

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DESENVOLVIMENTO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE DISCO
DE CORTE DENTADO PASSIVO PARA CORTE DE PALHIÇO
EM CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese submetida à banca examinadora para
obtenção do título de Doutor em Engenharia
Agrícola na área de concentração em Máquinas
Agrícolas.

ALOISIO BIANCHINI

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Graziano Magalhães.

CAMPINAS
JULHO 2002

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Maria das Graças e filhos Túlio e Mateus, que:

Nas horas de desânimo me incentivaram;

Nas horas de indecisão me apoiaram;

Nas horas de dificuldades me compreenderam e,

Nas horas de aflição me acalentaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pelos dons da vida da sabedoria e da inteligência, sem os quais este trabalho jamais poderia ser realizado.

Aos meus pais Orlando e Elza, que tudo fizeram para bem me conduzir na vida.

Ao Prof. Dr. Paulo Sérgio Graziano Magalhães que acreditou, apoiou e orientou este trabalho de forma incontestável.

À Universidade Federal de Mato Grosso e à Universidade Estadual de Campinas pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior - Capes e, à Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo – FAPESP, pelo suporte financeiro, essencial à realização do trabalho.

Aos professores Dr. Oscar Antônio Braunbeck e Dr Inácio Dall Fabro pelos ricos momentos de troca de experiências.

A todos os funcionários do Laboratório de protótipos (oficina) pela convivência diária e pela colaboração inestimável.

Ao prof. Dr. Nelson Luis Capelli e ao Eng. Eletricista M.Sc. Cláudio Kiyoshi Umezu pela convivência e aporte técnico imprescindível à realização deste trabalho.

Aos professores, funcionários e colegas da Faculdade de Engenharia Agrícola, que de forma direta ou indireta contribuíram para meu aperfeiçoamento profissional e execução deste trabalho.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ANEXOS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xix
RESUMO.....	xx
ABSTRACT.....	xxii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. A MANUTENÇÃO DO PALHIÇO.....	5
2.1.1 Benefícios associados à conservação do solo e da água.....	6
2.1.2 Aumento da produtividade.....	8
2.1.3 Benefícios associados ao controle da planta daninha.....	9
2.1.4 Aspectos associados à fertilidade do solo e adubação.....	10
2.1.5 Implicações relacionadas à mecanização agrícola.....	16
3. ARTIGO 1: ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR AO CORTE.....	23
3.1. INTRODUÇÃO.....	23
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
3.4. CONCLUSÕES.....	38
3.5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	38
4. ARTIGO 2: DESENVOLVIMENTO DE DISCO DENTADO PASSIVO PARA CORTE DE PALHADA.....	40
4.1. INTRODUÇÃO.....	40
4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	44
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47

4.3.1	Desenvolvimento do disco dentado de corte passivo.....	47
4.3.2.	Análise da trajetória do dente do disco de corte de rolamento.....	50
4.3.3.	Movimentos em relação ao centro do disco.....	54
4.3.3.1.	Forças que atuam nos dentes do disco e provocam momentos.....	56
4.3.3.1.1.	Força de corte.....	56
4.3.3.1.2.	Força de resistência do solo ao deslocamento dos dentes do disco.....	58
4.3.3.1.3.	Força de resistência do solo a penetração dos dentes.....	62
4.3.4.	Diferença entre o valor da frente de ruptura e a distância real entre os dois dentes consecutivos.....	64
4.3.5.	Relação entre a altura e a largura do dente.....	68
4.3.6.	Altura da palhada.....	68
4.3.7.	Simulações.....	68
4.3.8.	Ensaio.....	82
4.3.8.1.	Avaliação da força vertical aplicada ao centro do disco.....	85
4.4.	CONCLUSÕES.....	87
4.5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
5.	ARTIGO 3: AVALIAÇÃO DE DISCOS DENTADOS PARA CORTE DE PALHIÇO EM CAIXA DE SOLO.....	91
5.1.	INTRODUÇÃO.....	91
5.2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	95
5.2.1.	O protótipo de ensaios.....	100
5.2.2.	Instrumentação utilizada.....	101
5.2.3.	Preparo da caixa de solo.....	103
5.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	105
5.3.1.	Análise das variáveis de controle dos ensaios.....	105
5.3.1.1.	Análise da umidade do solo.....	106
5.3.1.2.	Análise da umidade do palhiço.....	107
5.3.1.3.	Análise da resistência do solo à penetração.....	107
5.3.2.	Tratamento dos sinais coletados nos ensaios.....	110
5.3.2.1.	Tratamento dos sinais do anel octogonal.....	112
5.3.2.2.	Análise espectral de frequência dos sinais das forças vertical e horizontal.....	112

5.3.2.3.	Tratamento dos sinais dos sensores indutivos.....	116
5.3.3.	Avaliação da velocidade de translação dos discos.....	117
5.3.4.	Análise dos atributos utilizados na avaliação dos três tipos de discos de corte estudados (experimento 1).....	120
5.3.4.1.	Avaliação da força vertical.....	120
5.3.4.2.	Avaliação da força horizontal.....	122
5.3.4.3.	Avaliação do momento aplicado ao centro do disco.....	124
5.3.4.4.	Avaliação da razão de velocidades (λ).....	125
5.3.4.5.	Avaliação da quantidade de palhiço enterrada pelos discos.....	127
5.3.5.	Análise dos atributos utilizados na avaliação dos três discos dentados de corte estudados (experimento 2)	134
5.3.5.1.	Avaliação da força vertical.....	134
5.3.5.2.	Avaliação da força horizontal.....	135
5.3.5.3.	Avaliação do momento aplicado ao centro do disco.....	136
5.3.5.4.	Avaliação da razão de velocidades (λ).....	137
5.3.5.5.	Avaliação da quantidade de palhiço enterrada pelos discos.....	138
5.4.	CONCLUSÕES.....	140
5.5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	141
6.	CONCLUSÕES GERAIS.....	144
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS.....	146

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1:	Lâmina de corte mostrando: A - ângulos e dimensões relativas à faca e seu movimento; B - ângulo oblíquo da lâmina.	25
FIGURA 2:	Equipamento de ensaio montado para obtenção dos dados de força de corte, evidenciando os principais componentes.	27
FIGURA 3:	Forças de corte (Newton), em função do deslocamento, em micrômetros, das lâminas de 0° e 10° de ângulo oblíquo, obtidas em ensaios com palha na quantidade correspondente a 12 Mg*ha ⁻¹ e umidade de 16%.	30
FIGURA 4:	Forças de corte (F) obtidas nos ensaios de laboratório para as lâminas com ângulos oblíquos de 0° (sem ângulo) e de 10°, em função da variação da quantidade de palha (q).	31
FIGURA 5:	Força específica de corte (Fe), em função da umidade da palha da cana (U) e lâmina com ângulo oblíquo de 5°.	33
FIGURA 6:	Energia específica de corte (Ee), em função da umidade da palha da cana (U) e lâmina com ângulo oblíquo de 5°.	35
FIGURA 7:	Força específica de corte (Fe), em função do ângulo oblíquo da lâmina (Ao), para palha com umidade de 14 %.	36
FIGURA 8:	Bordas de discos de corte de rolamento existentes no mercado.	40
FIGURA 9:	Geometria do disco de corte dentado.	48
FIGURA 10:	Trajetoória de dois dentes consecutivos do disco de 16 dentes, R = 304,8. mm, p = 70 mm, h = 75 mm e $\lambda = 0.95$, durante o período efetivo de corte, em função do deslocamento.	53
FIGURA 11:	Diagrama da reação à força de corte aplicada na palhada pelo dente do disco e suas componentes.	56
FIGURA 12:	Diagrama mostrando o desenho esquemático do dente posterior, evidenciando o ângulo “ka” e o segmento $\overline{on'}$.	58

FIGURA 13: Diagramas das forças de resistências do solo no sentido horizontal, aplicadas nos dentes anterior e posterior e suas respectivas componentes normais.	59
FIGURA 14: Diagrama mostrando os segmentos utilizados nos cálculos das distâncias de aplicação das forças de reação do solo e da área de penetração dos dentes.	61
FIGURA 15: Diagramas das forças de resistência do solo à penetração aplicadas nos dentes anterior e posterior e suas respectivas componentes.	62
FIGURA 16: Geometria utilizada para calcular o valor da distância real entre dois dentes consecutivos.	65
FIGURA 17: Resposta da simulação do disco de 508 mm, com 16 dentes, trabalhando na profundidade de 70 mm, na presença de palhicho referente a 10 Mg*ha ⁻¹ e resistência do solo igual a 2 Mpa.	70
FIGURA 18: Resposta da simulação do disco de 609,6 mm, com 16 dentes, trabalhando na profundidade de 70 mm, na presença de palhicho referente a 10 Mg*ha ⁻¹ e resistência do solo igual a 2 Mpa.	70
FIGURA 19: Resposta da simulação do disco de 711,2 mm, com 16 dentes, trabalhando na profundidade de 70 mm, na presença de palhicho referente a 10 Mg*ha ⁻¹ e resistência do solo igual a 2 Mpa.	71
FIGURA 20: Caixa de solos onde foram realizados os ensaios.	95
FIGURA 21: Caracterização geométrica dos discos de corte confeccionados.	96
FIGURA 22: Tipos de discos utilizados no primeiro experimento: A – disco dentado.	98
FIGURA 23: Foto dos três discos dentados com 16 dentes e diâmetros de 28”, 24” e 20”, respectivamente, da esquerda para a direita, que foram utilizados nos ensaios.	99
FIGURA 24: Principais partes do protótipo construído para ensaios na caixa de solo.	100
FIGURA 25: Diagrama da montagem do sistema de aquisição dos dados de ensaio.	102

FIGURA 26:	Resistência à penetração do solo obtida em um talhão de cana-de-açúcar após ter decorrido 30 dias da colheita mecanizada sem queima.	108
FIGURA 27:	Resistência do solo à penetração, obtida nos leitos preparados para execução do primeiro experimento.	109
FIGURA 28:	Resistência do solo à penetração obtida nos leitos preparados para execução do segundo experimento.	110
FIGURA 29:	Dados de forças e momento coletados no Ensaio 4R100-R3, após processamento pela rotina computacional.	111
FIGURA 30:	Sinais das forças horizontal e vertical para os três discos estudados.	113
FIGURA 31:	Periodogramas dos sinais das forças horizontal e vertical, obtidos pela FFT, para os três discos estudados.	114
FIGURA 32:	Parte do sinal bruto obtido a partir dos sensores indutivos para o ensaio 4R100-B3.	117
FIGURA 33:	Parte do sinal obtido dos sensores indutivos para o ensaio 4R100-B3 após processamento.	117
FIGURA 34:	Fotos dos blocos 1, 2 e 3, antes da coleta do palhiço que foi enterrado pelos discos.	129
FIGURA 35:	Fotos dos blocos 4, 5 e 6, antes da coleta do palhiço que foi enterrado pelos discos.	130
FIGURA 36:	Detalhe do corte efetuado pelo disco dentado (A) e pelo disco liso (B).	131
FIGURA 1.1:	Localização das espessuras utilizadas para cálculo do "Sharpness Index".	156
FIGURA 1.2:	Localização das variáveis utilizadas no cálculo do Fator de corte do disco.	157
FIGURA 3.1:	Descrição geométrica do ângulo epsilon e da borda cortante do dente do disco \overline{bc} , em função de η .	166
FIGURA 3.2:	Geometria utilizada para definir a distância efetiva de corte de cada dente do disco.	167

FIGURA 4.1: Geometria com diagrama de forças utilizadas para determinar o momento aplicado ao centro do disco	179
FIGURA 6.1: Distribuição de camada de solo na caixa com auxílio de lâmina	192
FIGURA 6.2: Rolo compactador sendo aplicado sobre camada de solo	193
FIGURA 6.3: Escarificação da camada recém compactada	193
FIGURA 7.1: A: Sistema de aquisição de dados acoplado ao Microcomputador; B: detalhe evidenciando a caixa do anel octogonal, fixado entre a coluna e o chassi do protótipo.	196
FIGURA 7.2: Sensores indutivos utilizados nos ensaios com os discos de corte.	196

LISTA DE TABELAS

TABELA 1:	Dimensões, ângulo do gume e fator de corte (F_c), obtidos para as lâminas utilizadas nos ensaios, adotando-se a metodologia apresentada no Apêndice 1.	29
TABELA 2:	Variáveis utilizadas nas rotinas computacionais para definição da geometria do disco dentado de corte passivo.	46
TABELA 3:	Resultado das simulações executadas com disco de 508 mm (20”) de diâmetro, espessura de 6 mm, velocidade de avanço de $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, em função do número de dentes e da profundidade de operação.	76
TABELA 4:	Resultado das simulações executadas com disco de 558,8 mm (22”) de diâmetro, espessura de 6 mm, velocidade de avanço de $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ em função do número de dentes e da profundidade de operação.	77
TABELA 5:	Resultado das simulações executadas com disco de 609,6 mm (24”) de diâmetro, espessura de 6 mm, velocidade de avanço de $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, em função do número de dentes e da profundidade de operação.	78
TABELA 6	Resultado das simulações executadas com disco de 660,4 mm (26”) de diâmetro, espessura de 6 mm, velocidade de avanço de $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, em função do número de dentes e da profundidade de operação.	79
TABELA 7:	Resultado das simulações executadas com disco de 711,2 mm (28”) de diâmetro, espessura de 6 mm, velocidade de avanço de $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, em função do número de dentes e da profundidade de operação.	80
TABELA 8:	Resultados de M_c , λ e Q_{palha} obtidos nos ensaios realizados na caixa de solo com os três discos dentados.	84

TABELA 9:	Resultados de FV, λ e Qpalha obtidos nos ensaios executados na caixa de solo para os discos dentado e liso, com diâmetro de 609,6 mm.	86
TABELA 10:	Principais dimensões dos discos liso e recortado utilizados no primeiro experimento.	97
TABELA 11:	Principais dimensões construtivas dos discos dentados utilizados no primeiro e segundo experimentos.	97
TABELA 12:	Valores médios obtidos para a umidade do solo e do palhiço dos leitos preparados para os experimentos.	106
TABELA 13:	Resumo da análise de variância das velocidades de translação (V_o) do protótipo para os dois experimentos.	119
TABELA 14:	Resumo da análise de variância para a força vertical “FV” obtida no primeiro experimento.	121
TABELA 15:	Médias dos atributos utilizados para a avaliação do desempenho dos três discos de corte estudados, nas duas profundidades adotadas (primeiro experimento).	121
TABELA 16:	Resumo da análise de variância para a força horizontal “FH” obtida no primeiro experimento.	123
TABELA 17:	Resumo da análise de variância para o momento aplicado ao centro do disco “ M_c ” no primeiro experimento.	125
TABELA 18:	Resumo da análise de variância para a razão de velocidades “ λ ” obtida no primeiro experimentos.	126
TABELA 19:	Resumo da análise de variância para quantidade de palhiço enterrado pelos discos “Qpalha” no primeiro experimento.	131
TABELA 20:	Resumo da análise de variância para a força vertical “FV” obtida no segundo experimento.	135
TABELA 21:	Médias dos atributos utilizados para a avaliação do desempenho dos três discos dentados estudados (segundo experimento).	135
TABELA 22:	Resumo da análise de variância para a força horizontal “FH” obtida no segundo experimento.	136

TABELA 23:	Resumo da análise de variância para a o momento aplicado ao centro do disco “M _C ” no segundo experimento.	137
TABELA 24:	Resumo da análise de variância para a razão velocidade (λ) obtida no segundo experimento.	137
TABELA 25	Resumo da análise de variância para a quantidade de palhiço enterrado pelo disco “FH” obtida no segundo experimento	138
TABELA 1.1:	Dimensões, ângulo do gume (AG) e fator de corte (Fc) obtidos para as lâminas e discos de corte utilizados nos ensaios dos Artigos 1 e 2.	158

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE 1:	Caracterização da espessura atual do gume das lâminas e discos de corte utilizados nos ensaios	154
APÊNDICE 2:	Rotina computacional utilizada no matlab, para simular a trajetória de 2 dentes consecutivos do disco dentado de corte passivo	159
APÊNDICE 3:	Rotina para cálculo das forças "h" e "v" atuantes no dente do disco de corte e da distância efetiva de corte para cada dente	164
APÊNDICE 4:	Momento aplicado ao centro do disco de corte	178
APÊNDICE 5:	Análises realizadas com o solo da caixa de solo do laboratório de protótipos	182
APÊNDICE 6:	Seqüência de passos utilizados para o preparo do leito de ensaios da caixa de solo do laboratório de protótipos	191
APÊNDICE 7:	Instrumentação utilizada na coleta de dados dos ensaios na caixa de solos	195
APÊNDICE 8:	Rotina elaborada para tratamento dos dados dos ensaios obtidos por meio do sistema de aquisição de dados	197
APÊNDICE 9:	Resumo das análises estatísticas dos experimentos	204

LISTA DE SÍMBOLOS

1 Latinos:

AA: ângulo de ataque (rad);

AE: ângulo de escape (rad);

AG: ângulo do gume da lâmina (rad);

AL: ângulo de limpeza (rad);

Ao: ângulo oblíquo da lâmina (rad);

AP: área momentânea de penetração do dente anterior (mm^2);

C/N: relação entre o carbono e o nitrogênio existente na palhada;

D_B : distância entre o centro do disco e o ponto onde a força RH_p é aplicada no dente anterior (mm);

D'_B : distância entre o centro do disco e o ponto onde a força RH'_p é aplicada no dente posterior (mm);

K: elemento químico potássio;

MO: matéria orgânica;

MRH: momento de resistência dado pela componente RH_p e seu braço de aplicação D_B (mN);

MRH': momento de resistência dado pela componente RH'_p e seu braço de aplicação D'_B (mN);

MRP: Momento aplicado, em relação ao centro do disco, pela componente RP_p e seu braço da aplicação (mN);

MRP': Momento aplicado, em relação ao centro do disco, pela componente RP'_p e seu braço da aplicação (mN);

MFC: momento dado pela força de resistência do palhiço ao corte (mN);

NH_4^+ : amônia;

N: elemento químico nitrogênio;

RP: resistência do solo à penetração do dente anterior do disco (kPa);

RP': resistência do solo à penetração do dente posterior do disco (kPa);

RP_p : componente de RP, perpendicular ao flanco do dente anterior (kPa);

RP'_p : componente de RP, perpendicular ao flanco do dente posterior (kPa);

RP_C : resistência do solo à penetração do cone (kPa);

AP': área momentânea de penetração do dente posterior (mm^2);

Da: distância entre a ponta do dente anterior e o ponto de aplicação de RH_p (mm);
 Da': distância entre a ponta do dente posterior e o ponto de aplicação de RH'_p (mm);
 EG: espessura do gume (mm);
 EL: espessura da lâmina (mm);
 Ee: energia específica (J);
 F: força de corte (N);
 F_C : fator de corte (mm^{-2});
 FC_p : componente da força RFC, perpendicular ao segmento \overline{on} (N);
 FC_R : componente da força RFC, em direção ao centro do disco (N);
 Fe: força específica de corte (N);
 FS: linha que define o fundo do sulco
 FV: força vertical aplicada ao centro do disco para penetrá-lo no solo (N);
 FH: força horizontal aplicada no disco (FH);
 Ka': ângulo formado entre a força RFC e sua componente FC_R (N)
 Mc: momento aplicado ao centro do disco (mN);
 Mm: momento motor, dado pela soma dos momentos que favorecem o giro do disco (mN);
 Mr: momento resistente, dado pela soma dos momentos que impedem o giro do disco (mN);
 \overline{R} : vetor de posição do ponto b, na base móvel;
 R: raio externo do disco de corte (mm);
 RFC: reação da força de corte dada pelo palhicho à ação cortante da faca (N);
 RH: componente da força de reação horizontal dada pelo solo à ação do dente anterior do disco (N);
 RH': componente da força de reação horizontal dada pelo solo à ação do dente posterior do disco (N);
 RH_p : resultante de RH, normal ao flanco do dente anterior (N);
 RH'_p : resultante de RH', normal ao flanco do dente posterior (N);
 Ri: raio interno do disco (mm);
 Rs: resistência do solo à penetração (kPa);
 SP: linha que define a superfície da camada de palha;
 SS: linha que define a superfície do solo;
 U: umidade da palha (%);

Vo: velocidade de translação do disco ($m \cdot s^{-1}$);

a: ponto localizado na interseção do segmento \overline{ob} com a circunferência interna;

b: ponta do dente posterior;

c: ponto localizado na interseção da circunferência interna, com a linha que define a superfície da palha, na base do dente posterior;

ca: adesão do solo (kPa);

cs: coesão do solo (kPa);

d: ponto localizado na interseção da circunferência externa com a linha que define a superfície do solo

dc: deslocamento do centro do disco (m);

e: ponto localizado na base do dente anterior ao dente de referência, sobre a circunferência interna, no lado sem afiação (ombro ou flanco do dente)

f: ponto definido pela interseção da SS e a linha que define o ombro, ou flanco, do dente;

h: altura indeformada da palhada (mm);

j: ponta do dente anterior;

k: ângulo auxiliar no cálculo da distância real momentânea entre os dentes anterior e posterior (rad);

ka': ângulo definido pela perpendicular que passa tangente ao ponto n' e o seguimento $\overline{on'}$ (rad);

l: ponto de interseção entre SS e a perpendicular tangente ao ponto j;

n: ponto localizado na circunferência interna do disco, onde se inicia o gume da lâmina do dente anterior;

n': ponto de contato momentâneo entre a borda cortante do disco posterior e o solo;

o: ponto que define o centro do disco dentado;

p: altura do ombro, ou flanco, do dente, que corresponde à profundidade de trabalho projetada para o disco (mm);

q: quantidade de palha por hectare ($Mg \cdot ha^{-1}$)

r: frente de ruptura do solo (mm)

s: ângulo auxiliar utilizado no cálculo da distância Da' do dente anterior (rad);

s': ângulo auxiliar utilizado no cálculo de $\overline{bn'}$ e da distância Da' do dente posterior (rad);

t: tempo (s);

u: ângulo auxiliar no cálculo da distância real momentânea entre os dentes anterior e posterior (rad);
 vt: velocidade tangencial do disco ($m \cdot s^{-1}$);
 w: espessura do disco de corte (mm);

2 Gregos:

α : ângulo de ataque do dente anterior, em relação à superfície do solo (rd);
 α' : ângulo de ataque do dente posterior, em relação à superfície do solo (rd);
 ϵ : ângulo da ponta do dente;
 δ : ângulo de atrito solo metal (graus);
 γ : densidade aparente do solo ($Mg \cdot m^{-3}$);
 λ : razão entre as velocidades de translação e rotação do disco;
 η : ângulo formado entre os segmentos de retas \overline{ob} e \overline{oc} ; (rad);
 σ : ângulo momentâneo, em função do giro do disco, formado entre a normal e o segmento \overline{oj} (rad);
 σ' : ângulo momentâneo, em função do giro do disco, formado entre a normal e o segmento \overline{ob} (rad);
 ω : velocidade angular do disco de corte ($rad \cdot s^{-1}$);
 θ : ângulo de rotação do disco dentado (rad);
 ϕ : ângulo de atrito interno do solo (graus);
 τ : ângulo formado entre a normal e o segmento \overline{oc} (rad);
 ζ : ângulo entre a perpendicular e o segmento $\overline{on'}$

LISTA DE ABREVIATURAS

1 Abreviaturas

BU: base úmida;

BS: base seca;

C.V.: coeficiente de variação (%);

GL: graus de liberdade obtidos na análise de variância;

QM: quadrado médio obtido na análise de variância;

D/pr: relação entre o diâmetro do disco recortado e a profundidade do recorte;

D/p: relação entre o diâmetro do disco recortado e a sua profundidade de trabalho;

distReal: distância real momentânea, entre dois dentes consecutivos, dado pelo segmento $\overline{fn'}$ (mm);

Qpalha: quantidade de palhiço que o disco introduziu, por metro linear, no sulco aberto quando da sua passagem no solo (g);

RESUMO

Os restos culturais da colheita da cana-de-açúcar realizada sem o processo de queima são consideráveis e dificultam o cultivo e a adubação executados na soqueira. A revisão da bibliografia revela que a manutenção dos restos culturais pode beneficiar a produtividade, reduzir as perdas de solo por erosão, dificultar o aparecimento de plantas daninhas e servir como um reservatório de nutrientes. A maioria dos autores concorda que o adubo nitrogenado deve ser incorporado, mas os implementos para cultivo disponíveis no mercado não têm apresentado resultados satisfatórios, quando trabalham sobre os restos culturais da cana (palhiço). A deficiência destes implementos está nos discos de corte. O mercado dispõe de quatro tipos de discos de corte de rolamento diferentes, mas a bibliografia consultada revela que o trabalho deles é deficiente, pois não conseguem penetrar no solo seco ou duro e no solo úmido, ou com pouca resistência, introduzem os restos culturais no sulco por eles produzidos, sem corta-los. Diante do problema, o presente trabalho propõe desenvolver um disco de corte de rolamento, com geometria dentada, que tenha maior habilidade de cortar o palhiço em relação aos outros discos existentes. Inicialmente, estudou-se o comportamento do palhiço ao corte, por meio de um ensaio, usando um dispositivo com faca e contra-faca, onde se analisou a influência da quantidade e da umidade da palha, bem como do ângulo oblíquo da lamina de corte. O resultados deste estudo demonstraram que a força máxima específica de corte, em função da umidade da palha, tem tendência crescente, com uma taxa de incremento cada vez menor, de forma que a partir de 28 % de umidade, em base seca, o valor da força específica se manteve praticamente constante. O menor valor foi de 7,7 MPa, obtido na umidade da palha de 9,6 %. O segundo passo foi conceber a geometria básica do disco dentado e desenvolver uma metodologia para prever o comportamento dos discos projetados, a partir da geometria básica. Uma rotina computacional foi elaborada para descrever o movimento do disco dentado e prever seu comportamento frente às resistências do solo e da palha. Os resultados das simulações permitiram, após análise de 75 configurações diferentes, escolher três discos dentados para ensaios de desempenho. Foram executados dois experimentos em caixa de solos, sendo que o primeiro comparou o disco dentado com um disco liso e um recortado, já disponíveis no mercado. A força vertical aplicada no disco dentado e a quantidade de palhiço introduzida no sulco sem ser cortada foram inferiores às exigidas pelos outros discos. A relação entre velocidade linear e de translação do disco dentado foi maior, em relação aos outros dois, atingindo valor superior a 1,0. No segundo experimento, os

três discos dentados foram comparados entre si. Os resultados deste experimento demonstram que a habilidade do disco dentado em cortar o palhiço não é função apenas da interação solo-dente, mas também dos ângulos e distâncias envolvidas no processo. Os resultados, também, permitiram afirmar que o desempenho do disco dentado é superior ao dos discos liso e recortado e que ele não precisa ter mais do que 609,6 mm (24”) de diâmetro, para trabalhar com palhiço de cana.

ABSTRACT

The crop residues from green cane harvesting are considerable and make ratoom cultivation a difficult job. A bibliographic revision reveals that retaining crop residues in the field can improve productivity, reduce soil loss to erosion, slow down weed development and act as a nutrient reservoir. Most authors agree that nitrogen fertilizers should be incorporated, but cultivation implements available on the market have not shown satisfactory results when working over sugarcane crop residues (trash). Those implements are faulty because of their disk coulters. The market has four different types of rolling disk coulters, but the bibliography shows that they have been poorly designed, because they cannot penetrate dry or hard soil, or a soil that is humid or has little resistance, introducing crop residues in the furrows produced by them, without cutting the stubble. In view of this problem, the goal of this project is to develop a rolling disk coulters having a toothed geometry, with a greater ability to cut trash than other disks. Initially, the behavior of trash subjected to cutting was studied by means of an assay that employed a cutting device having a knife and a counter-knife. The influence of the amount and moisture of trash, as well as the oblique angle of the cutting blade were studied. The maximum specific cutting strength, dependent upon stubble moisture, has a tendency to increase, but with an incremental rate progressively smaller. Starting at 28% moisture, on a dry basis, the specific strength value was maintained practically constant, and the smallest value, 7.7 MPa, was obtained at 9.6% stubble moisture. The second step was to conceive the basic geometry of the toothed disk and develop a methodology to predict the behavior of the projected disks, from the basic geometry. A computational routine was written to describe the motion of the toothed disk and predict its behavior under the resistance offered by the soil and the stubble. After analysis of 75 different configurations, simulation results allowed us to select three toothed disks for performance tests. Two experiments were carried out in the soil bin, the first comparing the toothed disk with a smooth and a notched disk, already available on the market. The vertical force applied to the toothed disk and the amount of uncut trash introduced in the furrow were lower than those observed at the other disks. The ratio between linear and translation speed for the toothed disk was higher as compared to the other two disks, being higher than 1.0. In the second experiment, the three toothed disks were compared among themselves. The results obtained in this experiment demonstrated that the disk's ability to cut the trash is due not only to the soil-tooth interaction, but also the angles and distances involved in the process. The results

also allow us to say that the toothed disk performance is better than the smooth and notched disk performances, and the diameter at the disk that it does not have to be larger than 609.6 mm (24") to be able to work with sugarcane trash.

1. INTRODUÇÃO

O manejo da cultura de cana-de-açúcar tem sofrido alterações nos últimos anos no que se refere à colheita, principalmente no Estado de São Paulo. Os canaviais que tradicionalmente eram queimados para facilitar o corte manual e para diminuir o volume de material estranho a ser transportado, passaram a ser colhidos sem a queima. Esta prática de colheita sem despalha à fogo é conhecida por colheita de "cana crua" ou "cana verde".

De acordo com MAGALHÃES e BRAUNBECK (1998) tem crescido nos últimos anos, por parte dos ambientalistas, a exigência de que a colheita de cana-de-açúcar seja realizada sem a queima. Fato este, que encontra respaldo do setor político, à medida que a demanda por investimentos de capital em outros setores tecnológicos exige um melhor controle da qualidade do ar.

No Estado de São Paulo, por exemplo, foi promulgado o Decreto Nº 45.869, de 22 de junho de 2001, regulamentando o emprego do fogo como método despalhador e facilitador do corte da cana-de-açúcar. Por este decreto, esta prática deve ser eliminada de forma gradativa, de forma que, a partir de 2018 ela não mais será permitida.

O sistema de colheita de cana crua traz algumas conseqüências que obrigam novas práticas de manejo. A palha da cana mais os ponteiros, ficam depositados sobre o solo após a colheita. Este material forma uma cobertura morta que, aos 12 dias após a colheita, tem uma espessura de 80 a 100 mm, de acordo com ABRAMO FILHO et al. (1993) e ORLANDO FILHO et al. (1994), apresentando uma quantidade de matéria seca que varia entre 7 a 15 Mg*ha⁻¹, em função da variedade e da produtividade local (RÍPOLI et al., 1991 e CANTARELLA, 1998). Esta quantidade de palhicho dificulta as práticas culturais tradicionalmente realizadas nos canaviais, notadamente as adubações de manutenção e a escarificação ou subsolagem do solo. Segundo RÍPOLI (1991a), palhicho é a parte do material remanescente no terreno após a operação da colheita de cana-de-açúcar e constituída de ponteiros, folhas verdes e palha.

O eficiente cultivo mecânico da soca de cana-de-açúcar, tendo o palhicho como cobertura, envolve as práticas de aplicação dos fertilizantes no perfil do solo, a quebra de camadas compactadas e a manutenção da cobertura de palhicho sobre o solo, de forma a protegê-lo da ação das chuvas, além de impedir o desenvolvimento de plantas invasoras e retardar seu ressecamento em períodos de longas estiagens. Esta operação mecanizada tem sido uma tarefa

difícil, pois os implementos agrícolas disponíveis no mercado, para tal fim, apresentam deficiências. Esforços, como os trabalhos apresentados em WILLCOX (1990) e AGRICOLA INFORMA (1998), tem sido empregados na busca de resolver ou minimizar este problema.

A maior deficiência apresentada pelos implementos de cultivo de cana está na ineficiência de seus discos de corte de rolamento passivo. Este disco de corte se constitui de um disco metálico, de diâmetro muito maior que sua espessura, com borda normalmente afiada dos dois lados, em forma de cunha, que gira livre, pivotado em um mancal. Ele tem a função de cortar o palhiço, permitindo que a ferramenta de abertura de sulco ou subsolagem possa realizar seu trabalho sem sofrer embuchamento (acúmulo de material vegetal na coluna da ferramenta, impedindo que ela trabalhe adequadamente). A dificuldade de cortar restos vegetais, apresentada pelo disco de corte de rolamento passivo está associada à interação entre ele e o solo. KUSHWAHA et al. (1983) já alertavam para o fato de que a penetração do disco pode ser inadequada quando o solo está seco e duro. Quando o solo está úmido ou solto o disco de corte tende a empurrar o resíduo vegetal para dentro do solo, sem cortá-lo.

Na atualidade, o disco de corte de rolamento passivo torna-se uma ferramenta imprescindível para que se possam executar práticas agrícolas na presença de restos vegetais, pois ele é a única ferramenta, utilizada para cortar restos vegetais, que equipa tanto implementos de cultivo, como máquinas utilizadas no chamado sistema de “plantio direto” de culturas anuais. Estes discos de corte podem ser encontrados no mercado com quatro diferentes geometrias de borda, a saber: lisa, recortada, estriada e ondulada. Alguns estudos, como o realizado por CHOI & HERBACH, (1986) demonstram que os discos de corte de rolamento com estes formatos de borda não têm se mostrado eficientes no corte dos restos vegetais.

Diante do problema apresentado, este trabalho propõe o desenvolvimento de um disco de corte de rolamento que apresente melhor desempenho, em relação aos discos disponíveis no mercado. É aqui sustentada a tese de que é possível melhorar a eficiência do cultivo mecânico em soqueiras de cana-de-açúcar mantendo a camada de palhiço, resultante da colheita sem queima prévia, por meio de discos de corte de rolamento dentados. Os dentes, ao mesmo tempo, cortariam palhiço e trabalhariam como ferrameta estreita, possibilitando uma somatória de momentos, aplicados ao centro do disco, que seja mais favorável ao corte, do que os demais discos existentes no mercado.

O presente trabalho busca, objetivamente, desenvolver um disco de corte de rolamento dentado que possa apresentar um melhor desempenho em relação aos discos existentes no mercado, no que se refere à qualidade do corte e à minimização da carga vertical aplicada sobre o mancal. Para atender estes objetivos e confirmar a tese postulada desenvolveu-se o trabalho em etapas que originaram três artigos técnicos. No primeiro, é apresentado o estudo realizado para conhecer o comportamento da palha de cana-de-açúcar quando sujeita ao corte.

No segundo artigo foi concebido o projeto da geometria básica do disco de corte dentado. Também foram desenvolvidos os procedimentos para dimensionar e simular o trabalho de discos dentados, com a finalidade de prever o seu comportamento frente a uma condição de solo. Neste segundo artigo foram, ainda, realizadas simulações, utilizando informações obtidas no primeiro artigo, com 75 configurações de discos projetados.

No último artigo foram realizados dois experimentos, sendo um para comparar o comportamento do disco dentado com o dos discos liso e recortado já existentes no mercado; o outro foi realizado com três configurações de disco dentado, escolhidas a partir das simulações realizadas no segundo artigo, buscando verificar diferenças de comportamento entre eles em uma condição de solo, principalmente no que se refere à qualidade do corte e necessidade de força vertical sobre o mancal.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A colheita da cana-de-açúcar pelo sistema denominado de cana crua interfere em todo o processo produtivo desta cultura, principalmente quando ela é realizada mecanicamente. A manutenção, eliminação ou retirada do palhicho do campo de produção é um dos questionamentos que são atualmente levantados.

Paralelamente às transformações que vem experimentando o setor sucro-alcooleiro do Brasil, há uma tendência mundial de se repensar a agricultura, com a introdução do conceito de sustentabilidade de sistemas agrícolas produtivos. De acordo com NJOS (1994), sustentabilidade na agricultura pode ser definida como sendo a administração próspera de recursos agrícolas para satisfazer as necessidades humanas variáveis, enquanto mantém ou melhora a qualidade do ambiente e conserva recursos naturais. Ela reside, basicamente, na manutenção da produtividade ao longo do tempo e, para tanto, os recursos do ambiente, como solo, água e banco de germoplasma devem ser manejados adequadamente, utilizando-se de medidas que favoreçam a sua conservação e promovam a reciclagem dos subprodutos gerados.

O sistema de “plantio direto” de culturas anuais, comparado ao sistema de plantio convencional é exemplo de um sistema agrícola mais sustentável. Inúmeros autores, entre eles HEDLEY et al. (1982), PARRA (1986), SÁ (1991) e MIYZAWA et al. (1992) relatam as vantagens advindas desta prática alternativa de manejo de solo e água, que em última instância está calcada em dois fatores básicos: mínima mobilização do solo e manutenção permanente de restos vegetais sobre ele. No entanto, as vantagens advindas deste sistema são perceptíveis somente após vários anos de manutenção das práticas por ele preconizadas, conforme relatos de alguns autores, dentre eles JONES et al. (1968) e TRIPLET e DOREN (1969). Herbert Bartz, pioneiro no sistema de “plantio direto” de culturas anuais no Brasil, em entrevista dada à REVISTA PLANTIO DIRETO (1997), afirma que a estabilidade deste sistema é obtida após um período de 10 a 15 anos, com elevação do teor de matéria orgânica acima de 5%, aumento do potencial de fertilidade do solo, que é um indicador da sustentabilidade do sistema.

A manutenção de restos vegetais sobre o solo (*mulching*) é uma prática agrícola conhecida desde o início do século passado, quando já era recomendada com objetivos diversos, como a conservação de umidade do solo, controle de plantas daninhas, reciclagem de nutrientes, aumento do teor de matéria orgânica, aumento da vida microbiana benéfica para o solo, melhoria

nas suas propriedades químicas e físicas e impedimento da incidência direta dos raios solares sobre o solo (Reynoso, citado por ARÉVALO, 1998). A esses objetivos podem-se somar, ainda, os fatos de que a palhada evita o impacto direto das gotas de chuva sobre o solo e diminui a velocidade de escoamento das águas em sua superfície.

2.1. A MANUTENÇÃO DO PALHIÇO

ORLANDO et al. (1998) realizaram um trabalho, em áreas de terceiro ano (2ª soca) de cana crua e de despalha à fogo, da variedade SP716163, em Latossolo Vermelho do Estado de São Paulo, onde variaram as dosagens de nitrogênio e potássio, bem como o modo de aplicação. Neste trabalho os autores encontraram valores de produtividade, significativamente, inferiores para a cana crua em relação à cana queimada, que associaram ao ataque mais intenso de pragas e ao decréscimo na temperatura da superfície do solo logo abaixo do palhiço, em até 5°C. Constataram, por outro lado, um aumento nos teores de matéria orgânica, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre no solo sob o palhiço em relação aos tratamentos onde a cana foi queimada antes da colheita. Mencionam, ainda, um aumento no teor da água do solo naqueles tratamentos. O potássio foi o único elemento encontrado em maior quantidade na área queimada.

MEYER (1996), no entanto, em um trabalho de revisão a respeito da pesquisa em manejo de solo para a sustentabilidade da produção de cana, relata problemas de degradação do solo e declínio de produção em vários países, como Austrália, Colômbia e África do Sul. Os problemas estão relacionados à compactação e à perda de solo pela erosão, perda da matéria orgânica e acidificação dos solos. Conclui afirmando que estratégias baseadas na prioridade às práticas de manejo, a partir de condições específicas de solo, bem como, ênfase a retenção de resíduos da colheita, reciclagem de nutrientes, manejo das fileiras e entre fileiras de plantio, baseado no cultivo mínimo, cultivo intercalar e cultivo em camalhão, são práticas que ajudarão desenvolver a produtividade, lucratividade e sustentabilidade do sistema produtivo.

Em distritos não irrigados da Austrália, de acordo com RIDGE E DICK (1989), podem ser esperados benefícios na produtividade de cana em vários períodos, quando cultivada sobre cobertura com palhiço. Afirmam, no entanto, que a adoção desta prática está ligada, principalmente, à redução dos custos das operações executadas na soqueira. Benefícios adicionais apontados incluem o maior conteúdo de açúcar, redução da erosão dos solos, aumento da

capacidade operacional das colhedoras quando o tempo está muito úmido e um potencial para a manutenção da fertilidade do solo pelo retorno dos resíduos vegetais da cana.

BEER et al. (1996) apresentaram as principais vantagens advindas da colheita em cana crua, associadas à manutenção do palhicho. Estas incluem o incremento de produção em condições marginais de umidade, o incremento da recuperação de açúcar, a redução dos níveis de cana deteriorada, a supressão de plantas daninhas, o incremento da taxa de infiltração de água e a redução das perdas de solo e água.

A manutenção do palhicho sobre o solo, na cultura da cana-de-açúcar pode ser analisada sob vários ângulos:

2.1.1. Benefícios associados à conservação do solo e da água

A manutenção do palhicho sobre o solo apresenta diversas vantagens, no entanto, a mais importante é àquela relacionada à proteção do solo contra a erosão. Matthews e Makepeace citados por PROVE et al. (1986) afirmam que solos do tipo “Krasnozem”, em áreas de canaviais, na Austrália, com 16% de declividade apresentaram perdas de solos de $382 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, que são bem superiores as $12 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, considerada tolerável para climas temperados. Embora a razão de formação de solos sob condições tropicais possa ser maior que $12 \text{ Mg} \cdot \text{ano} \cdot \text{ha}^{-1}$, os níveis de perda de solos de canaviais citados são, para os autores, claramente inaceitáveis.

THOMPSON (1966) realizou um trabalho na África do Sul com a cultura de cana-de-açúcar, em áreas com declive de 11% e solos altamente suscetíveis à erosão, com a finalidade de avaliar as perdas de solo e água. Os resultados por ele obtidos demonstraram que nos tratamentos, onde o solo estava coberto com palha, a redução nas perdas de água, durante o período em que o solo ainda não estava totalmente coberto pela cultura, foi de 90% e a redução nas perdas de solo foram de 60%, em relação aos tratamentos onde o solo não estava coberto por palha.

PLATFORD (1982) conduziu estudos em diversos tipos de solos, utilizando simuladores de chuva para determinar as perdas de solo e água em áreas de cana na África do Sul. Os solos estudados variaram desde o arenoso até argilas bem estruturadas. As maiores perdas ocorreram na área de solo arenoso, serie “Cartref” (70% de areia), com declividade de 9,0%, arada e sem cobertura vegetal. Neste solo, 87% dos 63 mm de água, aplicada em uma hora, não ficaram retidos. Estas perdas ocorreram devido à rápida saturação do perfil do solo. A maior perda de

solo registrada no estudo, foi obtida nesta área, atingindo $30 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Quando foi comparado dois tratamentos em solo da série “Clansthal”, com 10% de argila, tendo 3,5% e 4,0% de declividade, verificou-se que não houve perdas de solo e água nos tratamentos onde não ocorreu a aração ou apresentavam um índice de cobertura com palhicho de 90%. Outro dado interessante é o de que no solo série “Bonheim”, com 43% de argila, 7,5% de declividade, arado e descoberto, as perdas de solo foram de, apenas, $1,0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, embora as perdas de água tenham atingido 40%. Este solo apresentava teor de matéria orgânica alto (3,0%), o que demonstra a sua importância na estabilidade do solo.

YANG (1996) estudou a relação existente entre palhicho e a conservação de um solo argiloso (ultisol) com 7% de declive, em “Lautoka – Figi”, durante o ciclo da cultura da cana planta. Ele encontrou valores de perdas de água de $33 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ em área de cana com palhicho, plantada em nível, enquanto as perdas foram de $46 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ para a área sem palhicho. Encontrou, também, valores de perdas de solo de $182\text{kg}\cdot\text{ano}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$, na área com cobertura, enquanto as perdas, para a área sem cobertura de solo foram de $294 \text{ kg}\cdot\text{ano}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$. Na avaliação da primeira soca, no ano seguinte, as diferenças nos valores obtidos foram mais pronunciadas, com as áreas cobertas com palhicho apresentando sempre menores valores de perdas de água e solo.

De acordo com BERTONI E LOMBARDI (1985) o efeito do manejo do palhicho de cana-de-açúcar, nas perdas de água e solo pela erosão, são evidentes. Considerando-se uma média anual de 1300 mm de chuvas e declividades entre 8,5 a 12%, as perdas de solo, em áreas onde o palhicho é queimado, correspondem a $20,2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, enquanto esta perda foi de apenas $6,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, nas áreas onde o palhicho é mantido. As perdas de água também são superiores para as áreas queimadas em comparação com aquelas cobertas por palhicho (8% contra 2,5%).

PAGE et al. (1986) estudando a importância da retenção do palhicho na cultura da cana-de-açúcar em áreas da Austrália, encontrou valores de perdas de solo de $130 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ no tratamento cuja colheita ocorreu em cana queimada e o palhicho resultante removido e queimado. No tratamento com colheita de cana verde e retenção do palhicho a perda de solo foi nula. Eles atribuem esta redução na erosão do solo à manutenção da cobertura vegetal e à não mobilização do solo.

Quando o solo é pouco mobilizado e se mantém protegido por uma cobertura de restos culturais, a sua perda por escoamento superficial (runoff) é menor, em função do seu melhor estado de agregação e devido à redução do impacto das gotas de chuva e da velocidade de

escoamento da água. Por outro lado, o solo estando melhor estruturado apresenta uma maior velocidade de infiltração da água de chuvas, o que concorre para um menor escoamento superficial destas águas.

2.1.2. Aumento da produtividade

Estudos realizados por vários autores em diversas regiões da Austrália demonstraram haver incremento na produção de cana-de-açúcar nos tratamentos com manutenção da cobertura de palhiço, em relação aos tratamentos onde ele foi queimado, após a colheita mecanizada. DICK & HURNEY (1986) não encontraram diferenças significativas na produtividade de cana entre vários tipos de cultivo da soqueira, mas afirmam que a tendência das produções obtida, de 2 anos de análise em várias usinas, sugere uma vantagem do sistema de cultivo com manutenção do palhiço em relação aos sistemas em que ocorre a queima desse material.

WOOD (1986) instalou seis experimentos para estudar o manejo do palhiço em áreas de colheita de cana verde, no Vale Herbert- Austrália. As médias dos seis ensaios mostraram que a produção da cana planta e da 1ª soca foram ligeiramente superiores, porém não significativas, para o tratamento com queima, em relação ao tratamento sem queima do palhiço. No entanto, na 2ª e 3ª socas o tratamento com manutenção do palhiço apresentou produtividade de colmos e de açúcar por hectare significativamente superiores.

PAGE et al. (1986) estudaram durante 4 anos a importância da manutenção do palhiço em experimentos desenvolvidos em áreas das usinas Isis e Maryborough, na Austrália, comparando o processo convencional de cultivo (colheita em cana queimada, retirada e queima do palhiço) com o cultivo de cana verde com a manutenção do palhiço. Nestes experimentos, verificaram que a produtividade de cana, em geral, foi superior quando o palhiço foi mantido após a colheita de cana crua. O incremento médio da produção da 2ª, 3ª e 4ª socas, na localidade de Hapsburg, foi de 18%.

Os resultados obtidos por McINTYRE et al. (1996) de trabalhos com cana, conduzidos na zona seca (pluviosidade < 1200 mm.ano⁻¹) e em na zona superúmida (pluviosidade > 2500 mm.ano⁻¹) em Maurício, demonstraram a vantagem de se manter a cobertura sobre o solo, quando comparada com tratamentos onde se realizou o enterrio total ou parcial do palhiço ou quando este foi queimado. Em quatro anos de experimentos consecutivos na zona seca, o tratamento que

apresentou a melhor produtividade foi aquele onde o palhiço foi mantido sobre o terreno e o pior, aquele onde este foi queimado todos os anos.

Na zona superúmida, os resultados obtidos por estes autores, em dois anos de pesquisa, mostraram que a produtividade se manteve equivalente para todos os tratamentos quando houve regularidade na distribuição das chuvas. Em um ensaio, porém, onde houve déficit hídrico, o tratamento com palhiço apresentou superioridade na produção de colmos, em relação ao com solo nu. Estes resultados permitiram afirmar que a manutenção do palhiço é benéfica para a produção, quando ocorrem períodos de veranicos (déficit hídrico); mas não apresenta melhora na produtividade quando as condições climáticas durante o período vegetativo da cana se mantêm adequadas.

2.1.3. Benefícios associados ao controle de plantas daninhas

As sementes das plantas, normalmente, necessitam de umidade e calor provenientes do contato com o substrato em que se encontram para desencadear o processo de germinação. A princípio, o palhiço evita o contato direto dos raios solares sobre o solo, além de evitar grandes variações na sua temperatura, o que dificulta a germinação de muitas espécies.

Considerando a regra geral da competição entre plantas, onde os indivíduos que se estabelecem primeiro em um dado local têm vantagens sobre aqueles que vêm em seguida, é de extrema importância que seja, pelo menos, retardada a germinação das plantas daninhas, em relação ao crescimento da cana. Desta forma a presença de cobertura morta sobre o solo beneficia a cana, em detrimento das plantas daninhas, diminuindo assim, os gastos com o controle destas últimas.

A cobertura morta desempenha importante papel no controle de plantas daninhas, de acordo com ROMAN e VELLOSO (1993), pois muitas espécies não germinam se cobertas por uma camada uniforme de palha. As suas sementes só vão germinar após a quebra da dormência, quando o palhiço já se decompôs.

ORLANDO et al. (1994) estudando doses e localização dos fertilizantes nitrogênio e potássio, em soqueira de cana-de-açúcar, mencionam que houve a necessidade de controle químico de plantas daninhas somente nos tratamentos onde foram realizadas queimas de limpeza, não sendo necessário nos tratamentos com cobertura morta (palhiço).

ARÉVALO (1998) afirma que os estudos sobre o manejo de plantas daninhas em áreas de colheita de cana crua, com manutenção do palhicho são incipientes, mas que quantidades de resíduos sobre o solo superiores a 15 Mg.ha⁻¹, torna rara a infestação de plantas daninhas.

A COPERSUCAR vem desenvolvendo desde 1991, um estudo para a avaliação agrônômica do sistema de produção com colheita de cana crua, conforme relatou MANECHINI (1997). Dentro deste estudo, está sendo realizada a avaliação do efeito de diferentes quantidades de palhicho na produtividade da cana e no desenvolvimento de plantas daninhas. Os resultados preliminares demonstraram que a quantidade de palhicho não influencia a produtividade da cana, no entanto exerce controle eficaz das plantas daninhas anuais, sendo este nível de controle diretamente proporcional à sua quantidade sobre o solo. A tiririca, cipós e espécies perenes não foram diretamente afetadas pelo palhicho.

2.1.4. Aspectos associados à fertilidade dos solos e adubação

A adubação nitrogenada é a mais estudada e a mais complexa pelo fato dos compostos nitrogenados serem altamente solúveis e quimicamente instáveis.

As perdas de nitrogênio em um agrossistema com cana-de-açúcar podem ocorrer, de acordo com CARNAÚBA (1989), por meio da volatilização da amônia, da lixiviação, da denitrificação ou do deflúvio superficial (*runoff*).

Vários trabalhos têm sido realizados nos últimos anos para determinar as perdas de nitrogênio em cana-de-açúcar, principalmente aquelas perdas relacionadas à aplicação do fertilizante nitrogenado sobre o palhicho. A presença do palhicho, para CANTARELLA (1998), afeta as reações dos adubos nitrogenados aplicados na superfície, geralmente, diminuindo a sua eficiência. Ele pode imobilizar temporariamente o nitrogênio do fertilizante devido à alta relação carbono nitrogênio (C/N) do resíduo, geralmente da ordem de 100. Pode, ainda, contribuir para o aumento de perdas por denitrificação por manter a umidade do solo por mais tempo e por fornecer compostos solúveis de carbono. No entanto, após alguns anos com a manutenção do palhicho, o sistema se torna mais eficiente com relação ao aproveitamento do nitrogênio no chamado ciclo do nitrogênio no solo. Desta forma, as doses de nitrogênio aplicadas poderiam ser reduzidas ou as produtividades obtidas com a mesma quantidade de nitrogênio seriam aumentadas.

A uréia aplicada sobre o palhiço úmido será hidrolizada rapidamente, seu contato com o solo será pequeno e a amônia (NH_3) resultante da hidrólise terá um potencial de volatilização elevado, uma vez que o palhiço tem baixa capacidade de retenção deste gás (Freney et al. citados por TRIVELIN et al., 1998). Isto ocorre, segundo FRENEY et al. (1991) pelo fato de que o palhiço contém uma enzima denominada de urease, que é capaz de hidrolizar a uréia do fertilizante.

Existe, por parte dos agricultores, uma preocupação de validar a prática da aplicação de uréia sobre o palhiço devido aos fatos de que esta prática é, operacionalmente, mais barata do que a aplicação no perfil do solo e que os implementos destinados à incorporação não apresentam boa eficiência na presença do palhiço. A uréia, embora apresente o problema de ser degradada pela enzima urease, causando perdas de nitrogênio por volatilização, é o fertilizante nitrogenado mais utilizado em canaviais devido ao seu baixo custo, relativo aos outros fertilizantes nitrogenados, além de ser facilmente obtida no mercado.

A desvantagem do uso do sulfato de amônia, ou outra fonte nitrogenada que não está sujeita à volatilização quando aplicada sobre o palhiço de cana, segundo KONG et al. (1991), reside no custo do fertilizante. Eles relatam que na época, o preço pago pelos agricultores australianos ao nitrogênio advindo do nitrato de amônia era 1,6 vez e o do sulfato de amônia era 2 vezes superiores ao preço do nitrogênio advindo da uréia.

No Brasil este fato também se verifica uma vez que os preços pagos na atualidade à uréia e ao sulfato de amônia são quase equivalentes, no entanto, a uréia apresenta 45% de nitrogênio disponível, enquanto o sulfato de amônia apenas 20%. Assim, o custo do sulfato de amônia, em termos de nitrogênio, é da ordem de 60% superior ao da uréia.

As pesquisas realizadas por PRAMMANEE et al. (1989) na Austrália, com a finalidade de avaliar as perdas por volatilização do nitrogênio aplicado na forma de uréia, revelaram que grandes perdas de nitrogênio podem ocorrer nos primeiros dias após a sua aplicação sobre o palhiço de cana. Ocorreram perdas de 50% do nitrogênio aplicado em setembro/1988, quando houve um período de estiagem após a aplicação da uréia. Perdas superiores a 20% também aconteceram quando chuvas pesadas ocorreram (100 mm) após a aplicação de novembro/1988. Comentam que tais perdas podem ser reduzidas se o fertilizante for aplicado de forma incorporada ao solo ou utilizar, como fonte de nitrogênio, o sulfato de amônia, que não é objeto de perdas por volatilização quando aplicado em cobertura.

DENMEAD et al. (1990) desenvolveram um trabalho de avaliação das perdas de nitrogênio por volatilização, a partir da uréia, em quatro áreas distintas da Austrália (Mackay – zona fria; Ayr – zona seca; Ingham – zona quente e úmida e Tully – zona muito úmida). Em todos os casos a aplicação sobre o palhço de cana foi realizada antes do início da brotação da soca. Concluíram que, após seis semanas, em Mackay e Ingham, onde ocorreram várias precipitações com intensidades inferiores a 3,3 mm, as perdas por volatilização chegaram a 30 e 40%, respectivamente, dos 160 kg.ha⁻¹ de nitrogênio aplicado. Na localidade de Tully as perdas foram menores, chegando à casa dos 27 kg.ha⁻¹ (17%). Explicam que nesta localidade ocorreu uma chuva de 13,2 mm na primeira semana após a aplicação, o que pode ter solubilizado a uréia e permitido que ela percolasse no solo, reduzindo assim, as perdas por volatilização. Na localidade de Ayr as perdas por volatilização foram insignificantes devido ao fato de que durante o experimento não ocorreram chuvas ou orvalhos.

Os estudos de KONG et al. (1991) com perdas de amônia a partir da mistura de uréia e cloreto de potássio, realizados em canaviais da Austrália confirmam que pode haver grandes perdas de nitrogênio sob condições relativamente secas em áreas de colheitas recentes de cana. As perdas acumuladas de nitrogênio, devido à volatilização, chegaram aos 23,9% após 30 dias da aplicação da uréia sobre o palhço. A aplicação da uréia em mistura com cloreto de potássio sobre o palhço resultou em perdas de nitrogênio de 29,6%, superiores à aplicação de apenas uréia, o que levou os autores à não recomendarem esta prática.

FRENEY et al. (1991) realizaram pesquisa para determinar as perdas por volatilização da amônia oriunda da uréia, em canaviais na região de Tully, Austrália. Eles verificaram que a perda da amônia é controlada pela disponibilidade de água no palhço e sua evaporação, de forma que, até mesmo o orvalho, pode influenciar na perda da amônia. Dos 160 kg de N.ha⁻¹ aplicados, na forma de uréia, 37 kg.ha⁻¹ foram perdidos após 18 dias, quando a aplicação foi a lanço e, quando aplicados em faixa, dentro das fileiras de cana, a perda foi maior, 60 kg.ha⁻¹. Eles atribuíram esta resposta ao fato de que houve maior concentração do N amoniacal (NH₃⁺ NH₄⁺) e elevação do pH, fatores primários que favorecem o processo de volatilização.

A quantidade de água na forma de chuva ou irrigação, interfere na perda de nitrogênio. Eles encontraram, em outro ensaio, após 23 dias da aplicação da uréia, valores de perdas de nitrogênio de 11,4 kg.ha⁻¹ na área que recebeu 16 mm de água de irrigação; 17,3 kg.ha⁻¹ na área que recebeu 8 mm e 22,7 kg.ha⁻¹ na área sem irrigação. Ressaltam que, nesta ultima área, além do

orvalho houve uma chuva de 2,5 mm, no quinto dia após a adubação e que, a partir da qual, a perda aumentou rapidamente. Eles consideraram que a perda de nitrogênio foi, consideravelmente, retardada quando a área recebe mais de 13 mm de água logo após a aplicação da uréia. Também consideraram que a aplicação em faixa leva a maiores perdas de amônia do que a aplicação em área total (FRENEY et al., 1991).

Os efeitos da dosagem e do modo de aplicação do fertilizante nitrogenado no plantio de cana-de-açúcar têm sido muito estudado e, de acordo com MORELLI et al. (1997), os resultados são inconclusivos. Para CARNAÚBA (1989) a cana-de-açúcar, na maioria das vezes, não responde à adubação nitrogenada na cana planta, no entanto, nas socas a resposta é positiva. Mesmo assim, a autora apresenta dados de trabalhos de adubações nitrogenadas para a cana-de-açúcar no Brasil que mostram uma tendência de aumento da quantidade de N, que de um modo geral giram em torno de 100 kg de N.ha⁻¹, tanto para cana planta como para soca.

Estudos desenvolvidos por PENATTI e FORTI (1994) concluíram que a resposta da adubação nitrogenada tem comportamento quadrático e a dose de máxima eficiência econômica foi 93 kg.ha⁻¹, considerando o preço do açúcar e da uréia da época. Neste trabalho foram avaliados 20 experimentos de adubação de soca, com doses de nitrogênio variando de zero a 200 kg.ha⁻¹, em canaviais com diversas variedades de cana no Estado de São Paulo, nas safras 91/92 e 92/93. Os autores também consideraram que o nitrogênio é um dos nutrientes mais difíceis de serem recomendados adequadamente e, que a dose até então recomendada, de 100 kg.ha⁻¹ não deveria ser alterada.

GANDINI e MONTREZOR (1994) também encontraram resposta quadrática para a adubação nitrogenada, quando avaliaram 22 experimentos, na usina Santa Luzia – SP. Os autores avaliaram o comportamento da adubação nitrogenada, nas safras 90/91 a 93/94, em oito solos diferentes, onde foram utilizados 100 m³.ha⁻¹ de vinhaça, a cada ano. A dose economicamente recomendada, encontrada por eles, foi de 97 kg de N.ha⁻¹.

De acordo com ORLANDO FILHO (1983) a cultura da cana retira do solo doses elevadas de nitrogênio, que variam entre 0,7 kg a 0,9 kg para cada tonelada de colmos produzida. No entanto, a cana planta tem uma menor frequência de resposta à adubação quando comparada com a cana soca. Esta última responde à aplicação de doses maiores que a cana planta, principalmente em solos argilosos.

Conforme CARNAÚBA (1989) a cultura da cana-de-açúcar precisa de grande quantidade de N para realizar o perfilhamento e, que a máxima absorção deste elemento pela planta ocorre até este período, indicando a melhor época de aplicação do fertilizante nitrogenado.

Para SILVEIRA (1985) a resposta da cana-de-açúcar, à adubação nitrogenada parece estar relacionada com a taxa de crescimento da planta, a qual, por sua vez, depende da sua bagagem genética e de fatores do ambiente, interrelacionados com suas características fisiológicas em termos da eficiência do uso do nitrogênio. O trabalho desenvolvido por PAES et al. (1997) confirma estas afirmações. Eles avaliaram os efeitos de doses crescentes de Nitrogênio (0 - 50 - 100 kg.ha⁻¹) em diversos espaçamentos entre sulcos, na produtividade de colmos e de quantidade de açúcar de três variedades de cana-de-açúcar. O resultados demonstraram que para as variedades Rb739359 e NA56-79 as respostas foram positiva e para a variedade CB45-3, a resposta foi nula.

MEYER (1996) em um trabalho de revisão mostra que a resposta ao N fertilizante aplicado é inversamente proporcional à quantidade de matéria orgânica existente no solo e, em solos da África do Sul com alto teores de matéria orgânica (M. O. > 4%), a resposta à adubação é muito pequena (10% de resposta relativa para um tratamento ótimo com N). Ao se comparar as recomendações, sugeridas pelo autor, entre estes solos de alto teores de matéria orgânica, com os de baixo teores de matéria orgânica (M. O. < 2 %), nota-se que a redução na quantidade de N aplicado pode chegar a 50 % para a cana planta e 35 % para a cana soca, em canaviais sem irrigação. O autor apresenta, também, algumas desvantagens da manutenção do palhicho sobre o solo, entre elas a de que ocorre um incremento nas perdas por volatilização do nitrogênio quando a uréia é aplicada sobre o palhicho.

A adubação nitrogenada pode ser aplicada na forma líquida sobre o solo ou sobre o palhicho, quando se mistura o adubo nitrogenado à vinhaça, por exemplo. CASAGRANDE et al. (1996) desenvolveram um trabalho para estudar a dinâmica das formas de nitrogênio no solo, durante o ciclo de desenvolvimento da soqueira da variedade SP 79-1011, adotando tratamentos que envolviam a presença ou não do palhicho, na ordem de 15,3 Mg*ha⁻¹ de matéria seca e a utilização ou não de vinhaça na dosagem de 100 m³*ha⁻¹ (com pH = 4). Os autores concluíram que os tratamentos com palhicho sobre a superfície do solo, aparentemente, apresentaram valores similares aos observados nos tratamentos onde esse material foi queimado.

Um outro trabalho para avaliar o comportamento do nitrogênio foi desenvolvido por TRIVELIN et al. (1998). Os autores utilizaram soluções de uréia + água aplicada na dosagem de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ e de aquamônia + vinhaça aplicada na dosagem de $200 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, em áreas com e sem a presença de palhicho de cana, correspondendo à quantidade de $80 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de N. Os resultados obtidos demonstraram que a volatilização, aos 14 dias após a aplicação foi maior para o tratamento com solução de uréia aplicada sobre o palhicho (10,74 % do N aplicado), e o que ofereceu menor perda foi aquele onde a solução de uréia foi aplicada diretamente sobre o solo (4,97%). Os tratamentos envolvendo a aplicação de aquamônia + vinhaça apresentaram valores de perdas girando em torno de 7,5 %. A solução de uréia aplicada na ordem de 10 mm de chuva ($10 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$), infiltrou rapidamente na primeira camada do solo (30 mm), onde segundo os autores, o N-amoniaco originado da hidrólise da uréia teve maior possibilidade de ser retido nos sítios ativos do solo como NH_4^+ , com conseqüente redução da volatilização.

ORLANDO et al. (1994) desenvolveram um estudo em Latossolo Vermelho, do Estado de São Paulo, com a finalidade de avaliar doses e localização de fertilizantes em cana crua e cana queimada, de 3º corte, da variedade SP 71-6163. Neste estudo foram analisadas, quanto à localização do adubo, varias situações, dentre elas, as deposições na fileira e entre fileiras, sob o palhicho, em cobertura total e apenas na fileira sobre o palhicho. Uma comparação mais detalhada dos resultados demonstrou uma diferença de $6,1 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ a favor da deposição na fileira de plantas sob o palhicho em relação aos tratamentos onde o fertilizante foi colocado entre as fileiras, a 0,20 m de profundidade. Esta tendência demonstra que a deposição do fertilizante mais próximo à fileira de plantio traz maiores benefícios do que quando ele é depositado entre fileiras. Esta tendência é confirmada quando se analisam os resultados obtidos, pelos mesmos autores, no experimento com cana queimada. O contraste, apresentado, entre aplicação do fertilizante na fileira versus fertilizante aplicado entre as fileiras demonstra uma diferença significativa de $6,7 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de cana produzidas à favor da adubação na fileira. Outro resultado interessante obtido é o de que a adubação fosfatada apresentou resposta significativa para a cana crua e não significativa para a cana queimada.

2.1.5. Implicações relacionadas à mecanização agrícola

A cultura da cana-de-açúcar tem alto grau de mecanização e, com a colheita mecânica, o tráfego de máquinas de grande porte nos canaviais tende a aumentar. De acordo com CORSINI

(1993), o cultivo intensivo e o tráfego de máquinas são as causas primeiras da compactação dos solos cultivados. O autor alerta, ainda, para o fato de que quanto mais pobre a estrutura do solo maior a necessidade de operações mecânicas e quanto mais mobilizado for o solo pior será a sua estrutura.

Neste aspecto, a redução da mobilização do solo por ferramentas agrícolas seria benéfica para a manutenção da sua estrutura. Por outro lado, o aumento do teor de matéria orgânica no perfil do solo traz, também, vantagens para a agregação do solo, melhorando ou preservando sua estrutura, uma vez que a matéria orgânica é, segundo DENARDIN e KOCHHANN (1993), um excelente agente cementante de solo.

De acordo com CONDE e DONZELLI (1997) no sistema de plantio convencional da cana-de-açúcar, a capacidade operacional de todas as práticas mecanizadas, mais notadamente a colheita, ficam bastante prejudicadas devido à presença de terraços, construídos com a finalidade de controlar a erosão hídrica do solo. O não paralelismo entre os terraços se apresenta como um fator complicador, já que as fileiras de plantio são, às vezes descontínuas no talhão, provocando manobras excessivas das máquinas que, para realizarem seu trabalho, obedecem à configuração dessas fileiras. Concluem o trabalho afirmando que é possível eliminar terraços utilizados no controle de erosão, desde que o solo se mantenha protegido por algum tipo de cobertura vegetal, na ocasião da reforma e do plantio da cana-de-açúcar.

De acordo com CANTARELLA (1998) a uréia, fertilizante nitrogenado de maior disponibilidade no mercado brasileiro, apresenta o maior risco de perdas por volatilização de amônia, podendo atingir 40% ou mais do N uréia aplicado sobre o palhço da cana. No entanto, o enterrio deste produto a 0,05 ou 0,10 m de profundidade é uma forma eficiente de prevenir tais perdas. O desenvolvimento de uma máquina, de baixo custo operacional, para enterrar este fertilizante pode ser uma solução para a problemática da adubação nitrogenada em canaviais colhidos sem queima prévia.

A manutenção de restos culturais cobrindo permanentemente o solo é uma prática recomendável pelo aspecto da sustentabilidade do sistema. No entanto, a necessidade de deposição do adubo, principalmente a uréia, sob a camada de palhço e a prática freqüente de escarificação ou sub-solagem nos canaviais, associadas às vantagens de se manter o solo coberto com restos culturais, sugere a utilização de máquinas agrícolas específicas. Para RIPOLI e

VILLANOVA (1992) a camada de palhico traz várias implicações, dentre elas, a necessidade de modificações nos equipamentos existentes para o cultivo e adubação.

WILLCOX (1990) fez referência a dois tipos de aplicadores de fertilizantes para a cultura da cana-de-açúcar, na Austrália. O primeiro, aplica o fertilizante em ambos os lados e próximo à fileira das soqueiras. Nessa máquina, cada conjunto de aplicação é constituído de um disco de corte liso, seguido de uma ferramenta estreita para rompimento do solo, à qual prende-se, pela sua parte posterior, o tubo de descarga de fertilizante. O segundo, aplica o fertilizante na soqueira, após a passagem de um disco de corte para abertura de um pequeno sulco. Em seguida há uma corrente para promover o fechamento do sulco.

De acordo com o autor, a primeira máquina é a mais comum e opera bem, tanto em áreas de cana sem queima prévia quanto em áreas onde ocorre esta prática. No entanto, sua operação é dependente da umidade do solo, considerando-se que algumas vezes são encontrados problemas se o solo está muito úmido ou muito seco. Sob condições de solo com pouca umidade, o peso da máquina não é suficiente para produzir a penetração dos discos de corte. Sob condições de alta umidade, próxima da capacidade de campo, ocasionalmente ocorrem problemas de embuchamento na frente dos discos de corte. A segunda máquina mencionada ainda se encontrava em fase de testes uma vez que mostrava, aparentemente, um efeito nocivo à soqueira de cana.

CHAPMAN e HAYSON (1991) realizaram experimentos para verificar a influência do local de deposição da uréia fertilizante e da umidade do solo na produção da soca em áreas de cultivo de cana crua da Austrália. Os resultados do primeiro experimento demonstraram que, quando o solo estava com umidade elevada no momento da aplicação da uréia e após 4 dias irrigado com 20 mm de chuva, as produções médias obtidas, para N variando de 80 a 320 kg.ha⁻¹, foram de 71,3 Mg.ha⁻¹ para aplicação sobre a fileira de plantio, 76,7 Mg.ha⁻¹ para aplicação incorporada a 100 mm, na fileira e 64,5 Mg.ha⁻¹ para aplicação incorporada a 100 mm de profundidade, entre as fileiras. Estes resultados mostraram uma diferença da ordem de 12 Mg.ha⁻¹ na produtividade de cana, evidenciando que a adubação nitrogenada deve ser incorporada ao solo e que, quanto mais próxima da fileira de plantio, mais eficiente será a fertilização.

Em um segundo experimento, o solo estava com pouca umidade no momento da adubação, recebeu 20 mm de chuva após 4 dias e, no total do ciclo vegetativo, a cana recebeu 142 mm de chuva (100 mm a menos que o experimento anterior). Neste experimento, para as

mesmas condições de aplicação do experimento anterior, os resultados obtidos foram de 78,6 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para a aplicação na fileira de plantio, 87,6 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para a aplicação incorporada na fileira e 82,4 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para a incorporada entre as fileiras. Quando se compara os resultados dos 2 experimentos verifica-se que a menor quantidade de água aplicada ao solo influenciou, sobremaneira, no aproveitamento do nitrogênio pela planta, apresentando melhores resultados para o segundo experimento. Além disso, a aplicação nas entre fileiras incorporada a 100 mm mostrou comportamento inverso ao do primeiro experimento apresentando produção de 82,4 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, superior ao tratamento com deposição do adubo sobre a fileira de plantio (78,6 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). No entanto, a aplicação da uréia na fileira de plantio incorporada a 100 mm (87,6 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) permaneceu, ainda, como o melhor tratamento. Afirmam, também, que não se sabe se esta prática de aplicar a uréia incorporada na fileira de plantio tem alguma vantagem sobre a prática rotineira de se aplicar o fertilizante incorporado nos dois lados da fileira de plantio, quando o palhicho é queimado.

A COPERSUCAR (1991) vem desenvolvendo cultivadores de cana-de-açúcar para áreas de cana crua desde o ano de 1991. Os resultados preliminares, obtidos àquela época recomendavam que esta máquina só fosse utilizada depois de decorridos, no mínimo, uma semana da colheita para que o disco de corte, posicionado à frente da haste conseguisse cortar o palhicho com maior facilidade. Ainda hoje o problema persiste, de modo que os cultivadores existentes no mercado brasileiro trabalham, normalmente, com apenas uma haste entre as fileiras para minimizar o problema do embuchamento (acúmulo de restos vegetais nas hastes de escarificação ou de abertura dos sulcos de adubação).

A Seção de Projetos Mecânicos Agrícolas da COPERSUCAR está desenvolvendo um cultivador de arrasto para operar em canaviais com e sem queima de limpeza (AGRICOLA INFORMA, 1998). De acordo com a reportagem, a maior dificuldade operacional dos equipamentos montados nos três pontos do sistema hidráulico, em canaviais sem queima de limpeza, é efetuar o cultivo com duas hastes para cada entre-fileiras, pois o palhicho em grande quantidade dificulta a operação, causando constantes embuchamentos.

Quando se analisa as interações dos objetivos mencionados, entre mínima mobilização do solo e manutenção de restos vegetais sobre ele, fica fácil concluir que as grandes vantagens trazidas por esta prática são, em última análise, melhor conservação do solo e da água, redução

dos custos do cultivo e manutenção da produtividade, que estão plenamente de acordo com a visão mais recente de sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

As pesquisas realizadas no Brasil com a cultura de cana-de-açúcar, comparando os sistemas de colheita de cana crua, com manejo do palhicho, em relação ao sistema de cana queimada, não tem apresentado diferenças significativas na produtividade dos primeiros anos de adoção daquele sistema. É de se esperar que os resultados de uma prática de manejo de solo para esta cultura, onde ele não é revolvido com frequência e mantém-se uma camada de cobertura morta permanente sobre o mesmo, também sejam perceptíveis, a exemplo do “plantio direto”, somente após vários anos de cultivo sob estas condições. Para CORSINI (1993) a avaliação de um sistema de cultivo de cana-de-açúcar deve ser realizado com dados, obedecendo a uma distribuição espacial e coletados por mais de cinco anos.

A manutenção do palhicho sobre o solo beneficia a produtividade, principalmente quando ocorre período de seca prolongado durante o ciclo da cultura, a exemplo do que ocorreu em 1999 e se repetiu no ano de 2000 em várias regiões do Estado de São Paulo. A espessa camada de palhicho sobre o solo pode minimizar os efeitos dos veranicos, pois forma uma barreira física que dificulta a evaporação da água do solo mantendo-o úmido por mais tempo. Outro fato que contribui para uma redução drástica da velocidade de evaporação da água do solo é que o palhicho além de impedir a incidência direta dos raios solares sobre ele funciona como um isolante térmico. Por consequência, há uma redução da temperatura média diária do solo e da pressão de vapor da água nele contida, resultando também, em uma menor evaporação.

A aplicação de fertilizantes na soqueira da cana é uma exigência do ponto de vista agrônomo, mas tem se tornado uma prática difícil de ser implementada de acordo com as recomendações agrônomicas, ou seja, incorporada ao solo. O grande fator complicador desta prática é a presença do palhicho que dificulta o trabalho dos cultivadores-adubadores de cana. Agricultores e pesquisadores de várias partes do mundo têm tentado encontrar formas alternativas para a deposição dos fertilizantes.

A deposição de adubos, principalmente nitrogenados sobre o palhicho, embora apresente alto rendimento operacional das máquinas, não é uma prática recomendável, como apontaram inúmeros autores. O nitrogênio é um elemento muito instável no solo, que está sujeito a volatilização, percolação no solo ou dissolução na água de escoamento superficial. Alguns trabalhos aqui apresentados chegaram a mostrar perdas de até 50 % do nitrogênio total aplicado

na forma de uréia (PRAMMANEE et al., 1989). Existem outros dois fatos que devem ser salientados quando se trata de perdas de nitrogênio, o primeiro é o de que existe naturalmente no palhiço uma enzima, a uréase, capaz de volatilizar a uréia FRENEY et al. (1991). O outro fato está reportado por vários pesquisadores que afirmam que precipitações de pequenas lâminas d'águas facilitam as perdas de nitrogênio e que até mesmo o orvalho da manhã pode contribuir nestas perdas.

As práticas de cultivos realizadas na soqueira da cultura da cana-de-açúcar, com vistas à adoção de um sistema conservacionista, exigem equipamentos específicos, dado o grande volume de material vegetal que se acumula sobre o solo logo após a colheita. Os implementos de cultivo devem permitir a execução das tarefas de adubações, escarificação ou subsolagem do solo de forma eficiente, ou seja, depositar os fertilizantes na profundidade adequada e romper camadas compactadas sem produzir movimentação do palhiço. Varias pesquisas têm sido desenvolvidas e alguns implementos têm sido propostos no sentido de viabilizar o cultivo da soca de cana sobre palhiço, no entanto, ainda existem dificuldades a serem superadas para que eles possam executar eficientemente as tarefas aqui mencionadas.

A mobilização do solo provoca a quebra de sua estrutura natural e, dependendo do seu estado e da quantidade de energia nele aplicada, pode levá-lo ao grau extremo de desagregação. Quando as frações do solo estão agrupadas, formando uma estrutura dificilmente são arrastadas pelas águas de chuva, desta forma um solo pouco mobilizado estará melhor protegido contra o efeito de arraste provocado pelas chuvas. Por outro lado, o palhiço, densa camada de cobertura de restos vegetais, oferece uma proteção adicional, pois absorve o impacto das gotas de chuva que têm grande energia e podem desagregar partículas do solo, quando incidem diretamente sobre ele. Além de absorver o impacto da gota, a cobertura vegetal serve de barreira reduzindo a velocidade de escoamento superficial das águas de chuva. Desta forma, a desagregação, a energia de impacto da gota d'água e a energia cinética das águas pluviais, que são os três elementos básicos responsáveis pela erosão dos solos, ficam controladas. Há ainda que se considerar que um solo bem estruturado apresenta uma maior velocidade de infiltração das águas de chuva, o que concorre, também, para um menor escoamento superficial destas águas.

O palhiço persiste sobre o solo por um período bastante prolongado e, quando em quantidade suficiente para recobri-lo uniformemente retarda a germinação e o desenvolvimento de plantas daninhas durante a rebrota da cana. A cana, por sua vez, se desenvolve rapidamente,

cobre o solo e impede que as plantas daninhas se estabeleçam, pelo efeito de supressão. Assim, é possível reduzir consideravelmente os gastos com produtos químicos ou ações mecânicas para controle de plantas daninhas nos canaviais.

O palhico depositado sobre o solo se decompõe com o passar do tempo e, os compostos orgânicos resultantes desta decomposição, são incorporados lentamente ao perfil do solo aumentando de forma estável seu teor de matéria orgânica. Assim, após alguns anos de manejo com manutenção do palhico, o solo se tornará mais eficiente com relação ao ciclo do nitrogênio, o que poderá levar a reduções nas doses aplicadas deste elemento. O aumento do teor de matéria orgânica no solo eleva sua atividade biológica, promovendo, inclusive, o desenvolvimento de microrganismos fixadores de nitrogênio (micorrizas) na região da rizosfera de cana-de-açúcar. A matéria orgânica traz também vantagens para a agregação do solo, melhorando ou preservando sua estrutura, uma vez que ela é um excelente agente cementante de solos.

A manutenção de restos culturais cobrindo permanentemente o solo é recomendável pelo aspecto da sustentabilidade, como foi aqui discutido, assim como a necessidade de se incorporar ao solo à adubação nitrogenada, à base de uréia. Desta forma há necessidade de máquinas que permitam adubar e escarificar ou subsolar os canaviais sem movimentar o palhico. Um dos principais fatores que dificultam o avanço do cultivo mínimo da soqueira de cana-de-açúcar são as máquinas de cultivo existentes no mercado, por apresentarem baixa eficácia no corte do palhico e ocasionarem embuchamentos frequentes. Por um lado, o palhico apresenta variações no seu teor de umidade, na espessura de sua camada e no grau de decomposição, além daquelas intrínsecas à variedade da cana. Por outro lado, o solo quando seco oferece grande resistência à penetração dos discos de corte e, quando muito úmido não oferece sustentação para que o disco corte o palhico adequadamente. A evolução do cultivo mínimo da cana passa, indiscutivelmente, pelo desenvolvimento das máquinas de cultivo, notadamente no que se refere à habilidade de cortar o palhico.

3. ARTIGO 1: ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR AO CORTE

3.1. INTRODUÇÃO

Os dispositivos de corte de materiais vegetais são de grande importância para a agricultura e a pecuária, pois estão sempre presentes no dia-a-dia do meio rural, equipando várias máquinas de corte e acondicionamento de capineiras para alimentação animal, máquinas de colheitas autopropelidas e implementos de preparo e mobilização de solo na presença de palhadas.

As práticas agrícolas que visam mínima mobilização de solo e conservação de restos culturais na sua superfície têm ganhado destaque nas últimas décadas. Esta afirmação é corroborada por KUSHWAHA et al. (1983) que afirmam terem aumentado as práticas de cultivo mínimo nos anos mais recentes. No entanto, alertam para o fato de que poucos trabalhos têm sido apresentados, do ponto de vista da engenharia, no que se refere à resistência ao corte de restos de culturas, por ser um importante parâmetro no desenvolvimento de máquinas para plantio ou trabalho em áreas de cultivo mínimo. Faz, por fim, algumas considerações a partir da revisão bibliográfica:

- O efeito da velocidade é pequeno ou nulo na energia requerida para o corte de plantas forrageiras por cisalhamento;
- A resistência máxima de corte é diretamente proporcional à densidade de matéria seca e inversamente proporcional à umidade quando a palha contém altos teores de água.
- A energia requerida para cortar plantas forrageiras é inversamente proporcional ao afiamento da lâmina.

Os pesquisadores utilizaram um aparato de ensaio de cisalhamento de solo modificado para promover ensaios de cisalhamento em palha de trigo. Eles utilizaram velocidades de ensaio baixas, entre 0,005 a 0,015 mm.s⁻¹, pelo fato de que não se dispunha de aparatos de ensaios que permitissem valores mais elevados de velocidade de corte. Os resultados destas pesquisas demonstraram que a resistência ao cisalhamento da palha não foi influenciada pela velocidade de corte. No entanto, o aumento da umidade da palha, até um determinado nível (aproximadamente 13% B.U., para a lâmina com ângulo de afiamento de 30° e 17,5% B.U., para a lâmina de 90°),

provocou um rápido incremento na resistência ao corte, que permaneceu, a partir daí, quase constante. Eles explicaram este comportamento atentando para o fato de que a palha é frágil e menos viscoelástica para baixos teores de umidade e, portanto, mais fácil de cortar. Para teores elevados de umidade, houve um incremento na viscoelasticidade da palha, de forma que ocorreram falhas, mas foi difícil produzir a separação das partes.

Os resultados demonstraram, também, que a umidade ideal para cortar a palha de trigo estava na faixa de 8 a 10% (B.U.), correspondendo a valores mínimos de resistência específica ao corte, de 7 a 11 MPa. A magnitude da resistência ao corte foi menor para a lâmina de 30° em relação à de 90°, demonstrando a importância de seu afiamento.

Os estudos realizados por HALYK e HURLBUT (1968) já mostravam que o conteúdo de água do material vegetal influencia a resistência destes ao corte. Os seus estudos, utilizando-se de um aparato tipo pêndulo Charpy, demonstraram que a resistência máxima ao corte de hastes de alfafa foi inversamente proporcional ao conteúdo de água das hastes.

CHOI e HERBACH (1986) utilizaram o pêndulo de Charpy e discos lisos de corte de rolamento para estudar o comportamento dos colmos de milho em corte. Eles observaram que o conteúdo de água dos colmos de milho tem um significativo efeito na percentagem de colmos cortados pelo disco, mas tem um pequeno efeito na energia de corte, dada pelo ensaio com o dispositivo pendular. Colmos úmidos tendem a ser mais difíceis de se cortar pelo disco liso de corte do que colmos secos. Afirmaram, também, que os colmos de milho tendem a ficar mais duros e mais resistentes à flexão com o decréscimo de sua umidade.

PRASAD e GUPTA (1975) realizaram ensaios para determinar os valores ótimos de variáveis, como ângulo oblíquo, ângulo de corte e velocidade da faca no corte inercial de colmos de milho, utilizando-se de um aparato de corte que funcionava pelo princípio do pêndulo de Charpy. Também avaliaram a influência do diâmetro e umidade do colmo na energia e no requerimento de força de corte. Os seus estudos, para ângulos oblíquos entre 2° e 62°, umidade dos colmos de 78 % (B.U.) e corte normal às fibras, mostraram que a demanda de energia decresceu com o acréscimo do ângulo oblíquo, apresentando um valor mínimo para 32°. O mesmo comportamento foi observado para a força máxima de corte, mas neste caso, o incremento da força não foi significativo a partir dos 32°.

A habilidade de uma lâmina para produzir o corte de materiais vegetais depende de vários fatores, que podemos classificar em extrínsecos e intrínsecos. Os fatores extrínsecos são

aqueles relacionados às condições de operação, como quantidade de massa a ser cortada, taxa de alimentação e aqueles relacionados ao material a ser cortado, como idade das plantas, espécies vegetais que compõe a massa, estado nutricional das plantas e umidade da massa vegetal.

As características intrínsecas à lâmina são aquelas relacionadas às suas dimensões construtivas ou posição de montagem no dispositivo de corte. Segundo PERSSON (1987), o ângulo do gume **AG**, definido pelas duas faces do gume da lâmina e a espessura **EG** do gume da faca, Figura 1 – A, são as dimensões mais importantes do ponto de vista do corte propriamente dito. No entanto, quando se considera no estudo, o movimento da faca, tornam-se também importantes os seguintes atributos: espessura da lâmina **EL**; ângulos de ataque **AA**, compreendido entre a face superior do gume da lâmina e o plano "xy"; ângulo de limpeza **AL**, que abrange a face superior do gume e o plano "zy"; ângulo de escape **AE**, formado pela face inferior do gume e o plano "xy" e, o ângulo oblíquo **Ao**, formado entre o eixo "y" e a borda cortante do gume. Estes ângulos, que podem ser visualizados na Figura 1, consideram um plano em que o movimento da faca se dá no sentido "x", a largura da faca está no sentido "y" e a normal está no sentido "z".

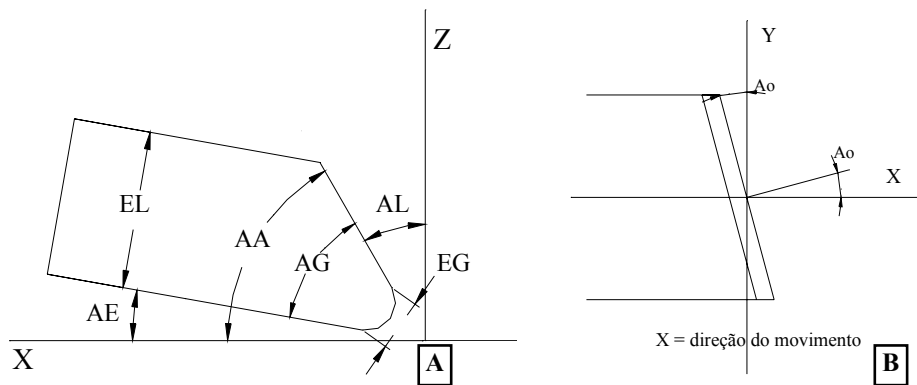


FIGURA 1 - Lâmina de corte mostrando:

A - ângulos e dimensões relativas à faca e seu movimento;

B - ângulo oblíquo da lâmina.

As lâminas retas, ou seja, aquelas que não possuem ângulo oblíquo tocam ao mesmo tempo toda a extensão de seu fio no material a ser cortado, enquanto aquelas que possuem este ângulo penetram gradualmente no material a ser cortado, como pode ser visto na Figura 1 - B.

A necessidade de se quantificar as forças e a energia envolvida no corte de material vegetal, em função de variáveis intrínsecas e extrínsecas às lâminas se torna necessário, do ponto de vista tecnológico, para o desenvolvimento de ferramentas de máquinas agrícolas. A bibliografia específica na área de cana-de-açúcar traz muito pouca informação referente ao corte do palhicho. Assim, o presente estudo foi o primeiro passo dado para o conhecimento do comportamento da palha de cana-de-açúcar quanto ao corte. Entende-se por palhicho, de acordo com RÍPOLI (1991), como sendo a parte do material remanescente no terreno após a operação da colheita de cana-de-açúcar e constituída de ponteiros, folhas verdes e palha.

Neste sentido, foi montado um experimento, que pudesse trazer algumas informações importantes dentro do contexto do estudo, que não foram possíveis de serem levantadas por meio da revisão da bibliografia disponível. O presente trabalho foi, então, desenvolvido com o objetivo de avaliar o comportamento da palha de cana-de-açúcar ao corte, em função da umidade e da espessura de sua camada, bem como do ângulo oblíquo da lâmina.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

A coleta dos dados foi realizada utilizando-se de um aparato de ensaio montado especificamente para este fim, acoplado a uma prensa mecânica, cuja função foi a de produzir o movimento da faca de corte, a uma velocidade média de $0,31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. A Figura 2 mostra o equipamento utilizado nos ensaios, evidenciando as partes principais. O aparato era composto de uma base sólida de $100 \times 70 \text{ mm}$, confeccionada em aço 1020 de onde subiam duas colunas laterais, com 168 mm de altura, cada qual contendo um canal de formato retangular de dimensões de $4 \times 3 \text{ mm}$, disposto no sentido vertical, que servia de guia para a lâmina em seu movimento retilíneo alternado. Na parte posterior da base estava instalada a contra-faca.

A prensa gerava um ciclo de movimento retilíneo alternado, com curso de 45 mm , de forma que a lâmina pudesse descer através da camada de palha e retornar à sua posição original. Entre a prensa e a lâmina foi acoplada a célula de carga para que a força requerida no corte da palha pudesse ser mensurada. Sobre a base foi colocada a caixa de ensaios, que se encaixava nas colunas por meio de canais de seções retangulares, dispostos horizontalmente. A caixa de ensaios apresentava um fundo falso, por onde a lâmina transpassava, para efetuar o corte da amostra, tendo a contra-faca como apoio do material ensaiado.



FIGURA 2 – Equipamento de ensaio montado para obtenção dos dados de força de corte, evidenciando os principais componentes.

As lâminas utilizadas nos experimentos apresentavam as seguintes características: comprimento de 100 mm; espessura de 4 mm e ângulo do gume de 15°. A caixa de ensaio do aparato, com área útil de 10^4 mm^2 , permitia a variação da quantidade de palha das amostras ensaiadas. Todos os experimentos foram realizados na presença de contra-faca e utilizando-se de palha da variedade de cana IAC 554.

O estudo para atender aos objetivos propostos neste trabalho foi dividido em três partes, onde cada uma delas se caracterizou por um experimento independente. O primeiro foi desenvolvido com o objetivo de se verificar o comportamento da força e energia de corte, em

função da quantidade de palha de cana. O segundo e o terceiro experimento buscaram avaliar especificamente a influência da umidade da palha da cana e o ângulo oblíquo da lâmina, no requerimento de força e na demanda de energia para efetuar o corte da palha da cana.

O primeiro, foi de caráter mais abrangente e foi montado num esquema fatorial, utilizando-se de dois tipos de lâminas (sendo uma sem ângulo oblíquo e a outra com ângulo oblíquo de 10°) e 4 quantidades de palha de cana (correspondente a $4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, $8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, $12 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e $16 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Neste experimento foram realizados 20 ensaios (repetições) para cada nível de quantidade de palha *versus* tipo de lâmina, totalizando 160 parcelas experimentais.

A palha de cana, para montagem das amostras, foi preparada e disposta da seguinte maneira: As folhas secas de cana (palha) foram divididas em 3 segmentos: bainha, parte inferior e parte superior do limbo. Cada amostra levada ao aparato para ensaio era composta por camadas destes três segmentos, sorteados ao acaso. A disposição das porções de folhas, em cada camada, era também sorteada, entre três opções: 0° , 45° e 90° em relação ao eixo transversal da caixa de ensaio. Para compor uma amostra de ensaio, a caixa ia recebendo camadas de porções de palha até atingir o peso correspondente à quantidade de palha/ha desejada. Estes procedimentos foram adotados para que se pudesse simular as condições da disposição do palhicho no campo. Uma amostra da palha utilizada em cada ensaio era pesada imediatamente e levada à estufa para determinação da umidade da palha.

No segundo experimento, adotou-se um delineamento inteiramente casualizado, procurando avaliar especificamente a influência da umidade da palha da cana na força e na energia requerida para o corte. Neste experimento utilizou-se a porção inferior do limbo foliar, disposto a 90° na quantidade de palha relativa a $10 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. A lâmina de corte para esse experimento possuía ângulo oblíquo de 5° e foram realizados nove ensaios (repetições) para cada um dos quatro níveis de umidade da palha avaliados (9,6 %, 28,4 %, 41,0 % e 69,7 %).

No último experimento, também por meio de um delineamento inteiramente casualizado, procurou-se verificar a influência específica do ângulo oblíquo da lâmina no requerimento de força e energia necessária para o corte da palha da cana. Para tanto, realizou-se oito ensaios (repetições) para cada uma das três lâminas estudadas (ângulos oblíquos de 0° , 5° e 10°). As condições de ensaios foram as mesmas do segundo experimento, com exceção da umidade da palha que foi mantida em torno de 14 %. Nos dois últimos experimentos também foi realizado controle de umidade da palha de cada ensaio, a exemplo do primeiro experimento.

As forças aplicadas nas lâminas de corte foram medidas por meio de um transdutor de força, tipo célula de carga, com 10 kN de fundo de escala e erro total combinado de 0,5%. Os valores lidos em cada ensaio, com duração de um segundo, foram registrados por um sistema de aquisição de dados, a uma taxa de aquisição de 9.600 Hz. Os arquivos com os dados gerados foram convertidos pelo programa computacional "Catman", desenvolvido pela HBM, para o formato texto, permitindo que os registros pudessem ser lidos por outros aplicativos. Utilizando-se do programa computacional "Matlab", desenvolvido pela MathWorks Incorporation, os dados obtidos nos ensaios foram tratados para se obter a máxima força registrada em cada ensaio.

Nos dois últimos experimentos, onde se analisava a influência da umidade e do ângulo oblíquo da lâmina foi levantada, também, a demanda de energia para o corte. Para tanto, lançou-se mão da técnica de integração por trapézios e, com o auxílio de uma pequena rotina computacional, implementada no "Matlab", levantou-se a área sob a curva da força de corte *versus* deslocamento da lâmina, que corresponde à energia total demandada no corte.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para se comparar os valores de força de corte e energia obtidos foram levantadas algumas dimensões das lâminas e calculado um Fator de Corte (F_c), apresentado na Tabela 1, de acordo com a metodologia que se encontra no Apêndice 1.

TABELA 1 - Dimensões, ângulo do gume e fator de corte (F_c), obtidos para as lâminas utilizadas nos ensaios, adotando-se a metodologia apresentada no Apêndice 1.

Lâminas Ao	Dimensões (mm)			AG* (graus)	F_c (mm ²)
	DI	EL*	EG**		
0°	15,15	3,97	0,05	15,00	5,04
5°	14,85	3,95	0,04	15,25	6,33
10°	14,95	4,03	0,06	15,42	4,14

Obs.: * Para efeito de cálculo, foram multiplicados por 2 os valores de AG e EL das lâminas, uma vez que apresentavam afiamento de um só lado;

** O valor de EG é a metade do valor obtido no cálculo, por se tratar de lâminas com afiamento de um só lado.

Os valores obtidos para F_c , como se observa, são bastante próximos, permitindo que os dados encontrados nos ensaios, que envolveram lâminas com ângulos oblíquos diferentes,

possam ser comparados. Observa-se, também, que a lâmina apresentava uma boa afiação, já que os valores de **EG** são pequenos, da ordem de centésimos de milímetros.

Os arquivos de dados, oriundos de cada ensaio com duração de um segundo, forneciam 9600 valores de força. Para avaliação dos dados foi preciso depurar estes arquivos de forma a se obter apenas o tempo efetivo do ensaio. A Figura 3 mostra dois exemplos de ensaios do primeiro experimento, sendo um com lâmina de 0° e o outro com lâmina de 10° de ângulo oblíquo, realizados com quantidade de palha correspondente a 12 Mg*ha⁻¹ e umidade de 16%.

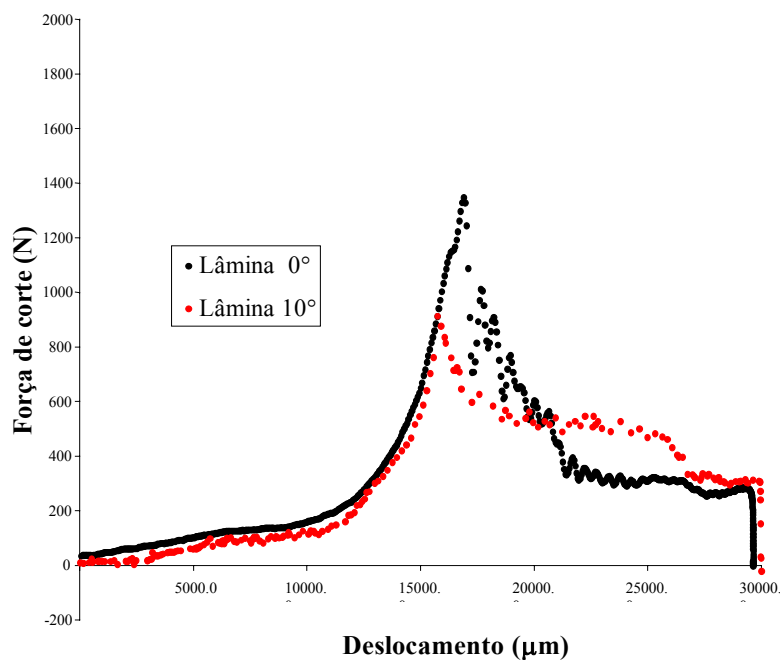


FIGURA 3 - Forças de corte, em Newton, em função do deslocamento, em micrômetros, das lâminas de 0° e 10° de ângulo oblíquo, obtidas em ensaios com palha na quantidade correspondente a 12 Mg*ha⁻¹ e umidade de 16%.

As curvas da Figura 3 se aproximam muito da curva típica de corte de material fibroso na presença de contra-faca, apresentada por PERSSON (1987). Em um primeiro instante, a palha é comprimida, resultando em um aumento gradual da força, porém o corte ainda não tem início. Após um certo grau de compressão, a palha passa a não mais resistir à ação cisalhante da faca e o processo de corte efetivamente tem início. Após o término do corte a força tende a zero.

Os resultados obtidos do primeiro experimento, com umidade média de 18,7 % BS e coeficiente de variação de 14,5 % são mostrados na Figura 4. As forças máximas de corte da palha de cana-de-açúcar apresentaram tendência linear e crescente, com médias de 760,4 N e 1355,9 N para a lâmina sem ângulo oblíquo e, de 396,6 N e 997,3 N para a lâmina com ângulo oblíquo de 10° nas quantidades de palha de 4 e 16 Mg·ha⁻¹, respectivamente. O incremento de força para as lâminas de 0° e 10° de ângulo oblíquo foi, respectivamente, da ordem de 47,9 N e 51,2 N para cada Mg·ha⁻¹ de palha acrescida.

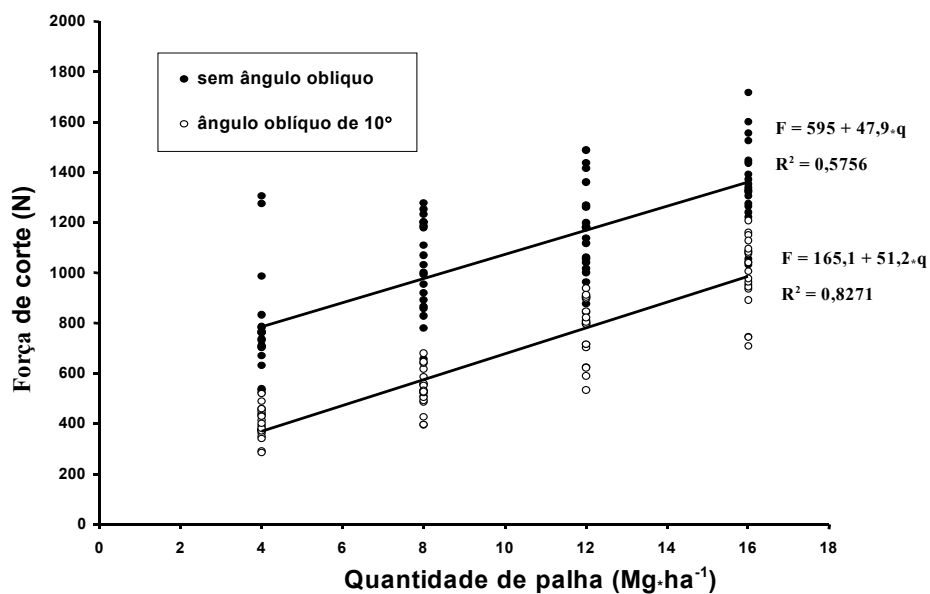


FIGURA 4.- Forças de corte (F) obtidas nos ensaios de laboratório para as lâminas com ângulos oblíquos de 0° (sem ângulo) e de 10°, em função da variação da quantidade de palha (q).

Os valores dos coeficientes angulares das equações de regressão obtidas são próximos entre si, demonstrando haver uma diferença na força de corte, quase constante, da ordem de 360 N, entre os valores obtidos para as lâminas, no intervalo de quantidade de palha estudado. Observa-se que houve uma redução (significativa ao nível de 1% de probabilidade) na força máxima de corte quando se utilizou a lâmina com ângulo oblíquo de 10°, em relação àquela sem ângulo.

Os coeficientes de determinação das equações de regressão foram considerados bons, uma vez que se trata de material biológico, que pode apresentar grandes variações de constituição entre duas porções de uma mesma unidade biológica. No entanto, deve-se lembrar que a preocupação primeira deste experimento foi a de obter informações a respeito do comportamento do palhicho quando atacado por uma ferramenta de corte, em condições de campo. Desta forma, já era esperada grande variação nos valores obtidos entre as repetições de um mesmo tratamento.

No segundo experimento, realizado com quatro níveis de umidade (9,6 %, 28,4 %, 41,0 % e 69,7 %) foi necessário, para efeito de comparação dos dados, determinar a força específica de corte e a energia específica demandadas. Esta exigência decorre do fato de que ao se variar a umidade do material, mantendo-se constante a quantidade de massa úmida utilizada nos ensaios, há diferenças significativas entre as massas secas. A força específica de corte ($\text{MPa} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ de seção transversal ao corte) e a energia específica demandada, em $\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$, foram obtidas considerando-se a densidade do material como sendo de $1,45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, conforme PERSSON (1987).

Os resultados de força máxima específica, obtidos para este experimento, apresentados na Figura 5, mostram que ela variou, em função da umidade da palha, sendo que os valores médios encontrados foram de 7,7 MPa, 11,2 MPa, 10,7 MPa e 10,6 MPa, para umidades da palha de 9,6 %, 28,4 %, 41 % e 69,7 % respectivamente. O modelo de regressão que melhor se ajustou foi o exponencial, com um coeficiente de determinação de 0,66. Este modelo determina uma tendência crescente, porém com uma taxa de incremento cada vez menor, de forma que as variações na força específica sejam pequenas quando a umidade da palha atinge níveis superiores a 28,4 %.

PRASAD e GUPTA (1975) em seus estudos, ao contrário, encontraram uma relação inversamente proporcional entre a máxima força de corte inercial e umidade de colmos de milho. A diferença entre os comportamentos pode ser explicada pelo tipo de corte. O corte inercial não depende de contra-faca, sendo a inércia do próprio material a ser cortado é que resiste à ação de deslocamento provocada pela lâmina de corte, sendo, portanto altamente dependente da velocidade de corte. O corte com contra-faca não depende da velocidade de corte.

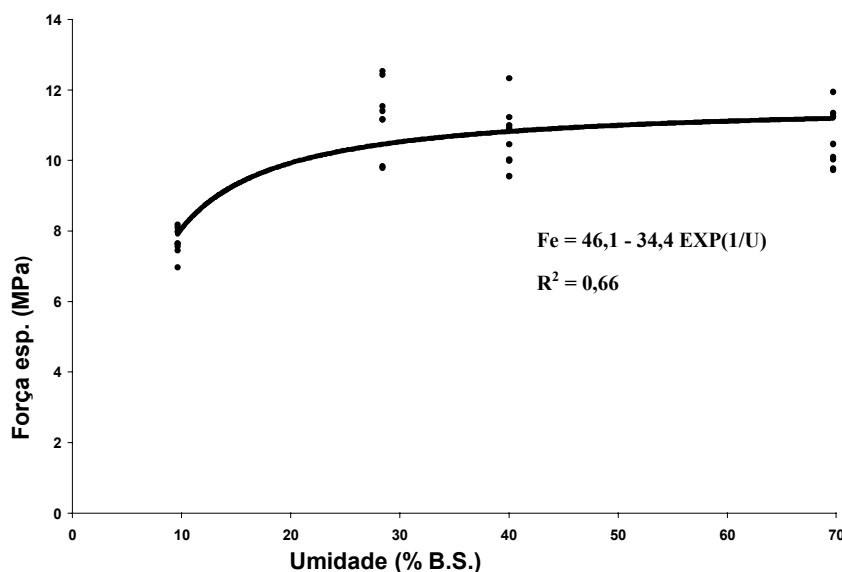


FIGURA 5 - Força específica de corte (Fe), em função da umidade da palha da cana (U) e lâmina com ângulo oblíquo de 5°

Outro fato que pode explicar a divergência entre os resultados obtidos é o de que os autores citados trabalharam com colmos de milho com idade de 70 dias, logo os tecidos estavam vivos e, conseqüentemente, túrgidos. A pressão dos líquidos internos à parede celular favorecem o processo de corte, como relata PERSSON (1987). O presente trabalho foi realizado com palha de cana-de-açúcar, portanto, tecido morto. Neste caso, a umidade absorvida pelas fibras vegetais não provoca a mesma turgidez encontrada no tecido vivo, mas, por outro lado, a torna maleável. A isto, soma-se a existência de uma folga que havia entre faca e contra-faca, comum neste tipo de dispositivo de corte, onde algum material se alojava durante o processo de corte, como já discutido anteriormente. Desta forma, a força de corte não foi representada exclusivamente pelo cisalhamento puro, porque no processo alguma palha acabava sendo separada, também, por outras forças, como a de dilaceramento. Este fato se intensificou com o aumento da umidade, uma vez que a maleabilidade da palha é, dentro de certos limites, diretamente proporcional ao seu conteúdo de água.

Observa-se, na Figura 5, que a partir da umidade de 28,4 % em base seca, as forças máximas específicas de resistência da palha ao corte já não mais apresentaram diferenças

significativas, demonstrando que, a partir de uma dada umidade, a quantidade de água presente na palha praticamente não mais interferiu na força de corte. A palha pouco úmida (9,6 % B.S.) ofereceu uma resistência específica ao corte de 7,7 MPa, que é significativamente menor, em relação aos outros níveis de umidade estudados. Comportamento semelhante foi observado por KUSHWAHA et al. (1983), que encontrou, para a palha de trigo, com umidade entre 8 a 10% em base úmida, valores de força específica de corte de 7 MPa para lâmina com ângulo de afiamento de 30°.

O comportamento das forças de corte observadas para a palha de cana pode ser explicado pelo fato de que a palha quando seca, ou seja, com pouca umidade, apresenta um comportamento elástico quanto ao corte, que se traduz em uma palha mais quebradiça e mais fácil de ser cortada. Com o incremento da quantidade de água presente, a palha passa a ter um comportamento cada vez mais visco-elástico, tornando-se mais maleável e mais difícil de ser cortada.

A energia específica demandada para o corte, em função da umidade apresentou comportamento semelhante ao da força de corte, como pode ser observado na Figura 6. A demanda de energia específica média para cortar a palha da cana apresentou um valor mínimo na umidade de 9,6 %, que foi de 0,10 J*mm⁻², significativamente menor do que os valores demandados para os outros níveis de umidade.

As quantidades de energia demandada para as umidades de 28,4 %, 41,0 % e 69,7 % foram respectivamente de 0,14 J*mm⁻², 0,13 J*mm⁻² e de 0,14 J*mm⁻². O modelo de regressão que melhor se ajustou para explicar o comportamento da demanda de energia específica, em função da variação da umidade foi, a exemplo da demanda de força específica, o exponencial com um fator de determinação de 0,78. O incremento na demanda de energia específica foi praticamente nulo a partir da umidade de 28,4 %, como pode ser observado na Figura 6.

Os resultados demonstraram que há uma variação significativa na demanda de energia para cortar a palha da cana, quando se varia o seu conteúdo de água. A energia específica demandada para cortar a palha com umidade superior a 28,4 % foi 40 % superior àquela demandada para cortar palha com 9,6 % de umidade, em base seca. Estes resultados mostraram que é recomendável, do ponto de vista da demanda energética, cortar a palha de cana seca, no entanto, as condições de operação dos dispositivos de corte variam muito no dia-a-dia do meio rural, não permitindo que se trabalhe apenas em condições ótimas de operação. Neste sentido e

analisando puramente a questão energética não se justifica aguardar a secagem do palhicho para se proceder ao cultivo quando não há tempo para que ele atinja níveis próximos de 10%.

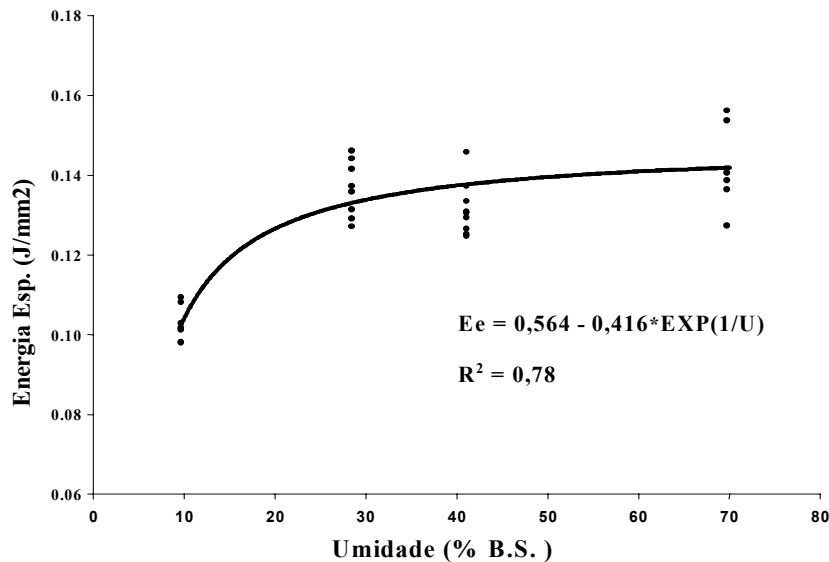


FIGURA 6 - Energia específica de corte (E_e), em função da umidade da palha da cana (U) e lâmina com ângulo oblíquo de 5° .

Os resultados do terceiro experimento, onde se variou o ângulo oblíquo da lâmina de corte estão apresentados na Figura 7. Eles demonstraram que há diferenças significativas entre as lâminas, no que se refere à máxima força específica de corte demandada.

O modelo linear, com coeficiente de determinação de 0,86 e tendência inversamente proporcional, foi o que melhor se ajustou para explicar o comportamento da máxima força específica de corte requerida, em função do ângulo oblíquo da lâmina. A lâmina sem ângulo oblíquo apresentou uma demanda média para esta força igual a 8,86 MPa, enquanto as lâminas com 5° e de 10° de ângulo oblíquo apresentaram, respectivamente, 8 MPa e 7,28 MPa de força específica. Estes resultados mostraram que é benéfica a existência deste ângulo em ferramentas para corte de palha de cana-de-açúcar, do ponto de vista da força requerida para o corte e, conseqüentemente, da potência instantânea exigida.

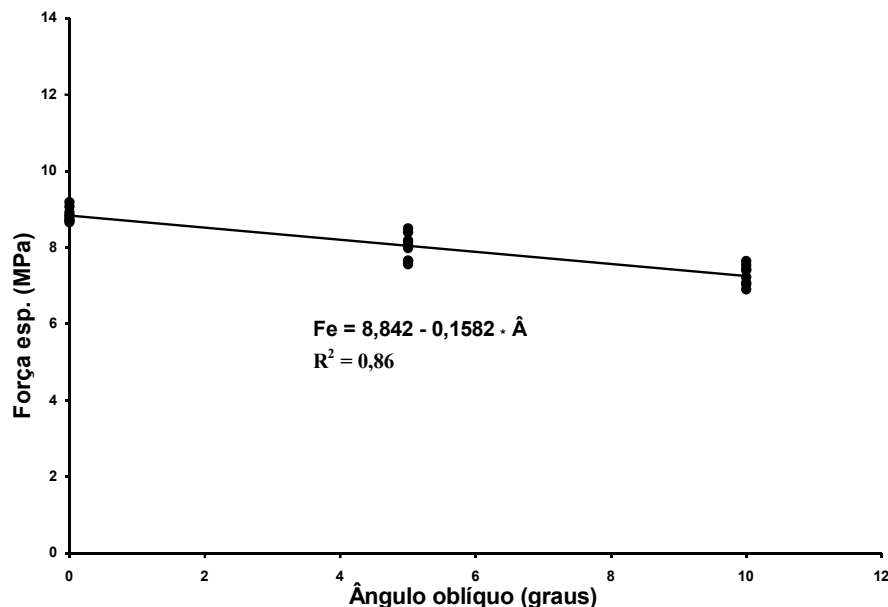


FIGURA 7 - Força específica de corte (F_e), em função do ângulo oblíquo da lâmina (A_o), para palha com umidade de 14 %.

A força específica máxima encontrada pela lâmina com 10° de ângulo oblíquo foi 18 % inferior à requerida pela lâmina sem ângulo. Este ângulo, formado pela borda cortante da lâmina e a linha paralela à superfície do material a ser cortado, reduz a força específica máxima de corte porque provoca um corte progressivo e contínuo, ao contrário da lâmina reta, que produz um corte abrupto do material. A lâmina sem ângulo oblíquo solicita uma força grande, por um curto período de tempo que coincide com o momento em que ocorre o início do corte, já que ele acontece simultaneamente em toda a extensão da lâmina. Quando a lâmina apresenta ângulo oblíquo, a parte mais avançada inicia o corte antes da parte mais retraída, de forma que o pico da solicitação de força fica atenuado. Esta atenuação será, dentro de certos limites, tão maior quanto maior for o ângulo oblíquo da lâmina.

PRASAD e GUPTA (1975) estudaram a variação da força específica máxima em função de ângulos oblíquos entre 2° e 62°. O trabalho demonstrou que ângulos oblíquos entre 32° e 62° não influenciaram na força específica máxima de corte, mas que entre 2° e 32°, houve um incremento linear e inversamente proporcional desta força. Os valores encontrados por eles para a força específica máxima de corte de colmos de milho se situaram em torno de 0,7 MPa para o

ângulo de 2° e 0,15 MPa para o ângulo de 32° . Vale lembrar que a força específica de que os autores se referiram baseia-se na área de seção transversal do colmo indeformado, ou seja, a área ocupada por sólidos e não sólidos que constituem os colmo de milho. Os autores explicaram que para ângulos oblíquos pequenos o efeito da ação de cunha da lâmina é grande, enquanto que para valores altos destes ângulos, ocorrem deslizamentos, que por sua vez, minimizam o efeito de cunha.

A análise da quantidade de energia envolvida no processo, por outro lado, não mostrou diferenças significativas entre as lâminas estudadas. A Figura 3 mostra dois ensaios realizados, onde as áreas sob as curvas representam, na verdade, a energia necessária para cortar a palha de cana. O exemplo mostra que as áreas sob as curvas de força de corte momentâneas, para as lâminas de 0° e de 10° de ângulo oblíquo não parecem ser tão diferentes. Na verdade, as quantidades de energia requeridas pelas lâminas estudadas não apresentaram diferenças significativas, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste "F", entre suas médias. As lâminas com 0° , 5° e 10° de ângulo oblíquo apresentaram uma demanda de energia de $0,098 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$, $0,1 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$ e $0,104 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$ respectivamente. Estes resultados mostraram que a variação deste ângulo não influenciou a quantidade de energia demandada para cortar a palha da cana, mas apresentaram diferenças significativas do ponto de vista da demanda de força máxima de corte.

Nos processos de corte que envolvem lâminas com ângulos oblíquos aparece uma força lateral que tende a deslocar o material para fora da linha de atuação da faca. Esta força é equilibrada pelas forças de atrito entre o material a ser cortado e o metal da lâmina. Com o aumento do ângulo oblíquo a componente lateral assume valores elevados e as forças de atrito passam a não serem mais eficientes para segurar o material na posição de corte. No presente trabalho o maior ângulo oblíquo utilizado para a lâmina foi o de 10° , justamente para evitar que houvesse deslocamento lateral da palha, que causaria um acúmulo deste material na porção mais retraída da lâmina. Caso isto viesse ocorrer, os ensaios seriam invalidados, pois haveria uma concentração de força no final dos mesmos, o que contrariaria o esperado. Os resultados mostraram que não houve deslocamento lateral da palha durante a execução dos ensaios, pois as curvas apresentadas pela lâmina de 10° mostraram comportamento semelhante ao esperado, a exemplo daqueles apresentados na Figura 3.

3.4. CONCLUSÕES

Considerando-se as condições em que foram conduzidos os ensaios foi possível chegar às seguintes conclusões, com respeito ao comportamento da palha de cana quando sujeita ao corte:

- A diferença na força máxima de corte entre as lâminas com 0° e 10° de ângulo oblíquo foi da ordem de 350 N, para as quantidades de palha estudadas, entre 4 Mg*ha⁻¹ e 16 Mg*ha⁻¹;
- A força específica de corte (Fe), em função da umidade da palha da cana-de-açúcar (U), apresentou comportamento exponencial, representada pela expressão:

$$Fe = 46,1 - 34,4 \text{ EXP}(1/U);$$

- A demanda de energia específica (Ee), em função da umidade da palha da cana-de-açúcar (U) apresentou comportamento exponencial, representada pela expressão:

$$Ee = 0,564 - 0,416 \text{ EXP}(1/U);$$

- A força máxima e a energia demandada para cortar palha de cana não apresentaram diferenças significativas para umidades da palha superiores a 28 %, em base seca;
- A palha de cana foi mais fácil de ser cortada quando apresentava umidade próxima de 10 % em base seca;
- A força máxima de corte apresentou tendência linear e inversamente proporcional ao ângulo oblíquo da lâmina, sendo expressa por:

$$Fe = 8,842 - 0,1582 * \hat{A}$$

- O ângulo oblíquo não influenciou a quantidade de energia específica utilizada para cortar a palha da cana-de-açúcar.

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHOI, Chang H.; ERBACH, Donald C. Cornstalk residue shearing by rolling coulters. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, 29(6): 1530-5, 1986.

HALYK, R. M; HURLBUT L. W. Tensile and shear strength characteristics of alfalfa stems. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, 11(2): 256-7. 1968.

KUSHWAHA, R. L.; VAISHNAV, A. S.; ZOERB, G. C. Shear strength of wheat straw. **Canadian agricultural engineering**, 25(2): 163-6, 1983.

PERSSON, S. **Mechanics of cutting plant material**. (ASAE monograph Number 7). St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1987.

PRASAD, J.; GUPTA, C. P. Mechanical properties of maize stalk as related to harvesting. **Journal agriculture engineering research**, London, v.20, p.79-87, 1975.

RIPOLI, T. C. **Utilização do material remanescente da colheita de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) – Equacionamento dos balanços energético e econômico**. 150 p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1991.Paulo.

TICE, E. M.; HENDRICK, J. G. Disc coulter operating characteristics. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph ,35(1): 3-10, 1992.

4. ARTIGO 2: DESENVOLVIMENTO DE DISCO DENTADO PASSIVO PARA CORTE DE PALHADA

4.1 INTRODUÇÃO

Os primeiros arados utilizados não apresentavam nenhuma ferramenta que permitisse o corte dos restos vegetais depositados sobre o solo, o que inviabilizava sua utilização em áreas com grande quantidade de restos de culturas em cobertura. Para facilitar a operação destes implementos de mobilização de solo surgiram os discos de corte de rolamento, também denominados de discos de corte passivo, cuja função é cortar o material depositado sobre o solo, permitindo que as ferramentas de mobilização efetuem seu trabalho eficientemente. Segundo KEPNER et al. (1978) eles são empregados para ajudar o corte da leiva e para cortar a palhada existente sobre o solo, que de outra forma poderia acumular-se nas ferramentas ou colunas do implemento causando embuchamentos.

Os tipos de discos de corte existente no mercado, segundo o autor, apresentam três geometrias de borda diferentes: os lisos, usados em campos relativamente limpos; os recortados e os ondulados, que trabalham bem em áreas com grande quantidade de palha em cobertura. Além destes formatos de bordas é citado, também, por HORTIZ-CANÃVATE (1984) e CHOI e HERBACH (1986) um quarto tipo, que é o disco estriado. Estes formatos de borda de discos estão representados nos desenhos da Figura 8.

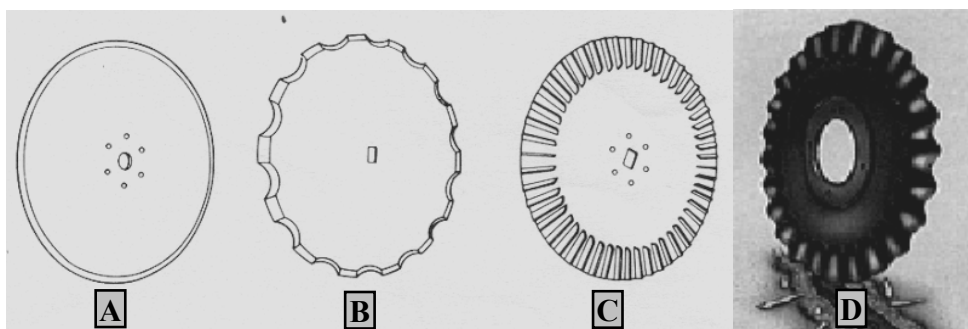


FIGURA 8 - Bordas de discos de corte de rolamento existentes no mercado:
A - lisa; B - recortada; C - estriada; D - ondulada.

A bibliografia consultada não explica a função da ondulação da borda cortante dos discos denominados de ondulados, no entanto, esta forma geométrica leva a crer que o

desempenho deste disco esteja relacionado com a mudança da direção e da magnitude da velocidade resultante do disco, pois esta forma geométrica produz componentes de velocidade, no sentido transversal ao deslocamento do disco. Já o desempenho do disco recortado, segundo MAGANÃ et al. (1994), é dado pela troca contínua de direção da velocidade tangencial e da tangente do gume da seção recortada, bem como pela mudança da magnitude da velocidade tangencial.

O uso destes discos tornou-se, mais recentemente, imprescindível com o advento das técnicas de “plantio direto” e o cultivo mínimo de diversas culturas, em várias regiões do globo terrestre. Nestes casos, o solo recebe a semente ou algum tratamento de mobilização, mas o material, constituído de restos vegetais, depositados sobre o mesmo, na maioria das vezes, precisa ser mantido inalterado. O disco de corte de rolamento é, na atualidade, a única ferramenta de equipamentos agrícolas disponível para cortar palhada e permitir que o solo seja trabalhado, sem que estas sejam incorporadas ou cause problemas de embuchamentos nos implementos.

Para CHOI e HERBACH (1986) a relação entre as condições de solo criadas pelo não preparo (sem mobilização), presença de resíduos na superfície e operação de discos de corte, ainda não são bem entendidas. Quando o solo está seco e duro, a penetração do disco de corte pode ser inadequada; quando o solo está úmido ou solto o disco de corte tende a empurrar o resíduo vegetal para dentro do solo, sem corta-lo.

Segundo WELLS et al. (1980) discos de corte de rolamento passivo de várias formas são muito comuns implementando máquinas de “plantio direto” e podem requerer peso extra em seu chassi para obter penetração dos discos de corte, quando trabalham em solo sem preparo. MORRISON Jr. et al.(1996) afirmam que em preparos conservacionistas e especialmente para “plantio direto”, onde o solo não é mobilizado antes do semeio, a resistência do solo pode ser muito maior que em condições de semeio com preparo convencional. Tal aumento da resistência do solo pode refletir no aumento da força de tração e penetração vertical nos dispositivos de corte e abertura de sulcos da semeadora.

KUSHWAHA et al. (1983) relatam que testes realizados com semeadoras têm indicado que sobre grande quantidade de restos vegetais o disco de abertura de sulco era incapaz de cortar a camada de palha, resultando na deposição das sementes em meio aos restos vegetais ou na superfície do solo. Quando a quantidade de palha era pequena e o solo estava macio, ela era empurrada para o fundo do sulco sem ser cortada. Também alertam para o fato de que, em

trabalhos de pesquisa, não tem sido relatada a resistência ao corte de resíduos vegetais, que é um importante parâmetro no desenvolvimento de máquinas para plantio ou trabalho em áreas de cultivo mínimo.

A ação do disco de corte de rolamento pode ser influenciada por vários parâmetros do próprio disco (diâmetro, formato, espessura, ângulo de afiamento), do solo (umidade, estrutura, resistência ao cisalhamento, grau de mobilização, entre outros) e da palhada (espécies vegetais que a compõe, grau de maturação da cultura, tempo de deposição, umidade e densidade).

Apesar dos discos de corte de rolamento serem muito importantes no sistema de cultivo mínimo e “plantio direto”, segundo TICE e HENDRICK (1992), a compreensão de suas interações com o solo é, ainda, limitada. A espessura e o ângulo de cunha influenciam as forças atuantes no disco de corte de rolamento e na relação entre suas velocidades de rotação e translação. Um melhor entendimento destes efeitos é necessário para assegurar que discos de corte de rolamento possam ser desenhados e implementados para uma máxima eficiência. A relação entre as velocidades de rotação e de translação é de importância nas forças relativas do disco de corte de rolamento na superfície de tração imposta pelo solo, podendo também influenciar como efetivamente o disco corta o solo através dos resíduos de plantas.

A razão entre as velocidades de rotação e de translação do disco de corte de rolamento, aqui representada por λ (lambda) é definida, segundo TICE e HENDRICK (1992) pela seguinte expressão:

$$\lambda = \omega R / V_o , \quad [1]$$

onde:

λ = razão de velocidades;

ω = velocidade angular do disco de corte;

R = raio externo do disco de corte;

V_o = velocidade de avanço.

Os autores desenvolveram um trabalho com a finalidade de determinar o efeito da profundidade de operação, espessura e ângulo de cunha de discos de corte lisos nas forças atuantes e no comportamento cinemático. Os resultados demonstraram que a força de tração e a força vertical podem ser minimizadas pelo uso de discos de corte de rolamento finos, com

pequeno ângulo de cunha. No entanto, ressaltam que o desafio para a redução das forças nos discos de corte reside na sua confecção, com pequena espessura, pequeno ângulo de cunha, de forma bem balanceada, sem comprometimento da sua resistência e durabilidade.

CHOI e HERBACH (1986) estudaram o corte e as forças na operação de corte de colmos de milho por discos de corte de rolamento em caixa de solo, sob condições controladas de densidade de solo (resistência à penetração), velocidade de deslocamento, profundidade de operação, umidade e espaço entre colmos. Os resultados demonstraram que o corte dos colmos de milho não foi afetado pela forma do disco de corte, mas foi afetado pela resistência do solo. Os diâmetros dos discos de 410 mm e 460 mm, bem como os quatro formatos de discos estudados (liso, estriado, recortado e ondulado) não afetaram, significativamente, a percentagem de colmos cisalhados. No entanto, os discos recortados e estriados foram os que apresentaram, respectivamente, a menor e a maior exigência de forças de tração e vertical. Estas forças foram, ainda, influenciadas pela profundidade de operação, pelo diâmetro dos discos e resistência do solo. O fator que mais influenciou o corte dos colmos foi à resistência do solo, sendo que o corte foi tanto melhor quanto mais resistente à penetração se encontrava o solo. O afiamento demonstrou ser o mais importante fator do disco, que afetou o corte dos colmos de milho. Com relação a estes, o fator umidade apresentou um efeito muito maior do que o diâmetro. Colmos úmidos tendem a ser mais difíceis de serem cortados do que colmos secos relatam os autores.

A revisão da bibliografia revelou que quando o solo é coeso e está com umidade baixa há dificuldade para o disco de corte passivo penetrá-lo. Quando isto ocorre, o disco não gira de forma adequada, resultando em corte deficiente da palhada, principalmente quando sua densidade ou resistência ao corte for elevada. No entanto, se forem aplicados valores de cargas normais suficientes, o disco desempenhará sua função satisfatoriamente.

Quando o solo está molhado, próximo da capacidade de campo, ou é pouco coesivo, o disco tem facilidade de penetrar em seu perfil, não necessitando de grande carga normal. No entanto, ele não oferece resistência suficiente para servir de anteparo ao corte da palhada. Assim, quando a quantidade de palhada é elevada, o corte do disco se mostra também deficiente, permitindo, inclusive, que parte deste material não cortado seja introduzido no solo.

Em ambos os casos, sendo deficiente o corte, o trabalho da ferramenta de abertura de sulcos, que vem logo atrás do disco de corte passivo, fica prejudicado. A palhada não cortada se acumula na frente da ferramenta, obrigando a interrupção da operação para retirada do material.

Assim, o desempenho do equipamento é baixo, dada a necessidade de constantes interrupções para desembuchamentos (eliminação da palhada acumulada na ferramenta), além de produzir um trabalho irregular e de baixa qualidade.

Outro problema existente, que também está relacionado com a interação solo-disco, é a relação entre as velocidades periférica e de translação do disco. Quanto menor esta relação, maior será a possibilidade de acúmulo do palhiço na frente do disco, que em vez de corta-lo o empurra para frente.

O desenvolvimento de um novo tipo de disco de corte de rolamento é aqui proposto, com borda de formato dentado, na tentativa de solucionar ou minimizar os problemas mencionados. O formato dentado do disco facilitaria a sua penetração no solo seco, resultando em menor resistência à penetração, o que minimizaria a carga normal a ser aplicada no disco. Quando o solo estivesse úmido, o disco ainda manteria a capacidade de cortar a palhada, em função de seus dentes terem formato e ângulos específicos, além do fato de que um dos flancos dos dentes atuaria como uma ferramenta estreita, aumentando, em relação aos discos lisos, o momento que causa o giro do disco. Isto promoveria também reduções do valor do deslizamento do disco (relação entre a velocidade periférica do disco e a velocidade de translação do seu eixo), evitando que a palhada se movimente e se acumule na frente do disco de corte.

O estudo da geometria do disco de corte dentado passivo proposto foi desenvolvido para atender os seguintes objetivos específicos:

- Minimizar do movimento do palhiço no sentido horizontal e avante do disco;
- Minimização da carga normal (N), em função do formato dos dentes e diâmetro dos discos;
- Possibilitar a operação do disco em camadas de palhiço com espessura entre 60 mm a 75 mm;

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento da geometria do disco dentado de corte foi executado considerando-se apenas o seu movimento passivo, ou seja, seu movimento de rotação dependente exclusivamente da interação disco-solo, não sendo utilizado nenhuma outra forma de propulsão.

A definição da forma básica dos dentes do disco dentado partiu de quatro pressupostos:

1. O disco deveria minimizar o deslocamento da palhada para frente;

2. O gume do dente deveria cortar o palhico com ângulo oblíquo, o que facilitaria o processo de corte;
3. O flanco posterior do dente deveria atuar como uma ferramenta estreita, produzindo torque no disco, e
4. O somatório de momentos atuantes no disco deveria ser favorável ao seu giro.

A definição das dimensões das variáveis geométricas do disco dentado foi realizada após análise dos dados obtidos em simulações computacionais que consideraram atributos da palhada, do solo e da geometria do disco dentado. As simulações foram executadas por rotinas elaboradas e implementadas na linguagem simbólica **Matlab**. Para avaliar a interação disco-solo foram introduzidos, na rotina computacional, cálculos para prever a resistência do solo à ação do disco dentado, utilizando-se da teoria apresentada em McKYES (1985) para ferramentas estreitas e a resistência do solo à penetração do disco por meio de informações obtidas com penetrógrafo. Para avaliar a interação disco-palhada foram utilizadas informações obtidas no Artigo 1, com relação ao comportamento da palha de cana-de-açúcar ao corte.

Diferentes discos dentados de corte foram gerados e analisados pelas rotinas computacionais, buscando-se definir a melhor geometria do disco, porém sempre observando a forma básica dos dentes. Para obter diferenças entre os discos gerados alterava-se uma ou mais das seguintes variáveis de entrada: diâmetro, número de dentes e profundidade de operação do disco de corte. As variáveis de entrada apresentadas na Tabela 2, foram mantidas constantes nas simulações computacionais. Aquelas que se referem ao solo foram obtidas a partir de análises do solo da caixa de solo do Laboratório de protótipos da FEAGRI, local onde foram realizados os ensaios com os discos de corte dentados. As análises do solo estão apresentadas no Apêndice 5 e foram realizadas nos Laboratórios de Materiais Alternativos da FEAGRI e no de Mecânica de Solos da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP.

A simulação computacional foi realizada com a intenção de levantar dados de alguns atributos, em cada disco gerado, que auxiliassem na definição das melhores geometrias para o disco dentado de corte. Desta forma, elegeram-se os seguintes atributos para a análise de desempenho do disco de corte dentado, de forma a atender aos objetivos do trabalho e aos quatro pressupostos enunciados:

- Momento resultante gerado, em função da força horizontal de reação do solo, da resistência do solo à penetração e da força necessária para cortar o palhiço;
- Diferença entre a distância real entre dois dentes consecutivos e o valor da frente de ruptura;
- Relação entre a altura e a largura do dente;
- Altura projetada para a palhada.

TABELA 2 – Variáveis utilizadas nas rotinas computacionais para definição da geometria do disco dentado de corte passivo.

Variável	Símbolo	Unidade	Valor
Densidade aparente do solo	γ	Mg*m ⁻³	1,40
Ângulo de atrito interno do solo	ϕ	Graus	15,25
Ângulo de atrito solo-metal	δ	Graus	10,17
Coesão do solo	cs	kPa	52,66
Adesão do solo	ca	kPa	35,11
Umidade do solo	-	% B.S.	14,0
Resistência do solo à penetração	Rs	MPa	2,0
Espessura do disco de corte	w	mm	6,0

A etapa seguinte à simulação foi a de eleger e executar a confecção física de protótipos de discos dentados, a partir da análise dos resultados obtidos nas simulações com as geometrias geradas. Os protótipos de discos foram testados na caixa de solo, em condições reais similares à das utilizadas nas simulações.

Na caixa de solos do Laboratório de Protótipos da FEAGRI foram preparadas camadas de solo de aproximadamente 200 mm de profundidade, para a realização dos ensaios. Cada camada preparada foi denominada de leito de ensaios. Estes leitos foram montados por sub-camadas de 50 mm de altura, que eram depositadas com o auxílio de uma lâmina, compactadas por um rolo compressor e umedecidas. Após a compactação e umedecimento de cada sub-camada, a superfície do solo era escarificada, antes de receber uma nova sub-camada, para evitar um possível deslizamento entre as camadas. Os passos utilizados na montagem dos leitos de ensaios estão ilustrados no Apêndice 6. Após a montagem da camada de solo, foram realizados

ensaios com um penetrógrafo eletrônico automático, desenvolvido por BIANCHINI et al (2002), com a finalidade de se avaliar a uniformidade do leito preparado, no que se refere à resistência do solo à penetração, para o intervalo de profundidade de zero a 110 mm. Também foram retiradas amostras de solo para determinação da sua umidade e densidade, no momento dos ensaios.

A coleta dos dados de força vertical, força horizontal, momento em relação ao centro do disco e das velocidades de translação e rotação dos discos foi feita utilizando-se de um sistema de aquisição de dados, com oito canais analógicos, a uma taxa de amostragem de 400 Hz. O transdutor utilizado para obtenção das forças horizontal, e vertical e momento em relação ao centro do disco foi um anel octogonal, desenvolvido por SOUZA e MAGALHÃES (1989). Para a leitura da rotação do disco e da velocidade de translação de seu centro foram utilizados dois sensores indutivos.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1. Desenvolvimento do disco dentado de corte passivo

A concepção do disco foi implementada a partir de três linhas básicas, uma representando a superfície do solo (SS), outra a superfície da camada de palha (SP) e a última representando a profundidade de penetração do dente do disco ou fundo do sulco (FS), como pode ser observado na Figura 9. Duas circunferências foram arbitradas com centro no mesmo ponto, uma tangente à superfície do solo, definida pelo raio interno (**Ri**) e a outra, maior, tangente ao fundo do sulco, definida pelo raio do disco (**R**). A circunferência maior deu origem ao círculo de topo dos dentes (circunferência externa do disco) e a de menor diâmetro deu origem ao círculo de pé dos dentes.

A partir do centro das circunferências pôde-se traçar três seguimentos de reta: o primeiro, \overline{ob} que vai até o ponto “b”, na interseção da circunferência maior com a linha que define a superfície da palhada (SP); o segundo \overline{oc} que vai até o ponto “c”, na interseção da circunferência menor com a linha que define a superfície da palhada (SP) e, o último, \overline{od} que vai até o ponto “d”, na interseção da circunferência maior com a linha que define a superfície do solo (SS). No segmento de reta \overline{ob} , define-se o ponto “a” localizado na interseção deste segmento com a circunferência interna, dando origem ao segmento \overline{ab} . Na linha que define a superfície da

palha pôde-se definir também o segmento \overline{bc} , entre as circunferências interna e externa. A descrição destes segmentos torna possível delimitar o dente do disco de corte passivo, que é circunscrito pelos segmentos de retas \overline{ab} e \overline{bc} . O arco \overline{ac} sobre a circunferência interna define a base do dente.

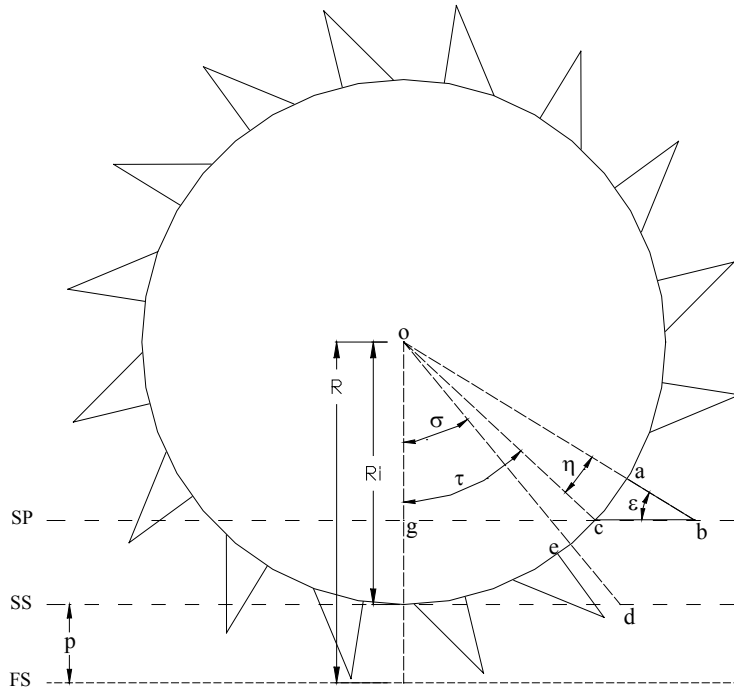


FIGURA 9 – Geometria do disco de corte dentado.

Uma vez determinado os contornos do disco e de seus dentes, torna-se possível definir alguns ângulos e algumas dimensões para efeito construtivo. A altura da camada de palha está representada por "**h**", a profundidade de operação do disco por "**p**" e os raios interno e externo do disco dentado por "**Ri**" e "**R**" respectivamente. Todas as outras dimensões do disco de corte dentado, apresentadas na Figura 9, foram definidas em função destas quatro dimensões básicas, como pode ser observado nas Equações 2 a 11.

Entre os seguimentos \overline{ab} e \overline{bc} forma-se o ângulo da ponta do dente que foi denominado de epsilon, "**ε**", Figura 9. Este ângulo determina que a borda cortante do dente, segmento \overline{bc} , atinja a superfície da palha de forma paralela. O ângulo da ponta do dente é obtido, em função de "**p**", "**h**" e "**R**" como se segue:

$$\varepsilon = a \sin \left[1 - \left(\frac{p+h}{R} \right) \right] \quad [2]$$

O segmento \overline{ab} tem a mesma dimensão da profundidade de trabalho do disco dentado "p":

$$\overline{ab} = p \quad [3]$$

O segmento \overline{og} representa o cateto oposto do triângulo definido por ele, o segmento \overline{ob} e pelo segmento \overline{bg} , que está localizado sobre a linha da superfície da palha. Este segmento pode ser obtido por:

$$\overline{og} = R - (h + p) \quad [4]$$

No entanto, este segmento pode, também, ser determinado por:

$$\overline{og} = R \times \sin(\varepsilon) \quad [5]$$

O ângulo “ τ ” formado entre a perpendicular do centro do disco e o segmento de reta que parte da origem e vai até o ponto de intercessão do círculo interno do disco com a linha da superfície da palhada, neste caso representada pelo segmento \overline{oc} , é obtido pela expressão:

$$\tau = a \cos \left[1 - \left(\frac{h}{R-p} \right) \right] \quad [6]$$

O seguimento de reta \overline{og} pode ser, também, obtido em função de “ τ ” por:

$$\overline{og} = Ri \times \cos(\tau) \quad [7]$$

O ângulo “ η ” formado entre os seguimentos de retas \overline{ob} e \overline{oc} é expresso por:

$$\eta = \frac{\pi}{2} - (\varepsilon + \tau) \quad [8]$$

O ângulo “ σ ” representa o ângulo entre a perpendicular que passa pelo centro do disco e o segmento \overline{od} , sendo calculado em função dos raios externo e interno do disco pela expressão:

$$\sigma = a \cos\left(\frac{Ri}{R}\right) \quad [9]$$

Este ângulo pode, também, ser expresso em função da profundidade de trabalho e o raio externo:

$$\sigma = a \cos\left(1 - \frac{p}{R}\right) \quad [10]$$

O seguimento de reta \overline{bc} , define a extensão da borda cortante do dente do disco e é definido pela expressão:

$$\overline{bc} = [R \times \cos(\varepsilon)] - [(R - p) \times \sin(\tau)] \quad [11]$$

As dimensões construtivas do disco de corte dentado podem, então, ser definidas por meio de cálculo, utilizando-se das Equações 2 a 11, considerando-se como variáveis a profundidade de trabalho, a altura da camada do palhiço, o número de dentes e o raio externo do disco.

4.3.2. Análise da trajetória do dente do disco de corte de rolamento

Após o equacionamento das variáveis que foram utilizadas para a definição da geometria do disco dentado o passo seguinte seria a verificação da trajetória do dente para constatar se realmente os dois primeiros pressupostos levados em consideração no desenvolvimento do disco estavam sendo atendidos. Neste sentido foram adotados procedimentos

que pudessem descrever graficamente o movimento do dente, durante sua trajetória, do ponto em que tocasse a palhada até atingir a profundidade máxima de operação.

Para descrever o movimento de pontos sobre o segmento \overline{bc} , que representa a borda cortante do dente do disco considerou-se uma base móvel com centro no ponto “o” e uma base inercial com centro, também no ponto “o”, porém não solidária à base móvel.

O vetor \vec{R} é o vetor de posição da partícula representada pelo ponto “b” na base móvel que, no sistema inercial é representado pela seguinte expressão:

$${}_1\vec{R} = \begin{bmatrix} dc \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R \times \cos \theta \\ R \times \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad [12]$$

O deslocamento do centro do disco está representado por "**dc**", ou seja:

$$dc = Vo \times t \quad [13]$$

Para se descrever a posição do segmento \overline{bc} , em função do tempo, utilizando-se da Equação 12, torna-se necessário escrever “ θ ” em função das dimensões construtivas do disco de corte e do tempo. Considerando a Equação 1 e que:

$$\omega = \frac{vt}{R} \quad [14]$$

$$\omega = \frac{\theta}{t} \quad [15]$$

Resulta que:

$$\theta = t \times \lambda \times \frac{Vo}{R} \quad [16]$$

Assim a trajetória percorrida pelo seguimento \overline{bc} pode ser descrita para cada geometria de disco de corte, considerando-se o caso passivo.

A borda cortante do dente toca simultaneamente toda sua extensão na superfície da palhada, no momento do contato, devido à imposição construtiva determinada pelo ângulo " ϵ " da ponta do dente. Este ângulo foi concebido exatamente para garantir a existência deste paralelismo, ou seja, no momento do contato o gume da borda cortante do dente apresenta um ângulo oblíquo igual a 0° . Define-se neste caso por ângulo oblíquo, o ângulo formado entre o seguimento \overline{bc} e a superfície do solo.

A análise gráfica da trajetória dos dentes do disco foi realizada utilizando-se de uma rotina computacional, que se encontra no Apêndice 2, implementada no Matlab, por meio das Equações 1 a 16. Na simulação de um disco projetado, cujo resultado está apresentado na Figura 10, observa-se que após a borda cortante do dente tocar a superfície da palhada, o ponto "b" (Figura 9), que define a ponta do dente terá uma cota sempre inferior a do ponto "c", localizado na base do dente, assegurando que a porção de palhada apreendida não tenha mais condições de fugir da ação cortante do dente do disco, pelo deslocamento horizontal.

O primeiro pressuposto foi, então, atendido, pois cada dente, juntamente com seu vão, prende uma determinada quantidade de palha e a conduz para baixo, contra o solo, minimizando seu movimento à frente, para fora da área de ação do disco. Em seguida, a palhada é comprimida e cortada pelo movimento de avanço do dente. Percebe-se na figura, que a borda cortante do dente tem, durante o período de compressão e corte, um movimento horizontal em relação à palhada, representado pela componente horizontal da Equação 12 ($dc + R \times \cos \theta$) que, associado ao seu movimento descendente ($R \times \sin \theta$), produz um tipo de corte denominado de "slicing cut", que tem melhor eficiência, segundo PERSSON (1987), em relação ao corte por cisalhamento simples, quando se trata de materiais com pouca resistência à deformação, como no caso de palhada.

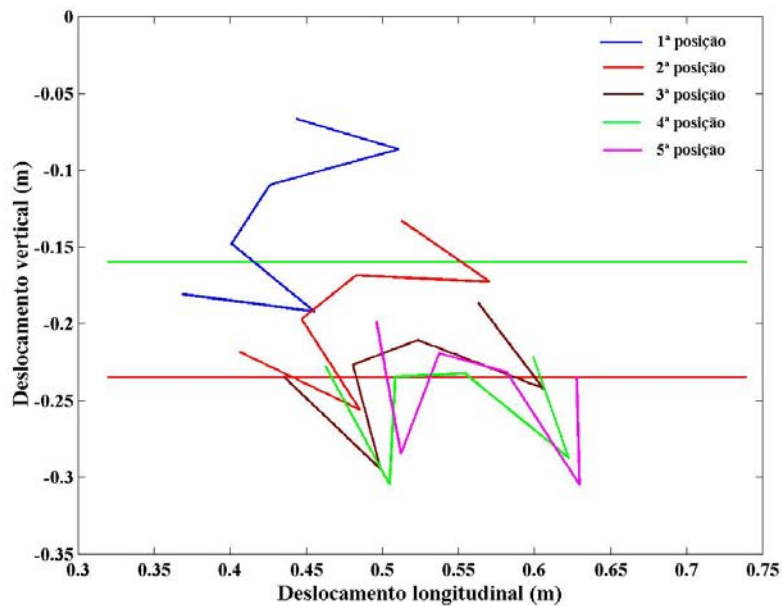


FIGURA 10 – Trajetória de dois dentes consecutivos do disco de 16 dentes, $R = 304,8$ mm, $p = 70$ mm, $h = 75$ mm e $\lambda = 0.95$, durante o período efetivo de corte, em função do deslocamento.

O movimento de rotação do disco, como pode se observado na Figura 10, permite que a borda cortante do dente forme um ângulo oblíquo, em relação à superfície do solo, que cresce à partir de zero no momento em que ela toca a palhada até um valor máximo, igual a “ τ ”, no instante em que ela completa a sua trajetória de penetração no solo, satisfazendo, desta forma o segundo pressuposto. Na Figura 10 pode-se observar uma posição intermediária (3ª posição), o ângulo oblíquo assumido pelo dente, logo após ter iniciado o processo de corte.

Observa-se, ainda, na Figura 10 que o processo de corte da palhada, efetuado pelo disco dentado pode ser denominado de composto, pois parte do material seria cortado pela borda cortante do dente, representada pelo seguimento \overline{bc} , e parte pelo arco que define o vão do dente, segmento \overline{ce} (Figura 9), que também sofreu afiamento. Vale ressaltar que no momento em que o vão do dente estiver fazendo o corte, o dente anterior estará totalmente introduzido no solo e o dente posterior parcialmente, garantindo que a palhada aprisionada não tenha como se deslocar para frente.

O terceiro pressuposto diz que o flanco posterior do dente deveria atuar como uma ferramenta estreita, produzindo um torque no disco e o quarto pressuposto afirma que a somatória dos momentos gerados no disco é favorável ao seu giro. Isto significa dizer que os momentos motores são maiores que os momentos de resistência ao giro do disco e suficiente para efetuar o corte da porção de palhada aprisionada pelo dente em trabalho efetivo de corte.

A análise da trajetória de dois dentes consecutivos, apresentada na Figura 10 mostra claramente, nas três últimas posições, que o flanco do dente que primeiro penetra no solo forma com ele um ângulo de ataque crescente com o deslocamento da ferramenta. O movimento horizontal e avante do dente deverá ser contraposto pela resistência do solo. Desta forma, o disco passará a ter um momento de força que promoverá seu movimento de rotação no sentido horário. No entanto, para que este pressuposto possa ser atendido é preciso que o solo ofereça a resistência necessária para contrapor a ação do flanco do dente, que passa a atuar, como uma ferramenta estreita.

4.3.3. Momentos em relação ao centro do disco.

A resistência do solo à ação do flanco do dente deve ser suficiente para produzir um momento motor (**M_m**) no disco que seja capaz de vencer os momentos de resistência do disco. Os principais momentos aplicados ao disco que impedem seu giro são dados pelas forças de resistência ao corte da palhada e à penetração do disco no solo. O momento de resistência dado pelo mancal foi considerado desprezível, em relação aos demais, por ele ser de rolamentos com lubrificação. A contribuição do atrito solo-metal, entre o solo e as paredes dos dentes do disco foi negligenciada. Este procedimento em nada compromete o estudo, pois os momentos gerados pelas forças de atrito não são consideráveis e só contribuiriam para o giro do disco.

Foi desenvolvida e implementada no Matlab uma rotina, que se encontra no Apêndice 3, para simular as componentes horizontal e vertical de reação do solo à ação dos dentes do disco de corte, bem como as forças de corte da palhada e de penetração do disco no solo e seus respectivos momentos. A quantificação do momento causado pela força horizontal de reação do solo e a determinação das forças de corte e de resistência do solo à penetração, bem como suas componentes e respectivos braços de aplicação, em relação ao centro do disco, serão apresentados no item 4.3.3.1.

A força horizontal estimada na simulação representa a máxima força de reação que o solo pode aplicar no dente do disco de corte para promover seu giro e cortar a palhada. Sendo assim, procurou-se, neste trabalho, altos valores para a força horizontal, que possam garantir o giro do disco. A partir do conhecimento da magnitude desta força e do ângulo de aplicação, em relação ao centro do disco, determinou-se a magnitude do momento aplicado no disco, no sentido horário, que por convenção, foi aqui definido como positivo, pois provoca giro no disco no sentido de cortar a palha.

A força de corte efetiva e a força de resistência do solo à penetração do disco, no entanto, aplicam momentos sobre o disco, que são opostos ao momento causado pela resistência do solo à ação do flanco do dente. A interação entre estes momentos gerados pode produzir, ou não, o movimento de rotação do disco de corte. A força efetiva de corte é aquela que o disco necessita para cortar a camada de palhicho e pode ser estimada com base nas informações obtidas no Artigo 1. A resistência do solo à penetração do disco é aquela dada pela área momentânea de contato e a força necessária para que o disco penetre no solo e pode ser estimada, com razoável precisão, em função do índice de cone e das áreas momentâneas de penetração dos dentes.

A simulação do movimento dos discos mostrou, a exemplo da Figura 10, que no espaço rotacional utilizado nas simulações, entre 270° e 360°, sempre havia dois dentes trabalhando no solo, mas apenas um efetuava corte da palhada. Desta forma, nas simulações utilizadas para estimar as magnitudes das forças e momentos, foram considerados dois dentes nos cálculos que envolviam as forças horizontal e de penetração dos dentes e apenas um dente no cálculo da força de corte da palhada.

O disco dentado só efetuará o corte se girar e só girará se houver resistência do solo à ação de seu dente. O valor positivo do somatório de momentos obtido na simulação indica que o disco terá condições de girar e efetuar seu trabalho de corte normalmente. Se o valor resultante for negativo indicará que o disco não girará e, conseqüentemente não poderá realizar o trabalho de corte. O somatório de momentos será negativo se as forças de corte e penetração do disco produzirem momentos de resistências ao giro do disco maior que o momento produzido pela reação máxima do solo ao ataque do flanco do dente, nas condições simuladas.

4.3.3.1. Forças que atuam nos dentes do disco e provocam momentos

4.3.3.1.1. Força de corte: A força de corte aplicada na palhada pelo dente do disco tem uma reação, aqui denominada de “**RFC**”, que é normal e atua no ponto de contato “**n'**”, da Figura 11, entre o gume do dente e a superfície do solo, que se comporta, neste caso, como contra-faca. A linha **SS** da referida figura representa a superfície do solo e a linha **FS** representa o fundo do sulco. Para efeito de descrição, o dente esquerdo nos desenhos esquemáticos apresentados nas Figuras 11 a 15, foi denominado de dente anterior por penetrar primeiro no solo. O outro dente, à direita foi denominado de dente posterior.

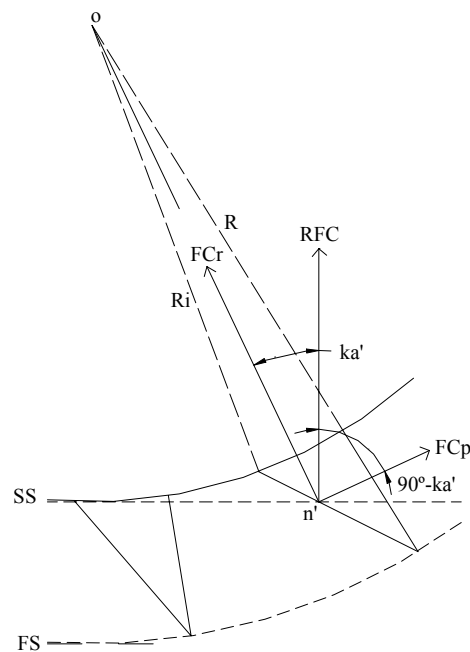


FIGURA 11 – Diagrama da reação à força de corte aplicada na palhada pelo dente do disco e suas componentes

As componentes desta força, em direção ao centro do disco e perpendicular ao segmento $\overline{on'}$ são representadas por “**FC_R**” e “**FC_P**” respectivamente, como ilustra o diagrama da Figura 11.

A força perpendicular ao segmento $\overline{on'}$, “**FC_P**” pode ser calculada pela Equação 17, conhecendo-se o valor de “**RFC**”:

$$FC_p = RFC \times \cos(90^\circ - ka') \quad [17]$$

O valor da “**RFC**” pode ser estimado, em função do comportamento da força de corte, obtido no Artigo 1, para as lâminas de corte com ângulo oblíquo.

O ângulo “**ka**”, da Equação 17, é igual ao ângulo zeta “**ζ**”, como pode ser observado na Figura 12:

$$ka = \zeta \quad [18]$$

O ângulo “**ζ**”, por sua vez, é obtido por relação trigonométrica, em função do segmento $\overline{on'}$ e do raio interno do disco “**Ri**”, neste momento representado pelo segmento \overline{on} da Figura 12:

$$\zeta = a \cos \left[\frac{\overline{on}}{\overline{on'}} \right] \quad [19]$$

O segmento $\overline{on'}$ da Equação 19, corresponde ao braço de aplicação da força “**FC_p**”, em relação ao centro do disco de corte e pode ser obtido, utilizando-se da lei dos co-senos. Como se observa na Figura 12, este segmento pode ser calculado em função do segmento $\overline{bn'}$, do ângulo “**ε**” e do raio externo do disco “**R**”, aqui representado pelo segmento \overline{ob} , por meio da seguinte expressão:

$$\overline{on'} = \sqrt{\overline{bn'}^2 + \overline{ob}^2 - 2 \times \overline{bn'} \times \overline{ob} \times \cos \varepsilon} \quad [20]$$

O segmento $\overline{bn'}$, por sua vez, pode ser calculado, em função da profundidade momentânea de trabalho do dente posterior $\overline{bm'}$ e dos ângulos “**ε**” e “**s'**” neles formados, como mostra a Figura 12, pela equação:

$$\overline{bn'} = \frac{\overline{bm'}}{\cos(\varepsilon + s')} \quad [21]$$

Assim, conhecendo-se o valor da força “ FC_p ” e do seu braço de aplicação $\overline{on'}$, pode-se calcular o momento “ MFC ”, dado pela resistência de corte da palhada, utilizando-se da equação 22:

$$MFC = FC_p \times \overline{on'} \quad [22]$$

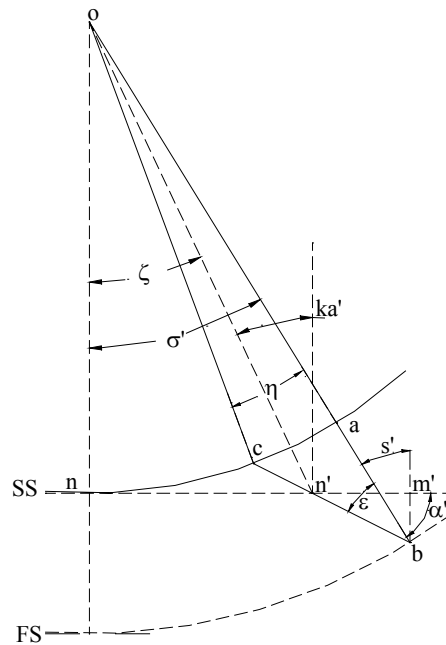


FIGURA 12 – Diagrama mostrando o desenho esquemático do dente posterior, evidenciando o ângulo “ ka' .” e o segmento $\overline{on'}$

4.3.3.1.2. Força de resistência do solo ao deslocamento dos dentes do disco: as forças de resistência do solo contra o deslocamento dos dentes, no sentido horizontal, estão aplicadas naqueles dentes que efetivamente estão atuando no solo. Dentro da gama de geometrias de discos que foram analisadas, sempre houve dois dentes efetivamente em contato com o solo, considerando-se o espaço rotacional utilizado nas simulações.

Pelas equações de **Mckyes e Alli** apresentadas em McKYES (1985), para ferramentas estreitas, obtém-se os valores das componentes de força horizontal da ferramenta, cuja reação do solo são representadas por “**RH**” e “**RH’.**”, para os dentes anterior e posterior, respectivamente, como ilustra a Figura 13. Estas forças fazem ângulos, com as normais das ferramentas (flancos do dente), iguais aos ângulos sigma “**σ**” e sigma linha “**σ’.**”, para os dentes anterior e posterior respectivamente.

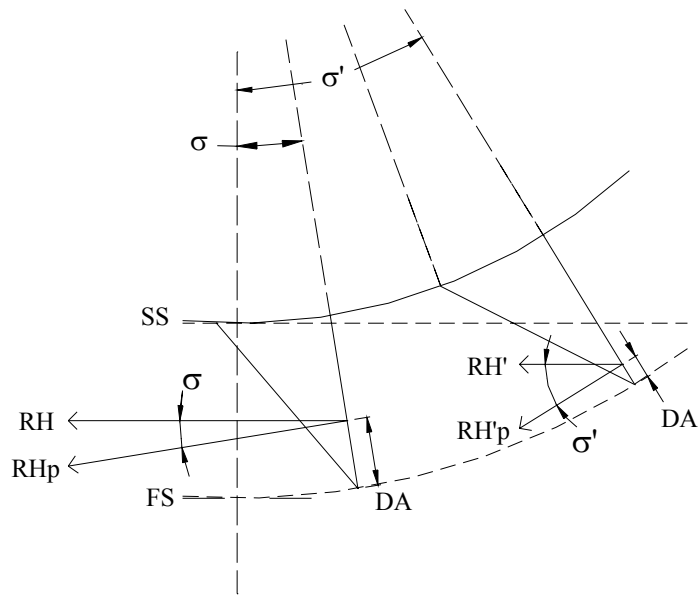


FIGURA 13 – Diagramas das forças de resistências do solo no sentido horizontal, aplicadas nos dentes anterior e posterior e suas respectivas componentes normais.

As resultantes normais ao flanco dos dentes anterior e posterior “**RH_p**” e “**RH'_p**” podem ser obtidas, então, em função de “**σ**” e “**σ’.**” pelas Equações 23 e 24 respectivamente:

$$RH_p = \frac{RH}{\cos \sigma} \quad [23]$$

$$RH'_p = \frac{RH'}{\cos \sigma'} \quad [24]$$

Os pontos de aplicação de “ \mathbf{RH}_p ” e “ \mathbf{RH}'_p ” precisam ser conhecidos para que se possa calcular os braços de aplicação destas forças, em relação ao centro do disco. De acordo com GODWING et al. (1987) estes pontos se localizam a 2/3 da profundidade de operação da ferramenta. As distâncias “ D_A ” e “ D_A' ”, da Figura 13, representam as distâncias entre as pontas dos dentes anterior e posterior e os respectivos pontos de aplicação das forças “ \mathbf{RH}_p ” e “ \mathbf{RH}'_p ”.

Estas distâncias podem ser obtidas, em função dos ângulos auxiliares “ s ” e “ s' ” da Figura 14 e das profundidades momentâneas de operação, utilizando-se das Equações 25 e 26:

$$D_A = \left(\frac{\frac{1}{3} \overline{jl}}{\cos s} \right) \quad [25]$$

$$D_A' = \left(\frac{\frac{1}{3} \overline{bm'}}{\cos s'} \right) \quad [26]$$

Os segmentos \overline{jl} e $\overline{bm'}$ correspondem, respectivamente, às profundidades momentâneas do dente que está atuando no solo (doravante denominado de dente anterior) e seu imediato posterior (doravante denominado de dente posterior). Eles estão representados na Figura 14 e são calculados, em função do raio externo do disco e dos ângulos alfa e sigma, pelas Equações 27 e 28:

$$\overline{jl} = R \times \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) - \cos(\sigma) \right] \quad [27]$$

$$\overline{bm'} = R \times \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha'\right) - \cos(\sigma) \right] \quad [28]$$

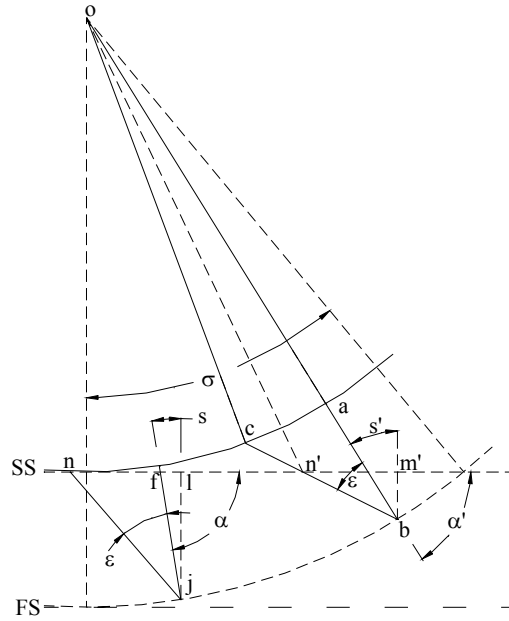


FIGURA 14 – Diagrama mostrando os segmentos utilizados nos cálculos das distâncias de aplicação das forças de reação do solo e da área de penetração dos dentes.

As distâncias entre o centro do disco e os pontos onde as forças “ RH_p ” e “ RH'_p ” são aplicadas, respectivamente, nos dentes anterior e posterior, são definidas por “ D_B ” e “ D_B' .” e podem ser obtidas em função do raio externo do disco, segmento \overline{ob} e das distâncias “ D_A ” e “ D_A' .” pelas Equações 29 e 30. Elas representam o braço de aplicação destas forças:

$$D_B = \overline{ob} - D_A \quad [29]$$

$$D_B' = \overline{ob} - D_A' \quad [30]$$

Os momentos produzidos pelas forças obtidas das Equações 23 e 24 e seus respectivos braços de aplicação serão, então:

$$MRH = RH_p \times D_B \quad [31]$$

$$MRH' = RH'_p \times D_B' \quad [32]$$

4.3.3.1.3. Força de resistência do solo à penetração dos dentes: As resistências “**RP**” e “**RP’**.” oferecidas pelo solo à penetração dos dentes anterior e posterior do disco são normais ao solo e pode-se, para efeito de predição, considerar que as resultantes destas forças são aplicadas na ponta dos dentes, como ilustra a Figura 15. As componentes perpendiculares ao flanco dos dentes anterior e posterior representadas por “**RP_p**” e “**RP’_p**”, respectivamente, produzem em relação ao centro do disco, momentos de resistências ao giro deste.

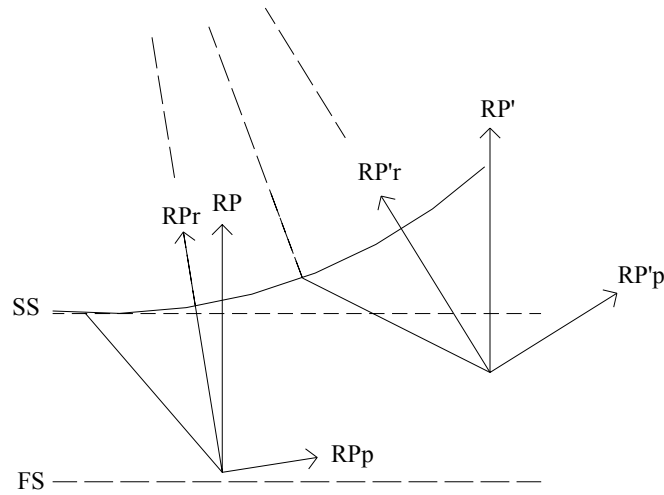


FIGURA 15 – Diagramas das forças de resistência do solo à penetração aplicadas nos dentes anterior e posterior e suas respectivas componentes

A força de resistência à penetração requerida pelos dentes foi obtida considerando-se as áreas momentâneas de penetração dos dentes e a hipótese simplificadora de que esta resistência pode ser assumida, com boa aproximação, como sendo igual a resistência do solo à penetração do cone “**RPc**”, obtida pelo penetrógrafo. As áreas momentâneas de penetração dos dentes anterior e posterior foram consideradas como sendo aquelas dadas pela espessura do disco “**w**” e pelos respectivos segmentos \overline{nl} e $\overline{n'm'}$, da Figura 14. Estes segmentos podem ser calculados pelas Equações 33 e 34, em função dos ângulos “ ε ” “ s ” e “ s' ”, também apresentados na Figura 14.

$$\overline{nl} = \overline{jl} \times \text{tg}(\varepsilon + s) \quad [33]$$

$$\overline{n'm'} = \overline{bn'} \times \sin(\varepsilon + s') \quad [34]$$

As áreas de penetração “**AP**” e “**AP’**.”, correspondente às seções transversais dos dentes anterior e posterior, no nível do solo, podem ser obtidas pelas equações 35 e 36 se considerarmos a espessura do disco “**w**”.

$$AP = w \times \overline{nl} \quad [35]$$

$$AP' = w \times \overline{n'm'} \quad [36]$$

As forças de resistência à penetração dos dentes anterior e posterior “**RP**” e “**RP’**.” podem, então, ser estimadas conhecendo-se o valor da resistência do solo à penetração do cone “**RPc**”, pelas equações 37 e 38, a seguir:

$$RP = RPc \times AP \quad [37]$$

$$RP' = RPc \times AP' \quad [38]$$

As componentes normais ao flanco dos dentes “**RP_p**” “**RP’_p**”, dos diagramas da Figura 15, podem ser obtidas pelas Equações 39 e 40, a seguir:

$$RP_p = RP \times \cos(90^\circ - s) \quad [39]$$

$$RP'_p = RP' \times \cos(90^\circ - s') \quad [40]$$

Convencionando-se que estas componentes de forças de resistência do solo à penetração estão sendo aplicadas nas pontas dos dentes, podem-se obter, por meio das equações 41 e 42, os momentos “**MRP**” e “**MRP’**.” aplicados ao centro do disco, dado pelos dentes anterior e posterior, uma vez que o braço de aplicação destas forças é igual ao raio externo do disco de corte \overline{ob} :

$$MRP = RP_p \times \overline{ob} \quad [41]$$

$$MRP' = RP'_p \times \overline{ob} \quad [42]$$

Após a definição e descrição das forças que atuam no disco e provocam momentos, negligenciando-se a resistência do mancal e a das forças de atrito entre as laterais dos dentes e o solo, pode-se fazer o seguinte somatório de momentos, para a condição de equilíbrio.

$$MRH + MRH' - MFC - MRP - MRP' = 0 \quad [43]$$

Os momentos aplicados no disco de corte pelo solo são os que promovem o giro do disco e são obtidos a partir das forças “RH” e “RH’.”. Por outro lado, os momentos obtidos a partir das forças de corte e de resistência à penetração dos dentes são contrários.

4.3.4. Diferença entre o valor da frente de ruptura e a distância real entre dois dentes consecutivos

A teoria descrita por **McKyes e Alli** permite, também, prever o valor da frente de ruptura do solo, caso ele não suporte as tensões aplicadas pelos flancos dos dentes. Se a frente de ruptura atingir distância superior à distância momentânea entre dois dentes consecutivos, o dente posterior atuará no solo já mobilizado. Desta forma os valores estimados para as componentes de reação do solo no dente posterior seriam enganosos, já que o solo mobilizado não oferece a mesma resistência à ação da ferramenta, que é oferecida pelo solo íntegro.

A distância momentânea da frente de ruptura sendo maior que o da distância real entre dois dentes indica que haverá coalizão da frente de ruptura do dente anterior com a do dente posterior, comprometendo o movimento do disco, uma vez que o dente posterior trabalharia em solo já perturbado. O ideal é que o valor da distância real seja superior ao da frente de ruptura para assegurar que, em havendo realmente a ruptura do solo, ela não atinja o espaço de trabalho do dente que vem em seguida, evitando a descontinuidade do trabalho do disco dentado de corte. Em outras palavras, tanto melhor quanto menor for a frente de ruptura, em relação à distância real entre dois dentes consecutivos.

É preciso conhecer, portanto, além do valor da frente de ruptura esperado, a distância momentânea entre dois dentes consecutivos que estão sendo solicitados pela reação do solo

durante seus trajetos. Neste sentido, é apresentada a seguir, uma metodologia desenvolvida para se determinar o valor da distância momentânea entre dois dentes consecutivos que estão sendo solicitados pela reação do solo durante seus trajetos, a partir do instante que o dente posterior toca o solo até o instante que o valor de alfa, do dente anterior, atinja 90°.

Para que esta distância fosse calculada lançou-se mão da geometria apresentada na Figura 16. Os ângulos auxiliares “k”, “s’.” e “u” foram definidos para auxiliar nos cálculos, por meio dos quais foi possível chegar ao valor da distância real momentânea entre dois dentes.

A distância real momentânea entre dois dentes consecutivos, representada na Figura 16 pelo segmento $\overline{fn'}$ foi obtida por meio do segmento \overline{bj} , como uma distância auxiliar, cujo valor se pode calcular pela Equação 44:

$$\overline{bj} = 2 \times R \times \sin(\eta) \quad [44]$$

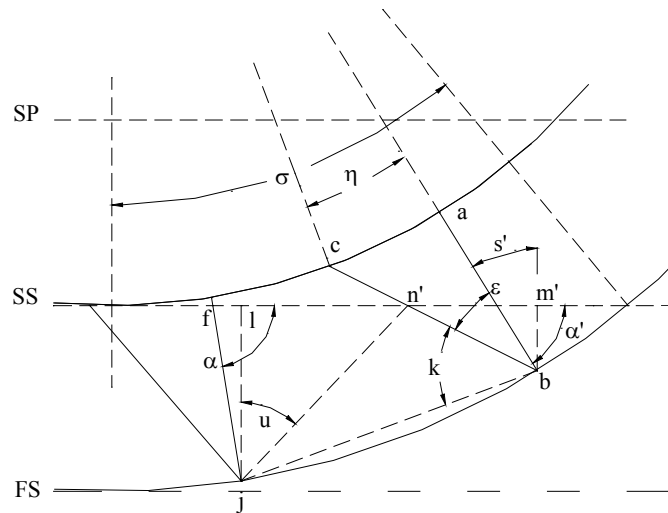


FIGURA 16 – Geometria utilizada para calcular o valor da distância real entre dois dentes consecutivos.

Os valores das profundidades momentâneas dos dentes anterior e posterior correspondem, respectivamente, ao segmentos \overline{lj} e $\overline{bm'}$, já definidos anteriormente (equações 27 e 28).

Os ângulos “ α ” e “ α' ”, Figura 16, representam os ângulos de ataque dos dentes anterior e posterior, respectivamente. Eles assumem valores, preestabelecidos na rotina computacional, entre $\frac{\pi}{2} - \sigma$, que é o momento em que a ponta do dente toca o solo e final da simulação, ou seja, $\frac{\pi}{2}$.

O valor de o ângulo auxiliar “ k ” é obtido em função de “ ϵ ” e “ η ”:

$$k = \frac{\pi}{2} - (\epsilon + \eta) \quad [45]$$

Os ângulos auxiliares “ s ” e “ s' ” são iguais a “ σ ” e “ σ' ”, para os dentes anterior e posterior:

$$s = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad [46]$$

$$s' = \frac{\pi}{2} - \alpha' \quad [47]$$

O segmento $\overline{bn'}$ representa a parte da borda cortante do dente posterior que já penetrou no solo e é uma distancia auxiliar para o calculo da distância real entre dois dentes consecutivos, no instante considerado. Este segmento pode ser obtido pela Equação 48, em função da profundidade momentânea do dente posterior e dos ângulos “ ϵ ” e “ s' ”:

$$\overline{bn'} = \frac{\overline{bm'}}{\cos(\epsilon + s')} \quad [48]$$

A distância auxiliar, representada pelo segmento $\overline{n'j}$, pode ser calculada pela lei dos co-senos, considerando-se o triângulo $\overline{bn'j}$ e o ângulo “ k ”, como se segue:

$$\overline{n'j} = \sqrt{(\overline{bn'}^2 + \overline{bj}^2 - 2 \times \overline{bn'} \times \overline{bj} \times \cos(k))} \quad [49]$$

O ângulo auxiliar “u” pode ser calculado, em função da profundidade momentânea do dente anterior, \overline{lj} e do segmento $\overline{n'j}$, pela Equação 50:

$$u = a \cos\left(\frac{\overline{lj}}{\overline{n'j}}\right) \quad [50]$$

A porção da distância real momentânea entre os dois dentes consecutivos, representada pelo segmento \overline{fl} , é calculada por meio da profundidade momentânea do dente anterior e pelo valor momentâneo do ângulo de ataque “α”.

$$\overline{fl} = \frac{deep}{tg(\alpha)} \quad [51]$$

O valor do segmento $\overline{n'l}$, que completa o valor da distância real momentânea entre os dois dentes pode ser obtida pela expressão:

$$\overline{n'l} = \overline{n'j} \times \sin(u) \quad [52]$$

O valor da distância real momentânea entre dois dentes consecutivos, representada pelo segmento $\overline{fn'}$, pode ser obtido pela soma dos valores encontrados nas Equações 51 e 52:

$$\overline{fn'} = \overline{fl} + \overline{n'l} \quad [53]$$

Os valores obtidos, a partir da simulação, para a distância real entre dois dentes consecutivos e para o valor da frente de ruptura foram, então, confrontados. Esta comparação visou verificar se ocorriam momentos em que pudesse haver coalizão das rupturas causadas no solo pela ação dos dois dentes consecutivos.

4.3.5. Relação entre a altura e a largura do dente

A relação entre a altura e a largura do dente é uma forma de se avaliar a robustez do disco, em termos de resistência mecânica, considerando-se fixa a espessura, quanto maior a relação entre a altura e a largura do dente, maior será o risco do dente sofrer alguma avaria. A profundidade de trabalho projetada “ p ” nos dá o valor da altura do dente e a distância representada pelo segmento \overline{ci} , definido no Apêndice 3, nos dá, com precisão suficiente, a largura do dente, representada pelo arco \overline{ac} , da Figura 16. Neste caso, a relação entre estas duas grandezas pode nos dar uma idéia da resistência mecânica apresentada pelo dente, já que a espessura foi mantida constante nas simulações. Para preservar a integridade do disco de corte estipulou-se que a maior razão, aceitável, entre a altura e a largura do dente seria de 1,5.

4.3.6. Altura da palhada

A altura da camada de palha é um importante fator a ser considerado na análise do disco de corte dentado de rolamento, pois definiu-se à princípio, que a borda cortante do dente, segmento \overline{bc} , da Figura 9 deveria tocar a superfície da palhada de forma paralela, para minimizar o movimento horizontal da palhada,. De acordo com ABRAMO FILHO et al., (1993) e ORLANDO FILHO et al. [1994), a camada de palhicho da cana-de-açúcar pode assumir alturas de até 100 mm e, segundo os levantamentos de campo realizados nesta pesquisa, a altura da camada de palhicho variou de 55 a 75 mm. Na verdade, muitos fatores fazem com que a altura desta camada varie muito, entre eles podem-se citar a variedade da cana-de-açúcar, a idade da planta, a fertilidade do solo, a pluviosidade e o tempo decorrido após a colheita. Desta forma, determinou-se que a altura da camada de palhicho, para efeito de projeto, deveria estar entre 60 mm e 75 mm para que se pudesse atender a prerrogativa estabelecida, uma vez que o corte do palhicho da cana foi o objetivo primeiro deste estudo. Obviamente, a altura de projeto é a máxima altura de palhicho que o disco deverá trabalhar, ou seja, é possível trabalhar com alturas de palhicho inferior à projetada, mas o contrário não seria recomendável.

4.3.7. Simulações

Foi preciso ainda fixar alguns elementos da geometria do disco para que se pudesse efetuar comparações. Desta forma, a espessura do disco, a velocidade de avanço do seu centro e a

relação de velocidades “ λ ” foram fixadas na execução das simulações. O número de dentes, a profundidade de trabalho projetada e o diâmetro externo do disco passaram a ser objeto de estudo na simulação e a altura da palha passou a ser um elemento de dimensionamento calculado, não sendo, portanto, pré-definido.

As simulações foram executadas para cinco discos, com diâmetros de 508 mm, 558,8 mm, 609,6 mm, 660,4 mm e 711,2 mm. Para cada disco variou-se o número de dentes, de 2 em 2, entre 12 e 20 e a profundidade de trabalho projetada, de 10 em 10mm, entre 50 mm e 70 mm, perfazendo um total de 75 simulações. Nestas simulações os seguintes atributos foram mantidos constantes:

- Espessura do dente de 6 mm;
- Relação de velocidades, λ , de 0,98;
- Velocidade de avanço de $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- Quantidade de palhada referente a $10 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$;
- Resistência do solo à penetração igual a 2,0 MPa.

As variáveis Momento motor (**Mm**), Momento resistente (**Mr**), frente de ruptura (**r**) e distância real entre dois dentes consecutivos (**distReal**) foram obtidas nas simulações, em função do ângulo de ataque do dente “ α ”, durante o espaço simulado, onde “ α ” assume o valor mínimo quando a ponta do dente em questão toca a superfície do solo ($\alpha = \frac{\pi}{2} - \sigma$) e o valor máximo igual a $\frac{\pi}{2}$. As Figuras 17 a 19 mostram os gráficos de resposta das simulações executadas com os discos de 508 mm, 609,6 mm e 711,2 mm, considerando-se a configuração com 16 dentes e 70 mm de profundidade de trabalho e os atributos do solo definidos em materiais e métodos.

O valor de **Mm** é sempre crescente como pode ser observado nas Figuras 17 a 19, devido ao fato de que a profundidade de operação dos dois dentes envolvidos no processo aumenta progressivamente. O ângulo de ataque do dente α , também aumenta progressivamente, aumentando a componente horizontal de reação do solo. Desta forma, o valor de **Mm** aumenta rapidamente com o movimento do disco, dentro do espaço simulado, ou seja, α assumindo valores entre $\frac{\pi}{2} - \sigma$ e $\frac{\pi}{2}$, como pode ser observado nas figuras mencionadas.

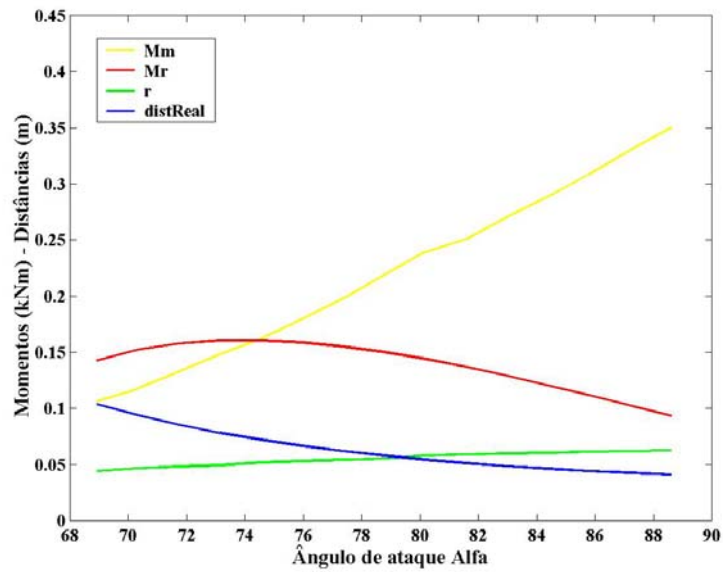


FIGURA 17 – Resposta da simulação do disco de 508 mm, com 16 dentes, trabalhando na profundidade de 70 mm, na presença de palhço referente a $10 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e resistência do solo igual a 2 Mpa.

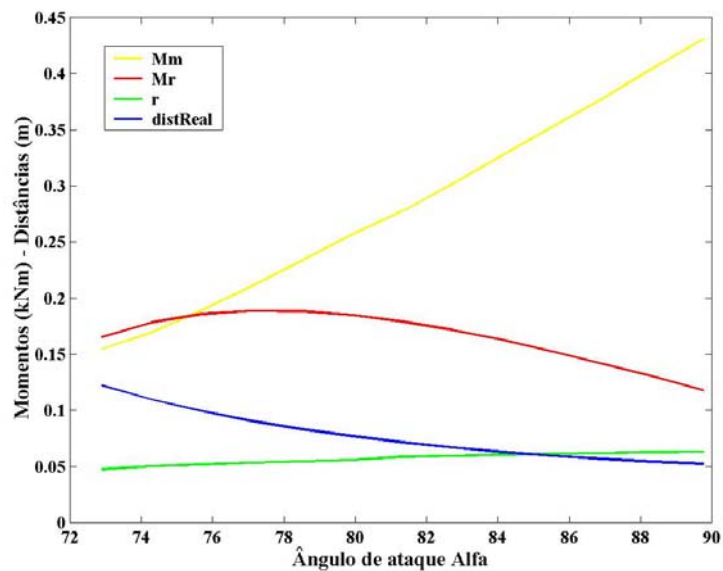


FIGURA 18 – Resposta da simulação do disco de 609,6 mm, com 16 dentes, trabalhando na profundidade de 70 mm, na presença de palhço referente a $10 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e resistência do solo igual a 2 Mpa.

O valor de **Mr**, sempre apresenta nas simulações uma tendência de segunda ordem, aumentando no princípio do corte e, depois de um certo valor de α , tende a diminuir, como pode ser observado nas figuras em questão. Este comportamento se deve à contribuição das áreas de penetração apresentadas pelos dentes do disco, que são obtidas por meio das Equações 35 e 36. A área de penetração calculada para o dente posterior cresce rapidamente no início da penetração deste dente e depois volta a reduzir.

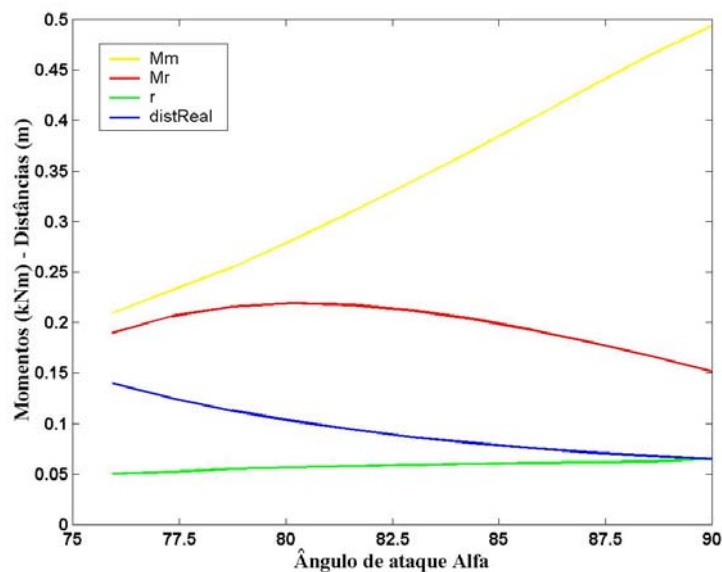


FIGURA 19 – Resposta da simulação do disco de 711,2 mm, com 16 dentes, trabalhando na profundidade de 70 mm, na presença de palhço referente a 10 Mg*ha⁻¹ e resistência do solo igual a 2 Mpa.

A análise simultânea dos momentos motores e de resistências aplicados ao disco dentado mostra que ele tem um período crítico de funcionamento que ocorre no início do processo de corte, ou seja, quando o dente posterior começa a penetrar no solo e efetuar o corte do palhço. Este período crítico ocorre porque este dente, no princípio, contribui muito pouco para o momento motor e exigem grande força de corte, causando um momento resistente elevado, em relação ao restante do movimento do dente. No início da penetração no solo, o dente posterior apresenta, também, uma grande área de secção transversal como pode ser observado na Figura 10, nas duas últimas posições. Por isso, o dente requer, neste período, maior força de penetração

em relação à fase final, terminando por produzir, ao se somar à resistência dada pelo corte, valores maiores de momento resistente no princípio do processo de corte.

As simulações mostraram que para algumas combinações de disco *versus* número de dentes *versus* condições de operação o somatório de momentos se mostrou negativo durante o período crítico, como pode ser observado nas Figuras 17 e 18, onde os valores de **Mr** são a princípio maiores que os valores de **Mm**. Neste caso o solo não poderia resistir à ação dos dentes e se romperia, prejudicando o processo de corte. Em outros casos, como no da Figura 19, não há intersecção entre as curvas de **Mm** e **Mr**, demonstrando que o disco não teria nenhum problema de funcionamento, no que se refere ao somatório de momentos.

A frente de ruptura “**r**”, medida na superfície do solo à partir da ferramenta, é que define a extensão de solo a ser perturbado. Ela foi calculada para o dente anterior, por meio da teoria de McKyes e Alli (1985). Esta frente aumenta com a largura, com o ângulo de ataque e com a profundidade de operação da ferramenta, se forem consideradas as mesmas condições de solo. Nas Figuras 17 a 19 estão representadas as curvas de “**r**”, cujos valores assumidos são sempre crescentes, em função de α . A profundidade de trabalho do dente aumenta com este ângulo, de forma que os valores de “**r**” apresentados são, também, influenciados por este ângulo.

A última curva, apresentada nas Figuras 17 a 19, é a que representa a distância real momentânea entre o dente anterior e o posterior, medida na superfície do solo. Nas referidas figuras é possível observar que a **distReal** é sempre decrescente. Ela assume seu valor máximo no instante que a ponta do dente toca o solo e mínimo quando este completa sua penetração no solo, como pode ser observado na Figura 10. Esta distância varia com o diâmetro do disco, com o número de dentes e com a profundidade de trabalho projetada. As Figuras 17 e 18 mostram que a curva da **distReal** intercepta em algum ponto a curva de “**r**” mostrando que a partir deste ponto os valores de “**r**” são maiores que os da **distReal**. Se por um lado o valor de “**r**” é a extensão de solo que será perturbado, a distância real momentânea mostra, por outro lado, quanto os dentes estão separados naquele instante. Desta forma, é possível afirmar que nestes casos haverá coalizão entre as perturbações causadas por dois dentes consecutivos, a partir do ponto de interseção das curvas. Na Figura 19 observa-se que estas curvas não se interceptam durante o espaço da simulação, demonstrando que nestes casos não haveria problemas relacionados à coalizão entre as perturbações causadas por dois dentes consecutivos.

O rompimento do solo só ocorre quando a carga aplicada pela ferramenta de corte, que neste caso é o flanco do dente, é superior à resistência do solo ao cisalhamento. Assim, para que se possa verificar se realmente haverá coalizão das perturbações causadas por dois dentes consecutivos, é preciso fazer uma análise das curvas de “**r**” e **distReal** em conjunto com as curvas de **Mm** e **Mr**. Ao se observar as curvas dos momentos, em conjunto com as curvas de “**r**” e **distReal**, percebe-se que quando há interseção entre estas duas últimas curvas, ela ocorre em um local onde o **Mm** é muito maior que **Mr**. Isto demonstra que naquele ponto e, a partir dele, o solo estará sendo solicitado por tensões muito inferiores à que ele pode suportar. Nestes casos não haverá coalizão das perturbações causadas por dois dentes consecutivos. Ela só ocorrerá, produzindo falha no solo quando a interseção das curvas de “**r**” e **distReal** ocorrerem para um valor de α que apresente um balanço de momentos negativo, ou seja valores de **Mr** maiores que de **Mm**.

O comportamento de **Mm** e **Mr** das Figuras 17 e 18 demonstram que haverá ruptura do solo durante o denominado período crítico, mas as diferenças entre as curvas de “**r**” e **distReal** são, neste período, consideravelmente superiores aos valores assumidos por “**r**”. Nestes casos o comportamento do disco é imprevisível, pois não há como prever as interações que ocorreriam entre os dentes do disco de corte e o solo. Somente a experimentação poderia mostrar o comportamento dos discos que apresentam este tipo de resposta nas simulações.

A análise de todos os resultados gráficos obtidos nas 75 simulações, nos moldes das que foram feitas para os exemplos apresentados nas Figuras 17 a 19, seria muito extensiva. Em função disso, os resultados destas simulações foram tabulados e estão apresentados nas Tabelas 3 a 7. Para que se pudesse interpretar os resultados obtidos, na ausência de gráficos, foi necessária a inclusão das seguintes variáveis nas tabelas:

- Ângulo alfa onde ocorreu a interseção das curvas de “**r**” e **distReal**, representado pela abreviação “**AlfaInters**”;
- A mínima soma de momentos ocorrida na simulação;
- A interseção de momentos, que representa o valor do ângulo alfa onde ocorreu a interseção entre as curvas de momentos;
- O ângulo alfa para o início da simulação;
- O valor do máximo momento resistente obtido na simulação;
- O valor do máximo momento motor obtido na simulação;

- Distância efetiva de corte, que representa a extensão de palhada que cada dente deverá cortar;
- Ângulo oblíquo inicial, que representa o ângulo oblíquo do dente quando este toca o solo.

Os discos de 660,4 mm (26”) e 711,2 mm (28”) não foram passível de simulação na profundidade de trabalho projetada de 50 mm e 12 dentes. Isto ocorreu pelo fato de que nestas condições o dente anterior se encontra próximo de 90° quando o posterior toca o solo. Assim, na simulação só foi possível obter um ponto. Isto demonstra que não é possível obter discos com menos de 14 dentes para diâmetros de 609,6 mm e 711,2 mm, de forma a atender as condições de projeto impostas.

A primeira análise a ser feita é a referente à altura da palhada projetada, para que se possa garantir, como já discutido no item 3.3.2, os dois primeiros pressupostos enunciados em materiais e métodos. As alturas das palhadas obtidas nas simulações foram comparadas com os valores esperados, entre 60 a 75 mm, estipulados no item 3.3.6. Os resultados mostram que esta altura é diretamente proporcional ao número de dentes e à profundidade de trabalho e inversamente proporcional ao diâmetro do disco. Mostra, ainda, que é mais influenciada pela profundidade de trabalho do que pelo diâmetro dos discos ou número de dentes, como se observa nas Tabelas 3 a 7. Para a profundidade de trabalho de 50 mm, só é possível obter alturas de palhadas projetadas dentro da faixa estipulada para discos com 18 e 20 dentes, entre todos os diâmetros de disco estudados. Quando se aumenta a profundidade de trabalho para 60 mm, torna possível obter alturas desejáveis com 16 dentes ou mais. Para a profundidade de 70 mm, o número de dentes passa a ser igual ou superior a 14. Em nenhum dos casos simulados foi possível obter a altura de palhada estipulada com discos de 12 dentes.

A relação entre a altura e a largura do dente foi também objeto de análise, sendo que valores inferiores a 1,5 eram esperados. Os resultados obtidos mostraram que esta relação é diretamente proporcional ao número de dentes e à profundidade de trabalho, mas é inversamente proporcional ao diâmetro do disco. Em virtude destas tendências, no disco de 508 mm (20”) de diâmetro só foi possível obter valores aceitáveis para esta relação, nas três profundidades de trabalho simuladas, quando ele foi projetado com 12 dentes. O disco com este diâmetro e 20 dentes não apresentou relação aceitável entre altura e largura nem mesmo na profundidade de

trabalho de 50 mm. Por outro lado, o disco de 711,2 mm (28”) apresentou valores aceitáveis para esta relação praticamente para todos os números de dentes e profundidades de trabalhos estudados. As exceções se fazem ao disco com 12 dentes na profundidade de 50 mm e ao com 20 dentes na profundidade de 70 mm.

A análise conjunta das curvas da **distReal** e de “**r**” foi feita por meio da mínima diferença entre elas, considerando-se o valor de α caso a interseção tenha ocorrido. Esta diferença diminuiu com o aumento do número de dentes e com a profundidade de trabalho projetada, mas aumentou com o diâmetro do disco. Desta forma no disco de 508 mm (20”) na profundidade de trabalho de 70 mm ocorreram interseções entre as duas curvas para todos os números de dentes analisados, sendo que os valores de α onde esta interseção ocorreu foram inversamente proporcionais ao número de dentes. Na verdade, em todas as simulações executadas, os valores de α , onde as interseções ocorreram sempre foram menores para números de dentes maiores. Nos discos de 660,4 mm (26”) e de 711,2 mm (28”), na profundidade de trabalho projetada de 50 mm, onde as simulações foram possíveis, nota-se que não houve interseção entre estas curvas.

A análise conjunta das curvas de momentos foi feita por meio do valor mínimo da soma de momentos e pelo valor da interseção de momentos, que representa o valor de α onde esta interseção ocorreu. Os resultados apresentados nas Tabelas 3 a 7 demonstram que para o disco de 508 mm (20”) só houve valores positivos na soma de momentos para o disco com 12 dentes. Nas configurações com 18 e 20 dentes não houve momentos positivos para qualquer dente ou profundidade analisada. Em todos os casos, foi possível observar que os valores das mínimas somas de momentos ocorreram para ângulos α tão mais próximos dos valores do ângulo α de início da simulação, quanto menor era o número de dentes. Outra constatação é a de que, para um mesmo diâmetro de disco, o valor da soma de momentos é inversamente proporcional ao número de dentes.

TABELA 3 – Resultado das simulações executadas com disco de 508 mm (20”) de diâmetro, espessura de 6 mm, velocidade de avanço de $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, em função do número de dentes e da profundidade de operação.

Atributos	Número de dentes				
	12	14	16	18	20
Profundidade de trabalho de 50 mm					
Altura projetada para a palha (mm)	31,3	42,5	53,2	63,3	72,1
Relação altura/largura	0,95	1,10	1,26	1,42	1,57
(distReal-r) Mínimo (mm)	33,8	13,3	-0,3	-7,2	-11,9
Alfa Interseção (graus)	*	*	90,0	85,9	82,7
Mínima Soma Momento (Nm)	14,6	-4,0	-16,9	-27,4	-34,1
Interseção de Momentos (graus)	*	82,4	80,2	79,6	78,2
Alfa inicial (graus)	83,4	79,1	75,9	73,4	71,4
Máximo Momento Resistente (Nm)	121,4	116,4	111,7	107,5	103,2
Máximo Momento Motor (Nm)	155,5	166,6	188,8	198,1	203,9
Distância Efetiva de corte (mm)	104,5	96,8	91,1	87,1	83,4
Ângulo oblíquo inicial (graus)	10,6	14,0	17,0	19,7	22,1
Profundidade de trabalho de 60 mm					
Altura projetada para a palha (mm)	41,1	53,3	64,5	74,3	82,9
Relação altura/largura	1,19	1,39	1,59	1,79	1,98
(distReal-r) Mínimo (mm)	13,3	-4,6	-11,4	-17,6	-21,7
Alfa Interseção (graus)	*	88,4	83,5	81,0	77,9
Mínima Soma Momento (Nm)	17,8	-7,2	-25,4	-38,3	-46,9
Interseção de Momentos (graus)	*	78,7	77,9	76,0	74,5
Alfa inicial (graus)	79,8	75,5	72,2	69,7	67,8
Máximo Momento Resistente (Nm)	145,8	140,6	135,5	130,9	126,3
Máximo Momento Motor (Nm)	227,7	254,4	264,3	285,9	288,8
Distância Efetiva de corte (mm)	115,8	108,1	102,7	98,4	94,7
Ângulo oblíquo inicial (graus)	12,8	16,1	19,0	21,6	23,8
Profundidade de trabalho de 70 mm					
Altura projetada para a palha (mm)	49,5	61,8	72,6	81,9	90,0
Relação altura/largura	1,47	1,71	1,95	2,19	2,43
(distReal-r) Mínimo (mm)	-3,3	-15,6	-21,4	-29,0	-33,0
Alfa Interseção (graus)	87,7	83,4	78,8	76,4	73,4
Mínima Soma Momento (Nm)	17,2	-14,5	-36,3	-50,7	-61,9
Interseção de Momentos (graus)	*	75,3	74,5	72,7	72,3
Alfa inicial (graus)	76,4	72,1	68,9	66,4	64,4
Máximo Momento Resistente (Nm)	172,1	166,2	160,7	156,3	152,4
Máximo Momento Motor (Nm)	318,2	346,1	350,2	369,9	389,3
Distância Efetiva de corte (mm)	127,2	119,5	113,8	109,3	105,7
Ângulo oblíquo inicial (graus)	14,4	17,7	20,4	22,7	24,7

Obs.: * Valores não existentes dentro do universo simulado.

TABELA 4 – Resultado das simulações executadas com disco de 558,8 mm (22”) de diâmetro, espessura de 6 mm, velocidade de avanço de $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ em função do número de dentes e da profundidade de operação.

Atributos	Número de dentes				
	12	14	16	18	20
Profundidade de trabalho de 50 mm					
Altura projetada para a palha (mm)	29,2	40,7	51,9	62,5	72,4
Relação altura/largura	0,8	1,0	1,1	1,3	1,4
(distReal-r) Mínimo (mm)	51,6	22,8	9,1	0,6	-5,4
Alfa Interseção (graus)	*	*	*	*	85,6
Mínima Soma Momento (Nm)	25,0	5,7	-10,3	-21,4	-30,9
Interseção de Momentos (graus)	*	*	80,5	80,2	78,8
Alfa inicial (graus)	85,2	80,9	77,7	75,2	73,2
Máximo Momento Resistente (Nm)	133,7	128,0	122,9	117,7	113,1
Máximo Momento Motor (Nm)	166,7	180,8	194,7	207,0	217,3
Distância Efetiva de corte (mm)	109,5	100,9	94,6	89,9	86,1
Ângulo oblíquo inicial (graus)	9,4	12,7	15,7	18,5	21,0
Profundidade de trabalho de 60 mm					
Altura projetada para a palha (mm)	39,5	52,4	64,4	75,4	85,2
Relação altura/largura	1,1	1,2	1,4	1,6	1,7
(distReal-r) Mínimo (mm)	25,6	6,8	-4,9	-11,8	-18,8
Alfa Interseção (graus)	*	*	86,9	84,2	81,0
Mínima Soma Momento (Nm)	33,6	5,3	-15,9	-31,3	-41,9
Interseção de Momentos (graus)	*	*	78,5	76,7	75,4
Alfa inicial (graus)	81,7	77,5	74,2	71,7	69,7
Máximo Momento Resistente (Nm)	160,2	154,0	147,7	142,1	137,2
Máximo Momento Motor (Nm)	246,1	260,0	293,6	302,8	325,2
Distância Efetiva de corte (mm)	120,5	112,1	105,9	101,2	97,4
Ângulo oblíquo inicial (graus)	11,7	15,0	18,1	20,7	23,0
Profundidade de trabalho de 70 mm					
Altura projetada para a palha (mm)	48,4	62,3	74,4	85,1	94,5
Relação altura/largura	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1
(distReal-r) Mínimo (mm)	7,3	-7,6	-17,2	-23,4	-28,5
Alfa Interseção (graus)	*	87,1	82,3	79,8	76,7
Mínima Soma Momento (Nm)	38,7	1,6	-24,2	-43,1	-56,2
Interseção de Momentos (graus)	*	*	75,3	73,5	72,2
Alfa inicial (graus)	78,7	74,3	71,0	68,5	66,5
Máximo Momento Resistente (Nm)	186,7	181,1	174,3	168,8	163,9
Máximo Momento Motor (Nm)	346,7	356,0	391,2	420,8	423,5
Distância Efetiva de corte (mm)	131,5	123,5	117,3	112,4	108,6
Ângulo oblíquo inicial (graus)	13,4	16,8	19,6	22,1	24,2

Obs.: * Valores não existente dentro do universo simulado.

TABELA 5 – Resultado das simulações executadas com disco de 609,6 mm (24”) de diâmetro, espessura de 6 mm, velocidade de avanço de $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, em função do número de dentes e da profundidade de operação.

Atributos	Número de dentes				
	12	14	16	18	20
Profundidade de trabalho de 50 mm					
Altura projetada para a palha (mm)	27,1	38,7	50,2	61,7	71,9
Relação altura/largura	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3
(distReal-r) Mínimo (mm)	76,9	33,9	16,5	6,2	-0,5
Alfa Interseção (graus)	*	*	*	*	88,2
Mínima Soma Momento (Nm)	36,9	16,1	-2,3	-16,4	-26,3
Interseção de Momentos (graus)	*	*	79,2	80,4	79,2
Alfa inicial (graus)	86,7	82,4	79,2	76,6	74,7
Máximo Momento Resistente (Nm)	139,2	139,6	134,4	129,2	123,4
Máximo Momento Motor (Nm)	176,0	192,5	209,7	226,9	239,6
Distância Efetiva de corte (mm)	114,7	105,1	98,1	93,1	88,9
Ângulo oblíquo inicial (graus)	8,4	11,6	14,5	17,3	19,8
Profundidade de trabalho de 60 mm					
Altura projetada para a palha (mm)	37,6	51,0	63,8	75,4	86,5
Relação altura/largura	0,9	1,1	1,3	1,4	1,6
(distReal-r) Mínimo (mm)	40,6	15,9	-0,4	-8,1	-12,3
Alfa Interseção (graus)	*	*	90,0	86,0	82,7
Mínima Soma Momento (Nm)	52,0	20,7	-4,3	-22,3	-35,2
Interseção de Momentos (graus)	*	*	77,3	77,2	75,9
Alfa inicial (graus)	83,4	79,1	75,9	73,5	71,4
Máximo Momento Resistente (Nm)	174,8	167,7	160,9	153,6	148,6
Máximo Momento Motor (Nm)	260,9	279,4	317,2	329,7	345,6
Distância Efetiva de corte (mm)	125,4	116,1	109,3	104,0	100,1
Ângulo oblíquo inicial (graus)	10,6	14,0	17,0	19,7	22,1
Profundidade de trabalho de 70 mm					
Altura projetada para a palha (mm)	47,5	62,0	75,0	86,8	97,6
Relação altura/largura	1,2	1,3	1,5	1,7	1,9
(distReal-r) Mínimo (mm)	18,0	0,4	-10,7	-18,1	-23,6
Alfa Interseção (graus)	*	*	85,6	81,7	79,6
Mínima Soma Momento (Nm)	62,3	18,8	-11,0	-33,0	-48,7
Interseção de Momentos (graus)	*	*	75,8	74,2	72,9
Alfa inicial (graus)	80,4	76,1	72,9	70,4	68,4
Máximo Momento Resistente (Nm)	204,0	196,5	188,1	181,4	176,1
Máximo Momento Motor (Nm)	372,8	387,9	429,7	438,9	474,4
Distância Efetiva de corte (mm)	136,6	127,4	120,5	115,3	111,4
Ângulo oblíquo inicial (graus)	12,5	15,8	18,8	21,4	23,6

Obs.: * Valores não existentes dentro do universo simulado.

TABELA 6 – Resultado das simulações executadas com disco de 660,4 mm (26”) de diâmetro, espessura de 6 mm, velocidade de avanço de $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, em função do número de dentes e da profundidade de operação.

Atributos	Número de dentes				
	12	14	16	18	20
Profundidade de trabalho de 50 mm					
Altura projetada para a palha (mm)	n/s	36,5	48,2	58,9	70,8
Relação altura/largura	n/s	0,8	0,9	1,0	1,1
(distReal-r) Mínimo (mm)	n/s	47,5	24,6	11,3	2,8
Alfa Interseção (graus)	n/s	*	*	*	*
Mínima Soma Momento (Nm)	n/s	26,8	6,4	-8,8	-21,1
Interseção de Momentos (graus)	n/s	*	*	80,7	79,4
Alfa inicial (graus)	n/s	83,8	80,6	78,2	76,1
Máximo Momento Resistente (Nm)	n/s	151,8	146,0	138,6	133,9
Máximo Momento Motor (Nm)	n/s	201,6	222,4	237,2	256,5
Distância Efetiva de corte (mm)	n/s	109,4	101,7	95,5	91,6
Ângulo oblíquo inicial (graus)	n/s	10,5	13,4	16,1	18,7
Profundidade de trabalho de 60 mm					
Altura projetada para a palha (mm)	35,5	49,3	62,6	75,2	86,6
Relação altura/largura	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4
(distReal-r) Mínimo (mm)	60,3	26,2	9,9	-2,9	-9,2
Alfa Interseção (graus)	*	*	*	88,7	85,3
Mínima Soma Momento (Nm)	70,9	34,6	6,4	-14,7	-29,1
Interseção de Momentos (graus)	*	*	*	77,4	76,3
Alfa inicial (graus)	84,9	80,6	77,4	74,9	73,0
Máximo Momento Resistente (Nm)	189,5	181,5	174,3	166,9	159,9
Máximo Momento Motor (Nm)	272,7	295,6	317,7	358,8	372,6
Distância Efetiva de corte (mm)	130,4	120,2	112,8	107,2	102,6
Ângulo oblíquo inicial (graus)	9,6	12,9	15,9	18,7	21,2
Profundidade de trabalho de 70 mm					
Altura projetada para a palha (mm)	44,8	61,0	75,1	88,3	99,7
Relação altura/largura	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7
(distReal-r) Mínimo (mm)	32,0	9,0	-4,7	-13,2	-19,1
Alfa Interseção (graus)	*	*	88,6	84,4	81,2
Mínima Soma Momento (Nm)	85,7	37,0	2,3	-21,3	-40,9
Interseção de Momentos (graus)	*	*	*	74,4	74,5
Alfa inicial (graus)	82,3	77,7	74,5	71,9	70,0
Máximo Momento Resistente (Nm)	217,8	212,2	203,6	196,3	188,9
Máximo Momento Motor (Nm)	386,4	413,2	467,0	483,0	493,7
Distância Efetiva de corte (mm)	140,3	131,4	124,1	118,8	114,1
Ângulo oblíquo inicial (graus)	11,5	14,9	17,9	20,6	23,0

Obs.: * Valores não existentes dentro do universo simulado.

n/s Não passível de simulação.

TABELA 7 – Resultado das simulações executadas com disco de 711,2 mm (28”) de diâmetro, espessura de 6 mm, velocidade de avanço de $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, em função do número de dentes e da profundidade de operação.

Atributos	Número de dentes				
	12	14	16	18	20
Profundidade de trabalho de 50 mm					
Altura projetada para a palha (mm)	n/s	34,4	46,1	57,9	69,3
Relação altura/largura	n/s	0,7	0,8	0,9	1,0
(distReal-r) Mínimo (mm)	n/s	52,1	33,9	18,8	7,9
Alfa Interseção (graus)	n/s	*	*	*	*
Mínima Soma Momento (Nm)	n/s	37,6	15,4	-1,6	-15,3
Interseção de Momentos (graus)	n/s	*	*	80,5	80,6
Alfa inicial (graus)	n/s	85,0	81,7	79,2	77,2
Máximo Momento Resistente (Nm)	n/s	164,0	157,7	151,4	144,9
Máximo Momento Motor (Nm)	n/s	226,2	232,3	255,5	273,8
Distância Efetiva de corte (mm)	n/s	113,8	105,4	99,2	94,4
Ângulo oblíquo inicial (graus)	n/s	9,5	12,4	15,1	17,6
Profundidade de trabalho de 60 mm					
Altura projetada para a palha (mm)	33,4	47,0	60,7	74,1	86,6
Relação altura/largura	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3
(distReal-r) Mínimo (mm)	66,2	38,4	17,9	2,7	-4,7
Alfa Interseção (graus)	*	*	*	*	87,7
Mínima Soma Momento (Nm)	89,9	50,6	19,9	-4,5	-21,6
Interseção de Momentos (graus)	*	*	*	77,5	77,6
Alfa inicial (graus)	86,2	82,0	78,8	76,2	74,2
Máximo Momento Resistente (Nm)	204,2	194,7	187,4	180,0	172,7
Máximo Momento Motor (Nm)	307,0	306,5	334,0	383,3	403,0
Distância Efetiva de corte (mm)	135,5	124,2	116,1	110,3	105,5
Ângulo oblíquo inicial (graus)	8,7	11,9	14,9	17,7	20,2
Profundidade de trabalho de 70 mm					
Altura projetada para a palha (mm)	43,8	59,5	74,4	88,3	100,9
Relação altura/largura	0,9	1,1	1,3	1,4	1,6
(distReal-r) Mínimo (mm)	47,4	18,6	-0,4	-7,5	-14,4
Alfa Interseção (graus)	*	*	90,0	87,2	82,7
Mínima Soma Momento (Nm)	113,1	59,0	19,3	-10,1	-30,7
Interseção de Momentos (graus)	*	*	*	74,7	74,8
Alfa inicial (graus)	83,4	79,1	75,9	73,4	71,4
Máximo Momento Resistente (Nm)	238,0	228,2	218,9	209,8	202,3
Máximo Momento Motor (Nm)	406,0	434,3	493,8	519,2	536,4
Distância Efetiva de corte (mm)	146,3	135,5	127,6	121,6	116,8
Ângulo oblíquo inicial (graus)	10,6	14,0	17,0	19,7	22,1

Obs.: * Valores não existentes dentro do universo simulado.

n/s Não passível de simulação.

Os valores do máximo momento motor **M_m** foram crescentes com o número de dentes, diâmetro do disco e profundidade de operação projetada, sendo esta última variável a que mais influenciou, como mostram os resultados apresentados. Os valores do máximo momento resistente **M_r** foram crescentes com a profundidade de operação projetada e com o diâmetro dos discos, mas decresceu com o número de dentes utilizados nas configurações. É importante salientar que o valor do máximo momento resistente é de grande importância para a análise das configurações de discos, pois efetivamente ele deveria acontecer durante o funcionamento do disco de corte. Já o valor do máximo momento motor indica a potencialidade da interação solo-disco.

O ângulo oblíquo **A_o** é de grande importância para o processo de corte, como já discutido no Artigo 1. Desta forma, o conhecimento do valor deste ângulo, no início do processo de corte, auxilia na escolha da configuração mais adequada para o disco. Os resultados obtidos para este atributo estão apresentados nas Tabelas 3 a 7, onde se pode verificar que o valor assumido por este ângulo cresce com o número de dentes e profundidade de trabalho projetada, mas decresce com o diâmetro do disco. O número de dentes do disco é a variável que mais influenciou no valor do ângulo oblíquo.

Após a análise individualizada dos dados obtidos procurou-se selecionar, por meio de uma análise conjunta, os discos que apresentavam valores para aqueles atributos que indicam um bom desempenho do disco de corte dentado. A análise conjunta mostrou que o disco de 711,2 mm (28”) de diâmetro atendeu a todos os atributos nas seguintes configurações: 16 dentes e profundidade de operação projetada de 60 mm; 16 dentes e profundidade de operação projetada de 70 mm e na com 14 dentes e profundidade de operação projetada de 70 mm. O disco de 660,4 mm (26”) de diâmetro atendeu a todos os atributos na configuração com 16 dentes e profundidade de operação projetada de 60 mm e na com 14 dentes e profundidade de operação projetada de 70 mm. O disco de 609,6 mm (24”) de diâmetro atendeu a todos os atributos somente na configuração com 14 dentes e profundidade de operação projetada de 70 mm.

Uma outra análise conjunta, considerando-se valores marginais para a mínima soma de momentos e para a diferença “**distReal-r**” foi realizada. Nesta análise foi considerada condição marginal para a mínima soma de momentos, quando a diferença entre o valor do ângulo de sua ocorrência (Interseção de momentos) e o ângulo do início da simulação (Alfa inicial) foi menor ou igual a 3°. Esta determinação baseou-se no fato de que quanto mais próximo do início do processo de corte for a interseção entre as curvas de momento, menor será a faixa de período

crítico de corte, como visto nas Figuras 17 a 19. O valor considerado marginal para a diferença “**distReal-r**” foi, também de 3° para a variável Alfa interseção, que mostra o valor de α onde as curvas de **distReal** e “**r**” se interceptaram. Neste caso o valor deve ser o mais próximo possível de 90°.

Na análise conjunta, considerando-se os valores marginais, para o disco de 711,2 mm (28”) de diâmetro pôde-se selecionar as configurações com 18 dentes e todas a três profundidades de operação projetadas. Para o disco de 660,4 mm (26”) foram selecionadas as configurações com 18 dentes e profundidades de trabalho projetadas de 50 mm e 60 mm. Para o disco de 609,6 mm (24”) foram selecionadas as configurações com 16 dentes e profundidades de trabalho projetadas de 60 mm e 70 mm. Para o disco de 558,8 mm (22”) foram selecionadas as configurações com 14 dentes e profundidades de trabalho projetadas de 70 mm. As demais configurações não apresentaram valores indicadores de desempenho do disco de corte dentado que fossem bons ou mesmo marginais.

Após as análises foram escolhidos três discos para serem confeccionados e ensaiados na caixa de solos. A escolha dos discos foi feita considerando-se que se pretendia ensaiar discos com mesmo número de dentes, mesma profundidade de trabalho projetada e que representassem a faixa de diâmetros utilizadas nas simulações. Além disso, considerou-se que um disco deveria ter apresentado na simulação valores, para os atributos de desempenho do disco, que estivessem dentro dos limites preestabelecidos. O outro deveria apresentar valores de atributos que fossem marginais e o último apresentar valores para os atributos de desempenho que fossem fora dos limites preestabelecidos. As configurações que se encaixaram nestes critérios de escolha foram os discos de 508 mm (20”), 609,6 mm (24”), e o de 711,2 mm (28”), com 16 dentes. Estas configurações poderiam trabalhar tanto na profundidade de trabalho projetada de 60 mm como na de 70 mm. A profundidade de trabalho de 70 mm foi escolhida aleatoriamente.

4.3.8. Ensaios

Os três discos de cortes dentados, cujas simulações estão apresentadas nas Figuras 17 a 19, foram ensaiados na caixa de solos para avaliação do comportamento, tanto da interação de momentos quanto do seu desempenho no corte da palhada. As condições de ensaio da caixa de solo foram muito próximas daquelas utilizadas nas simulações, Tabela 2, uma vez que as médias obtidas para a umidade e densidade do solo da caixa de ensaios foram de 13% e 1,35 Mg·m⁻³

respectivamente. A quantidade de palhicho de cana utilizada foi a mesma empregada nas simulações, ou seja, $10 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. O disco de 609,6 mm (20") foi, também, testado contra um disco liso, de mesmo diâmetro, para avaliar a carga aplicada sobre o centro dos discos. Para avaliar o comportamento dos discos confeccionados utilizaram-se das variáveis momento em relação ao centro do disco (**Mc**), relação entre a velocidade de avanço e periférica do disco (λ) e a quantidade de palhicho que o disco enterrou em cada metro de sulco (**Qpalha**).

A variável λ tem a função de medir o deslizamento do disco, que seria a primeira consequência da coalizão entre as perturbações causadas por dois dentes consecutivos, como previa as simulações dos discos de 508 mm e 609,6 mm. A variável **Qpalha** é o indicador da qualidade do trabalho dos discos, uma vez que a soma de todos os fatores associados ao corte seriam traduzidos na habilidade dos discos em cortar o palhicho. O valor obtido para o momento em relação ao centro do disco (**Mc**) representa a soma dos momentos resistentes obtidos nos ensaios.

Os resultados obtidos nos ensaios executados na caixa de solo estão apresentados na Tabela 8.

Na simulação foi previsto para o disco de 508 mm, condições do ensaio, um momento resistente de 160,7 Nm, como apresentado na Tabela 3. No entanto os valores obtidos nos ensaios, Tabela 8 têm uma média de 55,2 Nm, que é um valor inferior. O mesmo ocorreu com os discos de 609,6 mm e o de 711,2 mm, dos quais foram previstos respectivamente 188,1 Nm (Tabela 5) e 218,9 Nm (Tabela 7) e foram efetivamente obtidos, nos ensaios da caixa de solo, valores médios de 67,7 Nm e 86,5 Nm. Estes resultados demonstraram que a soma dos momentos resistentes foi sobreestimados nas simulações. Contudo observa-se que em todos os casos foi mantida uma proporcionalidade de aproximadamente 2,7 entre os valores estimados e obtidos. A causa desta diferença poderia estar sendo gerada tanto na estimativa da força de corte do palhicho, quanto na estimativa a força de resistência do solo à penetração do dente.

Os valores obtidos para λ demonstram que não houve deslizamento em nenhum dos três discos ensaiados, já que todos apresentaram valores semelhantes e superiores a 1,0. Mesmo o disco de 508 mm não apresentou problemas na interação entre o solo e o dente do disco, como havia sido previsto na simulação. As Figuras 17 e 18 mostram que se o real valor da soma de momentos resistentes fossem um pouco menor do que os simulados, já era possível obter valores

positivos para o somatório de momentos e as faixas críticas de funcionamento dos discos deixariam de existir.

Tabela 8 – Resultados de **Mc**, **λ** e **Qpalha** obtidos nos ensaios realizados na caixa de solo com os três discos dentados.

Disco dentado Diâmetro (mm)	Variável		
	Mc (Nm)	λ	Qpalha ($\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$)
508	53	1,08	2,9
508	55	1,07	3,4
508	64	1,07	0,0
508	49	1,07	4,9
609,6	64	1,06	0,0
609,6	76	1,05	7,5
609,6	51	1,07	8,3
609,6	80	1,07	4,0
711,2	89	1,06	34,5
711,2	85	1,07	25,0
711,2	73	1,06	23,3
711,2	99	1,06	31,4

Os valores da Tabela 8 para as quantidades de palha introduzida no sulco têm, para os discos de 508 mm e de 609,6 mm de diâmetro, médias de $2,8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$ e $2,9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$, que não são diferentes estatisticamente entre si pelo teste “t” em nível de 1%, demonstrando que a habilidade destes discos em cortar o palhicho foi a mesma. O disco de 711,2 mm, já apresentou uma habilidade inferior aos outros dois, a média dos valores obtidos para este disco foi de $28,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$, média esta que difere estatisticamente pelo teste de “t” em nível de 1%. Estes resultados demonstraram que o disco de 711,2 mm, que mostrou na simulação ter valores para os atributos de desempenho do disco dentro dos limites preestabelecidos, não foi o que cortou o palhicho de forma eficiente. Ficou claro que a qualidade do corte efetuado pelo disco dentado não dependeu exclusivamente dos momentos, da frente de ruptura e da distância real momentânea entre os

dentes. É preciso considerar, também, nesta análise o ângulo oblíquo inicial e a distância efetiva de corte.

Os dados das Tabelas 3, 5 e 7 mostram que o valor do ângulo oblíquo inicial de $20,4^\circ$ do disco de 508 mm é maior do que obtidos pelos discos de 609,6 mm e 711,2 mm, que apresentaram para este ângulo valores de $18,8^\circ$ e de 17° , respectivamente. Outro atributo que passa a ser importante nesta avaliação é a distância efetiva de corte que fica ao encargo de cada dente, mais seu vão. Os dados apresentados nas tabelas mencionadas revelam que o disco de 711,2 mm é o que apresenta a maior distância efetiva de corte, da ordem de 127,6 mm, enquanto o disco de 609,6 mm se encarrega de uma distância de corte de 120,5 mm e o de 508 mm, de uma distância de 113,8 mm. Se por um lado o ângulo oblíquo inicial diminui com acréscimo do diâmetro do disco, por outro lado, a distância efetiva de corte aumenta. Assim, a habilidade de corte do disco tende a reduzir com o aumento do diâmetro, quando se mantém a profundidade de operação projetada e o número de dentes, pois ângulos oblíquos maiores e distâncias efetivas de corte menores facilitam o trabalho do disco.

O solo utilizado nos ensaios apresentou características mecânicas que favoreceram o trabalho do disco, pois nas simulações os valores alcançados para o momento motor são relativamente elevados, em relação ao momento resistente obtido nos ensaios. Ensaios em solos com menor resistência ao cisalhamento, menores valores de **Mm** seriam obtidos, permitindo, assim, uma avaliação mais acurada do modelo de simulação aqui utilizado. Nas condições ensaiadas não foi possível detectar diferenças no desempenho do disco, no que se refere à interação solo/dente entre os três discos testados.

4.3.8.1. Avaliação da força vertical aplicada ao centro do disco

A força vertical, **FV**, representa a necessidade de carga aplicada ao eixo do disco para que ele consiga penetrar até a profundidade de trabalho estabelecida. O desenvolvimento do disco dentado preconiza uma minimização desta força, pois ela está diretamente relacionada ao desempenho do disco de corte de rolamento. Como discutido anteriormente, altos valores de cargas têm sido requeridos para possibilitar o trabalho dos discos de corte quando o solo está duro ou coeso e grandes quantidades de restos vegetais estão presentes sobre o solo. Um avanço na busca de uma geometria de disco de corte ideal seria a obtenção de valores baixos para a carga aplicada sobre o centro do disco, demonstrando uma maior eficiência da ferramenta.

Na rotina computacional elaborada para as simulações não foram desenvolvidos cálculos que pudessem prever a necessidade de carga nos discos de corte dentados. A comprovação de que o projeto de disco dentado, com formato específico exigiria menor carga normal sobre o mancal ficou ao encargo da experimentação. Assim, foi feito um ensaio comparativo entre o disco dentado de 609,6 mm com um disco liso de mesmo diâmetro, existente no mercado e que equipa normalmente implementos agrícolas. Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 9.

TABELA 9 – Resultados de **FV**, λ e **Qpalha** obtidos nos ensaios executados na caixa de solo para os discos dentado e liso, com diâmetro de 609,6 mm.

Disco de corte (609,6mm)	Variável		
	FV (kN)	λ	Qpalha (g*m⁻¹)
Dentado	1,45	1,08	2,9
Dentado	1,64	1,07	3,4
Dentado	1,06	1,07	0,0
Dentado	1,59	1,07	4,9
Dentado	1,21	1,06	4,6
Dentado	1,67	1,06	2,6
Liso	3,26	0,99	216,5
Liso	3,84	1,00	310,5
Liso	3,27	0,97	196
Liso	3,63	0,96	334,2
Liso	3,33	0,97	293
Liso	3,94	0,96	283,4

Os resultados obtidos mostram que há uma grande diferença na força vertical exigida entre os discos dentado e liso. As médias dos dados obtidos para este atributo foram de 1,44 kN para o disco dentado e de 3,54 kN para o disco liso. Estas médias são estatisticamente diferentes entre si pelo teste “t”, em nível de 1% de probabilidade. A geometria do disco dentado mostrou que ele tem maior capacidade de penetração, em relação ao disco liso, pois a necessidade de carga normal para fazê-lo foi da ordem de apenas 40% da exigida pelo disco liso.

O disco dentado cortou mais palhiço do que o disco liso, pois nos ensaios, após sua passagem no leito da caixa de solo, apenas $2,9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$ de palhiço, em média, foi introduzido no sulco aberto por ele. O disco liso, por sua vez, introduziu no sulco aberto na sua passagem, uma média de $272,3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$ de palhiço. Esta diferença é estatisticamente significativa em nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”. A geometria estabelecida para o disco dentado mostrou ser, então, mais eficiente do que o disco liso no que se refere ao corte do palhiço.

No que se refere ao deslizamento do disco, a média do valor de “ λ ” apresentado pelo disco dentado foi de 1,07, enquanto o disco liso mostrou um valor médio para “ λ ” igual a 0,97. Estes valores, também são diferente estatisticamente, em nível de 1% de probabilidade pelo teste “t” e demonstram que enquanto o disco liso apresentou um deslizamento de 3%, o disco dentado apresentou uma patinagem de 7%. A explicação para que o disco dentado tenha patinagem, sem ter fonte própria de propulsão, está no fato de que o raio dinâmico deste disco não tem o mesmo valor do raio externo, medido na ponta dos dentes. Desta forma, as pontas dos dentes deste disco estão a uma velocidade tangencial superior a de translação do seu centro.

4.4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um projeto de disco de corte de rolamento dentado, cujos dentes apresentam uma conformação específica para facilitar o corte da palhada e a penetração do disco no solo. Para facilitar a escolha do protótipo de disco de corte a ser construído e testado foram desenvolvidos e implementados procedimentos para prever o comportamento do referido disco quando em operação.

A análise dos resultados obtidos neste trabalho permitiu chegar às seguintes conclusões:

- A análise cinemática dos dentes do disco dentado de corte associada à definição e quantificação das variáveis utilizadas na avaliação do comportamento deste disco, por meio de simulação computacional, permitiu analisar rapidamente um grande número de configurações de discos.
- A capacidade do disco dentado em cortar o palhiço foi função não somente da interação solo-dente, mas também dos ângulos e distâncias envolvidas no processo;

- A força vertical aplicada no eixo do disco de corte de rolamento dentado foi, nas condições ensaiadas, inferior à aplicada no eixo do disco liso, atendendo ao objetivo proposto de reduzir a força vertical de penetração do disco no solo.
- O valor do momento de resistência foi superestimado na rotina computacional;
- O disco de corte de rolamento dentado pode apresentar um período crítico de funcionamento quando o dente inicia o processo efetivo de corte;
- Os discos de corte dentados passivos com 508 mm e 609,6 mm não apresentaram, nos ensaios executados na caixa de solos, problemas de deslizamento como fora previsto nas simulações;
- A geometria desenvolvida para o disco de corte dentado passivo se mostrou promissora para substituir os discos lisos em cultivadores e máquinas de “plantio direto”, pois apresentou, em relação a estes, maior habilidade no corte da palhada de cana e menor exigência de força vertical, nas condições ensaiadas.

4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMO FILHO, J.; MATSUOKA, S.; SPERANDIO, M. L.; RODRIGUES, R. C. D.; MARCHETTI, L. L. Resíduo da colheita mecanizada de cana crua. **Açúcar & Álcool**, 13(67): 23-5, 1993.

BIANCHINI, Aloisio; MAIA, João Carlos de Souza; MAGALHÃES, Paulo Sérgio Graziano; CAPPELLI, Nelson. Penetrógrafo eletrônico automático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande. 2002. (*no prelo*).

CHOI, Chang H.; HERBACH, Donald C. Cornstalk residue shearing by rolling coulter. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph. 29 (6): 1530-5, nov./dec.,1986.

GODWING, R.J.; MAGALHÃES, P.S.G.; MILLER, S.M. - Instrumentation to Study the Force System and Vertical Dynamic Behavior of Soil Engaging Implements - **Journal of Agricultural Engineering Research**. Silsoe 1987 (36), 301-310.

MAGAÑA, S. G. Campos; RICO, D. Moreno; WILLS, B. M. Kinematics of notched disc coulter. In: ASAE INTERNATIONAL SUMMER MEETING. 1994, Kansas City. **Paper Nº 941009**. Kansas City: American Society of Agricultural Engineering, 40p. 1994.

McKYES, Edward. **Soil cutting and tillage**. Elsevier. New York. 1985. 217p.

MORRISON Jr., J.E.; HENDRICK, J.G. E SCHAFER, R.L. Soil forces on coulter and disc-opener combinations. **Transaction of the ASAE**. St. Joseph. 39 (2): 369-76, mar./abr.,1996.

ORLANDO FILHO, J.; CARMELLO, Q. A. C.; PEXE, C. A.; GLÓRIA, A. M. Adubação de soqueira de cana-de-açúcar sob dois tipos de despalha: cana crua x cana queimada. **Revista STAB**, Piracicaba, v.12, n.4, p.7-11, mar./abr.,1994.

WELLS, L.G; SMITH, D.E. e HAMMETT, D.E. Analysis and testing of powered tillage blades. **Transaction of the ASAE**. St. Joseph. 23 (4): 1379-82, jul./ago.,1980.

HORTIZ-CANÁVATE, J. **Las máquinas agrícolas y su aplicacion**. Mundi Prensa, Madrid. 1984. 468 p.

KEPNER, R. A.; BAINER, Roy; BARGER, E. L. **Principles of farm machinery**. 3^a ed. Avi Publishing Company , Westport, Connecticut. 1978. 27p.

KUSHWAHA, R.L.; VAISHNAV, A.S. and ZOERB, G.C. Shear strength of wheat straw. **Canadian agricultural engineering**, 25 (2): 163-6, mar./abr.,1983

SOUZA, W. R.; MAGALHÃES, P. S. G. Projeto e construção de um transdutor para teste de Implementos Agrícolas. In: CONBEA - Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 19, 1989, Recife. **Anais...** Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, v. 1, p. 295-306,1990.

PERSSON, Sverker. **Mechanics of cutting plant material**. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph.. (ASAE monograph Number 7), 1987.

TICE, E.M. & HENDRICK, J.G. Disc coulter operating characteristics. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, 35(1): 3-10, jan./feb., 1992.

5. ARTIGO 3: AVALIAÇÃO DE TRÊS DISCOS DENTADOS PARA CORTE DE PALHIÇO EM CAIXA DE SOLO

5.1. INTRODUÇÃO

O avanço do cultivo mínimo e do plantio direto como prática agrícola tem se destacado no Brasil. Os números apresentados por SADE (2000) mostram que no Brasil o sistema denominado de plantio direto de culturas anuais apresentou um crescimento exponencial na área plantada entre as safras 73/74, onde foram cultivados apenas 1.000 ha e a safra 98/99, que chegou ao 13,37 milhões de hectares cultivados. Um crescimento acumulado médio de 44,2 % ao ano.

Mais recentemente, o Estado de São Paulo vem envidando esforços no sentido de se eliminar a queima nos canaviais, demonstrando mais uma vez a preocupação do Estado com o meio ambiente e o bem estar da população. Exemplo disto foi a promulgação do decreto Nº 45.869, de 22 de junho de 2001 estabelece, no que se refere à queima da palha da cana-de-açúcar, em seu artigo primeiro, que o emprego do fogo, como método despalhador e facilitador do corte da cana-de-açúcar, deve ser eliminado de forma gradativa, não podendo a redução, a cada período de 5 (cinco) anos, ser inferior a 25% (vinte e cinco por cento) da área de cada unidade agroindustrial ou propriedade não vinculada a unidade agroindustrial.

Os dois exemplos de esforços citados buscam melhorar a qualidade de vida da população e tornar o sistema produtivo mais sustentável, do ponto de vista do meio ambiente. Tanto no plantio direto como no cultivo da cana-de-açúcar sem eliminação da palhada, uma ferramenta torna-se imprescindível para que se possam executar as práticas agrícolas recomendadas. Esta ferramenta é o disco de corte de rolamento, também chamado de disco de corte passivo, que se constitui de um disco metálico, de diâmetro muito maior que sua espessura, com borda normalmente afiada dos dois lados, em forma de cunha, que gira livre em um mancal. O disco de corte de rolamento tem por função penetrar no solo com restos de cultura, cortar a palhada existente sobre ele, evitando acúmulo deste material nas ferramentas de cultivo ou nas colunas que as suportam, bem como facilitar a penetração destas ferramentas no solo.

De acordo com KEPNER et al. (1978) podem ser encontrados no mercado discos com três tipos de bordas diferentes: discos lisos, recortados e ondulados. Segundo os autores, os discos de borda lisa são utilizados em campos relativamente limpos, ou seja, pouca quantidade de

palhada; os recortados e os ondulados trabalham bem em áreas com grande quantidade de palhada em cobertura. HORTIZ-CANÃVATE (1984) e CHOI e HERBACH (1986) mencionam um quarto tipo de disco, que é o estriado.

Os discos de corte de rolamento existentes no mercado não têm apresentado bom desempenho quando trabalham em área com grande quantidade de restos culturais. Vários são os trabalhos publicados que mostrando as deficiências no corte de restos culturais apresentadas pelos discos de corte de rolamento. A ação do disco de corte de rolamento é influenciada por vários parâmetros do próprio disco (diâmetro, formato, espessura, ângulo e grau de afiamento), do solo (umidade, textura e resistência à penetração,) e da palhada (espécies vegetais que a compõe, grau de maturação das plantas, tempo de deposição, umidade e densidade do material).

Para CHOI e HERBACH (1986) a relação entre as condições de solo criadas pelo não preparo (sem mobilização), presença de resíduos na superfície e operação de discos cortantes, ainda não são bem entendidas. Quando o solo está seco e duro, a penetração do disco cortante pode ser inadequada. Quando o solo está úmido ou solto o disco cortante tende a empurrar o resíduo vegetal para dentro do solo, sem cortá-lo.

Os autores desenvolveram um trabalho onde estudaram o corte e as forças na operação de corte de colmos de milho por discos de corte de rolamento, em caixa de solo, sob condições controladas de resistência do solo à penetração, velocidade de deslocamento, profundidade de operação e umidade dos colmos. Os resultados demonstraram que os quatro formatos de discos estudados (liso, estriado, recortado e ondulado), bem como os diâmetros (410 mm e 460 mm) não afetaram, significativamente, a percentagem de colmos cisalhados. No entanto, os discos recortados e estriados foram os que apresentaram, respectivamente, a menor e a maior exigência de força de tração e força vertical. Eles concluíram que o disco afiado foi mais hábil no corte do que o sem afiamento e que a quantidade de colmos cortados aumentava com o decréscimo de sua umidade e com o aumento do diâmetro do disco de corte. Eles verificaram, ainda, que o fator que mais influenciou o corte dos colmos foi a resistência do solo à penetração, sendo que o corte foi tanto melhor quanto mais resistente à penetração se encontrava o solo.

MAGAÑA et al. (1994) desenvolveu um estudo para avaliar o desempenho de quatro discos recortados, com diâmetro de 425 mm e dimensões dos recortes diferentes, contra um disco liso de mesmo diâmetro. Neste estudo concluíram que a melhor razão entre o diâmetro do disco e a profundidade do recorte (D/pr) foi de 19,1, que os discos recortados devem trabalhar com uma

razão entre diâmetro e profundidade de trabalho (D/p) inferior a 5,5 e que as modificações na geometria do recorte não afetaram significativamente as forças vertical e horizontal do disco. Eles verificaram, ainda, que o desempenho do disco recortado com razão $D/pr = 19,1$ foi superior ao do disco liso.

KUSHWAHA et al. (1983) relatam que testes realizados com semeadoras de plantio direto indicaram que sobre grande quantidade de restos vegetais o disco de abertura de sulco era incapaz de cortar a camada de palha, resultando na deposição das sementes sobre os restos vegetais ou na superfície do solo. Quando a quantidade de palha é pequena e o solo está macio, ela é empurrada para o fundo do sulco sem ser cortada. No trabalho por eles realizado, onde avaliaram a resistência da palha de trigo ao corte, observaram que a força de corte era influenciada pela umidade da palha do trigo, sendo menor para palha com baixo teor de umidade, em torno de 8% a 10%. A partir de 15% de umidade da palha, segundo os autores, praticamente não houve mais incremento na força específica de corte para as duas lâminas estudadas. No entanto a lâmina de 90° apresentou uma força específica requerida maior que a lâmina com ângulo do gume de 30° .

KUSHWAHA et al. (1986a) realizaram um trabalho em caixa de solos, usando três discos de corte liso, com diâmetros de 360 mm, 460 mm e 600 mm, variando a profundidade de operação entre 50mm e 70 mm e a quantidade da palhada entre $1000 \text{ Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e $5000 \text{ Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Eles concluíram que os parâmetros do disco, do solo e da palhada influenciaram o corte da palhada e as forças no disco de corte. A quantidade de palhada cortada é inversamente proporcional à densidade da palha e diretamente proporcional à profundidade de trabalho e índice de cone. A densidade da palhada e a profundidade de trabalho têm a maior influência na quantidade de palhada cortada pelos discos de 360 mm e 600 mm de diâmetro. Porém, estas variáveis não influenciaram o desempenho do disco de corte de 460 mm de diâmetro. Concluíram, também, que a força vertical aumenta com o aumento da profundidade de trabalho e diâmetro do disco, assim como com a presença da palhada. A força vertical aumenta significativamente quando a palhada é empurrada para dentro do solo sem ser cortada. A força de tração também aumentou com o incremento na profundidade de trabalho, tamanho do disco e com a presença da palhada, mas o incremento não é tão significativo como na força vertical.

Schaaf et al (citado por KUSHWAHA et al., 1986a) realizaram um estudo intensivo, envolvendo nove tipos diferentes de disco de corte de rolamento passivo. Os resultados por eles

obtidos mostraram que a habilidade de penetração do disco é inversamente proporcional e a força vertical é diretamente proporcional ao diâmetro do disco. Estes estudos também mostraram que a forma ou estilo do disco não apresentou efeito significativo nas forças de tração e vertical, mas influenciou a formação do sulco e a quantidade de solo movimentado.

MORRISON Jr. et al. (1996) em um estudo para avaliar dois novos sistemas de abertura de sulcos para semeadoras de plantio direto, afirmam que a resistência do solo pode ser maior em solos não mobilizados, quando comparados com aquela onde a semeadura é feita após preparo convencional e que esta maior resistência, pode refletir no requerimento de maior força vertical para penetração do disco no solo. Afirmam, também que a força vertical estabelece um peso mínimo para o projeto da semeadora e existe uma relação direta entre o peso e a força necessária para tracioná-la. Neste trabalho, mostraram que, para um solo franco arenoso “Norfolk sand loam”, a força vertical foi, em geral, duas vezes superior à força de tração, mas atingiram valores tão alto quanto 6,7 kN, que é 3 a 4 vezes superior à força projetada para a maioria da semeadora.

Segundo WELLS et al. (1980) são comuns, em semeadoras para plantio direto, os discos de corte de rolamento passivo com várias formas e que o projeto destas máquinas inclui peso extra para obter a força vertical necessária para a penetração destes discos nos solos não preparados.

É claro que a primeira consequência relacionada à dificuldade do disco em penetrar no solo seco ou com grande quantidade de restos vegetais em cobertura é o aumento da carga aplicada sobre ele. Este aumento de força vertical aplicada sobre o disco melhora sua capacidade de penetrar no solo, mas obriga as máquinas e implementos a apresentarem uma estrutura mais robusta. Por outro lado, de nada adianta o sobrepeso quando o solo está úmido ou solto, pois neste caso, a deficiência no corte dos restos vegetais está na pouca resistência do solo à deformação, permitindo que o disco penetre facilmente em seu interior carregando a palhada, que não é cortada por falta de suporte (efeito de contra-faca).

O aumento da força vertical, necessária para aumentar a capacidade do disco em penetrar no solo, leva a um aumento do peso total da semeadora ou do implemento de cultivo, que acabam necessitando, também, de maior força de tração. Neste caso, além da baixa eficiência no corte dos restos culturais, sob condições adversas, os discos de corte de rolamento existentes no mercado levam a um aumento do custo construtivo da máquina, pela necessidade de uma

estrutura robusta. Há ainda que se considerar o aumento do custo operacional, pois máquinas e implementos pesados requerem maior força de tração do órgão motor.

Diante do exposto procurou-se avaliar o comportamento do disco dentado proposto, em comparação com um disco recortado e o disco liso que equipa os cultivadores de cana-de-açúcar no Brasil.

5.2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo para avaliar o desempenho dos discos dentados no corte de palhiço de cana-de-açúcar foi realizado no Laboratório de Protótipos da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, em um aparato de ensaios denominado de caixa de solo, Figura 20. Para este trabalho foram confeccionados três discos dentados, com 20”, 24” e 28” de diâmetro, à partir de três discos lisos, seguindo a técnica de dimensionamento apresentada no Artigo 2. A Figura 21 mostra o desenho esquemático dos discos de corte confeccionados.



FIGURA 20 - Caixa de solos onde foram realizados os ensaios

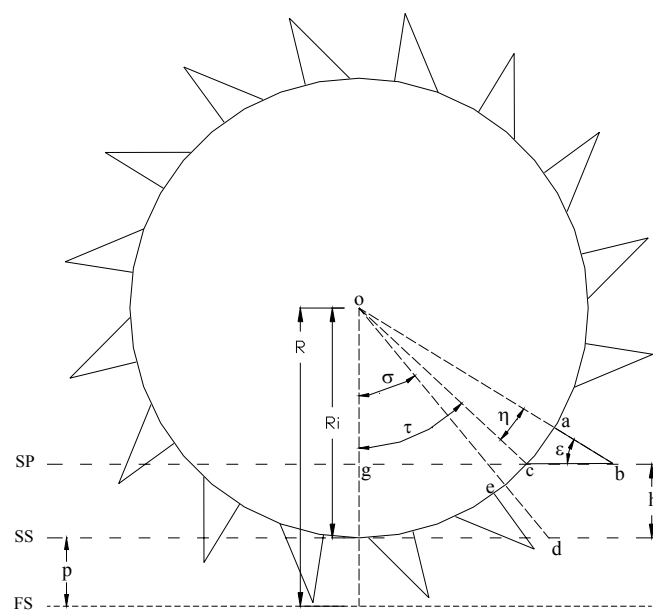


FIGURA 21 – Caracterização geométrica dos discos de corte confeccionados

O estudo foi dividido em duas etapas, onde cada uma delas se constituiu em um experimento independente. Este procedimento foi adotado porque a caixa de solo, de 2 m x 12 m, não comportava um número grande de tratamentos, principalmente ao se considerar que a sua área útil era de 2 m x 9 m, pois 3 m eram utilizados para armazenar solo e o rolo compactador.

No primeiro experimento, foi feita uma comparação entre um disco liso, adquirido no mercado, um disco dentado, confeccionado de acordo com as dimensões estabelecidas no Artigo 2 e um disco recortado, que embora não seja, ainda, comercializado no Brasil, é apontado pela bibliografia internacional como sendo uma alternativa. As dimensões construtivas dos discos utilizados estão apresentadas na Tabelas 10 e 11 e a foto dos protótipos utilizados no primeiro experimento esta Figura 22.

A escolha do disco liso com diâmetro de 24", para ser empregado neste primeiro experimento, foi baseada nas informações colhidas junto a fabricantes e usineiros, que informaram ser o tamanho de disco mais freqüente em cultivadores de cana-de-açúcar. Desta forma, os outros dois discos confeccionados, ou seja, o dentado e o recortado também apresentavam diâmetro igual a 24". O disco dentado de 24", embora não seja aquele que apresentou melhor desempenho nas simulações do Artigo 2, foi utilizado neste experimento, para que se pudesse padronizar o diâmetro e fazer comparações.

TABELA 10 – Principais dimensões dos discos liso e recortado utilizados no primeiro experimento

Discos	Dimensões
Liso	Diâmetro = 609,6 mm (24"); Espessura = 6,30 mm; Ângulo do gume = 21,83°;
Recortado	Diâmetro externo = 609,6 mm (24"); Espessura = 6,33 mm; Ângulo do gume = 20,50°; Número de recortes = 19; Raio da geratriz do recorte = 65 mm; Altura do recorte = 35 mm. Relação Diâmetro/profundidade do recorte = 17,4

TABELA 11 – Principais dimensões construtivas dos discos dentados utilizados no primeiro e segundo experimentos

Variável	Dimensões (mm)		
	Discos		
	28"	24"	20"
Raio externo (R)	355,6	304,8	254
Espessura do disco	6,27	6,34	6,28
Ângulo do gume (AG)*	30	32,5	30
Número de dentes	16	16	16
Altura do dente (p)	70	70	70
Altura da camada de palhiço projetada (h)	74	75	73
Ângulo da ponta do dente (ϵ)*	36,4	31,6	26
Comprimento da borda cortante do dente \overline{bc}	94	87	82
Distância efetiva de corte	130	122	115
Relação altura / largura do dente**	1,26	1,52	1,95

Obs.: * valores em graus; ** valores adimensionais.

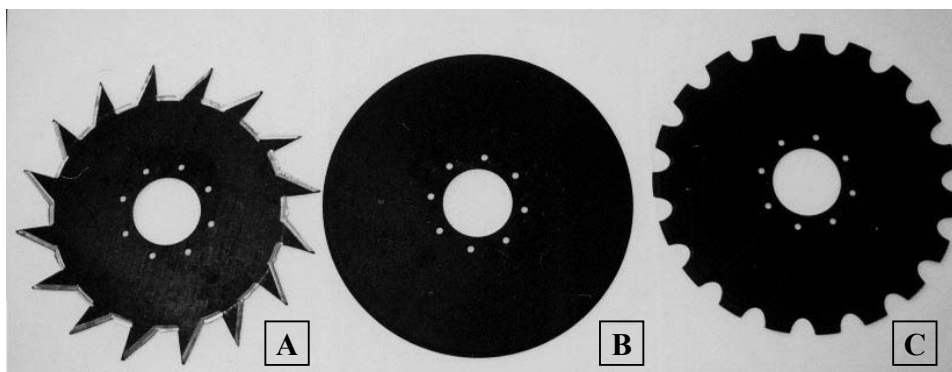


FIGURA 22 – Tipos de discos utilizados no primeiro experimento: A – disco dentado; B – disco liso; C – Recortado.

O delineamento estatístico, empregado neste experimento, foi em blocos casualizados, em um esquema fatorial 3x2 com três discos (liso, recortado e dentado) e 2 profundidades de trabalho (80 mm e 100 mm), com seis repetições, perfazendo um total de 36 parcelas experimentais. O delineamento em blocos se justifica pelo fato de que os ensaios foram realizados em leitos preparados em dias diferentes. A possibilidade de haver diferenças significativas entre leitos é grande, justificando um controle local.

As profundidades adotadas, superiores àquela utilizada nas simulações e no projeto construtivo do disco no Artigo 2, foram empregadas para que o vão do dente também aprofundasse no solo o suficiente para cortar o palhiço, além de possibilitar a avaliação do efeito da profundidade nos atributos utilizados na comparação entre os discos aqui estudados.

A avaliação de desempenho dos discos foi feita de forma comparativa utilizando-se dos seguintes atributos quantitativos, que foram obtidos diretamente dos sensores ou por meio de manipulação das informações neles geradas:

- Força no sentido horizontal, aplicada no centro do disco, denominada simplesmente de força horizontal (**FH**);
- Força vertical aplicada no centro do disco, denominada simplesmente de força vertical (**FV**);
- Momento aplicado ao centro do disco de corte para produzir seu giro (**Mc**).
- Razão entre as velocidades de rotação e de translação do disco de corte (Equação 1)

A quantidade de palhiço de cana que foi enterrado pelos discos de corte, em um metro de sulco (**Qpalha**), foi também escolhida como um atributo para avaliar a eficiência da ação dos discos de corte. O disco de corte, em seu movimento, introduz no sulco por ele aberto todo o palhiço que não foi cortado, principalmente quando o solo apresenta pouca resistência à compressão e ao corte. Isto ocorre porque no corte de restos culturais, por meio de discos de corte de rolamento, o solo é utilizado como contra-faca do processo de corte por cisalhamento simples, que é o caso em questão. Assim, o solo não oferecendo sustentação suficiente para firmar o palhiço durante o corte acaba cedendo, permitindo que o palhiço não cortado seja nele introduzido pela ação compressiva do disco.

O segundo experimento, também realizado na caixa de solo, se preocupou em avaliar o comportamento de três discos dentados, de diâmetros diferentes, que estão apresentados na Figura 23. Para efeito de comparação foi definido que os três discos, com diâmetros de 20”, 24” e 28” teriam 16 dentes e seriam dimensionados com altura do dente “**p**” igual a 70 mm (Figura 21). As dimensões construtivas destes discos dentados estão apresentadas na Tabela 11.

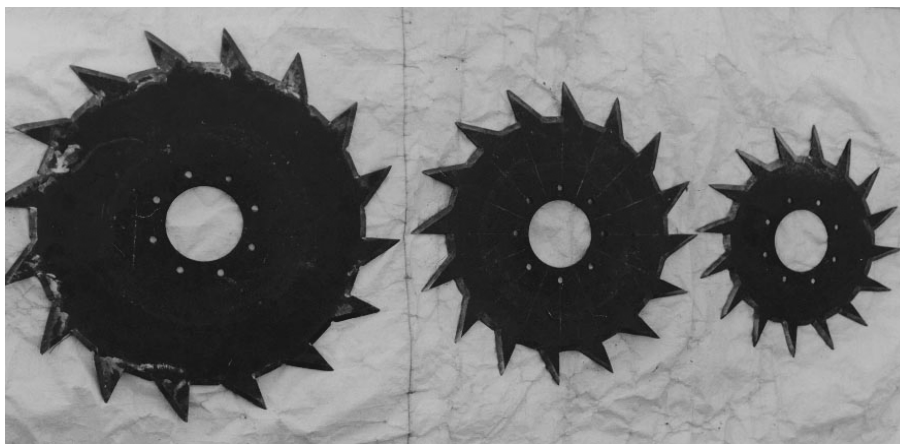


FIGURA 23 – Foto dos três discos dentados com 16 dentes e diâmetros de 711,2 mm, 609,6 mm e 508 mm, respectivamente, da esquerda para a direita, que foram utilizados nos ensaios.

Neste experimento também foi adotado o delineamento em blocos casualizados, com três tratamentos e 8 repetições, perfazendo um total de 24 parcelas experimentais. Os atributos

utilizados neste experimento, para avaliar o desempenho dos discos, foram os mesmos empregados no primeiro experimento.

5.2.1. O protótipo de ensaios

O protótipo de ensaios, construído para execução dos experimentos na caixa de solo era composto de duas partes principais, um chassi e uma coluna (Figura 24).

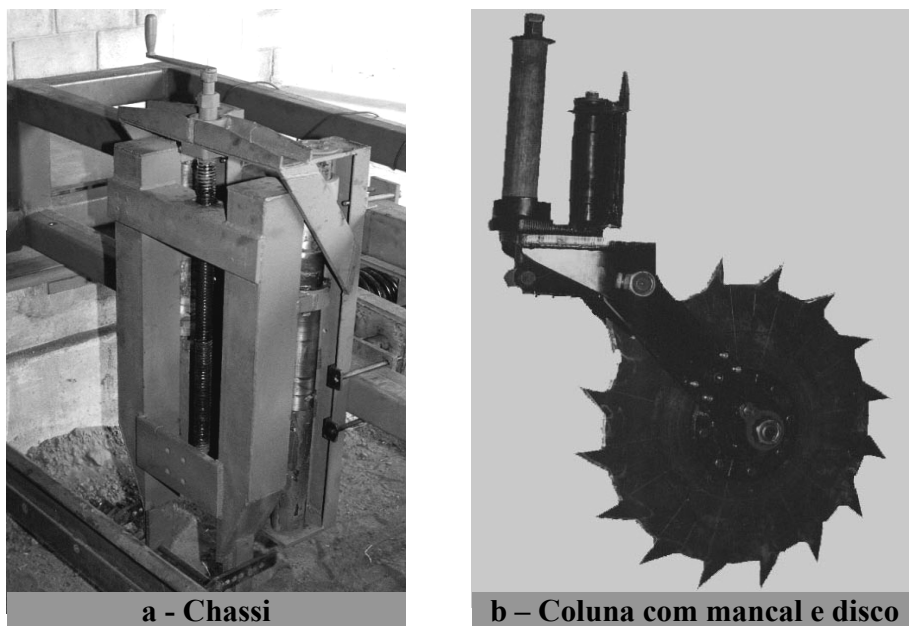


FIGURA 24 - Principais partes do protótipo construído para ensaios na caixa de solo:

a – Chassi evidenciando o sistema de regulagem de profundidade, por meio de parafuso de potência; **b** – coluna com disco montado, evidenciando a substituição da mola.

O chassi foi projetado e construído de forma que pudesse ser fixado ao carro porta ferramentas da caixa de solo por meio de braçadeiras com parafusos e possuísse uma parte fixa e outra móvel. O movimento entre as duas partes era possível graças a uma manivela e um sistema de transmissão por parafuso de potência, de forma que se podia ajustar a profundidade de trabalho do disco, como pode ser observado na Figura 24-a.

A coluna empregada no protótipo, Figura 24-b, era igual às utilizadas em cultivadores de cana comerciais e foi fornecida por um fabricante de máquinas agrícolas. Ela foi fixada à parte

móvel do chassi, por meio de 4 parafusos. O disco a ser ensaiado era preso, por meio de uma flange com 8 parafusos, ao mancal de rolamentos, cujo eixo se prendia à coluna. A mola que existia na coluna, cuja função original era a de manter uma carga compressiva sobre o mancal e o disco, foi retirada e um cilindro de metal tomou seu lugar. Este procedimento tornou a coluna rígida, permitindo que a profundidade de trabalho fosse mantida durante os ensaios, além de transferir integralmente para o anel octogonal todo esforço sofrido pelo disco de corte. Entre a coluna e a parte móvel do chassi foi instalado um anel octogonal, desenvolvido por SOUZA e MAGALHÃES (1991), transdutor cuja função era a de medir as reações vertical e horizontal, bem como o momento, em relação ao centro do anel.

5.2.2. Instrumentação utilizada

A instrumentação utilizada para a coleta de dados constituía-se de um anel octogonal, dois sensores indutivos, um sistema de aquisição de dados e um microcomputador. O diagrama de blocos apresentado na Figura 25 mostra o esquema de montagem dos instrumentos utilizados para a obtenção, aquisição e registro dos dados de força horizontal, força vertical, momento em relação ao centro do anel, velocidade de deslocamento do centro do disco (velocidade de avanço) e velocidade de rotação do disco.

O sistema de aquisição utilizado na coleta dos dados foi um condicionador de sinais “Spider” de oito canais de entradas analógicas, fabricado pela HBM. . A taxa de aquisição utilizada foi de 400 Hz nos cinco canais de entrada que foram habilitados para receber os sinais gerados nos sensores indutivos e no anel octogonal. A um dos canais de entrada foi vinculado o cronômetro interno do equipamento para registro do tempo e controle de aquisição dos dados. Um “software” denominado de “Spider control”, fornecido pelo fabricante do equipamento e instalado em um microcomputador, fazia o controle e gerenciamento de toda a aquisição de dados, via porta paralela, permitindo inclusive que o ensaio pudesse ser monitorado na tela do computador. No Apêndice 7 estão apresentadas as fotos dos sensores e do sistema de aquisição de dados utilizados nos dois experimentos realizados na caixa de solo.

O sensor indutivo, preso ao carro porta-ferramenta, era sensibilizado por uma roda dentada com 22 dentes, solidária à roda do carro, de forma que durante a passagem dos dentes pelo campo de ação do sensor um nível alto de tensão era gerado. Como a roda do carro apresentava um raio dinâmico de 125 mm, cada dente correspondia a um deslocamento do

conjunto de 35,7 mm. Na passagem do dente o sensor mantinha um nível alto de tensão na sua saída por um intervalo de tempo, suficientemente grande para que a passagem do dente pudesse ser detectada. Estas informações eram enviadas para o “Spider” para serem posteriormente convertidas em velocidade de translação do conjunto e conseqüentemente dos discos de cortes.

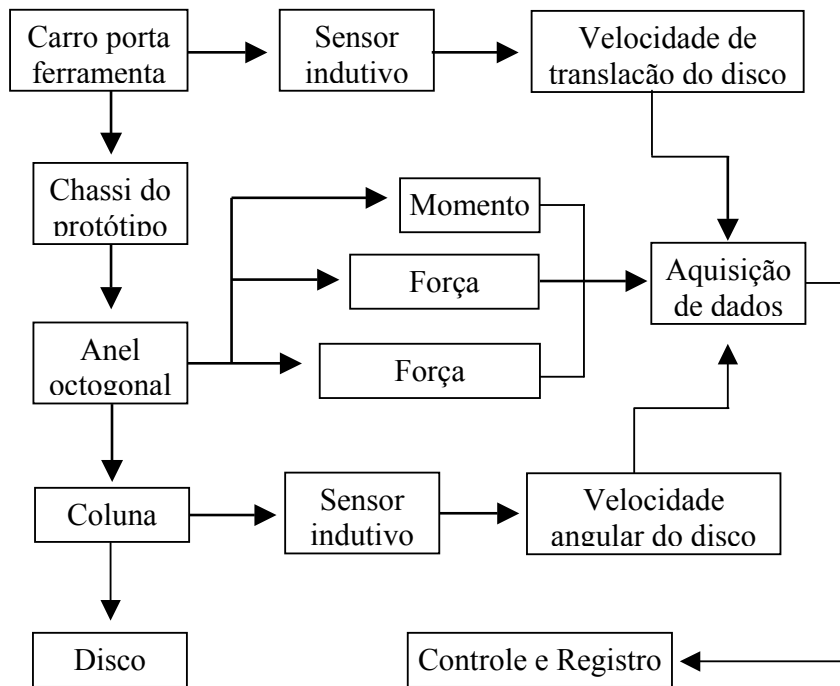


FIGURA 25 – Diagrama da montagem do sistema de aquisição dos dados de ensaio.

Outro sensor indutivo estava preso à coluna e era sensibilizado por uma outra roda dentada, com 36 dentes, solidária ao disco de corte, de forma que durante a passagem dos dentes pelo campo de ação do sensor, um nível alto de tensão era por ele gerado. Assim, a cada 10° de giro do disco o sensor mantinha um nível alto de tensão na sua saída por um intervalo de tempo, suficientemente grande para que fosse detectada a passagem do dente. Estas informações também eram enviadas para o “logger” e seriam posteriormente convertidas em velocidade angular dos discos.

O anel octogonal foi instalado entre o chassi e a coluna do protótipo e convertia as tensões mecânicas sobre ele aplicadas em 3 sinais de tensão que representavam a força horizontal, a força vertical e o momento aplicado, em relação ao seu centro. Estes três sinais eram interpretados e armazenados pelo “logger” para depois serem descarregados no

microcomputador, ao final do ensaio. O anel octogonal utilizado na coleta dos dados, com dimensões de 260 mm x 105 mm x 90 mm, apresentava capacidades nominais no sentido horizontal igual a 20 kN, no sentido vertical igual a 8 kN e momento máximo igual a 13 m*kN.

Antes do início de cada ensaio, o anel octogonal era zerado (tarado) com o protótipo suspenso, sem que o disco tocasse o solo. Em seguida, o disco era introduzido no solo até a profundidade especificada para o ensaio, a aquisição de dados era iniciada e, por fim, o carro de ensaios era colocado em movimento para a execução do ensaio. Desta forma a aquisição iniciava-se um pouco antes do início do ensaio e encerrava-se após o término do ensaio, pois a aquisição de dados só era encerrada após o protótipo ter cessado seu movimento. Após o término de cada ensaio as informações armazenadas temporariamente no “Spider” eram enviadas para o microcomputador. Estes procedimentos foram adotados para permitir padronizar a tara do equipamento, uma vez que a diferença de peso entre os discos era desprezível e, também, para permitir que o ensaio fosse registrado integralmente. Depois, no pós-processamento, as extremidades dos registros seriam eliminadas e a análise realizada somente sobre a parte dos dados obtida com o protótipo em equilíbrio dinâmico.

5.2.3 Preparo da caixa de solo

O solo existente na caixa de solos foi analisado para que pudessemos conhecer seu comportamento e escolher qual a condição de trabalho que seria adotada na execução dos ensaios. Assim, foram realizadas análises para determinar a granulometria, a umidade ótima de compactação, o ângulo de atrito interno e a coesão do solo, bem como o ângulo de atrito solo-ferramenta e a adesão do solo. As análises executadas nos laboratórios de solos e de materiais de construção alternativos da FEAGRI e no laboratório de mecânica dos solos, da Engenharia Civil, da UNICAMP para obtenção dos atributos aqui mencionados estão apresentadas no Apêndice 5.

A umidade do solo definida para preparar os leitos de ensaios foi de 14%, pois foi a umidade ótima de compactação obtida pelo ensaio proctor normal, que revelou uma compactação máxima de 1,85 Mg*m⁻³. A análise granulométrica mostrou que o solo apresenta uma grade com 30 % de argila, 23 % de silte e 47 de areias. O valor de umidade encontrado no ensaio de proctor estava coerente com o resultado da análise granulométrica, pois solos com grade igual à apresentada pelo solo em questão têm, normalmente, baixa capacidade de retenção de água, saturando-se rapidamente. Por outro lado, em se tratando de um solo com boa distribuição de

tamanho de partículas, já era esperado um alto grau de compactação, pelo ensaio de proctor normal.

A resistência do solo à penetração nos leitos preparados deveria apresentar um índice de cone próximo dos 2,4 MPa, que é um nível de resistência bastante comum no período de cultivo da soca dos canaviais. Decidiu-se, no entanto, adotar um índice de cone inferior, de 2 MPa, para que as condições de ensaios fossem adversas. Para a compactação do solo nos níveis preconizados foi necessário dimensionar um rolo compressor, para compactar as camadas de solo no processo de montagem dos leitos de ensaios na caixa de solos.

O leito de ensaios foi obtido pela repetição dos seguintes passos, ilustrados no Apêndice 6, até que se conseguisse obter uma espessura de camada de solo preparada de, aproximadamente, 200 mm:

1. Distribuição, por meio de uma lâmina côncava, de uma camada de solo, de aproximadamente 50 mm, sobre a anterior;
2. Aplicação de carga sobre o solo, pela passagem de um único ciclo (ida e volta) do rolo-compressor dimensionado e construído para este fim;
3. Escarificação da superfície da camada de solo recém-compactada;
4. Distribuição de água na camada de solo, por meio de um regador, na quantidade necessária para que sua umidade ficasse próxima dos 14 %.

O leito de ensaios após atingir uma espessura aproximada de 200 mm recebia uma camada de palhiço. O palhiço a ser distribuído sobre o leito de ensaios foi produzido por colheita mecânica, deixado secar ao sol, enfardado e armazenado seco por seis meses até a sua utilização. Ele foi previamente pesado em lotes com quantidade correspondentes ao recobrimento de 2 m de caixa de solo, ou seja, 4 m². A distribuição do palhiço foi feita, então, com o auxílio de um quadro para que a distribuição fosse a mais uniforme possível. O palhiço, após ter sido distribuído sobre o leito de ensaios, recebia água, por meio de um regador, na quantidade suficiente para elevar sua umidade até níveis próximos de 50 %.

O leito de ensaios, com o palhiço já umedecido, permanecia em repouso por dois dias, recoberto com uma lona, para que houvesse uma melhor distribuição da água de umedecimento por meio do solo e do palhiço. Decorridos os dois dias, a lona era retirada e 8 amostras de solo da área útil do leito eram colhidas, seguindo uma malha de 2 m x 1,5 m, para análise de umidade

que efetivamente foi obtida para aquele leito. Também foram coletas seis amostras de palhiço para cada leito, com a finalidade de determinar a sua umidade no momento em que os ensaios eram realizados.

O controle da compactação do solo foi realizado por meio da resistência do solo à penetração. Em cada leito preparado foram realizadas 27 sondagens, distribuídas em uma malha de 1 m x 0,7 m, ou seja, três fileiras de pontos espaçadas de 0,7 m entre si e de 1 m entre os pontos na fileira, por meio de um penetrógrafo automático desenvolvido por BIANCHINI et al. (2002). Vários autores, entre eles MORRISON Jr. et al. (1996), TICE e HENDRICK (1992) e KUSHWAHA et al. (1986) utilizaram o índice de cone em seus trabalhos em caixa de solo, onde se fazia necessário o preparo de leitos de solo para realização de ensaios com discos de corte. Nestes trabalhos o controle das condições do solo, quanto à sua resistência à penetração do disco de corte, foram monitoradas por meio de penetrômetros. Estes últimos autores afirmaram que o desempenho do corte da palhada é grandemente influenciado pelo grau de compactação do solo. Eles utilizaram o Índice de Cone para monitorar as condições de ensaio, de forma que o solo do leito preparado na caixa de solos apresentasse resistência à penetração similar às encontradas no campo.

A caixa de solo, para o primeiro experimento, foi dividida ao meio, no sentido transversal e para o segundo experimento, em quatro partes, de forma que cada parte se constituía em um bloco. As parcelas experimentais apresentavam 4.500 mm de comprimento e 330 mm de largura. Os ensaios foram executados logo após a retirada da lona e retirada das amostras para análise de controle, de acordo com o sorteio da posição de cada parcela experimental.

5.3. RESULTADO E DISCUSSÃO

5.3.1. Análise das variáveis de controle dos ensaios.

A denominação leito foi utilizada para definir uma camada de solo preparada e coberta com palhiço úmido. A avaliação dos leitos preparados teve por finalidade verificar a homogeneidade dentro de cada leito preparado e as possíveis diferenças entre eles. As análises que foram realizadas em cada leito de ensaio preparado, para atender estes objetivos, foram as de umidade do solo, resistência do solo à penetração e umidade do palhiço.

5.3.1.1. Análise da umidade do solo.

Os resultados obtidos para as umidades do solo nos dois experimentos estão apresentados na Tabela 12. Os leitos de número 3, 4 e 5 foram utilizados no primeiro experimento e os de número 6 e 7 foram empregados para a execução do segundo experimento.

TABELA 12 – Valores médios obtidos para a umidade do solo e do palhiço dos leitos preparados para os experimentos:

Leitos	Solo			Palhiço		
	Umidade média	Desvio padrão	C. V. (%)	Umidade média	Desvio padrão	C. V. (%)
Experimento 1						
3	13,5	0,69	5,1	33	3,58	10,8
4	13,8	0,57	4,1	56	2,98	5,3
5	13	0,47	3,6	89	5,84	6,5
Experimento 2						
6	12,7	0,25	2	87	2,25	2,6
7	12,7	0,19	1,5	71	1,64	2,3

Os resultados apresentados na Tabela 12, para a umidade do solo, são médias de oito amostras e mostram, em uma primeira análise, que esta umidade manteve-se próximo dos 13 %, embora se pretendesse atingir 14 %. No entanto, o desvio padrão e o coeficiente de variação foram diminuindo com o número do preparo, demonstrando que se por um lado não se conseguiu os 14 % de umidade esperados, por outro lado a cada preparo a variação de umidade foi ficando menor. Isto ocorreu pelo fato que a cada preparo, o solo ficava mais revolvido e misturado, permitindo uma maior homogeneidade em seu conteúdo de água.

Os resultados obtidos para a umidade do solo dos leitos apresentaram uma diferença de no máximo 1,1 % de umidade entre suas médias e os coeficientes de variação entre as amostras de um mesmo leito foi de no máximo 5,1 %. Estes resultados são satisfatórios, principalmente quando se considera que a caixa de solo é um ambiente aberto, que o tempo de manipulação do solo é grande e que a quantidade de solo a ser trabalhada, de aproximadamente 4 m³, torna muito difícil a manutenção de toda a sua massa com uma mesma umidade por um período muito longo.

5.3.1.2. Análise da umidade do palhicho.

O palhicho apresentou uma variação maior em seu conteúdo de água. Trata-se de um material orgânico, onde suas partes têm maior ou menor capacidade de retenção de água e apresentava peças de tamanho bastante variável, o que dificulta a distribuição da água e a homogeneidade de sua umidade. Outro fato a ser considerado é que para cada novo leito foi utilizada uma nova camada de palhicho, uma vez que a anterior era descartada. No entanto, observa-se na Tabela 12 que a homogeneidade da umidade da palha foi maior para cada novo leito preparado.

Os resultados obtidos para a umidade do palhicho nos diversos leitos, embora tenham variado entre 33 % e 89 %, não foi preocupante. Os resultados obtidos no estudo apresentado no Artigo 1 mostraram que a exigência de força máxima e a demanda de energia para cortar o palhicho não apresentaram diferenças significativas para umidades superiores a 28 %. Todos os leitos preparados apresentavam umidade do palhicho superior a este limite, o que significa dizer que a variação da umidade não influiria no resultado dos ensaios, tanto do primeiro, quanto do segundo experimento.

5.3.1.3. Análise da resistência do solo à penetração.

Antes do início dos trabalhos na caixa de solo, foi realizado um levantamento de campo da resistência do solo à penetração, em um canavial de quarto corte, em solo Latossolo Vermelho, textura argilosa, após ter decorrido 30 dias da colheita mecanizada, sem queima. Para o levantamento dos dados foi utilizado o penetrógrafo automático desenvolvido por BIANCHINI et al. (2002), a um intervalo de profundidade de 2,5 mm, de acordo com a norma S313.3 (American Society of Agricultural Engineers, 1999). A Figura 26 mostra o resultado do levantamento, onde cada curva é a média de pelo menos 20 pontos de sondagem, realizados com o penetrógrafo automático. Cada curva representa uma porção do talhão, entre dois terraços.

A curva 1, que representa a média dos pontos levantados ao longo e a jusante do terraço superior, apresentou uma resistência média de 1,77 MPa para a faixa de zero a 110 mm de profundidade. A curva 2, que representa os dados levantados na região intermediária entre os dois terraços, apresentou uma resistência média de 2,64 MPa para a faixa de zero a 110 mm de profundidade. A curva 3, com maior resistência média (4,48 MPa), representa os pontos obtidos ao longo e a jusante do terraço inferior.

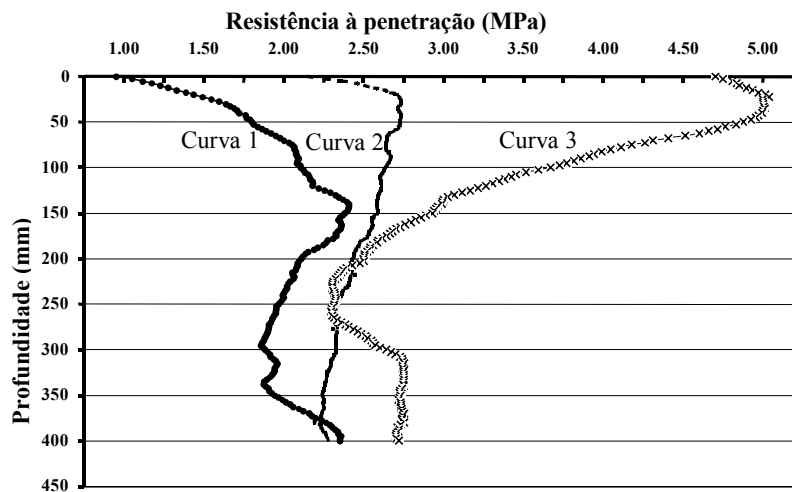


FIGURA 26 – Resistência à penetração do solo obtida em um talhão de cana-de-açúcar após ter decorrido 30 dias da colheita mecanizada sem queima.

A resistência do solo dos leitos preparados foi analisada na camada de zero a 110 mm de profundidade devido ao fato de que a máxima profundidade utilizada para operação dos discos foi de 100 mm. Os resultados obtidos do levantamento, utilizando intervalo de aquisição de 2,5 mm, estão sintetizados nas curvas apresentadas pelas Figuras 27 e 28, que representam a média geral para cada leito de caixa preparado.

Os leitos de números 3 a 5, preparados para a execução do primeiro experimento (Figura 27), apresentaram o mesmo comportamento, onde a resistência do solo à penetração foi proporcional à profundidade do perfil. Comportamento semelhante foi obtido por KUSHWAHA et al. (1986), em um estudo com discos de corte em caixa de solo, onde encontraram, também, uma tendência crescente para a resistência do solo à penetração, em função da profundidade do solo no leito preparado. A sobreposição de camadas, que são compactadas uma a uma durante o processo de construção do leito de solo, provoca esta tendência, pelo fato de que as camadas mais profundas recebem parte da carga que está sendo aplicada sobre as camadas mais superficiais.

Os valores médios da resistência do solo à penetração, obtidos nos leitos de 3 a 5 foram, respectivamente, de 1,51 MPa, 1,46 MPa e 1,59 MPa com coeficiente de variação (C.V.) de 13,6 %, 14,6 % e 14,6 %. Estas médias de resistências à penetração estão abaixo dos 2 MPa esperados, mas foram consideradas adequadas, já que as evidências de diferenças de desempenho dos discos

seriam mais pronunciadas quanto mais adversas fossem as condições do ensaio. Quanto menor a resistência do solo à penetração, mais difícil se torna para o disco cortar o palhiço.

A variação na resistência do solo entre os três leitos utilizados no primeiro experimento, para uma mesma profundidade, foi da ordem de 0,17 MPa desconsiderando os primeiros 10 mm.

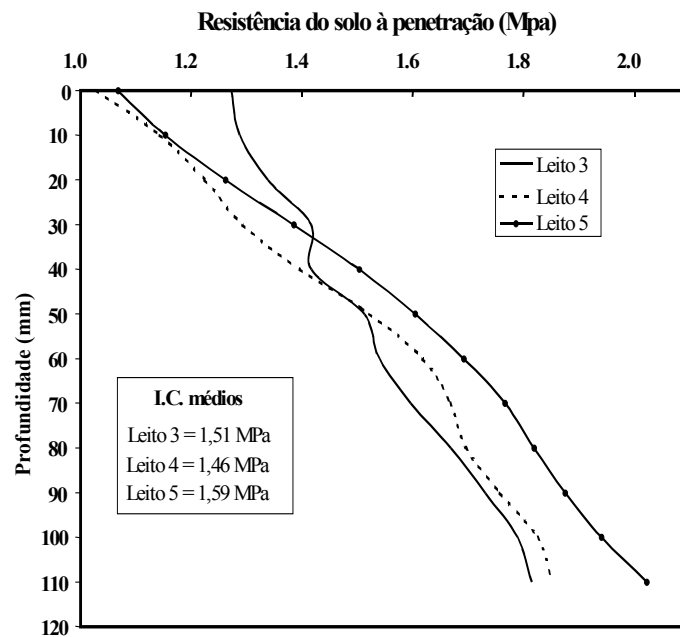


FIGURA 27 – Resistência do solo à penetração, obtida nos leitos preparados para execução do primeiro experimento.

Os leitos de números 6 e 7, preparados para a execução dos ensaios do segundo experimento, cuja finalidade foi comparar 3 discos dentados de diâmetros diferentes, apresentaram comportamento semelhante aos leitos preparados para o primeiro experimento. A resistência do solo aumentou com a profundidade do perfil analisado, conforme pode ser observado na Figura 28, apresentando valores médios de resistência do solo à penetração de 2,08 MPa para o leito 6 e de 1,76 MPa para o leito 7, com coeficiente de variação de 10,9 % e de 12,8 % respectivamente.

Neste segundo experimento, a variação da resistência do solo à penetração entre os leitos foi maior que os obtidos no primeiro experimento. No entanto, esta variação não foi maior que 0,25 MPa, com exceção dos intervalos de profundidade de zero a 20 mm e de 100 mm a 110 mm. MORRISON JR. et al (1996) trabalhando em caixa de solo, obtiveram resistências à penetração

varando entre 1,45 e 2,5 MPa, mas segundo os autores, ao excluir a resistência à penetração da superfície do solo a variação ficava entre 2 e 2,5 MPa.

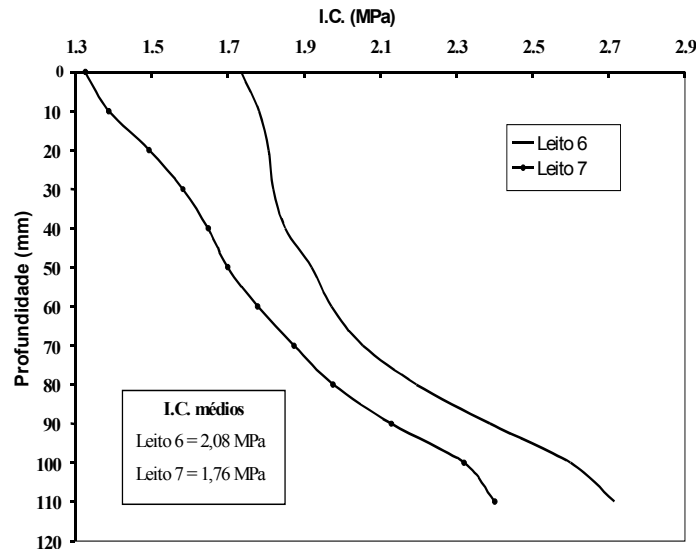


FIGURA 28 – Resistência do solo à penetração obtida nos leitos preparados para execução do segundo experimento.

A análise dos atributos utilizados na avaliação da qualidade do preparo dos leitos (umidade do solo, umidade do palhicho e resistência do solo à penetração), mostrou que os procedimentos utilizados no preparo dos leitos de ensaios foram adequados. Também ficou evidente que as condições impostas nos ensaios eram adversas e dificultavam o trabalho dos discos de corte, ou seja, o solo apresentava alto grau de umidade, o palhicho estava úmido e a resistência do solo estava relativamente baixa, principalmente para o primeiro experimento. Estas condições adversas foram definidas propositalmente para que se pudesse avaliar adequadamente o comportamento dos discos estudados. Se um tipo de disco apresentasse melhor comportamento nestas condições, em relação aos demais, obviamente seria também melhor em condições mais favoráveis ao corte.

5.3.2. Tratamento dos sinais coletados nos ensaios.

A avaliação dos atributos quantitativos, com exceção da quantidade de palha enterrada, só foi possível após o tratamento dos sinais obtidos nos ensaios. Para isso foi criada, no Matlab, uma rotina que se encontra no Apêndice 9, com o propósito de realizar as seguintes operações:

- Eliminar as extremidades dos arquivos de dados gerados em cada ensaio;
- Tratar os dados advindo dos sensores indutivos e calcular a velocidade de deslocamento média do protótipo, a velocidade angular média dos discos, bem como o valor médio da razão de velocidades;
- Converter os valores de milivolts/volt advindos do anel octogonal em valores de força vertical, força horizontal e momento de força, por meio de equações de calibração obtidas previamente;
- Calcular os valores médios das forças horizontal e vertical, do momento aplicado em relação ao centro do anel e da força resultante;
- Calcular o braço de aplicação da força resultante, em relação ao centro do disco e o momento de força nele aplicado;

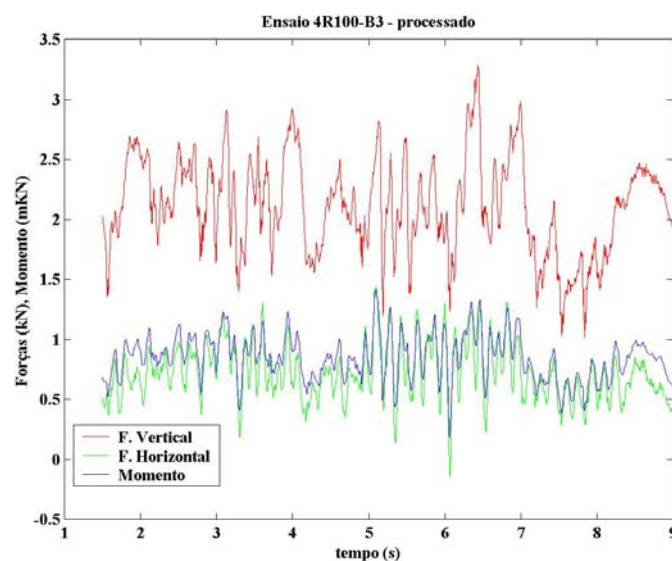


FIGURA 29 – Dados de forças e momento coletados no Ensaio 4R100-R3, após processamento pela rotina computacional.

Os dados brutos de cada ensaio, coletados pelo sistema de aquisição de dados e registrados em arquivos, eram tratados, individualmente, pela rotina computacional. A título de exemplo, estão apresentados na Figura 29 os dados coletados para as forças vertical e horizontal, bem como os do momento em relação ao centro do anel octogonal, após o referido tratamento.

Eles pertencem ao ensaio do primeiro experimento denominado pela sigla 4R100-R3, ou seja, 4º leito, disco recortado, profundidade de trabalho de 100 mm, repetição de número 3.

5.3.2.1. Tratamento dos sinais do anel octogonal.

A rotina apresentada no Apêndice 9 convertia os sinais advindos do anel octogonal, de milivolts/volt para a unidade de força quilonewton e em seguida obtinha o valor médio para a força vertical “FV”, para a força horizontal “FH” e para o momento aplicado ao centro do anel. As médias foram obtidas de conjuntos que continham, no mínimo, 3000 pontos. Com a média das forças vertical e horizontal calculou-se a força resultante, em relação ao centro do anel. A partir daí e, utilizando-se da geometria apresentada no Apêndice 4 foi calculada a distância de aplicação desta força resultante, em relação ao centro do disco e, por conseguinte, o momento aplicado ao centro do disco “M_C”.

5.3.2.2. Análise espectral de frequências dos sinais das forças vertical e horizontal.

Os resultados dos ensaios do primeiro experimento mostraram que os sinais produzidos por cada tipo de disco apresentavam certas particularidades. A Figura 30 mostra os sinais de força vertical e força horizontal, obtidos para um ensaio de cada tipo de disco estudado, na profundidade de 80 mm, onde é possível perceber diferenças entre eles. O sinal produzido pelo disco liso mostra uma linha mais definida, sem muitas oscilações; o sinal que representa o disco recortado tem uma maior oscilação do que o sinal do disco liso, como se fosse um ruído que pudesse estar associado ao sinal e, o sinal que representa o disco dentado tem uma oscilação ainda maior, aparentemente, em forma de serra. Em função das aparentes diferenças entre os sinais foi feita uma análise do espectro de frequência por meio da FFT (Fast Fourier Transform), utilizando-se de uma rotina escrita no Matlab. Foi aplicado na aquisição dos dados um filtro passa baixo de segunda ordem de 40Hz

Os periodogramas apresentados na Figura 31 são os resultados da análise espectral de frequências dos sinais mostrados na Figura 30, onde é possível observar as frequências dominantes nos sinais. Invariavelmente aparecem, a exemplos dos apresentados, em todos os ensaios frequências dominantes inferiores a 2,5 Hz. Estas frequências estão, possivelmente, associadas às vibrações causadas pelo movimento do carrinho que suportava o protótipo. Observou-se, também, que após 15 Hz não havia mais nenhum pico de frequência nos sinais estudados.

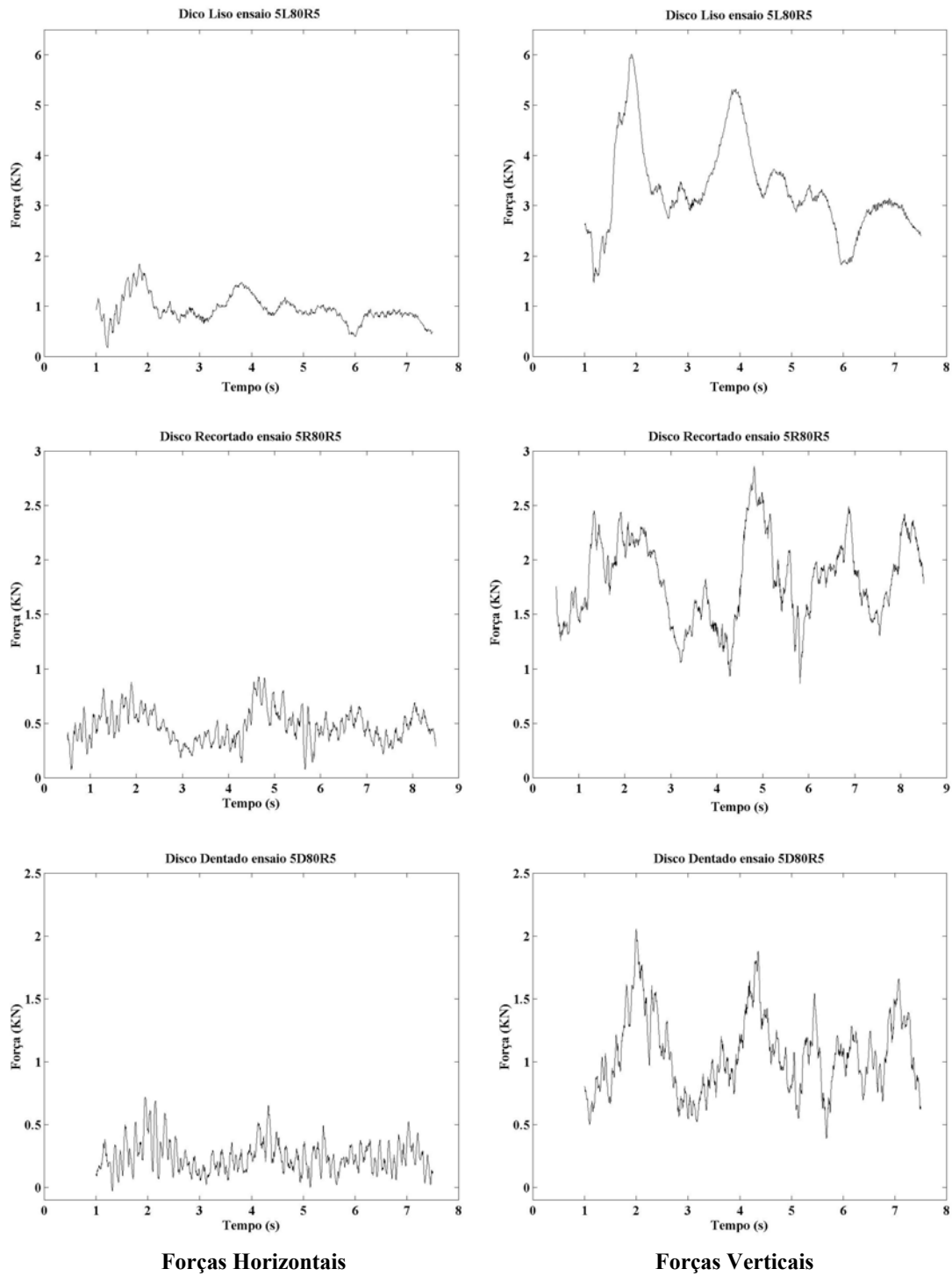
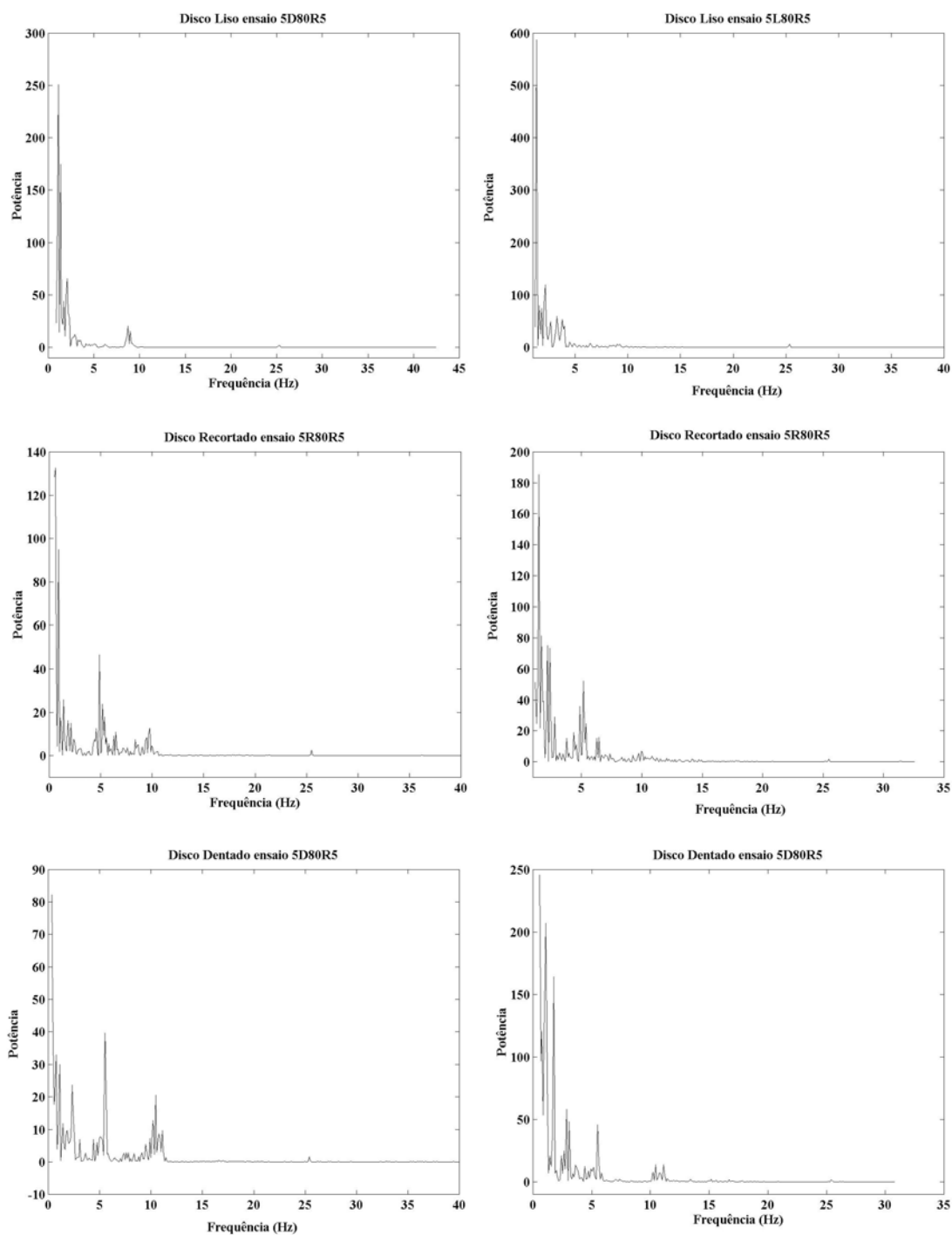


FIGURA 30 – Sinais das forças horizontal e vertical para os três discos estudados



Forças Horizontais

Forças Verticais

FIGURA 31 – Periodogramas dos sinais das forças horizontal e vertical, obtidos pela FFT, para os três discos estudados.

No periodograma obtido do sinal da força horizontal do disco dentado, apresentado na Figura 31, observa-se um pico em 5,5 Hz, que corresponde à frequência de penetração dos dentes do disco no solo. A frequência teórica de ataque, determinada por meio da velocidade angular e do número de dentes deste disco é de 5,6 Hz para o respectivo ensaio. Para o disco recortado, a frequência teórica de 5,0 Hz é praticamente igual à obtida pelo periodograma que foi de 4,9 Hz.

Novamente é possível afirmar que o pico de frequência em questão se refere, também, à frequência de penetração dos recortes. Este pico apareceu, entre 4 Hz e 6 Hz, em todos os periodogramas de forças horizontal e vertical dos ensaios com os discos recortados e dentados, sendo que a frequência do pico encontrada para as forças vertical e horizontal é a mesma, quando se trata de um mesmo ensaio, como pode ser observado pelo exemplo da Figura 31. Nos periodogramas obtidos para o disco liso não aparece, como era de se esperar, picos entre 4 e 6 Hz.

Os periodogramas de todos os ensaios revelaram um outro pico de frequência, próximo a 10 Hz. Este pico é praticamente imperceptível na maioria dos periodogramas dos sinais da força vertical, mas é evidente nos periodogramas dos sinais da força horizontal, como mostra os exemplos apresentados na Figura 31. Esta frequência parece estar associada aos pontos de ruptura do solo. Segundo NIEUWENBURG et al. (1992) um implemento quando se move através do solo causa nele uma separação e a distância entre os pontos de ruptura é mais ou menos fixa. Esta distância é definida como sendo a razão entre a velocidade de avanço do implemento e a frequência de rompimento do solo e foi determinada, experimentalmente, para vários tipos de solos americanos por LICSKO & HARRISON (1988).

NIEUWENBURG et al. (1992) em trabalho de campo, com discos de corte liso, obtiveram ruptura do solo a distâncias de aproximadamente 0,18 m e esperavam obter uma frequência de ruptura do solo em torno de 8 Hz. A análise espectral do sinal por eles obtidos, utilizando-se da FFT, mostrou um pico de frequência evidente em 8 Hz, embora fosse de baixa potência, confirmando que aquela frequência era mesmo a de ruptura do solo utilizado nos ensaios. Eles salientaram, ainda que a distância de ruptura depende das condições do solo e da profundidade de trabalho do implemento.

Os picos de frequência obtidos na análise espectral dos discos ensaiados no primeiro experimento foram convertidos em distâncias entre pontos de ruptura do solo, por meio da velocidade de avanço registrada nos ensaios. A análise estatística destes dados mostrou não haver

diferença significativa entre os tipos de discos estudados. A média da distância de ruptura do solo, para as profundidades de trabalho do disco de 80 mm e 100 mm foram, respectivamente de 58,2 mm e de 53,9 mm, com coeficiente de variação de 17%. Embora esta diferença não tenha sido significativa na análise de variância mostrou uma tendência de redução do tamanho do torrão, com o incremento da profundidade de trabalho do disco de corte.

5.3.2.3. Tratamento dos sinais dos sensores indutivos.

Os valores médios da velocidade angular e da velocidade de translação do disco foram obtidos a partir das informações coletadas por meio dos sensores indutivos. Com estas duas velocidades foi possível obter, também, o valor da razão entre velocidades, denominada de λ . As médias para estes atributos foram obtidas a partir de um conjunto de dados, que continha no mínimo 3.000 pontos para cada ensaio, após o tratamento do sinal pela rotina computacional apresentada no Anexo 9. As Figuras 32 e 4.14 mostram, a título de exemplo, os sinais parciais dos sensores indutivos em um dos ensaios realizados, antes e após o processamento dado pela rotina mencionada.

Os dados brutos, obtidos a partir dos sensores indutivos apresentavam uma sequência de valores altos, com pequenas oscilações em sua magnitude, seguidos de uma sequência de valores baixos, que também apresentavam oscilações em sua magnitude, lembrando uma onda quadrada, como pode ser observado na Figura 32. Apenas uma parte do ensaio está apresentada na figura, para uma melhor visualização, uma vez que todo o tempo do ensaio não seria possível de ser observado dentro da área da figura. Para obter as velocidades a partir da frequência de aquisição dos dados e das informações advindas dos sensores indutivos, foi preciso, inicialmente, tratar estes dados para que se pudesse obter um sinal de “pick up”.

A rotina utilizada para o tratamento dos dados incluía uma sub-rotina que permitia transformar as sequências de valores baixos em zeros e cada sequência de valores altos em apenas um valor diferente de zero.

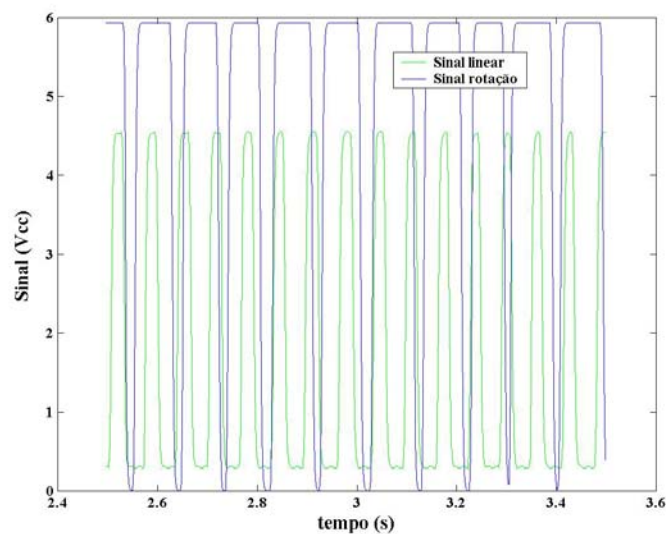


FIGURA 32 – Parte do sinal bruto obtido a partir dos sensores indutivos para o ensaio 4R100-B3.

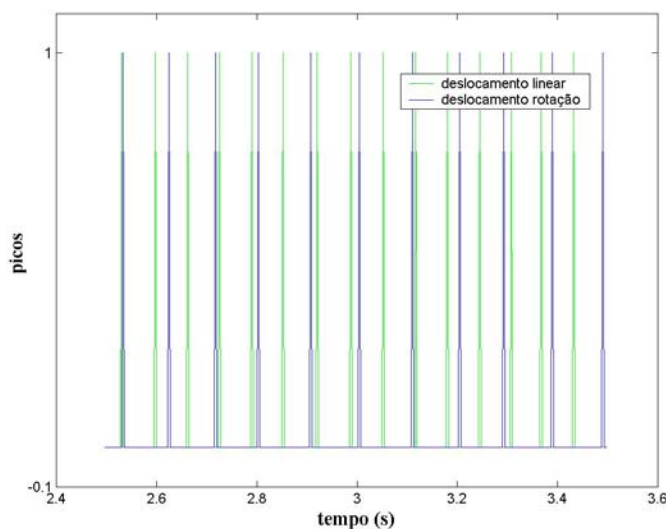


FIGURA 33 – Parte do sinal obtido dos sensores indutivos para o ensaio 4R100-B3, após o processamento.

5.3.3. Avaliação da velocidade de translação dos discos.

A velocidade de translação preconizada para os discos deveria ser mantida em todos os ensaios. Assim, uma análise criteriosa foi realizada com o objetivo de verificar se houve

diferença significativa na magnitude deste atributo durante a execução dos ensaios pertinentes ao primeiro e ao segundo experimento. Neste sentido analisaram-se as velocidades entre os tipos de discos estudados, entre os ensaios que ocorreram em dias diferentes e entre os ensaios ocorridos no mesmo dia.

A magnitude da velocidade de translação do disco pôde ser calculada, a partir do sinal tratado, como mostra o exemplo da Figura 33, advindo do sensor indutivo que estava acoplado à roda do carrinho da caixa de solo (sensor linear). O cálculo desta velocidade considerou o número de ocorrências do Algarismo Um, ou seja, o número de pulsos registrados pelo sensor linear, durante o intervalo de tempo útil do ensaio. Cada pulso do sensor representava um avanço do protótipo de ensaios igual a 35,7 mm, calculados em função do raio dinâmico da roda do carrinho e do número de pulsos que eram emitidos em cada volta da roda.

As análises de variância, cujos resumos estão apresentados na Tabela 13, mostram que não houve diferença significativa, nem mesmo no nível de 5% de probabilidade, para a velocidade de translação do protótipo em nenhum dos dois experimentos, quando se compara os tipos de discos utilizados. Também não foi encontrada diferença significativa, em nível de 5% de probabilidade, entre os ensaios realizados em dias diferentes, que estão representados na análise de variância pelo efeito de blocos. As médias das velocidades obtidas, no primeiro experimento, para os discos liso, recortado e dentado foram, respectivamente, de $0,54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $0,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $0,54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. No segundo experimento, as velocidades obtidas para os discos dentados com 20", 24" e 28" foram de $0,67 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $0,65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e de $0,66 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente. Estes resultados mostraram que a magnitude das velocidades de translação dos discos foram iguais.

A última análise realizada para a avaliação da velocidade de translação do centro dos discos foi àquela referente às variações ocorridas entre os ensaios de um mesmo leito. As análises estatísticas realizadas para os três leitos que compõe o primeiro experimento mostraram não haver, em nenhum deles, diferença significativa entre as velocidades de translação dos discos. No segundo experimento também não se obteve diferenças significativas entre as velocidades de translação dos ensaios realizados em um mesmo leito. Sendo assim, pode-se afirmar que o controle de velocidade do protótipo foi eficiente nos dois experimentos.

A velocidade de translação operacional dos implementos agrícolas destinados a efetuar cultivos é superior à utilizada nos ensaios, podendo ser da ordem de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, como cita WELLS et al. (1980a). No entanto, os estudos efetuados por CHANCELLOR (1958) demonstraram que a

energia de corte de várias forragens não foi influenciada significativamente pela velocidade de corte, que variou entre $1,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $5,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Os resultados de outro estudo, realizado por COCHRAN et al. (1974) mostraram que a força vertical do disco não foi significativamente afetada pela velocidade de deslocamento abaixo de $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Um terceiro trabalho, realizado por MORRISON Jr. et al. (1996) mostrou que as forças vertical e horizontal do disco de corte não foram afetadas significativamente pela variação da velocidade de translação do disco, entre $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $2,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, para uma profundidade de operação de 60 mm, em solo “Norfolk sand loam”.

TABELA 13 – Resumo da análise de variância das velocidades de translação (V_o) do protótipo para os dois experimentos.

Fonte	GL	QM	F	P
Experimento 1				
Disco	2	0,0000951	0,11	0,90
Bloco	5	0,0010444	1,16	0,35
Erro	27	0,0009030		
Total	34			
Experimento 2				
Disco	2	0,001154	0,94	0,410
Bloco	3	0,000022	0,02	0,997
Erro	18	0,001231		
Total	23			

A decisão de operar o protótipo de ensaios a uma velocidade de translação entre $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ foi, puramente, por questão de segurança. A utilização dos leitos preparados na caixa de solo deveria ser maximizada, para que se pudesse garantir 4.500 mm de comprimento em cada parcela experimental. Testes foram realizados e ficou constatado que o espaço necessário para a frenagem do carro porta ferramenta, com o protótipo, era superior ao existente, caso velocidades da ordem de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ fossem utilizadas.

5.3.4. Análise dos atributos utilizados na avaliação dos três tipos de discos de corte estudados (Experimento 1).

No primeiro experimento foram utilizados a força vertical “**FV**”, a força horizontal “**FH**”, o momento em relação ao centro do disco “**M_c**”, a razão de velocidades “**λ**” e a quantidade de palha enterrada pelos discos “**Qpalha**” como variáveis para avaliação do desempenho dos discos, como descrito na metodologia. As análises de variância e os testes de média para estes atributos foram executados, considerando-se seis tratamentos, resultantes da associação dos três tipos de discos com as duas profundidades de operação. O nível de significância adotado neste trabalho foi o de 1% probabilidade, tanto para as análises de variância como para os testes de média.

5.3.4.1. Avaliação da força vertical.

A força vertical é de grande importância no estudo de discos de corte de rolamento, uma vez que os discos existentes no mercado exigem uma grande quantidade de carga vertical aplicada sobre eles para que possam efetuar seu trabalho de forma adequada em solos sem mobilização, como relatam, entre outros, WELLS et al. (1980) e MORRISON Jr. et al. (1996). A exigência de força vertical está diretamente relacionada com a geometria do disco e as condições de operação. Se as condições de operação são as mais variadas possíveis e fogem do controle, resta então, reduzir a necessidade de carga sobre os discos por meio de geometrias mais eficientes. Desta forma o estudo da força vertical, necessária para penetrar o disco no solo passa a ser um dos atributos fundamentais na avaliação do desempenho de discos de corte.

A Tabela 14 apresenta o resumo da análise de variância para a força vertical “**FV**” exigida pelos discos estudados nas profundidades de trabalho de 80 mm e 100 mm. Observa-se que o efeito de tratamento (disco-profundidade) foi altamente significativo, pelo “teste F” e o efeito de blocos não apresentou diferença significativa em nível de 1% de probabilidade. O resultado desta análise mostrou que existe alguma diferença significativa entre os tratamentos utilizados e que os diferentes leitos preparados para este experimento não apresentavam diferenças entre si, quando analisado o atributo força vertical.

TABELA 14 – Resumo da análise de variância para a força vertical “FV” obtida no primeiro experimento.

Fonte	GL	QM	F	P
Disco-prof.	5	5,9382	61,73	0,000
Bloco	5	0,2595	2,70	0,045
Erro	24	0,0962		
Total	34			

A análise de variância, apresentando diferença significativa para tratamentos, permite que as médias obtidas nestes tratamentos possam ser comparadas entre si. A comparação de médias entre tratamentos foi efetuada pelo teste de Tukey, por ser um teste mais rigoroso. Na Tabela 15 encontram-se, entre outros, os valores médios de força vertical obtidos para o disco dentado desenvolvido, bem como para os discos liso e recortado, utilizados neste experimento comparativo.

TABELA 15 – Médias dos atributos utilizados para a avaliação do desempenho dos três discos de corte estudados, nas duas profundidades adotadas (primeiro experimento).

Tratamentos		Médias *				
disco	Profundidade (mm)	FV (kN)	FH (kN)	M _C (m.kN)	Lambda	Qpalha (g/m)
Dentado	80	1,242 A	0,325 A	0,053 A	1,060 A	2,5 A
Dentado	100	1,656 AB	0,504 AB	0,081 AB	1,062 A	18,5 A
Recortado	80	2,120 B	0,603 ABC	0,107 B	1,013 B	127,1 B
Recortado	100	2,258 B	0,783 BC	0,124 B	1,022 B	154,8 B
Liso	80	3,545 C	0,945 C	0,180 C	0,968 C	272,3 C
Liso	100	3,720 C	1,360 D	0,216 C	0,960 C	310,0 C

Obs.: * Médias, para um mesmo atributo, seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, em nível de 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

As forças verticais exigidas pelos discos não diferiram estatisticamente, em nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey, em função da variação da profundidade de trabalho de 80 mm para 100 mm. As forças verticais, de 3,545 kN, exigidas pelo disco liso para a profundidade de 80 mm e de 3,720 kN, para a profundidade de 100 mm, foram as maiores de todas, diferindo

significativamente, em nível de 1 % de probabilidade, daquelas exigidas pelos discos recortado e dentado. Os resultados obtidos por CHOI & HERBACH (1986) demonstraram que entre os discos liso, estriado, recortado e ondulado o disco recortado foi o que apresentou a menor exigência de força de tração e força vertical.

A força vertical exigida pelo disco recortado, nas duas profundidades de trabalho, foi significativamente inferior à exigida pelo disco liso, mas não diferiu estatisticamente do disco dentado na profundidade de 100 mm. O disco dentado, por sua vez, trabalhando na profundidade de 80 mm, apresentou a menor exigência de força vertical, de 1,242 kN, sendo estatisticamente inferior às exigidas pelos discos recortado e liso, em qualquer das duas profundidades estudadas. Desta forma, pode-se afirmar que o disco dentado, trabalhando a 80 mm de profundidade e considerando as condições do experimento, foi o que apresentou o melhor desempenho, quanto à força vertical exigida. Ficou evidente que a exigência de carga vertical do disco dentado é inferior à metade da carga exigida pelo disco liso e que o disco recortado apresentou um comportamento intermediário. O disco liso se revelou como sendo, dentre os tipos de disco estudados, o que mais exigiu força de penetração no solo, o que significa que o seu desempenho, para este atributo, foi o pior de todos.

5.3.4.2. Avaliação da força horizontal.

A força horizontal “FH” é aquela necessária para tracionar o disco de corte e torna-se importante do ponto de vista da potência requerida e, conseqüentemente, do consumo de combustível. Assim, o estudo de discos de corte, visando sua minimização, torna-se de grande importância pela redução de custos operacionais. A força horizontal tem íntima relação com a força vertical, como salientaram MORRISON Jr. et al. (1996). Desta forma, apenas a análise feita para a força vertical seria suficiente para afirmar que o disco dentado exigiria menos força de tração do que os outros dois discos.

A análise da força horizontal foi, também, realizada considerando-se que o disco dentado tem um princípio de funcionamento diferenciado do disco liso, onde parte da força de tração é transferida para o corte do palhço. Assim, a avaliação da força horizontal torna-se pertinente não só pela necessidade de conhecer a magnitude deste atributo, mas também para que se possa comparar os princípios de funcionamento. Tabela 16 apresenta o resumo da análise de

variância para a força horizontal. Ela revela que, em nível de 1 % de probabilidade, pelo teste “T”, há diferença significativa entre tratamentos.

TABELA 16 – Resumo da análise de variância para a força horizontal “FH” obtida no primeiro experimento.

Fonte	GL	QM	F	P
Disco-prof.	5	0,79539	26,85	0,000
Bloco	5	0,05025	1,70	0,174
Erro	24	0,02963		
Total	34			

Os resultados apresentados na Tabela 15, para a força horizontal (FH) mostram que embora houvesse variações significativas entre algumas médias de tratamentos, pelo teste de Tukey, o efeito do tipo de disco não foi tão pronunciado como nos demais atributos utilizados nas comparações. Este resultado mostra, claramente, que a força de tração, ou seja, a força horizontal requerida pelo disco de corte de rolamento não é um bom atributo para comparações de desempenho entre estes tipos de discos. No entanto, os dados obtidos, apresentados na referida tabela, permitem fazer algumas comparações interessantes.

O disco liso, trabalhando a 100 mm de profundidade foi o que mais exigiu força de tração, da ordem de 1,36 kN, diferindo estatisticamente, inclusive, do tratamento onde o mesmo disco trabalhou a uma profundidade de 80 mm. O disco liso foi o único disco, entre os testados, que apresentou diferença na “FH” entre as duas profundidades de operação adotadas, mostrando que a “FH” é altamente dependente da profundidade de trabalho para este tipo de disco. Este disco, trabalhando a 80 mm de profundidade, exigiu 0,945 kN, valor que não diferiu estatisticamente, em nível de 1 % de probabilidade, das médias exigidas pelo disco recortado trabalhando a 80 mm (0,603 kN) e a 100 mm (0,783 kN).

O disco liso, quando comparado ao disco dentado, apresentou maior exigência de força de tração, como pode ser observado na Tabela 15. A força horizontal exigida pelo disco dentado foi de 0,325 kN para a profundidade de 80 mm e de 0,504 kN para a profundidade de 100 mm, que são estatisticamente inferiores, pelo teste de Tukey, em nível de 1% de probabilidade, em relação às médias obtidas para o disco liso. Os valores obtidos demonstraram que, em termos do

requerimento de força de tração, o disco dentado apresentou melhor desempenho, com um requerimento de “FH” da ordem de 35% daquele requerido pelo disco liso, para a profundidade de 80 mm e de 44% para a profundidade de 100 mm. Os resultados desta comparação se mostraram coerentes, uma vez que a “FH” é dependente da “FV”, como discutido anteriormente, e que o disco dentado apresentou, também, menor requerimento para a “FV”.

A análise comparativa entre os discos dentado e recortado mostra que houve diferença significativa para a “FH” apenas entre o disco dentado, na profundidade de 80 mm (0,325 kN) e o disco recortado na profundidade de 100 mm (0,783 kN). Entre as médias obtidas para o disco dentado, na profundidade de trabalho de 100 mm (0,504 kN) e o recortado, na profundidade de 80 mm (0,603 kN), não houve diferença significativa, pelo teste de Tukey, em nível de 1% de probabilidade.

De um modo geral os resultados demonstraram que a exigência de força horizontal do disco dentado é inferior, em relação ao disco liso e que o disco recortado apresentou um comportamento intermediário.

5.3.4.3. Avaliação do momento aplicado ao centro do disco.

O momento aplicado ao centro do disco de corte é o torque necessário para que ele gire. Caso não haja torque suficiente o disco passa a ser arrastado e o trabalho de corte fica prejudicado. Desta forma, a análise do momento aplicado ao centro do disco de corte torna-se um importante atributo na avaliação de desempenho destes discos, considerando-se que o disco que exigir menor momento terá maior chance de produzir seu trabalho sem deslizamento, sob condições inadequadas de operação. O deslizamento do disco é uma das causas do corte deficiente do palhiço, uma vez que ao deslizar o disco empurra o palhiço para frente, que por sua vez, ao se acumular na região de corte do disco, exige maior esforço do disco de corte. A Tabela 17 apresenta o resumo da análise de variância para o momento aplicado ao centro do disco de corte, obtido conforme apresentado no Apêndice 4. O resultado da análise de variância mostrou que há diferença significativa, ao nível de 1 % de probabilidade, pelo teste “F”, para tratamentos.

As médias obtidas para este atributo se encontram na Tabela 15, acompanhado do resultado do teste de Tukey para comparação de médias. Este teste demonstrou que as médias, para um mesmo disco, obtidas para as profundidades de 80 mm e 100 mm não apresentaram diferença significativa entre si. Observa-se, também, que a média do momento solicitado para o

disco dentado, na profundidade de 100 mm, não diferiu das médias de momentos exigidos pelo disco recortado, nas duas profundidades estudadas.

TABELA 17 – Resumo da análise de variância para o momento aplicado ao centro do disco “ M_C ” no primeiro experimento.

Fonte	GL	QM	F	P
Disco-prof.	5	0,021917	46,31	0,000
Bloco	5	0,001146	2,42	0,065
Erro	24	0,000473		
Total	34			

O disco dentado exigiu momentos de 0,053 m*kN e 0,081 m*kN para as respectivas profundidades de 80 mm e 100 mm, enquanto o disco liso exigiu momentos médios de 0,18 m*kN e 0,216 m*kN, que são de 2,5 a 3 vezes superiores. Estas diferenças entre médias são significativas em nível de 1% de probabilidade. O disco recortado apresentou um comportamento intermediário entre o dentado e o liso, com média de momentos de 0,107 m*kN e 0,124 m*kN para as profundidades de 80 mm e 100 mm, respectivamente. Ele mostrou comportamento superior ao do disco liso, uma vez que os valores médios de momento exigidos por ele foram inferiores e estatisticamente diferentes, em nível de 1 % de probabilidade, em relação àqueles exigidos pelo disco liso.

Desta forma pode-se afirmar que o disco liso foi o que apresentou pior desempenho quanto à magnitude do momento aplicado ao centro do disco, enquanto o disco dentado, na profundidade de trabalho de 80 mm, apresentou desempenho superior aos discos recortado e liso.

5.3.4.4. Avaliação da razão de velocidades (λ).

A razão de velocidades, representada por λ , foi determinada, conforme apresentado na metodologia, em função da velocidade de deslocamento do centro do disco e de sua velocidade angular. Para a obtenção da magnitude da velocidade angular do disco foram utilizados a frequência de coleta de dados e o sinal tratado do sensor indutivo que estava acoplado ao eixo do disco de corte.

O estudo da razão de velocidades é importante para a avaliação do desempenho dos discos porque ela representa o deslizamento do disco quando em operação. Quando o disco desliza empurra o palhiço para frente, que se acumula dificultando o seu trabalho, por aumentar a exigência de momento de corte, além de elevar a cota do ponto de contato entre a superfície da camada de palhiço e o disco de corte. O palhiço, para ser cortado deve ser conduzido para baixo, contra o solo. Se a cota do ponto de contato entre o palhiço e o disco for muito alta, a velocidade resultante do disco, naquele ponto provoca o movimento do palhiço para frente. Este fato faz com que o disco não consiga efetuar o trabalho de corte, resultando em “embuchamento”.

TABELA 18 – Resumo da análise de variância para a razão de velocidades “ λ ” obtida no primeiro experimentos.

Fonte	GL	QM	F	P
Disco-prof.	5	0,0109315	150,55	0,000
Bloco	5	0,0004475	6,16	0,001
Erro	24	0,0000726		
Total	34			

A análise de variância da razão de velocidades, cujo resumo se encontra na Tabela 18, mostrou que há diferença significativa, em nível de 1 % de probabilidade, entre os tratamentos adotados. Sendo assim, aplicou-se o teste de Tukey para comparação entre médias.

As médias dos valores de lambda obtidos nos tratamentos estão apresentadas na Tabela 15, acompanhados do resultado do teste de Tukey para médias. O teste de médias revelou que os valores de razão de velocidades do disco dentado foram significativamente superiores aos demais discos, com médias de 1,060 e 1,062, para as profundidades de operação de 80 mm e 100 mm, respectivamente. O disco recortado, para as mesmas profundidades de operação, apresentou médias de razão de velocidades iguais a 1,013 e 1,022. Os valores médios deste atributo para o disco liso, nas mesmas profundidades, foram respectivamente de 0,968 e de 0,96, diferindo estatisticamente das médias obtidas para o disco recortado.

O desempenho do disco será melhor, quanto maior for o valor da razão de velocidades λ , no entanto este valor, teoricamente, não poderia ser superior a um, em se tratando de rolamento

puro. Mas, quando se trata de discos de corte de rolamento, o raio dinâmico tende a ser menor que o raio externo do disco, pois ele é um corpo rígido e parte dele trabalha inserida no solo. Desta forma a velocidade tangencial da periferia do dente é maior do que a desenvolvida no ponto onde se localiza o raio dinâmico. Em função disto e considerando-se que λ é calculada em função da velocidade periférica do disco é fácil compreender que valores superiores a um são passíveis de ocorrerem, mesmo que os discos sejam tracionados.

MAGAÑA et al. (1994) observaram, em trabalho desenvolvido em caixa de solo, que o disco recortado apresentou patinagem ($\lambda > 1$) e ela foi maior para profundidades maiores. Também observaram que o disco liso apresentou deslizamento ($\lambda < 1$) e que a percentagem deste deslizamento é maior para profundidades menores.

Os discos dentados e recortados apresentaram, como pode ser observado na Tabela 15, valores de λ superiores a um, demonstrando que estes discos desenvolveram velocidades tangenciais, em sua borda, superiores às velocidades de deslocamento de seus centros, caracterizando a ocorrência de patinagem. Ela é extremamente benéfica para o corte do palhço, pois determina que a resultante de velocidades tenha uma direção mais favorável ao corte. Como já foi mencionado, para que o disco possa efetuar o corte do palhço de forma eficiente, é necessário que o palhço seja movimentado para baixo, para que fique preso entre o solo e o gume do disco de corte. Se, além de ser movimentado para baixo ele for movimentado, também, para traz a eficiência do corte será maior ainda.

A diferença na razão de velocidades entre o disco dentado e o liso foi da ordem de 10 %, sendo que o disco liso apresentou um deslizamento da ordem de 4 %, enquanto o disco dentado apresentou uma patinagem da ordem de 6 %. Esta diferença foi da ordem de 4 % entre os discos recortado e liso e entre os discos recortado e dentado. Estas diferenças entre os valores médios de λ foram suficientemente grandes para apresentar diferenças significativas, em nível de 1 % de probabilidade, pelo teste de Tukey. Desta forma pode-se afirmar que o disco dentado foi o que apresentou o melhor desempenho, quanto à razão de velocidades, seguido do disco recortado. O disco liso foi o que apresentou o pior desempenho entre os disco estudados.

5.3.4.5. Avaliação da quantidade de palhço enterrado pelos discos.

Os atributos até agora analisados e discutidos avaliaram o desempenho mecânico do disco, mas não são capazes de avaliar a sua habilidade em cortar o palhço. A utilização de um

atributo, capaz de medir a habilidade do disco em cortar o palhiço se fez necessário, pois de nada adiantaria obter discos eficientes, do ponto de vista mecânico, mas que não conseguem cortar o palhiço. Assim, a habilidade do disco em cortar restos culturais passou a ser uma variável imprescindível na avaliação do desempenho dos discos de corte.

As condições de ensaio do experimento foram adversas, como já discutido anteriormente, de forma que o palhiço que não era cortado pelo disco era conduzido para dentro do sulco, em função da sua pouca resistência à deformação. O disco de corte pressionava o palhiço não cortado contra o solo, que não resistia e se deformava permitindo que o palhiço fosse empurrado para dentro do sulco, onde ficava depositado. O palhiço introduzido no sulco ficava preso e o restante deste material, solto na superfície do solo, podia ser facilmente removido.

O palhiço que estava solto na superfície do solo foi removido cuidadosamente, de forma que só restou aquele que ficara enterrado no solo, como pode ser observado nas Figuras 34 e 35. Para quantificar o palhiço não cortado, o material introduzido no solo foi recolhido, em uma extensão de 2 metros de sulco, para cada ensaio e levado para ser pesado. Amostras deste material foram retiradas e levadas para determinação da sua umidade. As referidas figuras mostram fotos de todos os blocos do primeiro experimento, após a retirada do palhiço que recobria o solo, e manutenção apenas daquele que havia sido enterrado na passagem dos discos de corte.

Observa-se nas figuras que o palhiço introduzido no solo estava preso e foi facilmente separado do restante. A foto referente ao Bloco 5, Figura 35, na sua parte superior, mostra o palhiço distribuído em toda a superfície do solo, antes da separação, bem como os limitadores definindo a extensão de dois metros, onde o material enterrado no solo seria coletado.

O atributo denominado de “**Qpalha**” se refere à quantidade de palhiço, em peso seco, enterrado pelo disco, em cada metro de sulco. A Tabela 19 apresenta a análise de variância para o atributo em questão.

A análise de variância demonstrou que para a quantidade de palhiço não cortado há diferença significativa, em nível de 1 % de probabilidade, pelo teste “**F**” entre os tratamentos adotados. Sendo assim, as médias obtidas para cada tratamento foram comparadas entre si, pelo teste de Tukey, em nível de 1 % de probabilidade. As médias e o resultados deste teste estão apresentados no Tabela 15.

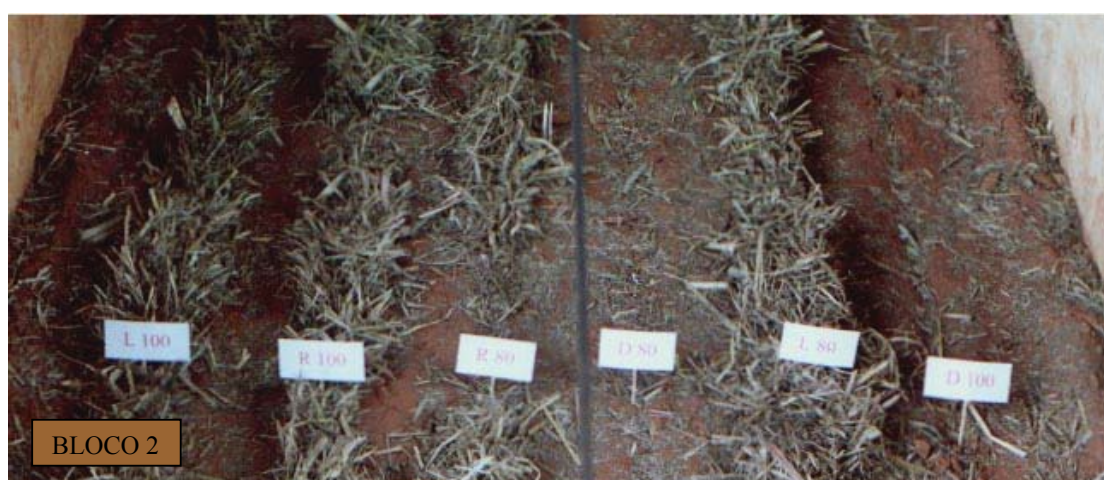


FIGURA 34 – Fotos dos blocos 1, 2 e 3, antes da coleta do palhicho que foi enterrado pelos discos

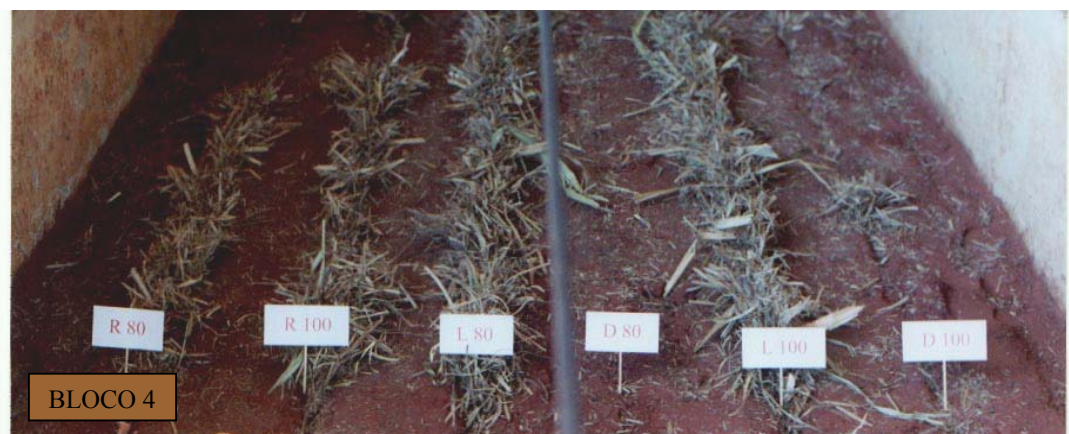


FIGURA 35 – Fotos dos blocos 4, 5 e 6, antes da coleta do palhiço que foi enterrado pelos discos



FIGURA 36 – Detalhe do corte efetuado pelo disco dentado (A) e pelo disco liso (B)

TABELA 19 – Resumo da análise de variância para quantidade de palhiço enterrado pelos discos “Qpalha” no primeiro experimento.

Fonte	GL	QM	F	P
Disco-prof.	5	370,171	84,89	0,000
Bloco	5	9,165	2,10	0,100
Erro	24	4,361		
Total	34			

O teste de média revelou que, nos três discos estudados, não houve diferenças significativas nas quantidades de palhiço cortada entre as duas profundidades de operação adotadas. Ele revelou, também, que o disco dentado apresentou melhor desempenho no corte do palhiço, pois a quantidade média de palha enterrada por este disco foi significativamente inferior às médias obtidas para os outros dois discos. Enquanto o disco dentado, na profundidade de trabalho de 80 mm, enterrou uma média de $2,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$ de palhiço, o disco recortado enterrou $127,1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$ e o disco liso, por sua vez, enterrou $272,3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$ de palhiço. Na profundidade de operação de 100 mm, os valores obtidos foram de $18,8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$, $154,8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$ e de $310 \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$, para os discos dentado, recortado e liso, respectivamente.

Estes resultados demonstraram, que o disco dentado apresentou maior habilidade para cortar o palhiço do que os discos recortado e liso. A Figura 36 mostra, em detalhe, o trabalho efetuado pelo disco dentado e pelo disco liso. O palhiço, por onde passou o disco dentado, ficou cortado, pois houve completa separação das partes. O mesmo já não ocorreu com o palhiço, por onde passou o disco liso, que ficou esmagado, ou seja, houve a falha do material, mas não houve a separação total das partes, em muitas unidades de palhiço, como pode ser observado na referida figura. O material que compõe o palhiço que não foi separado é forçado, pelo disco, a penetrar no solo. Há casos em que o material é pressionado para dentro do solo e acaba sendo cortado pelo disco no trajeto, com o auxílio das forças de atrito entre o palhiço e as paredes do sulco, mas, na maioria dos casos, ele termina por ser introduzido pelo disco até o fundo do sulco.

As médias obtidas para a quantidade de palhiço enterrada pelo disco recortado demonstram que este disco apresentou maior habilidade em cortar o palhiço, em relação ao disco liso. Os estudos desenvolvidos por MAGAÑA et al. (1994) demonstraram que o disco recortado, com razão entre o diâmetro do disco e a profundidade do recorte igual a 19,1, apresentou melhor desempenho no corte da palhada que o disco liso. KEPNER et al. (1978) já salientavam que este tipo de disco era mais indicado para trabalhos em áreas com grande quantidade de restos culturais.

Os resultados obtidos na avaliação da quantidade de palhiço enterrada pelos tipos de discos estudados permitiram afirmar que, nas condições estabelecidas para os ensaios, o disco liso, que equipa na atualidade os cultivadores de cana brasileiros, foi o que apresentou o pior desempenho no corte do palhiço da cana-de-açúcar. O disco dentado se revelou como sendo o de melhor desempenho entre os três discos estudados e o disco recortado apresentou um comportamento intermediário, pois cortou mais palhiço que o disco liso, mas foi superado pelo dentado.

Após a análise comparativa entre os três discos de corte de rolamento pode-se afirmar que o disco dentado apresentou desempenho superior ao do disco liso, pois em todos os atributos utilizados na avaliação sua resposta foi melhor. O disco recortado também apresentou resposta superior ao do disco liso em quase todos os atributos estudados. A exceção foi na força horizontal, onde o disco liso, trabalhando na profundidade de 80 mm requereu, estatisticamente, o mesmo nível de força que os discos recortados. No entanto, quando o disco liso trabalhou na

profundidade de 100 mm o requerimento de força horizontal exigido por este disco foi estatisticamente superior ao do disco recortado.

MAGANHA et al. (1994) em estudo para avaliar o desempenho de 4 discos, com geometrias de recortes diferentes concluíram que o melhor disco foi aquele que apresentou uma razão entre diâmetro e profundidade do recorte de 19,1 e que estes discos devem trabalhar com uma razão entre diâmetro e profundidade de trabalho (D/p) inferior a 5,5, para que tenham desempenho satisfatório no que se refere ao corte de palhadas. O disco recortado utilizado no primeiro experimento tem uma razão entre diâmetro e profundidade do recorte de 17,4 e trabalhou com razões entre diâmetro e profundidade de operação de 7,6 e 6,1 para as profundidades de 80 mm e 100 mm, respectivamente.

Os resultados obtidos com este disco demonstraram que em todos os atributos estudados, as diferenças entre as duas profundidades não foram significativas. No entanto, o disco recortado, mesmo trabalhando com razão de 7,6 se mostrou mais hábil no corte do palhiço que o disco liso, demonstrando que o limite de 5,5 apresentado pelos autores mencionados não se aplica nas condições em que o experimento foi realizado.

A comparação do disco dentado com o recortado, na profundidade de trabalho de 80 mm, mostra que o dentado é superior ao recortado em todos os atributos, com exceção à força horizontal. No entanto, quando a comparação é feita na profundidade de 100 mm, constata-se que o disco dentado só é superior ao recortado nos atributos razão de velocidades e quantidade de palha enterrada. Estes resultados demonstram que o desempenho do disco recortado melhorou, em relação ao disco dentado, com o incremento da profundidade, mas continua sendo inferior àquele nos atributos que medem a habilidade de cortar o palhiço.

Outra constatação é que a razão de velocidades e a habilidade do disco em cortar o palhiço foram os atributos que apresentaram as diferenças mais nítidas, mostrando que todos os discos diferiram estatisticamente entre si. Os resultados apresentados por estes atributos indicaram que há uma relação estreita entre o valor de λ e a habilidade do disco em cortar o palhiço. Para confirmar esta suspeita foi realizada uma análise de correlação, apresentada no Apêndice 10, entre todos os atributos estudados, sendo que a correlação entre λ e quantidade de palhiço enterrado foi o que apresentou o maior coeficiente, de $-0,94$. Esta alta correlação confirma a existência de uma relação estreita e inversa entre estas duas variáveis, ou seja, a quantidade de palhiço enterrado aumenta com o decréscimo do valor de λ .

Também foi possível observar que o atributo força horizontal não conseguiu separar estatisticamente, com clareza, as diferenças de desempenho dos tipos de discos estudados, mas a força vertical se mostrou sensível, devendo ser um dos principais atributos a serem analisados quando se pretende avaliar o desempenho de discos de corte de rolamento, juntamente com a razão de velocidades e a habilidade de corte do disco.

5.3.5. Análise dos atributos utilizados na avaliação dos três discos dentados de corte estudados (Experimento 2).

O segundo experimento foi realizado utilizando-se de 3 discos dentados, conforme descrito na metodologia, com a finalidade de se avaliar o comportamento deste tipo de disco, em função de seu diâmetro. A seguir, é analisado o comportamento dos discos dentados, por meio dos mesmos atributos utilizados no primeiro experimento.

5.3.5.1. Avaliação da força vertical.

A força vertical, como salientado é um dos principais atributos a ser analisado sob o ponto de vista do desempenho do disco, pois quanto maior a força vertical necessária para que o disco corte o palhiço, maior será a necessidade de peso no implemento. Desta forma, a minimização da força vertical significa um grande avanço no trabalho de melhorar o desempenho de discos de corte de rolamento.

A Tabela 20 apresenta o resumo da análise de variância para a força vertical, onde observa-se que os tratamentos (discos) apresentaram diferença significativa, em nível de 1 % de probabilidade pelo teste “F”. Os valores médios de força vertical obtidos para os três discos dentados, com diâmetros diferentes, foram comparados entre si pelo teste de Tukey. As médias deste atributo, acompanhadas do resultado do teste de Tukey, estão apresentadas na Tabela 21.

O disco de 508 mm (20”) de diâmetro foi o que apresentou o melhor desempenho, com relação ao requerimento de força vertical, uma vez que ele exigiu 1,465 kN, valor significativamente menor do que as forças exigidas pelos discos de 24 e 28 polegadas, que foram de 1,924 kN e 2,101 kN, respectivamente. As diferenças na força vertical entre os discos de 609,6 mm (24”) e 711,2 mm (28”) também foram estatisticamente diferentes pelo teste de Tukey. Este resultado demonstra que a força vertical exigida pelos discos dentados, também é diretamente proporcional ao seu diâmetro, como ocorre com os discos lisos.

TABELA 20 – Resumo da análise de variância para a força vertical “FV” obtida no segundo experimento.

Fonte	GL	QM	F	P
Disco	2	0,86236	69,37	0,000
Bloco	3	0,14203	11,42	0,000
Erro	18	0,01243		
Total	23			

TABELA 21 – Médias dos atributos utilizados para a avaliação do desempenho dos três discos dentados estudados (segundo experimento).

Tratamentos (disco)	Médias *			
	FV (kN)	M _C (m kN)	Lambda	Qpalha (g m ⁻¹)
Dentado 508 mm	1,465 A	0,070 A	1,091 A	2,3 A
Dentado 609,6 mm	1,924 B	0,098 B	1,079 B	5,5 A
Dentado 711,2 mm	2,101 C	0,094 B	1,079 B	26,2 B

Obs.: * Médias, para um mesmo atributo, seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, em nível de 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

5.3.5.2. Avaliação da força horizontal.

A análise de variância da força horizontal, para os três discos dentados, cujo resumo se encontra na Tabela 22, não apresentou diferença significativa para tratamentos, pelo teste “F”, sequer em nível de 5 % de probabilidade. Assim, não se fez necessário o teste de média e pode-se afirmar que não houve diferença significativa entre as médias de força horizontal solicitadas pelos discos dentados com diâmetros diferentes. A título de conhecimento, os valores médios de força horizontal, obtidos pelos discos de 508 mm (20”), 609,6 mm (24”) e 711,2 mm (28”) foram respectivamente de 0,594 kN, 0,654 kN e 0,577 kN.

Constata-se, aqui, que para os discos dentados não houve uma relação direta entre a força vertical e a força horizontal, como ocorre com os discos lisos, segundo relatos de alguns

autores, como KUSHWAHA et al. (1986 - a) e CHOI & HERBACH (1986). Eles observaram que a exigência de força vertical e força de tração, para o disco liso, aumenta com o incremento do diâmetro do disco. A análise da força vertical obtida nos ensaios mostrou diferenças significativas entre os três discos dentados avaliados, no entanto as médias para a força horizontal destes mesmos discos não diferiram estatisticamente entre si, demonstrando que a força de tração exigida pelo disco dentado para cortar o palhiço não dependeu da carga vertical, mas sim da interação do dente do disco com o solo e o palhiço a ser cortado.

TABELA 22 – Resumo da análise de variância para a força horizontal “FH” obtida no segundo experimento.

Fonte	GL	QM	F	P
Disco	2	0,01290	3,28	0,061
Bloco	3	0,03559	9,05	0,001
Erro	18	0,00393		
Total	23			

5.3.5.3. Avaliação do momento aplicado ao centro do disco.

A análise da variância para o momento aplicado ao centro do disco, Tabela 23, mostrou que há diferença significativa entre tratamentos, em nível de 1 % de probabilidade pelo teste “F”. O teste de Tukey, Tabela 21, mostrou que as médias dos momentos aplicados ao centro dos discos de 609,6 mm (24”) e 711,2 mm (28”) não diferiram estatisticamente entre si, mas foram superiores à média solicitada pelo disco de 508 mm (20”). Aqui, novamente, o disco de 508 mm (20”) mostrou um desempenho melhor do que os apresentados pelos outros dois discos, por solicitar um momento de 0,07 m.kN, contra 0,098 m.kN e 0,094 m.kN solicitados pelos discos de 609,6 mm (24”) e 711,2 mm (28”), respectivamente.

A magnitude das forças vertical e horizontal produzem uma resultante de força, que por sua vez, aplicada a uma dada distância do centro do disco lhe confere um momento de força. Assim, existe uma relação direta entre estes três atributos estudados. As diferenças entre as forças horizontais solicitadas pelos discos dentados não se mostraram significantes, mas a influência da força vertical foi suficientemente grande para produzir diferenças significativas entre o momento

solicitado pelo disco de 508 mm (20”) em relação aos discos de 609,6 mm (24”) e 711,2 mm (28”).

TABELA 23 – Resumo da análise de variância para a o momento aplicado ao centro do disco “**M_C**” no segundo experimento.

Fonte	GL	QM	F	P
Disco	2	0,0018203	36,29	0,000
Bloco	3	0,0006925	13,80	0,000
Erro	18	0,0000502		
Total	23			

5.3.5.4. Avaliação da razão de velocidades (λ).

A análise de variância, Tabela 24, mostrou que também havia diferença significativa da razão de velocidades para tratamentos, indicando que pelo menos um dos tratamentos diferia estatisticamente dos demais. Desta forma procedeu-se a análise dos tratamentos, comparando-se as médias para eles obtidas, por meio do teste de Tukey, em nível de 1 % de probabilidade.

TABELA 24 – Resumo da análise de variância para a razão velocidade (λ) obtida no segundo experimento

Fonte	GL	QM	F	P
Disco	2	0,0004167	8,18	0,003
Bloco	3	0,0000486	0,95	0,435
Erro	18	0,0000509		
Total	23			

As médias obtidas para a razão de velocidades estão apresentadas na Tabela 21, acompanhadas do resultado do teste de Tukey. O disco de 508 mm (20”) apresentou um valor médio para λ de 1,091 enquanto os discos de 609,6 mm (24”) e 711,2 mm (28”) apresentaram uma média igual a 1,079. Embora os três discos apresentassem valores para este atributo superior a um, o disco de 508 mm (20”) foi o que alcançou o maior valor, correspondente

a uma patinagem de quase 10 %. Estes valores de patinagem demonstram que as pontas dos dentes desenvolveram velocidades superiores à de deslocamento do centro do disco. Este comportamento é muito interessante do ponto de vista do corte do palhicho, como já foi discutido anteriormente, pois produz uma resultante de velocidade com direção mais propícia ao corte do palhicho do que quando o disco se desloca com deslizamento. Desta forma o comportamento dos três discos foi interessante para o bom desempenho com relação ao corte do palhicho, no entanto o disco de 508 mm (20”) foi estatisticamente superior aos demais.

5.3.5.5. Avaliação da quantidade de palhicho enterrado pelos discos.

Este atributo foi o que avaliou a habilidade dos discos em cortar o palhicho de cana, como já discutido anteriormente. A análise de variância mostrou que houve diferença significativa para tratamentos, conforme pode ser observado no resumo apresentado na Tabela 25.

TABELA 25 – Resumo da análise de variância para a quantidade de palhicho enterrado obtida no segundo experimento

Fonte	GL	QM	F	P
Disco	2	5.385,6	16,67	0,000
Bloco	3	370,6	1,15	0,357
Erro	18	323,0		
Total	23			

A quantidade de palha enterrada pelos discos recortados foi pequena, quando se compara com as quantidades enterradas pelos discos lisos, no primeiro experimento. A Tabela 21 mostra que o disco de 508 mm (20”) enterrou, em média, apenas 2,3 g·m⁻¹ de palhicho, enquanto os discos de 609,6 mm (24”) e 711,2 mm (28”) enterraram 5,5 g·m⁻¹ e 26,2 g·m⁻¹. Observa-se, também, que o resultado do teste de médias revelou que os discos de 508 mm (20”) e 609,6 mm (24”) não diferiram estatisticamente entre si, no que se refere à habilidade de cortar o palhicho. Já o disco de 711,2 mm (28”) apresentou um desempenho inferior ao dois outros discos.

Após a análise dos atributos utilizados na avaliação do desempenho dos discos de corte de rolamento dentados observa-se que o disco de 508 mm (20”) foi superior ao disco de 711,2

mm (28”), em todos os atributos utilizados na avaliação. O desempenho do disco de 609,6 mm (24”) pode ser, também, considerado superior ao de 711,2 mm (28”), pois foi estatisticamente superior nos atributos força vertical e quantidade de palha enterrada, que são dois dos mais importantes atributos que podem ser utilizados na avaliação de desempenho de discos de corte.

A análise de correlação não mostrou alta significância para os discos dentados, como pode ser observado nos dados apresentados no Apêndice 10. Observa-se que a tendência de acréscimo ou decréscimo na magnitude dos atributos estudados não foi linear, principalmente para o momento aplicado ao centro do disco e para a razão de velocidades, resultando em baixa correlação entre eles.

A Tabela 11 apresenta os principais elementos dimensionais, para os três discos dentados que foram estudados no segundo experimento. Nele é possível observar que poucas são as dimensões que apresentam grandes diferenças entre os discos. Há diferenças consideráveis no ângulo da ponta do dente (ϵ), no comprimento da borda cortante do dente (\overline{bc}), na distância efetiva de corte e na relação altura / largura do dente, além do diâmetro. A distância efetiva de corte é uma variável que contempla o comprimento da borda cortante do dente e a relação entre a altura e a largura do dente. Assim, além do diâmetro, as duas outras variáveis que podem ter interferido no corte são o ângulo da ponta do dente (ϵ) e a distância efetiva de corte.

As diferenças entre os três discos dentados foram pequenas, para todos os atributos utilizados no experimento comparativo, mas se mostraram significativas. Estas diferenças podem estar relacionadas com o fato dos discos terem distâncias efetivas de corte diferentes. As distâncias efetivas de corte representam o comprimento sobre a camada de palhicho que cada dente do disco, mais seu vão, terão que cortar, considerando-se um determinado deslizamento. Os discos de 508 mm (20”), 609,6 mm (24”) e de 711,2 mm (28”) têm distâncias efetivas de corte de 115 mm, 122 mm e de 130 mm respectivamente, trabalhando sem deslizamento. Observa-se que o disco de 508 mm (20”) tem uma distância efetiva de corte menor do que os outros, logo cada dente estará responsável por uma seção de palhicho menor.

O ângulo da ponta do dente (ϵ) é outro elemento dimensional que pode ter interferido no processo de corte, de forma que as diferenças obtidas entre os três discos fossem significativas. Os valores para o ângulo ϵ dos discos de 508 mm (20”), 609,6 mm (24”) e 711,2 mm (28”) foram, respectivamente de 26°, 31,6° e 36,4°. Quanto maior o valor deste ângulo, menor serão os ângulos oblíquos (A_o) desenvolvidos durante o processo de corte efetivo do palhicho. Como

apresentado e discutido no Artigo 1, o ângulo oblíquo tem relação inversa com a força de corte necessária.

5.4. CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos neste trabalho, considerando as condições em que ele foi realizado, permitiram concluir que:

- O desempenho do disco dentado no corte do palhiço foi superior ao dos discos liso e recortado;
- O disco liso foi o que apresentou o pior desempenho entre os três tipos de discos estudados;
- A profundidade de trabalho de 80 mm foi a mais adequada para o disco dentado;
- O atributo força horizontal foi o que mostrou a menor variação na avaliação entre os discos dentado e recortado, mostrando não ser um bom indicador do desempenho de discos de corte de rolamento;
- A habilidade de cortar a palha, representada pela quantidade de palhiço enterrada e a razão de velocidades foram os atributos que apresentaram as diferenças mais nítidas na avaliação entre os tipos de discos.
- A força vertical, a razão de velocidades λ e a habilidade do disco em cortar a palha são os atributos que devem ser utilizados na avaliação de desempenho de discos de corte de rolamento;
- A força de tração exigida pelos discos de corte dentados não dependeu da carga vertical, mas sim da interação do dente do disco com o solo e o palhiço a ser cortado;
- A profundidade de trabalho de 80 mm foi suficiente para o disco dentado cortar, com eficiência, o palhiço de cana;
- Os Discos de corte de rolamento dentados não necessitam ter mais do que 610 mm de diâmetro para trabalhar em cultivadores de cana;
- A demanda de força vertical nos discos dentados foi, também, diretamente proporcional ao seu diâmetro, como ocorre nos discos lisos;
- O disco dentado exigiu força vertical inferior ao disco liso.

5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. ASAE S313.3- Soil cone penetrometer. St. Joseph: **Agricultural Engineers Yearbook of Standards**, 834-835, 1999.

BIANCHINI, Aloisio; MAIA, João Carlos de Souza; MAGALHÃES, Paulo Sérgio Graziano; CAPPELLI, Nelson. Penetrógrafo eletrônico automático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande. 2002. (*no prelo*).

CHOI, Chang H.; ERBACH, Donald C. Cornstalk residue shearing by rolling coulter. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph. 29(6): 1530-1535, nov./dec., 1986.

CHANCELLOR, W. J. Energy requirements for cutting forage. **Agricultural Engineering**, 39: 633-636. oct. 1958.

COCHRAN, B. J.; PORTERFIELD, J. G.; BATCHELDER, D. G. Vertical forces on furrow opener and depth control devices. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph. 17(2): 443-446, mar./apr., 1974.

HORTIZ-CANAVE, Jaime. **Las máquinas agrícolas y su aplicacion**. Madrid: Mundi Prensa, 1984. 468 p.

KEPNER, R. A.; BAINER, Roy; BARGER, E. L. **Principles of farm machinery**. 3^a ed. Westport: Avi Publishing Company, 1978. 527p.

KUSHWAHA, R. L.; VAISHNAV, A. S.; ZOERB, G. C. Shear strength of wheat straw. **Canadian Agricultural Engineering**, 25(2): winter 163-166, 1983.

KUSHWAHA, R. L.; VAISHNAV, A. S. and ZOERB, G. C. Performance of powered-disc coulter under no-till crop residue in the soil bin. **Canadian agricultural engineering**, 28(2): 85-90, 1986

SCHAAF, D. E.; HANN, S.; LINDWALL, C. W. Development of performance and data on seed drill coulters. CASE Paper nº 80-303. Edmonton. 1980. apud KUSHWAHA, R. L.; VAISHNAV, A. S.; ZOERB, G. C. Soil bin evaluation of disc coulters under no-till crop residue conditions. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, 29(1): 40-44, jan-feb. 1986 (a).

LICKSKO, Z. J.; HARRISON, H. P. Acquisition and processing of soil reaction forces and tillage tools. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, 31(2): 315-318, mar./apr., 1988.

MAGAÑA, S. G. Campos; RICO, D. Moreno; WILLS, B. M. Kinematics of notched disc coulters. In: ASAE INTERNATIONAL SUMMER MEETING. 1994, Kansas City. **Paper Nº 941009**. Kansas City: American Society of Agricultural Engineering, 40p. 1994.

MORRISON Jr., J.E.; HENDRICK III, J.G. and SCHAFER, R.L. Soil forces on coulters and disc-opener combinations. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, 39(2): 369-376, mar./apr., 1996.

NIEUWENBURG, P.I.J; SPEELMAN, L. and WENSINK, H.E. An evaluation of some coulters designs. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, 51: 67-80, 1992.

SADE, Maury. Uma breve história...In: Encontro nacional de plantio direto na palha, 7, 2000, Foz do Iguaçu. **Resumos...**Foz do Iguaçu: Federação Brasileira de Plantio Direto na palha, 168p., p. 15-17, 2000.

SOUZA, W. R.; MAGALHÃES, P. S. G. Projeto e construção de um transdutor para teste de Implementos Agrícolas. In: CONBEA - Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 19, 1989, Recife. **Anais...** Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, v. 1, p. 295-306, 1990.

TICE, E.M.; HENDRICK, J.G. Disc coulters operating characteristics. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, 35(1): 3-10, jan-feb. 1992.

WELLS, L.G.; SMITH, D.E.; HAMMETT, H.J. Analysis and testing of powered tillage blades. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, 23(5): 1379-1382, nov-dec, 1980.

WELLS, L.G.; SMITH, D.E.; HAMMETT, H.J.; THOMPSON, Jr. H.J. Ground driven powered tillage. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, 23(5): 1383-1387, nov-dec, 1980a.

6. CONCLUSÕES GERAIS

O presente trabalho foi desenvolvido em três etapas, que estão apresentadas em capítulos, na forma de artigos técnicos. Este trabalho buscou, como objetivo geral, desenvolver um disco de corte de rolamento, com geometria de borda dentada que apresentasse vantagens, em relação ao disco de corte de rolamento liso que, normalmente, equipa os implementos agrícolas, onde estas ferramentas para corte de restos vegetais se fazem necessárias. A revisão da bibliografia mostra a necessidade de aprimoramento dos discos de corte para o cultivo da cana-de-açúcar. Os implementos utilizados no cultivo pós-colheita dos canaviais, onde a queima de limpeza não deve mais ser realizada, não tem apresentado bons resultados devido à ineficiência do disco de corte de rolamento liso.

Após todas as discussões em torno do assunto estudado pôde-se chegar às seguintes conclusões gerais:

- O estudo do comportamento da palha de cana-de-açúcar ao corte permitiu definir a magnitude das forças envolvidas no processo de corte deste material, por cisalhamento e constatar que a presença do ângulo oblíquo entre a lâmina de corte e o anteparo facilita sobremaneira o corte do material vegetal, no processo de corte por cisalhamento;
- A rotina computacional elaborada permitiu simular o comportamento dos discos de corte dentados, viabilizando uma análise mais criteriosa destes discos. Do contrário, a confecção dos protótipos que foram levados para ensaios na caixa de solo, seria realizada baseada, apenas, na conformação geométrica dos dentes. Os resultados das simulações, portanto, serviram para orientar e auxiliar nas decisões quanto ao dimensionamento dos discos que foram confeccionados para os ensaios.
- A força vertical aplicada ao centro do disco e a quantidade de palha introduzida no sulco pelos discos foram os dois atributos mais importantes na avaliação dos discos de corte;
- Os Discos de corte de rolamento dentados não necessitam ter mais do que 610 mm de diâmetro para trabalhar em cultivadores de cana-de-açúcar;
- O sucesso do projeto do disco de corte de rolamento dentado se deve ao fato de que todos os pressupostos levantados em materiais e métodos foram atendidos;

- O disco de corte de rolamento dentado apresenta melhor desempenho no corte de palhiço, em relação ao disco de corte de rolamento liso, pois requer menor carga sobre seu mancal e tem maior habilidade de corte.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS GERAIS

ABRAMO FILHO, J.; MATSUOKA, S.; SPERANDIO, M.L.; RODRIGUES, R.C.D. & MARCHETTI, L.L. Resíduo da colheita mecanizada de cana crua. **Açúcar & Alcool** 13 (67): 23-5, 1993.

AGRÍCOLA INFORMA. **Centro de Tecnologia Copersucar**, Setembro/1998 n.º 92.

ARÉVALO, Roberto A. Manejo de plantas daninhas em áreas de colheita de cana crua. In: SEMANA DA CANA DE AÇÚCAR DE PIRACICABA. 3, 1998. **Anais...**Revista STAB. Piracicaba. 1998. p. 26-8.

BERTONI, J. e LOMBARDI NETO. Conservação de solos. Piracicaba, Livro Ceres, 1985. 392pp.

BEER, A. G.; HUDSON, C.; MEYER, E.; SEIGMUND, B. Green cane harvesting and trash management. In: **International Society Of Sugarcane Technologists**, 22. Cartagena, Colômbia. 1995. Prociding, volume 2, Tecnicaña, 1996. Cali. p. 133-41.

CANTARELLA, H. Adubação nitrogenada em sistema de cana crua. In: **Semana da Cana de Açúcar de Piracicaba**. 3, 1998. **Anais...**Revista STAB. Piracicaba. 1998. p. 21-2.

CARNAÚBA, B. A. A. **Eficiência de utilização e efeito residual da uréia ¹⁵N em cana-de-açúcar (*Saccharum spp*), em condições de campo**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP, 1989. 98 p. Tese Mestrado.

CASAGRANDE, A. A.; MELO, W. G.; PEREIRA, R. ; MUTTON M.A.; BARBOSA J. C. & CAMPOS M. S. Influence of residues from mechanical harvesting and vinasse on soil nitrogen in sugarcane ratoon crops. In: **Internatinal Society of Sugarcane Technologists Congres**, 22. Cartagena, Colômbia. 1995. Proccedings. Tecniana, Cali. 1996. . p. 67-9.

CHAPMAN, L. S. & HAYSON, M. B. C. Nitrogen fertilisation for field with sugar cane crop residues. In: **Australian Society of Sugar Cane Technologists**, 13., Bundaberg, may 14-17, 1991. Proceedings. Brisbane: Watson Ferguson, 1991.

CHOI, C.H. & HERBACH, D.C. Cornstalk residue shearing by rolling coulter. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph. 29 (6): 1530-5, 1986.

CONDE, A.J. & DONZELLI, J.L. Manejo conservacionista do solo para áreas de colheita mecanizada de cana queimada e sem queimar. In: **Copersucar – Seminário Copersucar de Tecnologia Agronômica**. 7, 1997. Anais... Centro de Tecnologia Copersucar. Piracicaba. 1997. p. 193-205.

COPERSUCAR – Centro de Tecnologia Copersucar. **Seminário de Tecnologia Agronômica**. 5. 1991. Cultivadores. p. 277-8.

CORSINI, P. C. Problemas causados pela compactação dos solos. Revista STAB 11(5): 8-13, 1993.

DENARDIN, J. E. e KOCHHANN, R. A. Requisitos para implantação e a manutenção do sistema plantio direto. In: **Plantio direto no Brasil**, CNTP/EMBRAPA – FUNDACEP – Fundação ABC, Passo Fundo. Editora Aldeia Norte. p. 19-27.1993, 166p.

DENMEAD, O.T.; FRENEY, J.R.; JACKSON, A.V.; SMITH, J.W.B.; SAFFIGNA, P.G.; WOOD, A.W. & CHAPMAN, L.S. Volatilisation of ammonia from urea and ammonium sulfate applied to sugarcane trash in north Queensland. In: **Australian Society Of Sugar Cane Technologists**, 12., Proceedings ... Watson Ferguson, 1990. p. 72 - 78. (1990)

DICK, R. G. & HURNEY A. P. Technological chang in sugarcane agriculture. In: **Australian Society Of Sugar Cane Technologists Conference**, Proceedings ... Sounville, April-may 28-1, 1986. Brisbane, Watson Ferguson, 1986. p. 69-75.

FRENEY, J. R.; DENMEAD, O. T.; SAFFIGNA, P. G.; WOOD, A. W.; CHAPMAN, L. S. and HURNEY, A. P. Ammonia loss from sugar cane fields as affected by fertilizer placement, irrigation and canopy development. In: **Australian Society Of Sugar Cane Technologists**, 13., Bundaberg, 1991 Proceedings ... Bundaberg: Watson Ferguson, 1991. P. 38-43.

FRENEY, J.R.; DENMEAD, O.T.; SAFFIGNA, P.G.; WOOD, A.W.; CHAPMAN, L.S.; HURNEY, A.P. Ammonia loss from sugar fields as affected by fertilizer placement, irrigation and canopy development. In: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 13., Bundaberg, 1991. **Proceedings...** Bundaberg: Watson Ferguson, 1991. P. 38-43. apud TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A.; OLIVEIRA, M.W.; MURAOKA, T. Potencialidade da mistura de aquamônia com vinhaça na fertilização de canaviais colhidos sem despalha a fogo. Parte II: Perdas por volatilização de amônia e recuperação do ¹⁵N aplicado ao solo. **Revista STAB** 16(3): 23-6, 1998.

GANDINI, M. O. & MONTREZOR, G. Doses de nitrogênio em áreas de vinhaça durante quatro safras na usina Santa Luzia. In: **COPERSUCAR – Seminário Copersucar de Tecnologia Agrônômica**. 6, 1994. Anais... Centro de Tecnologia Copersucar. Piracicaba. 1994. p. 105-10.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, Dispõe sobre proibição das queimadas, Decreto n.º 28.848, p.1, 30/08/1997.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B. and CHAVHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubation. **Soil Science Society American Journal**, 46 p. 970-6, 1982.

JONES, J. N.; MOODY, J. E.; SHEAR, G. M.; MOSCHLER, W. W. E. and LILLARD, J. H. The no-tillage system for corn (*Zea mays* L.) **Agronomy Journal**, v. 60, p. 17-20, 1968.

KONG, W.P.; WOOD, A.W.; PRAMMANEE, P.; SAFFIGNA, P.G.; SMITH, J.W.B. & FRENEY, J.R. Ammonia loss from urea/potassium chloride mixtures applied to sugarcane trash.

In: **Australian Society Of Sugar Cane Technologists**, 13., Bundaberg, 1991 Proceedings ... Bundaberg: Watson Ferguson, 1991. p. 59-65. (1991)

MAGALHÃES, P.S.G. & BRAUNBECK, O.A. Colheita de cana-de-açúcar verde – energia renovável para uma agricultura sustentável. **Agro Artigos – Agricultura Brasileira Online**, WWW.agrobrasil.com.br/index.html p 1-6, 1998

MANECHINI, C. Manejo agrônômico da cana crua. In: **COPERSUCAR – Seminário Copersucar de Tecnologia Agrônômica**. 7, 1997. Anais... Centro de Tecnologia Copersucar. Piracicaba. 1997. p. 309-27

MATTHEWS, A. e MAKEPEACE, P. A new slant on soil erosion control . Canegrowers Quart. Bull. Nº 45. 1981. apud PROVE, B. G.; TRUONG, P. N. and EVANS, D.S. Strategies for controlling caneland erosion in the wet tropical coast of Queensland. In: **Australian Society Of Sugar Cane Technologists Conference**, Sounville , 28-1, 1986. Proceedings. Brisbane, Watson Ferguson, 1986. p. 77- 84. apr./may

McINTYRE, G.; SEERUTTUN, S. and BARBE, C. Trash management in mauritian sugarcane plantations. In: **International Society Of Sugarcane Technologists**, 22. Cartagena, Colômbia. 1995. Prociding, volume 2, Tecnicaña, 1996. Cali. p. 213-16.

MEYER, J. H. Soil management research for sustainable ratoon cane production in the south african sugar industry. In: **International Society Of Sugarcane Technologists**, 22. Cartagena, Colômbia. 1995. Prociding, volume 2, Tecnicaña, 1996. Cali. p. 14-22.

MIYZAWA, M.; CHIERICE, G. O. e PAVAN, M. A. Amenização da toxidade do alumínio às raízes do trigo pela complexação com ácidos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 16 (2): 209-15, 1992.

MORELLI, J.; DEMATTÊ, J. L. I.; DALBEN, A. E. e NELLI, E. Parcelamento da adubação nitrogenada em cana-planta: aplicação foliar. **Revista STAB**, 16 (2): 30-3. Piracicaba, 1997.

NJOS, A. Future land utilization and management for sustainable crop production. **Soil & Tillage Research**. Elsevier. 30: 345-57, 1994.

ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba, Planalsucar, 1983, 367 p.

ORLANDO FILHO, J.; CARMELLO, Q.A.C. ; PEXE, C.A. e GLÓRIA, A.M. Adubação de soqueira de cana-de-açúcar sob dois tipos de despalha: cana crua x cana queimada. . **Revista STAB** 12(4): 7-11, 1994.

ORLANDO FILHO, J.; ROSSETO R.; MURAOKA T. & ZOTELLI, H.B. Efeito do sistema de despalha (cana crua x cana queimada) sobre algumas propriedades do solo. **Revista STAB** 16(6): 30-3, 1998.

PAES, J.M.V; MARCIANO, N.; BRITO, C.H.; CARDOSO, A.A. MARTINEZ, H.H.P. e MENDES, A. Estudos de espaçamentos e doses de nitrogênio na produção e em algumas características biométricas de três variedades de cana-de-açúcar. **Revista STAB** 15(6): 18-20, 1997.

PAGE, R. P.; GLANVILLE, T. J. and TRUONG, P.N. The significance of trash retention trials in the Isis and Maryborough mill areas. In: **Australian Society Of Sugar Cane Technologists Conference**, Sounville , April-may 28-1, 1986. Proceedings. Brisbane, Watson Ferguson, 1986. p. 95-101.

PARRA, M.S. **Dinâmica de matéria orgânica e de nutrientes num solo roxo distrófico submetido aos sistemas de plantio convencional e direto e a diferentes sucessões de culturas**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1986. 94 p. Tese Mestrado.

PENATTI, C. P. & FORTI, J. A. Adubação nitrogenada em soqueira de cana-de-açúcar – Resultados preliminares. In: **Copersucar – Seminário Copersucar de Tecnologia Agrônômica**. 6, 1994. Anais... Centro de Tecnologia Copersucar. Piracicaba. 1994. p. 99-104.

PLATFORD, G.G. The determination of some soil erodibility factors using a rainfall simulator. In: **Association Annual Congress, 56, South African Sugar Technologists' Association**. Mount Edgecombe, June/1982. Proceedings. Natal, 1982. P. 130-3

PRAMMANEE, P.; SAFFIGNA, P.G.; WOOD, A.W. & FRENEY, J.R. Loss of nitrogen from urea and ammonium sulphate applied to sugar cane crop residues. In: **Australian Society of Sugar Cane Technologists**, 11. Proceedings ... Bundaberg: Watson Ferguson, 1989. p. 76 - 84.

PROVE, B. G.; TRUONG, P. N. and EVANS, D.S. Strategies for controlling caneland erosion in the wet tropical coast of Queensland. In: **Australian Society Of Sugar Cane Technologists Conference**, Sounville , April-May 28-1, 1986. Proceedings. Brisbane, Watson Ferguson, 1986. p. 77- 84.

REYNOSO, Alvaro. Ensayo sobre el cultivo de la caña de azúcar, La Habana, **El Magazine de la Haza**, 1862. 525p. Apud ARÉVALO, Roberto A. Manejo de plantas daninhas em áreas de colheita de cana crua. In: SEMANA DA CANA DE AÇÚCAR DE PIRACICABA. 3, 1998. **Anais...Revista STAB**. Piracicaba. 1998. p. 26-8.

REVISTA PLANTIO DIRETO – edição especial. 25 anos de plantio direto na fazenda România. Setembro/outubro. 1997. p. 32-5.

RIDGE, D. R. and DICK, R. G. The adoption of green cane harvesting and trash blanketing in Austrália. In: **International Society of Sugar Cane Technologists**, 20, Proceedings... p. 1034-41. 1989

RIPOLI, T.C.; MOLINA JR., W.F.; STUPIELLO, J.P.; NOGUEIRA M.C.; SACOMANO, J.B. Potencial energético de resíduos de cosecha de la caña verde. **Revista STAB** 12(1): 22-8, 1991.

RIPOLI, T.C. Utilização do material remanescente da colheita de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) – Equacionamento dos balanços energético e econômico. Piracicaba, 1991, 150 p. Tese (Livre Docência). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

RIPOLI, T.C. & VILLANOVA, N.A. Colheita mecanizada de cana-de-açúcar – novos desafios. **Revista STAB** 11(1): 28-31, 1992.

ROMAN, E. S. e VELLOSO, J. A. R. O. Controle cultural, coberturas mortas e alelopatias em sistemas conservacionistas. In: CNTP/EMBRAPA – FUNDACEP – Fundação ABC, **Plantio direto no Brasil**, Passo Fundo. Editora Aldeia Norte. p. 77-84.1993, 166p.

SÁ, J. C. M. Trigo; parâmetros para a tomada de decisão na recomendação de adubação. **Jornal Área Assistência Técnica**, 82 p. 3-7, 1991.

SILVEIRA, J.A.G. **Interações entre assimilação de nitrogênio e o crescimento da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) cultivadas em condições de campo**. ESALQ/USP, Piracicaba. 1985. 152p. (Tese M.S.).

THOMPSON, G.D. The effect of trash conservation on soil moisture and the sugarcane crop in Natal. In: **South Africa Sugarcane Technologist Association**, 39: 143-8. 1966.

TRIPLET Jr., G. B. and DOREN Jr., D.M. Nitrogen, phosphorus and potassium fertilization for no-tillage maize. **Agronomy Journal**, 65 p. 737-9, 1969.

TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A.; OLIVEIRA, M.W. & MURAOKA, T. Potencialidade da mistura de aquamônia com vinhaça na fertilização de canaviais colhidos sem despalha a fogo. Parte II: Perdas por volatilização de amônia e recuperação do ¹⁵N aplicado ao solo. **Revista STAB** 16(3): 23-6, 1998.

YANG, S.J. Trash management in relation to soil conservation and fertilization under rainfed agriculture. In: **International Society Of Sugarcane Technologists**, 22. Cartagena, Colômbia. 1995. Prociding, volume 2, Tecnicaña, 1996. Cali. p. 110-4.

WILLCOX, T. Prosepine growers develop new fertilizer appeccators. **BSES Bulletin**, Indoorooply, v. 29, p 20-1, 1990.

WOOD, A. W. Green cane trash management in the Herbert valley. Preliminary results and research priorities. In: **Australian Society Of Sugar Cane Technologists Conference**, Sounville , April-may 28-1, 1986. Proceedings. Brisbane, Watson Ferguson, 1986. p. 85-94.

APÊNDICE 1

CARACTERIZAÇÃO DA ESPESSURA ATUAL DO GUME DAS LÂMINAS E DISCOS DE CORTE UTILIZADOS NOS ENSAIOS

Caracterização da espessura atual do gume das lâminas e discos de corte utilizados nos ensaios

A habilidade que tem uma lâmina para cortar material vegetal está ligada com o ângulo do Gume **AG** e com a espessura do gume **EG**, como discutido no Artigo 1. Desta forma torna-se necessário no estudo de corte de restos vegetais que as lâminas utilizadas estejam devidamente caracterizadas quanto a estas dimensões.

CHOI & ERBACH (1986) alegam que ainda não está bem definido um procedimento para descrever o afiamento para discos de corte de rolamento. Apresentam uma proposta para caracterizar tais discos, ao definirem um índice que denominaram de "Sharpness Index, **SI**". Este índice é determinado a partir da espessura atual **Ta** do disco e a espessura original esperada **Te**, quando do disco novo, medidas a um mm da extremidade cortante, pela seguinte expressão:

$$SI = C * (Ta * Te)^{-1}$$

onde **C** é uma constante, que os autores atribuíram valor de 0,2 para que o "Sharpness Index" apresentasse um valor de 1 mm⁻², quando o disco estivesse afiado (**Ta** = **Te**) e o ângulo do gume fosse de 25°.

As espessuras **Ta** e **Te** e o ângulo do gume **AG** são calculados a partir de duas outras espessuras auxiliares **T1** e **T2**, como pode ser visto na Figura A1.1, que estão respectivamente à distância **d1** e **d2** da extremidade cortante do disco. Segundo os autores este índice foi escolhido de forma a aumentar com a redução do ângulo do gume e da espessura do disco de corte.

Nesta metodologia, são necessárias quatro medições (**d1**, **d2**, **T1** e **T2**), sendo o **AG** e as espessuras **Ta** e **Te** calculadas a partir das dimensões mensuradas. A determinação das espessuras **T1** e **T2** devem ser efetuadas perpendicularmente às respectivas distancias **d1** e **d2** para que não se incorra em erro de leitura.

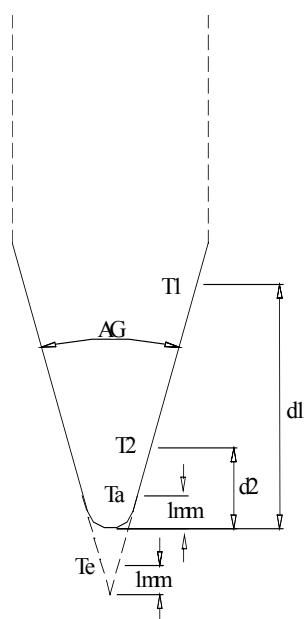


FIGURA 1.1 - Localização das espessuras utilizadas para cálculo do "Sharpness Index"

Outra observação que se faz em relação a esta metodologia é a de que a espessura da lâmina ou disco de corte, w , não é contemplada no cálculo do **SI**, uma vez que as distâncias **d1** e **d2** são duas distâncias quaisquer. Assim, dois discos de cortes de espessuras diferentes, com mesmo valor de **AG** apresentariam **SI** iguais, se estivessem com mesmo valor de **Ta**. No entanto, quando se considera a necessidade do disco de corte penetrar no solo para que possa efetivamente produzir o corte de uma camada de material vegetal, a espessura do disco passa a ter importância no processo, em função das cargas normais requeridas pelo efeito de cunha. Discos de menor espessura apresentam uma menor necessidade de carga normal para penetrarem no solo, pois precisam deslocar lateralmente uma menor quantidade de solo durante seu movimento de penetração.

Os resultados do trabalho desenvolvido por TICE & HENDRICK (1992) confirmam a alegação aqui apresentada. Os autores, ao estudarem o efeito da profundidade de operação, da espessura e do ângulo de cunha de discos de corte lisos nas forças atuantes e comportamento cinemático encontraram resultados demonstrando que a força vertical (força de corte) pode ser minimizadas pelo uso de discos de corte de rolamento finos, com pequeno ângulo de cunha.

A seguir, após as considerações levantadas, apresentamos uma proposta para determinar a habilidade de um disco de corte de rolamento ou lâmina de corte. Aqui consideramos a espessura do disco e a espessura atual do gume **EG** no cálculo de um fator de corte que procura

expressar a habilidade que o disco de corte de rolamento terá para cortar restos vegetais depositados sobre o solo. Nesta metodologia será necessário apenas determinar o valor de **AG**, a distância lateral **dl** entre a extremidade e a parte anterior do gume, além da espessura **w** da Lâmina ou disco, como mostra a Figura 1.2. A partir dos valores de **EL** e de **dl** determina-se o valor da espessura do gume, **EG**, por meio de **dt** (distância total) e **de** (distância esperada):

$$dt = 0,5 * w * (\sin (0,5*AG))^{-1} \quad (1.1)$$

$$EG = 2*(dt - dl) * \sin (0,5*AG) \quad (1.2)$$

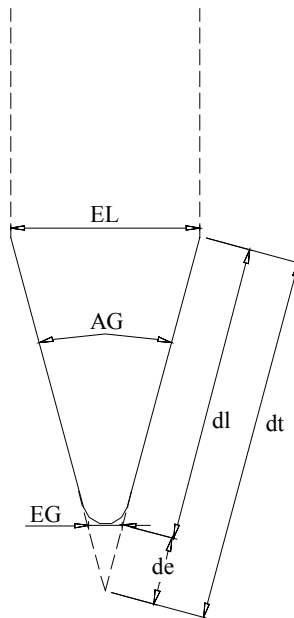


FIGURA 1.2. Localização das variáveis utilizadas no cálculo do Fator de corte do disco.

O Fator de corte **F_c** do disco poderá, então, ser obtido pela expressão:

$$F_c = 1 * (w * EG)^{-1} \quad (1.3)$$

A caracterização das lâminas de corte e dos discos de corte de rolamento utilizada neste trabalho foi feita conforme esta última metodologia. Para o levantamento dos valores de **dl** e **w**

foi utilizado um micrômetro, com precisão de 0,01 mm e para o ângulo **AG**, um transferidor de ângulos com precisão de 5"

As dimensões necessárias para calcular o **F_c** são mais fáceis de serem obtidas do que aquelas utilizadas no cálculo do **SI**, pelo fato de que elas são definidas pela própria geometria da peça, além do que, fica contemplado a espessura desta no cálculo, que acreditamos ser de grande importância para discos de corte de rolamento.

O valor de **F_c** obtido por meio deste método será tão maior quanto maior for a habilidade do disco de corte no trabalho de cortar restos vegetais sobre o solo. Desta forma, foram determinados os valores de **F_c** para as lâminas de 0°, 5° e 10° de ângulo oblíquo, utilizadas no trabalho de determinação da demanda de força e energias para o corte de palha de cana (Artigo 1) e dos discos de corte de rolamento utilizados nos ensaios comparativos entre o disco liso, o recortado e o dentado. Os valores encontrados para **F_c**, bem como as demais dimensões das lâminas e discos estão apresentadas na Tabela 1.1.

TABELA 1.1 - Dimensões, ângulo do gume (**AG**) e fator de corte (**F_c**) obtidos para as lâminas e discos de corte utilizados nos ensaios dos Artigos 1 e 2.

Ferramenta	Dimensões (mm)			AG (graus)	F _c (mm ²)
	dl	w	EG		
Lâmina 0°	15,15	3,97*	0,05**	15,00*	5,04
Lâmina 5°	14,85	3,95*	0,04**	15,25*	6,33
Lâmina 10°	14,95	4,03*	0,06**	15,42*	4,14
Disco liso 24"	14,31	6,30	0,83	21,83	0,19
Disco recortado 24"	15,35	6,33	0,87	20,50	0,18
Disco dentado 24"	9,73	6,34	0,89	32,50	0,18
Disco dentado 20"	10,53	6,28	0,83	30,00	0,19
Disco dentado 28"	10,22	6,27	1,00	30,00	0,16

Obs.: * Para efeito de cálculo, foram multiplicados por dois os valores de **AG** e **w** das lâminas, uma vez que apresentavam afiamento de um só lado;
 ** O valor de **EG** é a metade do valor obtido no cálculo, por se tratar de lâminas com afiamento de um só lado.

APÊNDICE 2

ROTINA COMPUTACIONAL UTILIZADA NO MATLAB, PARA SIMULAR A TRAJETÓRIA DE 2 DENTES CONSECUTIVOS DO DISCO DENTADO DE CORTE PASSIVO.

Rotina computacional utilizada no matlab, para simular a trajetória de dois dentes consecutivos do disco dentado de corte passivo.

```
'descrição da trajetória de dois dentes consecutivos do disco de corte';
'+++++';

% Nesta rotina os pontos "d" e "e" não correspondem aos respectivos
% pontos referenciados no Desenvolvimento do disco dentado de corte,
% Capítulo III. Aqui eles se referem a um outro dente posterior formado
% pelos pontos "d", "e" e "f".

Vu=0.6;
lambida=0.95;
R=0.3048;
h=0.075;
p=0.07;
tempo=2;
cont=0.028;
inicio=14;
n=inicio;
np=n;

rc=R-p;
ra=rc;
re=R;
rf=rc;
rd=rc;
epsilon=asin(1-((p+h)/R));
tau=acos(1-(h/(R-p)));
ni=(pi/2)-epsilon-tau;
```

```

t=(0:cont:tempo);
dist=(va*t);

tetab=(2*pi)-(t*lambida*va/R);
Xb=dist+R*cos(tetab);
Yb=R*sin(tetab);

tetaa=tetab;
Xa=dist+ra*cos(tetaa);
Ya=ra*sin(tetaa);

tetac=tetab-ni;
Xc=dist+rc*cos(tetac);
Yc=rc*sin(tetac);

tetae=(2*pi)-(t*lambida*va/re)+(2*ni);
Xe=dist+re*cos(tetae);
Ye=re*sin(tetae);

tetad=tetae;
Xd=dist+rd*cos(tetad);
Yd=rd*sin(tetad);

tetaf=tetab+ni;
Xf=dist+rf*cos(tetaf);
Yf=rf*sin(tetaf);

altpalha=-R+p+h;
altsolo=-R+p;
linpalha=linspace(altpalha,altpalha,(1+tempo/cont));
linsolo=linspace(altsolo,altsolo,(1+tempo/cont));

```

```
plot(dist(20:45),linpalha(20:45),'g')
```

```
hold;
```

```
plot(dist(20:45),linsolo(20:45),'r')
```

```
xlabel('Deslocamento longitudinal (m)'), ylabel('Deslocamento vertical (m)')
```

```
xmedio=(Xb+Xc)/2;
```

```
ymedio=(Yb+Yc)/2;
```

```
b=((Yb.*(Xb-xmedio))+(Yc.*(Xc-xmedio)))/((Xb-xmedio).^2+(Xc-xmedio).^2);
```

```
a=ymedio-(b.*xmedio);
```

```
xmedioA=(Xb+Xa)/2;
```

```
ymedioA=(Yb+Ya)/2;
```

```
bA=((Yb.*(Xb-xmedioA))+(Ya.*(Xa-xmedioA)))/((Xb-xmedioA).^2+(Xa-xmedioA).^2);
```

```
aA=ymedioA-(bA.*xmedioA);
```

```
xmedioE=(Xe+Xf)/2;
```

```
ymedioE=(Ye+Yf)/2;
```

```
bE=((Ye.*(Xe-xmedioE))+(Yf.*(Xf-xmedioE)))/((Xe-xmedioE).^2+(Xf-xmedioE).^2);
```

```
aE=ymedioE-(bE.*xmedioE);
```

```
xmedioD=(Xe+Xd)/2;
```

```
ymedioD=(Yd+Ye)/2;
```

```
bD=((Ye.*(Xe-xmedioD))+(Yd.*(Xd-xmedioD)))/((Xe-xmedioD).^2+(Xd-xmedioD).^2);
```

```
aD=ymedioD-(bD.*xmedioD);
```

```
xmedioK=(Xa+Xf)/2;
```

```
ymedioK=(Ya+Yf)/2;
```

```
bK=((Ya.*(Xa-xmedioK))+(Yf.*(Xf-xmedioK)))/((Xa-xmedioK).^2+(Xf-xmedioK).^2);
```

```
aK=ymedioK-(bK.*xmedioK);
```



```
while n<39
```

```
x=linspace(Xb(n),Xc(n),(1+(tempo/cont)));  
xA=linspace(Xb(n),Xa(n),(1+(tempo/cont)));  
y=a(n)+(x.*b(n));  
yA=aA(n)+(xA.*bA(n));
```

```
xE=linspace(Xe(n),Xf(n),(1+(tempo/cont)));  
xD=linspace(Xe(n),Xd(n),(1+(tempo/cont)));  
yE=aE(n)+(xE.*bE(n));  
yD=aD(n)+(xD.*bD(n));
```

```
xK=linspace(Xa(n),Xf(n),(1+(tempo/cont)));  
yK=aK(n)+(xK.*bK(n));
```

```
implem=6;
```

```
plot(x,y)  
plot(xA,yA)  
plot(xE,yE)  
plot(xD,yD)  
plot(xK,yK)
```

```
n=n+implem;  
np=np+implem;  
end  
hold;
```

APÊNDICE 3

**ROTINA PARA CÁLCULO DAS FORÇAS "H" E "V" ATUANTES NO DENTE DO DISCO
DE CORTE E DA DISTÂNCIA EFETIVA DE CORTE PARA CADA DENTE**

Rotina para cálculo das forças "h" e "v" atuantes no dente do disco de corte e da distância efetiva de corte para cada dente

Na rotina para calcular os elementos dimensionais do disco foi necessário lançar mão de algumas equações auxiliares, já que a altura da camada de palha passou a ser uma incógnita e algumas das Equações de número 2 a 16, do Artigo 2, foram descritas, também, em função de “h”.

As equações que foram utilizadas, apresentadas a seguir, foram desenvolvidas a partir da Figura 3.1.

O cateto oposto ao ângulo epsilon, representado pelo segmento \overline{ci} da Figura 3.1 pode ser obtido pela seguinte expressão, em função do raio interno do disco (segmento \overline{oc}) e do ângulo η :

$$ci = Ri \times \sin \eta \quad (3.1),$$

O cateto adjacente ao ângulo epsilon, denominado de “cae” e representado na Figura pelo segmento \overline{bi} , pode ser obtido, em função do raio externo do disco (segmento \overline{bo}) e da distância “can”:

$$cae = R - can \quad (3.2)$$

Sendo a distância “can”, que representa o cateto adjacente ao ângulo η é expressa, em função do raio interno do disco, por:

$$can = Ri \times \cos(\eta) \quad (3.3)$$

Desta forma pode-se calcular o valor da borda cortante do dente do disco \overline{bc} , pela expressão:

$$\overline{bc} = \sqrt{cae^2 + ci^2} \quad (3.4)$$

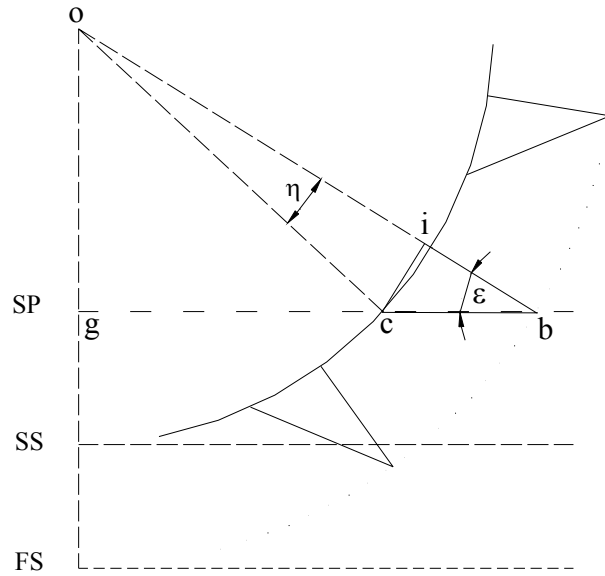


FIGURA 3.1 – Descrição geométrica do ângulo epsílon e da borda cortante do dente do disco \overline{bc} , em função de η .

Em função de \overline{bc} e “ci”, pode-se calcular o valor do ângulo epsílon por:

$$\varepsilon = a \sin \left(\frac{coe}{\overline{bc}} \right) \quad (3.5)$$

A partir do momento que se tem o valor do ângulo epsílon pode-se, então, calcular o segmento \overline{og} , em função do raio externo do disco, pela expressão:

$$\overline{og} = R \times \sin \varepsilon \quad (3.6)$$

A altura da camada de palha pode ser calculada pela expressão:

$$h = R - (\overline{og} + p) \quad (3.7)$$

A profundidade momentânea de trabalho, a partir do momento que o disco toca o solo, é calculada pela expressão:

$$deep = (R \times \cos \sigma) - Ri \quad (3.8)$$

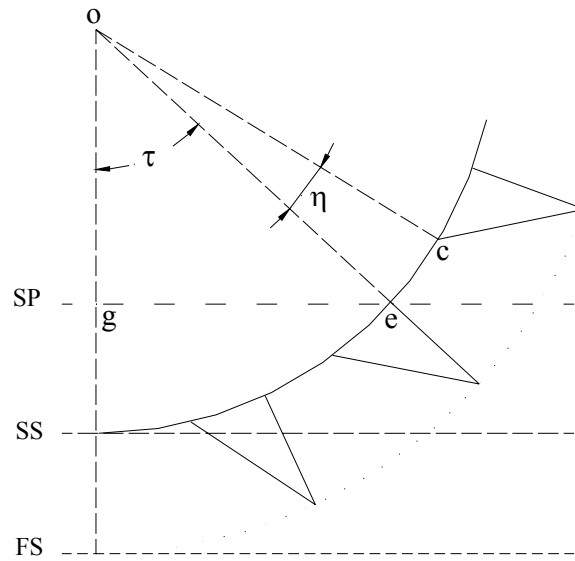


FIGURA 3.2 - Geometria utilizada para definir a distância efetiva de corte de cada dente do disco.

O cálculo da distância efetiva de corte de cada dente foi efetuado por meio da geometria apresentada na Figura 3.2, considerando-se o deslocamento linear e o giro do disco dentado.

A posição do ponto “e”, com “ η ” graus antes de tocar a superfície da palhada, se confunde na Figura 3.2 com o ponto “c”, na base do dente posterior. Esta posição é definida por:

$$\theta_{corte1} = 270 + \tau + \eta \quad (3.9)$$

A posição do ponto “e”, quando este toca a superfície da palhada, é definida por:

$$\theta_{corte2} = \theta_{corte1} - \eta \quad (3.10)$$

A posição horizontal do ponto "e" com “ η ” graus, antes de tocar a superfície da palhada, em relação ao centro do disco é dada por:

$$pe1 = Ri \times \cos(\theta_{corte1}) \quad (3.11)$$

A posição horizontal do ponto "e" ao nível da palhada, em relação ao centro do disco é definida por:

$$pe2 = Ri \times \cos(\theta_{corte2}) \quad (3.12)$$

O sentido de deslocamento do ponto "e", dado pelo giro do disco, é contrário ao avanço do centro deste e, a diferença entre as posições, nos dá o valor do deslocamento negativo deste ponto no sentido horizontal, quando o disco tem um giro igual à “ η ” graus:

$$difer_pe = pe1 - pe2 \quad (3.13)$$

O tempo gasto para o disco girar “ η ” é dado por:

$$tempo = \frac{\eta}{\omega} \quad (3.14)$$

O avanço horizontal do centro do disco é obtido por:

$$avanço = Vo \times tempo \quad (3.15)$$

O valor do avanço real dado pelo vão do dente é, então, obtido por:

$$avanço\ Real = avanço - difer_pe \quad (3.16)$$

Define-se a distancia efetiva de corte pela soma do avanço real, dado pelo vão do dente, ao valor do segmento \overline{bc} , que define o comprimento da borda de corte do dente:

$$distCorte = avanço Real + \overline{bc} \quad (3.17)$$

ROTINA COMPUTACIONAL

```
%'+++++';
%      DADOS DE ENTRADA
clear;
%      DADOS DO DISCO
DiaEx=input('Qual é o Diâmetro externo do disco,em polegadas ? ');
ndentes=input('Qual o número de dentes desejado ? ');
p=input('Qual a profundidade de penetração do dente, em mm ? ')/1000;
Quant_palhico=input('Qual é a quantidade de palhico em t/ha ? ');
IC=input('Qual é o valor do índice de cone, em MPa ? ');
lambida=0.98;
R=DiaEx*25.4/(2*1000);
va=0.6;           %velocidade de avanço do disco, em m/s;
w=6/1000;         %espessura do disco;
dPalha=1.45;      % densidade da palha igual a 1,45 t/m3;
%'-----';
%      DADOS DO SOLO
Fi=15.25*(pi/180); % ângulo de atrito interno do solo, em graus;
Delta=(2/3)*Fi;   % ângulo de atrito sol/metal, em graus;
Gama=1.4;         %densidade do solo, em t/metro cúbico;
c=52.66;          %coesão do solo, em kPa;
ca=(2/3)*c;       %adesão solo/ferramenta, em kPa;
q=0;              %carga sobre o solo, em kN;
```

```

g=9.8; % aceleração da gravidade, em metros/segundo ao quadrado;
%'-----';

% 'Rotina para cálculo dos parâmetros do disco de corte';
% 'dentado em função de R, p e número de dentes;
ni=2*pi/(ndentes*2);
Ri=R-p;
ci=Ri*sin(ni); % cateto oposto ao ângulo ni;
can=Ri*cos(ni); % cateto adjacente ao ângulo ni;
cae=R-can;
bc=sqrt(cae^2+ci^2);
epsi=asin(ci/bc);
og=R*sin(epsi);
h=R-(og+p); %altura da camada de palha projetada;
tau=acos((1-(h/(R-p)))));
sigma=acos(1-(p/R)); % ângulo entre Normal e ponta do dente quando esta toca o solo;
alfa=pi/2-sigma; % ângulo de ataque do dente quando este toca o solo;
grauMax=89; % ângulo Beta máximo a ser analisado;
grauMin=1; % ângulo Beta mínimo a ser analisado;
ACorte=alfa-epsi; % ângulo obliquo inicial, em radianos;
An_Obliquo=ACorte*180/pi % Ângulo obliquo inicial, em graus;
F_cortEsp=8.842-0.1582*(ACorte*180/pi); % força de corte específica máxima, em função do
ângulo alfa, em MPa;
%'-----';

% ROTINA PARA EQUACIONAR O PROBLEMA DA DESCONTINUIDADE DA
FUNÇÃO Ng
Alfa=(alfa:ni/8:pi/2); % Vetor com os ângulo de ataque alfas;
npontos=size(Alfa); % números de pontos considerados na análise;
npontos(2)=[];
Sigma=(pi/2)-Alfa; % Vetor com os ângulos sigmas, em função de Alfa;
Deep=(R*cos(Sigma))-Ri; % Vetor profundidade do dente, em metros;
cl=1; % contador da posição dos vetores Alfa e Deep;

```



```

for c1=1:(npontos)    % loop para cálculo dos vários ângulos Beta Criticos;
c2=1;                % contador para verificação da descontinuidade de Ng;
Beta=(grauMin:1:grauMax)*(pi/180);    % Cria vetor inicial de angulos beta;
divisor=cos(Alfa(c1)+Delta)+(sin(Alfa(c1)+Delta)*cot(Beta(c2)+Fi));
for i=1:grauMax        %contador do loop para verificar divisor negativo;
    while divisor >0
        c2=c2+1;
        divisor=cos(Alfa(c1)+Delta)+(sin(Alfa(c1)+Delta)*cot(Beta(c2)+Fi));
        if c2 == grauMax
            divisor=-1;
        end
    end
end
grauMax1=Beta(c2-1)*180/pi;

```

```

'-----';

```

% ROTINA PARA CÁLCULO DE BETA CRÍTICO;

```

Beta=(grauMin:1:grauMax1)*(pi/180); % Cria novo vetor de angulos beta;

for x=1:(grauMax1+1-grauMin)
    Ng(x)=(0.5*(cot(Alfa(c1))+cot(Beta(x)))*(1+(2*Deep(c1))/(3*w)*(cot(Alfa(c1))+
        cot(Beta(x)))*sqrt(1-(cot(Alfa(c1))/(cot(Alfa(c1))+cot(Beta(x))))^2)))/
        (cos(Alfa(c1)+Delta)+(sin(Alfa(c1)+Delta)*cot(Beta(x)+Fi)));
end
minimo=find(Ng==(min(Ng)));
clear Ng
BCr=Beta(minimo)*180/pi;
BetaCrit(c1)=BCr;
end

```

BetaCr=BetaCrit*pi/180;

'-----';

%' ROTINA PARA CÁLCULO DE Ng, Nc, Nq e Nca'

for t=1:npontos

Ng=(0.5*(cot(Alfa(t))+cot(BetaCr(t)))*(1+(2*Deep(t))/(3*w)*(cot(Alfa(t))+cot(BetaCr(t)))*sqrt(1-(cot(Alfa(t))/(cot(Alfa(t))+cot(BetaCr(t))))^2)))/
(cos(Alfa(t)+Delta)+(sin(Alfa(t)+Delta)*cot(BetaCr(t)+Fi)));

Ngama(t)=Ng;

Ncoesao=(1+cot(BetaCr(t))*cot(BetaCr(t)+Fi))*(1+(Deep(t)*(cot(Alfa(t))+cot(BetaCr(t)))*sqrt(1-((cot(Alfa(t)))/(cot(Alfa(t))+cot(BetaCr(t))))^2))/w)/
(cos(Alfa(t)+Delta)+(sin(Alfa(t)+Delta)*cot(BetaCr(t)+Fi)));

Nc(t)=Ncoesao;

Nadesao=(1-cot(Alfa(t))*cot(BetaCr(t)+Fi))/(cos(Alfa(t)+Delta)+
(sin(Alfa(t)+Delta)*cot(BetaCr(t)+Fi)));

Nca(t)=Nadesao;

Nq1=(cot(Alfa(t))+cot(BetaCr(t)))*(1+(Deep(t)*(cot(Alfa(t))+cot(BetaCr(t)))*sqrt(1-((cot(Alfa(t)))/(cot(Alfa(t))+cot(BetaCr(t))))^2))/w)/
(cos(Alfa(t)+Delta)+(sin(Alfa(t)+Delta)*cot(BetaCr(t)+Fi)));

Nq(t)=Nq1;

end

for t=1:npontos

Pull=(Gama*g*(Deep(t)^2)*Ngama(t)+c*Deep(t)*Nc(t)+q*Deep(t)*Nq(t)+
ca*Deep(t)*Nca(t))*w;

P(t)=Pull;

Horiz=P(t)*sin(Alfa(t)+Delta)+ca*Deep(t)*w*cot(Alfa(t));

H(t)=Horiz;

Vert=P(t)*cos(Alfa(t)+Delta)-ca*Deep(t)*w;

V(t)=Vert;

raio=Deep(t)*(cot(Alfa(t))+cot(BetaCr(t)));

r(t)=raio; %valor da frente de ruptura, em metros;

```

end
'-----';
% CÁLCULO DA DISTÂNCIA EFETIVA DE CORTE DE CADA DENTE;
tetaCorte1=3*pi/2+tau+ni;
tetaCorte2=3*pi/2+tau;
pe1=Ri*cos(tetaCorte1);           %posição horizontal do ponto "e" com ni graus, antes de
tocar a palha;
pe2=Ri*cos(tetaCorte2);           %posição horizontal do ponto "e" ao tocar a palha;
difer_pe=pe1-pe2;
vel_Angular= lambida*va/R;
tempo=ni/vel_Angular;
avanco=va*tempo;                  %avanço horizontal dado pelo deslocamento do
centro do disco;
avancoReal=avanco-difer_pe;
distCorte=avancoReal+bc;          %comprimento efetivo de corte para cada dente, em metros;

rela_p_coe=p/ci;                  %relação entre a profundidade de corte e a distância coe;
'-----';
% CÁLCULO DA FORÇA EFETIVA DE CORTE DE CADA DENTE;
volPalhico=Quant_palhico/dPalha; %volume específico de palha por ha, em m3;
alturaEsp=volPalhico/10000; %altura específica do palhico, em m;
areaCorte_esp= distCorte*alturaEsp; %área de corte específica, e função da quantidade de palha
por ha, em m2;
RFC=areaCorte_esp*F_cortEsp*1000; %força de corte máxima requisitada pelo dente mais
vão, em kN;
'-----';
% POSIÇÃO E CÁLCULO DAS DISTÂNCIAS ENTRE AS PONTAS DE 2 DENTES
CONSECUTIVOS;
% CÁLCULO DAS FORÇAS "H" E "V" TOTAIS RESULTANTES DA AÇÃO DE 2 DENTES
CONSECUTIVOS;
% CÁLCULO DOS MOMENTOS APLICADOS NO DISCO;

```

```

alfaAnt=alfa+2*ni;          % ângulo alfa do dente anterior, quando o posterior toca o solo;
posiAnt=find(Alfa==alfaAnt); % posição atual do ângulo alfa do dente anterior, no vetor Alfa;
posiAnt=17;
posiPost=find(Alfa==alfa); % posição atual do ângulo alfa do dente posterior, no vetor Alfa;
posicao=posiAnt;
z1=1;
AlfaPost=(Alfa(posiPost));
for z2=1:(npontos+1)-posiAnt
    frenteRompi=r(posicao); % valor de r, do dente anterior, quando o atual toca o solo;
    dist1=2*R*sin(ni);      % distância auxiliar 1 no cálculo distância real entre dois dentes;
    k=(pi/2)-(epsi+ni); % ângulo aux.1 para cálculo da distância real entre dois dentes;
    s=(pi/2)-Alfa(posicao); % ângulo momentâneo entre a normal e o flanco do dente anterior;
    s_linha=(pi/2)-Alfa(z1); % ângulo momentâneo entre a normal e o flanco do dente posterior;
    deep_linha=Deep(z1); % profundidade de trabalho do dente posterior, no momento zn;
    bn=Deep(posicao)/(cos(epsi+s)); % comprimento da face cortante do dente anterior que está
                                   dentro do solo no instante zn;
    bn_linha=deep_linha/(cos(epsi+s_linha)); % comprimento da face cortante do dente posterior
                                   que esta dentro do solo no instante zn;
    on_linha=sqrt(bn_linha^2+R^2-(2*bn_linha*R*cos(epsi))); % braço de aplicação da força de
                                   corte no dente posterior;
    zeta=acos(Ri/on_linha); % ângulo zeta auxiliar para o cálculo do momento da força de corte;
    ka_linha=zeta;
    FCp=RFC*cos((pi/2)-ka_linha); % resultante momentânea da força de corte. em KN;
    mFC= FCp*on_linha; % momento de força aplicado no disco pela força de corte, no momento
                                   zn;
    MFC(z2)=mFC; % vetor com os valores instantâneos do momento aplicado no disco pela força
                                   de corte, em mKN;
    jn_linha= sqrt(bn_linha^2+dist1^2-(2*bn_linha*dist1*cos(k))); % distancia auxiliar2 para
                                   cálculo da distância real entre dois dentes;
    u=acos(Deep(posicao)/jn_linha); % ângulo aux. 2 para cálculo da distância real entre dois
                                   dentes;

```

```

fl=Deep(posicao)/tan(Alfa(posicao));%distância auxiliar 3 para cálculo da distância real entre
dois dentes;
ln_linha=jn_linha*sin(u); % distância auxiliar 4 no cálculo distância real entre dois dentes;
distR=ln_linha+fl; % distância momentânea entre o flando do dente anterior e o ponto de
contato da face cortante do dente posterior com o solo;
distReal(z2)=distR; % Vetor com as distâncias momentâneas, em metros, entre o flaco do
dente anterior e o ponto de contato da face cortante do dente posterior com
o solo;
rHp=H(posicao)/cos(Sigma(posicao)); % resultante momentânea da força H aplicada no dente
anterior, em KN;
rH_linhap=H(z1)/(cos(Sigma(z1))); % resultante momentânea da força H aplicada no dente
posterior, em KN;
RHP(z2)=rHp; % Vetor com os valores da resultante horizontal para o dente anterior;
RH_linhaP(z2)=rH_linhap; % Vetor com os valores da resultante horizontal para o dente
posterior;
Da=(1/3*Deep(posicao))/cos(s); % distância do ponto de aplicação da força RH à ponta do
dente;
Da_linha=(1/3*deep_linha)/cos(s_linha); % distância do ponto de aplicação da força RH à ponta
do dente;
MRH(z2)=rHp*(R-Da); %vetor com os momentos de reação do solo aplicados no dente anterior
do disco, em mKN;
MRH_linha(z2)=rH_linhap*(R-Da_linha); % vetor com os momentos de reação do solo
aplicados no dente posterior do disco, em mKN;
jn=bc;
nl=jn*sin(eps+si);
n_linham_linha=bn_linha*sin(eps+si_linha); % distância utilizada para cálculo da área de
penetração do dente;
AP=w*nl; % área de penetração do dente anterior, considerando que o disco tem espessura de 6
mm;
AP_linha=w*n_linham_linha; % área de penetração do dente posterior, considerando que o
disco tem espessura de 6 mm;

```

```

RP=IC*AP*1000; % resistência do solo à penetração do dente anterior do disco;
RP_linha=IC*AP_linha*1000; % resistência do solo à penetração do dente anterior do disco;
RPp=RP*cos(pi/2-s); % resultante da resistência à penetração normal ao flanco do dente;
RPp_linha=RP_linha*cos(pi/2-s_linha); % resultante da resistência à penetração normal ao
                                flanco do dente;

mRP=RPp*R; % momento causado no dente anterior pela resultante de penetração;
mRP_linha=RPp_linha*R; % momento causado no dente posterior pela resultante de
                                penetração;

MRP(z2)=mRP; % vetor com os momentos instantâneos da resultante de penetração no dente
                                no dente anterior;
MRP_linha(z2)=mRP_linha; % vetor com os momentos instantâneos da resultante de
                                penetração no dente no dente posterior;

Htotal(z2)=H(posicao)+H(z1);
Vtotal(z2)=V(posicao)+V(z1);
posicao=posicao+1;
z1=z1+1;
end

M_motor=MRH+MRH_linha; % Soma dos momentos que produzem o movimento do disco;
M_resist=MFC+MRP+MRP_linha; % Soma dos momentos que impedem o movimento do disco;
Soma_M=M_motor- M_resist; %Somatório dos momentos aplicados ao disco de corte a cada
                                momento considerado na simulação;

M_min=min(Soma_M); %mínimo momento obtido no somatório de momentos;
MaxM_resist=max(M_resist); %máximo valor do momento de resistência obtido;
MaxM_motor=max(M_motor); %máximo valor do momento motor obtido;
'-----';

AlfaG=Alfa*180/pi;
plot(AlfaG(posiAnt:npontos),M_motor,'y',AlfaG(posiAnt:npontos),M_resist,'r')
xlabel('Ângulo de ataque Alfa'), ylabel('Momentos (mkN) - Distâncias (m)')
hold
plot(AlfaG(posiAnt:npontos),r(posiAnt:npontos),'g',AlfaG(posiAnt:npontos),distReal,'b')
hold

```

```

dif=distReal-r(posiAnt:npontos);
diferen=abs(dif);
inters=find(diferen==(min(diferen)));
minDif=min(dif);    %mínima diferença entre frente de ruptura e distância real entre 2 dentes,
em metros;
compara=Alfa(posiAnt:npontos);
alfaInters=compara(inters);
Hinters=Htotal(inters);
Vinters=Vtotal(inters);
Hmax=Hinters;
maxV=max(Vtotal);
Abs_M=abs(Soma_M);
inters_M=find(Abs_M==(min(Abs_M)));
M_Inters=compara(inters_M);
'-----';
Fi=Fi*180/pi;
Delta=Delta*180/pi;
alfaAnt=alfaAnt*180/pi;
alfaInters=alfaInters*180/pi;
M_Inters=M_Inters*180/pi;
save result DiaEx ndentes p h rela_p_coe minDif alfaInters M_min M_Inters alfaAnt
      MaxM_resist MaxM_motor distCorte An_Obliquo -ascii;

```

APÊNDICE 4

MOMENTO APLICADO AO CENTRO DO DISCO DE CORTE

Momento aplicado ao centro do disco de corte

O anel octogonal utilizado nos ensaios efetuados na caixa de solo permitiu a obtenção das forças horizontal e vertical, bem como do momento em relação ao seu centro. A partir destas grandezas foi possível determinar a distância de aplicação da força resultante e, conseqüentemente, do momento aplicado, em relação ao centro do disco.

Para que isso fosse possível lançou-se mão do procedimento descrito a seguir, em função das dimensões do protótipo de ensaio e da geometria apresentada na Figura 4.1:

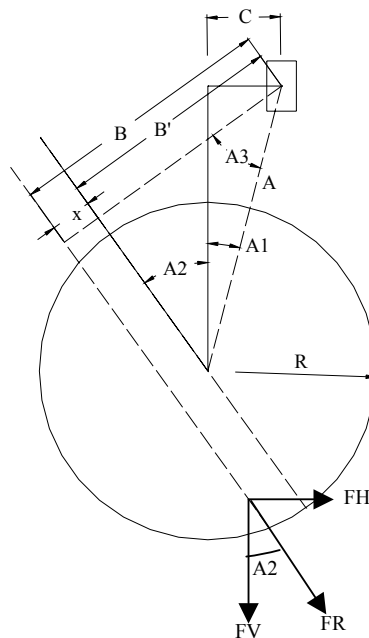


FIGURA 4.1 – Geometria com diagrama de forças utilizadas para determinar o momento aplicado ao centro do disco

A distância que representa o braço de aplicação da força resultante “ F_R ” está representado por “ B ”, no entanto há uma distância entre o centro do disco e o centro do anel, representada por “ B' ”. Logo a diferença entre “ B ” e “ B' ” representa o valor de “ x ”, que é a distância de aplicação da “ F_R ” ao centro do disco.

Os valores das distâncias “A” e “C”, assim como do ângulo “A1” foram levantados por medição no protótipo de ensaios e os valores de “FH” e “FV” foram obtidos por meio do anel octogonal.

O valor da força resultante “FR” é calculada, em função das forças vertical “FV” e horizontal “FH”, pela seguinte expressão:

$$FR = \sqrt{FV^2 + FH^2} \quad (4.1)$$

O ângulo “A2” foi determinado por:

$$A2 = \arccos\left(\frac{FV}{FR}\right) \quad (4.2)$$

Conhecendo-se este ângulo foi possível, então, determinar o valor do ângulo “A3” pela relação:

$$A3 = \frac{\pi}{2} - (A2 - A1) \quad (4.3)$$

O comprimento “B’” pode ser calculado pela expressão:

$$B' = A \times \cos(A3) \quad (4.4)$$

Substituindo os valores dos ângulos “A2” e “A3” na equação 4.4 temos:

$$B' = A \times \cos\left(\frac{\pi}{2} - \left(a \cos\left(\frac{FV}{FR}\right) + A1\right)\right) \quad (4.5)$$

Considerando-se que:

$$x = B - B' \quad (4.6)$$

E, que “**B**” pode ser obtido em função do momento “**M**” medido pelo anel octogonal:

$$B = \frac{M}{FR} \quad (4.7)$$

Podemos, finalmente, obter o valor de “**x**”, braço de aplicação do momento em relação ao centro do disco:

$$x = \left(\frac{M}{FR} \right) - \left(A \times \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) - \left(a \cos\left(\frac{FV}{FR}\right) + A1 \right) \right) \quad (4.8)$$

O valor do momento, em relação ao centro do disco “**M_c**” é obtido, em função de “**x**” e da força resultante “**FR**”:

$$M_c = x \times FR \quad (4.9)$$

Os valores levantados por medição no protótipo de ensaios foram:

- C = 165 mm;
- A = 549,8 mm
- A1 = 17,45°.

Os valores de “**FV**”, “**FH**” e “**M**” foram levantados durante os ensaios na caixa de solo.

APÊNDICE 5

ANÁLISES REALIZADAS COM O SOLO DA CAIXA DE SOLO DO LABORATÓRIO DE PROTÓTIPOS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA E TRANSPORTE

ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Dados do corpo de prova:

Massa específica aparente úmida: 1.596 g*cm³

Teor de umidade: 13,5%

Massa específica aparente seca: 1.406 g*cm³

Grau de compactação 1.406/1.800 = 78%.

Ensaio sem saturação

Tensões normais: 50 kPa – 150 kPa – 250 kPa

TENSÃO 50 (kPa)

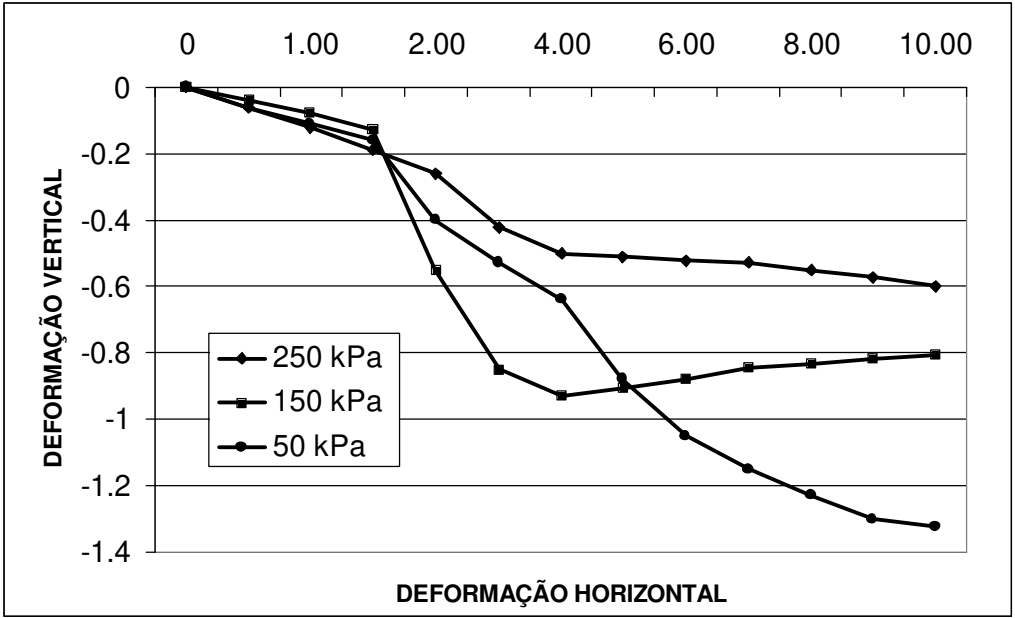
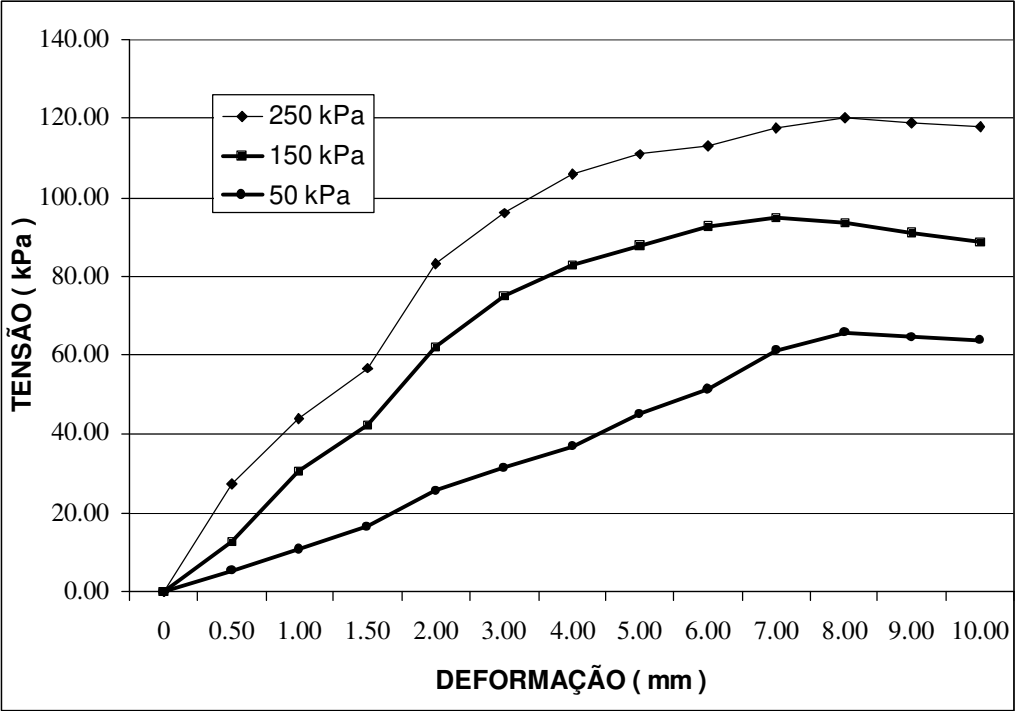
EXT. HORIZ	EXT. VERT.	DEF. VERT.	ANEL DE F.	CARGA	TENSÃO
mm.	mm.	mm.	divisões	kN	kPa
0	5.000	0	0	0	0.00
0.50	4.940	-0.060	22	0.018	5.56
1.00	4.890	-0.110	43	0.034	10.87
1.50	4.840	-0.160	66	0.053	16.68
2.00	4.600	-0.400	101	0.081	25.52
3.00	4.470	-0.530	124	0.099	31.33
4.00	4.360	-0.640	146	0.117	36.89
5.00	4.120	-0.880	178	0.142	44.98
6.00	3.950	-1.050	204	0.163	51.55
7.00	3.850	-1.150	242	0.194	61.15
8.00	3.770	-1.230	260	0.208	65.70
9.00	3.700	-1.300	256	0.205	64.69
10	3.680	-1.320	252	0.202	63.68

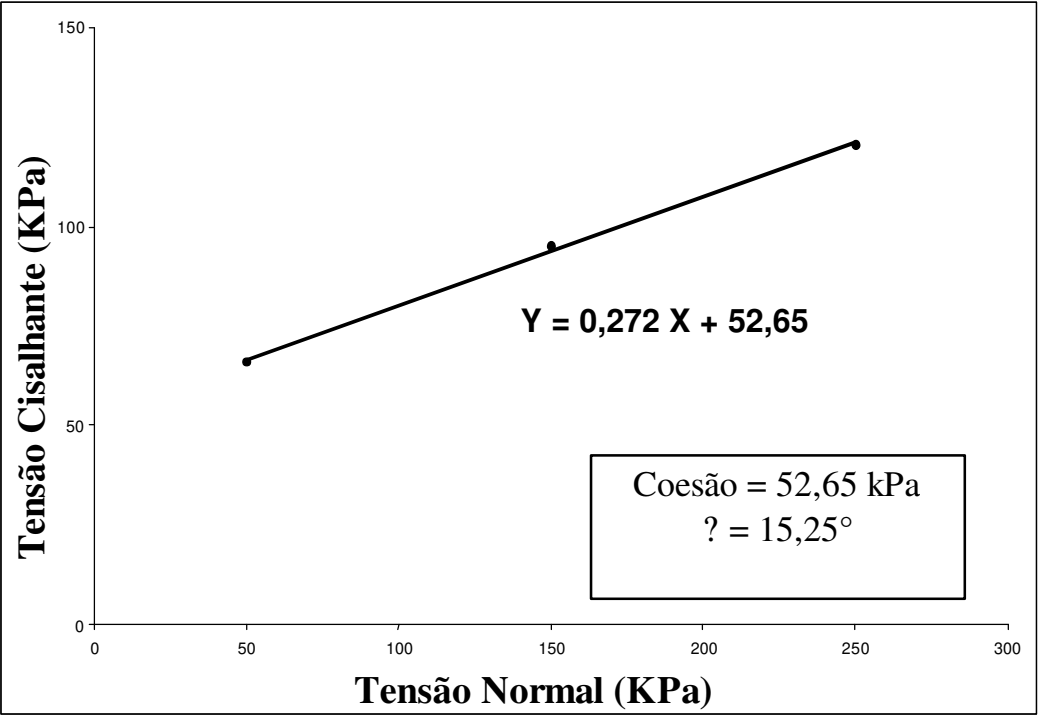
TENSÃO 150 (kPa)

EXT. HORIZ	EXT. VERT.	DEF. VERT.	ANEL DE F.	CARGA	TENSÃO
mm.	mm.	mm.	divisões	kN	kPa
0	5.000	0	0	0	0.00
0.50	4.960	-0.040	50	0.040	12.63
1.00	4.920	-0.080	122	0.098	30.83
1.50	4.870	-0.130	168	0.134	42.45
2.00	4.450	-0.550	246	0.197	62.16
3.00	4.150	-0.850	297	0.238	75.05
4.00	4.070	-0.930	328	0.262	82.88
5.00	4.095	-0.905	348	0.278	87.93
6.00	4.120	-0.880	368	0.294	92.99
7.00	4.155	-0.845	375	0.300	94.76
8.00	4.166	-0.834	370	0.296	93.49
9.00	4.185	-0.815	360	0.288	90.97
10.00	4.195	-0.805	350	0.280	88.44

TENSÃO 250 (kPa)

EXT. HORIZ	EXT. VERT.	DEF. VERT.	ANEL DE F.	CARGA	TENSÃO
mm.	mm.	mm.	divisões	kN	kPa
0	5.000	0	0	0	0.00
0.50	4.940	-0.060	108	0.086	27.29
1.00	4.880	-0.120	173	0.138	43.71
1.50	4.810	-0.190	225	0.180	56.85
2.00	4.740	-0.260	330	0.264	83.39
3.00	4.580	-0.420	381	0.305	96.27
4.00	4.500	-0.500	419	0.335	105.87
5.00	4.490	-0.510	439	0.351	110.93
6.00	4.480	-0.520	448	0.358	113.20
7.00	4.470	-0.530	465	0.372	117.50
8.00	4.450	-0.550	476	0.381	120.28
9.00	4.430	-0.570	471	0.377	119.01
10.00	4.400	-0.600	467	0.374	118.00





FACULDADE DE ENGENHARIA DE LIMEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS

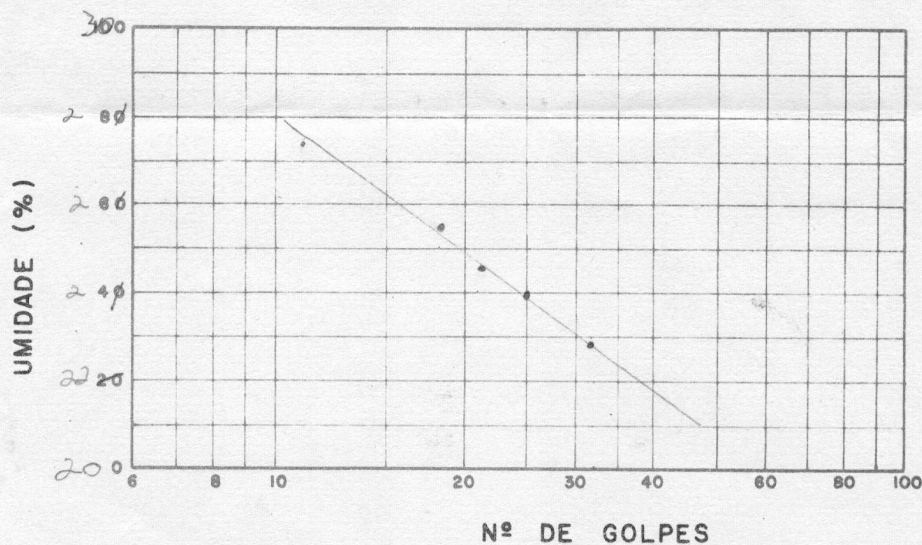


LIMITES DE ATTERBERG

OBRA CAIXA DE SOLO SONDAGEM Nº _____ LOCAL _____ FERRAÍ
AMOSTRA Nº _____ CORPO DE PROVA Nº _____ PROFUNDIDADE _____ m
LABORATORISTA Edson RESPONSÁVEL _____ DATA 9/5/04
TIPO DE SOLO _____

LIMITE DE LIQUIDEZ

CÁPSULA Nº	15	16	18	20	27		
SOLO + CAPS (g)	21.64	19.38	22.58	21.43	22.98		
SOLO SECO + CAPS (g)	19.75	17.90	20.33	19.54	20.59		
CÁPSULA (g)	11.47	11.73	11.14	12.13	11.87		
ÁGUA (g)	1.89	1.48	2.25	1.89	2.39		
SOLO SECO (g)	8.28	6.17	9.19	7.41	8.72		
UMIDADE (%)	22.83	23.99	24.48	25.50	27.41		
Nº GOLPES	32	25	21	18	12		



LL 24.0 %

LP 16.0 %

IP 8.0 %

LIMITE DE PLASTICIDADE

CÁPSULA Nº	34	83	92	
SOLO + CAPS (g)	14.49	15.47	14.39	
SOLO SECO + CAPS (g)	14.16	14.94	13.94	
CÁPSULA (g)	12.08	11.63	11.02	
ÁGUA (g)	0.33	0.53	0.45	
SOLO SECO (g)	2.08	3.31	2.92	
UMIDADE (%)	15.86	16.01	15.41	

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

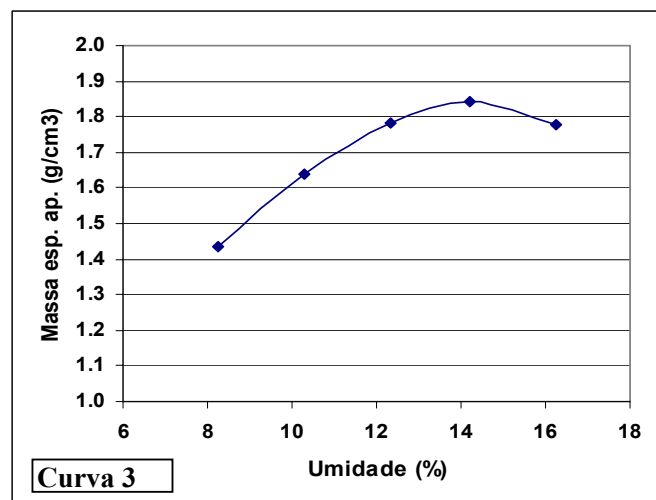
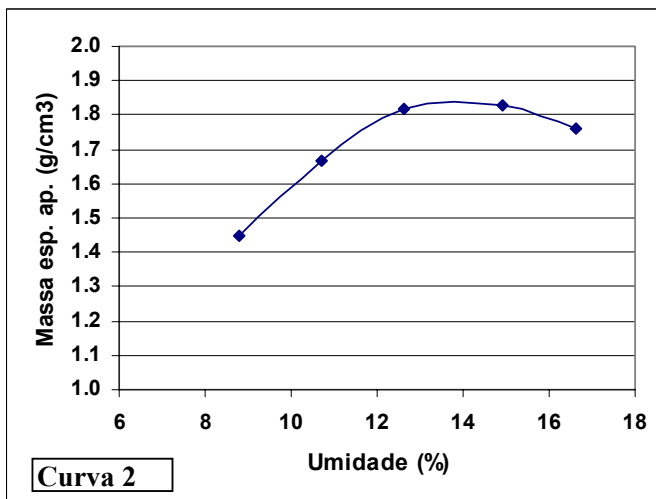
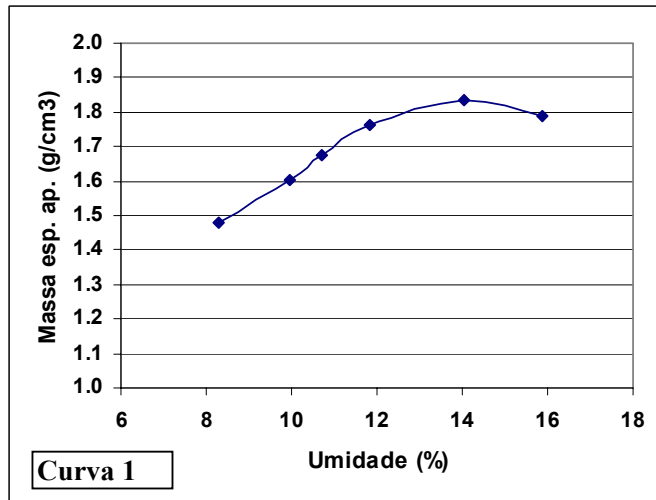
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA LABORATÓRIO DE SOLOS ANÁLISE: GRANULOMÉTRICA INTERESSADO: Bianchini											
Amostra	tara	tara+solo	arg	silte	sil.grosso	AF	AG	AT	tara	tara+solo	arg+silte
1	10.3035	10.3789	30	3	20	23	24	47	13.6328	13.7133	33
1	10.4628	10.5360	29	3	21	22	24	46	10.3026	10.3826	33

ENSAIO DE PROCTOR NORMAL

ENSAIO DE PROCTOR NORMAL CURVA 1 Volume do cilindro = 1000 cm ³ massa do cilindro = 2366.4 gramas										
ponto amostral	Massa total úmida	massa do corpo de prova úmido	Determinação do teor de umidade							massa esp. do corpo de prova
			cápsula	massa bruta úmida	massa bruta seca	tara da cápsula	massa de água	massa do solo seco	teor de umidade	
número	(g)	(g)	número	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(g/cm ³)
1	3968.9	1602.5	54.0	75.5	72.3	33.8	3.2	38.5	8.3	1.48
2	4126.5	1760.1	200.0	73.4	69.9	34.7	3.5	35.2	9.9	1.60
3	4221.0	1854.6	53.0	79.0	74.7	34.5	4.3	40.2	10.7	1.68
4	4337.4	1971.0	55.0	74.9	70.6	34.2	4.3	36.4	11.8	1.76
5	4456.2	2089.8	10.0	84.6	78.5	35.0	6.1	43.5	14.0	1.83
6	4441.7	2075.3	5.0	84.7	77.7	33.6	7.0	44.1	15.9	1.79

ENSAIO DE PROCTOR NORMAL CURVA 2 Volume do cilindro = 1000 cm ³ massa do cilindro = 2366.4 gramas										
Ponto Amostral	Massa total úmida	massa do corpo de prova úmido	Determinação do teor de umidade							massa esp. do corpo de prova
Número	(g)	(g)	cápsula número	massa bruta úmida (g)	massa bruta seca (g)	tara da cápsula (g)	massa de água (g)	massa do solo seco (g)	teor de umidade (%)	(g/cm ³)
1	3940.0	1573.6	51	79.0	75.4	34.4	3.6	41.0	8.8	1.45
2	4209.3	1842.9	4	86.8	81.6	33.0	5.2	48.6	10.7	1.66
3	4413.9	2047.5	6	95.5	88.7	34.9	6.8	53.8	12.6	1.82
4	4464.6	2098.2	1	85.8	79.1	34.2	6.7	44.9	14.9	1.83
5	4417.6	2051.2	9	112.0	100.9	34.2	11.1	66.7	16.6	1.76

ENSAIO DE PROCTOR NORMAL CURVA 3 Volume do cilindro = 1000 cm ³ Massa do cilindro = 2366.4 gramas										
ponto amostral	Massa total úmida	massa do corpo de prova úmido	Determinação do teor de umidade							massa esp. do corpo de prova
número	(g)	(g)	cápsula número	massa bruta úmida (g)	massa bruta seca (g)	tara da cápsula (g)	massa de água (g)	massa do solo seco (g)	teor de umidade (%)	(g/cm ³)
1	3919.0	1552.6	100	95.9	91.2	34.1	4.7	57.1	8.2	1.43
2	4173.5	1807.1	101	89.6	84.5	34.9	5.1	49.6	10.3	1.64
3	4368.4	2002.0	102	96.6	89.8	34.6	6.8	55.2	12.3	1.78
4	4471.1	2104.7	103	84.3	78.1	34.4	6.2	43.7	14.2	1.84
5	4435.3	2068.9	104	111.1	100.4	34.6	10.7	65.8	16.3	1.78



APÊNDICE 6

SEQÜÊNCIA DE PASSOS UTILIZADOS PARA O PREPARO DO LEITO DE ENSAIOS DA CAIXA DE SOLO DO LABORATÓRIO DE PROTÓTIPOS

**Seqüência de passos utilizados para o preparo do leito de ensaios
da caixa de solo do laboratório de protótipos**

Uma camada de solo de aproximadamente 200 mm foi preparada para a execução de cada ensaio. Esta camada foi denominada de leito de ensaios e foi construída pela sobreposição de camadas de solo de aproximadamente 50 mm que sofriam a seguinte seqüência de operações:

- 1- Distribuição de uma camada de solo de aproximadamente 50 mm, conforme mostra a Figura 6.1.



FIGURA 6.1 – Distribuição de camada de solo na caixa com auxílio de lâmina

- 2- Compactação da camada de solo, por meio de rolo compactador, conforme ilustra a Figura 6.2.

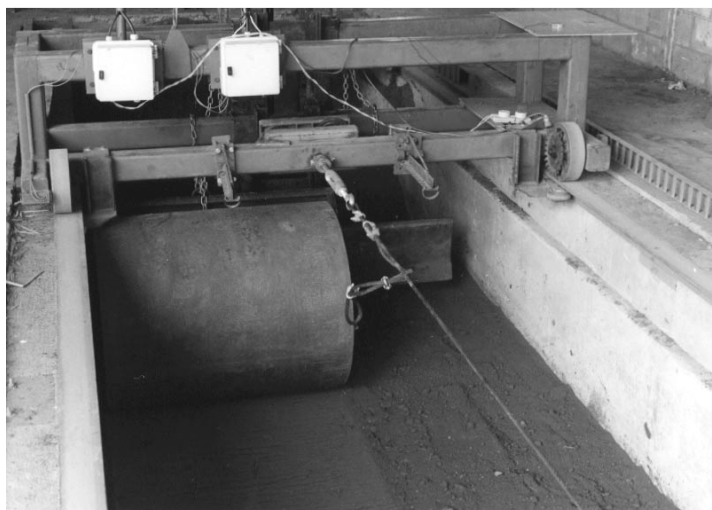


FIGURA 6.2 – Rolo compactador sendo aplicado sobre camada de solo

- 3- Escarificação da camada recém-compactada, como pode ser observado na Figura 6.3, para que houvesse uma boa solidarização entre as camadas de solo sobrepostas.



FIGURA 6.3 - Escarificação da camada recém compactada

- 4- Umedecimento: sempre que necessário era aplicado sobre a camada escarificada, com o auxílio de um regador, a quantidade de água suficiente para manter o solo próximo da umidade desejada (14%). Após a distribuição da água iniciava-se a aplicação de uma nova camada de solo, com aproximadamente 50 mm, até que se obtivesse uma espessura próxima de 200 mm para o leito de ensaios.

O leito de ensaio, depois de estar composto, recebia uma camada de palhiço, que também era umedecida e, finalmente era coberto com uma lona plástica. Ele permanecia desta forma, em repouso, por dois dias para que a umidade fosse melhor distribuída.

APÊNDICE 7

INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA NA COLETA DE DADOS DOS ENSAIOS NA CAIXA DE SOLOS

Instrumentação utilizada na coleta de dados dos ensaios na caixa de solos

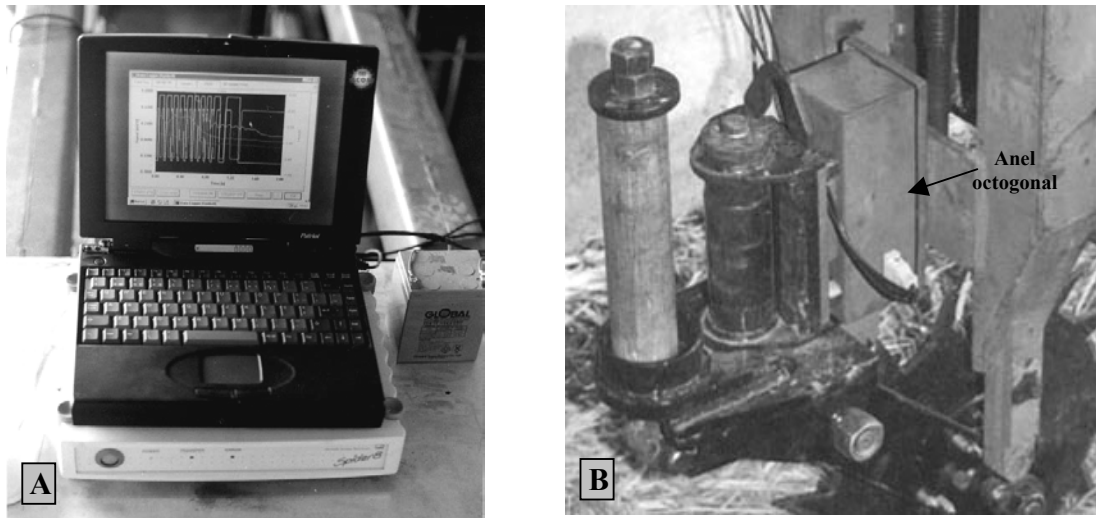


FIGURA 7.1 – A: Sistema de aquisição de dados acoplado ao Microcomputador;

B: detalhe do protótipo evidenciando a caixa do anel octogonal, fixado entre a coluna e o chassi do protótipo.

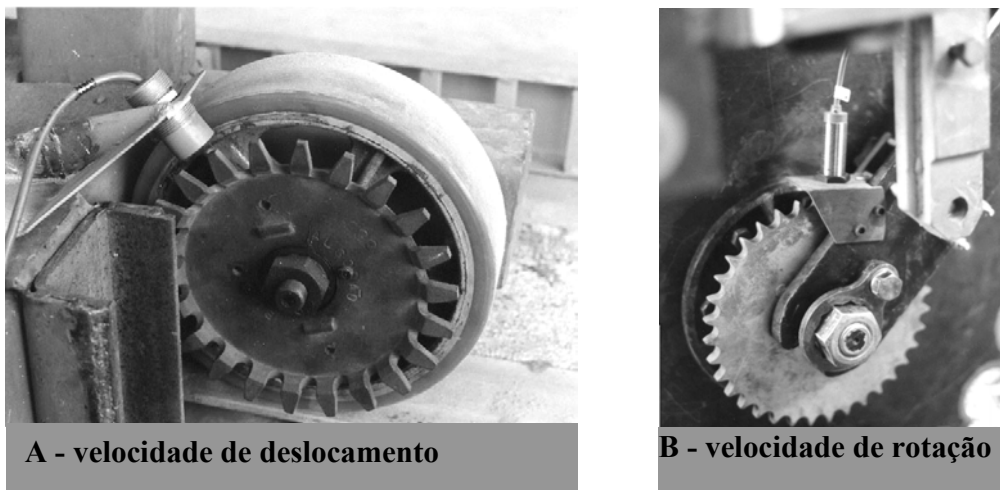


FIGURA 7.2 - Sensores indutivos utilizados nos ensaios com os discos de corte.

APÊNDICE 8

ROTINA ELABORADA PARA TRATAMENTO DOS DADOS DOS ENSAIOS OBTIDOS POR MEIO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

% ROTINA PARA TRATAMENTO DOS DADOS DE ENSAIOS COM OS DISCO DE
CORTE

%'-----';

% VARIÁVEIS UTILIZADAS

% Identificação dos dados referentes às variáveis Força Vertical,
% Força Horizontal, Momento de força, deslocamentos longitudinal e
% rotacional do disco de corte
% a = hipotenusa do triângulo com um vértice no centro do anel e outro no centro do disco;
% A1 = ângulo do triângulo, relativo ao vértice ligado ao centro do disco;
% A2 = ângulo formado entre o vetor Força Resultante e a Força Vertical;
% A3 = ângulo do cateto adjacente do triângulo formado por "a" e "b", com vértice no centro
anel octagonal;
% b = braço de aplicação da Força Resultante (FR), em relação ao centro do anel;
% b_linha = distância, perpendicular ao vetor FR, entre o centro do disco e o centro do anel;
% c = Valor do cateto oposto do triângulo com vértices nos centros do anel e do disco;
% Corte_inicio = tempo do ensaio à partir do qual serão aproveitados os dados;
% Corte_fim = tempo do ensaio, até onde serão aproveitados os dados;
% d = Valor do cateto adjacente do triângulo com vértices nos centros do anel e do disco;
% FH = força horizontal;
% FR = força resultante;
% FV = força vetical;
% FVmedia = valor medio da Força Vertical;
% FHmedia = valor médio da Força Horizontal;
% FRmedia = valor médio da Força Resultante;
% Mmedio = valor médio do Momento aplicado ao centro do anel;
% k = contador para loops que envolvem o sensor de deslocamento linear;
% M = momento de força aplicada no centro do anel octagonal;
% n = contador para loops que envolvem o sensor de rotação;
% N_pontos = número de dados que contém o arquivo;

```

% picosR = número de picos do sensor de rotação;
% picosL = número de picos do sensor de deslocamento linear;
% pulsoR = vetor de zeros e uns, dos pulsos do sensor de rotação;
% pulsoL = vetor de zeros e uns, dos pulsos do sensor de deslocamento linear;
% R = raio do disco de corte ensaiado;
% Sinal_V = Sinal da força Vertical;
% Sinal_H = Sinal da força Horizontal;
% Sinal_M = Sinal do momento de força;
% Sinal_Linear = Sinal do sensor de deslocamento linear;
% Sinal_Rotacao = Sinal do sensor de rotação;
% tempo = vetor coluna criado, em função da frequência de aquisição;
% Vel_media = Velocidade média de translação do centro do disco de corte;
% Vel_angular = Velocidade angular do disco de corte;
% x = valor do braço de aplicação, em relação ao centro do disco, da Força Resultante;
%'-----';
%          DADOS DE ENTRADA
'Para carregar o arquivo digite: load nome_do_arquivo.txt'
'pressione a tecla "enter" e em seguida digite: return e tecle enter novamente'
keyboard
Nome_Arquivo=input('digite novamente o nome do arquivo, sem a extensão ');
N_pontos = size(Nome_Arquivo);
N_pontos(2)=[];
N_colunaV=input('Em qual coluna está o sinal da força vertical? ');
Sinal_V = Nome_Arquivo(1:N_pontos,N_colunaV);
N_colunaH=input('Em qual coluna está o sinal da força horizontal? ');
Sinal_H = Nome_Arquivo(1:N_pontos,N_colunaH);
N_colunaM=input('Em qual coluna está o sinal do momento? ');
Sinal_M = Nome_Arquivo(1:N_pontos,N_colunaM);
N_colunaLinear=input('Em qual coluna está o sinal de deslocamento linear? ');
Sinal_Linear = Nome_Arquivo(1:N_pontos,N_colunaLinear);
N_colunaRotacao=input('Qual a coluna do sinal de deslocamento rotacional? ');

```

```

Sinal_Rotacao = Nome_Arquivo(1:N_pontos,N_colunaRotacao);
frequencia = input('Qual a frequência de aquisição adotada, em Hz? ');
R = input('Qual o valor do raio do disco de corte, em metros? ');
%'-----';
%          CRIANDO VETOR TEMPO
ultimo_valor = N_pontos*(1/frequencia);
temp = linspace((1/frequencia), ultimo_valor, N_pontos);
%'-----';
%          GRÁFICOS INICIAIS;
plot(temp,Sinal_V,'r')
xlabel('tempo (s)'), ylabel('Sinal (mV/V)')
hold
plot(temp,Sinal_H,'g',temp,Sinal_M,'b')
hold
%'-----';
%          CORTE DOS ARQUIVOS
Corte_inicio = input('Em que tempo (segundos) deseja fazer o corte inicial do arquivo? ');
Corte_fim = input('Em que tempo (segundos) deseja fazer o corte final do arquivo? ');
inicio = Corte_inicio*frequencia;
fim = Corte_fim*frequencia;
Sinal_Vt = Sinal_V(inicio:fim);
Sinal_Ht = Sinal_H(inicio:fim);
Sinal_Mt = Sinal_M(inicio:fim);
Sinal_Lineart = Sinal_Linear(inicio:fim);
Sinal_Rotacaot = Sinal_Rotacao(inicio:fim);
tempo = temp(inicio:fim);
%'-----';
%          DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS E MOMENTO
%          EQUAÇÕES DE CALIBRAÇÃO
FV = 12.0781*Sinal_Vt-0.0172;
FH = 12.0195*Sinal_Ht-0.0772;

```

```

M = 2.0317*Sinal_Mt-0.052;
%      CÁLCULO DA RESULTANTE
FR = sqrt(FV.^2 + FH.^2);
%'-----';
%      CONFECÇÃO DOS GRÁFICOS;
plot(tempo,FV,'r')
xlabel('tempo (s)'), ylabel('Forças (kN), Momento (mKN) ')
hold
plot(tempo,FH,'g',tempo,M,'b')
hold
%'-----';
%      TRATAMENTO DO SINAL DOS SENSORES INDUTIVOS;
%      ROTAÇÃO;
N_pontos1 = size(tempo);
N_pontos1(1)=[];
maximoR = max(Sinal_Rotacaot);
for n=1:N_pontos1
    if Sinal_Rotacaot (n)>=(maximoR*0.92)
        pulsoR(n)=1;
    else pulsoR(n)=0;
    end
end
pulsoR=pulsoR';
for k=1:(N_pontos1-1)
    if pulsoR(k+1) == 1
        pulsoR(k) = 0;
    else
        end
end
n=1;
picosR=0;

```



```

for n=1:N_pontos1
    if pulsoR(n)==1
        picosR=picosR+1;
    else
        end
end
%    LINEAR;
n=1;
k=1;
maximoL = max(Sinal_Lineart);
for n=1:N_pontos1
    if Sinal_Lineart(n)>=(maximoL*0.92)
        pulsoL(n)=1;
    else pulsoL(n)=0;
    end
end
pulsoL=pulsoL';
for k=1:(N_pontos1-1)
    if pulsoL(k+1) == 1
        pulsoL(k) = 0;
    else
        end
end
k=1;
picosL=0;
for k=1:N_pontos1
    if pulsoL(k)==1
        picosL=picosL+1;
    else
        end
end
end

```

```

% '-----';
%          CALCULANDO VELOCIDADES
Vel_media = picosL*0.0357/(Corte_fim - Corte_inicio)
% 0.1745 = 10 graus(valor de cada pulso do sensor de rotação);
Vel_angular = (picosR*0.1745/(Corte_fim - Corte_inicio));
rel_Velocidades = Vel_angular/Vel_media
% '-----';
%          VALORES MÉDIOS;
FVmedia = mean(FV)
FHmedia = mean(FH)
FRmedia = mean(FR)
Mmedio = mean(M)
% '-----';
%          DETERMINAÇÃO DO MOMENTO APLICADO AO CENTRO DO DISCO
c = 0.165;
d = 0.5245;
a = 0.5498;
A1 = 0.3046;
b = Mmedio/FRmedia;
A2 = acos(FVmedia/FRmedia);
A3 = 1.571-(A2+A1);
b_linha = a*cos(A3);
x = b-b_linha
Mc = FRmedia*x

```

APÊNDICE 9

RESUMO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS EXPERIMENTOS

Resumo das análises estatísticas dos experimentos

As análises estatísticas dos experimentos foram realizadas por meio do software MINITAB versão 13.1. A seguir são apresentados os resumos das análises realizadas nos dois experimentos.

1 - Primeiro experimento

1.1 - Análise de variância dos atributos utilizados para avaliação dos discos de corte de rolamento

...

Results for: 3discos.xls

General Linear Model: FV; FH; ... versus Disc-prof; bloco

Factor	Type	Levels	Values
Disc-pro	fixed	6	d100 d80 1100 180 r100 r80
bloco	random	6	1 2 3 4 5 6

Analysis of Variance for FV, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Disc-pro	5	29.6572	29.6911	5.9382	61.73	0.000
bloco	5	1.2977	1.2977	0.2595	2.70	0.045
Error	24	2.3087	2.3087	0.0962		
Total	34	33.2637				

Analysis of Variance for FH, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Disc-pro	5	3.97890	3.97693	0.79539	26.85	0.000
bloco	5	0.25125	0.25125	0.05025	1.70	0.174
Error	24	0.71104	0.71104	0.02963		
Total	34	4.94119				

Analysis of Variance for M_{CD}, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Disc-pro	5	0.109786	0.109584	0.021917	46.31	0.000
bloco	5	0.005731	0.005731	0.001146	2.42	0.065
Error	24	0.011358	0.011358	0.000473		
Total	34	0.126876				

Analysis of Variance for Qpalha, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Disc-pro	5	1863453	1850854	370171	84.89	0.000
bloco	5	45827	45827	9165	2.10	0.100
Error	24	104653	104653	4361		
Total	34	2013933				

Analysis of Variance for **lambda**, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Disc-pro	5	0.0545343	0.0546573	0.0109315	150.55	0.000
bloco	5	0.0022373	0.0022373	0.0004475	6.16	0.001
Error	24	0.0017427	0.0017427	0.0000726		
Total	34	0.0585143				

Analysis of Variance for **Vo**, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
disco	2	0.0002956	0.0001902	0.0000951	0.11	0.900
bloco	5	0.0052218	0.0052218	0.0010444	1.16	0.356
Error	27	0.0243798	0.0243798	0.0009030		
Total	34	0.0298971				

1.2 - Teste de normalidade dos resíduos (Anderson Darling)

Variable	Value*
FV	0,86
FH	0,65
M _{CD}	0.48
Qpalha	0,26
Lambda	0,53

Obs.:* É aceito como tendo distribuição normal do resíduo aquele atributo que obtiver valor superior a 0,1 neste teste.

1.3 - Testes de médias ao nível de 1% de probabilidade

Tukey Simultaneous Tests

All Pairwise Comparisons among Levels of Disc-pro

Response Variable FV

Disc-pro = d100 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
d80	-0.3969	0.1895	-2.095	0.3232
l100	2.0814	0.1895	10.983	0.0000
l80	1.9064	0.1895	10.060	0.0000
r100	0.6197	0.1895	3.270	0.0339
r80	0.4814	0.1895	2.540	0.1520

Disc-pro = d80 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
l100	2.4783	0.1791	13.840	0.0000
l80	2.3033	0.1791	12.863	0.0000
r100	1.0167	0.1791	5.677	0.0001
r80	0.8783	0.1791	4.905	0.0007

Disc-pro = l100 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
l80	-0.175	0.1791	-0.977	0.9207
r100	-1.462	0.1791	-8.163	0.0000
r80	-1.600	0.1791	-8.935	0.0000

Disc-pro = l80 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r100	-1.287	0.1791	-7.185	0.0000
r80	-1.425	0.1791	-7.958	0.0000

Disc-pro = r100 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r80	-0.1383	0.1791	-0.7725	0.9696

Response Variable FH

Disc-pro = d100 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
d80	-0.1755	0.1052	-1.669	0.5638
l100	0.8595	0.1052	8.172	0.0000
l80	0.4445	0.1052	4.226	0.0036
r100	0.2828	0.1052	2.689	0.1145
r80	0.1028	0.1052	0.977	0.9207

Disc-pro = d80 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
l100	1.0350	0.09938	10.415	0.0000
l80	0.6200	0.09938	6.239	0.0000
r100	0.4583	0.09938	4.612	0.0014
r80	0.2783	0.09938	2.801	0.0918

Disc-pro = l100 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
l80	-0.4150	0.09938	-4.176	0.0041
r100	-0.5767	0.09938	-5.803	0.0001
r80	-0.7567	0.09938	-7.614	0.0000

Disc-pro = l80 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r100	-0.1617	0.09938	-1.627	0.5898
r80	-0.3417	0.09938	-3.438	0.0232

Disc-pro = r100 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r80	-0.1800	0.09938	-1.811	0.4776

Response Variable M_{CD}

Disc-pro = d100 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
d80	-0.02729	0.01329	-2.053	0.3439
l100	0.13538	0.01329	10.185	0.0000
l80	0.09921	0.01329	7.464	0.0000
r100	0.04355	0.01329	3.276	0.0334
r80	0.02655	0.01329	1.997	0.3728

Disc-pro = d80 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
l100	0.16267	0.01256	12.951	0.0000
l80	0.12650	0.01256	10.072	0.0000
r100	0.07083	0.01256	5.640	0.0001
r80	0.05383	0.01256	4.286	0.0031

Disc-pro = l100 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
l80	-0.0362	0.01256	-2.880	0.0782
r100	-0.0918	0.01256	-7.312	0.0000
r80	-0.1088	0.01256	-8.665	0.0000

Disc-pro = l80 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r100	-0.05567	0.01256	-4.432	0.0022
r80	-0.07267	0.01256	-5.786	0.0001

Disc-pro = r100 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r80	-0.01700	0.01256	-1.354	0.7530

Response Variable Qpalha

Disc-pro = d100 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
d80	-33.30	40.35	-0.8254	0.9598
l100	581.61	40.35	14.4149	0.0000
l80	506.36	40.35	12.5500	0.0000
r100	271.40	40.35	6.7266	0.0000
r80	199.02	40.35	4.9327	0.0006

Disc-pro = d80 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
l100	614.9	38.12	16.129	0.0000
l80	539.7	38.12	14.155	0.0000
r100	304.7	38.12	7.992	0.0000
r80	232.3	38.12	6.094	0.0000

Disc-pro = l100 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
l80	-75.2	38.12	-1.97	0.3854
r100	-310.2	38.12	-8.14	0.0000
r80	-382.6	38.12	-10.03	0.0000

Disc-pro = l80 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r100	-235.0	38.12	-6.163	0.0000
r80	-307.3	38.12	-8.061	0.0000

Disc-pro = r100 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r80	-72.38	38.12	-1.898	0.4270

Response Variable **lambda**

Disc-pro = dl100 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
d80	-0.0031	0.005207	-0.59	0.9908
l100	-0.1031	0.005207	-19.80	0.0000
l80	-0.0947	0.005207	-18.20	0.0000
r100	-0.0414	0.005207	-7.95	0.0000
r80	-0.0497	0.005207	-9.55	0.0000

Disc-pro = d80 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
l100	-0.1000	0.004920	-20.33	0.0000
l80	-0.0917	0.004920	-18.63	0.0000
r100	-0.0383	0.004920	-7.79	0.0000
r80	-0.0467	0.004920	-9.49	0.0000

Disc-pro = l100 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
l80	0.008333	0.004920	1.694	0.5486
r100	0.061667	0.004920	12.535	0.0000
r80	0.053333	0.004920	10.841	0.0000

Disc-pro = l80 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r100	0.05333	0.004920	10.841	0.0000
r80	0.04500	0.004920	9.147	0.0000

Disc-pro = r100 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
Disc-pro	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r80	-0.008333	0.004920	-1.694	0.5486

1.4 - Medias

Descriptive Statistics: FV; FH; M_{CD}; Qpalha lambcorr; by Disc-prof

Variable	Disc-pro	Mean
FV	d100	1.656
	d80	1.242
	l100	3.720
	l80	3.545
	r100	2.258
	r80	2.120
FH	d100	0.5040
	d80	0.3250
	l100	1.360
	l80	0.9450
	r100	0.7833
	r80	0.6033
M_{CD}	d100	0.08080
	d80	0.05317
	l100	0.2158
	l80	0.17967
	r100	0.12400
	r80	0.10700
Qpalha	d100	18.8
	d80	2.5
	l100	310.0
	l80	272.3
	r100	154.8
	r80	127.1
lambda	d100	1.062
	d80	1.060
	l100	0.9600
	l80	0.968
	r100	1.022
	r80	1.013
Vo	dent	0.54
	liso	0.54
	recort	0.53

1.5 - Correlações

Correlations: FV; FH; lambda; Mc; Qpalha

	FV	FH	lambda	Mc
FH	0.911 0.000			
lambda	-0.925 0.000	-0.842 0.000		
Mc	0.978 0.000	0.960 0.000	-0.911 0.000	
Qpalha	0.935 0.000	0.853 0.000	-0.940 0.000	0.929 0.000

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

2 - Segundo experimento

2.1 - Análise de variância dos atributos utilizados para avaliação dos três discos dentados

Results for: 3discos.xls

General Linear Model: FV; FH; Mc; LambCorr; Qpalha versus disco; bloco

Factor	Type	Levels	Values
disco	fixed	3	r20 r24 r28
bloco	random	4	1 2 3 4

Analysis of Variance for FV, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
disco	2	1.72473	1.72472	0.86236	69.37	0.000
bloco	3	0.42610	0.42610	0.14203	11.42	0.000
Error	18	0.22378	0.22378	0.01243		
Total	23	2.37460				

Analysis of Variance for FH, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
disco	2	0.025808	0.025808	0.012904	3.28	0.061
bloco	3	0.106767	0.106767	0.035589	9.05	0.001
Error	18	0.070758	0.070758	0.003931		
Total	23	0.203333				

Analysis of Variance for Mc, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
disco	2	0.0036406	0.0036406	0.0018203	36.29	0.000
bloco	3	0.0020775	0.0020775	0.0006925	13.80	0.000
Error	18	0.0009029	0.0009029	0.0000502		
Total	23	0.0066210				

Analysis of Variance for Qpalha, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
disco	2	10771.1	10771.1	5385.6	16.67	0.000
bloco	3	1111.7	1111.7	370.6	1.15	0.357
Error	18	5813.9	5813.9	323.0		
Total	23	17696.7				

Analysis of Variance for Lambda, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
disco	2	0.0008333	0.0008333	0.0004167	8.18	0.003
bloco	3	0.0001458	0.0001458	0.0000486	0.95	0.435
Error	18	0.0009167	0.0009167	0.0000509		
Total	23	0.0018958				

Analysis of Variance for **Vo**, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
disco	2	0.002308	0.002308	0.001154	0.94	0.410
bloco	3	0.000067	0.000067	0.000022	0.02	0.997
Error	18	0.022158	0.022158	0.001231		
Total	23	0.024533				

2.2 - Teste de normalidade dos resíduos (Anderson Darling)

Variable	Value*
FV	0,53
FH	0,37
M _{CD}	0.29
Lambda	0,71
Qpalha	0,51
Vo	0,55

Obs.:* É aceito como tendo distribuição normal do resíduo aquele atributo que obtiver valor superior a 0,1 neste teste.

2.3 - Testes de médias ao nível de 1% de probabilidade

Tukey Simultaneous Tests

All Pairwise Comparisons among Levels of disco

Response Variable FV

disco = r20 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
disco	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r24	0.4587	0.05575	8.229	0.0000
r28	0.6362	0.05575	11.413	0.0000

disco = r24 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
disco	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r28	0.1775	0.05575	3.184	0.0136

Response Variable FH

disco = r20 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
disco	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r24	0.06000	0.03135	1.9139	0.1635
r28	-0.01625	0.03135	-0.5184	0.8634

disco = r24 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
disco	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r28	-0.07625	0.03135	-2.432	0.0633

Response Variable M_{cp}

disco = r20 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
disco	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r24	0.02775	0.003541	7.836	0.0000
r28	0.02412	0.003541	6.813	0.0000

disco = r24 subtracted from:

Level	Difference	SE of		Adjusted
disco	of Means	Difference	T-Value	P-Value
r28	-0.003625	0.003541	-1.024	0.5720

Response Variable **Lambda**

disco = r20 subtracted from:

Level	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
disco				
r24	-0.01250	0.003568	-3.503	0.0068
r28	-0.01250	0.003568	-3.503	0.0068

disco = r24 subtracted from:

Level	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
disco				
r28	-0.000000	0.003568	-0.000000	1.000

Response Variable **Qpalha**

disco = r20 subtracted from:

Level	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
disco				
r24	6.281	8.986	0.6990	0.7671
r28	47.750	8.986	5.3138	0.0001

disco = r24 subtracted from:

Level	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
disco				
r28	41.47	8.986	4.615	0.0006

Response Variable **Vo**

disco = r20 subtracted from:

Level	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
disco				
r24	-0.02375	0.01754	-1.354	0.3851
r28	-0.00875	0.01754	-0.499	0.8728

disco = r24 subtracted from:

Level	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
disco				
r28	0.01500	0.01754	0.8550	0.6746

2.4 - Medias

Descriptive Statistics: FV; FH; Mc; LambCorr; Qpalha by disco

Variable	disco	Mean
FV	r20	1.465
	r24	1.924
	r28	2.101
FH	r20	0.594
	r24	0.654
	r28	0.577
Mc	r20	0.070
	r24	0.098
	r28	0.094
Lambda	r20	1.091
	r24	1.079
	r28	1.079
Qpalha	r20	2.35
	r24	5.50
	r28	26.22
Vo	r20	0.67
	r24	0.65
	r28	0.66

2.5 - Correlações

Correlations: FV; FH; Lamb; Mc; Qpalha

	FV	FH	Lamb	Mc
FH	0.406 0.049			
Lamb	-0.656 0.001	-0.172 0.421		
Mc	0.883 0.000	0.588 0.003	-0.576 0.003	
Qpalha	0.614 0.001	-0.118 0.583	-0.383 0.065	0.343 0.101

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value