

Parecer

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Uriel Aparecido Rosa e aprovada pela Comissão julgadora em 12 de junho de 1990.

Campinas, 19 de julho de 1990


Prof. Dr. Uscar Antonio Bianchi
Presidente da Banca

MODELAGEM DA TRAJETÓRIA DE RESÍDUOS ORGÂNICOS
PICADOS PROCESSADOS POR ROTOR DE FACAS RETAS

URIEL APARECIDO ROSA

CAMPINAS, 1990.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

MODELAGEM DA TRAJETÓRIA DE RESÍDUOS ORGÂNICOS
PICADOS PROCESSADOS POR ROTOR DE FACAS RETAS

Dissertação apresentada como parte dos requisitos
exigidos para obtenção do título de MESTRE em ENGENHARIA
AGRÍCOLA.

Autor : URIEL APARECIDO ROSA *ur*

Orientador : PROF. DR. OSCAR ANTONIO BRAUNBECK *ob*

CAMPINAS, 1990.

À minha esposa Fernanda
e ao meu filho Gabriel,
pelo carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Engenharia Agrícola pela oportunidade;

À Copersucar pela concessão da realização e publicação deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Oscar A. Braunbeck pela orientação inteligente, pelo incentivo e apoio constante;

Ao Prof. Dr. João D. Biagi pelas oportunas sugestões;

Aos colegas Ricardo Soares de Arruda Pinto e Angelo Domingos Banchi pelas inúmeras sugestões;

Aos estagiários Maurício Pires Martins e Nelson Luis Bonacelli pelo auxílio e cooperação;

Ao desenhista José Doniseti Martins pela colaboração na realização dos desenhos;

À minha família pelo incentivo, especialmente ao primo Prof. Dr. José Cláudio Moura pelo apoio para realização do mestrado;

Ao ferramenteiro Pedro Roberto Pereira em especial, cujo empenho foi fundamental e decisivo para a montagem e execução dos experimentos no laboratório;

À Usina Modelo e Usina São Martinho pela cessão dos sub-produtos utilizados nos experimentos.

SUMÁRIO

	PÁG.
SUMÁRIO	i
LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	6
3. REVISÃO DE LITERATURA	7
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
5. MATERIAL E MÉTODOS	35
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
7. CONCLUSÕES	111
ANEXO A	114
ANEXO B	118
ANEXO C	119
ANEXO D	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
ABSTRACT	136

LISTA DE FIGURAS

FIG. Nº	TÍTULO	PÁG.
4.1	Rotor operando em resíduo orgânico	21
4.2	Movimento da partícula sobre a faca, sistema de coordenadas retangular, GALILI & SHTEINGAUZ (1982)	22
4.3	Movimento da partícula em faca reta inclinada, GALILI & SHTEINGAUZ (1982)	25
4.4	Diagrama de corpo livre de partícula em queda livre, influenciada pela gravidade e a resistência do ar, REINTS & YOERGER (1967)	28
4.5	Coeficientes de arrasto para partículas esféricas e de forma irregular, MENNEL & REECE (1963)	29
5.1	Túnel vertical	38

FIG. Nº	TÍTULO	PÁG.
5.2	Lançador de material	43
5.3	Módulo de campo	45
5.4	Diagrama de forças da torta na faca	50
5.5	Esquema simplificado do túnel vertical	55
5.6	Perfis de velocidade ao longo da seção do tubo	58
5.7	Modelo simplificado do teste de lançamento de torta	62
5.8	Modelo genérico de faca com dimensões principais	63
5.9	Trajetória do material dentro da faca	68
5.10	Material na posição de início de descarga	69
6.1	Trajetórias de lançamento na condição U81A+28	83
6.2	Trajetórias de lançamento na condição	

FIG. Nº	TÍTULO	PÁG.
	U81A+13	84
6.3	Trajelórias de lançamento na condição U81A+00	84
6.4	Trajelórias de lançamento na condição U81A-16	85
6.5	Trajelórias de lançamento na condição U81A-31	85
6.6	Trajelórias de lançamento na condição U68A+28	86
6.7	Trajelórias de lançamento na condição U68A+13	86
6.8	Trajelórias de lançamento na condição U68A+00	87
6.9	Trajelórias de lançamento na condição U68A-16	87
6.10	Trajelórias de lançamento na condição U68A-31	88

FIG. Nº	TÍTULO	PÁG.
6.11	Trajelórias de lançamento na condição U44A+28	88
6.12	Trajelórias de lançamento na condição U44A+13	89
6.13	Trajelórias de lançamento na condição U44A+00	89
6.14	Trajelórias de lançamento na condição U44A-18.	90
6.15	Trajelórias de lançamento na condição U44A-31	90
6.16	Trajelórias de lançamento na condição U82A+00, $V_t < 4,2$ m/s	91
6.17	Trajelórias de lançamento na condição U82A+00, $V_t = 5,4$ m/s	91
6.18	Trajelórias de lançamento na condição U82A+00, $V_t = 7,6$ m/s	92
6.19	Trajelórias de lançamento na condição U82A+00, $V_t = 9,1$ m/s	92

FIG. Nº	TÍTULO	PÁG.
6.20	Trajeto�rias de lançamento na condição U82A+00, $V_t=10,9$ m/s	93
6.21	Trajeto�rias de lançamento na condição U82A+00, $V_t>12,1$ m/s	93
6.22	Diferença entre trajetória experimental e teórica na condição U81	94
6.23	Diferença entre trajetória experimental e teórica na condição U68	94
6.24	Diferença entre trajetória experimental e teórica na condição U44	95
6.25	Diferença entre trajetória experimental e teórica na condição U82A+00	95
6.26	Curvas experimentais da condição U81	104
6.27	Curvas experimentais da condição U68	104
6.28	Curvas experimentais da condição U44	105
6.29	Curvas experimentais das condições U82	105

FIG. No	TÍTULO	PÁG.
6.30	Alcance para as curvas teóricas da condição U81	106
6.31	Alcance para as curvas teóricas da condição U68	107
6.32	Alcance para as curvas teóricas da condição U44	107
6.33	Alcance para as curvas teóricas da condição U82	108

LISTA DE TABELAS

TAB. No	TÍTULO	PÁG.
5.1	Classificação granulométrica de torta seca a peso constante (Usina Modelo)	41
5.2	Identificação e umidade das sub-amostras de torta de filtro	48
5.3	Densidade aparente das sub-amostras de torta de filtro	49
5.4	Coeficientes de atrito cinético utilizados	53
5.5	Velocidade média do ar vs posição da válvula	57
5.6	Distribuição de massa da sub-amostra U82 obtida no túnel vertical	59
5.7	Distribuição de massa da sub-amostra U68	

TAB. No	TÍTULO	PÁG.
	obtida no túnel vertical	60
5.8	Distribuição de massa da sub-amostra U44 obtida no túnel vertical	60
5.9	Velocidades de arrasto obtidas para as sub-amostras	61
5.10	Posições da faca de lançamento	63
5.11	Condições iniciais do material dentro da faca para sub-amostras U81 e U68	71
5.12	Condições iniciais do material dentro da faca para sub-amostras U44	71
5.13	Condições iniciais do material dentro da faca para sub-amostra U82	72
6.1	Valores teóricos para a sub-amostra U81 no ponto de descarga	78
6.2	Valores teóricos para a sub-amostra U68 no ponto de descarga	78
6.3	Valores teóricos para a sub-amostra U44	

TAB.	Nº	TÍTULO	PÁG.
		no ponto de descarga	79
6.4		Valores teóricos para a sub-amostra U82 no ponto de descarga	79
6.5		Distâncias atingidas pelo lançamento da sub-amostra U81	96
6.6		Distâncias atingidas pelo lançamento da sub-amostra U68	97
6.7		Distâncias atingidas pelo lançamento da sub-amostra U44	97
6.8		Valores da curva ajustada para a sub-amostra U81 no ponto de descarga	98
6.9		Valores da curva ajustada para a sub-amostra U68 no ponto de descarga	99
6.10		Valores da curva ajustada para a sub-amostra U44 no ponto de descarga	99
6.11		Distâncias atingidas pelo lançamento da sub-amostra U81 com condições iniciais da curva ajustada	100

6.12 Distâncias atingidas pelo lançamento da
sub-amostra U68 com condições iniciais
da curva ajustada

101

~~6.13 Distâncias atingidas pelo lançamento da~~
~~sub-amostra U44 com condições iniciais~~
~~da curva ajustada~~

101

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
A	Área frontal da partícula	m^2
b	Constante linear da reta que define o perfil da faca	m
C	Coefficiente de arrasto	-
D	Diâmetro da partícula; é a maior dimensão quando a partícula é de forma irregular	m
d	Distância atingida pela torta sobre o piso em relação ao centro de rotação do torno	m
e	Base de logaritmos naturais	-
F	Força de arrasto	N

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
FC	Força centrífuga	N
F_n	Força normal exercida na partícula pela faca	N
F_t	Força tangencial exercida na partícula pela faca	N
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
K	Constante de arrasto	kg/m
k	Constante angular da reta que define o perfil da faca	-
L_{max}	Distância atingida pela torta em relação à extremidade da carenagem	m
l_1	Dimensão máxima da partícula	m
l_2	Dimensão máxima da partícula com exceção de l_1	m
m	Massa da partícula	kg
R	Força resultante entre a força cen-	

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
	trífuga e o peso do material	N
Rey	Número de Reynolds	-
R_e	Raio externo da faca	m
R_i	Raio inicial do material na faca	m
t	Tempo	s
V	Velocidade relativa da partícula com o ar	m/s
V_A	Velocidade de arrasto das partícu- las no túnel vertical	m/s
V_t	Velocidade terminal da partícula	m/s
V_{xo}	Velocidade de saída da partícula em relação ao eixo x do sistema de coordenadas girantes	m/s
V_{yo}	Velocidade de saída da partícula em relação ao eixo y do sistema de coordenadas girantes	m/s

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
V_o	Velocidade da partícula na posição de descarga	m/s
x	Distância da partícula ao eixo das ordenadas	m
x_i	Coordenada x referente à posição inicial da partícula	m
x_q	Coordenada x referente à extremidade da carenagem	m
x_t	Coordenada x referente à posição de descarga do material	m
y	Distância da partícula ao eixo das abscissas (perfil da faca)	m
y_q	Coordenada y referente à extremidade da carenagem	m
y_t	Coordenada y referente à posição de descarga do material	m
α_f	Ângulo de atrito entre partícula e faca	°

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
α_1	Ângulo entre o vetor $\omega.R_1$ e a força normal à faca, na posição inicial	°
α_R	Ângulo entre a superfície da faca e o eixo x	°
β	Ângulo da tangente à trajetória do material em relação à horizontal	°
β_o	Ângulo de saída do material da faca em relação à horizontal	°
ϵ	Ângulo entre a tangente à faca de perfil genérico e o eixo x	rad
γ	Ângulo entre o braço de sustentação da carenagem e a horizontal	°
θ	Ângulo de rotação da faca	rad, °
θ_o	Ângulo total de rotação da faca até a descarga	rad, °
μ	Coeficiente de atrito entre partícula e faca	-

SÍMBOLO

DESCRIÇÃO

UNIDADE

 ρ

Densidade do ar (pressão e temperatura)

 kg/m^3 ν

Viscosidade cinemática do ar

 m^2/s ω

Velocidade angular

 rad/s

RESUMO

O presente trabalho estuda o comportamento de resíduos orgânicos processados por rotor de facas retas radiais e inclinadas. O modelamento matemático baseia-se na literatura referente ao lançamento de materiais granulares por distribuidores centrífugos. Um programa computacional resolve a trajetória teórica do material dentro da faca e outro resolve sua trajetória no ar.

Construiu-se um lançador de material montado em um torno, para lançamento de torta de filtro com umidades entre 44 e 82 %. Ajustaram-se as facas com ângulos de -31 a $+28^{\circ}$ em relação à direção radial.

Filmaram-se as trajetórias de lançamento da torta para posterior reprodução, através de congelamento de imagens com avanço quadro a quadro e registro de suas coordenadas no espaço. Mediu-se a distância alcançada pela torta ao atingir a cota mínima.

Construiu-se um túnel vertical para medição de velocidade terminal, dotado de válvula reguladora de vazão de ar. Pesaram-se as frações de torta classificadas para se obter uma velocidade terminal representativa de cada umidade.

Após análise de alternativas de rotores simples e duplos em termos de potência de acionamento e trajetória preliminar optou-se por um rotor simples.

Construiu-se um rotor de facas retas radiais com diâmetro externo de 1,8 m para avaliação qualitativa do seu funcionamento. Montou-se lateralmente em uma colhedora de cana MF 201. Acionou-se o rotor através de dois motores hidráulicos TRW. Tracionou-se o conjunto com um guincho montado em um trator Valmet 128. O rotor revolveu uma parcela do monte de torta de seção triangular de 4 m de largura por 2 m de altura.

Os resultados experimentais indicaram bons ajustes das trajetórias teóricas geradas por facas radiais e com ângulos negativos. Devido ao tempo de descarga maior para facas com ângulos positivos, ocorreram desvios maiores nestas trajetórias.

A modificação do ângulo da carenagem se mostrou mais influente na alteração da trajetória do material lançado do que a mudança do ângulo da faca.

A desestruturação e aeração do material se realizam pela ação das facas do rotor e devido à ação do ar durante sua trajetória aérea.

1 INTRODUÇÃO

O crescente interesse na utilização de adubação orgânica em áreas de plantio de cana-de-açúcar tem sido manifestado devido ao elevado custo da adubação mineral, à possibilidade de melhoria das propriedades físico-químicas dos solos e à elevada quantidade de resíduos resultantes dos processos de fabricação de açúcar e álcool nas usinas.

A aplicação da matéria orgânica, proveniente de resíduos animais, vegetais ou humanos, oferece ao agricultor um valioso e muitas vezes menos oneroso método de conservação do solo. Se propriamente manuseada e aplicada, esta não somente diminui a necessidade dos caros e energeticamente pouco eficientes fertilizantes químicos, mas também eleva o conteúdo de húmus e evita erosão. Quando compostados, muitos dos problemas de toxidez associados com resíduos orgânicos frescos são reduzidos e o material se torna mais estável e mais capaz de melhorar a fertilidade do solo sobre um longo período de tempo. Embora o valor econômico destes benefícios possa facilmente ser superestimado, o valor mundial final de um programa cuidadosamente manejado de compostagem e aplicação na terra nunca deveria ser subestimado, STEFFEN

(1979).

A fertilidade do solo é incrementada pela adubação orgânica, devido à maior disponibilidade de nutrientes, à maior capacidade de retenção de água, à textura mais adequada e ao aumento da atividade microbiana fixadora de nitrogênio, CARDOSO & DIAS DE TOLEDO (1984).

A preparação do composto é uma fase importante do processo de adubação orgânica. A perda de água e carbono na forma de CO_2 produz uma grande redução de volume e massa do produto. Devido à perda de água através da secagem, a torta de filtro sofre uma redução de massa de 45 % quando o produto passa de 78 para 60 % de umidade (B.U.). Esses números evidenciam a importância da compostagem na redução dos custos de transporte e manuseio do produto, PERTICARRARI & BRAUNBECK (1988). O transporte do resíduo é o item de maior influência na composição dos custos da adubação orgânica, COPERSUCAR (1989).

O composto orgânico, constituído de matéria orgânica estabilizada, pode ser incorporado à cultura sem lhe provocar a queima, produzir mau cheiro ou atrair insetos. A compostagem é a decomposição aeróbica de resíduos orgânicos por microorganismos, que se desenvolvem a altas temperaturas, em torno de 50 a 70 °C, resultante da liberação de energia de suas atividades. Existe uma seleção dos microorganismos termofílicos que irão degradar o produto. A temperatura elevada inibe a atividade dos próprios microorganismos e elimina microorganismos

patogênicos e ervas daninhas.

O material precisa ser revolvido periodicamente para se evitar a formação de regiões anaeróbicas pois, durante o período termofílico, o consumo de oxigênio por parte dos microorganismos é intenso. Esta é a fase de maior redução de massa e volume. Com o declínio da temperatura, provocado pela redução da atividade microbiana, o consumo de oxigênio é reduzido e não se torna mais necessário fazer o revolvimento das pilhas de composto, porém o material continua amadurecendo e sofrendo redução de massa e volume, COPERSUCAR (1985). O produto final sofre uma queda da relação C/N superior a 30 para 17, aproximadamente, tornando-se adequado para aplicação nas culturas.

Para cada tonelada de cana moída, são produzidos de 30 a 40 kg de torta de filtro e cerca de 275 kg de bagaço, HUGOT (1977). A sobra de bagaço no setor canavieiro vem crescendo nos últimos anos, principalmente devido à modernização das caldeiras e sistemas periféricos das usinas. Existem várias alternativas para o uso de bagaço, tais como a energética, produção de aglomerados, chapas, produção de rações, cama de frango e outras. A utilização do bagaço na compostagem vem a ser uma utilização viável, juntamente com a torta de filtro que hoje é aplicada nos sulcos de plantio ou em áreas de soqueira.

A situação das usinas cooperadas da Copersucar na safra 81/82 (que se repetiu proporcionalmente na safra 82/83), indica que, de 14.10^6 t de bagaço produzidas,

houve uma sobra de 755.000 t (5 %). Em 50 % das usinas houve sobra de bagaço, atingindo o nível de 15 % em algumas unidades, COPERSUCAR (1983).

Os resíduos da indústria açucareira, bagaço e torta de filtro, podem ser compostados na proporção de 1:2 em massa, respectivamente, fornecendo um composto de boa qualidade.

Atualmente, o processo de revolvimento é realizado em algumas usinas por pá carregadora frontal com transmissão reversível para revolvimento de leiras de torta de 4 m de largura por 2 m de altura, COPERSUCAR (1985).

Em outros países, parte do tratamento de resíduos orgânicos urbanos é realizado por misturadores contínuos que revolvem o material disposto em leiras triangulares a céu aberto, HAY et alli (1985). O uso de um misturador contínuo conduz a uma otimização do processo, sem perdas de tempo operacional e energia devido às manobras da máquina. Ocorrem apenas as manobras de início e final de leira. O elemento básico desse tipo de misturador é um ou mais rotores de facas que cortam, arejam e desintegram o material para decomposição, lançando-o para trás e mantendo a mesma forma de leira triangular.

A produção de cogumelos comestíveis utiliza material orgânico pulverizado e estabilizado como substrato para seu desenvolvimento. Algumas firmas nacionais utilizam equipamentos contínuos importados para preparo do composto. Seu princípio de funcionamento é baseado em rotores que cortam, desestruturam e arremessam o produto

para reconstituição da leira, fornecendo ao produto características de oxigenação e textura convenientes para a realização da compostagem.

BRAUNBECK & IDE (1982) avaliaram um implemento contínuo para secagem de torta de filtro, que corta uma camada de uma face da leira através de uma rosca sem fim e a despeja sobre a outra face. A cada passagem do implemento, a seção transversal da leira se desloca da distância equivalente a uma camada cortada de material.

Embora exista a experiência com a operação do implemento revolvedor de resíduos, o uso de um rotor é mais eficiente que a rosca sem fim utilizada no referido implemento. Perdas por atrito, inerentes ao uso de rosca de corte e deslocamento de material, apresentam-se menores no caso do uso do rotor.

Um estudo amplo de um rotor de corte para revolvimento de resíduos orgânicos picados se faz necessário, sendo este o elemento principal de um misturador contínuo. Este trabalho inicia o referido estudo por um dos itens mais relevantes para o projeto de rotores trabalhando em resíduos orgânicos, que é justamente o deslocamento do material tanto dentro como fora das facas do rotor, ou seja, realiza o estudo referente à sua trajetória.

2. OBJETIVOS

a) Adaptação de um modelo matemático de trajetória de corpo livre de espalhador rotativo de material granular, para uso no equacionamento de um rotor lançador de resíduo orgânico picado, com diâmetro de 1,8 m e velocidade periférica de 5 m/s, dimensionado para leiras de 4 m de largura por 2 m de altura.

b) Verificação experimental do modelo teórico para facas planas radiais e inclinadas, através da construção de dispositivo de lançamento que permita medir as coordenadas das trajetórias e as distâncias de lançamento.

c) Recomendação para o projeto de um rotor lançador adequado ao uso com resíduo orgânico picado e avaliação qualitativa de desempenho de misturador de resíduos autopropelido, dimensionado com o modelo desenvolvido.

3 REVISÃO DE LITERATURA

PATTERSON & REECE (1962) estudaram a alimentação de partículas perto do centro de rotação de um disco montado com pás radiais e rotação no plano horizontal. Neste caso, não existe impacto na alimentação e a partícula desliza suavemente pelas pás do rotor. Dependendo da forma das partículas, dois tipos de movimento foram considerados. Partículas mais poligonais deslizam sobre a pá sem rolamento, com valor limite das forças de atrito. Partículas mais arredondadas, rolam em vez de deslizar, as forças de atrito são menores, suficientes para provocar o rolamento. Pela geometria específica dos resíduos orgânicos, espera-se que apenas deslizem sobre a faca.

Além da forma da partícula, os autores também concluem que outros fatores, tais como atrito das partículas com o disco e com as pás têm efeito significativo na alteração da trajetória.

A determinação experimental do ângulo de saída do material com a faca foi medida através de fotografia de exposição longa e a velocidade tangencial da faca foi determinada pela medição da rotação do disco e do raio externo da faca. Usando relacionamentos geométricos entre

o ângulo de saída do material, a velocidade tangencial da faca e a velocidade radial do material, foi possível obter a velocidade de saída do mesmo.

Os autores mostram que existem limites máximo e mínimo de ângulo de saída do material com relação à direção da faca. Partículas que rolam deixam o disco com velocidade e ângulo máximo, enquanto partículas que apenas deslizam deixam o disco com o ângulo e velocidade mínimas.

INNS & REECE (1962) estudaram o movimento de partículas esféricas alimentadas verticalmente em um disco horizontal montado com facas retas e radiais. Foi realizada a alimentação do material longe do centro do disco. Utilizaram-se esferas de aço. Os ângulos de saída foram medidos diretamente através de fotografia com tempo de exposição longo e no período noturno, para evitar efeitos indesejáveis de iluminação.

Foi obtida boa correlação da teoria com os dados experimentais no caso de partículas esféricas, mas com dificuldades para partículas de formato irregular. Após o impacto na alimentação, as partículas assumem uma direção de saída randômica.

No caso estudado, com esferas de aço, o coeficiente de restituição de velocidade entre material e a faca do rotor apresenta valor considerável. No caso de resíduos orgânicos picados, o coeficiente de restituição deverá ser desprezível, esperando-se, portanto, que o deslocamento do material acompanhe o perfil da faca.

BILANSKI et alli (1962) desenvolveram um método preciso para determinação da velocidade terminal para sementes em queda livre, em ar parado. O número de Reynolds para esse tipo de partícula foi determinado baseado na maneira em que as sementes caem. Com a medição da área frontal da partícula e a determinação prévia da velocidade terminal, o coeficiente de arrasto foi calculado. As dimensões principais, a velocidade terminal, o coeficiente de arrasto para algumas sementes e uma esfera de plástico de 3/8" de diâmetro usada como referência foram apresentados.

O coeficiente de arrasto da partícula está estritamente relacionado com as dimensões usadas para calcular a área frontal. Os autores afirmam que vários pesquisadores tem utilizado a área equivalente de uma elipse calculada com o maior e menor eixo das duas maiores dimensões da partícula. O número de Reynolds da partícula de forma irregular é incerto, porém, foi obtido utilizando-se a maior dimensão da seção transversal da partícula.

Existe dificuldade de utilização do método, embora ele seja preciso, para medição de partículas em batelada. Os autores sugerem o uso de um túnel de vento vertical com turbulência controlada e que não irá restringir as medições com partículas individuais.

MENNEL & REECE (1963) trabalharam com trajetórias de partículas de fertilizantes lançadas no ar por

distribuidores centrífugos. O fluxo de ar em torno dessas partículas é normalmente turbulento.

Foi apresentado o relacionamento do coeficiente de arrasto para partículas esféricas e irregulares com o número de Reynolds.

Devido à dificuldade de resolução das equações diferenciais de equilíbrio da partícula juntamente com as forças de arrasto, um caminho adimensional foi proposto.

Com partículas irregulares, foi utilizada uma aproximação grosseira, onde o coeficiente de arrasto foi considerado igual a 1,2 e o diâmetro equivalente da partícula tomado da malha da peneira por onde ela passou.

Como o material apresentava variações na granulometria, tornou-se necessário separar o material pelo tamanho das partículas e cada faixa de diâmetro foi tratada independentemente. O efeito de cada faixa granulométrica deve ser sobreposto para se obter o efeito global.

Partículas finas, com diâmetros menores que 0,127 mm, estarão em regime de transição e apresentam um problema diferente e mais difícil de ser resolvido.

CUNNINGHAM (1963) realizou estudos do modelo de distribuição de três diferentes tipos de distribuidores centrífugos horizontais, usados com fertilizantes granulares. Foram analisados os tipos de alimentação e a variação da taxa de alimentação em relação à velocidade de avanço do caminhão. A resolução da equação diferencial de

movimento para facas retas inclinadas para frente forneceu a equação da velocidade da partícula relativa à lâmina em função do ângulo de rotação e a equação que relaciona o raio externo e o ângulo da partícula na ponta da faca com respeito ao raio. Também foram usadas essas equações para facas inclinadas para trás, mediante simples considerações de sinais.

Os coeficientes de arrasto das partículas dados para as velocidades e condições de fluxo envolvidas em distribuição de fertilizantes granulares foram essencialmente constantes, o que indica que a resistência do ar varia com o quadrado da velocidade. Existe a influência do número de Reynolds no coeficiente de arrasto.

Soluções aproximadas que regem o fenômeno das partículas na faca podem ser obtidas negligenciando-se o atrito entre a faca e o fertilizante. Assim, as equações conduzem a um modelo simplificado e conveniente para soluções rápidas de seno ou cosseno hiperbólico.

Fatores significativos, tais como tamanho de partículas, densidade e fatores de forma afetam consideravelmente o perfil de distribuição das partículas. As equações de trajetória completam um método racional do estudo de distribuição das partículas. Os coeficientes de variação foram calculados para cada perfil de distribuição das partículas.

Através de técnicas de fotografias de alta velocidade, foi verificada a aplicabilidade do modelo desenvolvido.

KIKER & ROSS (1966) fizeram uma análise teórica e prática do fluxo de partículas em queda livre dentro de um duto vertical. Os coeficientes de arrasto, neste caso, são diferentes daqueles obtidos para uma massa grande de ar parado pois, no duto, onde ocorre o deslocamento da massa de ar em regime turbulento, o coeficiente de arrasto depende da intensidade de turbulência relativa à superfície da partícula.

O atrito das partículas no duto e entre elas próprias pode ser desprezado. Valores de coeficiente de arrasto para partículas isoladas, caindo em ar parado, não podem ser usados na equação de movimento. No duto existe um número grande de partículas caindo em um volume confinado de ar, que se move em regime turbulento. Estas condições levam o coeficiente de arrasto a variar com ambos, o número de Reynolds da partícula e o grau de turbulência.

CUNNINGHAM & CHAO (1967) estudaram a distribuição de fertilizantes em distribuidores centrífugos horizontais de facas radiais e inclinadas. A direção da velocidade de saída dos fertilizantes granulares foi influenciada pela inclinação das facas. O coeficiente de atrito dinâmico do fertilizante com a lâmina teve um efeito significativo no movimento do fertilizante para todas as condições estudadas. As investigações mostraram correlações satisfatórias entre os resultados obtidos e a teoria proposta.

Os autores citam que os desenvolvimentos de RANEY apud

RICHEY (1961) para rotores elevadores de forragem podem ser aplicados para máquinas centrífugas e formam o rudimento da teoria desenvolvida por outros para distribuidores centrífugos.

Um computador analógico foi utilizado para realizar uma investigação teórica do desempenho de um perfil especial de faca composta, projetada para reduzir o efeito de impacto entre o fertilizante e a faca. Duas equações teóricas, relacionadas ao perfil de cada parte da faca, foram alimentadas e selecionadas eletronicamente para serem utilizadas dependendo da posição em que a partícula se encontra na faca.

REINTS JR & YOERGER (1967) analisaram as equações de trajetória de corpo livre baseadas nas leis de equilíbrio, que foram desenvolvidas para uma partícula esférica com deslocamento relativo a um meio parado. Foi considerado um coeficiente de arrasto variando em função do número de Reynolds. Realizou-se o ajuste de uma curva exponencial para reproduzir matematicamente a curva de coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds. Equações diferenciais foram resolvidas por computador analógico. Foram obtidas as trajetórias das partículas, as curvas de variação da velocidade da partícula e do coeficiente de arrasto ao longo da trajetória, válidas para esferas, sementes e fertilizantes granulares.

O coeficiente de arrasto varia para números de Reynolds baixos e é razoavelmente constante para números

mais altos. A verificação experimental mostrou desvios das médias dentro de 10 % com a teoria. Porém, partículas menos esféricas, cristais com cantos não arredondados, mostraram pouca correlação com o número de Reynolds, já que ficaram com desvios em torno de 40 % .

A análise do coeficiente de arrasto não considerou o efeito de várias partículas em movimento ao mesmo tempo, como acontece no caso prático, podendo alterá-lo.

Verificou-se que existe um ângulo de alcance máximo diferente de 45 graus, entre 30 e 45 graus, devido ao efeito da resistência do ar. As equações utilizadas eram válidas para partículas próximas a esferas, como soja e fertilizantes granulares.

REED & WACKER (1970) avaliaram o perfil de distribuição de distribuidores de fertilizantes de dois discos, convencionais. As medidas foram realizadas com o trator, os distribuidores estacionários e o conjunto de bandejas com receptores móveis tracionados por um guincho elétrico. O perfil de distribuição e coeficientes de variação foram obtidos experimentalmente. Ocorreu pouco erro medindo-se o volume de cada bandeja e usando-se a densidade aparente em vez de se realizar a pesagem, que é mais trabalhosa.

DAVIS & RICE (1974) realizaram a simulação de um distribuidor centrífugo para distribuição de fertilizantes usando a linguagem de simulação matemática CSMP. As

equações de descrição dos fenômenos foram obtidas de outros trabalhos e resolvidas através da linguagem de simulação contínua. Essa linguagem possui rotinas próprias de integração e recursos de FORTRAN.

Alguns valores de coeficiente de resistência foram medidos experimentalmente. Os distribuidores centrífugos puderam ser razoavelmente simulados através do uso dos conceitos teóricos e das características aerodinâmicas determinadas experimentalmente.

BRINSFIELD & HUMMEL (1978) preocupados com a uniformidade de distribuição de fertilizantes lançados por distribuidores centrífugos horizontais, propuseram uma nova configuração de distribuidor horizontal que pudesse reduzir ou eliminar o impacto da partícula com a faca.

Equações matemáticas foram escritas para as partículas nos distribuidores centrífugos. Um computador analógico digital foi usado para resolver as equações. Os resultados indicam que ele pode ser usado para resolver equações em perfis de facas complexos. Um programa de computador foi escrito para se obter um perfil otimizado das facas.

A análise teórica indica que, se o coeficiente de atrito entre partícula e faca aumenta, a velocidade resultante diminui e o ângulo da partícula, desde a alimentação até sua liberação do rotor, aumenta. Medidas de velocidade da partícula e ângulo de saída foram feitas usando-se uma câmera de alta velocidade Fastax WF4.

BRAUNBECK & DALCOLMO (1981) determinaram experimentalmente os coeficientes de atrito interno e sobre superfícies para torta de filtro. As medidas foram realizadas através de um dispositivo acoplado ao equipamento de medição Instron Universal.

Foram determinados os coeficientes de atrito estático, cinético e interno. Foram relacionados os coeficientes de atrito da torta sobre superfícies de madeira, chapa galvanizada e chapa pintada, com variações de carga normal e de umidade da torta.

As cargas normais variaram de 10 a 90 g/cm², a umidade de 75,85 até 21,60 % e a velocidade utilizada para a determinação do atrito cinético foi de 20 cm/min.

GALILI E SHTEINGAUZ (1982) desenvolveram um modelo matemático geral para a simulação do movimento de partículas em um distribuidor centrífugo. Surgiu a necessidade de se estudar a distribuição de materiais granulares devido à baixa uniformidade de distribuição obtida com distribuidores centrífugos convencionais do tipo horizontal. Foi estudado o comportamento do material em contato com a faca e sua trajetória no ar. A validade do modelo foi verificada experimentalmente. O modelo foi usado para o projeto de um distribuidor de fertilizantes granulares do tipo vertical.

No distribuidor do tipo vertical, que é mais recente, as facas giram em um plano vertical e o material adquire componentes vertical e horizontal de velocidade. Para

fertilizantes granulares, obtém-se um perfil de distribuição com maior alcance e uniformidade.

Este modelo físico-matemático, usado para o distribuidor vertical, pode ser adotado para o rotor distribuidor de resíduos orgânicos a partir do momento em que o material já estiver alimentado e em contato com a faca. A parte da trajetória no espaço leva em consideração a divisão granulométrica do material e o formato específico das partículas.

Foi verificado o comportamento para facas retas, circulares e espirais. Um programa de computação, através de resoluções numéricas das equações, foi feito para simular todo o sistema. Os dados de velocidade e ângulo de saída do material da faca foram usados como dados de entrada para o cálculo da trajetória no espaço. Foi assumido que a força de arrasto das partículas em ar parado é proporcional ao quadrado da velocidade.

PIIT et alli (1982) analisaram o perfil de espalhamento de fertilizantes granulares produzidos por distribuidores centrífugos. Uma simulação estatística foi realizada para investigar o efeito da variabilidade do tamanho do fertilizante na composição do perfil de material arremessado no solo.

Equações aproximadas das trajetórias de partículas de fertilizante no espaço foram desenvolvidas e comparadas com as soluções numéricas de equações reportadas por MENNEL & REECE (1963), apresentando desvio menor que 7 %.

A simulação mostrou que a variabilidade do tamanho da partícula apresentava pouco efeito na forma do perfil do material disposto no solo, embora o tamanho médio da partícula fosse importante.

PONCE et alli (1983) estudaram amostras de bagaço de cana, visando obter dados de velocidades terminais, tempos de residência em correntes de ar, taxas de combustão e secagem, classificação pneumática, eficiência de ciclone e outras variáveis.

Nove amostras de 20 kg de bagaço inteiro de cana, obtidas de uma usina cubana, foram secas ao ar até atingir a umidade de equilíbrio (8 a 12 %) e classificadas em peneira vibratória de malha de 22,4 mm até 0,354 mm. Toda amostra retida pela peneira de 0,841 mm ou maiores foram quarteadas repetidamente para posterior sub-classificação manual. Cerca de 29 % do total de partículas, menores que 1 mm, não foram classificadas. A moenda da usina produzia partículas muito grandes em comparação com as condições brasileiras.

As partículas de bagaço puderam ser claramente identificadas como tendo forma prismática, retangular e com faces planas e paralelas.

As amostras foram sub-classificadas manualmente, distinguindo-se as partículas com alta relação entre o comprimento e a largura das com baixa relação.

As três dimensões lineares básicas foram medidas e obtidas juntamente com o desvio padrão, volume, área da

superfície, diâmetro equivalente, fator de forma e densidade das partículas. Os dados obtidos podem ser usados para projeto em transporte e classificação pneumáticos.

NEBRA (1985) utilizou-se de um capítulo do trabalho de tese para se referir à caracterização das propriedades geométricas das partículas de bagaço e à determinação da velocidade terminal e do coeficiente de arrasto.

Foi realizado um estudo experimental de tamanhos e formas das partículas de bagaço, assim como a determinação do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds. À propriedade determinada, relacionou-se o fenômeno físico correspondente. No caso da determinação do coeficiente de arrasto, a característica mais importante é a área projetada da partícula, perpendicular à corrente de ar principal.

Para que fosse possível peneirar a amostra inicial, a mesma foi seca e quarteada várias vezes. Por observação visual, pôde-se diferenciar o material em partículas tipo fibras e medula, e então foi realizado um estudo separado entre as tipo fibras e as tipo pó. O critério adotado de classificação das partículas de forma visual e com microscópio apresentou dificuldades para uma classificação precisa, principalmente para partículas pequenas e de baixa relação entre o comprimento e a largura. Partículas tipo fibras apresentavam efetivamente relação entre comprimento e largura, menor que 3:1 para malhas de

peneiras maiores; para malhas finas, relação de 6:1, com segurança na medição. Devido ao número de medições e à forma de classificação, as dimensões médias obtidas foram consideradas representativas e não médias estatísticas.

O artigo INDUSTRIAL cinematography... (1988) expõe as vantagens da filmagem de máquinas ou processos e posterior análise. Algumas vezes, a melhor forma de se analisar os problemas é através de filmagem em velocidade normal e realização da exibição do filme em velocidades bem mais baixas. Filmagens de alta velocidade fornecem uma visão dinâmica do fenômeno.

Pode-se usar filmadoras fotográficas de quadros de alta velocidade, desde 100 a 10.000 quadros por segundo. As imagens podem ser vistas a 1/400 vezes da velocidade de gravação. Porém, os quadros precisam ser processados posteriormente. Um novo sistema de vídeo, utilizando fitas de alta densidade magnética, pode gravar até 1.000 quadros por segundo, enquanto os convencionais estão em torno de 30. Porém, o custo desse equipamento e da fita é elevado, em contraste com o custo do sistema fotográfico.

4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 ALIMENTAÇÃO DO MATERIAL NA FACA

A alimentação de material para dentro das facas ocorre durante o percurso das mesmas entre a posição inferior, próxima ao solo, e a carenagem, conforme figura 4.1.

Existe o efeito do coeficiente de restituição do material, que choca-se com a faca ao ser cortado e alimentado. Este valor é baixo, menor que 0,1, segundo determinações preliminares (item 5.2.4). O tempo de permanência dentro da faca deve ser suficiente para evitar que ocorram afastamentos do material de sua superfície até o ponto de descarga. Para efeito de trajetória, considerou-se, portanto, o material em contato com a faca.

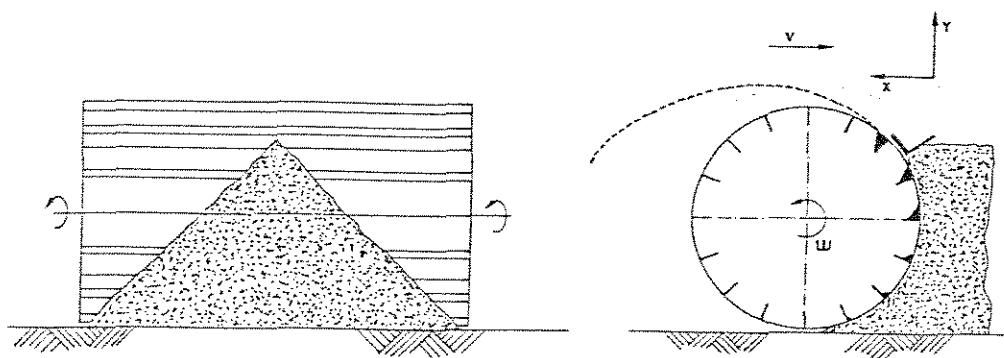


FIGURA 4.1 - Rotor operando em resíduo orgânico.

4.2 MATERIAL EM CONTATO COM A FACA

As equações 4.1, que regem o movimento do material em contato com a faca do rotor, foram baseadas na segunda lei de Newton. Para facilidade de estudo, foi utilizado um sistema de coordenadas girante com a faca, conforme figura 4.2.

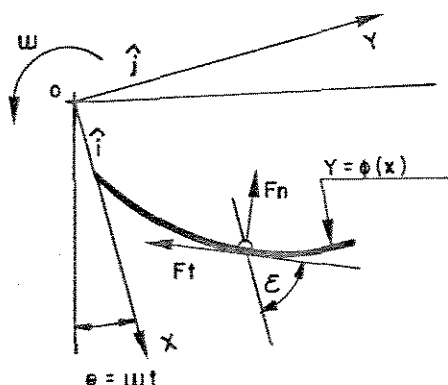


FIGURA 4.2 - Movimento da partícula sobre a faca, sistema de coordenadas retangular, GALILI & SHTEINGAUZ (1982).

$$\begin{cases} m(\ddot{x} - 2\omega\dot{y} - \omega^2x) = -F_n \sin \epsilon - F_t \cos \epsilon & 4.1.a \\ m(\ddot{y} + 2\omega\dot{x} - \omega^2y) = F_n \cos \epsilon - F_t \sin \epsilon & 4.1.b \end{cases}$$

onde:

m - massa da partícula;

F_n - força normal exercida na partícula pela faca;

F_t - Força tangencial exercida na partícula pela faca;

ϵ - ângulo entre a tangente à faca e o eixo x .

Dividindo-se a equação 4.1.a pela 4.1.b e utilizando-se as equações 4.2 e 4.3,

$$F_t = \mu F_n \quad 4.2$$

$$y = \phi(x)$$

4.3

onde:

μ - coeficiente de atrito entre partícula e faca;

y - perfil da faca;

e usando as equações 4.4 a 4.9,

$$\theta = \omega t$$

4.4

$$\tan \epsilon = \frac{dy}{dx}$$

4.5

$$\dot{x} = \omega \frac{dx}{d\theta}$$

4.6

$$\ddot{x} = \omega^2 \frac{d^2x}{d\theta^2}$$

4.7

$$\dot{y} = \omega \left[\left(\frac{dy}{dx} \right) \left(\frac{dx}{d\theta} \right) \right]$$

4.8

$$\ddot{y} = \omega^2 \left[\frac{d^2y}{dx^2} \left(\frac{dx}{d\theta} \right)^2 + \frac{dy}{dx} \frac{d^2x}{d\theta^2} \right]$$

4.9

atinge-se o equacionamento geral, equação 4.10:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2x}{d\theta^2} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] + \left(\frac{dx}{d\theta} \right)^2 \frac{d^2y}{dx^2} \left[\mu + \frac{dy}{dx} \right] \\ & + 2 \mu \frac{dx}{d\theta} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] + x \left[\mu \frac{dy}{dx} - 1 \right] \\ & - y \left[\mu + \frac{dy}{dx} \right] = 0 \end{aligned}$$

4.10

onde:

θ - ângulo de rotação do impulsor;

ω - velocidade angular constante.

Esta equação pode ser resolvida numericamente ou

analiticamente quando a forma da faca $y = \phi(x)$ e as condições iniciais, equações 4.11 e 4.12, são conhecidas.

$$x_i = R_i \quad 4.11$$

$$\frac{dx}{d\theta_i} = 0 \quad 4.12$$

para:

$$|\alpha_i| < \alpha_f$$

$$\alpha_f = \tan^{-1} \mu$$

$$v = \omega R_i$$

onde:

R_i - raio inicial do material;

α_i - ângulo entre o vetor v e a força normal à faca;

α_f - ângulo de atrito.

Foi assumido que ocorre impacto plástico na alimentação e o ângulo máximo da faca é igual a α_f . O coeficiente de restituição do choque do material na faca é desprezível.

4.2.1 FACAS RETAS RADIAIS E INCLINADAS

Para o caso de faca inclinada, conforme figura 4.3, $y = \phi(x) = kx - b$, onde k e b são constantes.

Substituindo-se a relação acima e as condições iniciais, equações 4.11 e 4.12, na equação 4.10, obtemos:

$$\frac{d^2x}{d\theta^2} + 2\mu \frac{dx}{d\theta} - x = \frac{-b(k + \mu)}{(k^2 + 1)} \quad 4.13$$

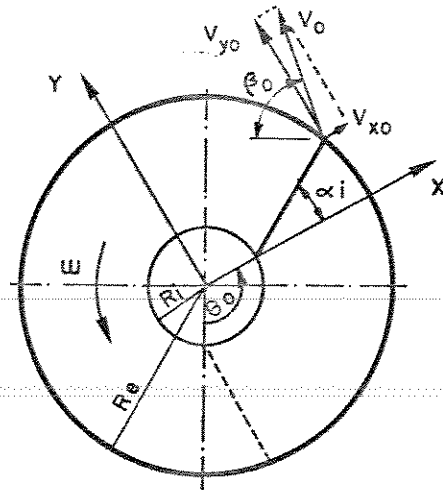


FIGURA 4.3 - Movimento da partícula em face reta inclinada, GALILI & SHTEINGAUZ (1982).

A solução geral dessa equação é dada por:

$$x = B_1 e^{\lambda_1 \theta} + B_2 e^{\lambda_2 \theta} + \frac{b(k + \mu)}{(k^2 + 1)} \quad 4.14$$

onde:

$$\lambda_1 = -\mu + \sqrt{1 + \mu^2} \quad 4.15$$

$$\lambda_2 = -\mu - \sqrt{1 + \mu^2} \quad 4.16$$

$$B_1 = \frac{\left[\left(\frac{dx}{d\theta_1} \right) - R_1 \lambda_2 \frac{1 - \mu k}{k^2 + 1} \right]}{2 \sqrt{1 + \mu^2}} \quad 4.17$$

$$B_2 = \frac{\left[\left(\frac{dx}{d\theta_1} \right) - B_1 \lambda_1 \right]}{\lambda_2} \quad 4.18$$

para:

$$\left[\frac{dx}{d\theta_1} \right] = 0,$$

$x_1 = R_1$, (condições iniciais).

Transformando-se de acordo com as equações apresentadas de 4.6 a 4.9, obtemos os valores das componentes de velocidade da partícula V_{xo} e V_{yo} , a seguir:

$$\begin{cases} V_{xo} = \omega \left[\left[\frac{dx}{d\theta} \right]_o - y_o \right] \\ V_{yo} = \omega \left[\left[\frac{dy}{d\theta} \right]_o + x_o \right] \end{cases} \quad 4.19$$

onde:

V_{xo} = velocidade de saída em relação ao eixo de coordenadas girante x;

V_{yo} = velocidade de saída em relação ao eixo de coordenadas girante y;

e,

$$\beta_o = -\pi - \theta_o - \tan^{-1} \left[\frac{V_{yo}}{V_{xo}} \right] \quad 4.20$$

onde V_{xo} e V_{yo} são obtidos com a ajuda das seguintes expressões:

$$x_o = B_1 e^{\lambda_1 \theta_o} + B_2 e^{\lambda_2 \theta_o} + \frac{b(k + \mu)}{(k^2 + 1)} \quad 4.21$$

$$\left[\frac{dx_o}{d\theta_o} \right]_o = B_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 \theta_o} + B_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 \theta_o} \quad 4.22$$

$$y_o = k x_o - b \quad 4.23$$

$$\left[\frac{dy}{d\theta} \right]_0 = k \left[\frac{dx}{d\theta} \right]_0 \quad 4.24$$

onde:

θ_0 - ângulo total de rotação da faca.

Para faca reta e radial, $k = b = 0$.

4.3 TRAJETÓRIA DO MATERIAL NO AR

A trajetória de corpo livre do material é calculada tomando-se como condições iniciais o ângulo de saída β_0 com a horizontal e as componentes da velocidade de saída do material da faca V_{x0} e V_{y0} , formuladas no item anterior. O ângulo θ_0 , rodado até o ponto de saída do material, também é usado para localizar a faca e a partícula num mesmo sistema fixo de coordenadas cartesianas no momento de saída da partícula da faca.

As equações clássicas de movimento de uma partícula, considerando-se a força da gravidade e a resistência do ar, equação 4.25, são apresentadas a seguir, conforme figura 4.4.

$$\begin{cases} -F \cos \beta = m \ddot{x} \\ -m g - F \sin \beta = m \ddot{y} \end{cases} \quad 4.25$$

A força de arrasto F , é uma função da velocidade relativa da partícula com o ar, descrita pela equação:

$$F = \frac{1}{2} C \rho A V^2 \quad 4.26$$

onde:

C - coeficiente de arrasto;

ρ - densidade do ar (pressão e temperatura);

A - área frontal da partícula;

V - velocidade relativa da partícula com o ar.

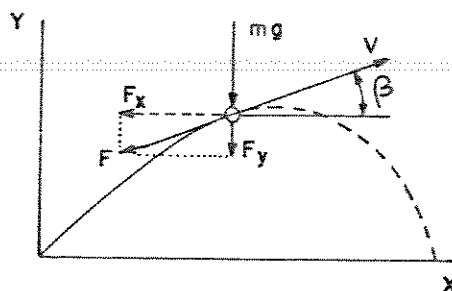


FIGURA 4.4 - Diagrama de corpo livre de partícula em queda livre, influenciada pela gravidade e a resistência do ar, REINTS & YOERGER (1967).

A área frontal da partícula precisa ser definida através de uma metodologia específica. Tem sido adotada a área frontal calculada através das maiores dimensões das partículas pela aproximação elipsoidal. Assim,

$$A = \frac{\pi}{4} l_1 l_2 \quad 4.27$$

onde:

l_1 e l_2 - são as duas dimensões máximas da partícula, BILANSKI (1962).

Os valores de C dependem do fluxo de ar em torno da partícula. A natureza desse fluxo (laminar, transição ou turbulento) e a relação das forças de arrasto resultantes da inércia e viscosidade do fluido são descritas pelo número de Reynolds, dado por:

$$Rey = \frac{D V}{\nu}$$

4.28

onde:

D - diâmetro para partícula esférica; pode ser tomado como a maior dimensão quando a partícula é de forma irregular;

V - velocidade relativa da partícula com o ar;

ν - viscosidade cinemática do ar.

A relação entre o coeficiente de arrasto e o número de Reynolds para uma partícula esférica ou irregular, na faixa de Rey provável de ser encontrada na trajetória de fertilizantes no ar, é mostrada na figura 4.5.

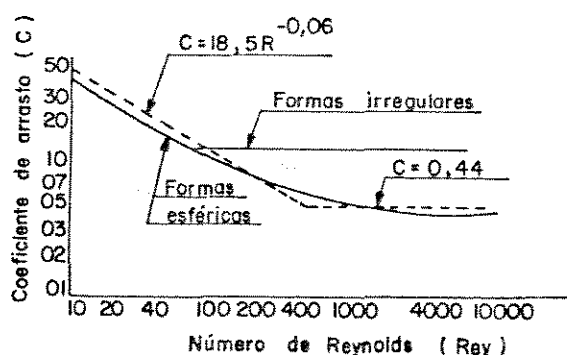


FIGURA 4.5 - Coeficientes de arrasto para partículas esféricas e de forma irregular, MENNEL & REECE (1963).

A relação entre C e Rey pode ser obtida para resíduos orgânicos picados se a sua textura for conhecida. Devem ser encontrados resultados semelhantes aos de fertilizantes, conforme figura 4.5, onde o C e o Rey podem ser relacionados por uma única equação ou por outra, onde os valores de C permanecem constantes numa faixa de Rey e na outra variam na forma de uma função conhecida.

A solução analítica da equação 4.25 torna-se inviável

quando tratada junto à equação 4.26.

Uma solução numérica, utilizando-se o programa de análise dinâmica pela solução de equações diferenciais CONTINUOUS system modeling program... (1983), torna-se bastante conveniente.

As relações auxiliares apresentadas a seguir, 4.29 e 4.30, completam o conjunto de equações necessárias à resolução numérica das equações anteriores.

A velocidade pode ser expressa em termos de seus componentes:

$$V = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad 4.29$$

O seno e o cosseno de β podem ser escritos em termos dos componentes de velocidade:

$$\begin{cases} \text{sen } \beta = \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \\ \text{cos } \beta = \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \end{cases} \quad 4.30$$

A velocidade da partícula e as coordenadas espaciais podem então ser obtidas e plotadas para análise.

Devido à variação da granulometria dos resíduos orgânicos, torna-se necessário que se obtenha uma classificação do material por faixas de tamanho e suas respectivas propriedades físicas. Cada faixa de tamanho é resolvida através das equações anteriores, independentemente. Com a superposição dos resultados de cada faixa, chegamos à resolução completa do sistema.

4.3.1 RELAÇÃO ENTRE COEFICIENTE DE ARRASTO E NÚMERO DE REYNOLDS

O coeficiente de arrasto C é determinado experimentalmente em função do número de Reynolds em um fluido infinito e sem circulação.

As forças de atrito na partícula são de dois tipos. Para números de Reynolds baixos, a inércia do ar deslocado é negligenciável e o arrasto é devido somente ao cisalhamento viscoso. A força de arrasto é proporcional à velocidade.

Para números de Reynolds altos, o arrasto resulta da formação de turbulência. Enquanto a viscosidade do ar eventualmente absorve a energia dessas turbulências, seu efeito direto sobre o arrasto da partícula é negligenciável. A força de arrasto é proporcional ao quadrado da velocidade relativa, o que implica em um C constante.

Com o tabelamento dos valores de C e Re correspondentes, obtidos experimentalmente, pode-se ajustar uma curva para o coeficiente de arrasto C da forma a seguir:

$$C = e^{(a \ln b V - c)^d - f} \quad 4.31$$

para:

$$b = \frac{D}{\nu};$$

onde:

a, b, c, d, f - constantes.

A determinação das constantes a, b, c, d, f para o

material lançado define uma equação para uma ampla faixa de Reynolds da curva do coeficiente de arrasto C , REINTS & YOERGER (1967). Para lançadores centrífugos trabalhando com sementes e fertilizantes granulares, o Rey está na faixa de 100 a 15.000.

Valores de C aproximadamente constantes podem também ser utilizados para cada faixa de interesse do Rey. Partículas esféricas e elipsoidais em regime turbulento, com Rey na faixa de 500 a 400.000, produzem C iguais a 0,44 e 0,40, respectivamente, GALILI & SHTEINGAUZ (1982). Em regime laminar, com valores de Rey < 1 , embora de pouco interesse para a aplicação agrícola deste trabalho, pode-se adotar $C = \frac{24}{\text{Rey}}$. Em regime de transição, pode-se adotar $C = 18,5 \text{ Rey}^{-0,6}$, MENNEL & REECE (1963).

4.3.2 MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ARRASTO

Através da trajetória em queda livre de uma partícula no ar parado, é possível determinar o valor de C através da curva de deslocamento e da velocidade terminal.

Segundo BILANSKI et alii (1962), através da equação de equilíbrio, temos:

$$m \ddot{x} + K \dot{x}^2 - m g = 0 \quad 4.32$$

comparando-se a força de arrasto, $K \dot{x}^2$ nesta expressão, com a equação 4.26, obtemos:

$$K = \frac{1}{2} C A \rho \quad 4.33$$

K é constante se a área frontal e o coeficiente de

arrasto permanecerem constantes. Se a velocidade inicial é considerada nula para $x=0$ e $t=0$, então a integração da equação 4.32 produz:

$$x = \left[\frac{v_t^2}{g} \right] \ln \cosh \left[\frac{g}{v_t} \right] t \quad 4.34$$

que contém uma simples constante arbitrária, a velocidade terminal V_t . Por substituição, o valor de V_t é:

$$V_t = \left[\frac{2 m g}{C A \rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad 4.35$$

Assim, o valor do coeficiente de arrasto pode ser calculado da velocidade terminal se a área frontal é conhecida.

Pode-se determinar a velocidade terminal em um túnel de vento vertical e usá-la na equação anterior.

4.3.3 TRAJETÓRIA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE ARRASTO

A constante de arrasto K pode ser calculada diretamente do valor da velocidade terminal quando a granulometria e a área das partículas não são conhecidas.

Através da equação 4.32, quando a velocidade x atinge o valor de V_t , a aceleração $\dot{x}$ é nula e o valor de K pode ser calculado conforme a equação 4.36.

$$K = \frac{m g}{V_t^2} \quad 4.36$$

A força de arrasto F é calculada da seguinte maneira:

$$F = \frac{m g}{V_t^2} x^2 \quad 4.37$$

A substituição de F na equação 4.25, com a utilização das componentes de velocidade descritas na equação 4.30, produz a equação final de resolução da trajetória no ar, equação 4.38.

$$\begin{cases} \ddot{x} = - \left(\frac{g}{v_t^2} \right) \dot{x} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \\ \ddot{y} = - \left(\frac{g}{v_t^2} \right) \dot{y} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} - g \end{cases} \quad 4.38$$

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 MATERIAL

A fase experimental e o processamento de dados da pesquisa foram realizados utilizando o material relacionado a seguir:

5.1.1 TORTA DE FILTRO ROTATIVO OLIVER

Torta fresca, 50 kg acondicionados em um saco plástico, provenientes da Usina São Martinho de Pradópolis em 11/05/89, e 100 kg acondicionados em dois sacos plásticos, provenientes da Usina Modelo de Piracicaba em 30/05/89, com umidades iniciais de 76,63 % e 81,75 %, respectivamente.

Torta fresca, 15 m³ armazenados a céu aberto em leira de formato triangular de 4 m de largura por 2 m de altura, provenientes da Usina Modelo em 19/01/89.

A torta de filtro proveniente da Usina São Martinho foi utilizada integralmente em testes preliminares de ajuste e desenvolvimento do túnel vertical e do lançador de material.

5.1.2 LABORATÓRIO

O Laboratório Central de Análises da Copersucar realizou as análises de umidade da torta, com secagem das amostras à temperatura de 105 °C, durante 3 h, segundo norma da International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. A granulometria da torta foi obtida em um separador vibratório com peneiras ABNT EB-22 de malhas 14, 18, 20, 30, 45 e 60.

Balança semi-analítica Metler, modelo PE 3600, com escala de 0 a 3600 g e divisão de escala de 0,01 g; balança semi-analítica Metler, modelo PM 11, com escala de 0 a 11000 g e divisão de escala de 0,1 g.

Estufa com temperatura controlada a 70 °C, bandejas de alumínio e circulação interna de ar.

Barômetro de coluna de mercúrio Princo, com escala de 510 a 810 mmHg e termômetro para leitura de temperatura ambiente.

5.1.3 GRAVAÇÃO E REPRODUÇÃO GRÁFICA DE DADOS

Filmadora de vídeo Sharp, modelo VC-C20UA, portátil, sistema de cor NTSC, para formato de fita VHS, largura 12,7 mm e velocidade de gravação de 33,55 mm/s, iluminação mínima de 10 LUX, lentes F 1,2.

Quadro de referência de papel com dimensões de 1 x 1,25 m, estruturado com barras de alumínio, de cor branca, com linhas quadriculadas de cor preta, espaçadas de 50 mm e realce com marcas mais grossas a cada 5 linhas.

Gravador de fita de vídeo Panasonic, modelo PV-4700, com 4 cabeças magnéticas, congelamento de imagem e avanço

quadro a quadro.

Televisor colorido Telefunken, tela de 508 mm.

5.1.4 PROCESSADOR DE DADOS

Microcomputador Prológica, modelo Solution 16, capacidade de memória "RAM" de 512 kbytes, 16 bites, compatibilidade com PC da IBM.

Planilha eletrônica, SC4 da Computer Associates International, Inc, versão 1.10.

Pacote de análise de dados e ajuste de curvas, MSCHART da Microsoft Corporation, versão 3.0.

Pacote com linguagem de simulação contínua para resolução de equações diferenciais com saída gráfica, IBM system/370 vs-APL CSMP pgm.

Impressora Grafix modelo 80 F/T de 80 colunas.

5.1.5 TÚNEL VERTICAL

O túnel vertical foi desenvolvido utilizando-se os componentes relacionados a seguir, conforme figura 5.1:

SOPRADOR

Soprador de ar Ibram, modelo CR-8, pressão de 24,5 kPa, vazão de $2 \text{ m}^3/\text{min}$, potência de 5,5 kW, tensão de alimentação de 220 V, corrente de 21 A, trifásico.

ANEMÔMETRO

Anemômetro Dwyer Instruments Inc., modelo 400-1325, formado por um tubo de Pitot de 8 mm de diâmetro externo e um manômetro de óleo, de coluna inclinada, com escala de 0 a 1,18 kPa.

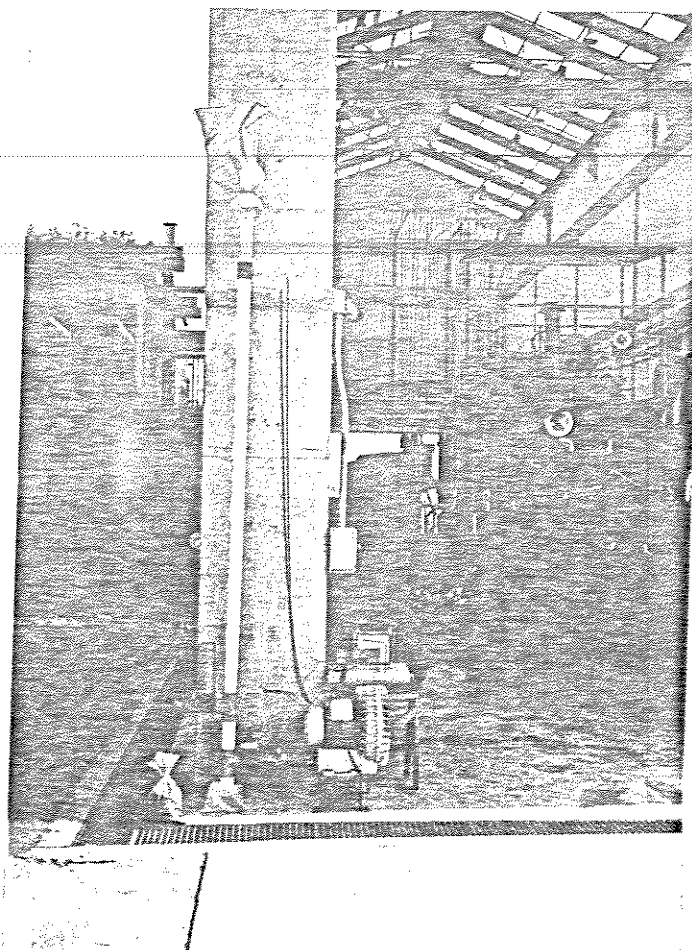


FIGURA 5.1 - Túnel vertical.

TERMÔMETRO

Termômetro digital portátil Brastermo, com haste de 6 mm de diâmetro externo, sensor de NiCr, escala de -70 a +199,9 °C, visor de 3 1/2 dígitos e precisão de 0,5 %.

ACESSÓRIOS

Tubulação de PVC de 71 mm de diâmetro interno.

Válvula de gaveta de 76 mm de diâmetro nominal, usada para ajuste da velocidade do ar.

Filtro de saída de ar, onde foi utilizado um saco de

tiras de plástico trançadas, do tipo normalmente usado para ensacamento de cereais.

Reservatório de coleta, constituído de um saco plástico impermeável e transparente com volume de 5 L.

Sacos plásticos de 1 e 5 L de volume, para acondicionamento de torta em estado original e torta classificada no túnel vertical.

Alimentador manual de material, formado por êmbolo de aço com manopla e reservatório com tampa, para admissão de torta de filtro.

O procedimento de desenvolvimento do túnel vertical é descrito a seguir:

Segundo o equacionamento teórico da trajetória de material granular no ar, REINTS & YOERGER (1967), equação 4.25, é necessário obter a força F de arrasto das partículas para que a equação diferencial possa ser resolvida numericamente.

Inicialmente, tentou-se obter a força de arrasto das partículas de torta, equação 4.26, através da determinação das suas dimensões externas máximas, usadas para o cálculo da área frontal, equação 4.27 e através da determinação do coeficiente de arrasto.

Segundo BILANSKI et alii (1962), pode-se calcular o valor do coeficiente de arrasto quando se conhece o valor da velocidade terminal das partículas, uma vez que sua área frontal seja conhecida.

Foi adotado procedimento similar ao utilizado por GALILI & SHTEINGAUZ (1982), ou seja, a determinação da

quantidade de material retido com relação à malha das peneiras utilizadas.

Amostras de torta de filtro fresca, com umidade de 76,63 %, não puderam ser classificadas nas peneiras devido à adesão entre partículas que resultaram em embuchamento das peneiras finas. Realizou-se a secagem do material para posterior classificação. A torta seca se aglutinou formando partículas maiores, alterando visivelmente sua textura original. A desintegração manual dos torrões alterou essa textura, transformando-a em partículas mais finas que a torta original, o que também não permitiu a utilização do processo. A tabela 5.1 mostra a textura fina da torta da Usina Modelo, que foi secada e destorroada manualmente.

Pode-se obter a força F de arrasto das partículas substituindo-se diretamente o valor da velocidade terminal nas equações de equilíbrio citadas.

Para a determinação experimental da velocidade terminal da torta, foram feitas tentativas preliminares de medições de trajetória da torta em queda livre.

Foram filmadas as trajetórias de queda de diversas quantidades de torta, 180, 360 e 540 cm³ depositadas sobre uma chapa de aço. A torta foi abandonada em queda livre com velocidade inicial nula na direção vertical pela raspagem de outra chapa, perpendicular à anterior. O painel quadriculado de referência usado no lançador de material foi colocado na vertical, atrás do plano de queda do material. A filmadora de vídeo gravou a queda.

TABELA 5.1 - Classificação granulométrica de torta seca a peso constante (Usina Modelo).

Peneira	Abertura	Retido
ABNT	(mm)	(%)
14	1,41	17,0
18	1,00	10,0
20	0,84	12,0
30	0,59	14,6
45	0,35	27,1
60	0,25	6,0
Fundo	-	13,3

Posteriormente, a fita foi reproduzida quadro a quadro, utilizando-se o recurso de congelamento de imagens do gravador de vídeo para que se anotassem as coordenadas verticais em relação ao quadro filmado, ou seja, em relação ao tempo de queda.

O método descrito anteriormente apresenta o inconveniente da filmadora poder gravar, com razoável nitidez, apenas imagens de materiais com velocidades menores que 5 m/s. Este fato limita a obtenção da velocidade terminal da torta, uma vez que ela pode ser superior a esse valor.

Em função das dificuldades observadas, optou-se pela construção de um túnel vertical, BILANSKI et alli (1962).

Para a determinação da velocidade terminal, algumas modificações foram feitas em relação ao modelo inicial, visando reduzir a temperatura do ar e para se obter suficiente material classificado, por faixas de velocidade terminal, para suprir as necessidades do lançador.

Uma abertura de ar foi colocada no sistema para que houvesse resfriamento do ar do soprador durante as leituras, sem precisar modificar o ajuste da válvula de controle de velocidade para realizar o abaixamento da temperatura. Tal fato era especialmente importante para baixas velocidades, onde a restrição da válvula de regulagem de velocidade era maior e a circulação de ar dentro do soprador era menor, gerando elevação da temperatura do ar da ordem de 10 °C.

5.1.6 LANÇADOR DE MATERIAL

O lançador foi desenvolvido utilizando-se os componentes relacionados a seguir, conforme figura 5.2:

Torno Nardini, modelo ND 250 BE, potência de 5,8 kW, tensão de alimentação de 220 V, corrente de 25 A, trifásico.

Faca de lançamento de torta construída com chapa de aço, largura de 210 mm e comprimento de 100 mm, montada com raio de cantoneiras de perfil laminado de 25,4 x 31 mm e ângulo regulável entre a faca e o raio através de parafuso e porca.

Carenagem externa móvel, de aço, com centro de giro no próprio centro de giro do torno.

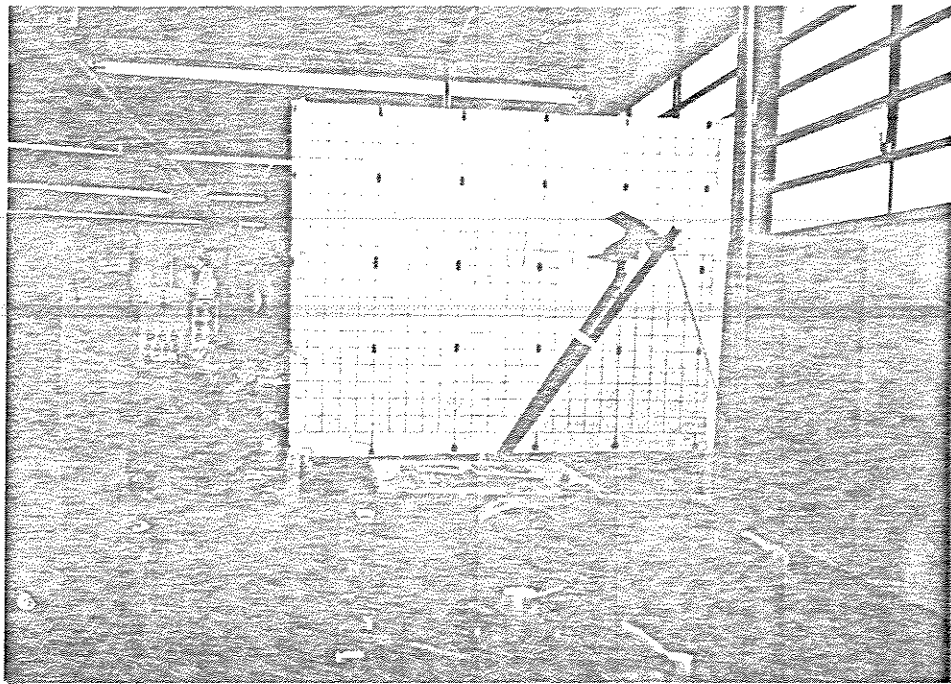


FIGURA 5.2 - Lançador de material.

Fita adesiva Scotch, 3M, largura de 19 mm, para união da faca de lançamento com a carenagem externa móvel.

O procedimento de desenvolvimento do lançador de material é descrito a seguir:

Inicialmente, a faca permanecia parada, com seu braço de sustentação formando ângulo acima da horizontal de cerca de 30° (menor que o ângulo de repouso da torta) para que o material pudesse ser alimentado sem desmoronar. A seguir, o torno era ligado e a trajetória da torta lançada no ar, filmada. O sistema apresentava, conforme esperado, variações de trajetória para diferentes ângulos de faca.

Porém, o sistema partia do repouso, sendo necessário pelo menos $1/8$ de volta para atingir velocidade angular constante.

Com carenagem externa móvel, pode-se alimentar o material dentro da faca, com o seu braço posicionado a 60° abaixo da horizontal, sem ocorrer vazamento de material até a posição de lançamento, conforme figura 5.2. Isto proporciona tempo de aceleração suficiente para a faca atingir velocidade angular constante antes do lançamento.

A fita adesiva, utilizada como elemento para deslocar a carenagem junto com a faca até o ponto de lançamento, foi ajustada em diversos raios. Foi selecionado o raio em que a faca conseguia arrastar a carenagem sem se romper e, ao mesmo tempo, oferecia a menor resistência possível para ser rompida na posição de lançamento.

O lançador de material possuía o tubo central de transmissão de torque, do torno até o braço radial de sustentação da faca, construído em tubo de aço de 31 mm de diâmetro externo e parede fina. Esse elemento foi trocado por um elemento de aço maciço para evitar vibrações torcionais observadas durante o lançamento.

5.1.7 MÓDULO DE CAMPO

Foi desenvolvido utilizando-se os componentes relacionados a seguir, conforme figura 5.3.

ROTOR

Rotor constituído por 16 facas retas, planas, radiais, com raio externo de 0,9 m, comprimento de 0,12 m e largura de 1,325 m. Suportado por uma estrutura acoplada a uma colhedora de cana-de-açúcar, modelo MF 201, ano de fabricação 1974. O acionamento do rotor foi realizado por

dois motores hidráulicos TRW, modelo MAB 24, alimentados pela bomba de engrenagens Vickers da colhedora, e transmissão de corrente com relação de transmissão de 1,76:1.

CARENAGEM

Construiu-se uma carenagem em chapa de aço faceando a

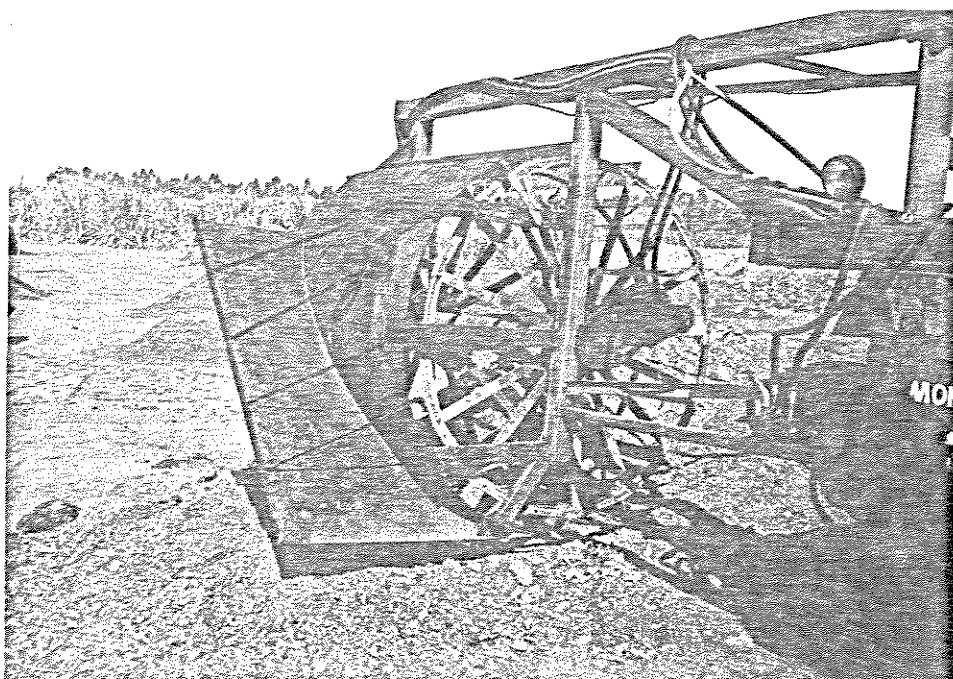


FIGURA 5.3 - Módulo de campo.

ponta das facas do rotor. O fim da carenagem determinava a posição do início do movimento relativo entre a torta e a faca, ou seja, o ponto de saída da torta de dentro da carenagem.

A carenagem, com raio de 0,91 m, abrange desde o ponto inferior do rotor, próximo do solo, até a posição de saída; forma um ângulo de 45° com a direção horizontal.

Na frente do rotor foi colocada uma extensão da

carenagem, construída em chapa de aço, para evitar o espalhamento da torta pelas laterais do rotor.

GUINCHO TRATOR

Uma corrente enrolada ao eixo principal de um implemento eliminador de soqueira, modelo Copersucar, montado em um trator Valmet 128 e acionado por um motor hidráulico TRW MAB 24, tracionou a colhedora MF 201, produzindo velocidade de avanço em torno de 260 m/h.

O procedimento de desenvolvimento do módulo de campo é descrito a seguir:

O rotor foi dimensionado para trabalhar com facas radiais, planas, com velocidade periférica de 5 m/s.

O primeiro teste de campo mostrou a potencialidade do equipamento em termos de capacidade operacional, trajetória e pulverização da torta, além da necessidade de se usar uma carenagem para definir o ponto de saída do material e, conseqüentemente, sua trajetória no ar. Sem carenagem metálica, o próprio monte de torta serve como guia e define o início do movimento do material em relação à faca e o ponto de saída para a trajetória no espaço.

Como o ângulo de saída era muito variável, às vezes o material era lançado com ângulo muito elevado em relação à horizontal, de forma que retornava à faca, sendo realimentado e lançado muito próximo ao rotor, justificando a presença da carenagem. Uma extensão da carenagem, localizada na dianteira do rotor, foi utilizada para que o monte não se espalhasse, ou seja, não fosse se abrindo à medida que o rotor avançava.

A colhedora, com sua transmissão hidrostática, constituída por motor e bomba de pistões axiais, conseguia se deslocar a velocidades de, no mínimo, 700 m/h. A potência disponível ao rotor não era suficiente para a elevada vazão de material que seria obtida com essa velocidade. O guincho trator movimentou o rotor com velocidade de aproximadamente 260 m/h, mais compatível com a potência disponível para o giro do mesmo.

5.2 MÉTODOS

5.2.1 DIVISÃO DA TORTA EM SUB-AMOSTRAS

Da torta proveniente da Usina Modelo, foram retiradas 4 sub-amstras; a primeira, com aproximadamente 5 kg, foi acondicionada em sacos plásticos para posterior utilização no lançamento de material.

A segunda e terceira sub-amstras, com aproximadamente 5 kg cada, foram secadas em estufa à temperatura de 70°C (para evitar combustão da matéria orgânica) até atingirem as umidades desejadas para os testes. Uma parte foi utilizada no lançamento de material e outra na classificação de velocidade terminal no túnel vertical.

A quarta sub-amstra, com aproximadamente 15 kg, foi utilizada para classificação por velocidade terminal no túnel vertical. As frações classificadas foram utilizadas para o lançamento de material.

O número que identifica as sub-amstras corresponde ao seu teor de umidade. A tabela 5.2 refere-se à

identificação das sub-amostras.

TABELA 5.2 - Identificação e umidade das sub-amostras de torta de filtro.

Sub-amostra	Umidade medida	Umidade média	Utilização	
	(% B.U.)	(% B.U.)	Túnel	Lançador
U81	80,90	80,94	-	L
	80,87			
	81,06			
U68	67,47	67,79	T	L
	68,64			
	67,25			
U44	43,09	44,05	T	L
	45,25			
	43,82			
U82	81,75	81,75	T	L

- não realizada
 T utilizada no túnel vertical
 L utilizada no lançador de material
 B.U. base úmida

5.2.2 DENSIDADE

Determinou-se a densidade aparente das sub-amostras através da pesagem de um volume de torta de 356 cm³, depositada em recipiente plástico, sem introdução de pressão externa. Utilizou-se a balança semi-analítica PE 3600 para a realização das pesagens. Foram feitas 3 repetições para cada medida de densidade. Os resultados são apresentados na tabela 5.3.

TABELA 5.3 - Densidade aparente das sub-amostras de torta de filtro.

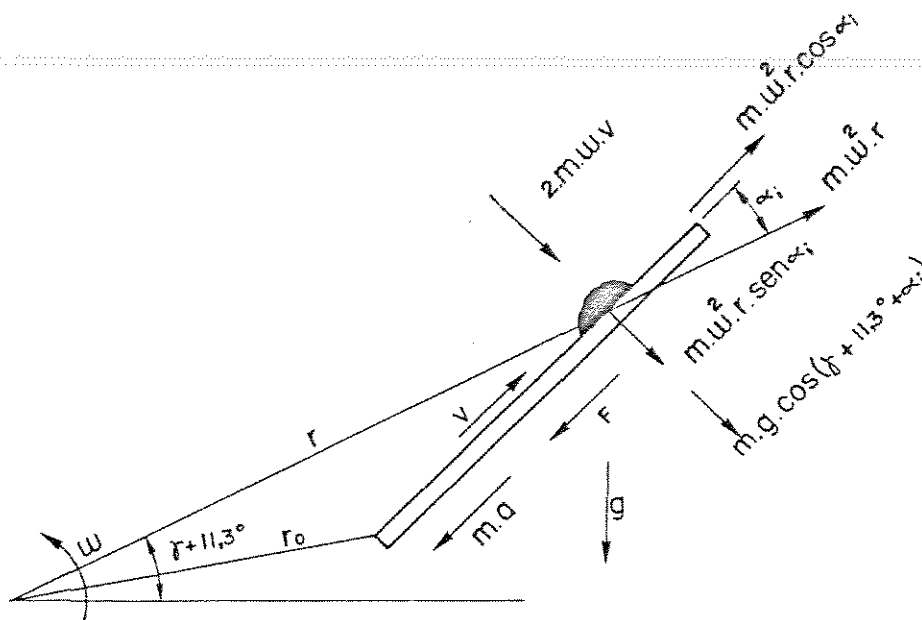
Sub-amostra	Densidade medida (g/cm ³)	Densidade média (g/cm ³)
U81	0,419 0,422 0,433	0,425
U68	0,298 0,324 0,302	0,308
U44	0,187 0,196 0,193	0,192
U82	0,482 0,455 0,487	0,475

5.2.3 COEFICIENTE DE ATRITO

Obteve-se o coeficiente de atrito cinético entre a torta e a chapa de aço por interpolação das medições realizadas por BRAUNBECK & DALCOLMO (1981). Para tal, estimou-se a magnitude da carga normal sobre a torta e utilizaram-se os valores de teor de umidade medido das sub-amostras para entrar na tabela de coeficiente de atrito cinético de torta em chapa de aço galvanizada, contida na bibliografia citada.

A magnitude da carga normal entre a torta e a faca depende do peso de torta normal à faca, do ângulo de inclinação da faca e da aceleração de Coriolis. A figura

5.4, análoga à apresentada por CUNNINGHAM (1963) para mostrar um diagrama de forças de fertilizantes granulares sobre facas retas inclinadas, mostra as forças normais à faca, responsáveis pela ação do coeficiente de atrito.



$$F_n = m g \cos (\gamma + 11,3^\circ + \alpha_i) + 2 m \omega V + m \omega^2 r \sin (\alpha_i)$$

FIGURA 5.4 - Diagrama de forças da torta na faca.

Alimentaram-se 356 cm³ da sub-amostra U81 no lançador de material ajustado com faca radial e realizou-se a leitura da quantidade de quadros, rodada até o centro de massa da torta sair da faca, após a liberação da carenagem externa. Foram percorridos 5 quadros, ou seja, 0,25 m, o que equivale ao ângulo de 0,278 rad (15,9°) e um tempo de 0,05 s com a velocidade angular de 5,236 rad/s.

A distância percorrida pelo centro de massa da torta até sair da faca foi lida diretamente do quadro de

referência, figura 5.2, através do congelamento da imagem do lançamento no gravador de vídeo. Verificou-se que o centro de massa do material encontra-se a $1/2$ quadro (2,5 cm) da extremidade da faca, com raio inicial de 0,875 m. Observou-se, também pela imagem, que a área de torta em contato com a faca é aproximadamente igual à área da torta em contato com a carenagem.

Calculou-se, portanto, a velocidade média aproximada de deslizamento da torta sobre a superfície da faca e obteve-se o valor de 0,5 m/s. A parcela relativa à força de Coriolis foi, portanto, de 0,791 N, com peso equivalente a uma massa de 81 g.

Como o volume de torta alimentado permanece constante e a largura da faca é de 21 cm, conclui-se que a largura de contato da torta com a faca é de 5,8 cm, o que produz uma pressão normal devida a Coriolis de $0,7 \text{ g/cm}^2$.

A outra parcela da força, devido ao efeito da aceleração centrífuga, não contribui com a carga normal para as facas radiais, pois não há reação da faca, ou seja $\sin(\alpha_1)$ é igual a zero. Porém, para facas com inclinação positiva essa componente ocorre e foi avaliada para a faca com ângulo de inclinação de 28° .

Como avaliou-se a ordem de grandeza das forças envolvidas, utilizou-se o raio inicial e a área de contato igual ao da faca radial para se avaliar a pressão normal relativa à força centrífuga. Obteve-se uma força de 1,588 N, equivalente ao peso de uma massa de 162 g, e uma pressão normal de $1,3 \text{ g/cm}^2$.

O valor do ângulo ($\gamma + 11,3^\circ$) foi avaliado em 58° . Assim, devido ao peso do material, a carga normal é de 1,484 N, equivalente ao peso de uma massa de 151 g, e uma pressão normal de $0,7 \text{ g/cm}^2$ (faca radial).

Como a tabela para a seleção do coeficiente de atrito apresentada por BRAUNBECK & DALCOLMO (1981) possuía pressões normais de 10, 50 e 90 g/cm^2 e os valores para outros ângulos de faca e outras unidades de torta apresentaram pressões ainda menores, selecionou-se o coeficiente de atrito correspondente à pressão mais próxima, ou seja, 10 g/cm^2 .

Com esse valor de pressão normal e as unidades medidas das sub-amostras obteve-se a tabela 5.4 para os coeficientes de atrito adotados.

5.2.4 COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO

Obteve-se inicialmente a magnitude do coeficiente de restituição da torta de filtro no piso de cimento do laboratório, através do método padrão da medição da altura de retorno do material abandonado em queda livre. Realizou-se a filmagem e posterior leitura da altura de queda e de retorno com a torta sendo abandonada à frente do painel quadriculado de referência. Os dados indicaram um coeficiente para a amostra U81 da ordem de 5 %, onde a altura da queda foi de 1,25 m.

Segundo INNS & REECE (1962), esferas de aço projetadas sobre blocos sólidos de alumínio atingiram altura de retorno maior do que quando projetadas sobre facas de

TABELA 5.4 - Coeficientes de atrito cinético utilizados.

Unidade	Coeficiente de	Coeficiente de
% B. U.	atrito cinético	atrito cinético
	da referência	adotado

33,10	0,61	-
44,05	-	0,70
54,75	0,79	-
65,30	0,94	-
67,79	-	0,94
75,85	0,94	-
80,94	-	0,94
81,75	-	0,94

- não realizada

B.U. base úmida

alumínio de um rotor. O coeficiente de restituição não depende somente dos materiais usados, mas também das suas massas e rigidez relativas. Espera-se portanto, que o coeficiente de restituição da torta em facas de aço seja menor ou, ao menos, da ordem de 5 %, o que foi confirmado posteriormente. A torta de filtro foi abandonada em queda livre de uma altura aproximada de 1 m sobre a faca do rotor usado no módulo de campo. Como a altura de retorno foi pequena, produzindo um coeficiente menor que o 5 % citado, considerou-se o coeficiente de restituição da

torta com a faca de aço do rotor desprezível para os fins deste trabalho.

5.2.5 VELOCIDADE TERMINAL

A velocidade terminal da torta de filtro relativa ao ar foi determinada para as sub-amostras U68, U44 e U82 utilizando-se o túnel vertical. As diversas frações de torta foram separadas de acordo com sua velocidade de arrasto e pesadas posteriormente.

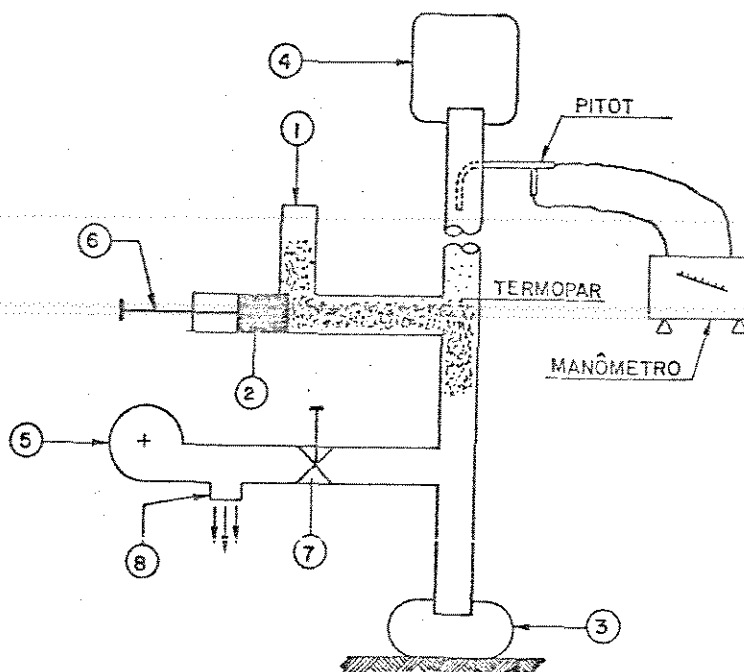
O processo de classificação das sub-amostras é descrito a seguir, com o auxílio de um esquema simplificado do túnel vertical com seus componentes, apresentado na figura 5.5.

a) Calibração.

Realizou-se inicialmente a calibração da válvula de regulação da vazão de ar com o tubo de Pitot, localizado no centro da tubulação vertical do túnel. Para cada vazão de ar ajustada pela válvula, foi lida a velocidade correspondente no manômetro.

Foi feita uma marcação no corpo da válvula, correspondente a cada velocidade de ar, de modo que a mesma pudesse ser reproduzida posteriormente sem a presença do tubo de Pitot, pois, alimentando-se torta para classificação, o tubo de Pitot precisava ser retirado devido a problemas de obstrução em seus furos.

Mediu-se a pressão atmosférica e a temperatura do ar dentro do tubo para se realizar correções nas medições de densidade do ar e, conseqüentemente, das velocidades



onde:

- 1 - Reservatório de admissão
- 2 - Pistão de alimentação
- 3 - Reservatório de coleta
- 4 - Filtro de ar
- 5 - Soprador de ar
- 6 - Manopla de acionamento do pistão
- 7 - Válvula reguladora de vazão
- 8 - Saída para refrigeração

FIGURA 5.5 - Esquema simplificado do túnel vertical.

obtidas com o manômetro. Obteve-se a pressão atmosférica de 719 mmHg e a temperatura do ar foi lida para cada vazão ajustada. Tais correções foram realizadas utilizando-se as fórmulas dadas no Bulletin no H-11 da Dwyer Instruments, Inc.

Varreduras dos perfis de velocidade ao longo da seção transversal do tubo foram realizadas para obtenção da velocidade média. A posição do Pitot foi ajustada próxima

à parede, em posições intermediárias, passando pelo centro e indo até a parede oposta. Obtiveram-se, desta forma, os perfis de velocidade.

Verificou-se que o comprimento da tubulação de 50 diâmetros, segundo SPINK (1967), foi suficiente para localizar o tubo de Pitot de forma que os perfis de velocidade fossem razoavelmente simétricos e com pouca variação. Esses gráficos, para três faixas de velocidade abrangidas por este trabalho, são mostrados na figura 5.6.

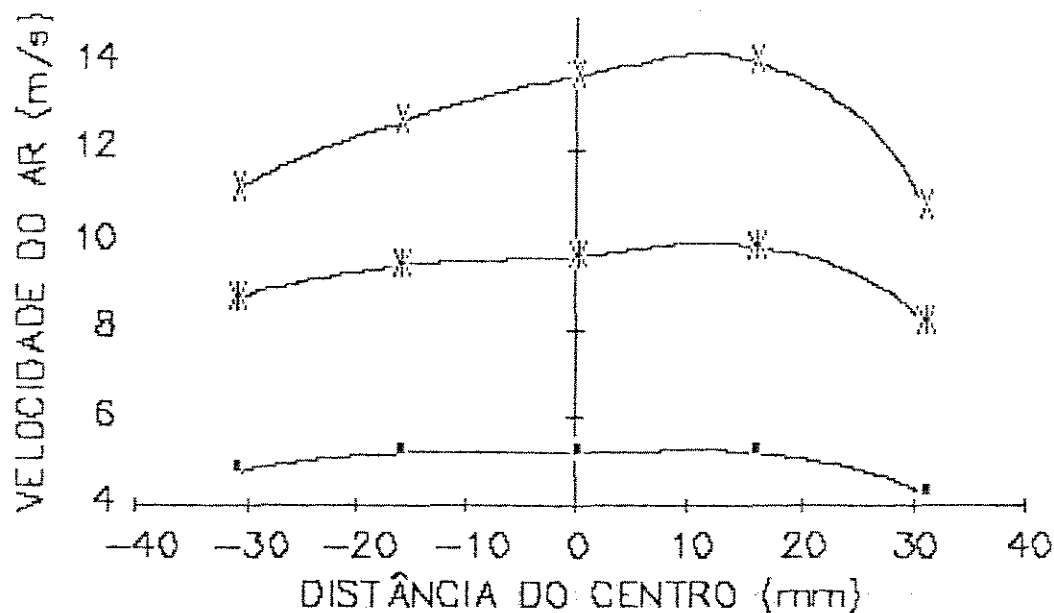


FIGURA 5.6 - Perfis de velocidade ao longo da seção do tubo.

O coeficiente de 0,9 foi adotado para se corrigir a velocidade lida no ponto central do tubo, visando obter a velocidade média do ar, conforme indicado no manual do fabricante do equipamento e observado nos gráficos.

A tabela 5.5 apresenta as velocidades médias medidas

para os seis pontos da calibração da válvula de regulagem de vazão, juntamente com os parâmetros intermediários utilizados para obtenção desses resultados.

TABELA 5.5 - Velocidade média do ar vs posição da válvula.

Posição da válvula	I	II	III	IV	V	VI
Pressão medida (mmH ₂ O)	0,2	1,2	3,0	5,0	6,5	10,0
Temperatura (°C)	20,0	27,3	28,9	30,0	30,3	30,9
Densidade (kg/m ³)	1,138	1,106	1,106	1,106	1,106	1,090
Velocidade no centro do tubo (m/s)	2,09	4,69	7,28	9,41	10,73	13,40
Velocidade média (m/s)	1,9	4,2	6,6	8,5	9,7	12,1

b) Classificação textural das sub-amostras.

Retirou-se o tubo de Pitot após a calibração e tampou-se o orifício de modo a mantê-lo sem reentrância ou saliência na superfície interna.

As sub-amostras a serem classificadas foram mantidas em sacos plásticos, próximas ao equipamento. Utilizou-se

uma quantidade maior de torta para a sub-amostra U82, pois suas frações classificadas também seriam utilizadas em lançamentos de material.

Ajustou-se a válvula de vazão para a posição I. Uma parte da sub-amostra U82 foi alimentada no reservatório de admissão até completar o seu volume, em torno de 3.000 cm³, com o pistão de alimentação na posição aberta.

A torta presente na parte inferior do reservatório de admissão foi empurrada pelo pistão para dentro da corrente de ar da tubulação vertical. O deslocamento do pistão foi lento, para se formar uma nuvem rala de torta dentro da tubulação.

Uma fração da torta com velocidade de arrasto menor ou igual a 1,9 m/s foi arrastada pela corrente de ar e retida pelo filtro de saída. O restante do material, com velocidade de arrasto maior que 1,9 m/s, caiu em direção contrária à corrente de ar e se depositou no reservatório de coleta.

Todo o material contido no reservatório de admissão foi processado através de sucessivos ciclos, como o já descrito.

A torta contida no saco plástico de espera foi alimentada novamente no reservatório até que se processasse toda a sub-amostra.

As frações de torta retidas no filtro de saída e no reservatório de coleta foram vedadas em sacos plásticos para posterior pesagem ou lançamento.

O mesmo processo de separação foi repetido para as

posições de II a VI da válvula.

Realizou-se procedimento idêntico para as sub-amostras U68 e U44. Todas as frações resultantes do processo de separação foram pesadas em seguida na balança semi-analítica PE 3600.

Durante todas as fases de separação, a temperatura do ar no interior da tubulação foi lida para correção de sua densidade.

Os pesos e percentagens das frações separadas no túnel com as correspondentes velocidades de ar adotadas são mostrados nas tabelas 5.6, 5.7 e 5.8, para as sub-amostras U82, U68 e U44, respectivamente.

TABELA 5.6 - Distribuição de massa da sub-amostra U82 obtida no túnel vertical.

Velocidade de arrasto (m/s)	Quantidade classificada (g)	% do total
$V_A < 4,2$	499,8	11,1
$4,2 \leq V_A < 6,6$	1762,5	39,2
$6,6 \leq V_A < 8,5$	1001,0	22,3
$8,5 \leq V_A < 9,7$	641,8	14,3
$9,7 \leq V_A < 12,1$	313,1	7,0
$12,1 \leq V_A$	279,6	6,2
Total	4497,8	100,1

TABELA 5.7 - Distribuição de massa da sub-amostra U68 obtida no túnel vertical.

Velocidade de arrasto	Quantidade classificada	% do total
(m/s)	(g)	
$V_A < 1,9$	3,7	0,6
$1,9 < V_A < 4,2$	347,2	54,8
$4,2 < V_A < 6,6$	161,3	25,4
$6,6 < V_A < 8,5$	49,5	7,8
$8,5 < V_A < 9,7$	25,4	4,0
$9,7 < V_A$	46,7	7,4
Total	633,8	100,0

TABELA 5.8 - Distribuição de massa da sub-amostra U44 obtida no túnel vertical.

Velocidade de arrasto	Quantidade classificada	% do total
(m/s)	(g)	
$V_A < 1,9$	23,6	10,3
$1,9 < V_A < 4,2$	142,3	62,0
$4,2 < V_A < 6,6$	43,7	19,0
$6,6 < V_A < 8,5$	15,9	6,9
$8,5 < V_A$	4,0	1,7
Total	229,5	99,9

Através das tabelas anteriores, calculou-se a velocidade de arrasto média, característica de cada sub-amostra classificada. Utilizou-se o valor de velocidade correspondente a 50 % da massa total de torta, obtida somando-se da menor para a maior velocidade de arrasto até atingir-se a quantidade citada. Assumiu-se uma distribuição linear dentro de cada faixa de velocidades. Realizando-se uma interpolação de valores, obteve-se o valor final da velocidade de arrasto, citado na tabela 5.9.

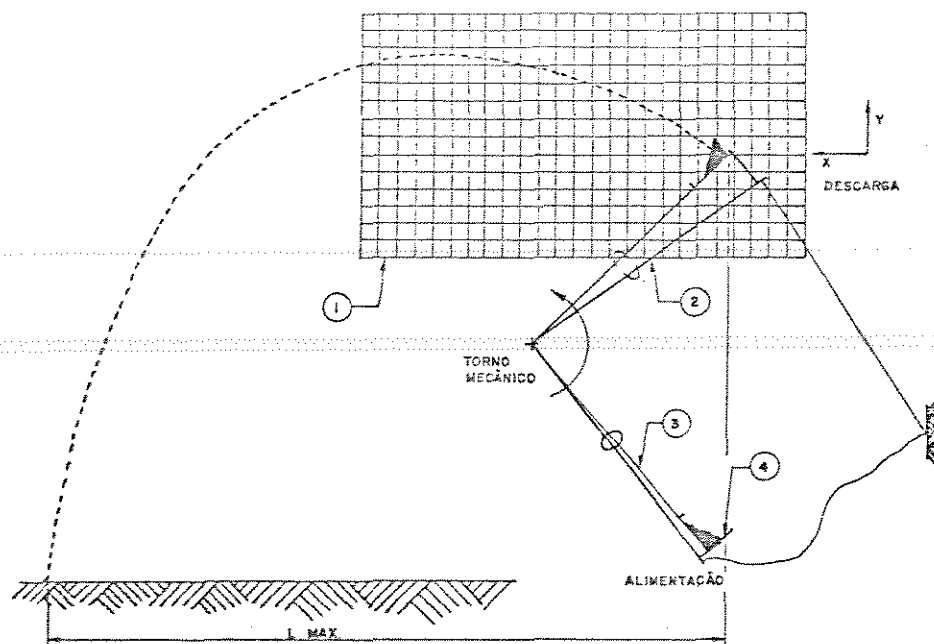
TABELA 5.9 - Velocidades de arrasto obtidas para as sub-amostras.

Sub-amostra	U82,U81	U68	U44
Velocidade de arrasto			
(m/s)	6,6	4,0	3,4

O valor da velocidade de arrasto da sub-amostra U82 e U81 são os mesmos, pois elas são provenientes da mesma amostra inicial, porém a nomenclatura foi diferenciada por terem tratamento posterior à classificação diferenciado.

5.2.6 REGISTRO DOS DADOS DE LANÇAMENTO

O teste de lançamento é ilustrado com o modelo simplificado da figura 5.7.



onde:

- 1 - Painel quadriculado de referência
- 2 - Braço de sustentação da carenagem
- 3 - Braço de sustentação da faca
- 4 - Carenagem

FIGURA 5.7 - Modelo simplificado do teste de lançamento de torta.

Trabalharam-se com diferentes ajustes do ângulo de faca. Fixaram-se 5 ângulos distintos entre a superfície da faca e o seu raio. Utilizaram-se gabaritos de ângulos para que as posições pudessem ser reproduzidas posteriormente. Mediram-se esse ângulo denominado de α_R , o valor da distância n e do raio externo da faca R_e , conforme mostra a figura 5.8.

A tabela 5.10 apresenta os valores obtidos de n e R_e , relativos a cada ângulo α_R , e a identificação

correspondente.

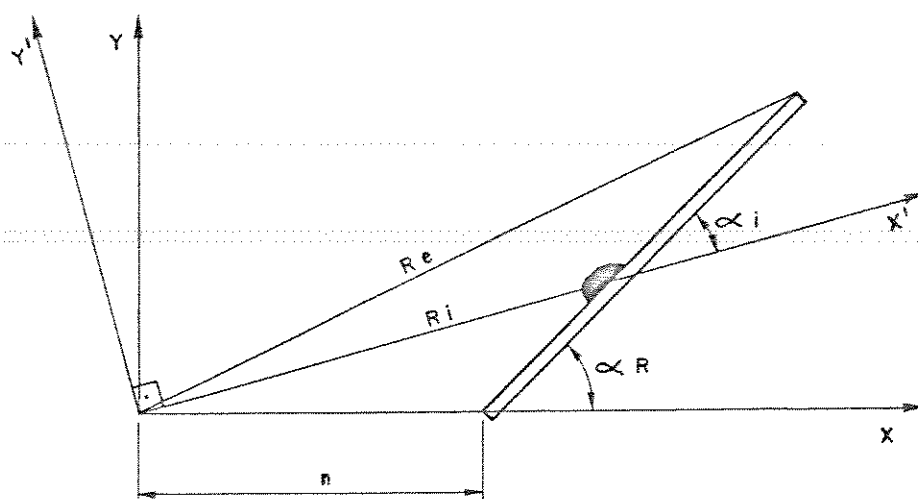


FIGURA 5.8 - Modelo genérico de faca com dimensões principais.

TABELA 5.10 - Posições da faca de lançamento.

Posição da faca	α_R (graus)	n (m)	R_e (m)
A+28	27,9841	0,816	0,906
A+13	13,2882	0,810	0,908
A+00	0,0982	0,805	0,904
A-16	-16,0615	0,810	0,904
A-31	-30,7808	0,820	0,908

As sub-amostras U81, U68 e U44 foram lançadas em todas as posições de faca da tabela anterior. A amostra U82 usou

somente a posição A+00. O lançamento de cada sub-amostra foi repetido 3 vezes em cada posição angular.

A cada lançamento, depositou-se um volume definido de 356 cm³ de torta sobre a faca, de forma a abranger toda sua superfície. Na posição inferior de alimentação, a faca permaneceu estática, formando um ângulo de aproximadamente 45° com a direção vertical.

Uma frequência angular de 50 min⁻¹, correspondente a uma velocidade angular de 5,236 rad/s, foi selecionada no torno. O limitador de curso da carenagem constituiu-se de um cordão de nylon com uma extremidade fixa na própria carenagem e a outra fixa no piso do laboratório. Regulou-se a posição de descarga, de forma que o curso máximo da carenagem na posição superior formasse um ângulo de aproximadamente 45° entre o seu raio e a direção vertical.

O painel quadriculado de referência foi posicionado a 0,25 m do centro da faca de lançamento e um fio de prumo alinhou seus traços com a direção vertical. Uniu-se o braço de sustentação da faca e o da carenagem através da fita adesiva. A filmadora de vídeo foi posicionada a uma distância aproximada de 2,5 m da faca, no mesmo nível do centro do quadro de referência.

O motor do torno foi acionado e o conjunto faca, carenagem e torta partiu da posição inferior e se deslocou até a posição de descarga, chegando com velocidade constante. Nesse ponto o limitador de curso restringiu o movimento da carenagem, rompendo a fita adesiva.

Iniciou-se o deslizamento da torta sobre a faca até que todo o material fosse liberado, continuando sua trajetória no ar. Acionou-se instantaneamente o motor do torno em sentido contrário para frear o movimento da faca.

Registrrou-se a distância atingida pela torta sobre o piso em relação ao centro de rotação do torno, denominada de d. Referências foram previamente marcadas no piso com fita adesiva para facilitar a leitura.

5.2.7 REPRODUÇÃO DOS DADOS DE LANÇAMENTO

As imagens dos testes, registradas em fita magnética, foram reproduzidas através do gravador de vídeo. O quadrante esquerdo inferior do quadro de referência foi utilizado para colocação de caracteres de identificação do ângulo da faca, da unidade da torta e da quantidade de repetições dos lançamentos.

As imagens foram avançadas quadro a quadro. Observou-se o esticamento do cordão de nylon, a parada instantânea da carenagem e o rompimento da fita adesiva. Congelou-se novamente a imagem no quadro em que a ponta da faca de lançamento atingiu a ponta da carenagem, ou seja, na posição do início da descarga, e calculou-se o ângulo γ formado entre a direção horizontal e o raio da cantoneira de sustentação da carenagem. Somando-se esse ângulo a um constante de $11,3^\circ$ (próprio da geometria da carenagem), obtém-se o ângulo da carenagem na posição de descarga com relação à direção horizontal.

Contou-se o número de quadros existentes, nas direções

vertical e horizontal, entre a origem do sistema de referência do painel quadriculado e a ponta da faca, coincidente com a ponta da carenagem na posição de descarga. Estas coordenadas foram definidas como y_q e x_q , respectivamente.

A posição de início de descarga foi utilizada como o início da trajetória da torta, primeiramente dentro da faca e posteriormente no ar. Realizou-se a leitura das coordenadas x e y em relação ao sistema de referência do quadro guia. A seguir, avançou-se a imagem no monitor de vídeo em mais um quadro e realizou-se a leitura das coordenadas x e y da trajetória da torta. Assumiu-se o centro geométrico da torta vista na tela do vídeo como sendo seu centro de massa. O processo de avanço quadro a quadro e leitura das coordenadas foi repetido sucessivamente até a torta alcançar o final do painel quadriculado.

5.2.8 AJUSTE DA CURVA EXPERIMENTAL

Realizou-se a troca do sistema de coordenadas do quadro guia para um sistema de referência com ordenada e abscissa paralelas ao sistema anterior e com origem em seu ponto de início de descarga. Subtraíram-se respectivamente as constantes x_q e y_q das coordenadas x e y experimentais. Multiplicaram-se as coordenadas x e y pela dimensão do quadriculado, 0,05 m, para se obterem as leituras em metros.

As 3 repetições realizadas para uma mesma condição de

lançamento não necessariamente deveriam gerar as mesmas coordenadas x no eixo das abscissas. A leitura das imagens depende da posição de congelamento das mesmas, não sendo possível selecionar imagens com valores de x especificados previamente. Realizou-se, para todos os lançamentos, um ajuste de curvas a cada condição de lançamento, contendo o conjunto de pontos de suas 3 repetições.

Através do ajuste polinomial do MSCHART, realizou-se um ajuste de quinto grau e obtiveram-se os coeficientes do polinômio e o coeficiente de correlação dos pontos em relação à curva ajustada. Digitaram-se no SC4 os coeficientes dos polinômios obtidos para se realizar posteriormente comparação entre os dados teóricos e experimentais.

5.2.9 CÁLCULO DA TRAJETÓRIA TEÓRICA

Dividiu-se o cálculo da trajetória do material em duas fases: dentro e fora da faca (no ar).

a) Dentro da faca

Utilizou-se a formulação teórica para facas retas radiais e inclinadas, descrita em 4.2.1, para resolução da trajetória dentro da faca.

Considerou-se como trajetória dentro da faca o deslocamento do centro de massa do material desde o início da descarga na carenagem, percorrendo a superfície da faca durante o ângulo θ até alcançar o raio externo da faca. Nesse ponto, inicia-se a trajetória do material no ar, perdendo o contato com a faca. A figura 5.9 ilustra o

processo da trajetória do material dentro da faca.

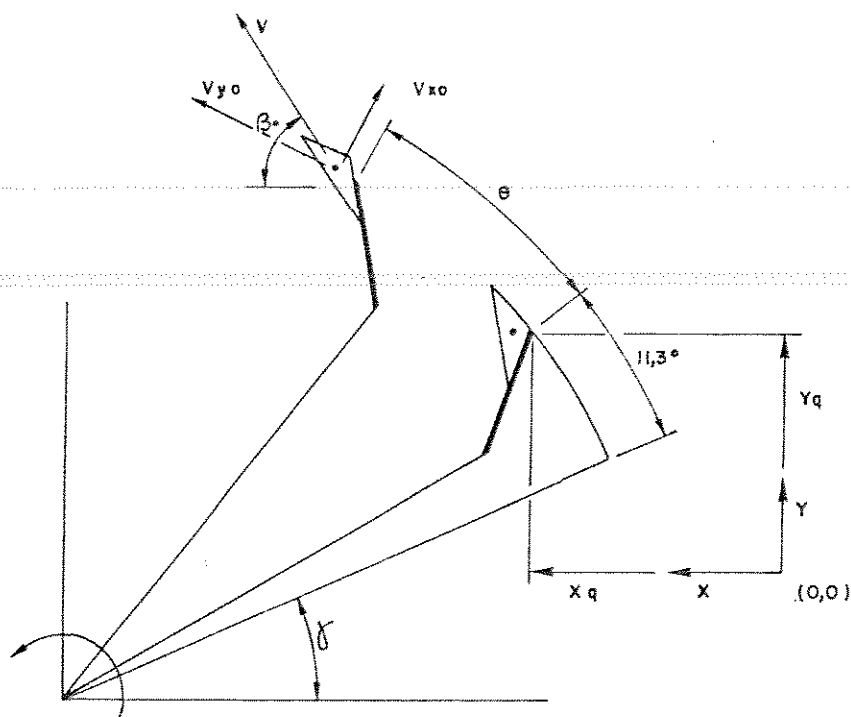


FIGURA 5.9 - Trajetória do material dentro da faca.

Utilizou-se um programa, desenvolvido em SC4, ANEXO A, empregando as equações de 4.2.1 para calcular o ângulo θ , necessário para o material se deslocar da posição inicial até a posição de saída da faca. Realizaram-se algumas determinações complementares, utilizadas na condição inicial.

Na posição inicial, considerou-se o material na eminência de saída de dentro da carenagem. Portanto, não ocorre deslocamento relativo entre material e faca. Nesse ponto, consideraram-se apenas a força centrífuga e a gravitacional atuando no centro de massa do material. Não existe aceleração de Coriolis, pois o material não se desloca em relação à faca. Ela ocorre quando a massa está

deslizando sobre a faca durante o processo de descarga.

Assumiu-se, portanto, como condição inicial, uma variação nula do deslocamento do material na direção da faca em relação ao ângulo de rotação, ou seja, $dx/d\theta = 0$.

Nessa mesma posição, determinou-se graficamente o raio inicial do material. A figura 5.9 ilustra o procedimento utilizado.

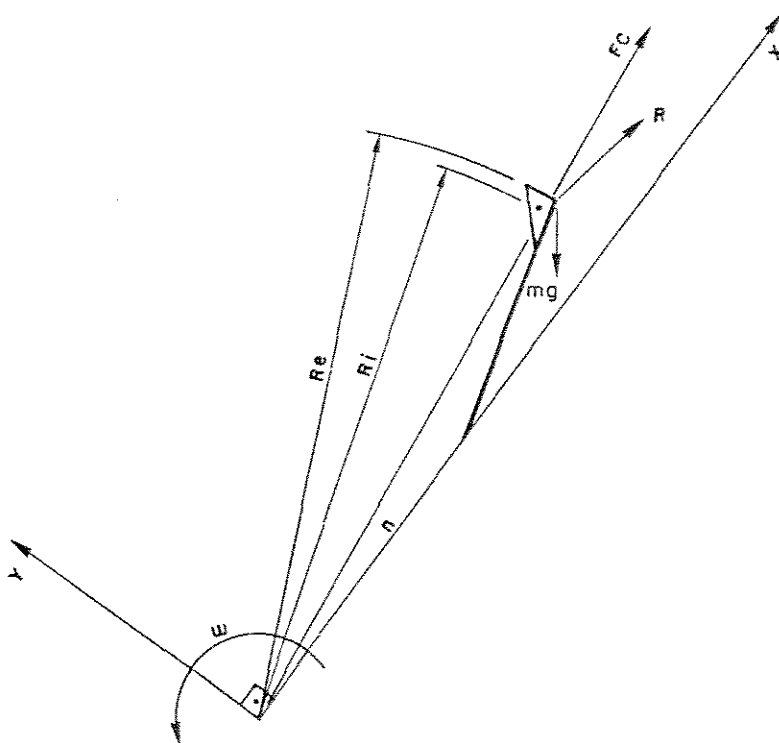


FIGURA 5.10 - Material na posição de início de descarga.

Determinaram-se a direção da resultante da força centrífuga e o peso do material. Tomou-se a perpendicular a essa direção e traçou-se a direção do perfil assumido pelo material, adicionando-se seu ângulo de atrito interno. Como o volume de material alimentado foi sempre constante, 356 cm^3 , e a largura da faca é de 21 cm, a área da seção transversal resultava ser de $16,95 \text{ cm}^2$.

Traçaram-se várias paralelas à direção encontrada até se obter a área correspondente de $16,95 \text{ cm}^2$. Mediu-se então o raio inicial, correspondente ao centro geométrico do triângulo de material.

O equacionamento teórico considera o ângulo da faca em relação ao raio, α_i , quando o material encontra-se no raio inicial. Os raios iniciais, obtidos graficamente, foram maiores que as distâncias n , fazendo com que o ângulos de faca medidos previamente precisassem ser corrigidos de acordo com o raio inicial. Assim, na posição inicial, tomaram-se o raio inicial e o ângulo da faca α_i correspondente a essa posição. A figura 5.8 ilustra o material dentro da faca na posição inicial, com relação ao sistema de coordenadas anterior e o atual corrigido.

O ângulo inicial α_i foi corrigido de acordo com a seguinte expressão:

$$\alpha_i = \sin^{-1} \left\{ \frac{n}{R_i} \sin \left[180^\circ - \alpha_R \right] \right\} \quad 5.1$$

As seguintes expressões também foram utilizadas para alimentar as condições de contorno no programa citado:

$$k = \tan \alpha_i \quad 5.2$$

$$b = k R_i \quad 5.3$$

As tabelas 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam um resumo das condições iniciais dos lançamentos realizados.

A seguir, calculou-se o ângulo θ iterativamente. Através do programa em SC4, acrescentaram-se à posição inicial do material incrementos angulares de $0,1^\circ$ até o

TABELA 5.11 - Condições iniciais do material dentro da faca para sub-amostras U81 e U68.

Posição da faca		A+28	A+13	A+00	A-16	A-31
n	(m)	0,816	0,810	0,805	0,810	0,820
R _i	(m)	0,862	0,875	0,876	0,882	0,890
R _e	(m)	0,906	0,908	0,904	0,904	0,908
α_R	(°)	27,98	13,29	0,10	-16,06	-30,78
α_i	(°)	26,37	12,28	0,09	-14,72	-28,13
γ (U81)	(°)	46,4	47,7	46,2	47,3	47,3
γ (U68)	(°)	47,7	47,3	47,7	47,3	47,3

TABELA 5.12 - Condições iniciais do material dentro da faca para sub-amostra U44.

Posição da faca		A+28	A+13	A+00	A-16	A-31
n	(m)	0,816	0,810	0,805	0,810	0,820
R _i	(m)	0,875	0,875	0,880	0,888	0,890
R _e	(m)	0,906	0,908	0,904	0,904	0,908
α_R	(°)	27,98	13,29	0,10	-16,06	-30,78
α_i	(°)	25,95	12,28	0,09	-14,62	-28,13
γ	(°)	50,8	50,7	50,0	48,0	50,2

TABELA 5.13 - Condições iniciais do material dentro da faca para sub-amostra U82.

Posição da faca	A+00	A+00
V_t	<4,2, 5,4, 7,6 e 9,1	10,9 e >12,1
n (m)	0,805	0,805
R_i (m)	0,876	0,876
R_e (m)	0,904	0,904
α_R (°)	0,10	0,10
α_i (°)	0,09	0,09
γ (°)	47,0	47,9

material alcançar o R_e . Adotou-se, então, este como sendo o ângulo θ necessário.

Para esta posição de descarga, calcularam-se as coordenadas x_t e y_t com relação ao sistema de coordenadas utilizado na gravação de imagens da fase experimental e mostrado na figura 5.9. As coordenadas x_t e y_t , com a direção de saída do material da faca em relação à horizontal β_o e a velocidade final de saída do material da faca V_o , foram utilizadas como condições iniciais da fase seguinte de trajetória do material no ar. Obtiveram-se estes parâmetros através das seguintes expressões:

$$x_t = x_q \cdot 0,05 + | \cos (\gamma + 11,3 + \theta) - \cos (\gamma + 11,3) | R_e \quad 5.4$$

$$y_t = y_q \cdot 0,05 + | (\sin \gamma + 11,3 + \theta) - \sin (\gamma + 11,3) | R_e \quad 5.5$$

$$\beta_o = \pi - \frac{(\gamma + 11,3)}{57,3} - \theta - \tan^{-1} \left[\frac{V_{yo}}{V_{xo}} \right] \quad 5.6$$

Obtiveram-se as velocidades V_{xo} e V_{yo} do programa desenvolvido. São as componentes de velocidade do material nas direções x e y respectivamente, tomadas em relação ao sistema de coordenadas girante com a faca, adotado em 4.2.1.

Calculou-se a velocidade de saída do material V_o , da seguinte forma:

$$V_o = \sqrt{x_o^2 + y_o^2} \quad 5.7$$

b) Fora da faca (no ar)

A trajetória do material no ar teve início no término da descarga do material dentro da faca. Utilizou-se, portanto, como condições iniciais, o ângulo β_o e a velocidade V_o para o cálculo da trajetória resultante de cada lançamento de torta.

A resolução das seguintes equações, deduzidas no item 4.3.3, regeu a trajetória do material no ar:

$$\ddot{x} = - \left[\frac{g}{v_t^2} \right] \dot{x} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad 5.8$$

$$\ddot{y} = - \left[\frac{g}{v_t^2} \right] \dot{y} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} - g \quad 5.9$$

onde x e y são as coordenadas horizontal e vertical da trajetória do material.

Utilizou-se um programa com linguagem de simulação contínua, denominado CSMP, desenvolvido pela IBM, para obter numericamente os valores de x e y . O diagrama de blocos do programa encontra-se no ANEXO B.

Utilizaram-se as velocidades terminais obtidas anteriormente da classificação das sub-amostras, e as coordenadas x_t e y_t para serem alimentadas como condições iniciais do referido programa. As velocidades iniciais nas direções horizontal e vertical foram obtidas através das seguintes expressões:

$$\dot{x}_0 = V_0 \cos \beta_0 \quad 5.10$$

$$\dot{y}_0 = V_0 \sin \beta_0 \quad 5.11$$

Resolveram-se as trajetórias das sub-amostras em combinação com as condições de lançamento e armazenaram-se os resultados em arquivos.

5.2.10 COMPARATIVO ENTRE CURVA EXPERIMENTAL E TEÓRICA

Os resultados experimentais foram comparados com os teóricos gerados pelos programas do ANEXO A, referente ao material dentro da faca, e do ANEXO B, referente à

trajetória no ar. Utilizaram-se os coeficientes do ajuste polinomial, realizado com os pontos experimentais no MSCHART, para alimentar uma equação no SC4 utilizando o mesmo x teórico, porém com a ordenada calculada em função da equação gerada pelo ajuste.

Para cada coordenada x teórica existe um valor de y calculado com o CSMP e um valor correspondente, calculado com os coeficientes de ajuste dos dados experimentais. Dessa forma, conseguiram-se os valores teóricos e experimentais com a mesma abscissa x . Os valores de x teóricos dependem do incremento de tempo usado na resolução das equações diferenciais com o CSMP e os experimentais, do instante em que a filmadora registra as imagens de lançamento na fita magnética.

5.2.11 MEDIÇÃO COM O MÓDULO DE CAMPO

O rotor de corte trabalhou em torta de filtro com 42 % de umidade média. Inicialmente, testou-se sem a carenagem externa e, posteriormente, com ela.

A velocidade de avanço do rotor tracionado pelo guincho foi sempre de 280 m/h e sua rotação de 54 min^{-1} , aferida com cronômetro e contagem de rotações. Filmaram-se todos os testes, inclusive o processo de descarga, para posterior congelamento de imagens e avaliação qualitativa.

Mediu-se a pressão do circuito hidráulico para avaliação de demanda de torque.

Testaram-se três ângulos distintos de carenagem externa com relação à horizontal, 45, 58 e 71° , para

avaliar o alcance máximo da trajetória de torta.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 TRAJETÓRIA DE LANÇAMENTO

As coordenadas experimentais x e y dos lançamentos de torta com relação ao sistema de referência fixo com origem na saída da carenagem são apresentadas no ANEXO C. Os coeficientes dos polinômios de quinto grau referentes às curvas ajustadas aos pontos experimentais, e os respectivos coeficientes de correlação, denotados por R^2 , também compõem o ANEXO C.

Os valores teóricos do ângulo θ que o centro de massa do material percorre dentro da faca até atingir o ponto de descarga para o ar, os ângulos de lançamento com a direção horizontal β_0 , as velocidades de lançamentos V_0 e as coordenadas do ponto de início de descarga x_i e y_i em relação ao sistema de referência são apresentadas nas tabelas 6.1 a 6.4.

As coordenadas das curvas teóricas de trajetória de torta, calculadas utilizando-se as tabelas 6.1 a 6.4 como condições iniciais da trajetória no ar e as coordenadas das curvas experimentais estão contidas no ANEXO D. Cada valor de x apresenta os valores correspondentes de y teórico, y experimental calculado com a equação ajustada,

a diferença entre as coordenadas y dos valores experimentais e teóricos e as coordenadas do semi-círculo

TABELA 6.1 - Valores teóricos para a sub-amostra U81 no ponto de descarga.

Posição da faca	A+28	A+13	A+00	A-16	A-31
θ ($^{\circ}$)	32,3	19,9	15,6	12,6	11,2
β_o ($^{\circ}$)	6,7	21,0	28,7	31,5	32,7
V_o (m/s)	5,1	5,0	4,8	4,6	4,4
x_t (m)	0,484	0,292	0,223	0,180	0,159
y_t (m)	0,140	0,112	0,103	0,084	0,077

TABELA 6.2 - Valores teóricos para a sub-amostra U68 no ponto de descarga.

Posição da faca	A+28	A+13	A+00	A-16	A-31
θ ($^{\circ}$)	32,3	19,9	15,6	12,6	11,2
β_o ($^{\circ}$)	5,4	21,4	27,2	31,5	32,7
V_o (m/s)	5,1	5,0	4,8	4,6	4,4
x_t (m)	0,487	0,291	0,226	0,180	0,159
y_t (m)	0,129	0,114	0,097	0,084	0,077

TABELA 6.3 - Valores teóricos para a sub-amostra U44 no ponto de descarga.

Posição da faca	A+28	A+13	A+00	A-16	A-31
θ ($^{\circ}$)	22,6	18,7	14,1	10,7	11,6
β_o ($^{\circ}$)	12,9	20,1	26,2	30,9	29,2
V_o (m/s)	5,2	5,1	4,8	4,6	4,4
x_t (m)	0,340	0,279	0,207	0,153	0,169
y_t (m)	0,101	0,094	0,082	0,072	0,071

TABELA 6.4 - Valores teóricos para a sub-amostra U82 no ponto de descarga.

Posição da faca	A+00	A+00
V_t (m/s)	<4,2; 5,4; 7,6 e 9,1	10,9 e >12,1
θ ($^{\circ}$)	15,6	15,6
β_o ($^{\circ}$)	27,9	27,0
V_o (m/s)	4,8	4,8
x_t (m)	0,225	0,226
y_t (m)	0,100	0,096

descrito pelo raio externo da faca.

A trajetória teórica dentro da faca, para efeito de comparação com a trajetória experimental medida com o quadro de referência, é considerada a mesma do círculo descrito pelo raio externo da faca pois, a dimensão de 5 cm do quadriculado de referência é maior que a distância percorrida pelo centro de massa do material dentro da faca até ser descarregado.

As figuras 6.1 a 6.21 apresentam as trajetórias de lançamento de todas as sub-amostras. Cada figura contém os pontos experimentais, a curva experimental ajustada, a curva teórica calculada e o semi-círculo descrito pela ponta da faca de lançamento. O semi-círculo foi calculado a partir do raio externo, das coordenadas x_t e y_t e do ângulo γ formado pelo braço de sustentação da faca com a direção horizontal.

As figuras 6.22 a 6.25 apresentam as diferenças ocorridas entre as ordenadas das curvas teóricas e experimentais ajustadas para cada abscissa x . O máximo desvio ocorrido para todas as sub-amostras lançadas com ângulo de faca A+00 e com abscissas na faixa de 0 a 0,7 m foi inferior a um quadro de referência.

Para a faixa de x entre 0,7 e 1,0 m os desvios foram maiores para as sub-amostras com menores umidades. Nesta faixa, as curvas teóricas ficaram mais baixas que as experimentais.

Estes resultados indicam que a resistência do ar é inferior à considerada no equacionamento teórico da

trajetória. As constantes de arrasto teóricas, geradas a partir das velocidades terminais medidas no túnel vertical, foram maiores que as experimentais, ou seja, a velocidade terminal da "nuvem" de material lançada pela faca é superior à correspondente da "nuvem" em suspensão no túnel vertical. Este fato também ocorreu com umidades menores, nas sub-amostras U68 e U44. O agrupamento mais compacto (denso) de partículas, no caso de lançamento por facas, sofre menor resistência do ar que a distribuição bastante dispersa conseguida dentro do túnel.

Os resultados obtidos com as sub-amostras U82, lançadas por facas radiais, foram melhores com relação às outras sub-amostras. Provavelmente, devido à maior homogeneidade deste material que foi classificado no túnel vertical e a seu elevado teor de umidade. O maior teor de umidade aumenta a coesão do material, contribuindo para evitar a dispersão da "nuvem", aumentando sua velocidade terminal no túnel.

Ocorreu uma tendência de afastamento das curvas teóricas em relação às experimentais à medida que os ângulos de faca foram aumentados da posição A+00. Esta tendência ocorreu independentemente da umidade do material lançado. As facas ajustadas com A+28 sofreram o maior desvio, os quais diminuíram para as facas ajustadas com A+13.

As facas ajustadas com ângulos A-16 e A-31, de modo geral, apresentaram desvios razoavelmente pequenos. Ocorreu uma tendência de afastamento da curva experimental

em relação à teórica no início da trajetória, para abscissa na faixa de 0 a 0,2 m.

Na seção teórica, o material dentro da faca foi modelado como uma partícula de massa m sujeita à sua ação e com resistência do ar desprezada.

Observou-se das gravações preliminares de lançamento de torta em queda livre que sua área final, quando esta atinge a velocidade de 5 m/s, aumenta em cerca de 4 a 5 vezes em relação à posição inicial, com velocidade nula.

O efeito do atrito do ar na camada superficial da massa liberada faz com que sejam desagregadas partículas da superfície, pulverizando a massa. O efeito é similar ao provocado pelo pulverizador de líquidos.

Este fenômeno também foi observado no módulo de campo, de forma contínua.

Para ângulos de descarga θ reduzidos, das posições A+00 a A-31, a torta, ao sair da faca, sofre o efeito da resistência do ar em todas as suas partículas quase que simultaneamente. Para ângulos maiores, A+13 e A+28, a descarga não pode ser considerada simultânea.

Para ângulos de descarga positivos, A+13 e A+31, a torta que sai inicialmente da faca, sofre imediatamente a resistência do ar (velocidade de 5 m/s), pulverizando-se e aumentando sua área. O material que continua se deslocando dentro da faca só irá sofrer este efeito posteriormente, no momento de sua descarga, ou seja, embora ainda exista uma parte de torta dentro da faca, a outra já foi descarregada. Quanto maior é o ângulo da faca, mais

pronunciado é este efeito.

Os desvios ocorrem pois as premissas teóricas de uma partícula de massa m , sofrendo simultânea e integralmente a sua ação e a não influência do ar na trajetória considerada como dentro da faca ocorrem apenas parcialmente. A elevação da altura da ordenada y média medida é devida ao espalhamento da torta que vai sendo lançada no ar enquanto a torta em contato com a faca não é alterada em relação ao teórico.

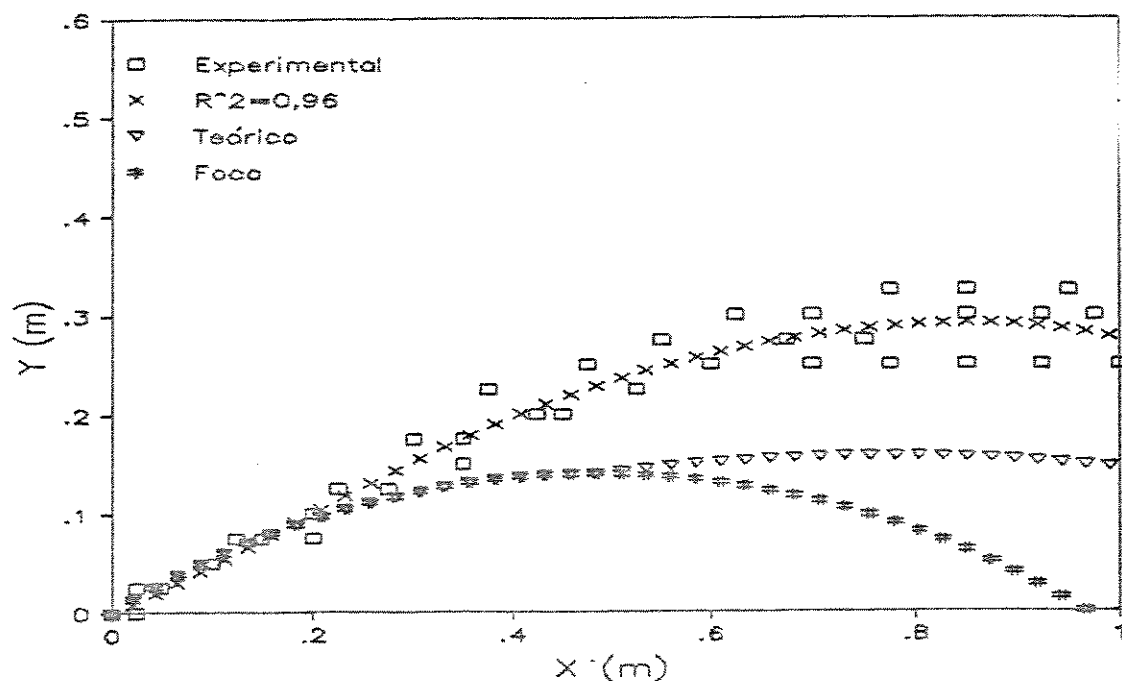


FIGURA 6.1 - Trajetórias de lançamento na condição U81A+28.

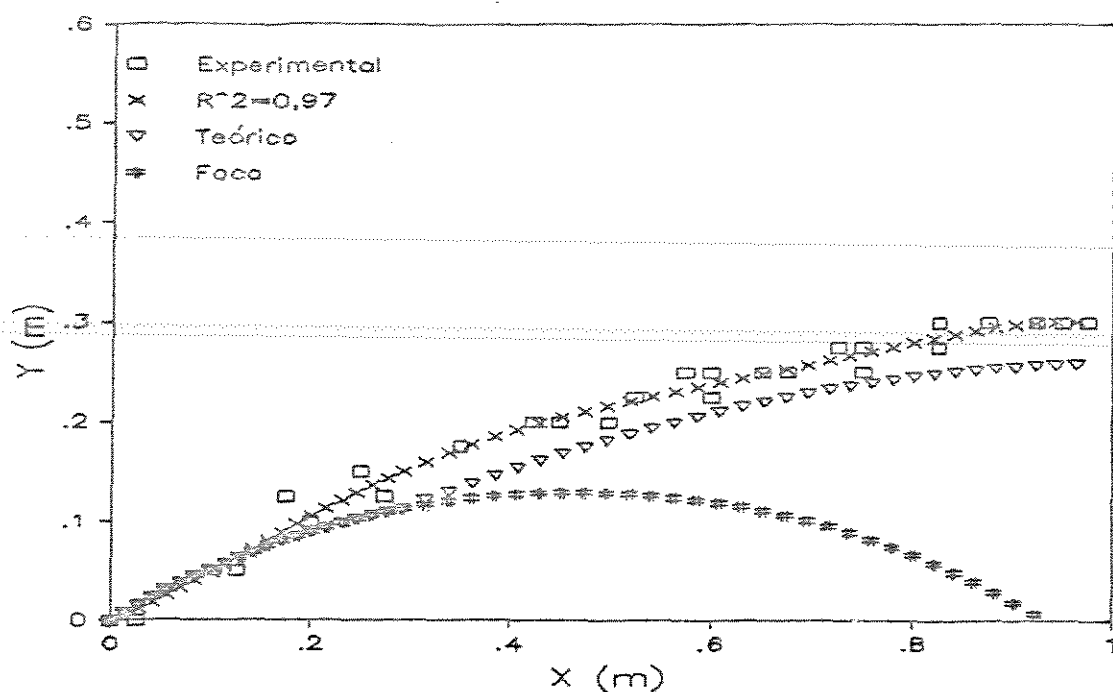


FIGURA 6.2 - Trajetórias de lançamento na condição U81A+13.

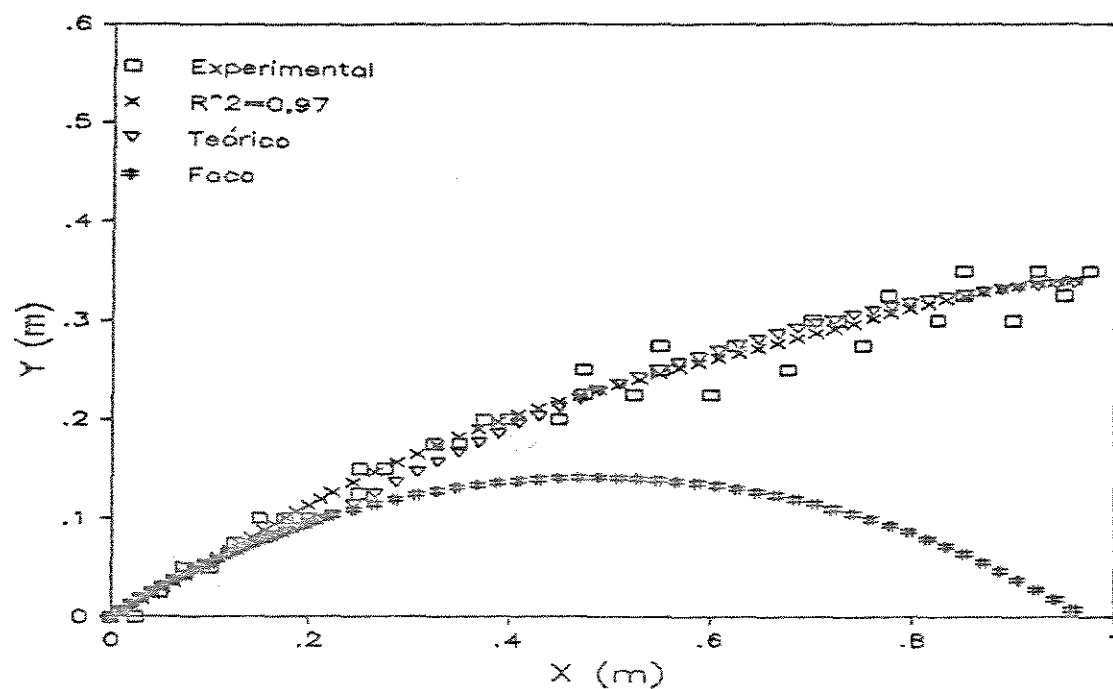


FIGURA 6.3 - Trajetórias de lançamento na condição U81A+00.

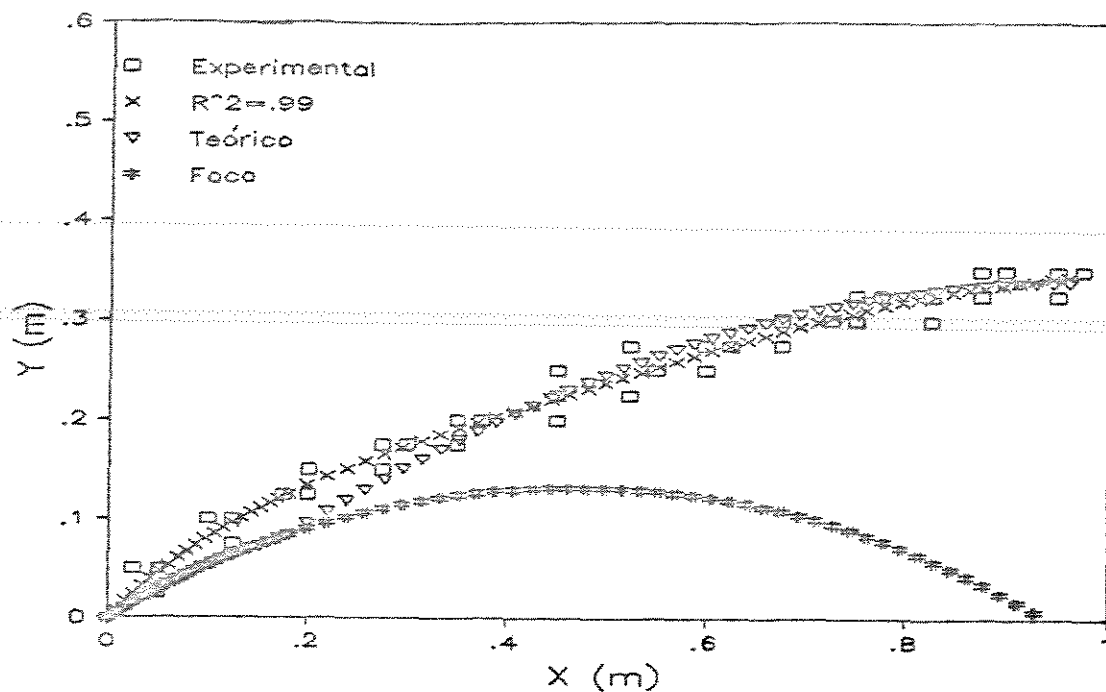


FIGURA 6.4 - Trajetórias de lançamento na condição U81A-16.

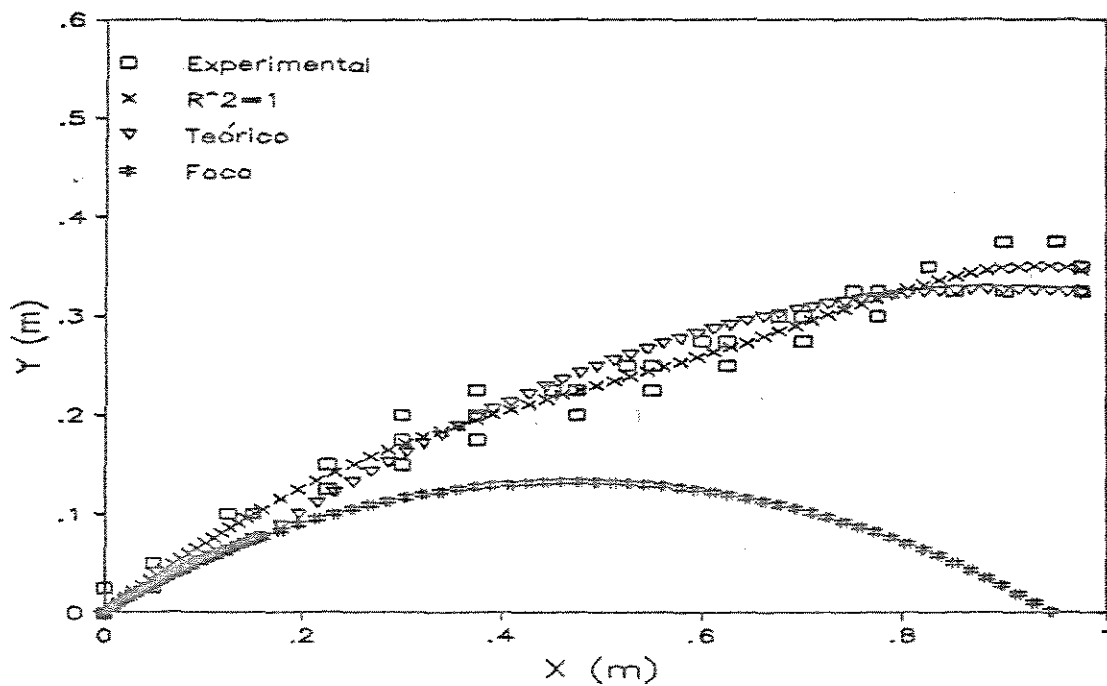


FIGURA 6.5 - Trajetórias de lançamento na condição U81A-31.

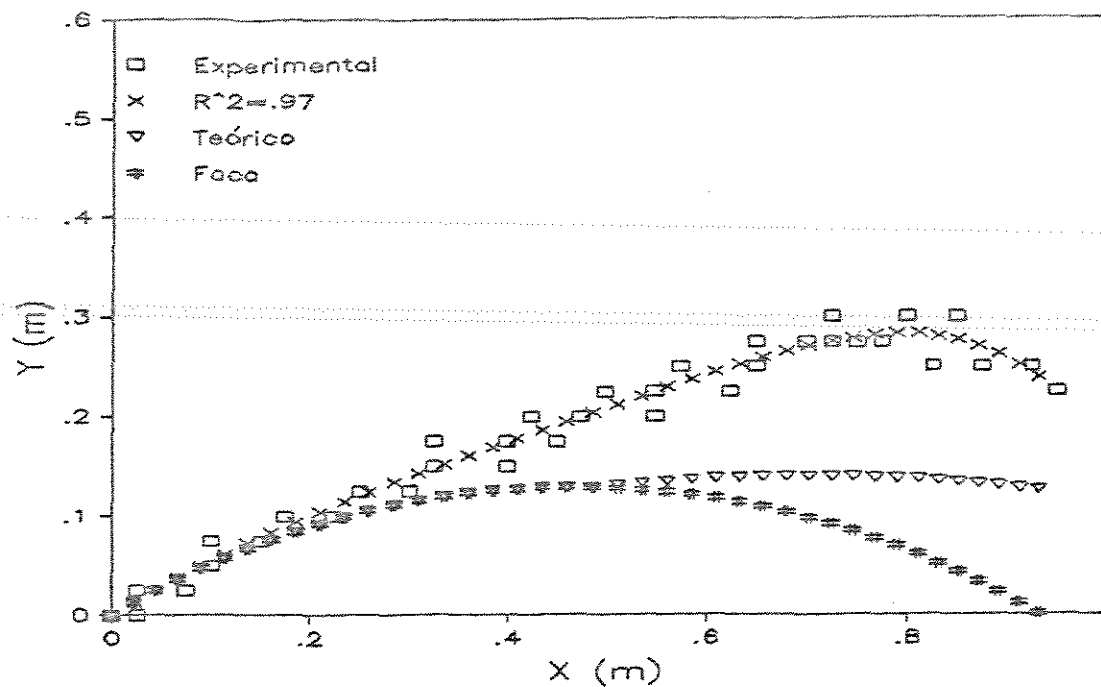


FIGURA 6.6 - Trajetórias de lançamento na condição U68A+28.

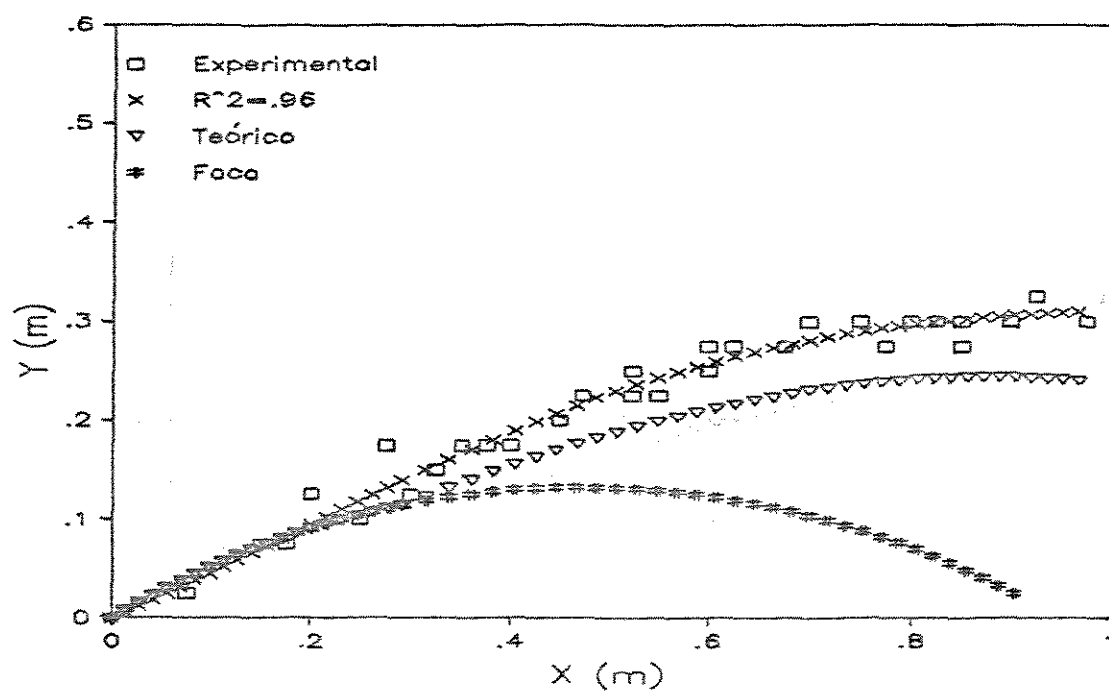


FIGURA 6.7 - Trajetórias de lançamento na condição U68A+13.

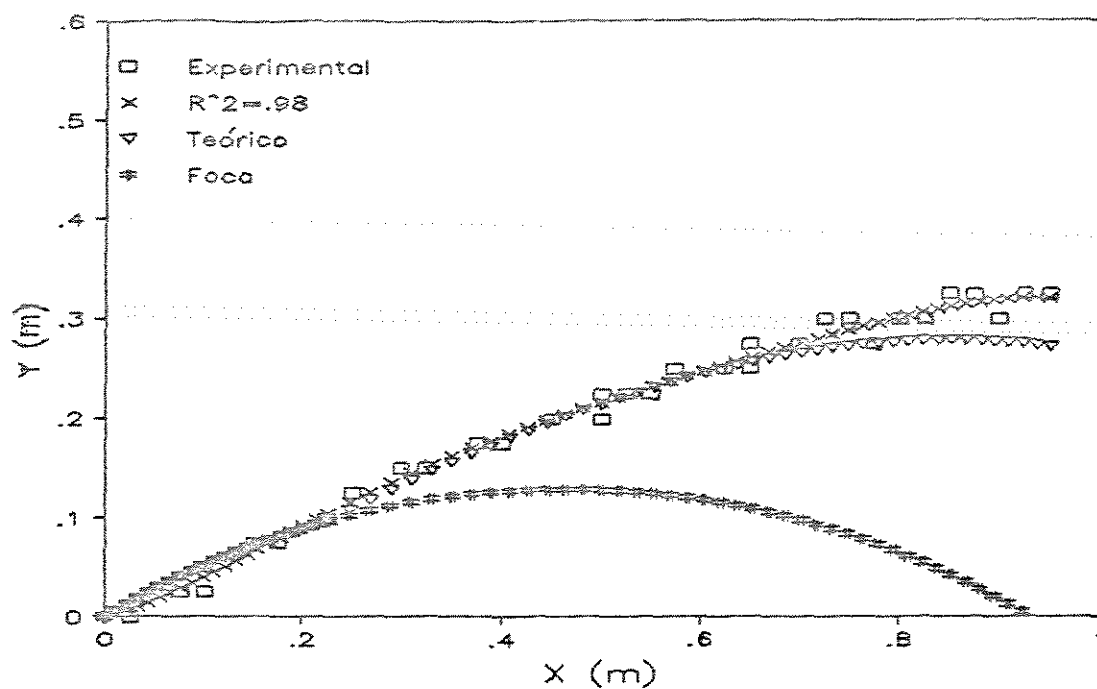


FIGURA 6.8 - Trajetórias de lançamento na condição U68A+00.

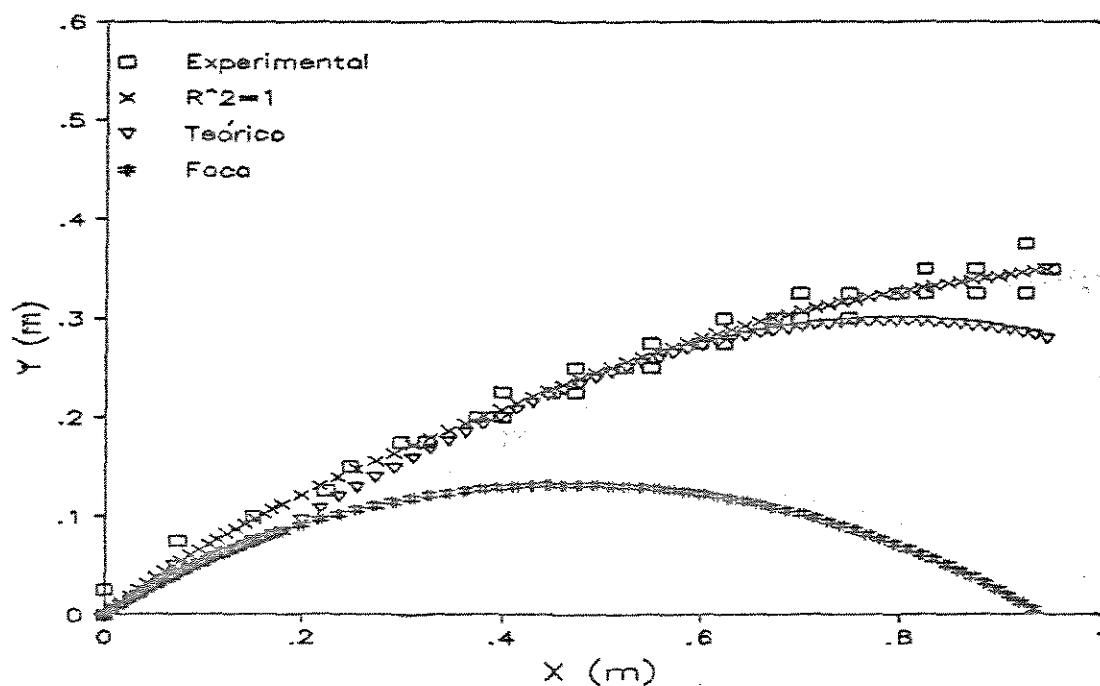


FIGURA 6.9 - Trajetórias de lançamento na condição U68A-16.

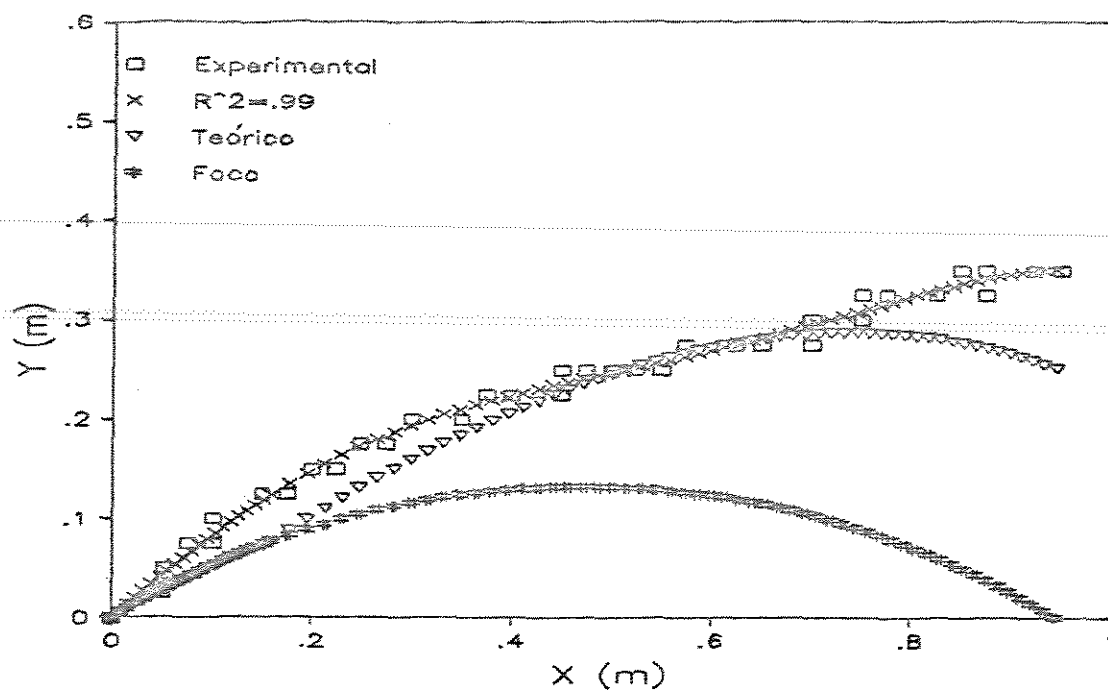


FIGURA 6.10 - Trajetórias de lançamento na condição U68A-31.

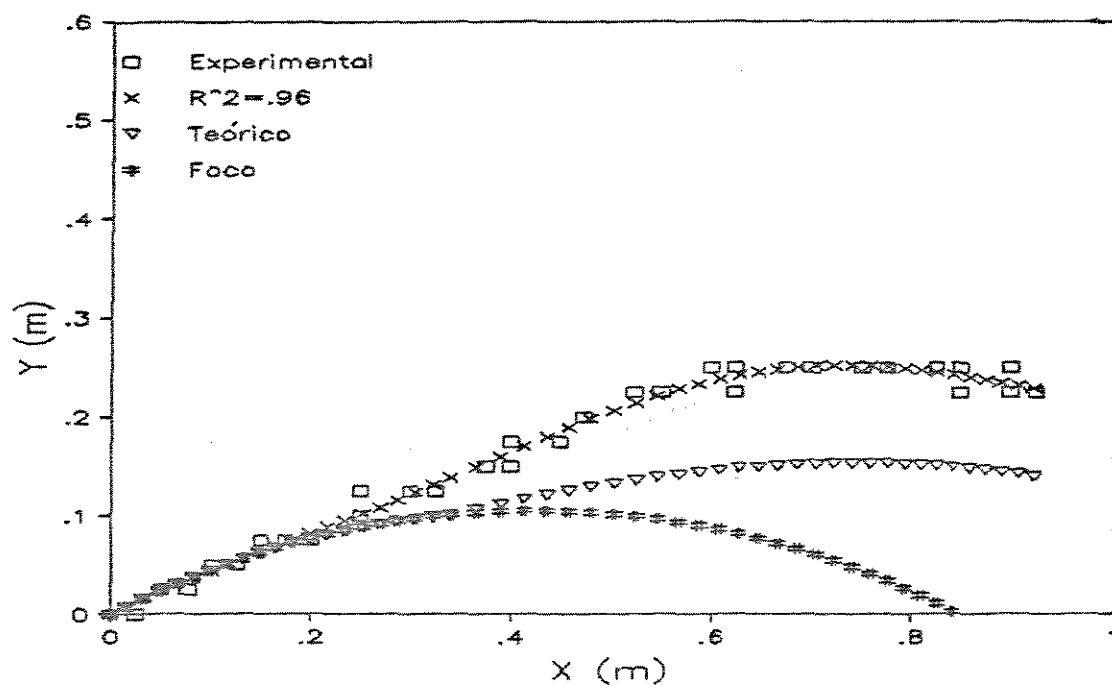


FIGURA 6.11 - Trajetórias de lançamento na condição U44A+28.

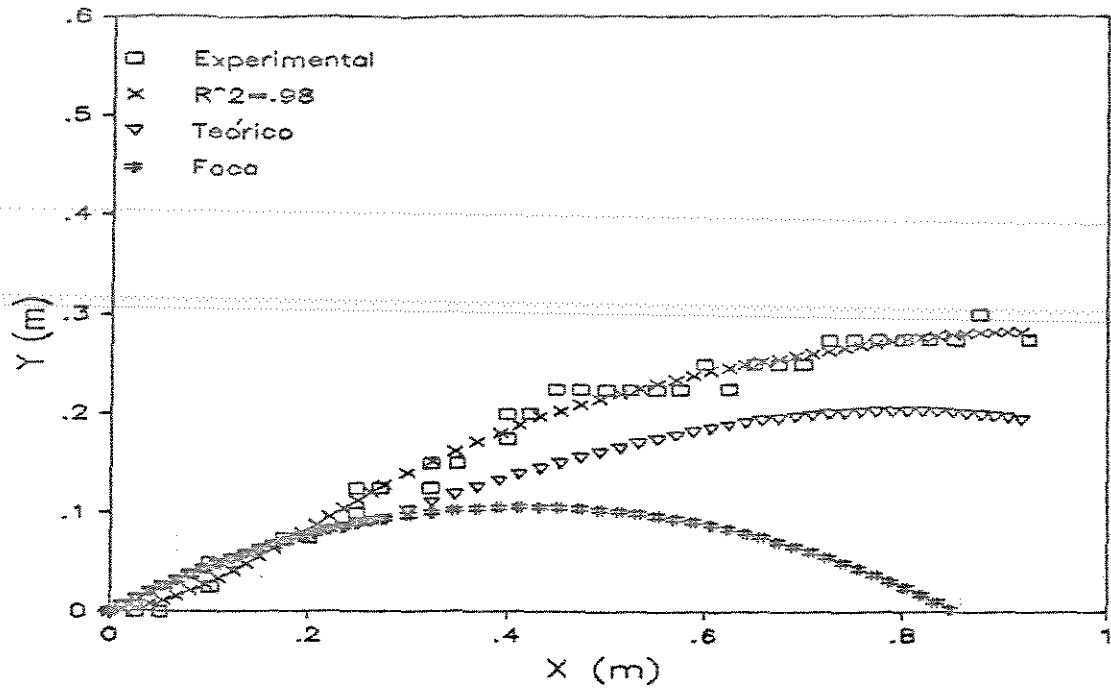


FIGURA 6.12 - Trajetórias de lançamento na condição U44A+13.

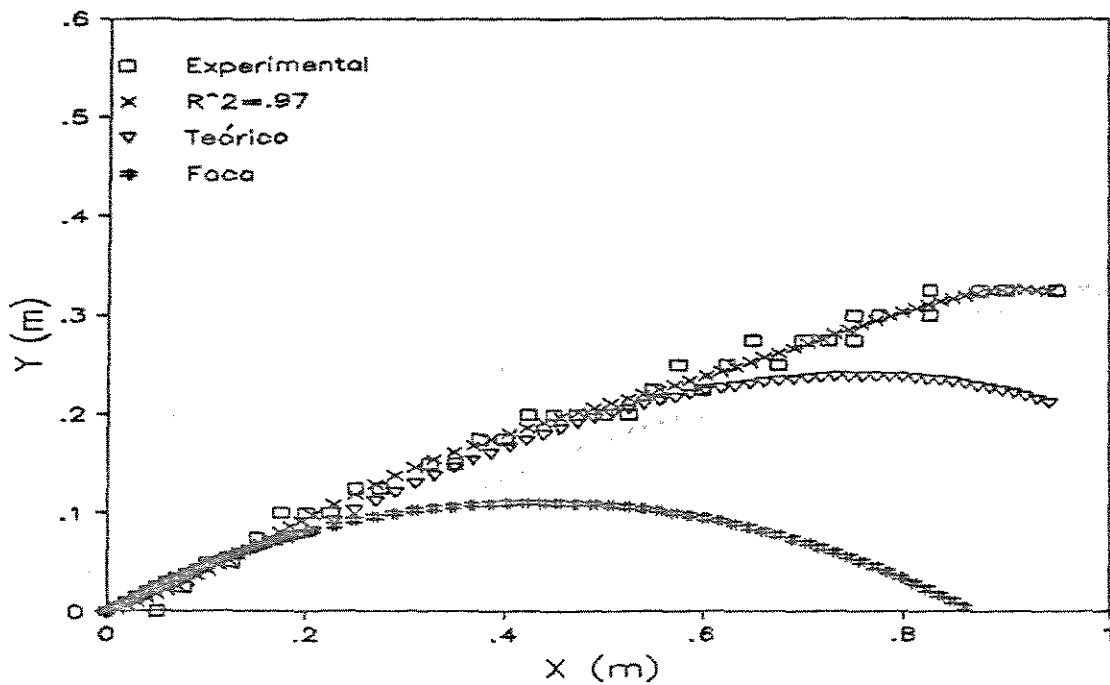


FIGURA 6.13 - Trajetórias de lançamento na condição U44A+00.

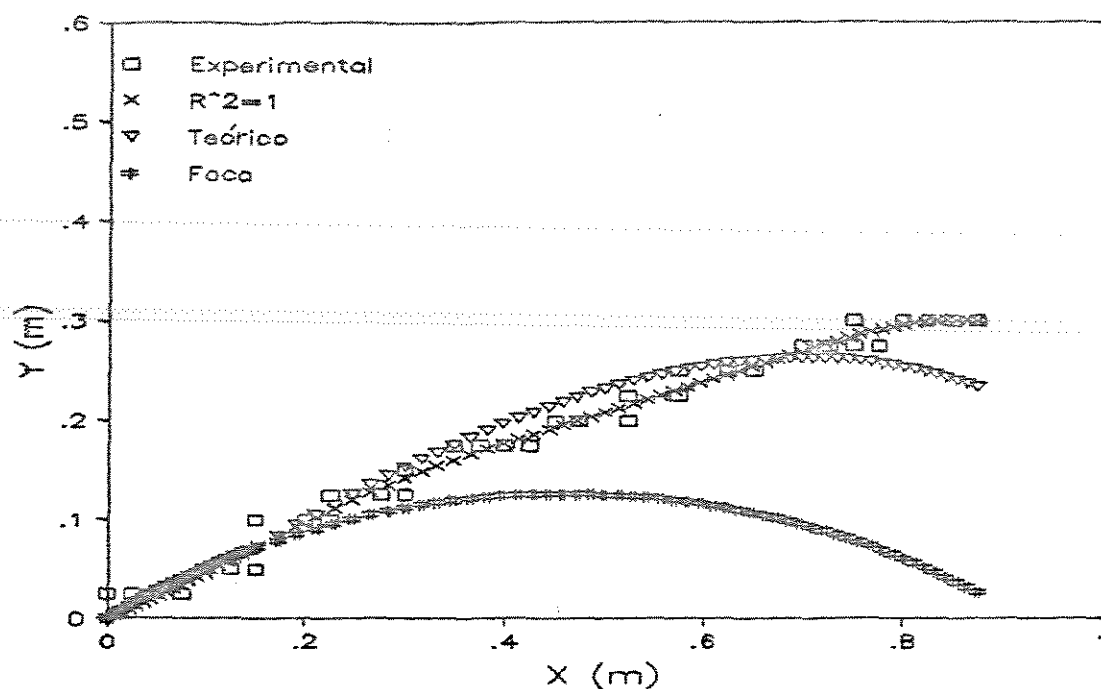


FIGURA 6.14 - Trajetórias de lançamento na condição U44A-18.

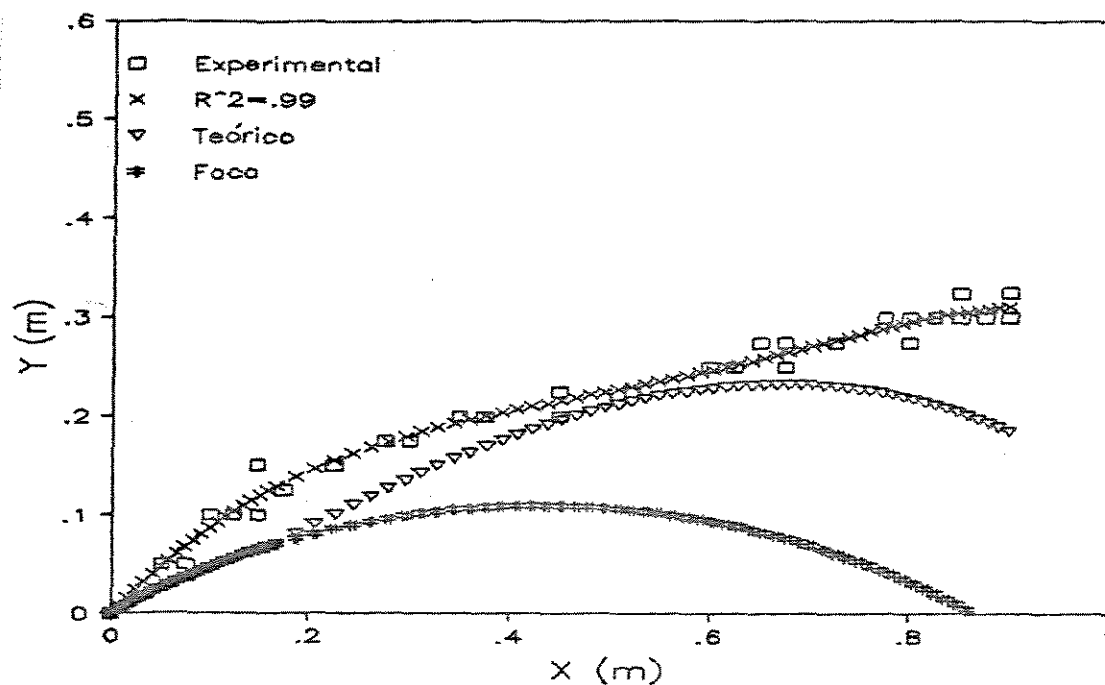


FIGURA 6.15 - Trajetórias de lançamento na condição U44A-31.

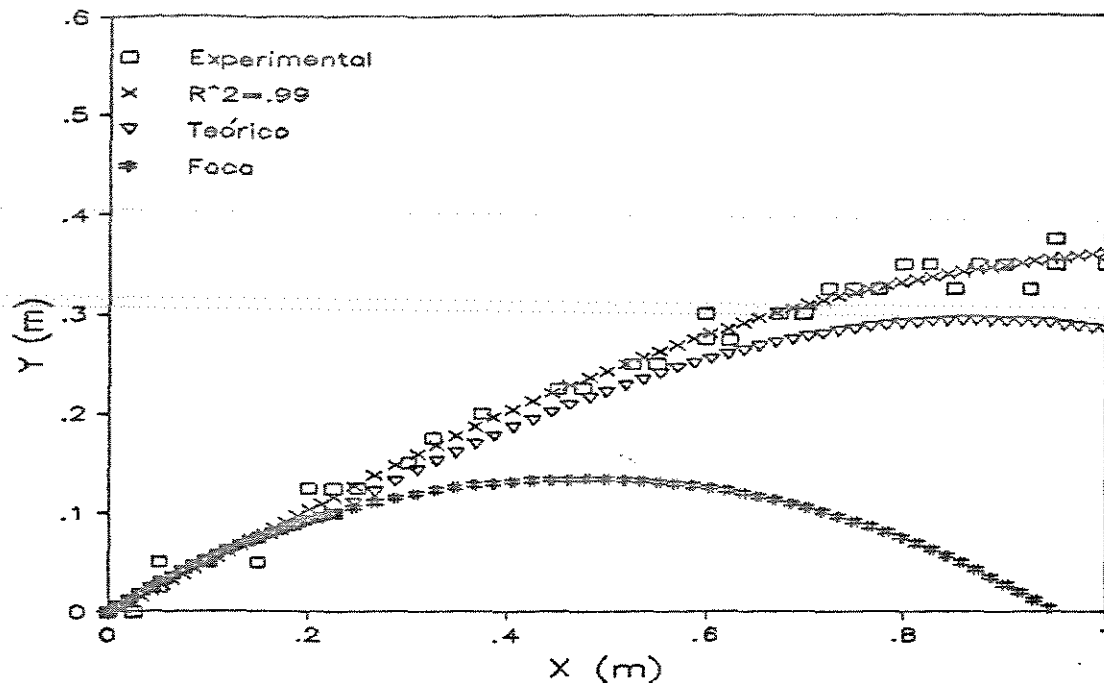


FIGURA 6.16 - Trajetórias de lançamento na condição U82A+00, $V_t < 4,2$ m/s.

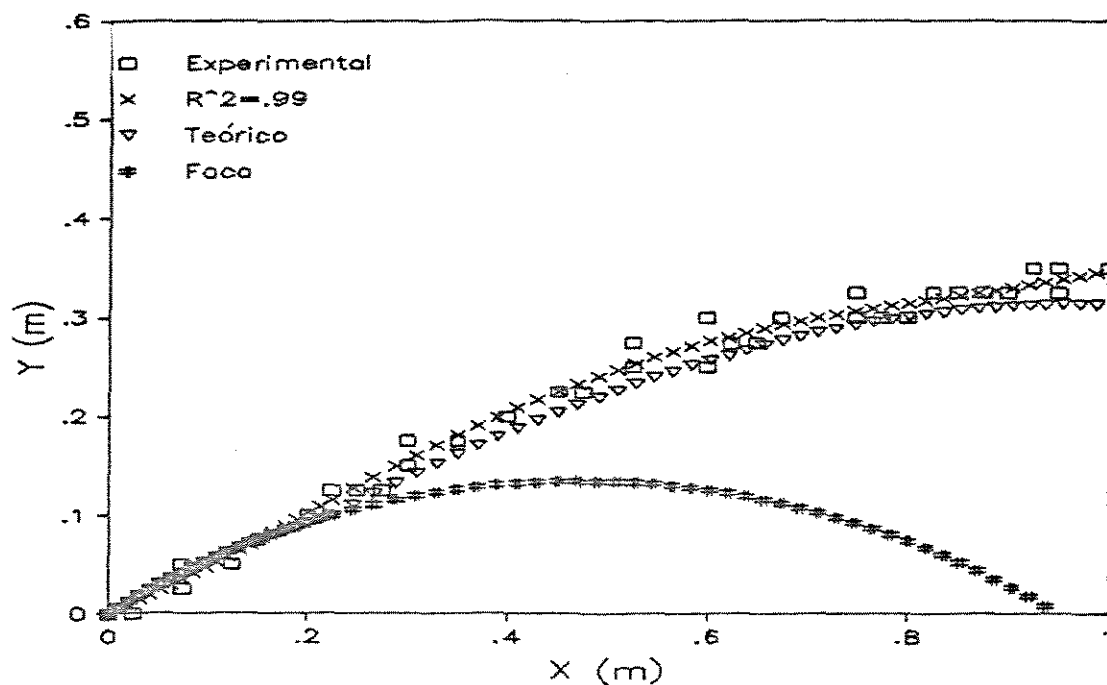


FIGURA 6.17 - Trajetórias de lançamento na condição U82A+00, $V_t = 5,4$ m/s.

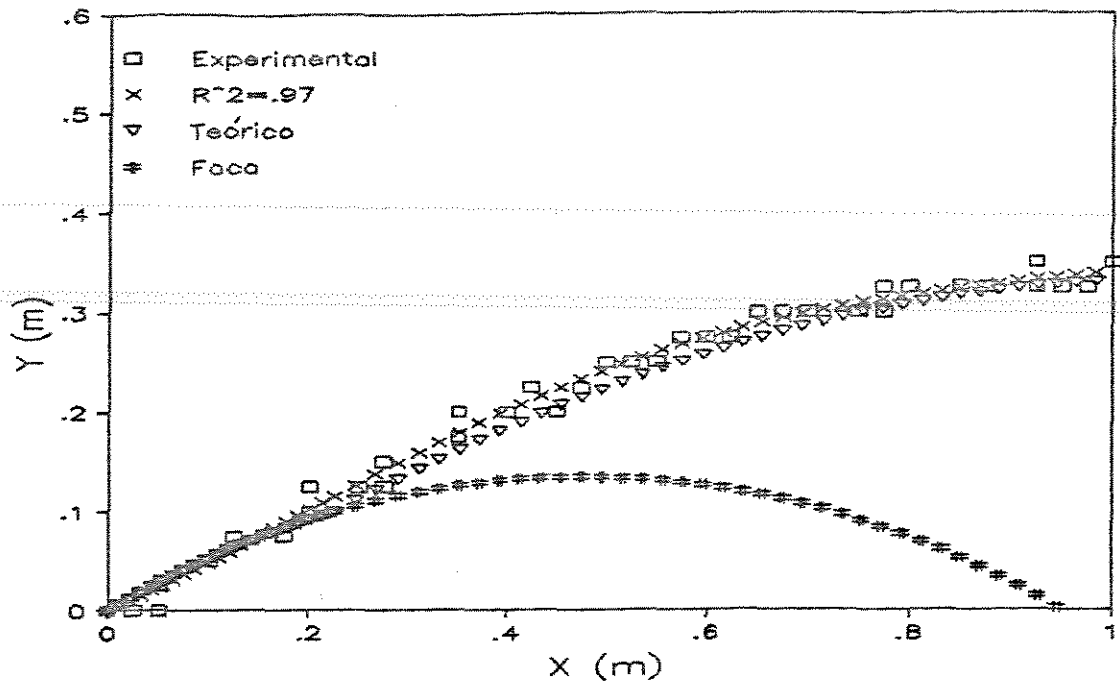


FIGURA 6.18 - Trajetórias de lançamento na condição U82A+00, $V_t = 7.6$ m/s.

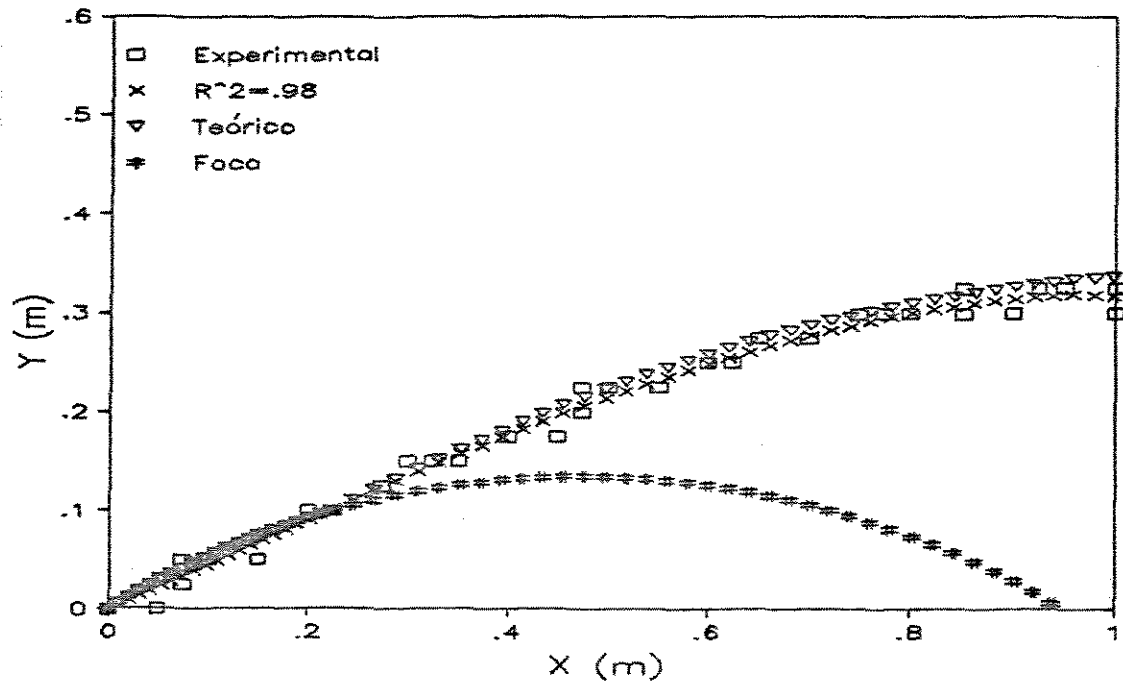


FIGURA 6.19 - Trajetórias de lançamento na condição U82A+00, $V_t = 9.1$ m/s.

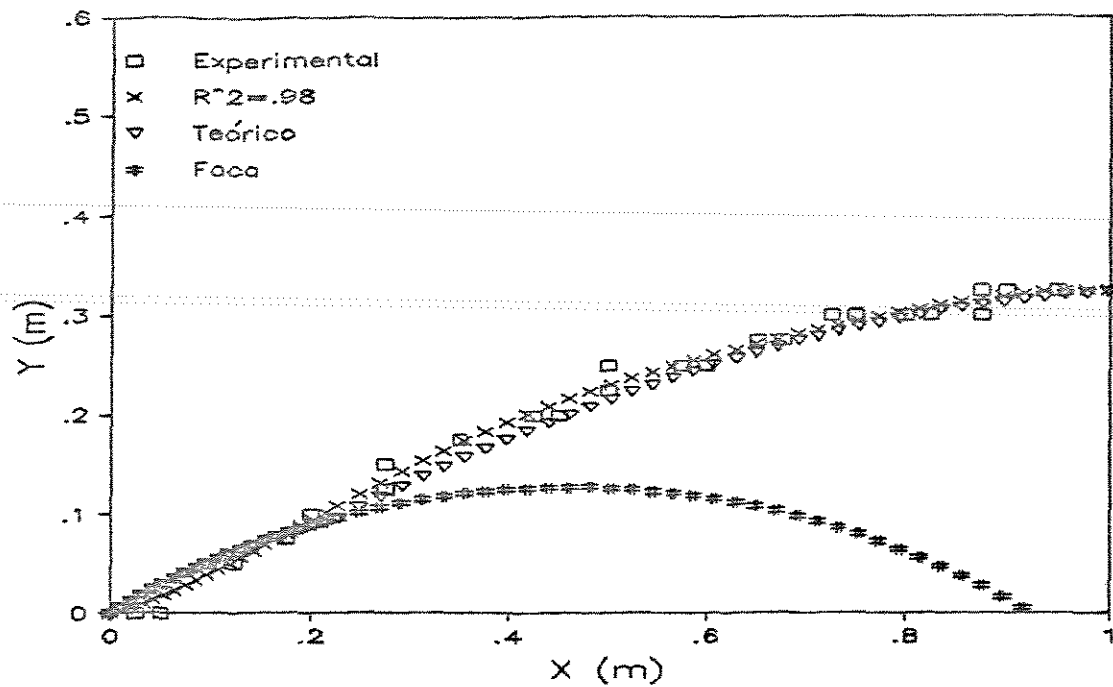


FIGURA 6.20 - Trajetórias de lançamento na condição U82A+00, $V_t = 10,9$ m/s.

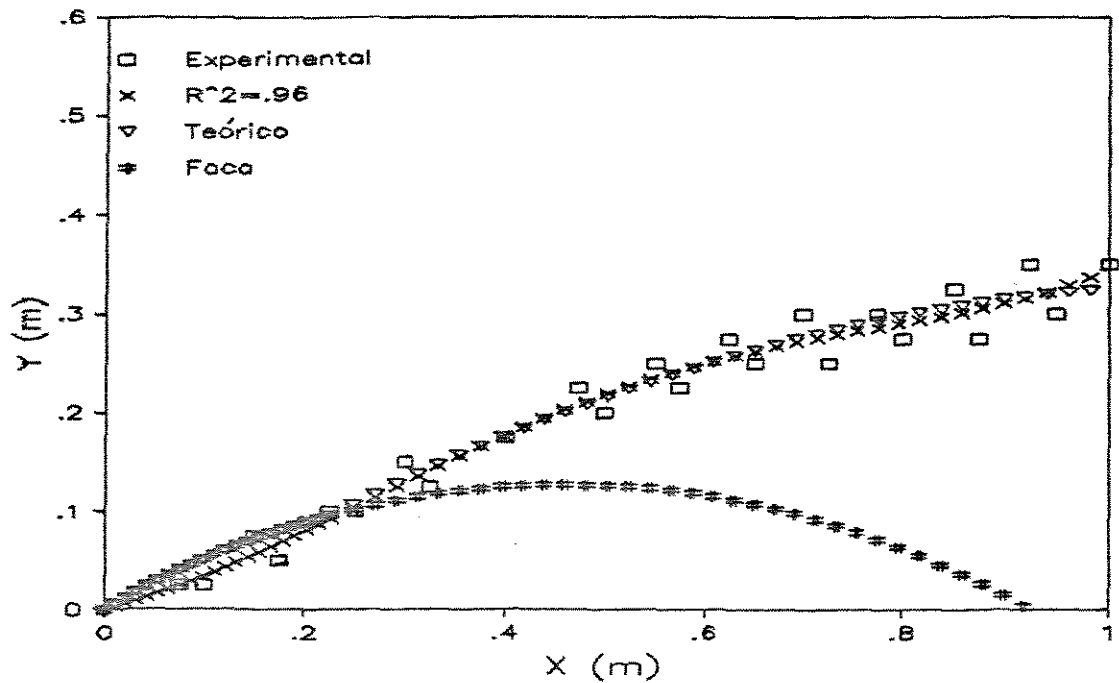


FIGURA 6.21 - Trajetórias de lançamento na condição U82A+00, $V_t > 12,1$ m/s.

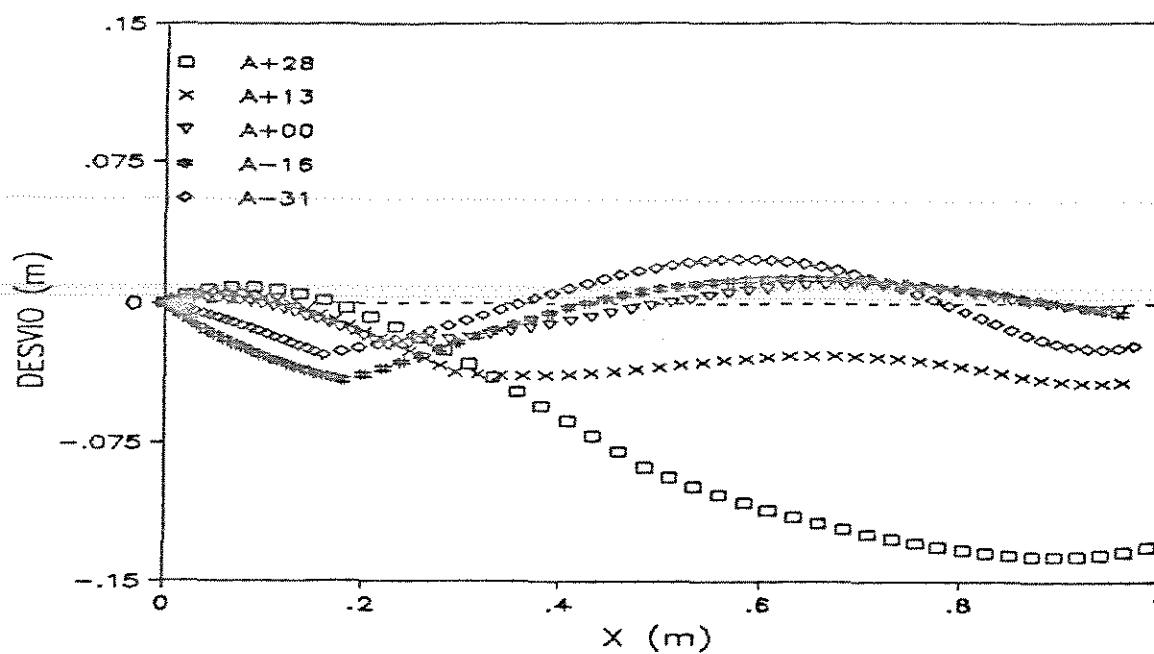


FIGURA 6.22 - Diferença entre trajetória experimental e teórica na condição U81.

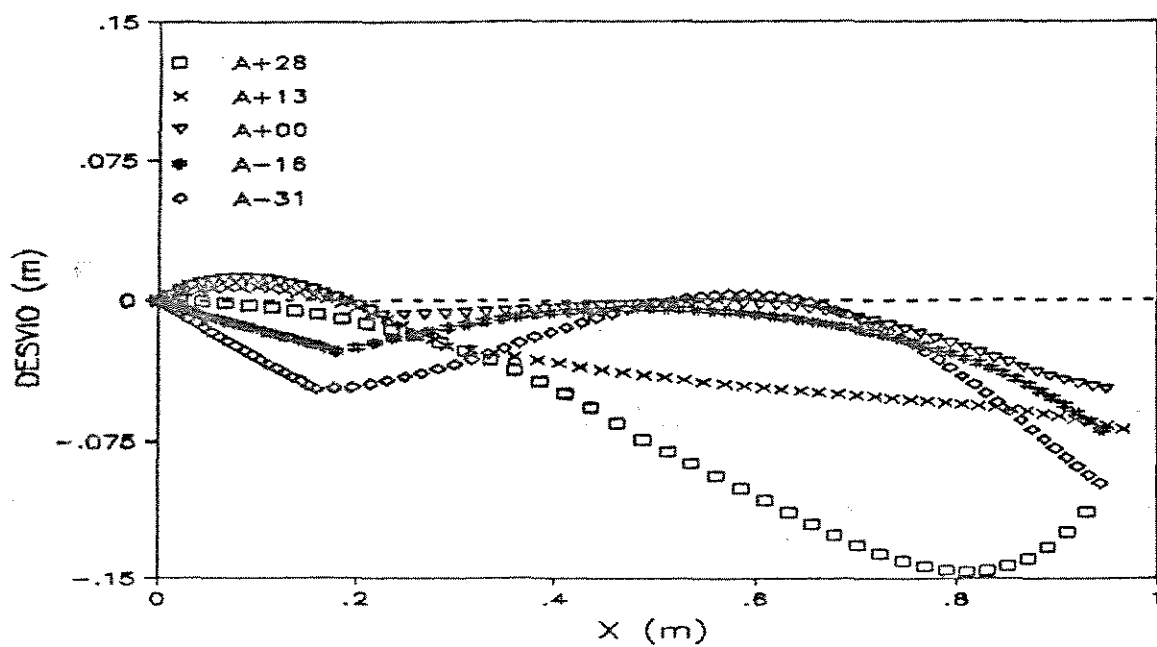


FIGURA 6.23 - Diferença entre trajetória experimental e teórica na condição U68.

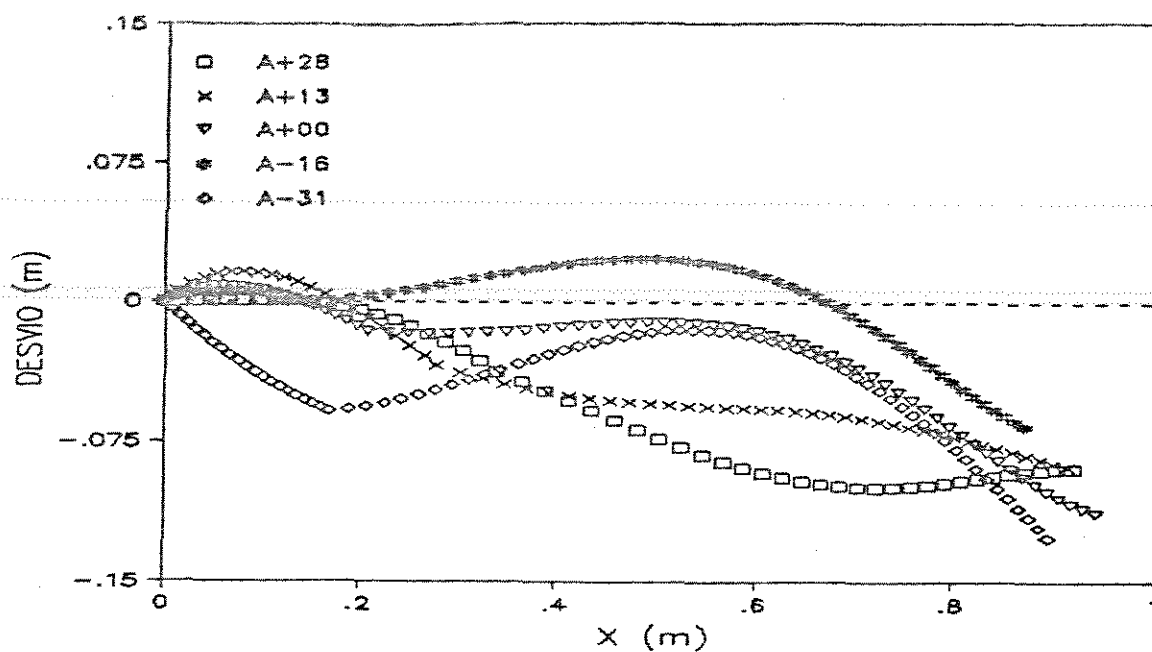


FIGURA 6.24 - Diferença entre trajetória experimental e teórica na condição U44.

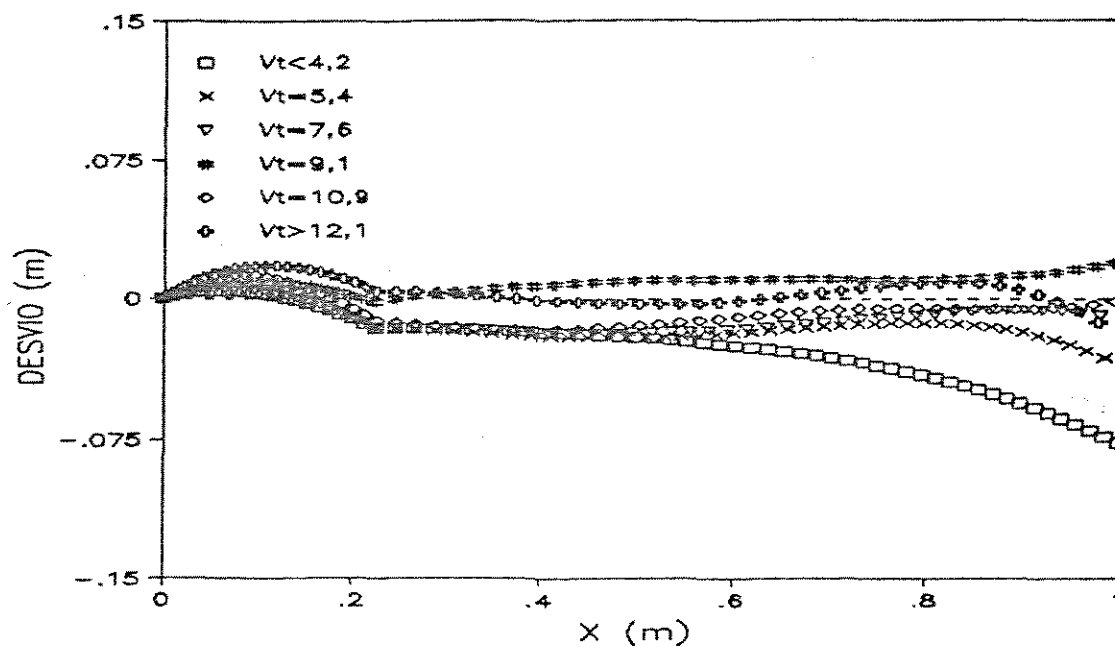


FIGURA 6.25 - Diferença entre trajetória experimental e teórica na condição U82A+00.

6.2 DISTANCIA DE LANÇAMENTO

Foram calculadas as distâncias teóricas alcançadas pela torta, desde a sua liberação da carenagem até atingir a cota mínima (piso do laboratório), a uma altura de 1,965 m, denominadas de L_{max} . Os L_{max} experimentais e os teóricos são apresentados nas tabelas 6.5 a 6.7. O L_{max} experimental foi medido somando-se a distância D da torta, no piso, até o centro de rotação do lançador, com a distância desse ponto até o extremo da carenagem. A distância D foi obtida da média de três repetições e a mínima divisão da escala foi de 0,25 m.

Foi calculado o valor de L_{max} com valores de β_o , V_o , x_i e y_i pertencentes à curva experimental ajustada, no ponto de saída da torta da faca. As coordenadas x_i e y_i

TABELA 6.5 - Distâncias atingidas pelo lançamento da sub-amostra U81.

Posição da faca	L_{max}		Desvio (%)
	Teórico (m)	Experimental (m)	
A+28	3,26	3,73	12,7
A+13	3,19	3,47	8,1
A+00	3,01	3,65	17,6
A-16	2,81	3,81	26,2
A-31	2,66	3,72	28,6

TABELA 6.6 - Distâncias atingidas pelo lançamento da sub-amostra U68.

Posição da faca	L_{max}		Desvio (%)
	Teórico	Experimental	
	(m)	(m)	
A+28	2,44	2,80	13,0
A+13	2,26	2,72	16,8
A+00	2,12	2,72	21,9
A-16	1,97	2,47	20,1
A-31	1,88	2,39	21,2

TABELA 6.7 - Distâncias atingidas pelo lançamento da sub-amostra U44.

Posição da faca	L_{max}		Desvio (%)
	Teórico	Experimental	
	(m)	(m)	
A+28	2,03	2,51	19,2
A+13	1,94	2,43	19,9
A+00	1,80	2,35	23,4
A-16	1,67	2,38	29,9
A-31	1,65	1,93	14,6

foram lidas do ANEXO D, utilizando-se o ponto em que a diferença entre as ordenadas y experimental e y da ponta da faca foi em torno de 25 mm (1/2 quadro de referência).

O valor de β_o foi obtido calculando-se o ângulo entre a tangente à curva no ponto referido e a direção horizontal. O valor da velocidade V_o foi calculado dividindo-se a velocidade periférica da faca pelo cosseno da diferença entre o ângulo β_o e o ângulo formado entre a tangente à ponta da faca e a direção horizontal no ponto x_t e y_t . As tabelas 6.8 a 6.10 apresentam estes valores de β_o , V_o , x_t e y_t .

Este procedimento possibilita calcular o alcance L_{max} com condições iniciais obtidas da curva de trajetória experimental, excluindo-se o efeito referente à trajetória do material dentro da faca.

TABELA 6.8 - Valores da curva ajustada para a sub-amostra U81 no ponto de descarga.

Posição da faca	A+28	A+13	A+00	A-16	A-31
β_o (°)	26,9	26,5	26,8	34,9	30,0
V_o (m/s)	4,9	4,9	4,8	4,8	4,8
x_t (m)	0,282	0,247	0,245	0,088	0,151
y_t (m)	0,143	0,129	0,136	0,073	0,100

TABELA 6.9 - Valores da curva ajustada para a sub-amostra U68 no ponto de descarga.

Posição da faca	A+28	A+13	A+00	A-16	A-31
β_o (°)	19,9	25,1	24,5	27,2	38,0
V_o (m/s)	4,8	4,9	4,9	4,8	4,9
x_t (m)	0,309	0,315	0,310	0,170	0,086
y_t (m)	0,143	0,150	0,145	0,107	0,073

TABELA 6.10 - Valores da curva ajustada para a sub-amostra U44 no ponto de descarga.

Posição da faca	A+28	A+13	A+00	A-16	A-31
β_o (°)	22,6	28,7	26,2	22,8	40,5
V_o (m/s)	4,9	5,0	4,9	4,8	4,9
x_t (m)	0,305	0,265	0,249	0,282	0,058
y_t (m)	0,124	0,121	0,119	0,135	0,054

As tabelas 6.11 a 6.13 apresentam os valores de L_{max} calculados a partir das tabelas 6.8 a 6.10, para as condições: sem resistência do ar, com as velocidades terminais obtidas da classificação no túnel vertical (6,6,

4,0 e 3,4 m/s) e com velocidades terminais estimadas para minimizar os desvios (10,7, 5,1 e 4,4 m/s). O valor de velocidade terminal de 10.000 m/s foi utilizado para o alcance da torta sem resistência do ar, referência de máximo alcance, ou através de BERNACKI et alli (1972).

Os valores de L_{max} teóricos (tabelas 6.5 à 6.7) e os calculados com as velocidades terminais obtidas no túnel vertical (6,6, 4,0 e 3,4 m/s), porém com condições iniciais estimadas da curva experimental, apresentam desvios máximos de aproximadamente 0,25 m. Ambos atingem cerca de 0,5 m a menos que o L_{max} experimental. Este fato sugere que as velocidades terminais utilizadas no cálculo do L_{max} são menores do que as reais, o qual é coerente com os desvios de trajetória discutidos no item 6.1. Portanto,

TABELA 6.11 - Distâncias atingidas pelo lançamento da sub-amostra U81 com condições iniciais da curva ajustada.

Posição da faca	L_{max}		
	$V_t = 6,6 \text{ m/s}$ (m)	$V_t = 10,7 \text{ m/s}$ (m)	$V_t = 10.000 \text{ m/s}$ (m)
A+28	3,11	3,72	3,89
A+13	3,06	3,66	3,87
A+00	3,05	3,65	3,85
A-16	2,81	3,41	3,84
A-31	2,91	3,51	3,84

TABELA 6.12 - Distâncias atingidas pelo lançamento da sub-amostra U68 com condições iniciais da curva ajustada.

Posição da faca	L_{max}		
	$V_t = 4,0 \text{ m/s}$	$V_t = 5,1 \text{ m/s}$	$V_t = 10.000 \text{ m/s}$
	(m)	(m)	(m)
A+28	2,23	2,67	3,71
A+13	2,24	2,71	3,89
A+00	2,24	2,70	3,88
A-16	2,05	2,50	3,80
A-31	1,88	2,34	3,88

TABELA 6.13 - Distâncias atingidas pelo lançamento da sub-amostra U44 com condições iniciais da curva ajustada.

Posição da faca	L_{max}		
	$V_t = 3,4 \text{ m/s}$	$V_t = 4,4 \text{ m/s}$	$V_t = 10.000 \text{ m/s}$
	(m)	(m)	(m)
A+28	1,93	2,42	3,86
A+13	1,88	2,39	4,04
A+00	1,86	2,35	3,89
A-16	1,89	2,38	3,79
A-31	1,54	2,02	3,89

foram calculadas velocidades terminais para produzirem o mesmo alcance que o experimental.

Foram calculados valores de L_{max} referentes aos desvios minimizados que, em relação aos valores experimentais das tabelas 6.5 a 6.7, geraram um desvio máximo de 10,5%.

O fato da velocidade terminal medida no túnel ser menor que a necessária para se atingir o alcance medido pode ser justificado por uma ligeira secagem e desintegração da torta dentro do túnel, superior àquela que ocorre no lançamento, produzindo partículas mais finas e com conseqüente menor velocidade terminal.

Outra possibilidade é que o efeito da quantidade de partículas em batelada, superior à existente na "nuvem rala" do túnel vertical, altere o Rey e o coeficiente de arrasto das partículas.

De acordo com KIKER & ROSS (1966), também ocorreu variação do coeficiente de arrasto em função do Rey e do grau de turbulência para material granular se deslocando confinado em um duto de descarga vertical.

STRAUSS (1975) estudou a interação entre as partículas presentes em correntes de gás. Estas são consideráveis e irão aumentar a resistência do fluido ao movimento das partículas, mesmo para baixas concentrações volumétricas.

O movimento de um grupo de partículas em um fluido não confinado, resulta em movimento de partículas em torno do grupo. Quando as partículas estão suficientemente próximas, ou coesas, o fluido entre as partículas move-se

com elas e o grupo pode ser considerado como uma nuvem. Quando as partículas estão suficientemente separadas, ou sem coesão, ou seja existem vazios, então o fluido move-se entre elas. Na prática ocorre uma situação intermediária entre grupos e partículas individuais. Porém, o fenômeno é bastante complexo de ser quantificado. Em geral nuvens densas tendem a se mover mais rapidamente e grupos unidos por paredes tendem a se mover mais devagar.

Assim, pode ocorrer uma variação do coeficiente de arrasto dentro do túnel vertical, bem como na trajetória devido à presença de batelada de partículas, que pode aumentar a sua velocidade terminal.

6.3 RESULTADOS COMPARATIVOS

As curvas experimentais de cada sub-amostra, com os cinco ângulos de faca utilizados, foram ilustradas nas figuras 6.26 a 6.29 para efeito comparativo.

Observa-se destas figuras que, para abscissas na faixa de 0 a 1 m, não ocorreram diferenças significativas, menores que um quadrículo (50 mm) entre as trajetórias experimentais correspondentes aos diversos ângulos de faca testados. Teoricamente, tais diferenças deveriam ser mais significativas, principalmente devido ao efeito dos ângulos de faca positivos. Para as posições A+26, por exemplo, o abaixamento esperado desta curva em relação ao medido deveria ser de 140 mm.

As curvas teóricas geradas pela simulação do lançamento das sub-amostras até atingirem o piso foram

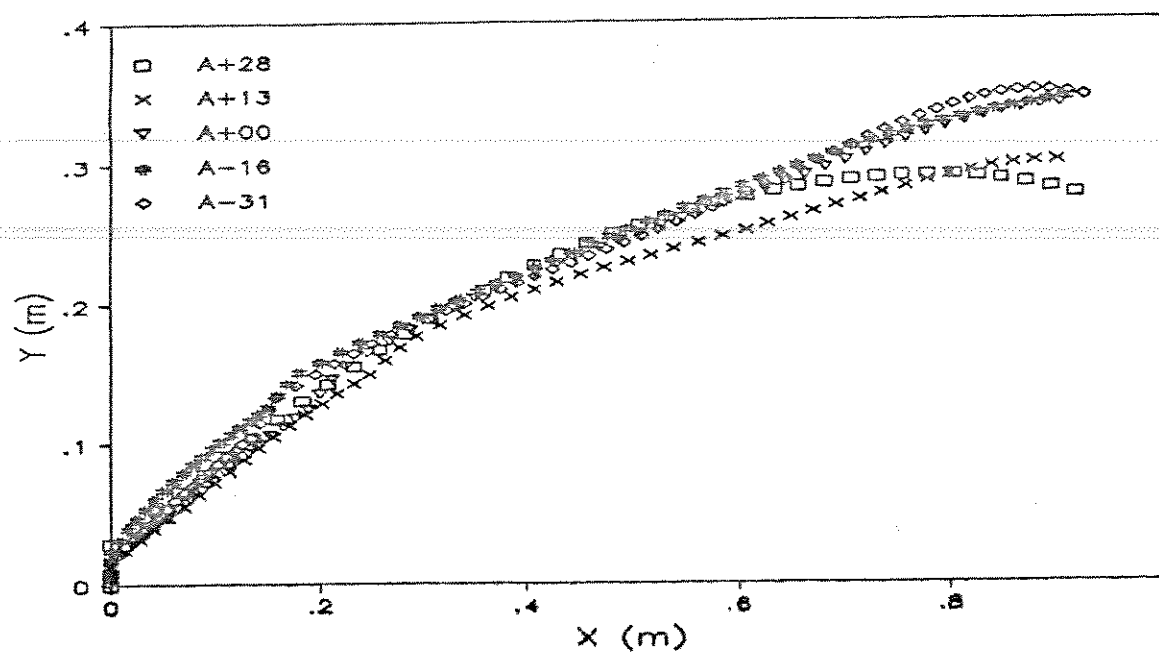


FIGURA 6.26 - Curvas experimentais da condição U81.

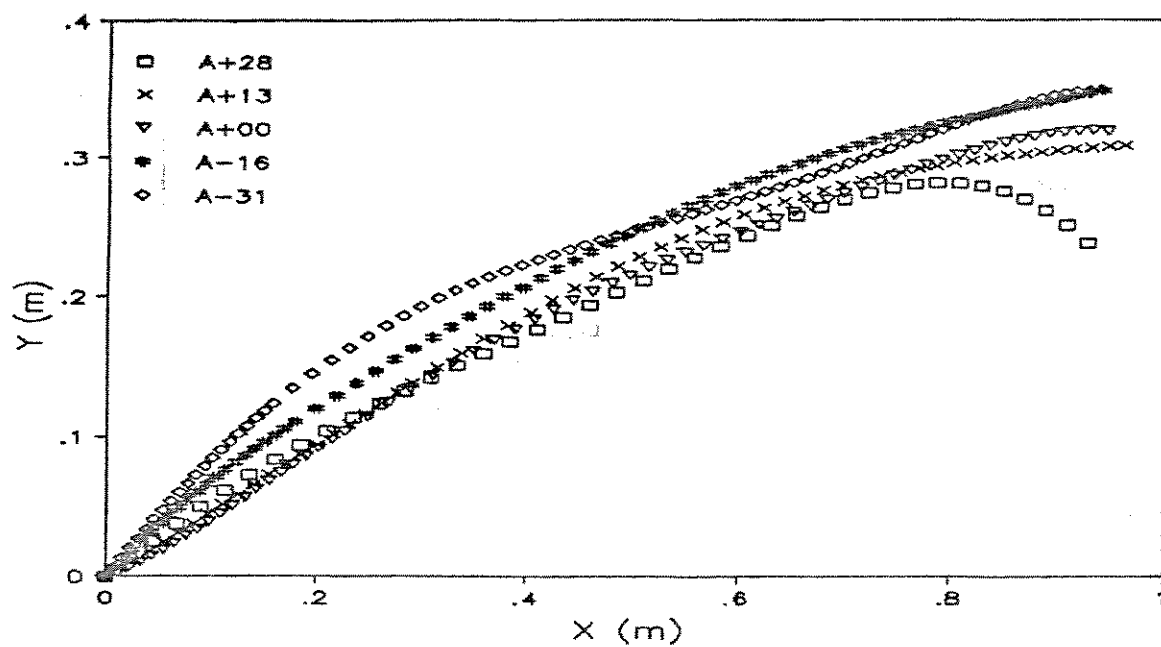


FIGURA 6.27 - Curvas experimentais da condição U68.

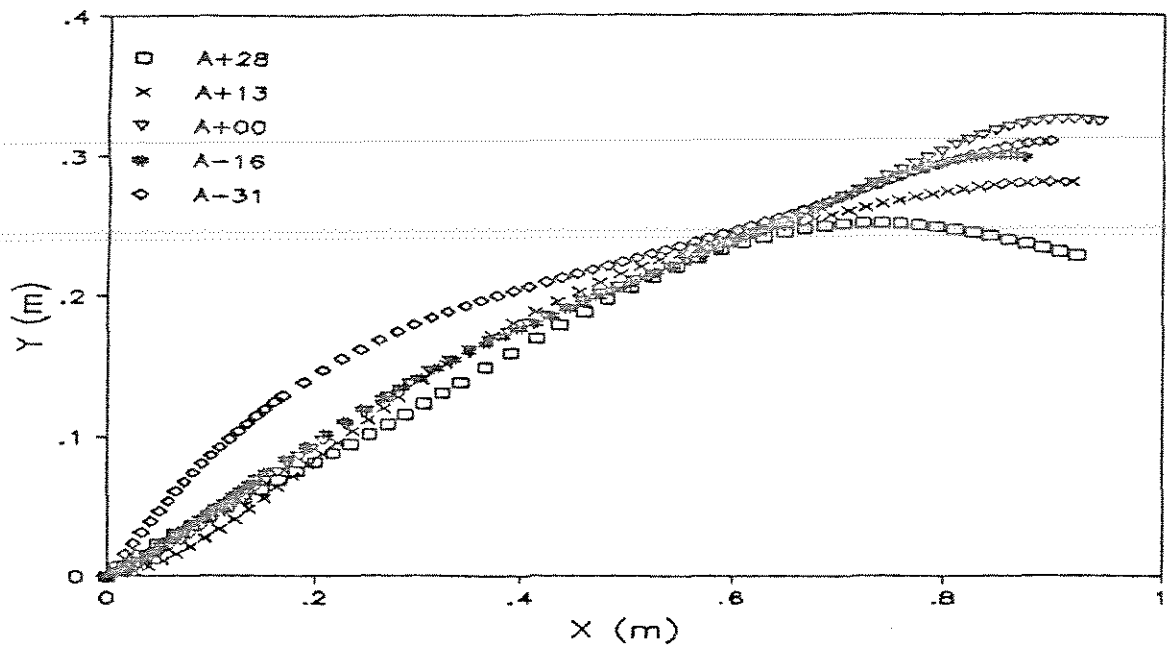


FIGURA 6.28 - Curvas experimentais da condição U44.

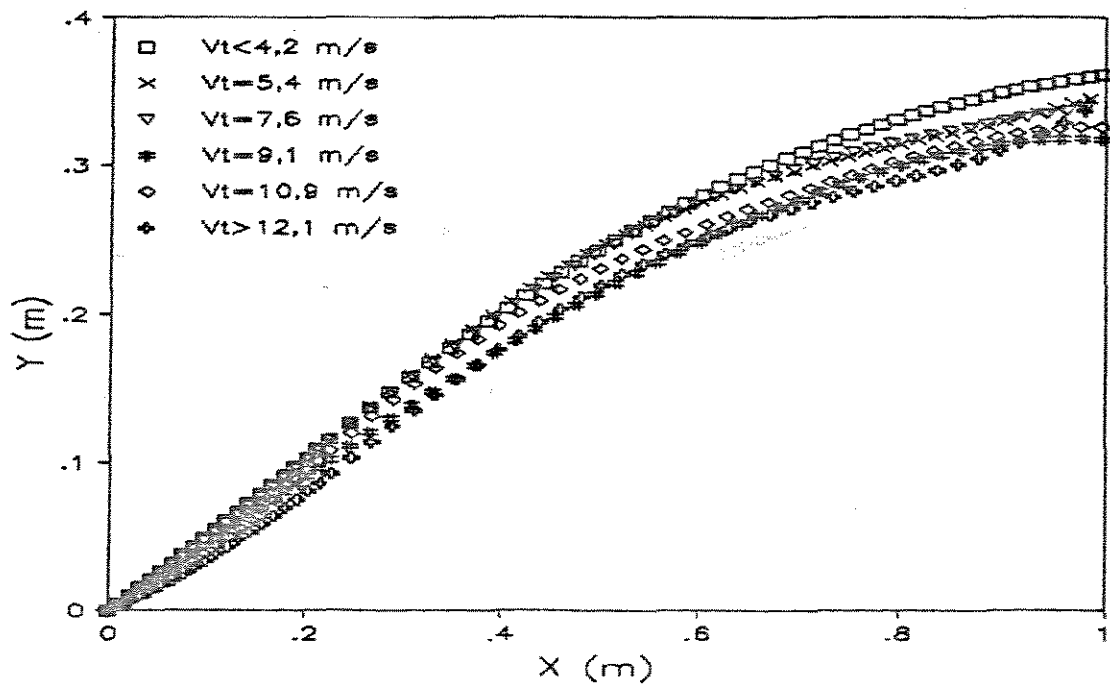


FIGURA 6.29 - Curvas experimentais das condições U82.

comparadas nas figuras 6.30 a 6.33 para todos os ângulos de faca regulados. Os valores iniciais do lançamento são os das tabelas 6.1 a 6.4.

Em termos de L_{max} , o alcance da torta varia pouco em relação aos ângulos de lançamento β_0 e velocidades de lançamento V_0 estudadas. Por outro lado, as velocidades terminais utilizadas produzem diferenças significativas no alcance. Entre as figuras 6.30 e 6.32, com velocidades terminais de 6,6 e 3,4 m/s respectivamente, correspondente às sub-amostras com 81 e 44 % de umidade, o L_{max} sofre redução em torno de 0,8 m. Na figura 6.33, onde os ângulos e velocidades de lançamento são praticamente os mesmos para todas as curvas, a diferença do alcance L_{max} entre a torta classificada com velocidade terminal menor que 4,2

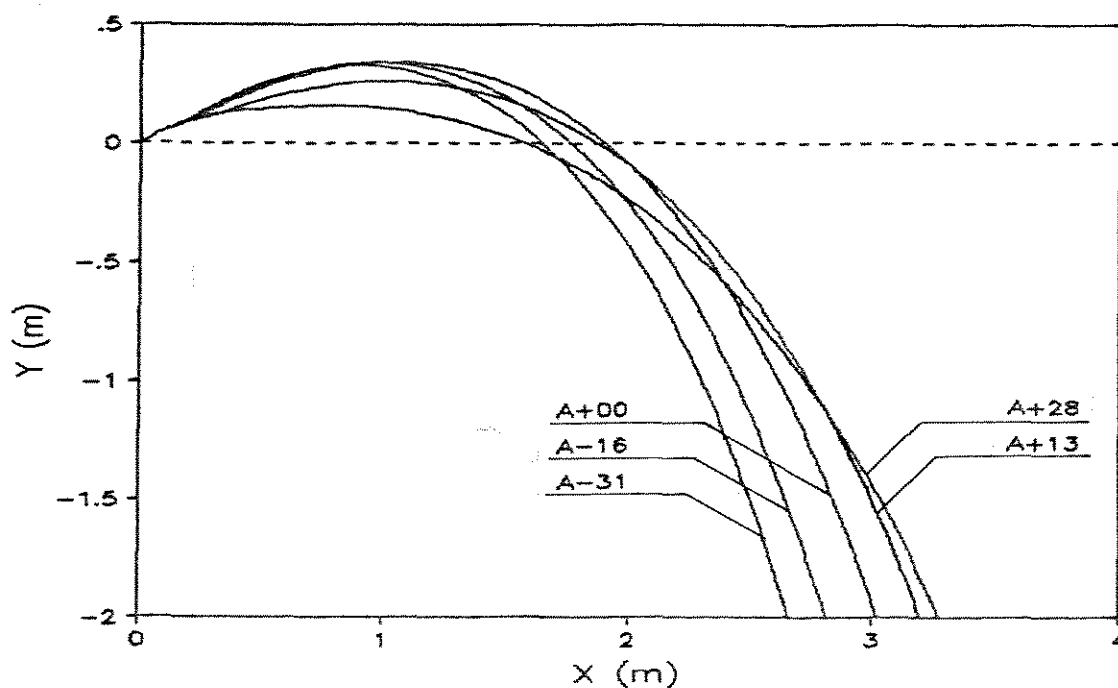


FIGURA 6.30 - Alcance para as curvas teóricas da condição U81.

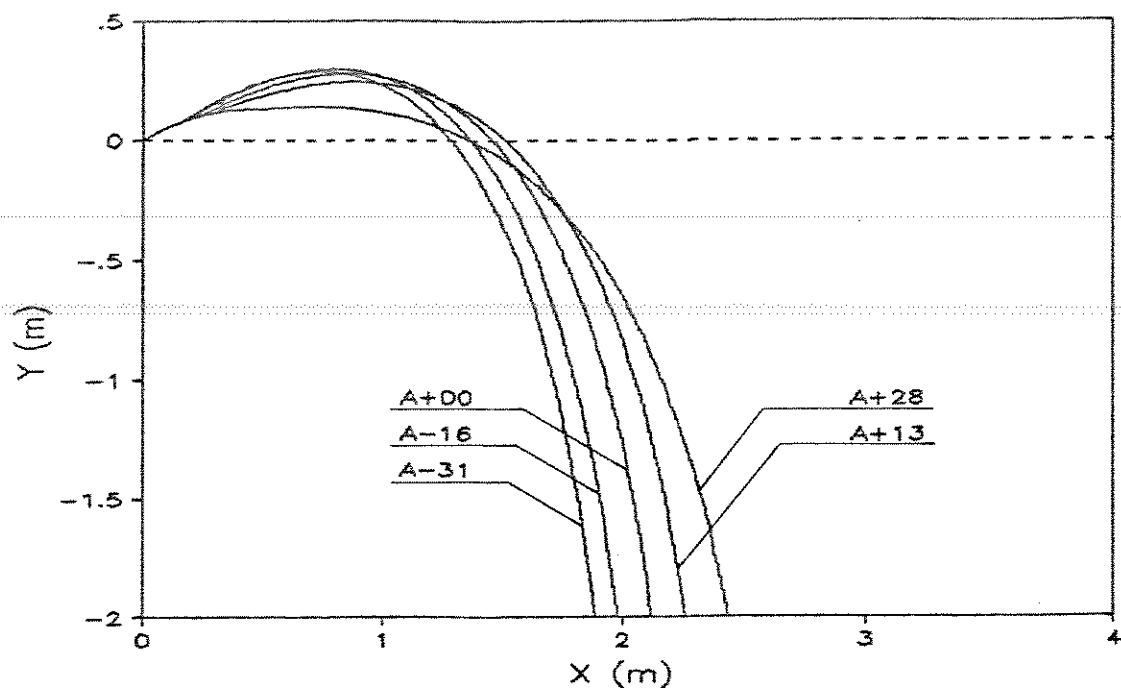


FIGURA 6.31 - Alcance para as curvas teóricas da condição U68.

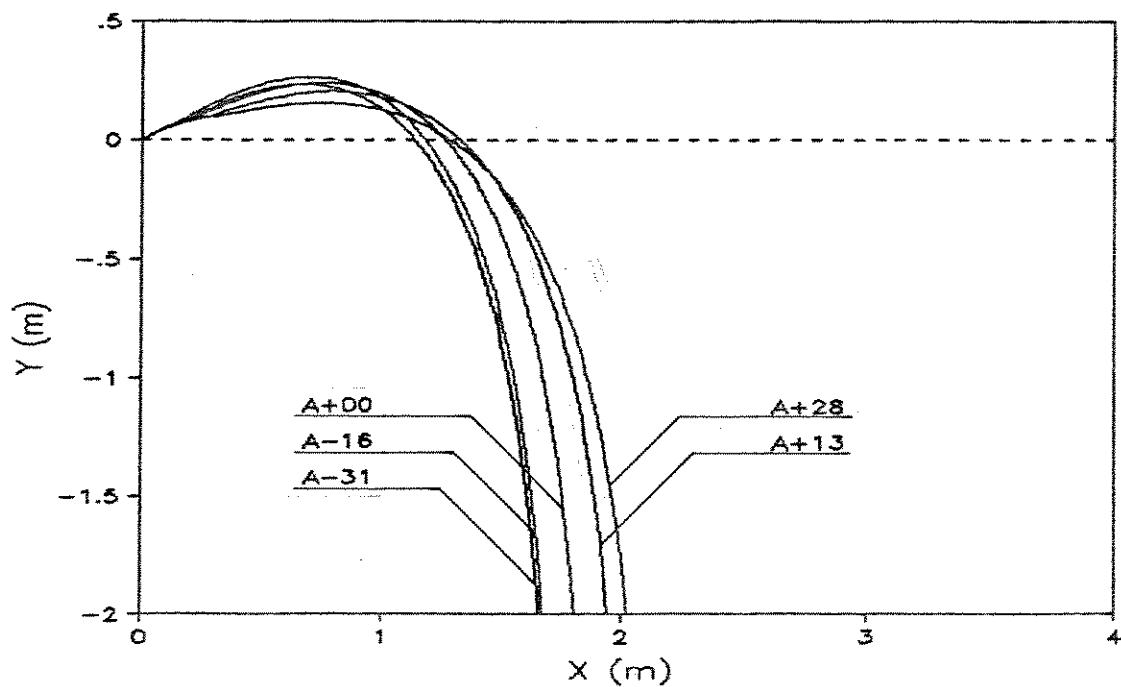


FIGURA 6.32 - Alcance para as curvas teóricas da condição U44.

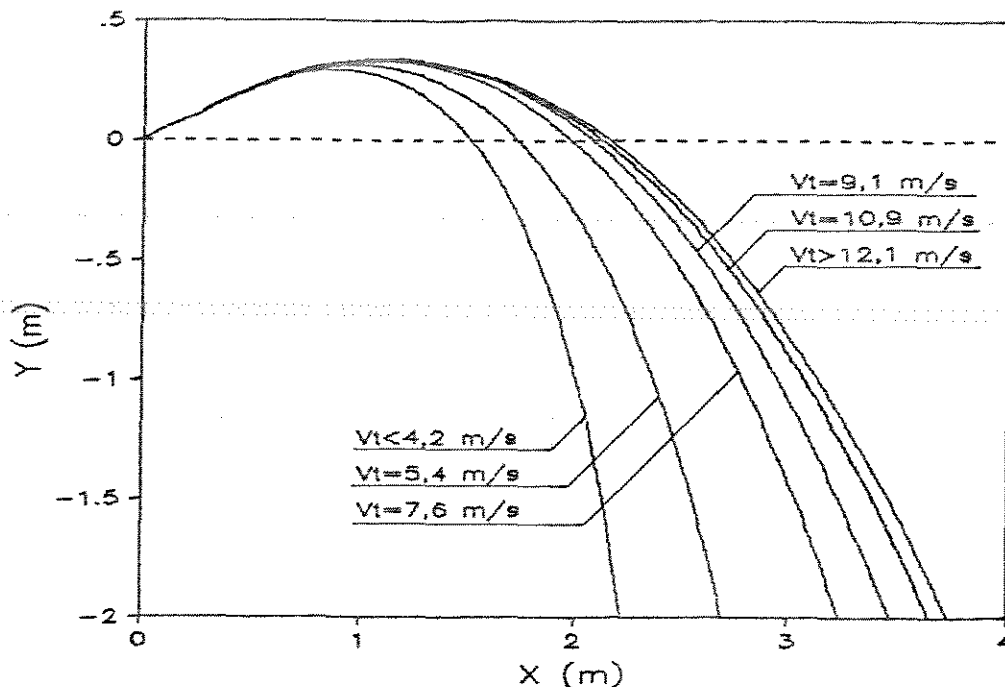


FIGURA 6.33 - Alcance para as curvas teóricas da condição U82.

m/s e maior que 12,1 m/s é ainda mais significativa. Esta diferença é de aproximadamente 1,7 m.

Teóricamente portanto, a redução do teor de umidade das sub-amostras de 82 para 44 % reduz significativamente o alcance da torta lançada. Esta afirmação é compatível com os alcances experimentais constantes nas tabelas 6.5 a 6.7, onde a diferença entre a média dos alcances experimentais das sub-amostras U81 e U44 está em torno de 1,4 m.

6.4 MÓDULO DE CAMPO

As avaliações qualitativas com o módulo de campo indicaram que a utilização dos três ângulos da carenagem

com a horizontal (45 , 58 e 71°) tiveram efeito visualmente significativo tanto na variação da trajetória de saída da torta como no alcance da torta no solo. O ângulo de 58° foi o que apresentou o maior alcance.

O ângulo θ de permanência da torta dentro da faca do rotor foi suficientemente pequeno para que a torta alimentada fosse lançada antes da faca iniciar o próximo ciclo de alimentação. O fato do material permanecer por mais de um ciclo dentro da faca até ser descarregado diminui a eficiência do rotor em termos energéticos. Ocorre consumo desnecessário de energia por atrito.

Sem a carenagem de aço, o próprio monte de torta faz o papel da carenagem. Porém, o monte atuando como carenagem define um ângulo de saída em relação à horizontal com variações, ou seja, a definição do ponto de início de descarga não é tão precisa como ocorre quando se tem a carenagem, que determina uma trajetória bem definida.

A altura do monte de torta atuando como carenagem, define o ponto de início de descarga. Observou-se desde a ocorrência de torta sendo liberada do rotor com ângulos β_0 negativos, abaixo da direção horizontal, até torta sendo lançada praticamente na direção vertical. Neste segundo caso, a torta era lançada prematuramente, não obtinha alcance suficiente para sair do rotor, sendo realimentada no rotor pela periferia da faca e descarregada a seguir. Este fato aumentou a dispersão da trajetória da torta no rotor sem a carenagem externa.

A medição da pressão do circuito hidráulico de

acionamento do rotor na rotação utilizada indicou uma demanda de torque em torno de 2200 N.m. Entretanto, em grande parte do tempo houve falta de torque e consequente diminuição da velocidade de rotação do rotor pela redução da vazão de óleo, resultante da abertura da válvula de alívio. Para as condições trabalhadas, estima-se que cerca de 4000 N.m sejam mais indicados.

7. CONCLUSÕES

As seguintes conclusões resultaram do desenvolvimento do presente trabalho:

7.1 - Os seguintes dados de projeto são satisfatórios para leiras de torta com umidades entre 82 e 44 % B.U. e formato triangular de 4 m de largura por 2 m de altura:

Rotor de facas radiais com 1,8 m de diâmetro externo, altura das facas de 0,12 m, número de facas igual a 16, velocidade periférica mínima de 5 m/s, preferivelmente com carenagem externa, produção de 1000 m³/h para velocidade de avanço de 260 m/h.

7.2 - As trajetórias geradas pelo modelo matemático derivadas de material granular são válidas para resíduos orgânicos nas condições experimentais dos lançamentos com ângulos de faca A+00, A-16 e A-31 para todas as umidades utilizadas. Os ângulos de faca positivos A+13 e A+28 apresentam desvios devido ao elevado tempo de permanência do material dentro da faca, fazendo com que para estes ângulos o material não deva ser modelado simplesmente como uma partícula.

7.3 - Durante a trajetória da torta no ar ocorre pulverização parcial da massa e aumento de sua área, semelhante ao pulverizador de líquidos.

7.4 - A velocidade terminal da nuvem de material lançado pela faca é superior à velocidade da nuvem em suspensão no túnel vertical. O agrupamento mais compacto das partículas no lançamento aumenta sua velocidade terminal em relação ao túnel vertical.

7.5 - A menor coesão entre as partículas da torta, provocada pela diminuição de umidade, conduz à redução de sua velocidade terminal.

7.6 - O alcance do material L_{max} , é mais influenciado pela velocidade terminal, relacionado ao teor de umidade, do que pelo conjunto velocidade V_0 e ângulo de lançamento com a horizontal β_0 . A redução do teor de umidade de 82 para 44 % reduz o alcance em 1,4 m aproximadamente.

7.7 - O lançador de material reproduz simplifiadamente o fenômeno de descarga das facas do rotor.

7.8 - A medição da velocidade terminal da torta através da sua filmagem em queda livre, utilizando-se filmadora com velocidade de gravação compatível com a velocidade medida, deve resultar em valores mais próximos dos verificados no lançamento.

7.9 - O ângulo de descarga θ é bastante sensível ao raio inicial do centro de massa da torta, R_i .

7.10 - A desagregação e aeração, condições necessárias à realização de uma boa compostagem, são conferidas à torta pela ação das facas do rotor e pelo espalhamento durante a trajetória no ar.

7.11 - A modificação do ângulo da carenagem provoca maior influência na trajetória e no alcance do material do que a mudança do ângulo da faca. O ângulo da carenagem em torno de 58° com relação a direção horizontal é a condição que produz o maior alcance.

7.12 - O rotor trabalhando nas condições em que se realizaram os testes de campo, descarrega a torta alimentada antes desta completar um ciclo dentro das suas facas. Sem a presença da carenagem ocorre aumento da dispersão da trajetória. O material permanece mais tempo dentro da faca devido à realimentação dos materiais lançados prematuramente. Em consequência, mais tempo é gasto dentro da faca até serem descarregados novamente, na parte inferior do rotor e próxima ao solo. Com a carenagem, o ponto de descarga é bem definido e o tempo de descarga é menor.

ANEXO A - RESOLUÇÃO DA TRAJETÓRIA DO MATERIAL DENTRO DA FACA.

SUB-AMOSTRA U81

Posição da faca A+28 A+13 A+00 A-16 A-31

CONDIÇÕES DE CONTOURNO

μ		.94	.94	.94	.94	.94
Ri	(m)	.862	.875	.876	.882	.89
$(dx/dteta)_i$		0	0	0	0	0
θ	(grau)	32.3	19.9	15.6	12.6	11.2
α_i	(grau)	26.37131	12.28501	.0902409	-14.7193	-28.1320
k		.4957803	.2177612	.0015750	-.262705	-.534668
b		.4273626	.1905411	.0013797	-.231706	-.475855
α_r	(grau)	27.9841	13.2882	.0982	-16.0615	-30.7808
n	(m)	.816	.81	.805	.81	.82
w	(rad/s)	5.235988	5.235988	5.235988	5.235988	5.235988
γ	(grau)	46.4	47.7	46.2	47.3	47.3

RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE POSIÇÃO DO MATERIAL DENTRO DA FACA

1a1		.4324431	.4324431	.4324431	.4324431	.4324431
1a2		-2.31244	-2.31244	-2.31244	-2.31244	-2.31244
B1		.3112579	.5597155	.7368962	.8667193	.8761522
B2		.0582074	.1046707	.1378048	.1620826	.1638466
X	(m)	.9055280	.9079214	.9036953	.9038610	.9076988
Y	(m)	.0215803	.0071690	.0000436	-.005743	-.009463
Re	(m)	.9057851	.9079497	.9036953	.9038792	.9077481

RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE VELOCIDADE

$(dx/dteta)_o$		.1352103	.1728566	.1886995	.1868002	.1712082
$(dy/dteta)_o$		.0670346	.0376415	.0002972	-.049073	-.091540
Vxo	(m/s)	.5949650	.8675385	.9878000	1.008154	.9459922
Vyo	(m/s)	5.092326	4.950955	4.733294	4.475658	4.273399

RESOLUÇÃO COM MATERIAL NO RAIO EXTERNO DA FACA

Bo	(grau)	6.663975	21.03884	28.68798	31.49416	32.68214
Vo	(m/s)	5.126965	5.026389	4.835268	4.587797	4.376853
Vx	(m/s)	5.092326	4.691316	4.241724	3.911985	3.683906
Vy	(m/s)	.5949650	1.804477	2.321119	2.396719	2.363404
Xt	(m)	.4841232	.2921996	.2234173	.1800620	.1591946
Yt	(m)	.1401928	.1124576	.1027605	.0843472	.0769577

SUB-AMOSTRA U68

Posicao da faca A+28 A+13 A+00 A-16 A-31

CONDIÇÕES DE CONTOURNO

μ		.94	.94	.94	.94	.94
Ri	(m)	.862	.875	.876	.882	.89
$(dx/dteta)i$		0	0	0	0	0
θ	(grau)	32.3	19.9	15.6	12.6	11.2
α_i	(grau)	26.37131	12.28501	.0902409	-14.7193	-28.1320
k		.4957803	.2177612	.0015750	-.262705	-.534668
b		.4273626	.1905411	.0013797	-.231706	-.475855
α_r	(grau)	27.9841	13.2882	.0982	-16.0615	-30.7808
n	(m)	.816	.81	.805	.81	.82
w	(rad/s)	5.235988	5.235988	5.235988	5.235988	5.235988
γ	(grau)	47.7	47.3	47.7	47.3	47.3

RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE POSIÇÃO DO MATERIAL DENTRO DA FACA

la1		.4324431	.4324431	.4324431	.4324431	.4324431
la2		-2.31244	-2.31244	-2.31244	-2.31244	-2.31244
B1		.3112579	.5597155	.7368962	.8667193	.8761522
B2		.0582074	.1046707	.1378048	.1620826	.1638466
X	(m)	.9055280	.9079214	.9036953	.9038610	.9076988
Y	(m)	.0215803	.0071690	.0000436	-.005743	-.009463
Re	(m)	.9057851	.9079497	.9036953	.9038792	.9077481

RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE VELOCIDADE

$(dx/dteta)_o$		.1352103	.1728566	.1886995	.1868002	.1712082
$(dy/dteta)_o$		.0670346	.0376415	.0002972	-.049073	-.091540
Vxo	(m/s)	.5949650	.8675385	.9878000	1.008154	.9459922
Vyo	(m/s)	5.092326	4.950955	4.733294	4.475658	4.273399

RESOLUÇÃO COM MATERIAL NO RAIO EXTERNO DA FACA

Bo	(grau)	5.363975	21.43884	27.18798	31.49416	32.68214
Vo	(m/s)	5.126965	5.026389	4.835268	4.587797	4.376853
Vx	(m/s)	5.104513	4.678604	4.301030	3.911985	3.683906
Vy	(m/s)	.4792806	1.837184	2.209289	2.396719	2.363404
Xt	(m)	.4871792	.2914074	.2260307	.1800620	.1591946
Yt	(m)	.1291732	.1144948	.0968769	.0843472	.0769577

SUB-AMOSTRA U44

Posição da faca A+20 A+13 A+00 A-16 A-31

CONDIÇÕES DE CONTOURNO

μ		.7	.7	.7	.7	.7
Ri	(m)	.875	.875	.88	.888	.89
$(dx/dteta)i$		0	0	0	0	0
θ	(grau)	22.6	18.7	14.1	10.7	11.6
α_i	(grau)	25.95004	12.28501	.0098307	-14.6176	-28.1320
k		.4866536	.2177612	.0015678	-.260809	-.534668
b		.4258219	.1905411	.0013797	-.231598	-.475855
α_r	(grau)	27.9841	13.2882	.0982	-16.0615	-30.7808
n	(m)	.816	.81	.805	.81	.82
w	(rad/s)	5.235988	5.235988	5.235988	5.235988	5.235988
δ	(grau)	50.8	50.7	50	48	50.2

RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE POSIÇÃO DO MATERIAL DENTRO DA FACA

la1		.5206556	.5206556	.5206556	.5206556	.5206556
la2		-1.92066	-1.92066	-1.92066	-1.92066	-1.92066
B1		.3669736	.5570417	.6915619	.7735438	.7483256
B2		.0994800	.1510041	.1874701	.2096940	.2028578
X	(m)	.9058179	.9078488	.9039244	.9037891	.9078354
Y	(m)	.0149976	.0071532	.0000375	-.004118	-.009536
Re	(m)	.9059420	.9078770	.9039244	.9037984	.9078855

RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE VELOCIDADE

$(dx/dteta)_o$		.1450551	.1887939	.1848417	.1625179	.1688351
$(dy/dteta)_o$		.0705916	.0411120	.0002898	-.042386	-.090271
Vxo	(m/s)	.6809792	.9510686	.9676322	.8725034	.9339492
Vyo	(m/s)	5.112468	4.968747	4.734454	4.510295	4.280758

RESOLUÇÃO COM MATERIAL NO RAIO EXTERNO DA FACA

Bo	(grau)	12.88712	20.13593	26.15108	30.94847	29.20758
Vo	(m/s)	5.157622	5.058950	4.832326	4.593912	4.381456
Vx	(m/s)	5.027708	4.749740	4.337665	3.939877	3.824387
Vy	(m/s)	1.150309	1.741536	2.129797	2.362497	2.138041
Xt	(m)	.3402567	.2789282	.2067077	.1526816	.1689296
Yt	(m)	.1014349	.0941408	.0820501	.0723354	.0706648

SUB-AMOSTRA U82 com A=00

Velocidade terminal (m/s) (4,2, 5,4, 7,6 e 9,1 10,9 e 12,1

CONDIÇÕES DE CONTOURNO

μ		.94	.94
R_i	(m)	.876	.876
$(dx/dteta)_i$		0	0
θ	(grau)	15.6	15.6
α_i	(grau)	.0902409	.0902409
k		.0015750	.0015750
b		.0013797	.0013797
α_r	(grau)	.0982	.0982
n	(m)	.805	.805
ω	(rad/s)	5.235988	5.235988
δ	(grau)	47	47.9

RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE POSIÇÃO DO MATERIAL DENTRO DA FACA

$1a1$		.4324431	.4324431
$1a2$		-2.31244	-2.31244
$B1$		.7368962	.7368962
$B2$		.1378048	.1378048
X	(m)	.9036953	.9036953
Y	(m)	.0000436	.0000436
Re	(m)	.9036953	.9036953

RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE VELOCIDADE

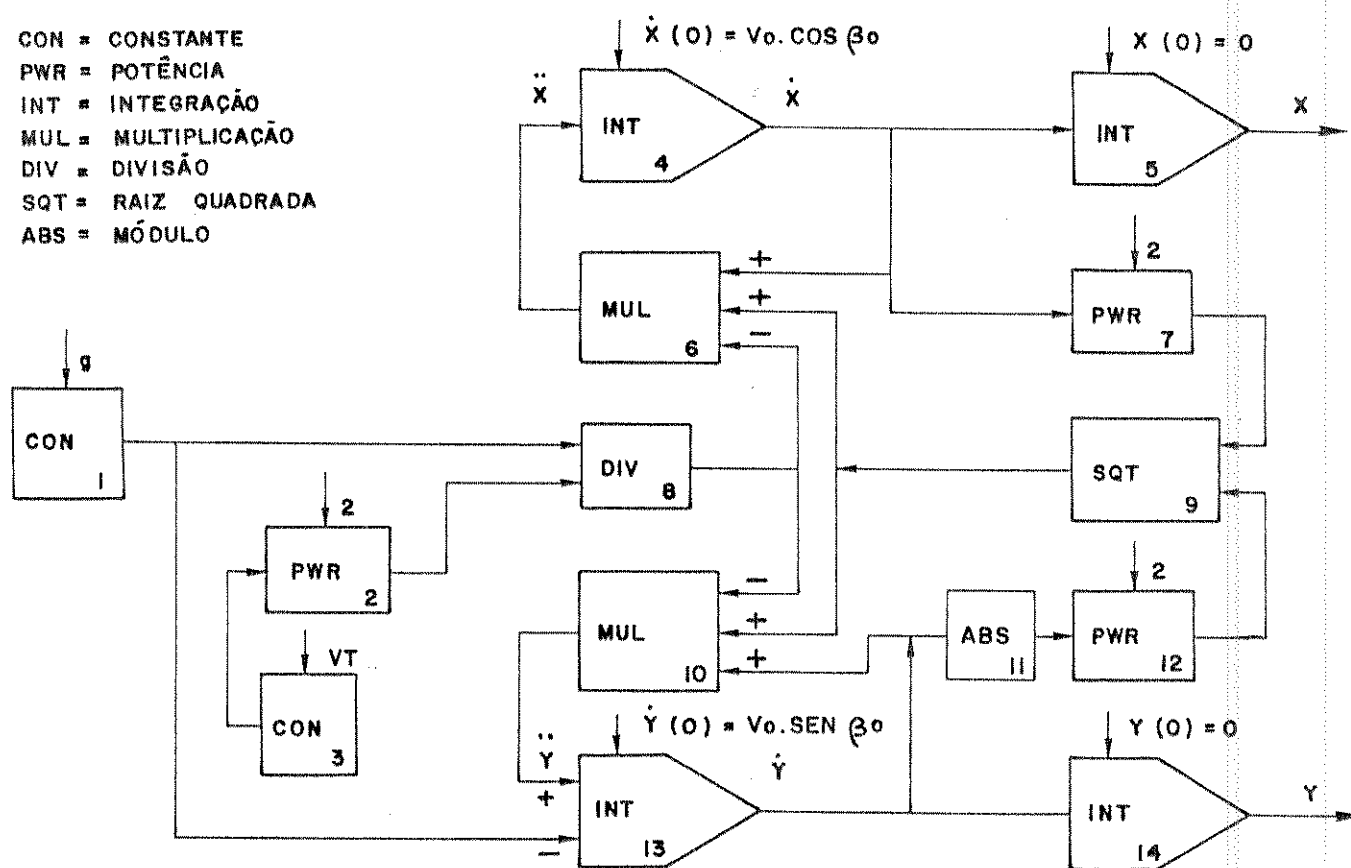
$(dx/dteta)_o$		.1886995	.1886995
$(dy/dteta)_o$		.0002972	.0002972
V_{xo}	(m/s)	.9878000	.9878000
V_{yo}	(m/s)	4.733294	4.733294

RESOLUÇÃO COM MATERIAL NO RAIO EXTERNO DA FACA

B_o	(grau)	27.88798	26.98798
V_o	(m/s)	4.835268	4.835268
V_x	(m/s)	4.273718	4.308716
V_y	(m/s)	2.261669	2.194262
X_t	(m)	.2248302	.2263674
Y_t	(m)	.0996310	.0960873

ONDE :

CON = CONSTANTE
PWR = POTÊNCIA
INT = INTEGRAÇÃO
MUL = MULTIPLICAÇÃO
DIV = DIVISÃO
SQT = RAIZ QUADRADA
ABS = MÓDULO



ANEXO C - DADOS EXPERIMENTAIS DAS TRAJETÓRIAS.

	US1A-20		US1A-12		US1A-08		US1A-15		US1A-28	
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
do lançamento	0	0	.025	0	.05	.025	.05	.025	0	0
	.05	.025	.1	.05	.125	.075	.125	.075	.05	.05
	.15	.075	.2	.1	.2	.1	.2	.125	.125	.1
	.225	.125	.275	.125	.275	.15	.275	.15	.225	.125
	.3	.175	.35	.175	.35	.175	.35	.175	.3	.175
	.375	.225	.425	.2	.45	.2	.45	.2	.375	.2
	.475	.25	.525	.225	.525	.225	.525	.225	.45	.225
	.55	.275	.6	.25	.6	.225	.6	.25	.525	.25
	.625	.3	.675	.25	.675	.25	.675	.275	.6	.275
	.7	.3	.75	.275	.75	.275	.75	.3	.675	.3
	.775	.325	.825	.275	.825	.3	.825	.3	.75	.325
	.85	.325	.925	.3	.9	.3	.875	.325	.825	.35
	.95	.325			.95	.325	.95	.325	.9	.375
									.95	.375
do lançamento	.025	0	0	0	.025	0	.025	.05	0	.025
	.1	.05	.1	.05	.1	.05	.1	.1	.05	.05
	.2	.075	.175	.125	.175	.1	.175	.125	.15	.1
	.275	.125	.25	.15	.25	.15	.275	.175	.225	.15
	.35	.15	.35	.175	.325	.175	.35	.2	.3	.2
	.45	.2	.425	.2	.4	.2	.45	.225	.375	.225
	.525	.225	.5	.2	.475	.225	.55	.25	.475	.225
	.6	.25	.575	.25	.55	.25	.625	.275	.55	.25
	.7	.25	.65	.25	.625	.275	.725	.3	.625	.275
	.775	.25	.725	.275	.725	.3	.775	.325	.7	.3
	.85	.25	.825	.3	.775	.325	.875	.35	.775	.325
	.925	.25	.875	.3	.85	.35	.95	.35	.85	.325
	.9	.25	.95	.3	.925	.35			.775	.35
					.975	.35				
do lançamento	.025	.025	.025	0	0	0	.05	.05	.05	.025
	.125	.075	.125	.05	.075	.05	.125	.1	.15	.075
	.2	.1	.2	.1	.15	.1	.2	.15	.225	.125
	.275	.125	.275	.125	.25	.125	.3	.175	.3	.15
	.35	.175	.35	.175	.325	.175	.375	.2	.375	.175
	.425	.2	.45	.2	.375	.2	.45	.25	.475	.2
	.525	.225	.525	.225	.475	.25	.525	.275	.55	.225
	.6	.25	.6	.225	.55	.275	.6	.275	.625	.25
	.675	.275	.675	.25	.625	.275	.675	.3	.7	.275
	.75	.275	.75	.25	.7	.3	.75	.325	.775	.3
	.85	.3	.825	.275	.775	.325	.825	.325	.85	.325
	.925	.3	.925	.3	.85	.325	.9	.35	.9	.325
	.975	.3	.975	.3	.925	.35	.975	.35	.975	.325
do lançamento	M	0	M	0	M	0	M	0	M	0
	A1 .3926134		A1 .3823355		A1 .5173837		A1 1.021870		A1 .7262991	
	A2 1.014060		A2 1.500514		A2 .7818748		A2 -2.41756		A2 -1.51863	
	A3 -2.81866		A3 -5.45460		A3 -3.49436		A3 4.025330		A3 -2.36527	
	A4 2.628514		A4 6.331813		A4 4.354994		A4 -3.22347		A4 4.377089	
	A5 -1.94925		A5 -2.52620		A5 -1.81543		A5 .9420863		A5 -2.22990	
	R ² 0,96		R ² 0,97		R ² 0,97		R ² 0,99		R ² 1	

	UGA+28		UGA+12		UGA+08		UGA-15		UGA-28	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1o lanzamiento										
	.025	0	.075	.025	.1	.025	0	.025	0	0
	.1	.05	.15	.075	.175	.075	.075	.075	.05	.05
	.15	.075	.2	.125	.25	.125	.15	.1	.1	.1
	.25	.125	.275	.175	.325	.15	.25	.15	.2	.15
	.325	.15	.35	.175	.4	.175	.325	.175	.275	.175
	.4	.175	.45	.2	.5	.2	.4	.225	.35	.2
	.475	.2	.525	.25	.55	.225	.475	.25	.45	.225
	.55	.225	.6	.275	.65	.25	.55	.275	.5	.25
	.65	.25	.675	.275	.7	.275	.625	.3	.575	.275
	.725	.275	.75	.3	.775	.275	.7	.325	.65	.275
	.775	.275	.825	.3	.825	.3	.75	.325	.7	.3
	.875	.25	.925	.325	.9	.3	.825	.35	.775	.325
	.925	.25					.875	.35	.85	.35
							.925	.375	.925	.35
2o lanzamiento										
	0	0	.075	.025	.075	.025	.075	.05	0	0
	.075	.025	.175	.075	.15	.075	.15	.075	.075	.075
	.15	.075	.25	.1	.225	.1	.225	.125	.15	.125
	.225	.1	.325	.15	.3	.15	.3	.175	.225	.15
	.3	.125	.4	.175	.375	.175	.4	.2	.3	.2
	.4	.15	.475	.225	.45	.2	.475	.225	.375	.225
	.45	.175	.55	.225	.525	.225	.55	.25	.45	.25
	.55	.2	.625	.275	.625	.25	.625	.275	.525	.25
	.625	.225	.7	.3	.7	.275	.7	.3	.625	.275
	.7	.275	.8	.3	.75	.3	.75	.325	.7	.275
	.75	.275	.85	.3	.825	.3	.825	.325	.75	.3
	.825	.25	.925	.325	.875	.325	.875	.325	.825	.325
	.95	.225			.95	.325	.95	.35	.875	.35
									.925	.35
3o lanzamiento										
	.025	.025	.075	.025	.025	0	0	0	0	0
	.1	.075	.15	.075	.1	.05	.075	.05	.05	.025
	.175	.1	.225	.1	.175	.075	.15	.1	.1	.075
	.25	.125	.3	.125	.25	.125	.225	.125	.175	.125
	.325	.175	.375	.175	.325	.15	.3	.175	.25	.175
	.425	.2	.45	.2	.4	.175	.275	.2	.3	.2
	.5	.225	.525	.225	.5	.225	.45	.225	.4	.225
	.575	.25	.6	.25	.575	.25	.525	.25	.475	.25
	.65	.275	.675	.275	.65	.275	.6	.275	.55	.25
	.725	.3	.775	.275	.725	.3	.675	.3	.625	.275
	.8	.3	.85	.275	.8	.3	.75	.3	.7	.3
	.85	.3	.9	.3	.85	.325	.8	.325	.75	.325
			.975	.3	.925	.325	.875	.325	.825	.325
							.925	.325	.875	.325
									.95	.35
	A0	0	A0	0	A0	0	A0	0	A0	0
	A1 .5906157		A1 .4317158		A1 .2828268		A1 .7951947		A1 .9128251	
	A2 -.343992		A2 .3582445		A2 1.666069		A2 -1.38237		A2 -.613300	
	A3 -.791216		A3 -.754146		A3 -4.97661		A3 2.727570		A3 -1.92818	
	A4 2.553270		A4 .2187488		A4 5.638735		A4 -2.89755		A4 3.975292	
	A5 -1.82254		A5 .8568758		A5 -2.29732		A5 1.116826		A5 -2.44232	
	R^2	0,97	R^2	0,96	R^2	0,96	R^2	1	R^2	0,99

	U44A-28		U44A-12		U44A-08		U44A-15		U44A-28	
	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)
1o lançamento										
	.05	.025	.05	.0	.05	.0	.05	.025	.0	.0
	.125	.05	.125	.05	.1	.05	.125	.05	.075	.05
	.2	.075	.2	.075	.175	.1	.2	.1	.15	.1
	.3	.125	.275	.125	.25	.125	.275	.125	.225	.15
	.375	.15	.35	.15	.35	.15	.35	.175	.3	.175
	.45	.175	.425	.2	.425	.2	.425	.175	.375	.2
	.525	.225	.5	.225	.5	.2	.525	.2	.45	.225
	.625	.225	.575	.225	.4	.225	.575	.225	.525	.225
	.675	.25	.65	.25	.675	.25	.65	.25	.6	.25
	.75	.25	.725	.275	.75	.275	.725	.275	.675	.275
	.825	.25	.8	.275	.825	.3	.775	.275	.725	.275
	.9	.25	.85	.275	.9	.325	.825	.3	.8	.3
							.875	.3	.85	.325
									.9	.325
2o lançamento										
	.025	.0	.025	.0	.05	.0	.025	.025	.0	.0
	.075	.025	.1	.025	.125	.05	.1	.05	.05	.05
	.15	.075	.175	.075	.2	.1	.15	.1	.1	.1
	.25	.125	.25	.125	.275	.125	.225	.125	.15	.15
	.325	.125	.325	.15	.375	.175	.3	.15	.275	.175
	.4	.15	.4	.2	.45	.2	.4	.175	.35	.2
	.45	.175	.475	.225	.525	.2	.475	.2	.45	.225
	.55	.225	.55	.225	.575	.25	.575	.225	.525	.225
	.625	.25	.625	.225	.65	.275	.625	.25	.4	.25
	.7	.25	.7	.25	.725	.275	.7	.275	.55	.275
	.775	.25	.775	.275	.775	.3	.75	.275	.725	.275
	.85	.25	.85	.275	.825	.3	.8	.3	.775	.3
	.9	.225	.925	.275	.9	.325	.875	.3	.825	.3
									.875	.3
3o lançamento										
	.025	.0	.025	.0	.075	.025	.0	.025	.0	.0
	.1	.05	.1	.05	.15	.075	.075	.025	.05	.05
	.175	.075	.175	.075	.225	.1	.15	.05	.125	.1
	.25	.1	.25	.1	.325	.15	.225	.1	.175	.125
	.325	.125	.325	.125	.4	.175	.3	.125	.275	.175
	.4	.175	.4	.175	.475	.2	.375	.175	.35	.2
	.475	.2	.45	.225	.55	.225	.45	.2	.45	.2
	.55	.225	.525	.225	.625	.25	.525	.225	.525	.225
	.6	.25	.6	.25	.7	.275	.575	.25	.625	.25
	.7	.25	.675	.25	.75	.3	.65	.25	.675	.25
	.775	.25	.75	.275	.825	.325	.7	.275	.725	.275
	.85	.225	.825	.275	.875	.325	.75	.3	.8	.275
	.925	.225	.875	.3	.95	.325	.8	.3	.85	.3
							.85	.3	.9	.3
	M	.0	M	.0	M	.0	M	.0	M	.0
	A1	.5417707	A1	.0793058	A1	.2447551	A1	.3794164	A1	1.037399
	A2	-1.37778	A2	2.944507	A2	2.329829	A2	1.367999	A2	-1.794804
	A3	4.765102	A3	-7.57712	A3	-7.71966	A3	-5.45379	A3	.8676859
	A4	-6.43895	A4	7.679991	A4	9.540748	A4	7.527914	A4	1.291599
	A5	2.734341	A5	-2.82560	A5	-4.10797	A5	-3.58420	A5	-1.10253
	R ²	0.96	R ²	0.98	R ²	0.97	R ²	1	R ²	0.99

182	V ₁ =4,2 m/s		V ₁ =5,4 m/s		V ₁ =7,6 m/s		V ₁ =9,1 m/s		V ₁ =16,9 m/s		V ₁ 112,1 m/s	
	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)
1o lançamento	0	0	0	0	.025	0	0	0	.05	0	.1	.025
	.05	.05	.075	.05	.1	.05	.075	.05	.1	.05	.175	.05
	.15	.075	.15	.075	.175	.075	.15	.075	.175	.075	.25	.1
	.2	.125	.225	.125	.25	.125	.225	.1	.275	.15	.325	.125
	.225	.125	.3	.15	.35	.175	.325	.15	.35	.175	.4	.175
	.3	.15	.4	.2	.4	.2	.4	.175	.425	.2	.5	.2
	.375	.2	.45	.225	.475	.225	.475	.225	.5	.225	.575	.225
	.475	.225	.525	.275	.55	.25	.55	.225	.575	.25	.65	.25
	.525	.25	.6	.3	.625	.275	.625	.25	.65	.275	.725	.25
	.6	.3	.675	.3	.7	.3	.7	.275	.725	.3	.8	.275
	.675	.3	.75	.325	.775	.325	.775	.3	.8	.3	.875	.3
	.75	.325	.825	.325	.85	.325	.85	.325	.875	.3	.95	.3
	.825	.35	.9	.325	.925	.35	.925	.325	.95	.325		
	.9	.35	.95	.35	1	.35	1	.325	1.025	.325		
	.95	.375										
	1.025	.375										
2o lançamento	0	0	.075	.025	.05	0	.075	.225	.025	0	.075	.025
	.05	.025	.125	.05	.1	.05	.15	.05	.125	.05	.15	.075
	.15	.05	.2	.1	.2	.1	.225	.1	.2	.1	.225	.1
	.225	.1	.275	.125	.275	.125	.3	.15	.275	.125	.3	.15
	.3	.15	.35	.175	.35	.175	.4	.175	.35	.175	.4	.175
	.375	.2	.45	.225	.45	.2	.475	.2	.45	.2	.475	.225
	.45	.225	.525	.25	.5	.25	.55	.225	.5	.25	.55	.25
	.525	.25	.6	.25	.575	.275	.625	.25	.6	.25	.625	.275
	.6	.275	.65	.275	.65	.3	.7	.275	.675	.275	.7	.3
	.675	.3	.75	.3	.75	.3	.775	.3	.75	.3	.775	.3
	.725	.325	.8	.3	.8	.325	.85	.3	.825	.3	.85	.325
	.8	.35	.875	.325	.875	.325	.9	.3	.9	.325	.925	.35
	.875	.35	.95	.325	.95	.325	1	.3	.95	.325	1	.35
	.95	.35	1.025	.35	1.025	.35			1.025	.325		
3o lançamento	.025	0	.025	0	.05	.025	.05	0	.05	0		
	.1	.05	.075	.05	.125	.075	.1	.05	.1	.05		
	.15	.075	.15	.075	.2	.125	.2	.1	.2	.1		
	.25	.125	.25	.125	.275	.15	.275	.125	.275	.125		
	.325	.175	.3	.175	.35	.2	.35	.15	.35	.175		
	.375	.2	.4	.2	.425	.225	.45	.175	.425	.2		
	.475	.225	.475	.225	.525	.25	.5	.225	.5	.225		
	.55	.25	.525	.275	.6	.275	.6	.25	.575	.25		
	.625	.275	.625	.275	.675	.3	.65	.275	.65	.275		
	.7	.3	.75	.3	.775	.3	.75	.3	.75	.3		
	.775	.325	.775	.3	.85	.325	.8	.3	.8	.3		
	.85	.325	.85	.325	.925	.325	.9	.3	.875	.325		
	.925	.325	.925	.35	.975	.325	.95	.325	.95	.325		
	1	.35	1	.35			1.025	.325				
	A1	0	A1	0	A1	0	A1	0	A1	0	A1	0
	A1 .4829183		A1 .4479944		A1 .4488928		A1 .4349912		A1 .2472992		A1 .2639515	
	A2 .20432547		A2 .8183797		A2 .5141228		A2 .1999247		A2 .1.932481		A2 .9427428	
	A3 -.848892		A3 -1.79111		A3 -1.14291		A3 -.658974		A3 -5.46594		A3 -1.14868	
	A4 .4744956		A4 1.441544		A4 .3274551		A4 .6466923		A4 5.014161		A4 -.386334	
	A5 -.609441		A5 -.460455		A5 -.444944		A5 -.264819		A5 -1.79818		A5 .5945155	
	R ² 0,99		R ² 0,99		R ² 0,97		R ² 0,98		R ² 0,98		R ² 0,96	

UR1A-1A

X Y(T) Y(E) Y(T)-Y(E) Y(FACA)

UR1A-3I

X Y(T) Y(E) Y(T)-Y(E) Y(FACA)

UR1A-2B

X Y(T) Y(E) Y(T)-Y(E) Y(FACA)

0005128 0051321 005204 - 003394 0051321
 0178811 0101783 0167891 - 006599 0101783
 0257945 0151139 0247343 - 009622 0151139
 0343812 0199625 0304324 - 010473 0199625
 0431117 0247153 0308728 - 015157 0247153
 0518935 0293719 0474575 - 017686 0293719
 0607259 0339316 0399772 - 006046 0339316
 0696879 0383929 0487444 - 002206 0383929
 0785385 0427583 0671741 - 024416 0427583
 0875164 0478243 0734279 - 006484 0478243
 0965488 0511912 0794699 - 028279 0511912
 1056184 0552587 0859886 - 034458 0552587
 1147242 0592263 0909525 - 031726 0592263
 1238811 0639733 0941442 - 033317 0639733
 1330799 0680595 0916942 - 034831 0680595
 1423196 0725243 0960449 - 036277 0725243
 1515991 0764972 1115749 - 037664 0764972
 1607171 0817548 1165484 - 039848 0817548
 1702727 0869468 1212817 - 040296 0869468
 180462 0904374 1259487 - 041568 0904374
 199574 0961837 1348295 - 038646 0961837
 218984 107749 1431738 - 035465 0965534
 238282 118932 1518253 - 032893 1019279
 257571 129854 1584584 - 028645 1048216
 276632 140477 1655484 - 025463 1112492
 29566 150884 1723249 - 021523 1152246
 314596 160836 1788688 - 018433 1187586
 33344 170576 1852884 - 014632 1218638
 352196 180424 1913817 - 011358 1245584
 370863 190184 1974196 - 008236 1268276
 389443 199856 2033468 - 005291 1287843
 407938 209643 2091888 - 002541 1301883
 426349 219446 2149462 - 1.71e-7 1312876
 444674 229266 2206452 0023208 1320069
 462922 239187 2262897 0044173 1332351
 481486 249168 2318638 0062842 1343337
 499171 259151 2374343 0079287 1351958
 517177 269229 2429282 0093948 1351286
 535185 279392 2483751 0105169 1361138
 552957 289552 2537669 0114853 1366666
 570733 299731 2591887 0122443 1368789
 588434 309918 2645576 0128844 1372794
 606162 320107 2695413 0131657 1372246
 623616 330299 2746379 0133511 1394132
 641079 340484 2796382 0133458 1362413
 65851 350673 2845313 0132217 13127278
 675851 360859 2893469 0129321 1088724
 693122 371042 2943545 0125875 1046746
 710325 381224 2994644 0119688 1001332
 727459 391412 3044848 0113862 0952471
 744526 401596 3095979 0105381 0908139
 761527 411785 3146445 0096825 0864389
 778662 421974 3197462 0087478 0820492
 795732 432167 3248475 0077418 0772249
 812813 442352 3299475 0066645 0655499
 829879 452539 3350499 0055271 0605311
 846936 462724 3401495 0043345 0511486
 863971 472908 3452498 0030882 0433728
 880974 483092 3503498 0017918 0352179
 897925 493274 3504446 0004446 0266784
 914845 503458 3555498 0009553 0177199
 931814 513642 3606498 0002488 0082564
 948723 523824 3657449 0003721 001432
 965673 534008 3708498 0005499 001658

0075974 0045867 0055128 - 000926 0045867
 0152393 0096789 0116342 - 001935 0096789
 0229258 0153342 0165572 - 003821 0153342
 0306536 0178982 0207553 - 004177 0178982
 0384245 0221844 0255818 - 005397 0221844
 0462374 0263945 0308784 - 006674 0263945
 0540782 0305288 0358351 - 008087 0305288
 0619834 0345944 0407699 - 009385 0345944
 0699159 0385638 0456368 - 010845 0385638
 0778869 0424853 0505272 - 012262 0424853
 0858957 0462887 0554391 - 013754 0462887
 0939414 0504337 0602999 - 015266 0504337
 1020234 0536998 0651849 - 016885 0536998
 1101488 0572848 0700497 - 018363 0572848
 1182929 0607943 0749382 - 019936 0607943
 1264789 0642219 0798427 - 021521 0642219
 1346988 0675694 0798427 - 023114 0675694
 1429494 0708363 0845499 - 024714 0708363
 1512323 0748225 0893384 - 026316 0748225
 159195 0789576 0940543 - 027893 0789576
 177571 0836293 0987158 - 028287 0836293
 195856 0899974 1044546 - 024457 0899974
 214153 111058 1334668 - 022449 0899974
 232163 121826 1419813 - 020155 1004327
 250186 132298 1501611 - 017718 1051944
 268129 142477 1575945 - 015119 1095438
 286198 152364 1647516 - 012388 1134925
 304265 161941 1715124 - 009551 1178547
 322341 17127 1779121 - 006642 1202282
 340419 180293 1839845 - 003693 1238341
 358491 189431 1897787 - 000748 1254766
 376561 197487 1953447 0021843 1275632
 394638 205561 2006132 0058478 1293810
 412711 213555 2057448 0078118 1306966
 430781 221117 2107721 0104429 1317557
 448851 228549 2155948 0129121 1324837
 466924 235573 2203054 0151884 1328857
 484993 242342 2251216 0172484 1329668
 503061 249079 2298345 0198445 1327288
 521131 255125 2345484 0205766 1321777
 539208 261191 2392866 0218144 1313158
 557281 266888 2440681 0227399 1301464
 575351 272248 2487888 0233392 1286788
 593421 277421 2538216 0253994 1268923
 611491 282333 2588151 0255149 1248122
 629561 286975 2638943 0260887 1224318
 647631 291357 2689681 0262249 1197521
 665701 295478 2740398 0261696 1167744
 683771 299339 2796331 0197859 1134977
 701841 302994 2846884 0179196 1099228
 719911 306283 2894532 0158298 1060495
 737981 309369 2941182 0134588 1018765
 756051 312199 3081364 0108346 0974827
 774121 314773 3167839 0078891 0926249
 792191 317094 3212316 0049624 0875472
 810261 319161 3173668 0017958 0821645
 828331 320976 3224391 001463 0764648
 846401 32254 3272782 004758 0704568
 864471 323853 3318857 0008833 0641321
 882541 324917 3361375 011221 0574871
 900611 325732 3399846 014253 0505173
 918681 3263 3433234 017853 0432164
 936751 32662 3461817 019542 0353789
 954821 326695 3483258 021631 0275991
 972891 326525 3497532 023228 0192663
 990961 326111 3503475 024237 0105764
 100901 325453 3504461 024553 0015178
 102708 324523 3486247 024468 0079119
 104518 32341 3460777 022668 0017745

0228724 0120425 0128518 - 000088 0128426
 0444979 0208579 0258884 - 000442 0258579
 0672588 0366384 0378845 - 001254 0366384
 0903378 0475585 0495598 - 002291 0475585
 1137141 0578465 0616834 - 003837 0578465
 1373716 0674612 0736339 - 005573 0674612
 1612947 0764454 0846888 - 007295 0764454
 1854523 0846749 0945842 - 009914 0846749
 2098373 0922541 1048844 - 012558 0922541
 2344264 0991461 1148884 - 015534 0991461
 2591999 1053423 1242474 - 018945 1053423
 2841382 1108379 1335464 - 022746 1108380
 3092214 1158285 1426243 026996 1158285
 3344298 1197182 1515293 031819 1197183
 3597431 1234799 1603898 037238 1234799
 3851414 1257348 1691112 043276 1257348
 4106444 1274726 1776733 049088 1274726
 4361119 1288924 1863268 054734 1288925
 4616436 1295527 1949989 060588 1295527
 487179 129173 2036786 067448 1291732
 512511 131434 2125582 073856 1291437
 537446 133412 2216766 080739 1266341
 562985 135116 2294884 089332 1243716
 588198 136552 2378998 098548 1214811
 614038 137723 2460464 107123 1179837
 639534 138634 2522835 115567 1138991
 664695 139288 2598726 119785 1092446
 689533 139642 2653429 125653 1048346
 714955 139842 2708982 131648 0982827
 74027 139749 2755794 135836 0920884
 766187 139414 2792451 139851 0851957
 7927813 138839 2817922 142953 0778779
 819156 138628 2829969 144869 0708524
 846223 138484 2827477 145724 0617238
 871821 13571 2887461 145836 0528949
 8971557 134288 2769271 142719 0435688
 921836 132481 2718647 138586 0337395
 947865 131832 2629518 132429 0234105
 971165 128633 2524816 124638 0125758
 991197 125976 2398453 113229 0012293

U68A-13

X Y(T) Y(E) Y(T)-Y(E) Y(FAC)

0135277 0488782 0459847 0021935 0030982
 0271981 0159442 0119918 0039584 0159602
 0410449 0235837 0182516 0053321 0235837
 0549248 0309663 0246748 0062924 0309663
 0689932 0381859 0324281 0066578 0381859
 0831742 0458443 0396827 0074376 0458443
 0974729 0516473 0440861 0068412 0516474
 1118848 0580451 0517668 0062791 0580451
 1264456 0641917 0588344 0053617 0641917
 1418130 0708851 0659854 0041041 0708851
 1557545 0757237 0732179 0025458 0757237
 1705778 0811457 0805153 0006585 0811458
 1854982 0862296 0837635 - 001634 0862296
 2004094 0918927 0892487 - 004155 0918927
 2153787 0965966 0936572 - 002931 0965966
 2304298 1018378 098751 - 010038 1018378
 2459619 1041134 104885 - 013375 1041134
 2612625 1079247 1048838 - 018959 1079248
 2766274 1114678 1022472 - 020777 1114678
 291447 114495 1092615 - 024766 1144613
 316829 123496 1541241 - 026628 1198443
 332495 132111 1484835 - 028492 1227963
 348084 140356 1761874 - 030333 1259104
 362227 148238 1883718 - 032134 1284195
 376115 155765 1894414 - 033879 1303533
 390445 162943 1985011 - 035558 1317388
 404982 167779 2069424 - 037163 1326400
 419798 174278 2149679 - 038694 1336114
 434849 182440 2228882 - 040132 1346415
 449147 188294 2297837 - 041498 1352591
 463933 193821 2365848 - 042764 1361231
 478454 199034 2434984 - 043956 1377739
 492896 204399 2494088 - 045076 1394066
 508307 209554 2544499 - 046110 1405243
 523599 214841 2597244 - 047063 1417566
 538557 219847 2648424 - 047995 1429982
 553210 224563 2694178 - 048854 1444086
 567862 228992 2736618 - 049649 1457041
 582180 232737 2737574 - 050454 1465688
 596387 236804 2812038 - 051245 1484086
 610526 240584 2845486 - 051947 0992561
 624657 244187 2875863 - 052683 0948922
 638747 247642 2903911 - 053429 0885964
 652818 250946 2929393 - 054193 0827714
 666868 254066 2952563 - 054994 0766220
 680958 257027 2973572 - 055838 0711497
 694978 260031 2992569 - 056726 0633568
 708995 262881 3009711 - 057644 0562439
 722984 265579 3025158 - 058736 0488112
 736947 268227 3039439 - 059677 0410603
 750899 269843 3051531 - 061123 0329882
 764829 271382 3062778 - 062494 0245945
 778715 272885 3072934 - 063788 - 775424
 792579 274282 3082149 - 065033 - 775424
 806423 275622 3090573 - 067435 - 775424
 820248 276927 3098255 - 069486 - 775424

U68A-08

X Y(T) Y(E) Y(T)-Y(E) Y(FAC)

0105917 0062664 0031767 0030897 0062664
 0212677 0123688 0067219 0056661 0123688
 0320261 0183638 0106078 0075547 0183638
 0428848 0241905 0148113 0093812 0241925
 0537818 0298731 0193828 0116571 0298731
 0647752 0354848 0248549 0113498 0354848
 0758129 0418788 0298436 0117424 0418788
 0869528 0481661 0342427 0117734 0481661
 0981928 0514941 0396271 0114671 0514942
 1094718 0568191 0451722 0108469 0568191
 1208151 0607981 0505544 0099357 0607981
 1322231 0654862 0565545 0087556 0654862
 1436938 0698465 0625386 0073279 0698465
 1552824 0714783 0684975 0065728 0714784
 1668094 0738168 0745072 0060876 0738168
 1784518 0823052 0805484 0051567 0823052
 1901474 0861346 0868834 - 004469 0861347
 2018948 0898846 0926533 - 002851 0898846
 2136895 0973142 0968885 - 005374 0973142
 226431 0968768 0949483 - 008844 0968768
 247384 107728 1155745 - 007847 1073894
 268423 118171 1257824 - 007611 1073562
 289164 128223 1355444 - 007321 1117378
 309617 137891 1448539 - 006963 1155628
 329791 147184 1537134 - 006529 1188420
 349694 156109 1621339 - 006025 1216603
 369335 164673 1701333 - 005484 1239812
 388722 172882 1777342 - 004852 1258464
 407862 180743 1849623 - 004219 1272754
 426763 188262 1918459 - 003584 1282864
 445432 195445 1984142 - 002949 1288958
 463875 202297 2046964 - 002399 1291191
 482099 208824 2107219 - 001898 1298971
 500189 215031 2165183 - 001487 1284616
 517912 220722 2221128 - 001191 1276856
 535514 226343 2275381 - 000827 1264128
 552918 231777 2327919 - 000415 1243933
 570131 23675 2379189 - 000169 1238562
 587157 241425 2429282 - 000150 1249181
 604081 245885 2478343 - 000029 1184626
 620668 249896 2526494 - 000273 1157287
 637161 2537 2573883 - 000368 1124910
 653485 257221 2620339 - 000813 1093793
 669644 260443 2666121 - 000619 1057988
 685642 263428 2711142 - 000766 1019344
 701482 26612 2755384 - 000918 0970823
 717167 268541 2798784 - 0011329 0934186
 732742 270495 2841877 - 0013413 0897581
 748088 272585 2882345 - 0015649 0858485
 76333 274213 2922351 - 0018822 0818836
 77843 275581 2960985 - 0021510 0778257
 793392 276693 2977795 - 0023887 0675961
 808216 27755 3032772 - 0025727 0616771
 822948 278156 3065573 - 0028481 0555488
 837637 278512 3095898 - 0031878 0498989
 851899 278821 3123437 - 0033723 0424241
 866293 279484 3147841 - 0036390 0355888
 880383 279185 3168751 - 0038778 0285423
 894441 279405 3185781 - 0041893 0209264
 908379 279675 3198528 - 0043228 0132564
 922196 279929 3204567 - 0045128 0053317
 9359 279198 3204756 - 004748 - 002854
 949488 278634 3206739 - 0048849 - 011294

U68A-16

X Y(T) Y(E) Y(T)-Y(E) Y(FAC)

0055126 0051321 0046787 - 001525 0051321
 0170811 0101703 0131928 - 003023 0101703
 0257845 0151139 0195718 - 004453 0151139
 0343817 0199625 0250129 - 005858 0199625
 0431117 0247153 0319216 - 007286 0247153
 0518935 0293719 0379834 - 008531 0293719
 0607259 0339316 0437636 - 009832 0339316
 0696079 0383329 0495876 - 011114 0383329
 0785285 0427583 0551410 - 012383 0427583
 0875164 0470243 0606889 - 013645 0470243
 0965488 0511912 0660967 - 014965 0511912
 1056184 0552587 0671429 - 016171 0552587
 1147242 0592263 0765726 - 017446 0592263
 1238811 0630833 0816387 - 018737 0630833
 1330799 0668595 0869887 - 020049 0668595
 1423196 0705243 0919112 - 021387 0705243
 1515991 0740872 0968429 - 022756 0740872
 1609171 0775488 1017079 - 024168 0775488
 1702727 0809666 1065185 - 025684 0809666
 1804662 0843472 1114538 - 027187 0843472
 190491 0876133 1161836 - 028498 0876133
 200649 107586 1216752 - 029895 107586
 210849 107586 1262284 - 031563 107586
 2207519 110183 1298718 - 032589 107586
 230619 129071 1476491 - 033538 107586
 240489 129071 1558728 - 034529 1108420
 2503784 149113 1638877 - 035475 1144586
 260283 15658 1716752 - 036385 1188714
 270168 167688 1782589 - 037389 1156812
 280077 176443 1864273 - 038418 1237048
 290005 18485 1938139 - 039464 1257587
 300032 192915 2008176 - 040552 1278385
 3100384 200645 2076432 - 041698 1293817
 320034 210034 2142931 - 042849 1309933
 3300361 215117 2207692 - 044052 1314855
 3400318 221684 2278726 - 045284 1328495
 3500399 228365 2332823 - 046487 1343556
 3600342 234429 2391582 - 047729 1352536
 3700355 240245 2447391 - 048994 1364724
 3800372 245759 2505433 - 050178 1371524
 3900362 250872 2557842 - 051388 1387051
 4000353 255889 2612183 - 052638 1296337
 4100354 260816 2662887 - 053971 1283129
 4200357 264953 2711746 - 055322 1267487
 4300359 268945 2758819 - 056777 1249469
 4400355 272675 2804087 - 058274 1229121
 4500364 276166 2847554 - 059839 1206511
 4600374 279738 2889234 - 061484 1181664
 4700382 283222 2929143 - 063212 1154629
 4800393 286993 2967385 - 065038 1125444
 4900409 290737 3003756 - 066977 1094148
 5000421 294505 3038525 - 069031 1060754
 5100431 298287 3082888 - 071294 1026788
 5200444 294365 3133231 - 073838 1000361
 5300457 295487 3161787 - 076692 0969988
 5400469 296336 3188958 - 079859 0921529
 5500481 296934 3214798 - 083546 0880888
 5600493 297282 3239413 - 086659 0837778
 5700506 297384 3262885 - 089985 0792139
 5800518 29724 3285316 - 093292 0849365
 5900531 296854 3308894 - 096886 0817295
 6000543 296226 3327462 - 100528 0782318
 6100556 295359 3347483 - 103781 0745438
 6200568 294254 3366752 - 107421 0704653
 6300581 292913 3385634 - 111568 0659982
 6400594 291328 3404184 - 116088 0622368
 6500607 289531 3422532 - 121272 0580848
 6600620 287494 3440828 - 126589 0535485
 6700633 285227 3459272 - 132495 0487829
 6800646 282733 3477861 - 138923 0433694
 6900659 280614 3496983 - 145576 0381861

U02A+00 VL=4.2 m/s

U02A+00 VL=5.4 m/s

U02A+00 VL=7.6 m/s

X Y(T) Y(E) Y(T)-Y(E) Y(FACA)

X Y(T) Y(E) Y(T)-Y(E) Y(FACA)

X Y(T) Y(E) Y(T)-Y(E) Y(FACA)

0.015143 0.0437953 0.051184 0.012849 0.0437953
 0.021148 0.126465 0.143256 0.023213 0.126465
 0.0317993 0.187537 0.156485 0.031132 0.187537
 0.0425668 0.247144 0.216498 0.030646 0.247144
 0.0534129 0.305288 0.265481 0.039797 0.305288
 0.0643378 0.361932 0.321388 0.040544 0.361934
 0.0753389 0.417895 0.377896 0.040997 0.417895
 0.0864141 0.474754 0.435217 0.039536 0.474754
 0.0975613 0.532298 0.493199 0.039097 0.532298
 0.1087784 0.573523 0.551785 0.041738 0.573523
 0.1200634 0.622615 0.610915 0.041179 0.622615
 0.1314142 0.670167 0.670528 - 0.000361 0.670167
 0.1428287 0.716168 0.736565 - 0.01444 0.716168
 0.1543847 0.760612 0.794954 - 0.03434 0.760612
 0.1659842 0.803489 0.851665 - 0.04818 0.803489
 0.1774338 0.844792 0.912647 - 0.06786 0.844792
 0.1891889 0.884512 0.973729 - 0.08922 0.884513
 0.2007818 0.922644 1.038472 - 0.11583 0.922644
 0.2125336 0.959179 1.096277 - 0.1371 0.959179
 0.22483 0.99631 1.160154 - 0.16384 0.995541
 0.24662 1.11875 1.248763 - 0.12901 1.11875
 0.26781 1.21471 1.375532 - 0.16082 1.21471
 0.288173 1.31811 1.488471 - 0.17036 1.31811
 0.308193 1.41774 1.581981 - 0.16422 1.41774
 0.328265 1.51373 1.688485 - 0.17475 1.51373
 0.34818 1.61681 1.775885 - 0.15907 1.61681
 0.367856 1.6949 1.868397 - 0.17349 1.6949
 0.387298 1.78822 1.957917 - 0.16969 1.78822
 0.405514 1.86211 2.044458 - 0.18234 1.86211
 0.42351 1.94662 2.128845 - 0.18223 1.94662
 0.442292 2.01581 2.208845 - 0.19279 2.01581
 0.460865 2.08772 2.286274 - 0.19855 2.08772
 0.481236 2.15642 2.361658 - 0.20523 2.15642
 0.499486 2.22193 2.432994 - 0.21106 2.22193
 0.517388 2.28943 2.502128 - 0.21269 2.28943
 0.53518 2.34359 2.568224 - 0.22463 2.34359
 0.552788 2.39782 2.632223 - 0.23441 2.39782
 0.570218 2.45395 2.693322 - 0.24037 2.45395
 0.587473 2.50433 2.751851 - 0.24752 2.50433
 0.604558 2.55861 2.808789 - 0.25317 2.55861
 0.621477 2.59582 2.861584 - 0.26576 2.59582
 0.638232 2.63557 2.912759 - 0.27718 2.63557
 0.654829 2.67528 2.961733 - 0.28645 2.67528
 0.67127 2.71115 2.999471 - 0.28832 2.71115
 0.687536 2.74431 3.053183 - 0.30887 2.74431
 0.703696 2.7747 3.095444 - 0.32074 2.7747
 0.719692 2.80237 3.136183 - 0.33381 2.80237
 0.735543 2.82737 3.174789 - 0.34743 2.82737
 0.751254 2.84968 3.211532 - 0.36185 2.84968
 0.766828 2.86936 3.246482 - 0.37712 2.86936
 0.782267 2.88643 3.279745 - 0.39327 2.88643
 0.797574 2.90091 3.311249 - 0.41133 2.90091
 0.812751 2.91283 3.341239 - 0.42841 2.91283
 0.827881 2.92221 3.369688 - 0.44747 2.92221
 0.842876 2.92986 3.396657 - 0.46744 2.92986
 0.857827 2.93542 3.422226 - 0.48681 2.93542
 0.872688 2.93953 3.446458 - 0.51116 2.93953
 0.887471 2.94342 3.469486 - 0.53049 2.94342
 0.902186 2.94717 3.491127 - 0.54943 2.94717
 0.915846 2.95027 3.511688 - 0.56851 2.95027
 0.929762 2.95183 3.531117 - 0.58769 2.95183
 0.943867 2.95282 3.549495 - 0.60612 2.95282
 0.957861 2.9534 3.566863 - 0.62478 2.9534
 0.971747 2.95373 3.583273 - 0.64256 2.95373
 0.985526 2.95346 3.598774 - 0.66053 2.95346
 0.9992 2.95348 3.613414 - 0.67852 2.95348
 1.0127 2.95284 3.627168 - 0.69513 2.95284

0.015143 0.0437953 0.043781 0.028172 0.0437953
 0.021148 0.126465 0.089628 0.036841 0.126465
 0.0317993 0.187537 0.137448 0.050089 0.187537
 0.0425668 0.247144 0.187144 0.059999 0.247144
 0.0534129 0.305288 0.238619 0.066661 0.305288
 0.0643378 0.361932 0.291748 0.070165 0.361934
 0.0753389 0.417895 0.346487 0.076407 0.417895
 0.0864141 0.474754 0.402639 0.082065 0.474754
 0.0975613 0.532298 0.460282 0.082697 0.532298
 0.1087784 0.573523 0.518974 0.084547 0.573523
 0.1200634 0.622615 0.578878 0.087338 0.622615
 0.1314142 0.670167 0.639792 0.088374 0.670167
 0.1428287 0.716168 0.701684 0.091564 0.716168
 0.1543847 0.760612 0.764199 - 0.00357 0.760612
 0.1659842 0.803489 0.827461 - 0.02357 0.803489
 0.1774338 0.844792 0.891275 - 0.04648 0.844792
 0.1891889 0.884512 0.955526 - 0.07101 0.884513
 0.2007818 0.922644 1.020188 - 0.09746 0.922644
 0.2125336 0.959179 1.084885 - 0.12571 0.959179
 0.22483 0.99631 1.152472 - 0.15618 0.995541
 0.24662 1.11875 1.268781 - 0.16188 1.11875
 0.26781 1.21471 1.382753 - 0.16698 1.21471
 0.288173 1.31811 1.494821 - 0.17348 1.31811
 0.308193 1.41774 1.602241 - 0.18011 1.41774
 0.328265 1.51373 1.707121 - 0.18678 1.51373
 0.34818 1.61681 1.808428 - 0.19298 1.61681
 0.367856 1.6949 1.905496 - 0.19849 1.6949
 0.387298 1.78822 1.999551 - 0.20328 1.78822
 0.405514 1.86211 2.089128 - 0.20715 1.86211
 0.42351 1.94662 2.174687 - 0.20997 1.94662
 0.442292 2.01581 2.255953 - 0.21178 1.94662
 0.460865 2.08772 2.333157 - 0.21298 1.94662
 0.481236 2.15642 2.406251 - 0.21177 1.94662
 0.499486 2.22193 2.475288 - 0.21813 1.94662
 0.517388 2.28943 2.540325 - 0.20743 1.94662
 0.53518 2.34359 2.601498 - 0.20376 1.94662
 0.552788 2.39782 2.658886 - 0.19928 1.94662
 0.570218 2.45395 2.712657 - 0.19384 1.94662
 0.587473 2.50433 2.762963 - 0.18789 1.94662
 0.604558 2.55861 2.809777 - 0.18145 1.94662
 0.621477 2.59582 2.853886 - 0.17469 1.94662
 0.638232 2.63557 2.894891 - 0.16779 1.94662
 0.654829 2.67528 2.933216 - 0.16095 1.94662
 0.67127 2.71115 2.969463 - 0.15436 1.94662
 0.687536 2.74431 3.002691 - 0.14829 1.94662
 0.703696 2.7747 3.034335 - 0.14291 1.94662
 0.719692 2.80237 3.064254 - 0.13846 1.94662
 0.735543 2.82737 3.092694 - 0.13519 1.94662
 0.751254 2.84968 3.119923 - 0.13336 1.94662
 0.766828 2.86936 3.146243 - 0.13321 1.94662
 0.782267 2.88643 3.171897 - 0.13562 1.94662
 0.797574 2.90091 3.197188 - 0.13983 1.94662
 0.812751 2.91283 3.222377 - 0.14553 1.94662
 0.827881 2.92221 3.247775 - 0.15178 1.94662
 0.842876 2.92986 3.273668 - 0.16786 1.94662
 0.857827 2.93542 3.299348 - 0.18266 1.94662
 0.872688 2.93953 3.324811 - 0.20184 1.94662
 0.887471 2.94342 3.349754 - 0.22049 1.94662
 0.902186 2.94717 3.374112 - 0.23851 1.94662
 0.915846 2.95027 3.397918 - 0.25591 1.94662
 0.929762 2.95183 3.421117 - 0.27269 1.94662
 0.943867 2.95282 3.443813 - 0.28894 1.94662
 0.957861 2.9534 3.465993 - 0.30468 1.94662
 0.971747 2.95373 3.487547 - 0.31992 1.94662
 0.985526 2.95346 3.508573 - 0.33466 1.94662
 0.9992 2.95348 3.528978 - 0.34890 1.94662
 1.0127 2.95284 3.549483 - 0.36264 1.94662

0.015143 0.0437953 0.047669 0.016284 0.0437953
 0.021148 0.126465 0.094799 0.029474 0.126465
 0.0317993 0.187537 0.147327 0.048139 0.187537
 0.0425668 0.247144 0.199188 0.047957 0.247144
 0.0534129 0.305288 0.252388 0.052971 0.305288
 0.0643378 0.361932 0.306521 0.055512 0.361934
 0.0753389 0.417895 0.362853 0.055842 0.417895
 0.0864141 0.474754 0.416526 0.052227 0.474754
 0.0975613 0.532298 0.465966 0.049934 0.532298
 0.1087784 0.573523 0.513429 0.047938 0.573523
 0.1200634 0.622615 0.559342 0.049192 0.622615
 0.1314142 0.670167 0.603281 0.049886 0.670167
 0.1428287 0.716168 0.713781 0.049238 0.716168
 0.1543847 0.760612 0.774041 - 0.01423 0.760612
 0.1659842 0.803489 0.836377 - 0.03289 0.803489
 0.1774338 0.844792 0.899286 - 0.05351 0.844792
 0.1891889 0.884512 0.960544 - 0.07692 0.884513
 0.2007818 0.922644 1.020887 - 0.10036 0.922644
 0.2125336 0.959179 1.085612 - 0.12643 0.959179
 0.22483 0.99631 1.154984 - 0.15459 0.995541
 0.24662 1.11875 1.263489 - 0.15541 1.11875
 0.26781 1.21471 1.374193 - 0.15747 1.21471
 0.288173 1.31811 1.482947 - 0.16839 1.31811
 0.308193 1.41774 1.589375 - 0.16384 1.41774
 0.328265 1.51373 1.693228 - 0.16757 1.51373
 0.34818 1.61681 1.794254 - 0.17133 1.61681
 0.367856 1.6949 1.892270 - 0.17498 1.6949
 0.387298 1.78822 1.987182 - 0.17889 1.78822
 0.405514 1.86211 2.078599 - 0.18275 1.86211
 0.42351 1.94662 2.166647 - 0.18675 1.94662
 0.442292 2.01581 2.251151 - 0.19097 1.94662
 0.460865 2.08772 2.332833 - 0.19538 1.94662
 0.481236 2.15642 2.409255 - 0.19998 1.94662
 0.499486 2.22193 2.480273 - 0.20477 1.94662
 0.517388 2.28943 2.556635 - 0.20976 1.94662
 0.53518 2.34359 2.628332 - 0.21494 1.94662
 0.552788 2.39782 2.695385 - 0.22031 1.94662
 0.570218 2.45395 2.757898 - 0.22587 1.94662
 0.587473 2.50433 2.815861 - 0.23162 1.94662
 0.604558 2.55861 2.869283 - 0.23756 1.94662
 0.621477 2.59582 2.918154 - 0.24369 1.94662
 0.638232 2.63557 2.963486 - 0.24992 1.94662
 0.654829 2.67528 2.995281 - 0.25625 1.94662
 0.67127 2.71115 3.023636 - 0.26268 1.94662
 0.687536 2.74431 3.048651 - 0.26921 1.94662
 0.703696 2.7747 3.070326 - 0.27584 1.94662
 0.719692 2.80237 3.088661 - 0.28257 1.94662
 0.735543 2.82737 3.103666 - 0.28930 1.94662
 0.751254 2.84968 3.115341 - 0.29603 1.94662
 0.766828 2.86936 3.123696 - 0.30276 1.94662
 0.782267 2.88643 3.128701 - 0.30949 1.94662
 0.797574 2.90091 3.130356 - 0.31622 1.94662
 0.812751 2.91283 3.128661 - 0.32295 1.94662
 0.827881 2.92221 3.123616 - 0.32968 1.94662
 0.842876 2.92986 3.115221 - 0.33641 1.94662
 0.857827 2.93542 3.103476 - 0.34314 1.94662
 0.872688 2.93953 3.088381 - 0.34987 1.94662
 0.887471 2.94342 3.069936 - 0.35660 1.94662
 0.902186 2.94717 3.047141 - 0.36333 1.94662
 0.915846 2.95027 3.020996 - 0.37006 1.94662
 0.929762 2.95183 3.000401 - 0.37679 1.94662
 0.943867 2.95282 2.975356 - 0.38352 1.94662
 0.957861 2.9534 2.945861 - 0.39025 1.94662
 0.971747 2.95373 2.911916 - 0.39698 1.94662
 0.985526 2.95346 2.873471 - 0.40371 1.94662
 0.9992 2.95348 2.830526 - 0.41044 1.94662
 1.0127 2.95284 2.783081 - 0.41717 1.94662

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNACKI, H. ; HAMAN, J. & KANAFOJSKI, Cz.
Mechanical organic fertilizer distributors.
In: _____. Agricultural machines, theory and
construction. Warsaw, Poland, Ed. Foreign
Scientific Publications Department of the National
Center for Scientific, Technical and Economic
Information, 1972. p.513-53.

BILANSKI, W. K.; COLLINS, S. H. & CHU, P. Aerodynamic
properties of seed grains. Agricultural
Engineering, St. Joseph, MI, 43(4): 216-9. 1962.

BRAUNBECK, O. A. & DALCOMO, E. L. Coeficientes de
atrito, interno e sobre superfícies, da torta de
filtro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA
AGRÍCOLA, 11, Brasília, 1981. Anais. Botucatu,
SBEA, 1981. p.1595-605.

BRAUNBECK, O. A. & IDE, B. Y. Implemento para mistura
e secagem natural de resíduos orgânicos. In:
CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 12,

Ilhéus, 1982. Resumos. Ilhéus, CPEC, 1982. 24p.

BRINSFIELD, R. B. & HUMMEL, J. W. Simulation of a new centrifugal distributor design. Trans. of the ASAE, St. Joseph, MI, 18(2): 213-6, 220. 1975.

CARDOSO, C. O. N. & DIAS DE TOLEDO, A. C. Compostagem de resíduos industriais: torta de filtro e vinhaça. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 2, Piracicaba, 1984. Anais. São Paulo, COPERSUCAR, 1984. p.205-14.

CONTINUOUS system modeling program III (CSMP III) and graphic feature (CSMP III graphic feature): general information manual. 3.ed. Canada, IBM, 1983. (Program number 5734-XS9). s. p.

COPERSUCAR. Análise econômica da produção e do composto de bagaço e torta de filtro. Piracicaba, DEAD-CT/Copersucar, 1989. 28p. Texto não publicado.

COPERSUCAR. Compostagem de torta de filtro e bagaço. Caderno Copersucar Série Melhoramento, São Paulo, (14): 1-4. 1985.

COPERSUCAR. Seminário sobre bagaço de cana. Piracicaba, 1983. São Paulo, Ed. Copersucar, 1983. 30p.

CUNNINGHAM, F. M. Performance characteristics of bulk spreaders for granular fertilizer. Trans. of the ASAE, St. Joseph, MI, 6(2): 108-14. 1963.

CUNNINGHAM, F. M & CHAO, E. Y. S. Design relationships for centrifugal fertilizer distributors. Trans. of the ASAE, St. Joseph, MI, 10(1): 91-5. 1967.

DAVIS, J. B. & RICE, C. E. Predicting fertilizer distribution by a centrifugal distributor using CSMP, a simulation language. Trans. of the ASAE, St. Joseph, MI, 17(6): 1091-3. 1974.

GALILI, N & SHTEINGAUZ, G. Wide-swath vertical spreader for granular material. Trans. of the ASAE, St. Joseph, MI, 25(5): 1195-203. 1982.

HAY, J. C.; CABALLERO, R. C.; LIVINGSTON, J. R. & HORVATH, R. W. Windrow composting in Los Angeles county. Biocycle: Journal of Waste Recycling, Emmaus, PA, 26(7): 24-7. 1985.

HUGOT, E. Filtração. In: _____. Manual de engenharia açucareira. São Paulo, Ed. Mestre Jou, 1977. p.534.

HUGOT, E. Produção do vapor. In: _____. Manual de engenharia açucareira. São Paulo, Ed. Mestre Jou, 1977. p.950.

INDUSTRIAL cinematography. A high-speed chase.
Mechanical Engineering, New York, 11(3): 60-2,
 1988.

INNS, F. M. & REECE, A. R. The theory of the
 centrifugal distributor. II: motion on the disc
 off-centre feed. J. Agric. Eng. Res., Silsoe, 7(4):
 345-53. 1962.

KIKER, C. F. & ROSS, I. J. An equation of motion for
 multiple granular particles in free fall in
 enclosed vertical ducts. Trans. of the ASAE, St.
 Joseph, MI, 9(4): 468-73, 479. 1966.

MENNEL, R. M. & REECE, A. R. The theory of
 the centrifugal distributor. III: particle
 trajectories. J. Agric. Eng. Res., Silsoe, 8(1):
 78-84. 1963.

NEBRA, S. A. Secagem pneumática de bagaço de cana.
 Campinas, S. P., 1985. 121p.
 [Tese - Doutorado - Faculdade de Engenharia da
 Unicamp].

PATTERSON, D. E. & REECE, A. R. The theory of the
 centrifugal distributor. I: motion on the disc,
 near-centre feed. J. Agric. Eng. Res., Silsoe, 7(3)

232-40. 1962.

PERTICARRARI, J. G. & BRAUNBECK, O. A. Armazenamento, secagem e aplicação de torta de filtro e de outros compostos orgânicos. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 4, Piracicaba, 1988. Anais. São Paulo, COPERSUCAR, 1988. p.135-50.

PITT, R.E.; FARMER, G. S. & WALKER, L. P. Approximating equations for rotary distributor spread patterns. Trans. of the ASAE, St. Joseph, MI, 25(6): 1544-52. 1982.

PONCE, N.; FRIEDMAN, P. & LEAL, D. Geometric properties and density of bagasse particles. Int. Sugar Jnl, Bucks., England, 85(1018): 291-5. 1983.

REED, W. B. & WACKER, E. Determining distribution pattern of dry-fertilizer applicators. Trans. of the ASAE, St. Joseph, MI, 13(1): 85-9. 1970.

REINTS JR., R.E. & YOERGER, R. R. Trajectories of seeds and granular fertilizers. Trans. of the ASAE, St. Joseph, MI, 10(2): 213-6. 1967.

RICHEY, C. B. Forage harvesters and blowers. In: _____. Agricultural enginner's handbook. New York, Ed.

MacGraw-Hill, 1961. p.235-7.

SPINK, L. K. Details and characteristics of primary devices. In: _____. Principles and practice of flow meter engineering. 9.ed. Massachusetts, Ed. Foxboro, 1975. p.50-3.

STEFFEN, R. The value of composted organic matter in building soil fertility. Compost Science / Land Utilization, Emmaus, PA, 20(5): 34-7. 1979.

STRAUSS, W. Fluid resistance to particle motion. In: _____. Industrial gas cleaning. 2.ed. Melbourne, Ed. Pergamon Press, 1975. p.186.

ABSTRACT

The present work has been developed in order to understand the behavior of organic wastes processed by straight radial and pitched spinner blades. The mathematical model is based on the literature related to the distribution of granular material by centrifugal spreaders. The theoretical trajectories of the particles in the blade and in the air are solved using two computer programs.

A slinger device fitted to a lathe throwed the Oliver filter cake. Its moisture ranged from 44 to 82 % . The blades were adjusted with angles from -31 to $+28^{\circ}$ to the radial direction.

The filter cake trajectories in the air were filmed by a video camera. The playback was viewed frame by frame on the pause/still mode and the rectangular coordinates were obtained. The distance reached by the filter cake on the ground was also measured.

A vertical wind tunnel with controlled turbulence was constructed for measurement of terminal velocities. The classified filter cake fractions were weighted and a terminal velocity related to the moisture was obtained.

A radial vane rotary device with 1.8 m outer diameter was built for qualitative evaluation. It was mounted beside on a MF 201 sugar cane harvester. Two hydraulic motors TRW driven the rotating vanes. A winch placed on a Valmet 128 tractor pulled the device at adequate low speed. The vanes revolved part of a 4 m wide and 2 m high triangular windrow.

Experimental trajectories of radial and backward pitched blades indicated good adjustment with the theoretical one. Because the unloading time being greater for forward pitched blades some deviations occurred.

A housing angle change produced more influence on the trajectories than the angle blade adjustment.

Material size reduction and aeration is done by the action of blades and air respectively.