada todo tempo. Isto assegura que as vias aéreas permanecerão limpas e não permitirão que o produto denso seja compactado num determinado período de tempo. As exatas localizações para introduzir o ar variarão com cada aplicação. A mais efetiva localização pode geralmente só ser encontrada por experimentação. Se requer mais pesquisa para formular regras gerais.

3 Material e métodos

3.1 Local dos Ensaiois

Os modelos das caçambas e os transportadores helicoidais, assim como a montagem do sistema de bicos injetores de ar e também as análises do comportamento do fluxo foram desenvolvidos no Laboratório de Construções Rurais e Ambiência – LaCRA, Departamento de Engenharia Agrícola, do Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba.

3.2 Produtos utilizados

Os produtos utilizados foram o farelo de trigo e três tipos de rações para aves denominadas de ração para fase inicial, ração para engorda e ração para fase final, as quais para facilidade de manuseio no trabalho foram consideradas como rações 1, 2 e 3, respectivamente. O farelo de trigo foi adquirido no comércio local. As rações são industrializadas por diferentes empresas do município de Puxinanã.

Utilizou-se o farelo de trigo nos ensaios por apresentar características de fluxo livre. As rações 1 e 3 foram cedidas pela Granja Azevem e a ração 2 foi cedida pelo professor Francisco Monte Alvernes de Sales Sampaio através da empresa AVISA Ltda, ambas situadas no município de Puxinanã.

3.3 Modelo reduzido utilizando as equações matemáticas dimensionais

O sistema operacional consiste na relação baseada nas dimensões do modelo original como ilustrado na Figura 3.01.

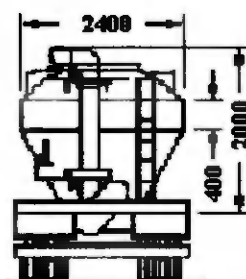


FIGURA 3.01 - Caminhão comercializado no Brasil (Padrão).

Os ensaios nos modelos reduzidos proporcionam aos engenheiros projetistas uma valiosa ferramenta de grande rigor científico, que lhes permitem em seus projetos estruturais abrirem caminhos entre os limitados conhecimentos no campo da mecânica e atuarem em uma zona muito mais ampla das estruturas fisicamente possíveis. O engenheiro pode escolher três ferramentas de caráter diferente para analisar os problemas estáticos: o cálculo utilizando métodos gráficos ou calculadoras, o computador de programa dirigido e os ensaios em modelos.

Os resultados das medições serão transformados com a ajuda da análise dimensional na escala do protótipo e além disso, como qualquer outro resultado obtido diretamente com a teoria da elasticidade, há que relacioná-los com as características do material utilizado na realidade. Os ensaios com modelos são possíveis sempre e quando se podem transmitir as conclusões de observações de

fenômenos físicos feitos em sistema mecânico S (no sentido mais amplo), a outro sistema semelhante S' realizado em outra escala.

É possível deduzir as condições de semelhança entre o ensaio em modelo e o protótipo sem ter conhecimento preciso da forma das equações diferenciais fundamentais que regem os fenômenos considerados. Basta que se conheça todas as grandezas físicas que influem no fenômeno que se deseja analisar: a busca das leis de semelhança partindo inicialmente do conhecimento das grandezas físicas que intervêm no processo é a finalidade da análise dimensional.

Primeiramente, convém manter separados os seguintes conceitos:

i - A grandeza física, como um conceito (grandeza efetiva que pode se medir e constante física que tem característica do mundo físico).

ii - A dimensão, na qual está sujeita a grandeza (comprimento, tempo e etc.).

As grandezas efetivas são:

- Comprimento [L]
- Tempo [T]

1- As grandezas físicas estão representadas por:

$$\delta, l, b_1, b_2, D, d, E, H, G, Q, W, \beta, \alpha..$$

2- As grandezas fundamentais são:

$$l \text{ e } t$$

3- Substituindo as grandezas físicas pelas grandezas fundamentais temos:

$$\delta^{x_1}, l^{x_2}, b_1^{x_3}, b_2^{x_4}, D^{x_5}, d^{x_6}, E^{x_7}, H^{x_8}, G^{x_9}, Q^{x_{10}}, W^{x_{11}}, \beta^{x_{12}}, \alpha^{x_{13}}$$

i - Ao substituir pelas dimensões temos:

$$l^{x_1}, l^{x_2}, l^{x_3}, l^{x_4}, l^{x_5}, l^{x_6}, l^{x_7}, l^{x_8}, l^{x_9}, (l^3 t^{-1})^{x_{10}}, (l t^{-1})^{x_{11}}, l^{x_{12}}, l^{x_{13}} = l^0 t^0$$

ii – Formando então, o sistema de equações lineares homogêneas

$$I: x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} = 0$$

$$t: 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -x_{10} - x_{11} = 0$$

Entre as grandezas físicas decisivas para a descrição de um fenômeno deve-se buscar aquelas combinações onde resultem grandezas adimensionais. Para facilitar esta busca utilizamos a “matriz de dimensões”. A matriz é composta de tantas colunas quanto as grandezas físicas que intervêm no fenômeno e de tantas linhas quanto as grandezas fundamentais necessárias para determinar a dimensão das grandezas físicas existentes.

O conteúdo da matriz é formado pelos expoentes da dimensão nas unidades fundamentais das grandezas físicas consideradas.

4- A matriz dimensional é:

	δ	l	b_1	b_2	D	d	E	H	G	Q	W
L	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1

O número de produtos adimensionais contidos em um sistema completo é igual ao número das grandezas físicas que intervêm no fenômeno, diminuídos do número de unidades fundamentais.

Número de π termos = $11 - 2 = 9$ π termos adimensionais independentes.

5- Comparando os expoentes das colunas pode-se escrever facilmente os seguintes produtos adimensionais

$$\pi_1 = \frac{\delta}{l}; \pi_2 = \frac{b_1}{l}; \pi_3 = \frac{b_2}{l}; \pi_4 = \frac{D}{l}; \pi_5 = \frac{d}{l}; \quad \pi_6 = \frac{E}{l}; \quad \pi_7 = \frac{H}{l}; \quad \pi_8 = \frac{Q}{l^2 \cdot w};$$

$$\pi_9 = \theta^0.$$

θ^0 para qualquer ângulo

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9) \text{ ou}$$

$$\frac{\delta}{l} = f\left(\frac{b_1}{l}, \frac{b_2}{l}, \frac{D}{l}, \frac{d}{l}, \frac{E}{l}, \frac{H}{l}, \frac{Q}{l^2 w}, \theta^0\right)$$

$$\frac{\delta_p}{l_p} = f_p\left(\frac{b_{1p}}{l_p}, \frac{b_{2p}}{l_p}, \frac{D_p}{l_p}, \frac{d_p}{l_p}, \frac{E_p}{l_p}, \frac{H_p}{l_p}, \frac{Q_p}{l_p^2 w_p}, \theta_p^0\right)$$

Logo, a equação de similaridade é:

$$\frac{b_{1p}}{l_p} = \frac{b_{1m}}{l_m}, \frac{b_{2p}}{l_p} = \frac{b_{2m}}{l_m}, \frac{D_p}{l_p} = \frac{D_m}{l_m}, \frac{d_p}{l_p} = \frac{d_m}{l_m}, \frac{E_p}{l_p} = \frac{E_m}{l_m}, \frac{H_p}{l_p} = \frac{H_m}{l_m}, \frac{Q_p}{l_p^2 w_p} = \frac{Q_m}{l_m^2 w_m}, \theta_p^0 = \theta^0$$

A equação de predição é a seguinte:

$$\frac{\delta_p}{l_p} = \frac{\delta_m}{l_m} \Rightarrow \delta_p = \frac{l_p}{l_m} \delta_m$$

3.4 Procedimentos para confecção da caçamba transportadora

3.4.1 Preparação do modelo base

Tomou-se como base a caçamba produzida pela TRIEL-HT (Indústria de Equipamentos Rodoviários Ltda), visto que é o principal fabricante nacional deste tipo de caçamba. A Figura 3.02 ilustra a caçamba em perspectiva.



FIGURA 3.02 - Caçamba da TRIEL em perspectiva

3.4.2 Confeção dos modelos reduzidos

As caçambas foram confeccionadas em duas versões no acrílico transparente de 2 mm de espessura. Foram construídas artesanalmente e levaram quatro meses de trabalho. Utilizou-se para cortar o acrílico uma serra elétrica circular Bosch. Para moldá-lo foi usado um soprador industrial elétrico e uma resistência elétrica confeccionada artesanalmente. A montagem foi realizada com cantoneiras de alumínio e parafusos com porcas para sustentação e rigidez da mesma. As duas versões podem ser visualizadas nas Figuras 3.03 e 3.04.



FIGURA 3.03 - Modelo da caçamba de geometria padrão



FIGURA 3.04 - Modelo da caçamba de geometria proposta

A primeira caçamba com geometria padrão possui ângulo de inclinação das paredes com a horizontal, $\alpha = 45^\circ$ e a segunda caçamba com geometria proposta

possui ângulo de inclinação das paredes com a horizontal, $\alpha = 50^\circ$. Os estudos realizados no modelo proposto foram baseados em resultados de pesquisas referentes as tremonhas dos silos, devido a escassez de literatura e pela semelhança da caçamba com a tremonha em forma de cunha.

Os modelos reduzidos em escala 1: 4 das caçambas padrão e proposta estão ilustradas nas Figuras 3.05 e 3.06, que representam as vistas transversais dos dois modelos.

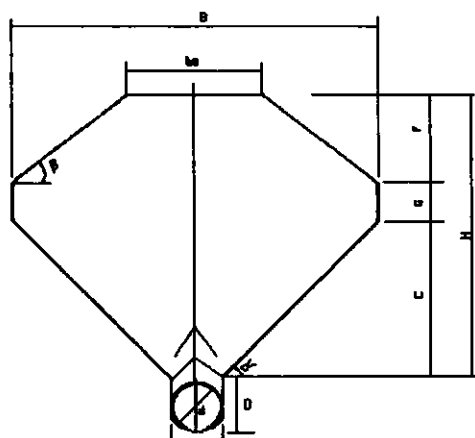


FIGURA 3.05 - Caçamba de geometria padrão

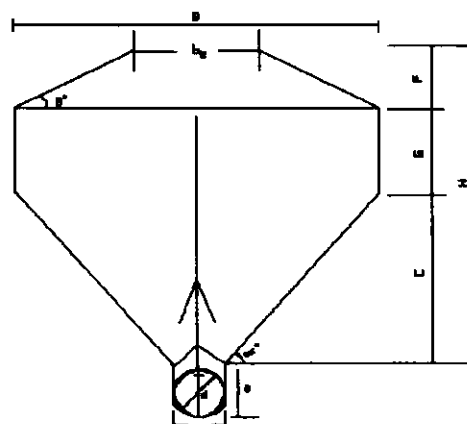


FIGURA 3.06 - Caçamba de geometria proposta

O Quadro 3.01 representa as dimensões reais da caçamba padrão e o Quadro 3.02 representa as dimensões do modelo proposto em escala reduzida. O ângulo de repouso (β) foi mantido nos dois modelos, pois os produtos utilizados nos ensaios foram os mesmos.

QUADRO 3.01 – Especificações e cotas da caçamba padrão

Modelo	Capacidade (m ³)	C (mm)	H (mm)	B (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	G (mm)	F (mm)	α (°)	β (°)
Padrão	19,6	1075	2000	2400	176	1149	400	525	45°	40°

QUADRO 3.02 – Especificações e cotas da caçamba proposta

Modelo	Capacidade (m ³)	C (mm)	H (mm)	B (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	G (mm)	F (mm)	α (°)	β (°)
Proposto	5,13	275	560	545	44	235,5	155	130	50°	40°

3.4.3 Confeção dos Transportadores

Os transportadores foram confeccionados durante três meses num processo artesanal utilizando como material tubo de aço de baixo teor de carbono. Durante a confecção dos transportadores utilizou-se um eixo com diâmetro uniforme de 12,7mm e chapa de aço de 1/32" cortadas em forma de arruelas com 38,0mm de diâmetro externo soldadas sobre o eixo construindo então, os filetes do transportador. Para o transportador padrão com passos constantes foi admitido um passo medindo 80% do diâmetro externo do próprio transportador, como está ilustrado nas Figuras 3.07 (a e b). No transportador proposto, os passos e o diâmetro interno são variados e o diâmetro externo constante. A construção dos filetes para a formação dos passos seguiu condições pré estabelecidas: o primeiro passo medindo 15mm, o segundo igual ao primeiro acrescido de um $\Delta L = 5\text{mm}$ e, assim sucessivamente, entretanto o último passo não deverá ultrapassar o diâmetro externo como ilustrado nas Figuras 3.08 (a e b). O diâmetro interno foi confeccionado com auxílio de uma fita de Teflon para enchimento e moldar a conicidade do mesmo. Com a estrutura pronta foi realizado um tratamento superficial de acabamento, em seguida, as extremidades do transportador foram sustentadas por mancais de rolamentos acopladas em uma calha de acrílico transparente de 2 mm de espessura em forma de U e então submetidos a realização dos ensaios.



FIGURA 3.07a - Transportador convencional.



FIGURA 3.07b – Transportador com passos, diâmetros interno e externo constantes.

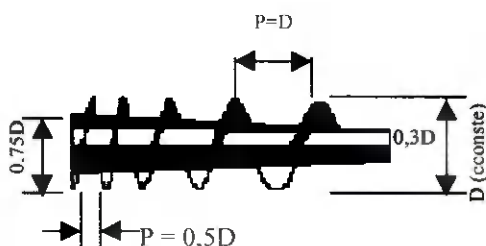


FIGURA 3.08a - Transportador com diâmetro externo constante, interno cônico e passos variados.



FIGURA 3.08b - Transportador com passos variados, diâmetro externo constante e interno cônico.

A Figura 3.09 ilustra o comportamento da variação dos diâmetros externo e interno das arruelas que serviram para confecção dos filetes.

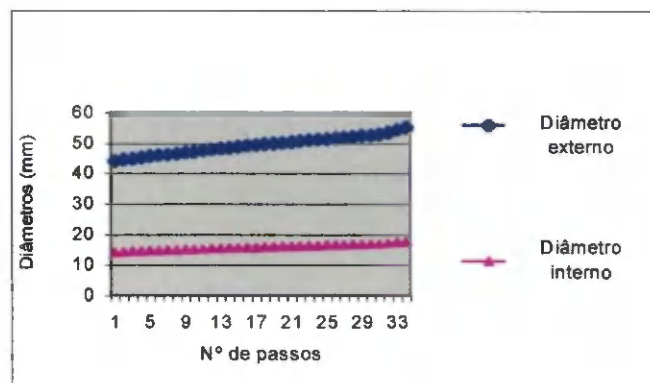


FIGURA 3.09 – Gráfico ilustrativo das variações dos diâmetros externo e interno dos filetes para confecção do transportador de passos crescentes.

3.4.4 Velocidade dos Transportadores

Para medir as velocidades rotacionais dos transportadores foi utilizado o Tacômetro da marca VENTURE de fabricação Inglesa, com capacidade ATH 4/U e escala de 500; 5.000 e 50.000. As medições foram realizadas na escala 500. Quando os transportadores giravam livremente sem nenhum produto dentro da caçamba e também quando estavam carregados forneceram leituras de velocidades relacionadas com o modelo da caçamba, o tipo de transportador e o tipo de ração, as quais estão indicadas nos Quadros 4.01; 4.02; 4.03 e 4.04.

O carregamento das caçambas foi realizado com uma simulação de um carregamento real. A caçamba foi carregada pela abertura superior onde colocou-se uma tremonha em escala reduzida para que o carregamento fosse de forma uniforme e aerada.

3.4.5 Vazão

A vazão foi calculada mediante a razão do volume de ração pré-estabelecido equivalente a $0,036\text{m}^3$ pelo tempo de escoamento para cada produto. Os parâmetros que intervêm na vazão para cada tipo de produto são: a sua densidade aerada que consiste em pesar um volume pré-estabelecido onde o produto é depositado de maneira solta sem nenhuma compactação. Com relação ao tipo de caçamba, o ângulo de inclinação das paredes é fator determinante da vazão do produto, assim como os tipos de transportadores dependendo do projeto de cada um deles. Estes parâmetros estão indicados nos Quadros 4.01; 4.02; 4.03 e 4.04.

3.4.6 Instalação dos bicos injetores

Os bicos injetores foram instalados próximo a saída de descarga onde há maior probabilidade de formação de arcos coesivos baseados em estudos realizados nos silos equipados com sistema pneumático para promoção de fluxo. Do mesmo modo, instalou-se os bicos injetores nas paredes inclinadas da caçamba em quatro linhas de distribuição, sendo duas para cada parede. A linha superior é composta por dois bicos e a inferior por três sendo um total de dez bicos por seção que faz parte da composição da caçamba. Os bicos são interligados por mangueiras de alta pressão a uma cápsula de distribuição de ar, onde a mesma é alimentada por um compressor a uma pressão de 827 KPa. Quando o sistema é acionado todos os bicos entram em ação injetando ar para dentro da caçamba aerando o produto e conseqüentemente quebrando a sua resistência e fazendo-o escoar livremente.

4 Resultados e Discussão

4.1 Análise do volume transportado

A otimização do volume para os caminhões do tipo silo graneleiro pode ser prevista com base no modelo do protótipo testado em laboratório. Várias modificações foram feitas indicando um melhor aproveitamento do volume nominal da caçamba. Foram analisados vários parâmetros, entre eles, o ângulo de inclinação (α) das paredes, altura e largura da caçamba padrão.

Com os dados experimentais obtidos foi possível construir duas secções transversais das caçambas padrão e proposta, através da geometria plana e estudos comparativos observou-se que a secção transversal proposta tinha a maior área superficial.

Como o comprimento é o mesmo para ambas as caçambas, logo observou-se que a caçamba proposta tem maior capacidade de transporte.

O volume transportado pela caçamba proposta é maior que a de geometria padrão com uma variação de aproximadamente 1m^3 por carregamento / caminhão. O caminhão em estudo foi o modelo Toko. Baseando-se nos cálculos volumétricos obtivemos os seguintes resultados:

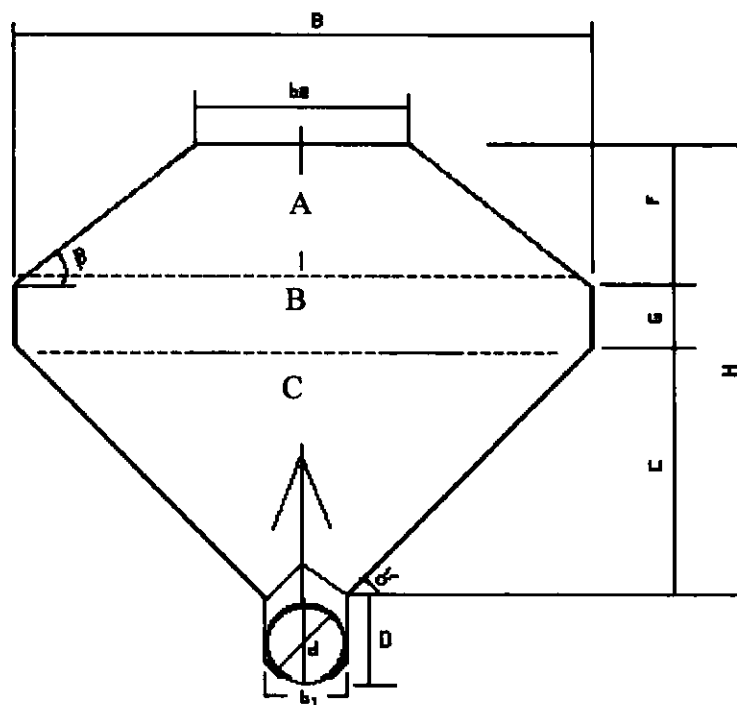


FIGURA 4.01 - Modelo de geometria padrão

Ângulos pré-estabelecidos

$$\beta = 40^\circ$$

$$\alpha = 45^\circ$$

Áreas calculadas

$$A = 931.507,5 \text{ mm}^2$$

$$B = 960.000 \text{ mm}^2$$

$$C = 1.384.600 \text{ mm}^2$$

Área total da secção transversal = $3,27 \text{ m}^2$

Comprimento referente as duas secções $\Rightarrow L = 3,0 \text{ m}$

Como $V = A_T \times L \Rightarrow V = 9,8 \text{ m}^3$

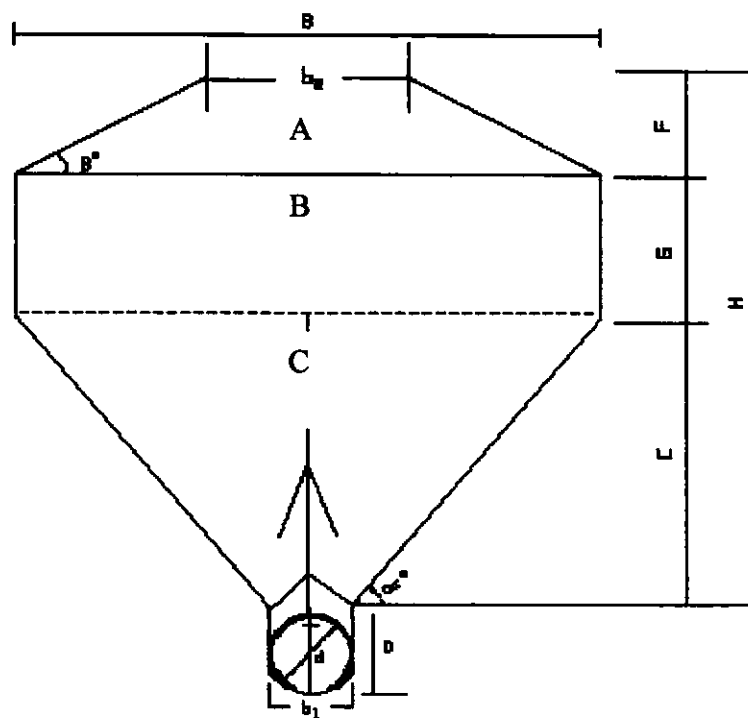


FIGURA 4.02 - Modelo de geometria proposta

Ângulos pré-estabelecidos

$$\beta = 40^\circ$$

$$\alpha = 50^\circ$$

Áreas calculadas

$$A = 712.972 \text{ mm}^2$$

$$B = 1.351.600 \text{ mm}^2$$

$$C = 1.295.800 \text{ mm}^2$$

Área total da secção transversal = $3,4 \text{ m}^2$

Comprimento referente as duas secções $\Rightarrow L = 3,0 \text{ m}$

Como $V = A_T \times L \Rightarrow V = 10,2 \text{ m}^3$

$$\Delta V = V_2 - V_1 \Rightarrow \Delta V = 10,2 - 9,8 \Rightarrow \Delta V = 0,4 \text{ m}^3$$

logo, as duas secções multiplicadas por $\Delta V \cong 1,0 \text{ m}^3$.

4.2 Vazão de descarga

O cálculo da vazão de descarga obedece aos seguintes procedimentos: a escolha da caçamba e o tipo do transportador. Determinou-se como padrão para os ensaios e determinação de densidade um volume fixo igual a $0,036 \text{ m}^3$ de um determinado produto e também o volume escoado a cada minuto sem interrupção da vazão. Nos Quadros 4.01, 4.02, 4.03 e 4.04 estão indicados os valores das vazões de descarga para as diferentes situações e produtos.

Analisando-se os dados dos referidos quadros percebe-se que a variação do tempo de descarga para cada tipo de transportador utilizado foi pequena, pois os mesmos apresentaram desvio no comportamento do fluxo, um com uniformidade e o outro com arqueamento.

Observando-se a variação da vazão verificou-se que a mesma está relacionada a geometria da caçamba, ao projeto do transportador e o tipo de produto.

Comparando os dados da caçamba de geometria padrão com transportador de passos, diâmetro externo e eixo constantes com a caçamba de geometria proposta verificou-se que houve um aumento da vazão na caçamba de geometria proposta para o mesmo produto.

Fazendo a comparação das caçambas com um mesmo produto e relacionando um transportador de passos variados, diâmetro externo constante e eixo cônico observou-se também um aumento significativo da vazão.

Comparando os dados dos transportadores da caçamba de geometria padrão percebemos que o transportador de passos e diâmetros constantes proporcionou uma maior vazão, mediante marteladas de impacto, enquanto o transportador com passos variados, diâmetro externo constante e eixo cônico proporcionou uma vazão menor,

mas com um número menor de marteladas por que houve menos formação de arcos, o qual proporcionou um fluxo de massa.

Comparando os tipos de transportadores para a caçamba de geometria proposta percebe-se que o transportador de passos e diâmetros constantes proporcionou uma vazão maior. A caçamba foi submetida a marteladas de impacto em número menor comparada com a caçamba de geometria padrão; com o transportador de passos variados, diâmetro externo constante e eixo cônico observou-se um escoamento livre sem a presença de marteladas nas paredes da caçamba.

QUADRO 4.01 – Comportamento do Farelo de Trigo submetido as condições pré-estabelecidas.

Caçamba de geometria padrão					
Produto	Volume (m³)	Densidade livre (kg/m³)	Velocidade Rotacional livre (rpm)	Transportador: Passos, diâmetros externo e eixo constantes	Transportador: Passos crescentes, Diâmetro interno cônico e externo constante
Farelo de Trigo	0,036	309,0	114		
Tempo de descarga (min)				9,1	11,07
Velocidade Rotacional com carga (rpm)				113,3	113
Vazão (m³/seg.)				6,580 x 10 ⁻⁵	5,42 x 10 ⁻⁵
Caçamba de geometria proposta					
Produto	Volume (m³)	Densidade livre (kg/m³)	Velocidade Rotacional livre (rpm)	Transportador: Passos, diâmetros externo e eixo constantes	Transportador: Passos crescentes, Diâmetro interno cônico e externo constante
Farelo de Trigo	0,036	309,0	114		
Tempo de descarga (min)				8,85	9,23
Velocidade Rotacional com carga (rpm)				112	112,7
Vazão (m³/seg.)				6,780 x 10 ⁻⁵	6,498 x 10 ⁻⁵

QUADRO 4.02 – Comportamento da Ração 1 submetida as condições pré estabelecidas.

Caçamba de geometria padrão					
Produto	Volume (m ³)	Densidade livre (kg/m ³)	Velocidade Rotacional livre (rpm)	Transportador: Passos, diâmetros externo e eixo constantes	Transportador: Passos crescentes, Diâmetro interno cônico e externo constante
Ração Inicial (Ração 1)	0,036	714,0	114		
Tempo de descarga (min)				16,477	17,30
Velocidade Rotacional com carga (rpm)				112,0	111,0
Vazão (m ³ /seg.)				3,641 x 10 ⁻⁵	3,468 x 10 ⁻⁵
Caçamba de geometria proposta					
Produto	Volume (m ³)	Densidade livre (kg/m ³)	Velocidade Rotacional livre (rpm)	Transportador: Passos, diâmetros externo e eixo constantes	Transportador: Passos crescentes, Diâmetro interno cônico e externo constante
Ração Inicial (Ração 1)	0,036	714,0	114		
Tempo de descarga (min)				14,87	15,22
Velocidade Rotacional com carga (rpm)				109,7	109,0
Vazão (m ³ /seg.)				4,035 x 10 ⁻⁵	3,942 x 10 ⁻⁵

QUADRO 4.03 – Comportamento da Ração 2 submetida as condições pré estabelecidas.

Caçamba de geometria padrão					
Produto	Volume (m ³)	Densidade livre (kg/m ³)	Velocidade Rotacional livre (rpm)	Transportador: Passos, diâmetros externo e eixo constantes	Transportador: Passos crescentes, Diâmetro interno cônico e externo constante
Ração: Monte (Ração 2)	0,036	727,0	114		
Tempo de descarga (min)				14,2	14,74
Velocidade Rotacional com carga (rpm)				111,0	111,0
Vazão (m ³ /seg.)				4,22 x 10 ⁻⁵	4,07 x 10 ⁻⁵
Caçamba de geometria proposta					
Produto	Volume (m ³)	Densidade livre (kg/m ³)	Velocidade Rotacional livre (rpm)	Transportador: Passos, diâmetros externo e eixo constantes	Transportador: Passos crescentes, Diâmetro interno cônico e externo constante
Ração: Monte (Ração 2)	0,036	727,0	114		
Tempo de descarga (min)				13,90	14,00
Velocidade Rotacional com carga (rpm)				110,0	111,0
Vazão (m ³ /seg.)				4,316 x 10 ⁻⁵	4,285 x 10 ⁻⁵

QUADRO 4.04 – Comportamento da Ração 3 submetida as condições pré estabelecidas.

Caçamba de geometria padrão					
Produto	Volume (m³)	Densidade livre (kg/m³)	Velocidade Rotacional livre (rpm)	Transportador: Passos, diâmetros externo e eixo constantes	Transportador: Passos crescentes, Diâmetro interno cônico e externo constante
Ração Final (Ração 3)	0,036	707,3	114		
Tempo de descarga (min)				15,06	16,98
Velocidade Rotacional com carga (rpm)				109,3	111,0
Vazão (m³/seg.)				3,984 x 10 ⁻⁵	3,533 x 10 ⁻⁵
Caçamba de geometria proposta					
Produto	Volume (m³)	Densidade livre (kg/m³)	Velocidade Rotacional livre (rpm)	Transportador: Passos, diâmetros externo e eixo constantes	Transportador: Passos crescentes, Diâmetro interno cônico e externo constante
Ração Final (Ração 3)	0,036	707,3	114		
Tempo de descarga (min)				13,87	14,20
Velocidade Rotacional com carga (rpm)				111,0	109,0
Vazão (m³/seg.)				4,326 x 10 ⁻⁵	4,225 x 10 ⁻⁵

4.2.1 Caçamba padrão com transportador de passos constantes

O transportador helicoidal de passos constantes influenciou no escoamento do produto, pois neste tipo de transportador ao girar 360° o primeiro passo é carregado e transportado ao longo do eixo até sua saída, assim o transportador não é alimentado ao longo do eixo proporcionando uma inclinação superficial do produto, compactando-o e conseqüentemente a formação de “arcos”.

A formação de “arcos” coesivos provavelmente pode ser causada por vibrações mecânicas no transporte que compacta o produto, pela inclinação das paredes da caçamba e pelo projeto do transportador.

Nas condições pré estabelecidas, o farelo de trigo fluiu livremente, sem interrupção. Na ração 1, o escoamento foi interrompido nos primeiros quatro

minutos, já na ração 2 o descarregamento foi interrompido antes do primeiro minuto e assim ocorreu com a ração 3. Os comportamentos estão ilustrados na Figura 4.03

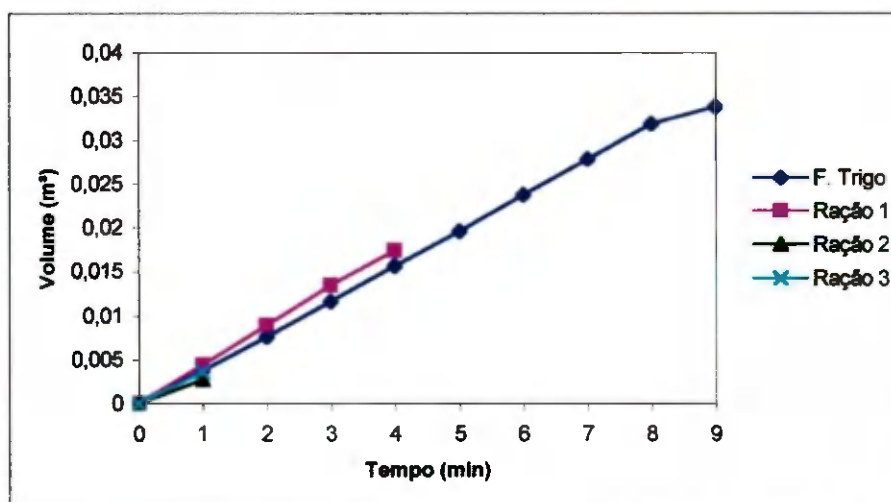


FIGURA 4.03 - Comportamento referente aos ensaios da caçamba padrão com transportador de passos constantes

4.2.2 Caçamba padrão com transportador de passos variados

O farelo de trigo por ser considerado um produto de escoamento livre escoou sem interrupção, o que já era esperado. Nas rações foram avaliadas apenas suas densidades, enquanto as outras propriedades físicas não foram analisadas, o que proporcionou os seguintes comportamentos: a ração 1 teve seu escoamento interrompido nos primeiros oito minutos; na ração 2, o escoamento foi interrompido nos primeiros dois minutos e na ração 3, o escoamento foi interrompido nos primeiros quatro minutos. A Figura 4.04 ilustra estes comportamentos.

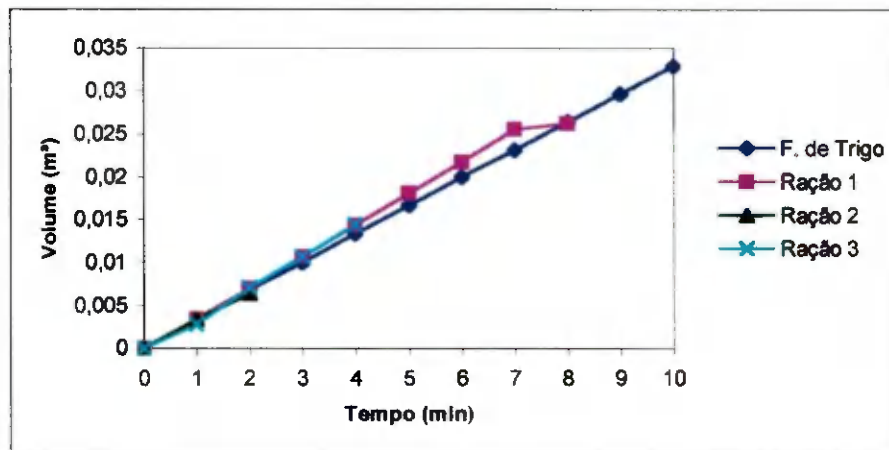


FIGURA 4.04 - Comportamento referente aos ensaios da caçamba padrão com transportador de passos variados

4.2.3 Caçamba proposta com transportador de passos constantes

O farelo de trigo continuou escoando livremente. Na ração 1, o escoamento foi interrompido no final de oito minutos, a ração 2 também teve seu escoamento interrompido no final de oito minutos, o mesmo aconteceu com a ração 3. Os comportamentos observados estão ilustrados na Figura 4.05.

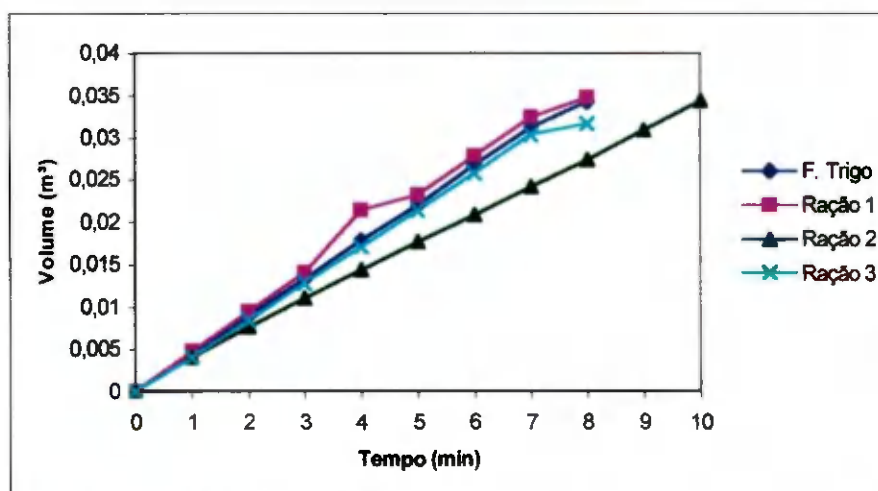


FIGURA 4.05 - Comportamento referente aos ensaios da caçamba proposta com transportador de passos constantes

4.2.4 Caçamba proposta com transportador de passos variados

A caçamba proposta favoreceu o escoamento, devido a inclinação das paredes, o transportador helicoidal de passos variados garantiu um fluxo de massa do produto, por que o mesmo foi alimentado no primeiro passo e, em seguida, a cada passo foi adicionado um Δv garantindo uma alimentação do transportador ao longo do seu comprimento proporcionando uma superfície plana do produto armazenado, ou seja, um fluxo de massa.

Na conexão da caçamba proposta com o transportador de passos variados, o resultado foi o esperado, não só o farelo de trigo como as demais rações escoaram livremente. Os dados analisados encontram-se ilustrados na Figura 4.06

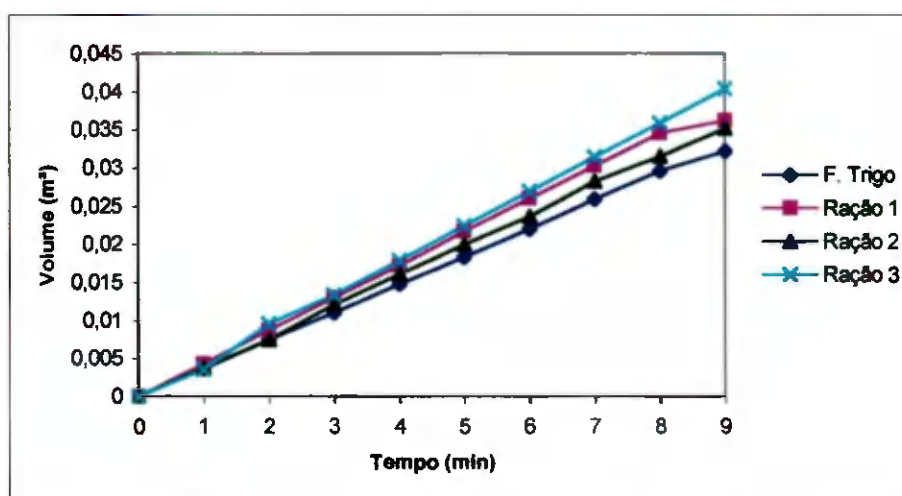


FIGURA 4.06 - Comportamento referente aos ensaios da caçamba proposta com transportador de passos variados

Como os ensaios foram realizados em modelos reduzidos na escala de 1:4 e os produtos utilizados nos ensaios estavam na escala real espera-se que provavelmente as dificuldades encontradas e alguns problemas que surgiram durante os ensaios possam ser minimizados.

4.3 Tipos de Fluxo

Os resultados obtidos nos ensaios com diferentes tipos de transportadores helicoidais e modelos reduzidos de caçambas transportadoras de ração mostraram o verdadeiro comportamento, pois ao se utilizar a caçamba de geometria padrão com um transportador helicoidal de passos, diâmetro externo, diâmetro do eixo constantes e como o transportador gira dentro de uma calha em forma de U observou-se que o produto foi transportado ao longo do comprimento da mesma, o qual entrou no primeiro passo e foi conduzido ao longo do comprimento deste até a saída. Este processo resultou no descarregamento da caçamba com problemas de arqueamento, pois o transportador foi alimentado uma só vez. Entretanto, quando o transportador girou 360° com alimentação só no primeiro passo provocou um canal de escoamento do produto em sua direção definindo claramente que o fluxo foi do tipo funil, como ilustrado na seqüência fotográfica da Figura 4.07, o que estava de acordo com o que foi observado por O'BRIEN (1965).

O produto durante sua trajetória na calha até a saída provocou um atrito com o produto estacionário e compactou-o contra a parede da caçamba provocando arcos coesivos e posteriormente, o efeito tubo, do qual o transportador gira livremente com vazão zero mesmo que haja produto dentro da caçamba. Esta situação encontra-se ilustrada nas fotografias da Figura 4.08.



FIGURA 4.07 – Tipo de fluxo numa caçamba padrão com transportador de passos, diâmetro externo e diâmetro do eixo constantes



FIGURA 4.08 – Tipo de fluxo realizado em uma caçamba padrão com transportador de passos, diâmetro externo e interno constantes. Ilustrando uma situação típica de arqueamento e efeito tubo

Realizou-se também ensaios utilizando a caçamba de geometria padrão com um transportador de passos crescentes, diâmetro externo constante e diâmetro do eixo cônico. Ao considerar que o transportador gira dentro de uma calha em forma de U, o produto foi transportado ao longo do comprimento da mesma. Observou-se, então, que o produto entrou no primeiro passo do transportador e a partir daí o volume transportado foi alimentado por um incremento, Δv , para cada passo ao longo do comprimento até a saída. Este processo resultou no descarregamento da caçamba com fluxo de massa para farelo de trigo e rações, pois a rosca foi

alimentada durante toda sua trajetória ao longo do seu comprimento provocando uma descarga de “superfície plana” do produto armazenado como está ilustrado nas Figuras 4.09 e 4.10. Devido a existência da calha protetora do transportador, o escoamento do produto ocorreu lateralmente como ilustra a fotografia da Figura 4.09 que deixa transparecer que o fluxo era de funil, mas não era. Já na seqüência fotográfica da Figura 4.08 está representada a ocorrência do fluxo de massa na vista lateral da caçamba.

O produto foi conduzido ao longo da rosca até a saída, pelo qual fluiu livremente sem nenhum tipo de arqueamento e o produto armazenado na caçamba escoou totalmente. Esta situação está representada nas Figuras 4.09 e 4.10.



FIGURA 4.09 - Modelo de fluxo indeterminado utilizando transportador com passos variados, diâmetro externo constante e o eixo cônico.



FIGURA 4.10 - Modelo de fluxo de massa utilizando transportador com passos variados, diâmetro externo constante e o eixo cônico.

Nos ensaios realizados com vários tipos de transportadores observou-se resultados satisfatórios como por exemplo, ao se utilizar a caçamba de geometria proposta com o transportador de passos crescentes, diâmetro externo constante e diâmetro do eixo cônico foi verificado que os produtos escoaram livremente, sem nenhuma interrupção causada por arqueamento, tal comportamento era esperado devido a uma inclinação (α) mais acentuada nas paredes inclinadas da caçamba e ao transportador de passos crescentes. Tal comportamento está ilustrado na Figura 4.11. O ideal seria a inclinação da parede com 70° que proporcionaria fluxo de massa, mas como se trata de uma caçamba para transportar produto num caminhão seria fora de estética e provocaria instabilidade dinâmica da caçamba.

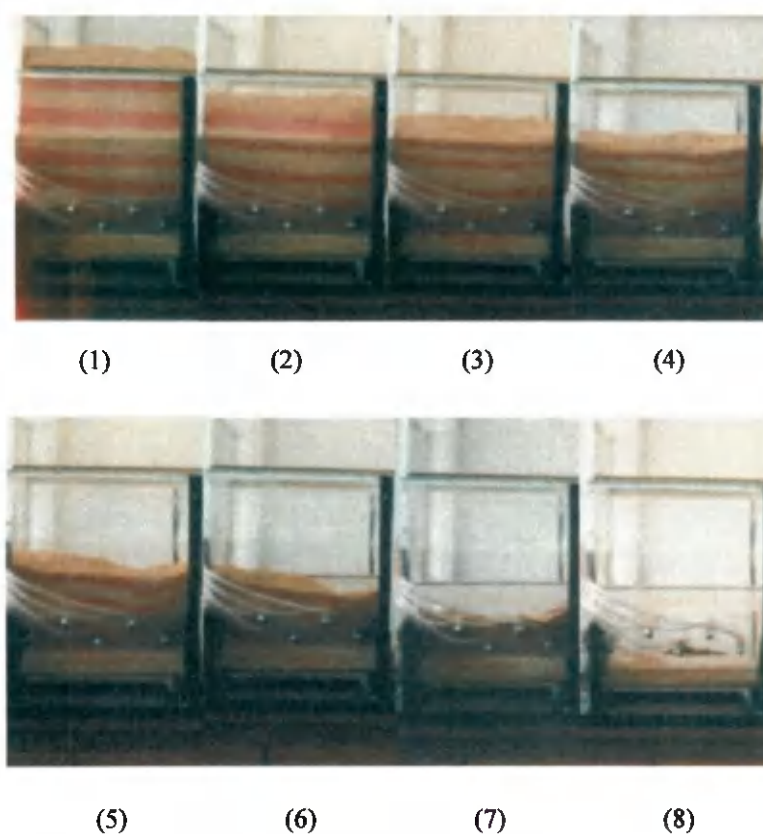


FIGURA 4.11 - Sequência fotográfica ilustra o comportamento do fluxo da caçamba proposta.

A Figura 4.12, extraída do EUROCODE 1/N108/1993, fornece o tipo de fluxo em função do ângulo de atrito com a parede, o ângulo de inclinação das paredes da tremonha e o tipo de tremonha (retangular) a que se adequa as caçambas estudadas.

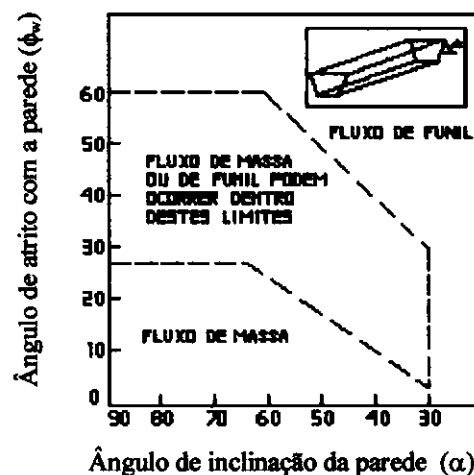


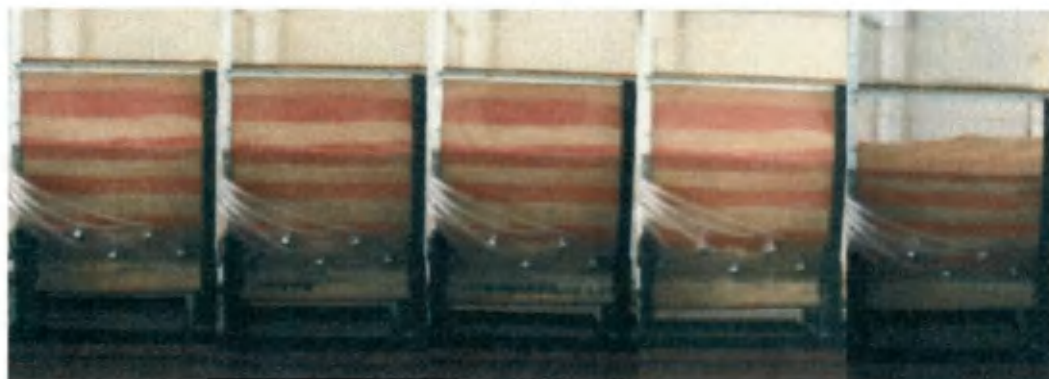
FIGURA 4.12 - Determinação do tipo de fluxo

BANDEIRA (1997) determinou as propriedades de vários tipos de rações e encontrou que o ângulo de atrito do produto com a parede de acrílico, mesmo material utilizado nas caçambas em estudo, variava de 13° a 18°, logo com estes dados observou-se que as paredes das caçambas devem ser revestidas com material que as deixem mais lisas (polidas). Para que ocorra fluxo de massa é necessário que o ponto de interseção do ângulo de atrito da parede (ϕ_w) com o ângulo de inclinação da parede fique fora da faixa de fluxo indeterminado, como mostra a Figura 4.12.

4.4 Utilização de Bicos Injetores

A aeração do produto dentro da caçamba é o método mais simples e freqüentemente o mais efetivo de promover descarga. Esta técnica baseia-se em quantidades controladas de ar a baixa pressão para fluidizar os produtos com características coesivas, por exemplo, as rações estudadas. A adição suficiente de ar reduz o atrito do produto com a parede da caçamba, segundo OOMS & ROBERTS (1982). Sob tais circunstâncias, o produto flui livremente e por conseguinte pode ser induzido a fluir na superfície inclinada da parede da tremonha.

O ar pode ser introduzido por blocos de aeração porosos nas superfícies internas ou através de uma membrana porosa montada na base da tremonha. Neste estudo, o ar foi introduzido na caçamba através de bicos injetores de ar distribuídos em número de cinco para cada parede inclinada seguindo duas linhas de distribuição, ou seja, a linha superior com dois bicos e a linha inferior com três bicos atingindo assim, regiões de maior ocorrência de arqueamento. Como o sistema a uma pressão de 827 KPa alimenta uma cápsula distribuidora com 10 bicos que injetam ar dentro da caçamba contra os arqueamentos tornando o produto fluidizado. Na Figura 4.13 tem-se uma ilustração de uma seqüência de fotografias, nas quais observa-se a ração 1 sendo descarregada da caçamba de geometria proposta no instante em que se desenvolveu o arqueamento, provocando o efeito tubo. Com a injeção de ar quebrando a resistência do produto, a ração 1 foi descarregada com fluxo de massa.



(1)

(2)

(3)

(4)

(5)



(6)

(7)

(8)

(9)

FIGURA 4.13 - Sequência fotográfica do tipo de fluxo em caçamba proposta com a ação dos bicos injetores.

5 Conclusões

Com base nos resultados obtidos do presente estudo relacionados ao comportamento do fluxo pode-se concluir que:

1. O modelo proposto foi considerado ideal nas condições estudadas;
2. O transportador helicoidal com passos variados e eixo cônico proporcionou fluxo de massa dos produtos estudados, evitando-se a formação de arcos coesivos;
3. A vazão de descarga pode ter sido afetada pela densidade aerada dos produtos, pelo tipo de transportador e inclinação das paredes da caçamba;
4. As dimensões da caçamba proposta permitirão um acréscimo do volume transportado de 1 m³ / carregamento / caminhões modelo Toko.
5. A utilização dos bicos injetores a ar comprimido na caçamba de geometria proposta garantiu um escoamento livre dos produtos relacionados com rações avícolas e suínas transportados neste tipo de caçamba.

Sugestões

Outros trabalhos podem dar continuidade a este estudo explorando alguns parâmetros que não foram identificados neste trabalho, como por exemplo:

1. Estudar as condições de estabilidade dinâmica da caçamba de geometria proposta;
2. Analisar o comportamento do fluxo utilizando os bicos injetores em caçamba com diversas linhas de distribuição;
3. Estudar e avaliar a relação entre a inclinação das paredes da caçamba com a conicidade do eixo do transportador;
4. Fazer um estudo comparativo dos resultados obtidos neste trabalho variando a velocidade rotacional do transportador.
5. Investigar o efeito da aplicação de “vibrações mecânicas” sobre o transportador testado.

6 Referências Bibliográficas

- ARNOLD, P. C., McLEAN, A. G. and ROBERTS, A. W., Bulk Solids: Storage, Flow and Handling. The University of Newcastle Research Associates (TUNRA) Ltd., 2nd Edition, 1980.
- ASAE Standards, 40th Ed. SP389.1. Auger flighting design considerations. St. Joseph, Mich.: ASAE. 1993.
- BANDEIRA, Ivanoska Salgado de Assis. Análise de fluxo de ração e farelo de trigo em silos prismáticos industriais. Dissertação de mestrado, UFPB – Campina Grande, 1997.
- BRUSEWITZ, G. H. and S. P. E. PERSON. Parametric study of factors influencing screw-conveyor throughput and power requirements. Transactions of the ASAE 12(1): 51 – 54, 59, 1969.
- BURKHARD, G. J. Effect of pitch, radial clearance, hopper exposure, and head on performance of screw feeders. Transactions of the ASAE 10(5): 685-690, 1967.
- CALIL, Carlito. Jr. e DIAS, Antônio Alves. Caminhões graneleiros: otimização da seção transversal da caçamba. XXVI CONBEA (Julho, 1997).
- CARLETON, A. MILES, J and VALENTIN, F. A study of factors affecting the performance of screw conveyors and feeders. Trans. ASME, J. Eng. Ind. 91 (2) 329-334, 1969.
- CARSON, J. W. Designing effective screw feeders. Powder Bulk Eng., (Dec.) 32-36, 41-42, 1987.
- COLIJN, H. Introduction to size control in bulk solids handling, Proc. Tenth Annual Seminar on Bulk Materials Handling, University of Pittsburgh, December 1977.
- EUROCODE 1. Basis of design and actions on structures, Part 4: Action on Silos and Tanks, 1993.
- HOSSDORF, Heinz. Modelos Reducidos método de cálculo. Patronato de investigación científica y técnica < Juan de La Cierva > del consejo superior de investigaciones científicas, Costillares (Chamartín) – Madrid – 1972.

- JENIKE, A. W. and JOHANSON, J. R., "On the Theory of Bin Loads", Journal of Engng. For Industry, Trans. ASME, Series B, 91(2), 339, 1969.
- JENIKE, A. W. and JOHANSON, J. R., "Bin Loads", Journal of Structural Division, ASCE, 95(ST4), 1011. 1968.
- JENIKE, A. W., JOHANSON, J. R. and CARSON, J. W. "Bin Loads – Part 2: Concepts", Journal of Engng. For Industry, Trans. ASME, Series B, 95(1) 1973.
- JENIKE, A.W., "Gravity Flow of Bulk Solids", Bulletin 108, Utah Engng. Exper. Station, University of Utah, 1961.
- JENIKE, A.W., "Storage and flow of bulk solids", Bulletin 123, Utah Engng. Exper. Station, University of Utah, 1964.
- JOHANSON, J. R., "Blending apparatus for bulk solids". U.S. Patent No. 4, 286, 883, 1981.
- JONES, D. D. and KOCHER, M. F.. Auger design for uniform unloading of granular material: I. Rectangular cross-section containers. Transactions of the ASAE 38(4): 1157-1162, 1995.
- LANGHAAR, H. L. Dimensional Analysis and Theory of Models. Huntington, N. Y.: Robert E. Krieger Publishing Co., 1980.
- MANJUNATH. K. S. and ROBERTS, A. W. Wall pressure-feeder load interactions in mass flow hopper / feeder combinations, Part I, Bulk Solids Handling, 6(4) 769-775, 1986.
- MANJUNATH. K. S. and ROBERTS, A. W. Wall pressure-feeder load interactions in mass flow hopper / feeder combinations, Part II, Bulk Solids Handling, 6(5) 903-911, 1986.
- McFATE, K. L. and GEORGE, R. M.. Power-capacity relationships of nominal 8-inch screw conveyors when handling shelled corn. Transactions of the ASAE 14(1): 121-126, 1971.
- McLEAN, A. G. and ARNOLD, P. C.. A simplified approach for the evaluation of feeder loads for mass flow bins. Powder Bulk Solids Technol., 3 (3) 25-28, 1979.
- MILLIER, W. F. Bucket elevators, auger conveyors, for handling free-flowing materials. Agricultural Engineering 39(8): 552-555, 1958.

- ROBERTS, A. W., "Vibration of powders and bulk solids". Invited Chapter 6 for Handbook on Powder Science and Technology (Fayed and Otten). Van Nostrand 1984.
- ROBERTS, A. W. and MANJUNATH, K. S. Volumetric and torque characteristics of crew feeders. Proc. Powder and Bulk Solids Conf., Chicago, IL, USA, pp. 189-208, 1994.
- ROBERTS, A. W., OOMS, M. and MANJUNATH, K. S. Feeder load and power requirements in the controlled gravity flow of bulk solids from mass-flow bins, Mech. Trans. IEAust., ME9 (1) (1984) 49-61.
- ROSS, I. J. and ISAACS, G. W. Capacity of enclosed screw conveyors handling granular materials (Part II). Transactions of the ASAE 4(1): 97-100, 104, 1961.
- ROSS, I. J., WHITE, A. M., LOEWER, O. J. and WIEMAN, D. M. Constant-speed variable capacity screw conveyor. Transactions of the ASAE 24(2): 484-487, 1981.
- SHIVVERS, C. C. Sweep auger structure. U. S. Patent No. 3,765,548. U. S. Patent Office, 1973.
- SPIVAKOVSKY, A. O. and DYACHKOV, V. K. Conveying Machines, volume I e II, Mir Publisher – Moscow, 1985.
- WALTERS, J. K., "A theoretical analysis of stresses in axially-symmetric hoppers and bunkers", Chem. Engng. Sci., 28, 779, 1973.
- ZHONG, Z. and O'CALLAGHAN, J. R.. The effect of the shape of the feed opening on the performance of a horizontal screw conveyor. J. Agric. Eng. Res. 46(2): 125-128, 1990.