

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS E AGRÍCOLA
Departamento de Engenharia Agrícola

Coeficientes de atrito de forra-
gens picadas em várias superfícies

Elber Laércio Dalcolmo

Orientador:
Prof. Dr. Oscar Antonio Braunbeck

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola da Uni-
versidade Estadual de Campinas, para obtenção do Título de Mestre em Enge-
nharia Agrícola.

-1980-

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

À Neuza, minha esposa
e meus filhos
Fernanda e Bruno.

A G R A D E C I M E N T O S

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e ao PICD/CAPES por esta oportunidade, permitindo o meu afastamento e facilidades.

Ao Prof. Dr. Oscar Antonio Braunbeck, por sua orientação inteligente e objetiva, e pela sua paciência e amizade.

Ao Professor e amigo Dr. Inácio M. Dal'Fabro, pelo apoio e sugestões apresentadas.

Ao Prof. Dr. Carlos A. Gasparetto, pelas valiosas sugestões.

À Profa. Maria Lucia Setina, pela colaboração na análise estatística.

À minha esposa Neuza, por ter-me incentivado e acreditado em mim.

Aos amigos Sandoval F. da Mata e Thomás A. Ferreira pelo apoio e incentivo em todos os momentos.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, o nosso profundo reconhecimento.

C O N T E Ú D O

	pag.
ÍNDICE DE TABELAS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
SIMBOLOGIA	iv
RESUMO	v
SUMMARY	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Coeficiente de atrito	5
2.2. Variáveis que afetam o coeficiente de atrito	7
2.3. Equipamentos para determinação do coeficiente de atrito	11
3. OBJETIVOS	14
4. MATERIAIS E MÉTODOS	16
4.1. Materiais	16
4.1.1. Forrageiras	16
4.1.2. Superfícies de atrito	18
4.1.3. Equipamentos	19
4.2. Métodos	23
4.2.1. Preparo das amostras	25
4.2.2. Metodologia usada na determinação dos coeficientes de atrito	26
4.2.3. Rugosidade das superfícies	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1. Rugosidade das superfícies	34
5.2. Influência das variáveis no coeficiente de atrito	35
5.2.1. Velocidade de deslizamento	43
5.2.2. Carga normal	43

	pag.
5.2.3. Comprimento de corte da forragem	44
5.2.4. Teor de umidade da forragem	46
5.3. Magnitudes relativas dos coeficientes de atrito estático e cinético	54
5.4. Valores máximos dos coeficientes de atrito	55
5.5. Modelos matemáticos	57
6. CONCLUSÕES	64
7. SUGESTÕES	66
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ÍNDICE DE TABELAS

<u>TABELA</u>		<u>PAG.</u>
4.2.2.1.	Sequência dos testes e combinação de variáveis usadas para determinação dos coeficientes de atrito.	29
5.1.	Rugosidade média das superfícies em micron (μ) antes e depois de serem usadas.	34
5.2.	Coefficientes de atrito estático do milho.	36
5.3.	Coefficientes de atrito estático do capim elefante.	37
5.4.	Coefficientes de atrito estático do sorgo.	38
5.5.	Coefficientes de atrito cinético do milho.	39
5.6.	Coefficientes de atrito cinético do sorgo.	40
5.7.	Coefficientes de atrito cinético do capim elefante.	41
5.8.	Coefficientes de atrito cinético da cana.	42
5.9.	Coefficientes de atrito estático em função da umidade do capim elefante.	47
5.10.	Coefficientes de atrito estático em função da umidade do sorgo.	48
5.11.	Coefficientes de atrito estático em função da umidade do milho.	49

<u>TABELA</u>		<u>PAG.</u>
5.12.	Coeficientes de atrito cinético em função da umidade do milho.	50
5.13.	Coeficientes de atrito cinético em função da umidade do capim elefante.	51
5.14.	Coeficientes de atrito cinético em função da umidade do sorgo.	52
5.15.	Valores máximos de coeficientes de atrito de cada forrageira em todas as superfícies estudadas.	56
5.16.	Parâmetros das equações de regressão para determinação dos coeficientes de atrito estático e cinético do capim elefante.	59
5.17.	Parâmetros das equações de regressão para determinação dos coeficientes de atrito estático e cinético do sorgo.	60
5.18.	Parâmetros das equações de regressão para determinação dos coeficientes de atrito estático e cinético do milho.	61
5.19.	Parâmetros das equações de regressão para determinação dos coeficientes de atrito estático e cinético da cana.	62

ÍNDICE DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>		<u>PAG.</u>
1.1.	Alguns exemplos de aplicação do coeficiente de atrito.	4
4.1.3.1.	Esquema do equipamento acoplado ao Instron Universal para a determinação dos coeficientes de atrito.	21
4.2.2.1.	Gráfico característico da força de atrito x deslocamento, para o sorgo com 78% de umidade b.u. em superfície de madeira.	31
5.1.	Influência da carga normal no coeficiente de atrito estático do milho com 71% de umidade em chapa galvanizada.	45
5.2.	Influência do comprimento de corte da forragem no coeficiente de atrito estático do milho com 71% de umidade em chapa galvanizada.	45
5.3.	Efeito da umidade no coeficiente de atrito estático do milho em chapa não pintada.	53
5.4.	Efeito da umidade no coeficiente de atrito cinético do milho em chapa não pintada. $V = 20$ cm/min.	53

S I M B O L O G I A

<u>SÍMBOLO</u>	<u>DEFINIÇÃO</u>	<u>UNIDADE</u>
b.u.	Umidade da forragem em base úmida	(%)
cc	Comprimento de corte da forragem	(cm)
CN	Carga normal	(g/cm ²)
CV	Coeficiente de variação	(%)
F	Valor de F de Snedecor da regressão. A significância para 5 e 1% de probabilidade para o teste F é indicada, respectivamente, por um (*) e dois (**) asteriscos.	-
Fa	Força de atrito	(kgf)
Fe	Força de atrito estático	(kgf)
Fc	Força de atrito cinético	(kgf)
g	Aceleração da gravidade	(cm/seg ²)
L	Comprimento de transporte	(cm)
m	Massa	(kg)
R	Coeficiente de correlação múltipla	-
Ra	Rugosidade das superfícies	(μ)
Ri	Raio de atrito	(cm)
V	Velocidade de deslizamento	(cm/min)
W	Carga de forragem	(ton)
α	Ângulo de transporte da forragem	(rad)
β ₀ , β ₁ , β ₂ , β ₃	Coeficiente das equações de regressão 5.3. e 5.4.	-
μ _E	Coeficiente de atrito estático	-
$\bar{\mu}_E$	Coeficiente de atrito estático médio	-
μ _C	Coeficiente de atrito cinético	-
$\bar{\mu}_C$	Coeficiente de atrito cinético médio	-

R E S U M O

O projeto de máquinas para colheita e manuseio de forragens picadas requer dados sobre os coeficientes de atrito entre os diversos tipos de forragens e as superfícies sobre as quais deslizam esses materiais, permitindo uma análise mais apurada dos esforços que atuam nos mecanismos e uma melhor seleção técnico-econômica dos materiais de construção.

O objetivo do presente trabalho foi o de determinar os coeficientes de atrito estático e cinético do milho, sorgo, cana e capim elefante nas superfícies de madeira, chapa galvanizada, chapa não pintada, chapa pintada e madeira pintada, em função de variáveis que afetam a sua magnitude, tais como: umidade da forragem, comprimento de corte da forragem, velocidade de deslizamento e carga normal.

Para umidade da forragem superior a 70%, um aumento de carga normal implicou numa redução do coeficiente de atrito, enquanto que para umidade inferior a 30% a carga normal não alterou o coeficiente de atrito.

Os coeficientes de atrito sofreram uma redução quando a umidade variou de 60 para 30%, permanecendo constante acima e abaixo dessa faixa.

A velocidade de deslizamento não alterou o coeficiente de atrito cinético.

Um aumento no comprimento de corte das forragens provocou uma redução nos coeficientes de atrito estático e cinético.

As superfícies pintadas apresentaram coeficientes de atrito inferiores às outras superfícies.

Os maiores coeficientes de atrito foram obtidos para a cana em todas as superfícies.

Equações de regressão foram obtidas para calcular os coeficientes de atrito em função das variáveis consideradas.

S U M M A R Y

The friction coefficients between forages and different types of surfaces are needed in the area of machine design in order to estimate the loads acting on the mechanisms and also to make proper selections of materials from an economical point of view.

The objective of the present work was to evaluate the static and kinetic coefficients of friction of corn, sorgum, sugar cane and grass on the following surfaces: galvanized steel, painted carbon steel, non-painted carbon steel, wood and painted wood. The variables considered in this study were: moisture content, length of cut, sliding velocity and normal load.

There was a reduction of the friction coefficients for increasing normal loads, when the forages moisture content was over 70%; for moisture levels under 30% there was not effect of normal load on friction coefficients.

The friction coefficients increased with moisture content in the range of 30 to 60% w.b., being approximately constant out of this range.

The sliding velocity did not affect the kinetic coefficients of friction.

Increasing lengths of cut were associated with decreasing static and kinetic coefficients of friction.

Painted surfaces showed lower friction coefficients, sugar cane showed the highest friction coefficients.

Regression analysis was applied to the data in order to mathematically relate the friction coefficients to the variables involved.

1. - INTRODUÇÃO

Se dois corpos são postos em contato e há um movimento ou tendência de movimento relativo entre eles, manifestam-se forças na superfície de contato, cuja resultante se opõe ao movimento ou tendência de movimento. Como o atrito se opõe ao movimento, representa, na maioria dos casos, um indesejável mas inevitável obstáculo, e constitui a forma mais comum de resistência passiva, responsável por frações importantes do total da energia consumida pelas máquinas.

O dimensionamento de máquinas para colheita e manuseio de forragens picadas requer dados sobre os coeficientes de atrito entre os diversos tipos de forragens e as superfícies sobre as quais deslizam esses materiais. Na situação energética atual, o projeto de novas máquinas deve considerar também, entre os objetivos, a minimização do consumo de energia.

As colhedeiras de forragens utilizam geralmente um rotor com pás impulsoras para transportar a forragem picada até a carreta ou caminhão. Nesse processo, as pás do rotor forçam a forragem contra o anel periférico da carcaça e, vencendo as forças de atrito (Fig. 1.1.a) deslocam esse material até a boca de saída. Bockhop e Barnes (10) pesquisaram os componentes da potência total de acionamento, concluindo que para um regime de alimentação de 14 ton/h, a máquina, com rotor impulsor, necessita de 22 HP na TDP, dos quais, pouco mais de 6 HP corres-

pondem às perdas por atrito. Blevins e Hansen (9) mediram uma potência de 31 HP na TDP para um regime de alimentação de 20 ton/h, dos quais, 7,5 HP correspondem às perdas por atrito.

No caso de carretas forrageiras, Fig. 1.1.b., o dimensionamento das correntes do assoalho e componentes de transmissão, dependem das forças de atrito entre a forragem, assoalho e paredes laterais da carreta. O coeficiente de atrito pode variar de 0,2 para o caso de feno picado, a 0,8 para capim com alto teor de umidade, Richter (30), onde ter-se-á uma variação de 300% entre condições extremas. Uma carreta com 5 ton de forragem picada com 70% de umidade b.u., poderá demandar até 4 ton de esforço de tração no transportador, o que resulta numa energia de 8 ton-m para descarregar uma carreta de 4 m de comprimento. Esses valores poderão ser reduzidos até 40%, escolhendo convenientemente o material para as superfícies que interacionam com a forragem.

A energia específica de acionamento HP-h/ton e o dimensionamento do eixo e transmissões das roscas transportadoras (Fig. 1.1.c.) dependem também dos esforços de atrito desenvolvidos entre o material, a evolvente da rosca e a helicóide impulsora.

O transporte de forragens em tubos de descarga de colhedeadas e tubos elevadores para silos aéreos (Fig. 1.1.d.), é feito, principalmente, através da energia cinética conferida às partículas pelo rotor impulsor. Essa energia é dissipada por atrito entre as partículas, e entre elas e a parede do tubo atra-

vês do comprimento de transporte. A seleção do material do tubo com base no coeficiente de atrito poderá resultar numa redução importante da potência de acionamento e conseqüentemente, da energia gasta.

A variedade de materiais e coberturas superficiais (tinta, zinco) existentes comercialmente, permite adotar soluções diferentes, normalmente orientadas por considerações de custo, mas - que podem resultar em forças de atrito significativamente diferentes e, conseqüentemente, resultarão em transmissões de dimensões proporcionalmente diferentes.

O conhecimento dos coeficientes de atrito de forragens picadas em função das variáveis que afetam a sua magnitude, permite fazer uma análise mais apurada dos esforços que atuam nos mecanismos e uma melhor seleção técnico-econômica dos materiais de construção, constituindo-se num elemento indispensável para projetos racionais.

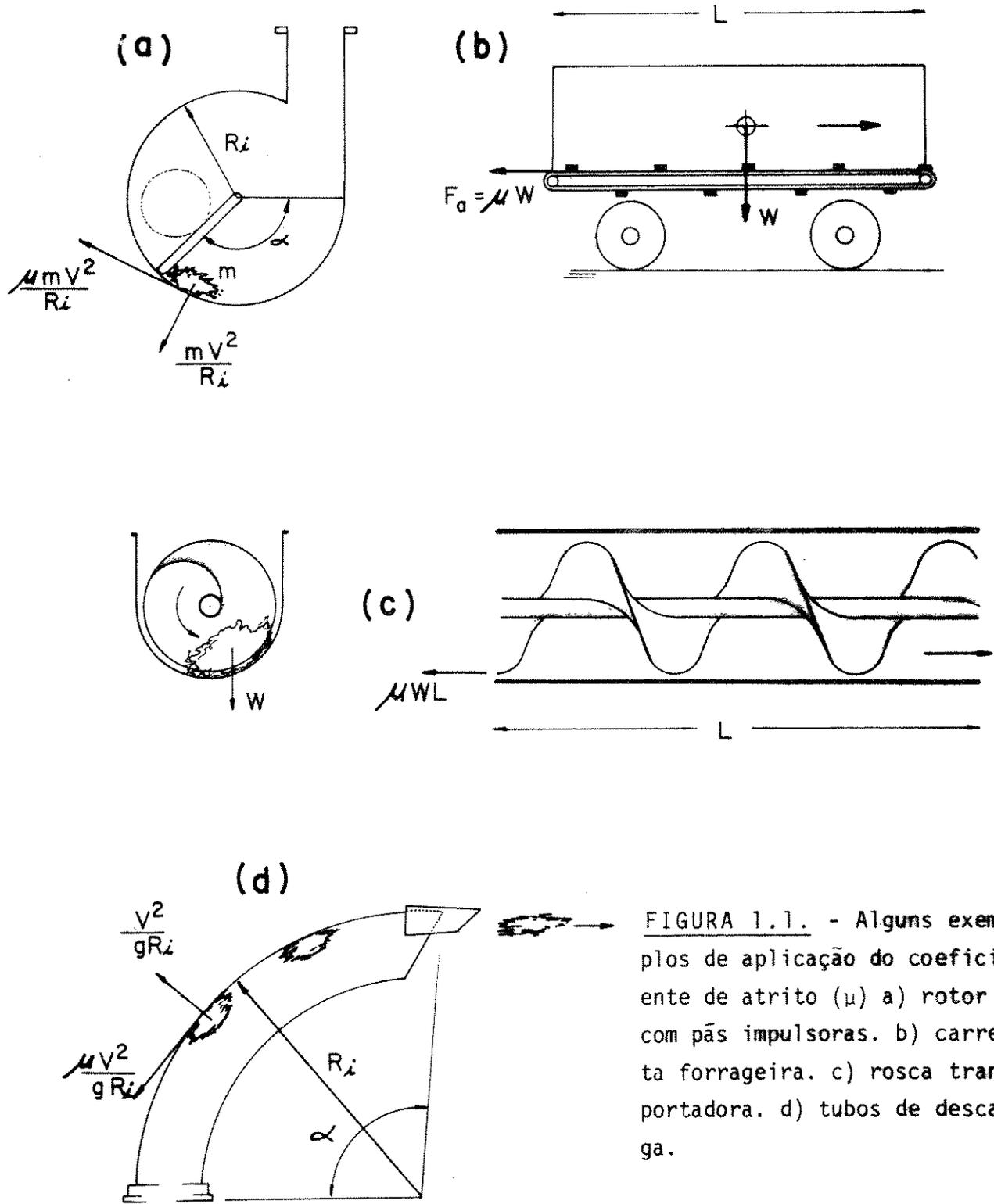


FIGURA 1.1. - Alguns exemplos de aplicação do coeficiente de atrito (μ) a) rotor com pás impulsoras. b) carruagem forrageira. c) rosca transportadora. d) tubos de descarga.

2. - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Coeficientes de atrito

O coeficiente de atrito é definido pela relação entre a força que atua no sentido de resistir ao movimento e a força normal sobre a superfície de contato.

Segundo citação de Moshenin (26), as leis básicas sobre o atrito foram enunciadas primeiramente por Amonstons e, mais tarde, verificadas por Coulomb, e dizem que: a força de atrito é independente da velocidade de deslizamento; a força de atrito depende da natureza dos materiais em contato; a força de atrito é proporcional à carga normal; a força de atrito é independente da área das superfícies em deslizamento.

Investigações mais recentes, com melhoramento das técnicas de medição, têm mostrado que alguns desses conceitos de atrito - não podem ser explicados pelas simples leis de Coulomb. Teorias avançadas sobre a causa do atrito foram propostas por - Amonstons e Bowden e Tabor (11).

Shwerwood (31) resumizou os conceitos mais gerais que são aceitos: a força de atrito é definida como a força atuando no plano de contato; a força de atrito provém da força requerida para deformar as asperezas e para vencer a adesão e coesão entre as superfícies; a força de atrito é proporcional à área de contato efetiva; a força de atrito depende da velocidade; a força

de atrito depende da natureza dos materiais em contato; a força de atrito não depende da rugosidade das superfícies, exceto em condições extremas.

Dois coeficientes de atrito são considerados para os produtos biológicos: o primeiro é o coeficiente de atrito estático, determinado pela força que é capaz de impedir o movimento relativo entre os corpos em contato; o segundo é determinado pela força que se manifesta na superfície de contato quando há movimento relativo entre os corpos, e é chamado atrito cinético ou atrito de deslizamento. De acordo com Manuais de Física, tais como: Fonseca (17), Goldemberg (18), Resnick e Halliday (29), American Institute of Physics Handbook (1) e outros, o coeficiente de atrito estático é geralmente maior que o coeficiente de atrito cinético, embora aconteçam alguns casos em que o inverso ocorre. Bickert e Buelow (8), trabalhando com grãos, observaram que a força de atrito aumenta durante a primeira fase de deslizamento e depois decresce até atingir um valor constante, sendo que o tempo para atingir esse valor constante diminui com o aumento da velocidade.

Vários trabalhos foram realizados com o objetivo de determinar os coeficientes de atrito de materiais agrícolas em várias superfícies, com várias variáveis e métodos de determinação, destacando-se: Brubaker e Pos (12), Stewart et al (34), Bickert e Buelow (7), Snyder et al (32), Lorenzin (25), Balis et al (5), todos trabalhando com grãos.

Poucas são as investigações realizadas com o objetivo de determinar os coeficientes de atrito de forrageiras. Hodges (22) - trabalhou na determinação da potência de acionamento do transportador mecânico de uma carreta forrageira. Convertendo os dados de potência para se obter o coeficiente de atrito, Hodges (22) encontrou o valor de 0,75 para silagem de milho em madeira, não sendo especificadas as condições de ensaio. Barger et al (6) apresentam coeficientes de atrito para silagem de milho, variando de 0,79 a 0,96, dependendo da condição da superfície, e também não especificam as condições em que este dado foi obtido. Hintz e Schinke (21) apresentam coeficientes de atrito cinético, para milho cortado e alfafa em chapa de aço, - sendo superior a 0,50. Richter (30) trabalhou com feno, palha, milho e grama e recomenda um coeficiente de atrito estático de 0,35 e cinético de 0,30 para feno e palha enquanto que para o milho e grama, recomenda 0,80 para coeficiente de atrito estático e 0,70 para cinético. Blevins e Hansen (9) determinaram o coeficiente de atrito cinético para milho e alfafa em chapas de aço, podendo variar de 0,20 a 0,70, dependendo da umidade.

Um resumo dos valores dos coeficientes de atrito de forragens em várias superfícies é apresentado na ASAE Data (2) e Moshenin (26).

2.2. Variáveis que afetam o coeficiente de atrito

De acordo com ASAE Data (2) e Moshenin (26), a magnitude do coeficiente de atrito pode ser afetada por variáveis tais como:

carga normal, velocidade de deslizamento, teor de umidade do material, comprimento de corte do material, condicionamento da superfície e meio ambiente.

2.2.1. Efeito da carga normal

Buelow (13) e Snyder et al (32), trabalhando com grãos, observaram que o efeito da carga normal no coeficiente de atrito não foi estatisticamente significativo. Todavia, Richter (30) verificou que não houve influência da carga normal no coeficiente de atrito de feno e palha seca em chapa galvanizada, enquanto que para milho e grama com 74 e 72% de umidade (b.u.), respectivamente, ocorre um decréscimo no coeficiente de atrito de até - 25% quando se aumenta a carga normal de 10 g/cm^2 para 30 g/cm^2 . Tal citação também aparece na ASAE Data (2).

2.2.2. Efeito da velocidade de deslizamento

Buelow (13), trabalhando com grãos de milho em chapa de aço, constatou um incremento no coeficiente de atrito - com velocidade aumentando de 0,075 m/seg para 0,37 m/seg. Hintz e Schinke (21) apresentam coeficientes de atrito para milho e alfafa em aço até a velocidade de 30,5 m/seg. Acima de 5,1 m/seg o coeficiente de atrito não foi superior a 0,50, enquanto que abaixo de 5,1 m/seg, - os resultados foram variados mas tinham, geralmente, - coeficientes superiores a 0,5. Wieneke (36), obteve um incremento no coeficiente de atrito cinético de palha -

seca e feno com velocidade aumentada até 4 m/seg, permanecendo, posteriormente, constante para velocidades até 10,13 m/seg, enquanto que para grama fresca ocorre um decréscimo no coeficiente de atrito para velocidade aumentando de 0,5 m/seg para 3,04 m/seg.

2.2.3. Efeito do teor de umidade do material

De uma maneira geral, um acréscimo na umidade de um produto biológico implica num aumento do coeficiente de atrito. Tal fato foi observado por Wieneke (36), trabalhando com feno e palha em aço; Brubaker e Pos (12) trabalhando com grãos em várias superfícies, Bickert e Buelow (7) para o caso de grãos em aço e madeira, Snyder et al (32) para grãos de trigo em aço, Steward et al (34) para grãos de sorgo em várias superfícies. Para o caso de forrageiras, tal observação foi feita por Richter (30), Blevins e Hansen (9), Osmak (27) e Wieneke (36). Osmak (27) constatou um aumento de 30% no coeficiente de atrito estático de talos de milho em aço enquanto que o coeficiente de atrito dinâmico variou de 0,32 para 0,54 quando a umidade foi aumentada de 13 para 88% (b.u.).

Blevins e Hansen (9), trabalhando com alfafa em chapa galvanizada, observaram que acima de 50% de umidade (b.u.), o valor do coeficiente de atrito é constante e da ordem de 0,63; enquanto que, na faixa de 20 a 50% de u-

midade ocorre uma variação da ordem de 40% no valor do coeficiente de atrito, permanecendo constante para umidades inferiores a 20%. As mesmas observações foram feitas por Wieneke (36) para feno e palha em aço, e Richter (30) para grama, palha e silagem em chapa galvanizada.

2.2.4. Efeito do comprimento de corte da forragem

Blevins e Hansen (9) determinaram o coeficiente de atrito de alfafa e milho em aço com variação do comprimento de corte e esta variação não modificou significativamente o valor do coeficiente de atrito que foi da ordem de 0,40 para milho e 0,6 para alfafa. ASAE Data (2), apresenta coeficientes de atrito cinético de alfafa em aço, variando de 0,652 para 0,622 quando o comprimento de corte varia de 2,5 para 10,2 cm.

2.2.5. Efeito do condicionamento da superfície

Para se obter dados reproduzíveis, muitos investigadores afirmam que a superfície deve ser condicionada, fazendo-se repetidas passadas antes de se medir a força de atrito. Bickert e Buelow (7 e 8), constataram que ocorre um incremento de até 50% no atrito com grãos de milho em vidro, durante o condicionamento. Este fato também foi observado por Wieneke (36) para coeficiente de atrito dinâmico do trigo em superfícies metálicas sob várias condições. Por outro lado, Richter (30) observou que há um decréscimo no coeficiente de atrito -

após o condicionamento, pois ocorre um polimento da superfície quando se trabalha com feno e palha seca sobre chapa galvanizada. Tal fato também foi observado por Stewart et al (34) onde aparece um considerável decréscimo no atrito para grãos de sorgo em aço e concreto.

2.2.6. Efeito do meio ambiente

Na determinação do coeficiente de atrito, há necessidade de se controlar o ambiente para evitar mudanças na umidade do material orgânico e da superfície a ser testada. Estas observações foram feitas por Snyder et al - (32) que verificaram que a umidade relativa afeta o valor do coeficiente de atrito em alumínio e chapa galvanizada, ocorrendo um aumento de 0,40 para 0,60 quando a umidade relativa aumenta de 40 para 80%. Stewart et al (34), trabalhando com grãos de sorgo em aço e concreto, e Brubaker e Pos (12) trabalhando com grãos em várias - superfícies, mostraram a influência da umidade relativa e tempo de contato no valor do coeficiente de atrito, o qual aumenta com o acréscimo de umidade relativa e tempo de contato.

2.3. Equipamentos para determinação dos coeficientes de atrito

Os métodos usados por vários investigadores para a determinação do coeficiente de atrito estático e cinético de materiais agrícolas, têm sido desenvolvidos para atender uma condição -

particular, e são variados. Um deles é baseado no ângulo formado por um plano inclinado quando o movimento do produto em contato com esse plano inicia-se. A tangente desse ângulo é o coeficiente de atrito estático. Esse método foi utilizado - por Kramer (24) trabalhando com arroz. Após este trabalho, outros pesquisadores usaram o mesmo método para cereais, café e frutos.

Em outro método, o material é colocado em contato com a superfície que está montada em um disco rotativo que é movido com velocidade conhecida. A força de atrito cinético é medida por balança ou extensômetros. Este método foi utilizado por Hintz e Schinke (21) e Richter (30). Para medir o coeficiente de atrito estático, Richter (30), utilizou um equipamento que consiste em montar a superfície em estudo numa base rígida e, sobre esta superfície, é colocado um recipiente que contém as amostras. Uma força horizontal é aplicada ao recipiente e esta força dá a medida da força de atrito estático.

Bickert e Buelow (7), Brubaker e Pos (12), Lorenzen (25), Stewart et al (34) e Snyder et al (32), em seus trabalhos utilizaram um método que consiste basicamente de uma mesa horizontal suportada por rolamentos e conectada a um motor de velocidade variável. As superfícies de atrito são montadas sobre esta mesa e o recipiente que contém as amostras, permanece fixo sobre a superfície de atrito que se desloca a uma velocidade constante. A medição das forças de atrito é feita através de extensômetros.

Alguns métodos menos utilizados são descritos por Moshenin (26), Henderson (20), Chen et al (14) e Clark et al (16).

Clark et al (15) propuseram a utilização do equipamento Instron Universal para a determinação de coeficientes de atrito, através do acoplamento de um dispositivo semelhante ao usado por Bickert e Buelow (7), só que a superfície de atrito permanece fixa, sendo movimentado um cilindro que contém as amostras. Um cabo é preso ao cilindro, passa por uma polia e é fixado ao dinamômetro do Instron, que, com base nos gráficos de força de atrito fornecidos pelo aparelho, são determinados os coeficientes de atrito estático e cinético.

O método usado por Clark et al (15) foi modificado por Tosello (35), ainda utilizando o aparelho Instron Universal, mas com o acoplamento de um sistema mais prático de contato com a superfície. Esse dispositivo assim modificado, foi também utilizado por Jorge (23) na determinação de coeficientes de atrito de soja em várias superfícies.

3. - OBJETIVOS

Em função da falta de dados sobre coeficientes de atrito de forrageiras brasileiras e da variabilidade dos coeficientes apresentados pela literatura estrangeira, foram propostos os seguintes objetivos para o presente trabalho:

3.1. Determinação dos coeficientes de atrito estático e cinético das seguintes forrageiras:

3.1.1. Capim elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum);

3.1.2. Milho (*Zea mays*, L);

3.1.3. Cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*, L);

3.1.4. Sorgo (*Sorghum vulgare*, Pers.).

3.2. Determinação da relação dos coeficientes de atrito das forrageiras acima mencionadas com as:

3.2.1. Variações do comprimento de corte;

3.2.2. Variações da carga normal;

3.2.3. Variações da velocidade de deslizamento;

3.2.4. Variações de umidade;

3.2.5. Seguintes superfícies:

3.2.5.1. Madeira não pintada;

3.2.5.2. Madeira pintada;

3.2.5.3. Chapa não pintada;

3.2.5.4. Chapa pintada;

3.2.5.5. Chapa galvanizada.

3.3. Determinação das interações entre as variáveis em es
tudo, acima mencionadas.

4. - MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

4.1.1. Forrageiras

Após ter sido feito um levantamento das principais forrageiras regionais usadas para ensilagem ou material - servido "in natura", foram selecionadas as seguintes forrageiras para estudo: capim elefante, milho, sorgo e cana-de-açúcar.

Pennisetum purpureum, Schum, que é conhecido vulgarmente como capim elefante, é uma das melhores forragens - verdes de fácil cultura em nosso meio e bastante apreciada pelos animais. É uma gramínea originária da África que se encontra difundida em todo o país. Seu plantio é feito de outubro a fevereiro, sendo colhido com aproximadamente 1,30 a 1,50 m de altura, quando é tenro. Fornece uma massa verde da ordem de 20 a 25 ton/ha/corte. Possui variedades tais como, Napier e Merker, sendo que muitos desses cultivares não possuem grande diferenciação botânica. Trata-se de um capim que apresenta excelentes rendimentos por unidade de área, com alto valor nutritivo e boa palatibilidade, razão pela qual, tem sido largamente utilizado como forragem verde fresco, picado, silagem, feno e mesmo como pastagem, segundo Pupo (28).

Zea mays, L, cujo nome vulgar é milho, é uma gramínea originária do continente americano, largamente utilizada pelos pecuaristas na alimentação animal. É uma cultura exigente em solo e clima para se conseguir altas produções. O plantio é feito na estação chuvosa e o corte deve ser realizado quando os grãos estiverem em ponto - de pamonha para farináceo, pois é nesta fase que apresenta 30 a 35% de matéria seca. Os cultivares de milho mais indicados para a elaboração de silagens devem possuir grande produção de massa verde e de grãos por unidade de área. Por isso, são recomendados os "milhos híbridos" que, além das características citadas, possuem ótima adaptação em nosso meio. Sua produção é de 20 a 30 ton/ha, segundo Pupo (28).

O sorgo, *Sorghum vulgare*, Pers., é uma gramínea originária da África e Ásia. É uma planta rústica fácil de ser cultivada e mais resistente que o milho. O período de plantio é durante os meses de outubro e novembro, podendo, entretanto, ser prolongado até fevereiro. É, sem dúvida, uma das melhores forrageiras para a elaboração de silagens, pois proporciona, além de altos rendimentos de massa verde por unidade de área, um produto final de excelente qualidade nutritiva. As variedades indicadas para plantio são aquelas que produzem grande massa verde e grãos para enriquecimento da silagem. Seu corte é realizado quando os grãos estiverem no estado -

de "leite-grosso", com uma produção de 30 a 40 ton/ha - mais a rebrota, de acordo com Pupo (28).

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*, L) é uma gramínea de origem asiática, semi-perene, utilizada fundamentalmente na indústria, mas que se constitui num valioso recurso forrageiro, pois proporciona grande rendimento de material palatável por unidade de área, justamente - nos períodos críticos de produção de forragens. Pode - ser utilizada picada e fornecida diretamente em cochos; picada e adicionada a forrageiras pobres em carboidratos para elaboração de silagens, ou picada e juntada a outros alimentos para melhorar a aceitabilidade dos mesmos. A colheita é feita de junho a dezembro, proporcionando 70 a 90 ton/ha no primeiro corte; 50 a 80 ton/ha, no segundo, 45 a 50 ton/ha no terceiro corte, de acordo com Pupo (28).

4.1.2. Superfícies de atrito

A variedade de materiais e acabamentos superficiais existentes no mercado sugerem a introdução do tipo de superfície como variável no estudo do coeficiente de atrito, principalmente considerando as evidências na literatura sobre a sua importância. As superfícies a serem estudadas, foram escolhidas com base fundamentalmente - na viabilidade econômica do material e do tratamento superficial, resultando desse critério, as seguintes su

perfícies:

- 4.1.2.1. Madeira não pintada (peroba);
- 4.1.2.2. Madeira pintada (esmalte sintético, amarelo Valmet);
- 4.1.2.3. Chapa não pintada (aço 1010-1020, laminado a frio, BSG # 16);
- 4.1.2.4. Chapa pintada (esmalte sintético, amarelo Valmet);
- 4.1.2.5. Chapa galvanizada (BSG # 16).

A escolha de superfícies pintadas e sem pintar, visa identificar a condição mais desfavorável de atrito que surge entre a máquina nova e a mesma máquina após o desgaste da camada de tinta. A escolha de chapa pintada, chapa galvanizada e madeira, visa oferecer ao projetista, alternativas no processo de seleção de material com base no custo e demanda de energia.

4.1.3. Equipamentos

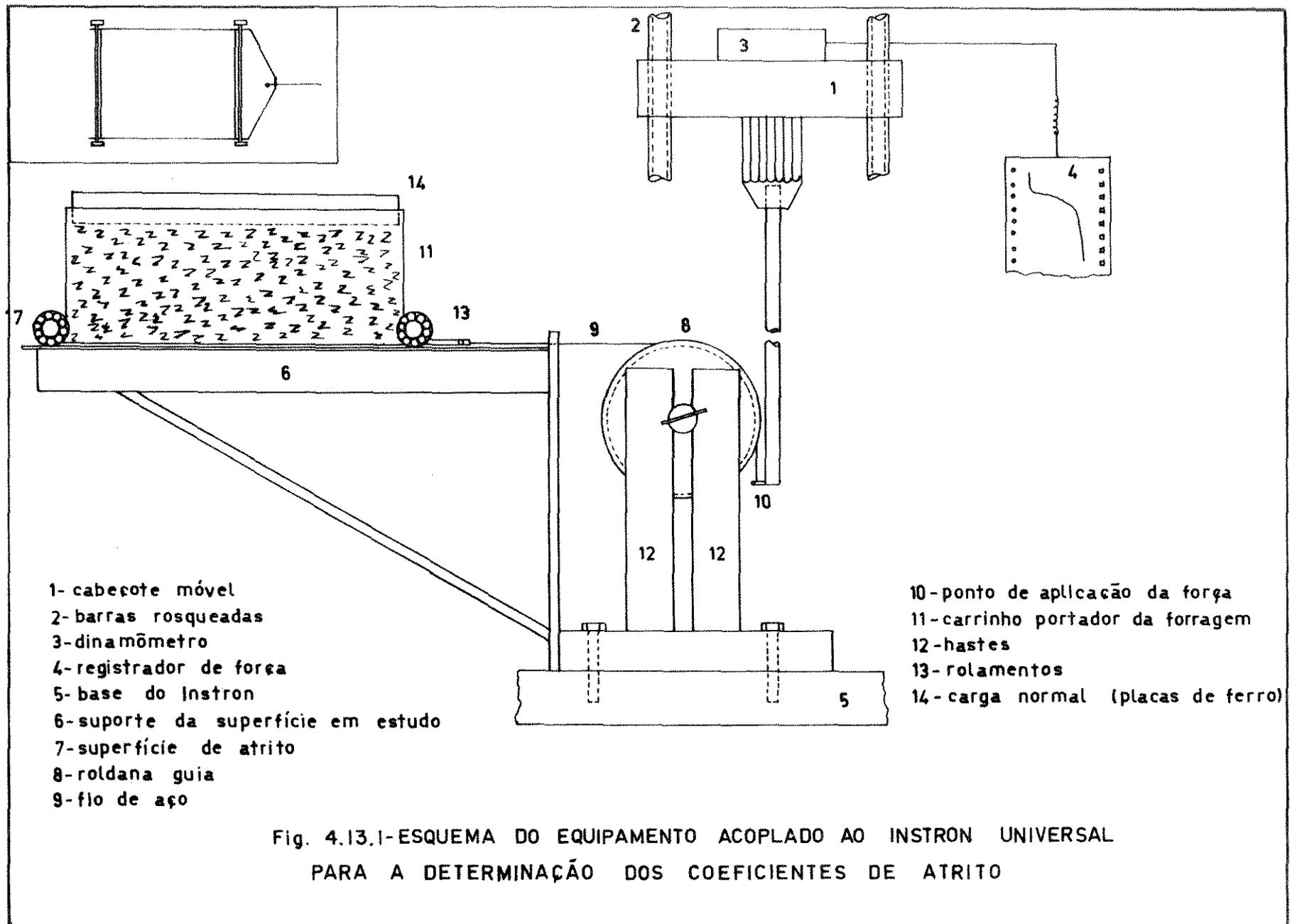
Para a determinação dos coeficientes de atrito, foi utilizado um dispositivo especialmente construído para este fim, dispositivo este, que é acoplável ao aparelho - Instron Universal, como pode ser observado no esquema - da Figura 4.1.3.1.

O Instron Universal, modelo 1130, é um aparelho convencional, constituído basicamente de duas partes: um cabe

çote móvel (1) que se desloca em sentido vertical por meio da ação de duas barras rosqueadas (2), um dinamômetro de tração e compressão (3) solidário ao cabeçote móvel (1); e um sistema de registro de força (4) em função do deslocamento. Neste aparelho é possível variar a velocidade do cabeçote e do papel onde é feito o registro da força de atrito.

Acoplável à base do Instron (5) encontra-se um dispositivo que consta, essencialmente, de um suporte horizontal (6), onde são colocadas as superfícies de atrito a serem estudadas (7), uma roldana guia (8) por onde passa um fio de aço (9) fazendo conexão entre o ponto de aplicação de força (10) e o carrinho (11) que empurra a forragem sobre a superfície de atrito. A roldana guia é suportada por duas hastes (12) soldadas em um ponto tal, que a aplicação da força seja na mesma vertical do dinamômetro e na mesma linha horizontal da superfície de atrito.

O carrinho é uma caixa retangular sem fundo, construído em acrílico, com dimensões: comprimento x largura x altura = 24,0 x 20,0 x 10,0 cm. Esse carrinho está apoiado sobre rolamentos (13) que visam diminuir o atrito do sistema e manter a base do carrinho afastada 2 mm da superfície de atrito, permitindo assim, que só a forragem entre em contato com a superfície.



O carrinho é colocado sobre a superfície de atrito e em seu interior recebe a forragem picada, que será mantida diretamente em contato com a superfície de atrito. Para a aplicação de carga normal foram utilizadas placas de ferro (14) com dimensões ligeiramente menores do que as do carrinho. Estas placas são colocadas sobre o produto permitindo que haja a aplicação de pressão normal uniforme em todo o material.

Através da aplicação de força ao sistema, o carrinho se desloca na horizontal e com o valor registrado dessa força é determinado o coeficiente de atrito.

O equipamento para determinação do coeficiente de atrito acima descrito, foi escolhido pela facilidade de sua adaptação ao Instron Universal e pela experiência prévia de trabalho com este tipo de equipamento existente no laboratório.

Durante a realização dos experimentos foram utilizadas as seguintes balanças: Dayton, de capacidade igual a 25 kg em sub-divisões de 10 g; e analítica de precisão com quatro casas decimais e capacidade igual a 200 g.

Para as determinações da umidade foi usada uma estufa - Fanem Ltda., modelo 315/4.

Para se efetuar o corte da forrageira no comprimento de sejado, foi utilizada uma serra circular acionada por

um motor elétrico.

As medidas de rugosidade das superfícies foram realizadas pelo aparelho Pert Meter Universal, modelo S4Bd do fabricante Perthen.

4.2. Métodos

Antes de ser estabelecida uma metodologia para as determinações dos coeficientes de atrito foram realizados ensaios preliminares, visando verificar a funcionabilidade do equipamento e possíveis variações nos valores registrados, resultando os seguintes procedimentos:

- a força de atrito do dispositivo, sem a forragem, nas diferentes superfícies foi da ordem de 25 a 50 g. Tomando-se como referência o valor máximo de 50 g, de toda força de atrito registrada, foi subtraído este valor.
- para se obter forças de atrito máximas e repetitivas, verificou-se que há necessidade de se fazer um condicionamento da superfície, fazendo-se repetidas passadas sobre ela, antes de se registrar o valor da força de atrito. Um número de cinco passadas, no mínimo, deverão ser feitas para que se consiga tal objetivo.
- pela observação dos resultados dos ensaios preliminares, verificou-se que os valores registrados das forças de atrito sofrem pequenas variações nas repetições. Em vista disso, e

das informações bibliográficas obtidas em trabalhos correlatos, que foram feitos com três ou quatro repetições, foi estabelecido que quatro repetições para cada tratamento seriam suficientes, tendo em vista que os coeficientes de variação são baixos;

- para que a temperatura e umidade relativa do ar possam ter - influência mínima nos resultados, o laboratório de ensaios - deverá permanecer a uma temperatura constante durante todas as fases do teste;
- cada amostra deverá ser acondicionada em sacos plásticos para se evitar perda ou ganho de umidade, e os ensaios serem - realizados em curto espaço de tempo;
- materiais depositados nas superfícies alteram os valores das forças de atrito. Por isso, antes de cada teste ou repetição, a superfície em questão deverá estar livre de resíduos estranhos;
- a velocidade de deslizamento máxima conseguida, por limitações do equipamento, foi de 80 cm/min. Por este motivo, são serão tomados valores de coeficiente de atrito cinético até esta velocidade. Como dentro desta faixa ocorrem pequenas - variações, serão usadas somente as velocidades de 20 cm/min, a 80 cm/min;
- a curva que relaciona o coeficiente de atrito com carga normal é uma função contínua com pequena curvatura, não havendo

necessidade de se fazer leituras com pequenas variações de carga normal. Foi estabelecido que três níveis de carga normal dentro da faixa de aplicação prática, seriam suficientes para representar o fenômeno. Foram selecionadas as cargas normais de 10,50 e 90 g/cm².

- a mesma observação do ítem acima também foi válida para o comprimento de corte dos fragmentos da forragem, sendo adotados os comprimentos de 1, 5 e 9 cm, que estão dentro dos limites proporcionados pelos diversos tipos de picadores de forragens.

4.2.1. Preparo das amostras

O capim elefante, milho e sorgo, foram sempre colhidos na mesma área e da mesma variedade, procurando-se retirar amostras representativas de cada forrageira. As plantas inteiras foram colhidas no ponto ideal de corte e levadas ao laboratório onde toda a planta foi cortada no comprimento desejado e a seguir acondicionada em sacos plásticos para não alterar a umidade.

As amostras de caña foram obtidas de uma picadeira estacionária Penha, onde só houve um comprimento médio dos fragmentos de 0,5 cm.

As determinações de umidade foram feitas sempre de acordo com as recomendações da ASAE (3).

Para a obtenção de diferentes níveis de umidade, o material cortado foi colocado em recipientes e deixado secar à sombra evitando-se usar um processo de secagem acelerada muito diferente das condições de secagem da planta.

4.2.2. Metodologia usada na determinação dos coeficiente de atrito

Para a obtenção dos coeficientes de atrito, o trabalho foi dividido em duas etapas: na primeira foi mantida uma umidade constante (superior a 70%) de cada forrageira em estudo e para cada superfície foram determinados os coeficientes de atrito estático e cinético, observando-se todas as combinações possíveis entre os três comprimentos de corte (1, 5 e 9 cm), duas velocidades (20 e 80 cm/min) e três níveis de carga normal (10, 50 e 90 g/cm²), com quatro repetições para cada combinação das variáveis.

Na segunda etapa, foi determinada a influência do teor de umidade da forragem sobre o coeficiente de atrito. - Para tanto, foram tomados valores de coeficientes de atrito estático e cinético do milho, sorgo e capim elefante e atrito cinético da cana, nas cinco superfícies. Para reduzir o número de observações experimentais nesta fase, foram tomados valores dos coeficientes de atrito para um comprimento de corte (1 cm), uma velocidade

(20 cm/min), três valores de carga normal (10, 50 e 90 g/cm²), com nove níveis de umidade variando na faixa de 12 a 78% b.u., com quatro repetições para cada teste.

Com o objetivo de proporcionar maior esclarecimento sobre o procedimento adotado com vistas à possibilidade de reprodução dos resultados, apresentamos a seguir a sequência de operações seguida nos ensaios:

- a) manter a temperatura ambiente em torno de 22^oC;
- b) remover impurezas da superfície de atrito;
- c) medir a rugosidade da superfície de atrito;
- d) colocar a superfície de atrito sobre a mesa horizontal e o carrinho sobre a superfície;
- e) determinar a umidade da forragem picada;
- f) colocar a forragem picada no recipiente (carrinho);
- g) verificar o espaço entre o recipiente e a superfície de atrito;
- h) colocar a carga sobre a forragem até atingir o nível desejado;
- i) para condicionar a superfície, movimentar o recipiente dez vezes sobre a superfície de atrito;
- j) ajustar o recipiente na posição normal de deslizamento;
- l) ligar o equipamento;
- m) parar o equipamento ao final do percurso;
- n) remover as cargas;
- o) retirar a forragem do recipiente e depois repetir a operação.

Para um dado comprimento de corte e a menor carga normal, foram registradas as forças de atrito estático e cinético para as velocidades de 20 e 80 cm/min. Para o mesmo comprimento de corte, a carga normal foi aumentada e as respectivas forças de atrito foram registradas para as duas velocidades e assim sucessivamente. A sequência de testes seguida, assim como as respectivas combinações de variáveis, podem ser observadas na Tabela 4.2.2.1.

Para a obtenção dos coeficientes de atrito estático das quatro forrageiras nas cinco superfícies, a sequência de ensaios adotada foi: 1º, 4º, 5º, 7º, 10º, 11º, 13º, 16º e 17º, levando em consideração que o atrito estático independe da velocidade. Todos os testes acima foram realizados com as forrageiras apresentando umidade superior a 70%.

Na fase em que há variação de umidade da forragem, a sequência adotada foi: 1º, 4º e 5º para o atrito cinético e também para o atrito estático.

Com base nos gráficos obtidos pelo equipamento foram calculadas as forças de atrito máximo antes do início do deslizamento e a força máxima após o deslizamento ter sido iniciado. As relações dessas forças com as cargas normais aplicadas são respectivamente os coeficientes de atrito estático e cinético.

TABELA 4.2.2.1. - SEQUÊNCIA DOS TESTES E COMBINAÇÃO DE VARIÁVEIS USADAS PARA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ATRITO.

SEQUÊNCIA DE TESTES	COMBINAÇÃO DAS VARIÁVEIS		
	comprimento de corte (cm)	velocidade (cm/min)	carga normal (g/cm ²)
1º	1	20	10
2º	1	80	10
3º	1	80	50
4º	1	20	50
5º	1	20	90
6º	1	80	90
7º	5	20	10
8º	5	80	10
9º	5	80	50
10º	5	20	50
11º	5	20	90
12º	5	80	90
13º	9	20	10
14º	9	80	10
15º	9	80	50
16º	9	20	50
17º	9	20	90
18º	9	80	90

A velocidade do papel de registro foi de 20 cm/min para todos os testes. Como a área do carrinho é de 480 cm², as cargas normais aplicadas para as pressões normais de 10, 50 e 90 g/cm², foram, respectivamente, 4,800 kgf, - 24,000 kgf e 43,200 kgf.

Para maior esclarecimento, segue um exemplo de como os coeficientes de atrito foram calculados. O gráfico da Figura 4.2.2.1. é característico da força de atrito vs. deslocamento para o sorgo com 78% de umidade b.u. em su perfície de madeira. A velocidade usada foi de 20 cm/min; carga normal de 10 g/cm² e 1 cm de comprimento - de corte.

A escala de força adotada foi de 50 g/divisão. Como te mos 62,5 divisões até o ponto onde a força atinge um va lor constante com o carrinho em movimento, a força de a trito medida neste ponto foi a força de atrito cinético (F_c), cujo valor foi: 50 x 62,5 = 3,125 kgf. A carga - normal aplicada neste caso foi de 4,800 kgf, logo o co-eficiente de atrito cinético foi de:

$$\mu_c = \frac{3,125 \text{ kgf}}{4,800 \text{ kgf}} = 0,65$$

O mesmo procedimento foi usado para calcular o coeficiente de atrito estático. A força de atrito estático - (F_e) máxima foi lida na marcação feita no gráfico que - indica a passagem da fase estática para cinética. Esta

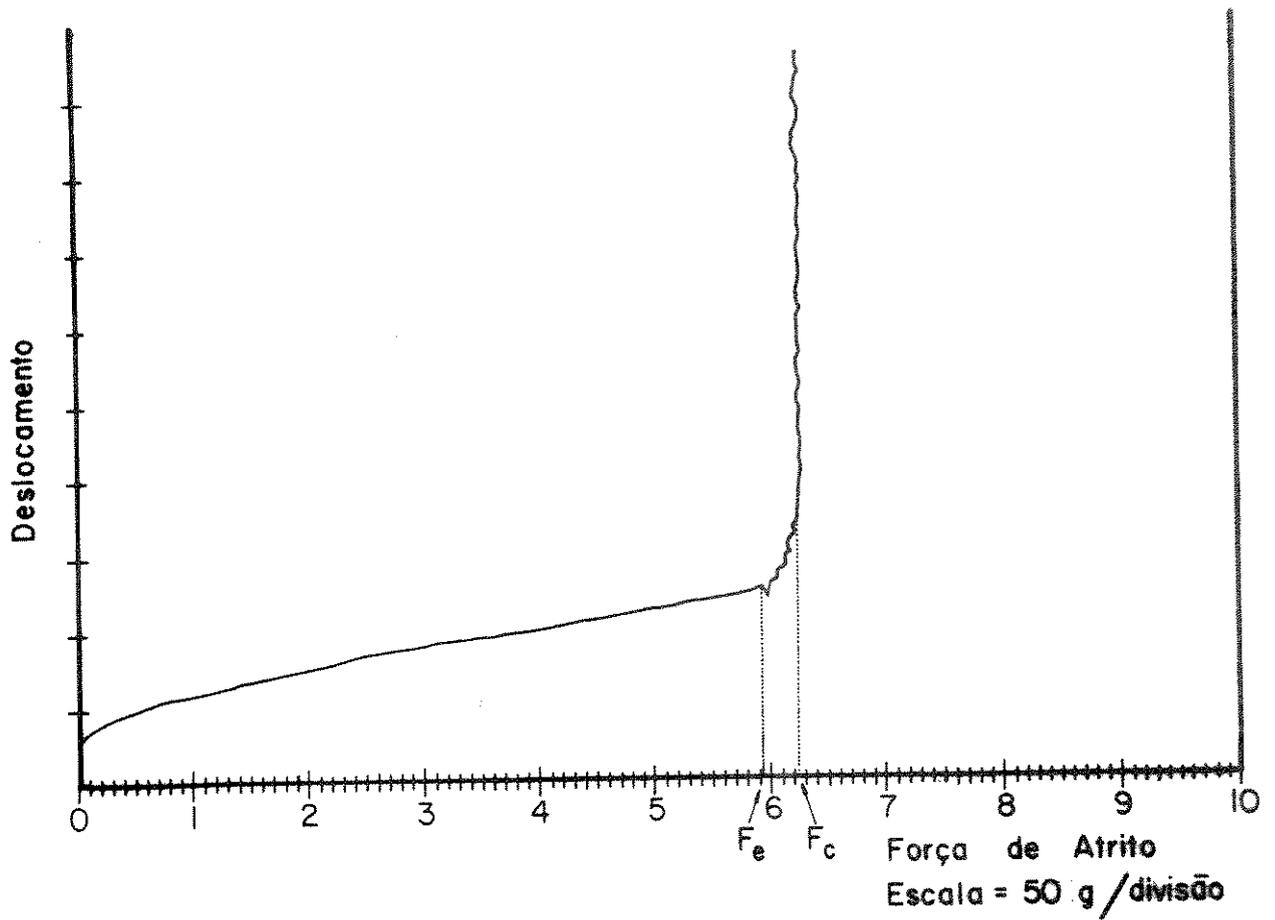


FIGURA 2.2.2.1. - Gráfico característico da força de atrito x deslocamento para o sorgo com 78% de umidade b.u. em madeira.

marcação foi feita através do acionamento de um dispositivo do próprio Instron, no instante em que o carrinho inicia o movimento. Assim, a força de atrito estático foi de $50 \times 59,5 = 2,975$ kgf e o coeficiente de atrito foi:

$$\mu_E = \frac{2,975 \text{ kgf}}{4,800 \text{ kgf}} = 0,62$$

Os coeficientes de atrito estático e cinético nas condições especificadas acima são encontrados nas Tabelas que contêm os resultados experimentais.

4.2.3. Rugosidade das superfícies

As medições de rugosidade das superfícies foram feitas antes e depois de serem usadas, simplesmente para melhor caracterização dessas superfícies. O equipamento usado para as medições foi o Perthen Universal modelo - S4Bd, usando um apalpador do tipo HTF-250, percorrendo um espaço de 5 mm sobre a superfície.

De acordo com a indicação e uso da norma ABNT (4), foi medida a rugosidade R_a das superfícies, que representa a média das ordenadas em valores absolutos em relação à linha média, e que é definida como sendo:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx$$

Para cada superfície em estudo, foram tomados valores - da rugosidade em quatro pontos diferentes, antes e após o uso da superfície.

5. - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Rugosidade das superfícies

A rugosidade média das superfícies usadas nos testes, assim como os respectivos coeficientes de variação, são apresentados - na Tabela 5.1.

TABELA 5.1. - RUGOSIDADE MÉDIA DAS SUPERFÍCIES EM μ (MICRON) - ANTES E DEPOIS DE SEREM USADAS

SUPERFÍCIE	Rugosidade média (Ra) em micron (μ)	
	antes de ser usada	após o uso
Madeira	6,23 C.V. = 17,41%	5,70 C.V. = 14,69%
Madeira pintada	2,11 C.V. = 12,60%	1,95 C.V. = 11,31%
Chapa não pintada	1,55 C.V. = 3,80%	1,25 C.V. = 2,50%
Chapa pintada	0,61 C.V. = 3,25%	0,50 C.V. = 5,80%
Chapa galvanizada	1,05 C.V. = 6,3%	0,95 C.V. = 4,5%

As superfícies de madeira apresentaram as maiores rugosidades, quando comparadas com as outras superfícies.

O recobrimento da superfícies com uma camada de tinta, provocou uma diminuição na sua rugosidade.

Os altos coeficientes de variação observados na Tabela 5.1., - foram provocados pelas irregularidades no acabamento das superfícies.

Tendo em vista os dados apresentados na Tabela 5.1., verificou-se que, com a sequência dos testes, ocorreu um pequeno polimento das superfícies podendo ter algum efeito no coeficiente de atrito, porém, este aspecto não foi objetivo do presente trabalho.

5.2. Influência das variáveis no coeficiente de atrito

Seguindo-se a metodologia já discutida, foram calculados os coeficientes de atrito estático e cinético propostos nos objetivos.

Nas Tabelas 5.2., 5.3. e 5.4. são apresentados os coeficientes de atrito estático médio do milho, capim elefante e sorgo, e, nas Tabelas 5.5., 5.6., 5.7. e 5.8., os coeficientes de atrito cinético médio do milho, sorgo, capim elefante e cana, com os respectivos coeficientes de variação (C.V. em %). Em todas as tabelas referidas acima, a umidade da forragem em b.u., foi superior a 70%.

Para analisar os resultados apresentados nas Tabelas 5.2. a 5.8., aplicou-se o teste de Tukey ao nível de 5%, Gomes (19) - para se detectar as diferenças significativas entre as médias das diferentes combinações das variáveis envolvidas.

TABELA 5.2. - COEFICIENTES DE ATRITO ESTÁTICO MÉDIO ($\bar{\mu}_E$) DO MILHO COM 71% DE UMIDADE b.u.

cc cm	CN g/cm ²	M A D E I R A		MADEIRA PINTADA		CHAPA NÃO PINTADA		CHAPA PINTADA		CHAPA GALVANIZADA	
		$\bar{\mu}_E$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_E$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_E$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_E$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_E$	C.V.(%)
1	10	0,61	1,57	0,69	0,84	0,63	0,70	0,66	1,24	0,73	3,04
1	50	0,53	0,92	0,55	1,48	0,52	1,70	0,58	1,41	0,62	0,93
1	90	0,51	1,60	0,54	1,68	0,51	1,85	0,58	0,96	0,61	1,60
5	10	0,52	1,84	0,60	1,38	0,58	0,86	0,60	0,83	0,68	0,90
5	50	0,47	1,74	0,51	2,56	0,50	1,63	0,50	1,91	0,57	1,43
5	90	0,48	1,35	0,51	0,98	0,50	1,78	0,50	2,52	0,56	1,20
9	10	0,52	1,12	0,57	1,46	0,53	0,94	0,59	1,38	0,63	1,10
9	50	0,47	2,04	0,50	1,63	0,49	1,67	0,49	2,36	0,54	0,98
9	90	0,47	1,85	0,50	1,50	0,49	0,98	0,48	1,99	0,52	1,20

TABELA 5.3. - COEFICIENTES DE ATRITO ESTÁTICO MÉDIO ($\bar{\mu}_E$) DO CAPIM ELEFANTE COM 76,4% DE UMI-
DADE b.u.

cc cm	CN g/cm ²	M A D E I R A		MADEIRA PINTADA		CHAPA NÃO PINTADA		CHAPA PINTADA		CHAPA GALVANIZADA	
		$\bar{\mu}_E$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_E$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_E$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_E$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_E$	C.V.(%)
1	10	0,79	3,33	0,55	3,20	0,65	2,40	0,54	2,80	0,65	1,26
1	50	0,68	2,51	0,47	3,01	0,55	3,00	0,42	3,60	0,53	2,06
1	90	0,65	3,17	0,46	2,17	0,51	2,28	0,42	2,40	0,51	3,40
5	10	0,71	3,15	0,50	2,12	0,57	1,28	0,51	2,90	0,56	2,50
5	50	0,58	3,69	0,46	3,00	0,45	3,00	0,43	2,45	0,49	4,00
5	90	0,57	2,05	0,45	2,82	0,46	1,08	0,43	2,28	0,48	4,32
9	10	0,62	2,12	0,48	2,29	0,54	2,39	0,49	2,57	0,50	4,20
9	50	0,53	1,89	0,46	1,16	0,47	2,13	0,46	2,81	0,45	1,94
9	90	0,53	2,54	0,45	2,13	0,46	2,08	0,44	3,00	0,44	1,60

TABELA 5.4. - COEFICIENTES DE ATRITO ESTÁTICO MÉDIO ($\bar{\mu}_E$) DO SORGO COM 78% DE UMIDADE b.u.

cc cm	CN g/cm ²	M A D E I R A		MADEIRA PINTADA		CHAPA NÃO PINTADA		CHAPA PINTADA		CHAPA GALVANIZADA	
		$\bar{\mu}_E$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_E$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_E$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_E$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_E$	C.V.(%)
1	10	0,62	2,03	0,56	0,89	0,56	1,03	0,59	1,38	0,60	2,15
1	50	0,52	0,96	0,44	1,32	0,44	2,00	0,48	1,04	0,49	2,36
1	90	0,51	1,13	0,42	1,94	0,44	1,05	1,46	1,09	0,49	1,95
5	10	0,57	0,88	0,49	1,95	0,50	1,00	0,53	1,54	0,59	0,85
5	50	0,49	1,18	0,41	1,41	0,40	1,25	0,44	1,31	0,47	1,06
5	90	0,48	1,04	0,40	1,25	0,39	2,09	0,42	1,37	0,48	1,20
9	10	0,54	0,93	0,48	1,20	0,47	2,04	0,53	1,09	0,57	0,88
9	50	0,47	1,23	0,40	1,44	0,41	1,22	0,43	1,16	0,49	1,11
9	90	0,46	1,26	0,40	2,30	0,39	2,02	0,42	1,19	0,49	1,02

TABELA 5.5. - COEFICIENTES DE ATRITO CINÉTICO MÉDIO ($\bar{\mu}_c$) DO MILHO COM 71% DE UMIDADE b.u.

cc	V cm	CN cm/min	M A D E I R A		MADEIRA PINTADA		CHAPA NÃO PINTADA		CHAPA PINTADA		CHAPA GALVANIZADA	
			$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)
1	20	10	0,63	0,79	0,69	1,39	0,66	0,80	0,71	0,81	0,76	2,40
1	20	50	0,54	1,25	0,58	0,86	0,55	1,48	0,64	0,90	0,65	2,03
1	20	90	0,53	0,98	0,57	0,88	0,53	1,09	0,62	1,32	0,63	1,42
1	80	10	0,62	0,81	0,69	1,39	0,65	1,47	0,70	1,68	0,75	1,72
1	80	50	0,53	2,83	0,57	1,05	0,54	2,39	0,62	1,98	0,64	2,05
1	80	90	0,52	2,22	0,56	0,89	0,53	0,94	0,60	0,96	0,62	0,98
5	20	10	0,54	2,14	0,62	1,54	0,61	1,57	0,66	0,80	0,70	1,17
5	20	50	0,49	1,18	0,54	0,93	0,55	0,95	0,53	0,94	0,62	1,28
5	20	90	0,47	2,04	0,53	0,94	0,53	0,94	0,52	1,84	0,59	1,38
5	80	10	0,52	2,48	0,64	0,78	0,63	2,05	0,65	0,77	0,69	1,90
5	80	50	0,47	1,80	0,54	0,93	0,51	2,94	0,54	2,39	0,60	1,45
5	80	90	0,47	1,23	0,53	0,94	0,52	1,84	0,52	1,84	0,61	2,08
9	20	10	0,54	0,93	0,60	1,05	0,55	0,91	0,64	1,50	0,67	1,43
9	20	50	0,49	1,95	0,52	0,98	0,51	1,60	0,53	1,90	0,57	1,05
9	20	90	0,47	0,80	0,52	1,32	0,50	1,00	0,51	1,85	0,55	1,48
9	80	10	0,53	0,78	0,63	1,08	0,56	1,46	0,64	0,95	0,67	2,06
9	80	50	0,47	2,75	0,55	1,48	0,52	1,84	0,52	1,70	0,57	1,20
9	80	90	0,47	1,23	0,53	1,64	0,50	1,00	0,52	1,75	0,56	1,03

TABELA 5.6. - COEFICIENTES DE ATRITO CINÉTICO MÉDIO ($\bar{\mu}_c$) DO SORGO COM 78% DE UMIDADE b.u.

cc	V cm/min	CN g/cm ²	M A D E I R A		MADEIRA PINTADA		CHAPA NÃO PINTADA		CHAPA PINTADA		CHAPA GALVANIZADA	
			$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)
1	20	10	0,65	0,77	0,59	1,38	0,58	1,72	0,61	1,57	0,62	2,08
1	20	50	0,56	1,46	0,46	2,08	0,45	2,13	0,50	1,91	0,51	1,60
1	20	90	0,54	1,51	0,44	1,86	0,44	2,18	0,48	1,04	0,50	3,00
1	80	10	0,65	0,89	0,59	0,85	0,56	0,89	0,62	0,80	0,63	1,50
1	80	50	0,55	1,48	0,45	1,60	0,45	1,11	0,49	1,67	0,50	1,91
1	80	90	0,55	1,05	0,44	1,86	0,45	1,20	0,48	1,20	0,50	1,15
5	20	10	0,60	0,83	0,52	1,11	0,52	0,96	0,54	1,77	0,60	0,83
5	20	50	0,53	1,50	0,42	1,20	0,44	1,14	0,45	1,11	0,51	1,88
5	20	90	0,52	1,11	0,42	1,50	0,42	3,00	0,44	1,86	0,52	0,96
5	80	10	0,59	1,20	0,51	1,00	0,53	1,54	0,55	0,90	0,62	0,81
5	80	50	0,51	2,00	0,43	1,00	0,44	2,00	0,45	1,28	0,52	1,57
5	80	90	0,51	1,60	0,42	1,10	0,44	2,10	0,44	1,14	0,53	1,30
9	20	10	0,58	0,86	0,50	2,00	0,48	1,99	0,54	0,93	0,60	0,83
9	20	50	0,49	1,02	0,42	1,30	0,44	1,31	0,46	1,77	0,53	0,94
9	20	90	0,48	1,70	0,42	1,94	0,42	1,94	0,44	2,18	0,53	0,94
9	80	10	0,56	1,30	0,50	1,00	0,49	1,18	0,55	1,05	0,60	0,83
9	80	50	0,48	1,70	0,40	1,50	0,43	1,16	0,45	1,30	0,53	1,09
9	80	90	0,48	1,40	0,40	1,68	0,43	1,34	0,45	1,81	0,53	0,94

TABELA 5.7. - COEFICIENTES DE ATRITO CINÉTICO MÉDIO ($\bar{\mu}_c$) DO CAPIM ELEFANTE COM 76.4% DE UMI-
DADE b.u.

cc	V cm/min	CN g/cm ²	M A D E I R A		MADEIRA PINTADA		CHAPA NÃO PINTADA		CHAPA PINTADA		CHAPA GALVANIZADA	
			$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)
1	20	10	0,78	2,20	0,58	3,08	0,69	1,80	0,57	3,62	0,68	1,90
1	20	50	0,69	1,18	0,48	2,69	0,57	2,94	0,45	2,40	0,59	2,54
1	20	90	0,67	1,43	0,47	2,32	0,55	3,11	0,44	2,80	0,57	0,88
1	80	10	0,76	2,54	0,56	2,92	0,70	2,03	0,56	1,46	0,67	1,20
1	80	50	0,66	1,24	0,47	3,03	0,56	1,87	0,45	3,85	0,58	1,99
1	80	90	0,67	1,49	0,48	2,08	0,55	1,08	0,46	2,82	0,58	2,23
5	20	10	0,74	2,31	0,53	1,54	0,63	2,54	0,55	1,74	0,65	4,20
5	20	50	0,62	3,63	0,49	3,06	0,54	1,38	0,47	2,68	0,55	3,70
5	20	90	0,62	2,53	0,47	2,04	0,50	3,61	0,46	2,23	0,53	2,08
5	80	10	0,71	3,05	0,53	2,44	0,62	2,03	0,54	2,60	0,63	3,80
5	80	50	0,59	2,40	0,46	4,16	0,53	2,44	0,45	3,20	0,54	2,39
5	80	90	0,60	3,00	0,47	2,04	0,52	3,30	0,47	2,32	0,54	2,62
9	20	10	0,64	3,12	0,52	2,48	0,60	3,19	0,54	1,55	0,60	1,80
9	20	50	0,55	4,15	0,48	2,00	0,51	3,75	0,49	1,33	0,52	1,20
9	20	90	0,55	3,00	0,46	2,08	0,49	2,34	0,47	2,47	0,51	2,09
9	80	10	0,62	2,35	0,51	2,47	0,60	2,12	0,53	2,83	0,59	4,00
9	80	50	0,53	2,60	0,43	1,90	0,49	3,10	0,47	1,25	0,51	2,47
9	80	90	0,52	2,87	0,45	1,28	0,50	2,83	0,49	2,60	0,52	3,21

TABELA 5.8. - COEFICIENTES DE ATRITO CINÉTICO MÉDIO ($\bar{\mu}_c$) DA CANA COM 71,4% DE UMIDADE b.u. E
CC MÉDIO DE 0,5 cm.

V cm/min	CN g/cm ²	M A D E I R A		MADEIRA PINTADA		CHAPA NÃO PINTADA		CHAPA PINTADA		CHAPA GALVANIZADA	
		$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)	$\bar{\mu}_c$	C.V.(%)
20	10	0,87	0,66	0,79	1,46	0,79	0,63	0,80	1,00	0,83	1,56
20	50	0,74	1,74	0,59	0,85	0,63	0,92	0,65	0,90	0,64	1,50
20	90	0,69	0,72	0,58	0,86	0,61	1,20	0,64	1,30	0,61	2,99
80	10	0,87	1,20	0,77	1,24	0,78	1,20	0,82	1,05	0,81	1,43
80	50	0,69	1,30	0,60	0,83	0,61	1,34	0,64	1,20	0,61	2,46
80	90	0,58	1,30	0,58	1,00	0,59	0,85	0,64	1,40	0,60	2,15

5.2.1. Velocidade de deslizamento

De acordo com o teste de significância realizado, verificou-se que a velocidade de deslizamento, nos limites estudados, não modificou significativamente o coeficiente de atrito cinético das quatro forrageiras nas cinco superfícies estudadas. O coeficiente de atrito cinético do milho com 71% de umidade b.u. em chapa não pintada com velocidade de 20 cm/min foi da ordem de 0,66, estando próximo ao valor de 0,70 encontrado por Richter (30) e Blevins e Hansen (9) para as mesmas condições.

5.2.2. Carga normal

Os coeficientes de atrito estático e cinético diminuíram significativamente quando a carga normal variou de 10 para 50 g/cm², não sendo significativa essa variação para cargas normais maiores, onde o coeficiente de atrito assume um valor constante ou com pequenas oscilações. Essa diminuição foi da ordem de 10 a 20% dependendo das superfícies e das forrageiras estudadas.

À mesma observação acima chegou Richter (30), onde, para milho com 74% de umidade em chapa galvanizada, encontrou um coeficiente de atrito estático de 0,68 e 0,58 - para as cargas normais de 10 g/cm² e 30 g/cm² respectivamente. Estes valores estão próximos aos obtidos experimentalmente para milho com 71% de umidade em chapa -

galvanizada, os quais foram de 0,73 para a carga normal de 10 g/cm^2 e 0,62 para 50 g/cm^2 . Esse comportamento - pode ser observado na Figura 5.1. onde o coeficiente de atrito diminui hiperbolicamente com o aumento de carga normal. A mesma tendência foi observada tanto no coeficiente de atrito estático como no cinético das demais forrageiras e superfícies, apenas variando os valores desses coeficientes.

5.2.3. Comprimento de corte da forragem

Para a variável comprimento de corte, verificou-se uma diminuição do coeficiente de atrito estático e cinético com o aumento do comprimento de corte da forragem, sendo esta influência menor nas superfícies pintadas e também para as cargas normais mais elevadas. Essa diminuição foi da ordem de até 15% quando aumentou-se o comprimento de corte da forragem de 1 para 9 cm, o que não está de acordo com Blevins e Hansen (9), que concluíram que o comprimento de corte não exerceu influência no coeficiente de atrito. Porém, segundo dados da ASAE (2), o coeficiente de atrito diminui de 0,652 para 0,622 quando o comprimento de corte varia de 2,5 para 10,2 cm.

A variação do coeficiente de atrito estático e cinético com o comprimento de corte apresenta um comportamento - linear conforme pode ser observado na Figura 5.2. para milho com 71% de umidade em chapa galvanizada. As mes-

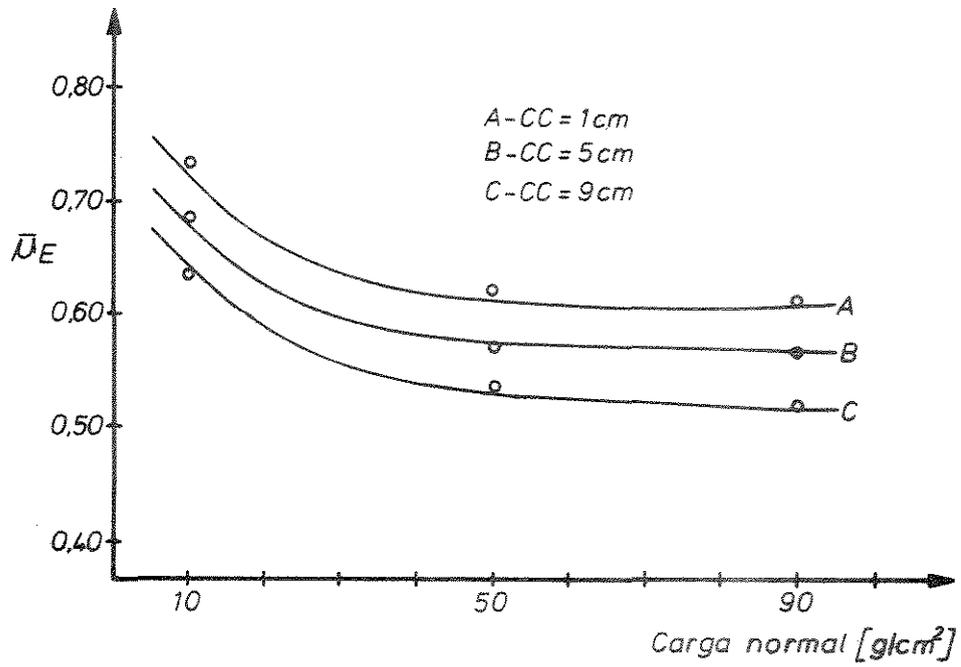


FIG. 5.1. - Influência da carga normal no coeficiente de atrito estático do milho com 71% de umidade em chapa galvanizada.

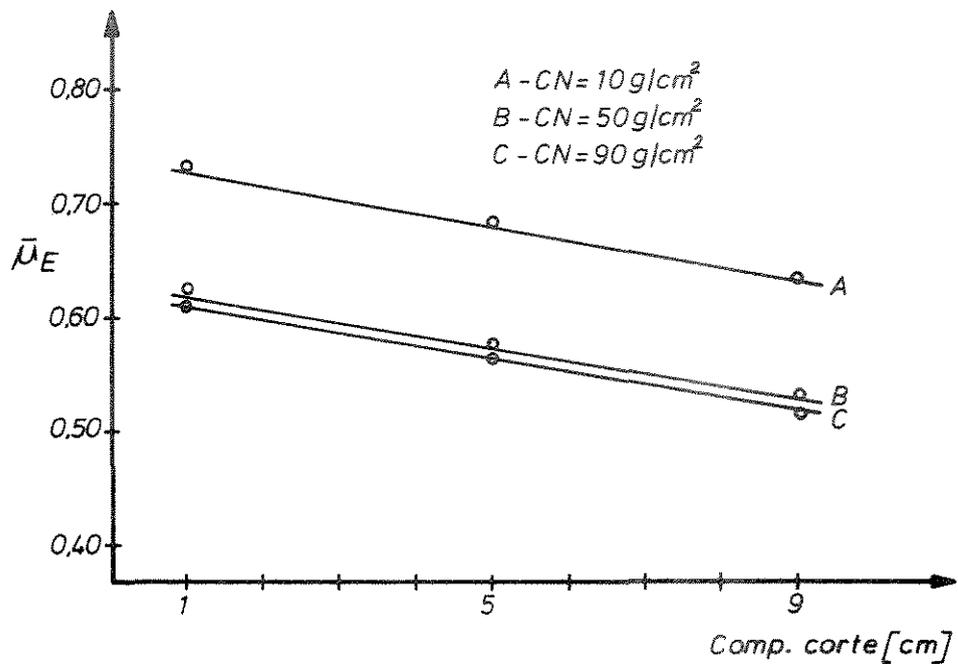


FIG. 5.2. - Influência do comprimento de corte no coeficiente de atrito estático do milho com 71% de umidade em chapa galvanizada.

mas tendências foram observadas para as demais forragens e superfícies.

5.2.4. Teor de umidade da forragem

Nesta etapa do trabalho verificou-se a influência da umidade da forragem no coeficiente de atrito estático e cinético. Os resultados experimentais obtidos são apresentados nas Tabelas 5.9., 5.10. e 5.11. para atrito estático e 5.12., 5.13. e 5.14. para atrito cinético. Os coeficientes de variação máximos para as observações experimentais das Tabelas 5.9. a 5.14. foram da ordem de 3%.

Com os resultados apresentados nas Tabelas 5.9. a 5.14. foram elaborados Gráficos para melhor se verificar a influência significativa da umidade, tanto no coeficiente de atrito estático como cinético.

Analisando-se as curvas características que relacionam o coeficiente de atrito estático (Fig. 5.3.) e cinético (Fig. 5.4.) com a variação de umidade do milho em chapa não pintada, verificou-se que acima de 60% de umidade da forragem, o valor do coeficiente de atrito é praticamente constante. Na faixa de 60 a 25% de umidade, ocorreu um decréscimo em torno de 35 a 40% no valor tanto do coeficiente de atrito estático como cinético, permanecendo constante para umidades inferiores.

TABELA 5.9. - COEFICIENTES DE ATRITO ESTÁTICO MÉDIO ($\bar{\mu}_E$), EM FUNÇÃO DA UMIDADE DO CAPIM
ELEFANTE. $cc = 1 \text{ cm}$ e $V = 20 \text{ cm/min}$

SUPERFÍCIE	CN g/cm ²	U M I D A D E (b.u.)								
		72,5%	66,5%	60,3%	54,5%	46,0%	38,4%	30,5%	21,0%	12,6%
MADEIRA	10	0,49	0,47	0,45	0,43	0,34	0,22	0,21	0,21	0,22
	50	0,43	0,41	0,40	0,38	0,32	0,24	0,24	0,23	0,23
	90	0,44	0,42	0,42	0,42	0,32	0,24	0,23	0,23	0,22
MADEIRA PINTADA	10	0,45	0,44	0,45	0,45	0,39	0,38	0,38	0,38	0,39
	50	0,35	0,34	0,34	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,32
	90	0,34	0,34	0,33	0,33	0,33	0,33	0,31	0,30	0,31
CHAPA NÃO PINTADA	10	0,63	0,61	0,62	0,61	0,51	0,44	0,43	0,44	0,43
	50	0,53	0,51	0,51	0,49	0,46	0,41	0,41	0,41	0,42
	90	0,51	0,49	0,49	0,49	0,47	0,43	0,42	0,41	0,41
CHAPA PINTADA	10	0,51	0,50	0,51	0,50	0,43	0,39	0,38	0,39	0,39
	50	0,37	0,38	0,38	0,37	0,38	0,33	0,33	0,32	0,33
	90	0,38	0,37	0,36	0,36	0,38	0,34	0,34	0,33	0,32
CHAPA GALVANIZADA	10	0,63	0,61	0,61	0,60	0,54	0,39	0,38	0,37	0,37
	50	0,49	0,49	0,48	0,46	0,45	0,36	0,34	0,31	0,32
	90	0,47	0,46	0,45	0,45	0,44	0,35	0,32	0,28	0,30

TABELA 5.10. - COEFICIENTES DE ATRITO ESTÁTICO MÉDIO ($\bar{\mu}_E$), EM FUNÇÃO DA UMIDADE DO SORGO.

cc = 1 cm E V = 20 cm/min.

SUPERFÍCIE	CN g/cm ²	U M I D A D E (b.u.)								
		78%	74,8%	65%	58,5%	53,0%	45%	37%	26%	14,5%
MADEIRA	10	0,62	0,58	0,56	0,51	0,40	0,29	0,29	0,28	0,28
	50	0,52	0,50	0,47	0,46	0,37	0,28	0,25	0,26	0,26
	90	0,51	0,49	0,46	0,45	0,37	0,28	0,24	0,25	0,26
MADEIRA PINTADA	10	0,56	0,50	0,50	0,49	0,43	0,35	0,24	0,23	0,24
	50	0,44	0,43	0,42	0,41	0,38	0,29	0,20	0,21	0,22
	90	0,42	0,43	0,42	0,40	0,37	0,29	0,19	0,19	0,20
CHAPA NÃO PINTADA	10	0,56	0,55	0,51	0,48	0,40	0,31	0,28	0,29	0,29
	50	0,44	0,43	0,42	0,39	0,36	0,28	0,23	0,23	0,25
	90	0,44	0,43	0,41	0,39	0,35	0,28	0,21	0,22	0,26
CHAPA PINTADA	10	0,59	0,56	0,53	0,49	0,44	0,36	0,20	0,19	0,20
	50	0,48	0,45	0,42	0,39	0,36	0,29	0,18	0,18	0,18
	90	0,46	0,44	0,43	0,39	0,36	0,30	0,17	0,18	0,19
CHAPA GALVANIZADA	10	0,60	0,59	0,55	0,50	0,35	0,30	0,21	0,21	0,20
	50	0,49	0,48	0,45	0,40	0,29	0,24	0,18	0,19	0,19
	90	0,49	0,47	0,45	0,40	0,28	0,24	0,17	0,18	0,19

TABELA 5.11. - COEFICIENTES DE ATRITO ESTÁTICO MÉDIO ($\bar{\mu}_E$), EM FUNÇÃO DA UMIDADE DO MILHO.

$cc = 1 \text{ cm}$ E $V = 20 \text{ cm/min}$

SUPERFÍCIE	CN g/cm ²	U M I D A D E (b.u.)								
		72%	65%	58,3%	52,%	42%	35,5%	29%	21%	15,5%
MADEIRA	10	0,61	0,60	0,56	0,54	0,39	0,34	0,31	0,28	0,28
	50	0,53	0,52	0,50	0,48	0,37	0,32	0,29	0,26	0,26
	90	0,51	0,52	0,49	0,47	0,37	0,32	0,28	0,25	0,26
MADEIRA PINTADA	10	0,69	0,68	0,64	0,61	0,49	0,43	0,38	0,35	0,35
	50	0,55	0,54	0,52	0,50	0,44	0,39	0,34	0,31	0,30
	90	0,54	0,54	0,52	0,50	0,43	0,38	0,33	0,30	0,30
CHAPA NÃO PINTADA	10	0,63	0,63	0,61	0,60	0,50	0,46	0,39	0,37	0,36
	50	0,52	0,52	0,51	0,51	0,46	0,41	0,35	0,33	0,33
	90	0,51	0,52	0,51	0,50	0,45	0,42	0,36	0,34	0,33
CHAPA PINTADA	10	0,66	0,65	0,60	0,58	0,56	0,50	0,45	0,43	0,43
	50	0,58	0,56	0,53	0,47	0,50	0,45	0,39	0,38	0,38
	90	0,58	0,56	0,53	0,46	0,50	0,44	0,39	0,39	0,38
CHAPA GALVANIZADA	10	0,73	0,72	0,67	0,64	0,51	0,42	0,37	0,35	0,34
	50	0,62	0,60	0,57	0,54	0,46	0,39	0,33	0,32	0,32
	90	0,60	0,60	0,56	0,53	0,46	0,38	0,32	0,31	0,30

TABELA 5.12.- COEFICIENTES DE ATRITO CINÉTICO MÉDIO ($\bar{\mu}_c$) EM FUNÇÃO DA UMIDADE DO MILHO.

cc = 1 cm E V = 20 cm/min.

SUPERFÍCIE	CN g/cm ²	U M I D A D E (b.u.)								
		72%	65%	58,3%	52%	42%	35,5%	29%	21%	15,5%
MADEIRA	10	0,63	0,59	0,58	0,56	0,37	0,33	0,30	0,28	0,27
	50	0,53	0,52	0,51	0,48	0,35	0,30	0,28	0,25	0,24
	90	0,53	0,51	0,50	0,48	0,35	0,29	0,26	0,25	0,24
MADEIRA PINTADA	10	0,69	0,68	0,65	0,60	0,50	0,41	0,36	0,35	0,35
	50	0,58	0,55	0,53	0,52	0,44	0,38	0,33	0,31	0,30
	90	0,57	0,55	0,53	0,51	0,45	0,37	0,32	0,30	0,30
CHAPA NÃO PINTADA	10	0,66	0,65	0,64	0,63	0,49	0,43	0,37	0,36	0,36
	50	0,55	0,55	0,53	0,53	0,47	0,41	0,36	0,34	0,34
	90	0,53	0,54	0,51	0,50	0,46	0,40	0,36	0,35	0,34
CHAPA PINTADA	10	0,70	0,68	0,63	0,62	0,59	0,51	0,45	0,43	0,43
	50	0,64	0,59	0,56	0,52	0,53	0,46	0,41	0,40	0,40
	90	0,62	0,58	0,55	0,50	0,52	0,45	0,40	0,40	0,39
CHAPA GALVANIZADA	10	0,76	0,74	0,71	0,67	0,52	0,42	0,36	0,35	0,35
	50	0,65	0,63	0,60	0,58	0,47	0,38	0,33	0,33	0,32
	90	0,63	0,62	0,58	0,57	0,48	0,37	0,32	0,31	0,32

TABELA 5.13. - COEFICIENTES DE ATRITO CINÉTICO MÉDIO ($\bar{\mu}$) EM FUNÇÃO DA UMIDADE DO CAPIM
ELEFANTE. $cc = 1 \text{ cm}$ E $V = 20 \text{ cm/min.}$

SUPERFÍCIE	CN g/cm ²	U M I D A D E (b.u.)								
		72,5%	66,5%	60,3%	54,5%	46%	38,4%	30,5%	21,0%	12,6%
MADEIRA	10	0,50	0,49	0,45	0,42	0,33	0,21	0,21	0,21	0,21
	50	0,41	0,40	0,39	0,38	0,31	0,24	0,23	0,22	0,22
	90	0,42	0,42	0,42	0,41	0,31	0,24	0,23	0,22	0,22
MADEIRA PINTADA	10	0,49	0,48	0,47	0,45	0,41	0,39	0,38	0,38	0,38
	50	0,37	0,37	0,36	0,35	0,36	0,35	0,33	0,32	0,33
	90	0,36	0,36	0,36	0,35	0,36	0,35	0,33	0,31	0,32
CHAPA NÃO PINTADA	10	0,67	0,65	0,66	0,63	0,53	0,45	0,44	0,46	0,44
	50	0,57	0,56	0,56	0,56	0,49	0,44	0,43	0,43	0,43
	90	0,54	0,53	0,53	0,53	0,49	0,46	0,44	0,44	0,43
CHAPA PINTADA	10	0,56	0,55	0,55	0,54	0,48	0,40	0,39	0,39	0,39
	50	0,39	0,39	0,39	0,38	0,38	0,35	0,35	0,35	0,35
	90	0,40	0,40	0,40	0,38	0,38	0,35	0,35	0,35	0,35
CHAPA GALVANIZADA	10	0,70	0,68	0,67	0,64	0,60	0,45	0,43	0,40	0,39
	50	0,53	0,53	0,53	0,52	0,52	0,39	0,36	0,32	0,33
	90	0,50	0,49	0,49	0,49	0,48	0,38	0,35	0,30	0,32

TABELA 5.14. - COEFICIENTES DE ATRITO CINÉTICO MÉDIO ($\bar{\mu}_c$), EM FUNÇÃO DA UMIDADE DO SORGO.

$cc = 1 \text{ cm E } V = 20 \text{ cm/min.}$

SUPERFÍCIE	CN g/cm ²	U M I D A D E (b.u.)								
		78%	74,8%	65%	58,5%	53,0%	45%	37%	26%	14,5%
MADEIRA	10	0,65	0,60	0,59	0,55	0,42	0,30	0,29	0,29	0,29
	50	0,56	0,52	0,49	0,48	0,35	0,27	0,23	0,24	0,25
	90	0,54	0,51	0,48	0,48	0,36	0,27	0,24	0,24	0,24
MADEIRA PINTADA	10	0,59	0,54	0,53	0,50	0,44	0,37	0,23	0,24	0,24
	50	0,46	0,45	0,44	0,42	0,37	0,32	0,19	0,20	0,21
	90	0,44	0,44	0,44	0,43	0,36	0,30	0,18	0,20	0,20
CHAPA NÃO PINTADA	10	0,58	0,58	0,55	0,50	0,40	0,33	0,26	0,26	0,27
	50	0,45	0,45	0,45	0,40	0,36	0,29	0,22	0,23	0,24
	90	0,44	0,46	0,45	0,40	0,36	0,28	0,21	0,23	0,23
CHAPA PINTADA	10	0,61	0,60	0,56	0,52	0,45	0,34	0,21	0,20	0,21
	50	0,50	0,48	0,45	0,43	0,39	0,32	0,18	0,18	0,20
	90	0,48	0,47	0,45	0,42	0,37	0,31	0,18	0,17	0,18
CHAPA GALVANIZADA	10	0,62	0,62	0,59	0,52	0,36	0,29	0,20	0,21	0,20
	50	0,51	0,51	0,47	0,43	0,29	0,24	0,17	0,17	0,18
	90	0,50	0,50	0,47	0,41	0,28	0,23	0,17	0,18	0,18

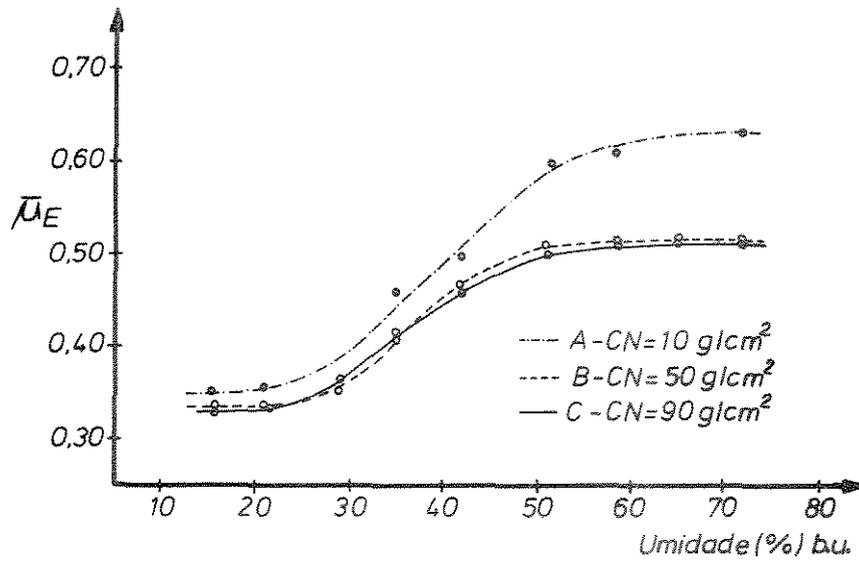


FIG. 5.3. - Efeito da umidade no coeficiente de atrito estático do milho em chapa não pintada.

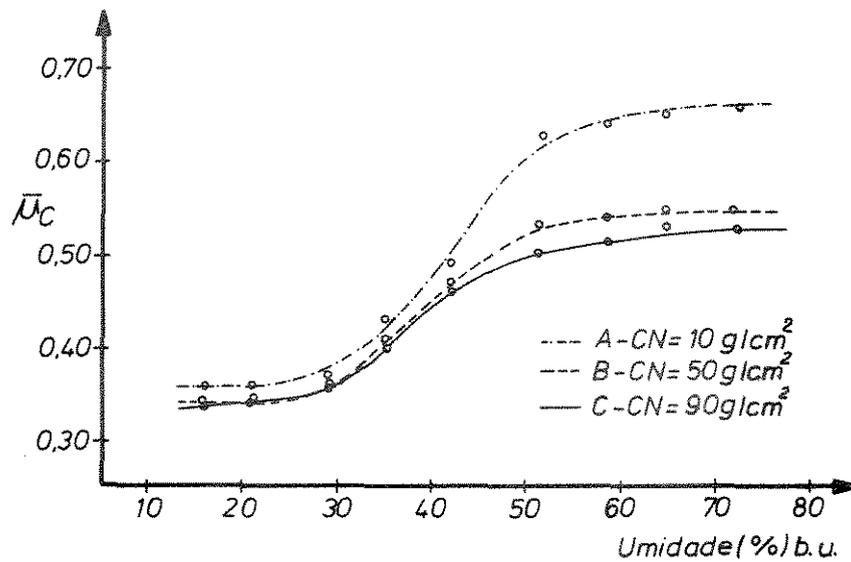


FIG. 5.4. - Efeito da umidade no coeficiente de atrito cinético do milho em chapa não pintada. $V = 20$ cm/min.

As curvas características das Fig. 5.3. e 5.4., são semelhantes às encontradas por Blevins e Hansen (9), que encontraram uma redução de 40% no coeficiente de atrito quando a umidade foi reduzida de 50 para 25% para alfafa em chapa de aço. A mesma observação foi feita por Wieneke (36) com grama em chapa de aço.

As mesmas tendências e curvas das Fig. 5.3. e 5.4. também foram características para as demais forragens e superfícies, ou seja, ocorreu uma diminuição de 20 a 40% no valor do coeficiente de atrito quando a umidade variou de 60 para 25%, permanecendo constante acima e abaixo dessa faixa.

Para umidade da forragem inferior a 25%, o coeficiente de atrito não foi afetado pela carga normal ou apresentou pequenas oscilações, como pode ser observado nas Figuras 5.3. e 5.4., fato que também foi observado por Richter (30) e pelos dados que constam na ASAE Data (2).

5.3. Magnitudes relativas dos coeficientes de atrito estático e cinético

Richter (30) recomenda um coeficiente de atrito cinético de - 0,70 e estático de 0,80 para milho picado em chapa galvanizada, ou seja, o coeficiente de atrito estático é maior do que o cinético. Nos ensaios realizados, tal fato não foi observado, -

uma vez que os coeficientes de atrito cinético encontrados foram iguais ou superiores ao estático, na maioria dos casos estudados.

O método utilizado por Richter (30) para determinar o coeficiente de atrito cinético consta de um disco rotativo onde são colocadas as superfícies de atrito e sobre estas, o material a ser testado. As leituras das forças de atrito estático foram feitas quando o disco atingia uma rotação constante.

Bickert e Buelow (8), trabalhando com grãos, constataram que ocorreu um aumento na força de atrito durante a primeira parte do deslizamento, decrescendo posteriormente a um valor constante. Baseando-se neste fato e nas observações durante os testes, admitiu-se a possibilidade de serem encontrados coeficientes de atrito cinético de forragens, maiores que os estáticos, uma vez que as forças de atrito cinético foram registradas apenas na fase inicial do deslizamento. Outros autores (1, 17), apresentam também para certos materiais, coeficientes de atrito cinético maiores que os estáticos.

5.4. Valores máximos dos coeficientes de atrito

Para todas as forrageiras e superfícies estudadas, os valores máximos dos coeficientes de atrito foram obtidos para a menor carga normal, o menor comprimento de corte, umidade superior a 70% e com qualquer velocidade até 80 cm/min, e são apresentados na Tabela 5.15.

TABELA 5.15. - VALORES MÁXIMOS DE COEFICIENTES DE ATRITO

SUPERFÍCIE	F O R R A G E I R A			
	sorgo	milho	capim elefante	cana
Madeira	0,65	0,63	0,78	0,87
Madeira pintada	0,59	0,69	0,58	0,79
Chapa não pintada	0,58	0,66	0,69	0,79
Chapa pintada	0,61	0,71	0,57	0,80
Chapa galvanizada	0,62	0,76	0,68	0,83

Observando-se a Tabela 5.19., verifica-se que os maiores coeficientes de atrito foram obtidos para a cana, em todas as superfícies, apresentando pequena variação de uma superfície para outra. Tais fatos, possivelmente estão relacionados com o pequeno comprimento de corte associado à umidade e açúcares, possibilitando uma maior aderência nas superfícies e, consequentemente, uma maior força de atrito.

O coeficiente de atrito do capim elefante nas superfícies pintadas foi, em média, 15% inferior quando comparado com as outras superfícies. Tal fato não foi observado para milho, uma vez que apresenta coeficientes elevados nas superfícies pintadas.

A chapa galvanizada apresentou coeficientes de atrito elevados

quando comparada com as demais superfícies, principalmente em relação às superfícies pintadas que apresentaram valores em média 10 a 15% inferiores.

A madeira foi a superfície que apresentou os maiores coeficientes de atrito quando comparada com as demais superfícies, em todas as forrageiras, com exceção do milho.

5.5. Modelos matemáticos

Procurando-se obter modelos que representem os dados experimentais e que possam ser utilizados no cálculo dos coeficientes de atrito para otimizar os projetos de máquinas ou mecanismos aplicou-se a análise de regressão múltipla (33) aos dados apresentados nas Tabelas 5.2. a 5.8.

Como ponto de partida foram tomadas as seguintes expressões gerais:

$$\mu_E = \beta_0 + \beta_1 CC + \beta_3 CN \quad (5.1.)$$

e

$$\mu_C = \beta_0 + \beta_1 CC + \beta_2 V + \beta_3 CN \quad (5.2.)$$

Após a estimação dos parâmetros β_0 , β_1 , β_2 e β_3 das equações 5.1. e 5.2., verificou-se através dos coeficientes de correlação (R), do valor de F para a regressão e dos resíduos que os modelos não eram satisfatórios. Isto pode ser justificado, pois, o comportamento do coeficiente de atrito em função da carga normal não é linear. Utilizando as mesmas expressões ge

rais 5.1. e 5.2., foram feitas tentativas combinando as relações parabólicas e hiperbólicas entre o coeficiente de atrito e as variáveis, isto é, cc , cc^2 , $1/cc$, $1/cc^2$, CN , CN^2 , $1/CN$, $1/CN^2$, onde constatou-se que o menor resíduo, assim como os maiores coeficientes de correlação (R) foram obtidos quando o coeficiente de atrito foi relacionado linearmente ao comprimento de corte e hiperbolicamente à carga normal, resultando a equação 5.3. para atrito estático e 5.4. para cinético:

$$\mu_E = \beta_0 + \beta_1 cc + \beta_3 \frac{1}{CN} \quad (5.3.)$$

$$\mu_c = \beta_0 + \beta_1 cc + \beta_2 V + \beta_3 \frac{1}{CN} \quad (5.4.)$$

As Tabelas 5.16., 5.17., 5.18. e 5.19. mostram um resumo dos parâmetros das equações de regressão 5.3. e 5.4., assim como os coeficientes de correlação múltipla (R) e o valor de F de Snedecor da regressão. A significância para 5% e 1% de probabilidade para o teste F é indicada respectivamente por um (*) e dois (**) asteriscos.

Os altos coeficientes de correlação múltipla (R) associados aos valores de F para regressão significativos ao nível de 1%, com exceção do sorgo em chapa não pintada, conforme mostram as Tabelas 5.16., 5.17., 5.18. e 5.19., indicam que as equações representam satisfatoriamente os fenômenos em questão.

Através da magnitude dos parâmetros das Tabelas 5.16. a 5.19., verificou-se também, que a variável que mais afetou o coeficiente de atrito foi a carga normal, seguida do comprimento de

TABELA 5.16.- PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA DETERMI
NAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ATRITO ESTÁTICO E CINÉ-
TICO DO CAPIM ELEFANTE COM 76,4% DE UMIDADE -
b.u., UTILIZANDO AS EQUAÇÕES 5.3. e 5.4.

PARÂMETRO	S U P E R F Í C I E				
	MADEIRA	MADEIRA PINTADA	CHAPA NÃO PINTADA	CHAPA PINTADA	CHAPA GALVANIZADA
β_0	0,6913 (0,6602)	0,4833 (0,4674)	0,5495 (0,5142)	0,4429 (0,4187)	0,5757 (0,5297)
β_1	-0,0170 (-0,0183)	-0,0037 (-0,0037)	-0,0089 (-0,0099)	0,0012 (0,0000)	-0,0087 (-0,0124)
β_2	-0,0003 -	-0,0002 -	0,0000 -	0,0000 -	0,0000 -
β_3	1,2043 (1,3815)	0,8523 (0,6156)	1,3537 (1,2250)	0,9860 (0,9450)	1,0819 (1,0294)
R	0,9922 (0,9890)	0,9512 (0,9099)	0,9826 (0,9396)	0,9389 (0,9198)	0,9904 (0,9671)
F	296,93** (134,40)**	44,34** (14,43)**	210,15** (22,60)**	55,81** (38,49)**	239,72** (43,38)**
Maior Resíduo	0,013 (0,016)	0,02 (0,024)	0,016 (0,023)	0,027 (0,026)	0,012 (0,029)

Obs.: Os valores entre parênteses correspondem ao atrito estático

TABELA 5.17. - PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ATRITO ESTÁTICO E CINÉTICO DO SORGO COM 78% DE UMIDADE b.u. UTILIZANDO AS EQUAÇÕES 5.3. E 5.4.

PARÂMETRO	S U P E R F Í C I E				
	MADEIRA	MADEIRA PINTADA	CHAPA NÃO PINTADA	CHAPA PINTADA	CHAPA GALVANIZADA
β_0	0,5518 (0,5096)	0,4459 (0,4228)	0,4461 (0,4156)	0,4713 (0,4528)	0,4944 (0,4731)
β_1	-0,0089 (-0,0074)	-0,0068 (-0,0058)	-0,0049 (-0,0039)	-0,0060 (-0,0062)	0,0012 (-0,0012)
β_2	-0,0001 -	0,0000 -	0,0000 -	0,0000 -	0,0000 -
β_3	1,0428 (1,0459)	1,2774 (1,1632)	1,0541 (0,9273)	1,2724 (1,2868)	1,1034 (1,1898)
R	0,9913 (0,9906)	0,9622 (0,9652)	0,9525 (0,8267)	0,9633 (0,9796)	0,9625 (0,9776)
F	265,31** (158,35)**	70,03** (40,92)**	73,47** (6,48)*	96,65** (71,54)**	94,45** (64,87)**
maior resíduo	0,013 (0,013)	0,03 (0,026)	0,03 (0,04)	0,028 (0,02)	0,026 (0,02)

Obs.: Os valores entre parênteses correspondem ao atrito estático.

TABELA 5.18. - PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ATRITO ESTÁTICO E CINÉTICO DO MILHO COM 71% DE UMIDADE b.u., UTILIZANDO AS EQUAÇÕES 5.3. e 5.4.

PARÂMETRO	S U P E R F Í C I E				
	MADEIRA	MADEIRA PINTADA	CHAPA NÃO PINTADA	CHAPA PINTADA	CHAPA GALVANIZADA
β_0	0,5313 (0,5167)	0,5524 (0,5437)	0,5416 (0,5187)	0,5905 (0,5586)	0,6319 (0,6018)
β_1	-0,0083 (-0,0079)	-0,0064 (-0,0087)	-0,0066 (-0,0062)	-0,0110 (-0,0108)	-0,0095 (-0,0108)
β_2	-0,0001 -	0,0001 -	0,0000 -	0,0000 -	0,0000 -
β_3	0,8307 (0,7267)	1,1828 (1,1961)	1,0181 (0,9223)	1,3146 (1,1179)	1,2559 (1,3259)
R	0,9165 (0,9145)	0,9698 (0,9533)	0,9409 (0,9440)	0,9567 (0,9654)	0,9897 (0,9968)
F	24,50** (15,33)**	73,81** (29,94)**	57,90** (24,56)**	81,03** (41,12)**	224,6** (470,16)**
maior resíduo	0,035 (0,028)	0,023 (0,035)	0,023 (0,025)	0,034 (0,026)	0,015 (0,009)

Obs.: Os valores entre parênteses correspondem ao atrito estático

TABELA 5.19. - PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO CINÉTICO DA CANA COM 71,4% DE UMIDADE b.u., UTILIZANDO A EQUAÇÃO $\mu_c = \beta_0 + \beta_2 V + \beta_3 \frac{1}{CN}$

PARÂMETRO	S U P E R F Í C I E				
	MADEIRA	MADEIRA PINTADA	CHAPA NÃO PINTADA	CHAPA PINTADA	CHAPA GALVANIZADA
β_0	0,6849	0,5524	0,5917	0,6123	0,5941
β_2	-0,0003	0,000	-0,0002	0,0000	-0,0003
β_3	2,0229	2,2729	2,0722	1,9702	2,4243
R	0,9896	0,9971	0,9995	0,9944	0,9990
F	71,21**	710,5**	1756,0**	360,00**	828,4**
maior resíduo	0,021	0,010	0,002	0,011	0,005

corte com menor influência, e a não influência, ou quase nula, da velocidade de deslizamento.

As curvas apresentadas nas Figuras 5.1. e 5.2. relacionam, respectivamente, a carga normal e o comprimento de corte com o coeficiente de atrito estático do milho com 71% de umidade, e foram calculados pela equação 5.5., com os parâmetros retirados da Tabela 5.18. para chapa galvanizada:

$$\mu_E = 0,6018 - 0,0108 cc + 1,3259 \frac{1}{CN} \quad (5.5.)$$

Como pode ser observado nas Figuras 5.1. e 5.2., as curvas apresentam pequenos desvios em relação aos valores experimentais fato esse já quantificado através do coeficiente de correlação múltipla (R) que foi de 0,9968 e pelo valor de F da regressão, significativo ao nível de 1%, indicando que a equação 5.5. é representativa do fenômeno.

As mesmas considerações feitas para o exemplo citado acima também são válidas para as demais forrageiras e superfícies.

6. - CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e nas discussões apresentadas no capítulo anterior, são apresentadas as seguintes conclusões:

- 6.1. A velocidade de deslizamento nos limites estudados não modificou significativamente o coeficiente de atrito cinético das forrageiras nas superfícies estudadas.
- 6.2. Os coeficientes de atrito estático e cinético das forrageiras com umidade superior a 70% foram máximos para as cargas normais baixas, decrescendo 10 a 20% com o aumento da carga normal de 10 para 50 g/cm² e permanecendo constante para cargas normais superiores em todas as superfícies estudadas.
- 6.3. Com o aumento do comprimento de corte dos fragmentos da forragem de 1 para 9 cm, ocorreu uma diminuição de até 15% no coeficiente de atrito estático e cinético das forrageiras nas diferentes superfícies.
- 6.4. Os coeficientes de atrito estático e cinético sofreram uma diminuição em torno de 40% quando a umidade das forragens picadas variou de 60 para 30%, permanecendo constante acima e abaixo dessa faixa, para todas as superfícies.
- 6.5. A carga normal não modificou significativamente os coeficientes de atrito estático e cinético das forrageiras com

umidade inferior a 30% b.u. em todas as superfícies.

- 6.6. Os valores máximos de coeficientes de atrito foram obtidos para a cana em todas as superfícies com um valor médio de 0,80.
- 6.7. A chapa galvanizada apresentou coeficientes de atrito elevados quando comparada às demais superfícies.
- 6.8. A cobertura da superfície de atrito com uma camada de tinta reduziu a sua rugosidade, com uma conseqüente diminuição do coeficiente de atrito em relação às demais superfícies. Assim, os valores mínimos de coeficientes de atrito foram obtidos nas superfícies pintadas.
- 6.9. O condicionamento da superfície deu origem a maiores valores dos coeficientes de atrito.
- 6.10. As equações de regressão propostas apresentaram valores de F significativos ao nível de 1% e coeficientes de correlação em média de 0,96 e, conseqüentemente, reproduzem, satisfatoriamente, os valores experimentais.

7. - SUGESTÕES

Tendo em vista os propósitos e as conclusões do presente trabalho, assim como a experiência adquirida, as seguintes sugestões são apresentadas:

- Devem ser realizados estudos visando verificar a influência da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito cinético para velocidades superiores às estudadas, podendo atingir até 30 m/seg.
- Verificar a possível influência do estágio de desenvolvimento da forrageira no valor do coeficiente de atrito, uma vez que a forragem nem sempre é colhida na fase ideal de corte.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS HANDBOOK - 3.^a edição. McGraw Hill Book Company. 1972.
2. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Agricultural Engineers Yearbook. ASAE Data: D 251.1. Friction coefficients of chopped forages. 27th ed. 1980.
3. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Agricultural Engineers Yearbook. ASAE Standard: S.358.1. Moisture measurement - Forages. 27th ed. 1980.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NB-93.
5. BALIS, J.S. & LILJEDAHL, J.B. Friction data limitations for Farm Machine design. ASAE paper 58-600, ASAE, St. Joseph, Mich. 1958.
6. BARGER, E.L.; LILJEDAHL, J.B.; GUNKEL, W.W. & CARLETON, W.M. Results of testes on mechanical loading devices for chopped forages. Agricultural Engineering. 30(5):223, 1949.
7. BICKERT, W.G. & BUELOW, F.H. Kinetic friction of grains on surfaces. Transactions of ASAE. 9(1);129-131, 134, 1966.
8. BICKERT, W.G. & BUELOW, F.H. Some aspects of kinetic friction of grains on surfaces. ASAE paper 65-323. St. Joseph, Mich. 1965.

9. BLEVINS, F.Z. & HANSEN, H.J. Analysis of forage harvester design. Agricultural Engineering. 37(1):21-26, 29, 1956.
10. BOCKHOP, C.W. & BARNES, K.K. Power distribution and requirements of a flail-type forage harvester. Agricultural Engineering. 36(7):453-457, 1955.
11. BOWDEN, F.P. & TABOR, D. The friction and lubrication of solids. Oxford University Press, New York, 1950.
12. BRUBAKER, J.E. & POS, J. Determining static coefficients of friction of grains on structural surfaces. Transactions of ASAE. 8(1):53-55, 1965.
13. BUELOW, F.H. Coefficients of friction of materials to be handled on the farm. ASAE paper 61-822. ASAE, St. Joseph, Mich. 1961.
14. CHEN, P. & SAUIRE, E.F. An evaluation of the coefficient of friction and abrasion damage of oranges on various surfaces. Transactions of ASAE. 14(6):1092-1094, 1971.
15. CLARK, R.L. & McFARLAND, H.A. Granular materials friction apparatus. Transactions of ASAE. 16(6):1198-1199, 1973.
16. CLARK, R.L.; WELCH, G.B. & FOX, W.R. Kinetic friction of cotton seeds as affected by several factors. Transactions of ASAE. 13(6):708-709, 714, 1970.

17. FONSECA, A. Curso de Mecânica (dinâmica). Vol. III. 3^a ed. Ao Livro Técnico S/A. 1967.
18. GOLDENBERG, J. Física geral e experimental. 1^o vol. Editora da USP. 1968.
19. GOMES, F.P. Curso de estatística experimental. 2^a ed. Piracicaba, S.P. 1963.
20. HENDERSON, J.M. Measuring kinetic friction coefficients using oscillatory motion. Transactions of ASAE. 10(3):348-351, 1967.
21. HINTZ, O.E. & SCHINKE, R. Coefficients of sliding friction for corn and alfafa on steel. Report 3-A186G-52R-1. Hindsdale, International Harvester Co., 1952.
22. HODGES, L.H. The design of a general-purpose farm wagon rack for mechanical unloading. Agricultural Engineering. 30(3):124-128, 1949.
23. JORGE, J.T. Determinação de algumas propriedades físicas e mecânicas da soja, variedade Santa Rosa. Tese de Mestrado. FEA. UNICAMP. 1977.
24. KRAMER, H.A. Factors influencing the design of bulk storage bins for rough rice. Agricultural Engineering. 25(10):463, 1944.
25. LORENZIN, R.T. Moisture effect on friction coefficients of small grains. ASAE paper 59-416, ASAE, St. Joseph, Mich. 1959.

26. MOHSENIN, N.N. Physical properties of plants and animal materials. Vol. 1. Gordon & Breach Science Pub. 1970.
27. OSMAK, I.T. Physiomechanical properties of corn. Sels, Khozmashina (4):10-15.
28. PUPO, N.I.H. Manual de pastagens e forrageiras. Conservação e Utilização. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola. 1980.
29. RESNICK, R. & HALLIDAY, D. Física. Parte I. Ao Livro Técnico S/A e Ed. da USP. 1967.
30. RICHTER, D.W. Friction coefficients of some agricultural materials. Agricultural Engineering. 35(6):411-413, 1954.
31. SHERWOOD, R.S. The mechanism of dry friction. Engineering Report nº 6. Iowa Eng. Exp. Sta. Ames, Iowa. 1951.
32. SNYDER, L.H.; ROLLER, W.L. & HALL, G.E. Coefficients of kinetic friction of wheat on various metal surfaces. Transactions of ASAE. 10(3):411-413, 419, 1967.
33. STATISTICAL SYSTEM. Pacote da IBM. Regressão Linear Múltipla. Pacote desenvolvido para utilização no IBM-1130.
34. STEWART, B.R.; HOSSAIN, Q.A. & KUNZE, O.R. Friction coefficients of sorghum grain on steel, teflon and concrete surfaces. Transactions of ASAE. 12(4):415-418, 1969.

35. TOSELLO, A. Equipamento experimental para determinação de coeficientes de atrito de grãos, atrito interno e atrito com paredes de diversos materiais, em conjugação - com o equipamento Instron. Resumos. 27.^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência. Vol. 27, nº 7, 491. 1975.
36. WIENEKE F. Reibungswerte von Pflanzen und Fasserstoffen. Landtechnische Forschung. 6:146, 1956.