

Impl. 15.10.92

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS E AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

UM ESTUDO PRELIMINAR DAS FORÇAS ATUANTES EM ELEMENTOS
ROMPEDORES DE SEMEADEIRAS DIRETAS COMERCIAIS

OSÉ ANTONIO PORTELLA *JP*

Orientador: Prof. Dr. CHEU-SHANG CHANG *CS*

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia de Alimentos e Agrí
cola, da Universidade Estadual
de Campinas - UNICAMP - como par
te dos requisitos exigidos para
obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Março - 1983

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

À minha mãe, por tudo que me ensinou,

À minha esposa, pela dedicação, amor
e apoio,

À minha filha, pelo carinho de crian
ça.

AGRADECIMENTOS

- à EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, pela oportunidade oferecida para a realização deste trabalho;
- à Chefia do Centro Nacional de Pesquisa de Trigo, pelo apoio e incentivo;
- ao Prof. Dr. Cheu-Shang Chang, por sua orientação;
- à LAVRALE - Máquinas Agrícolas Ltda., pela ajuda prestada;
- aos amigos Benito Bodini e Hugo Zattera, pelo interesse e auxílio;
- ao Prof. Dr. Oscar Braunbeck, por sua dedicação à Engenharia Agrícola;
- ao Prof. Dr. Inácio Dal Fabro por seus conselhos;
- aos amigos, colegas e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola da UNICAMP;
- a todas as pessoas que direta e indiretamente tornaram possível a realização deste trabalho.

RESUMO

Devido à rápida expansão da semeadura direta no Brasil, como técnica capaz de reduzir a erosão do solo, bem como conservar a energia derivada do petróleo, fez-se necessária uma pesquisa sobre semeadeiras adaptadas a esta nova técnica.

O conhecimento das forças que atuam nos elementos rompedores de tais semeadeiras é um parâmetro fundamental para o bom desenvolvimento de um projeto. Atualmente estes dados têm sido obtidos em projetos e pesquisas realizadas no exterior, em condições agrícolas por vezes muito diferentes das nossas.

Visando contribuir com pesquisas futuras nesta área, o presente trabalho fornece dados sobre alguns destes parâmetros desconhecidos. Assim sendo, procurou-se determinar as forças atuantes em três tipos de elementos rompedores de solo, submetidos a variações na velocidade de deslocamento e profundidade de trabalho.

Foi observado que a velocidade com que os rompedores se deslocam não tem efeito sobre as forças atuantes. No entanto, a profundidade de trabalho teve influência significativa tanto sobre as forças horizontal e vertical, quanto sobre a força resultante que atua sobre os mesmos.

Os rompedores atuaram de modo significativamente diferente, sendo que a faca rompedora exigiu menos força do que os demais.

Os resultados obtidos foram avaliados estatisticamente e, sempre que

possível, comparados com dados existentes na literatura.

SUMMARY

This research work is justified by the expansion of direct drilling techniques in Brazil.

The knowledge of the forces acting on the coulters is of fundamental importance to the development of any project related to this matter. To the present date those data were obtained from experiments carried out on foreign countries under conditions differing from ours.

This research work looks for to provide data about unknown parameters, contributing this way with future investigations in this area. The research is concerned about the forces acting on three different kinds of coulters under different velocities and working depth.

It was found that the velocity did not affect the forces acting on the coulters. However, the working depth was significant on the horizontal and vertical forces as well as on the resulting force acting on coulters. Different types of coulters behave significantly different. Knife coulters require less force than the others.

The results obtained from these tests were statistically interpreted and compared with those from literature.

ÍNDICE

| | Página |
|--|--------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1. Histórico e Importância da Semeadura Direta | 5 |
| 2.2. Semeadeiras Diretas | 6 |
| 2.3. Elementos Rompedores de Solo | 8 |
| 2.3.1. Faca Rompedora | 8 |
| 2.3.2. Disco de Corte | 9 |
| 2.3.3. Discos Duplos | 9 |
| 2.4. Forças Atuantes nos Elementos Rompedores | 11 |
| 2.4.1. Efeito das Características do Solo | 11 |
| 2.4.2. Efeito da Geometria do Elemento Rompedor | 13 |
| 2.4.3. Efeito das Condições de Trabalho | 17 |
| 2.4.3.1. Velocidade de deslocamento | 17 |
| 2.4.3.2. Profundidade de trabalho | 20 |
| 2.4.4. Análise da Força Resultante | 24 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 26 |
| 3.1. Materiais | 26 |
| 3.1.1. Elementos Rompedores Testados | 26 |
| 3.1.1.1. Disco de corte | 26 |
| 3.1.1.2. Discos duplos | 28 |
| 3.1.1.3. Faca rompedora | 28 |
| 3.1.2. Instrumentação | 28 |
| 3.1.2.1. Carro dinamométrico | 28 |
| 3.1.2.2. Dinamômetro de força (Transdutor) | 32 |
| 3.1.2.3. Pré-Amplificador | 32 |
| 3.1.2.4. Oscilógrafo registrador | 32 |
| 3.1.2.5. Anel dinamométrico | 32 |

| | Página |
|---|--------|
| 3.1.2.6. Penetrômetro | 33 |
| 3.1.2.7. Planímetro | 33 |
| 3.1.2.8. Outros equipamentos | 33 |
| 3.1.3. Propriedades Físicas e Mecânicas do Solo | 33 |
| 3.2. Métodos | 36 |
| 3.2.1. Teste de Campo | 36 |
| 3.2.1.1. Controle da velocidade de deslocamento | 37 |
| 3.2.1.2. Controle da profundidade de trabalho | 37 |
| 3.2.1.3. Controle das condições do solo | 38 |
| 3.2.2. Calibração do Transdutor | 38 |
| 3.2.2.1. Calibração da força horizontal | 38 |
| 3.2.2.2. Calibração da força vertical | 38 |
| 3.2.3. Propriedades Físicas e Mecânicas do Solo | 40 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 41 |
| 4.1. Resultados dos Ensaio de Campo | 41 |
| 4.2. Discussão | 50 |
| 4.2.1. Disco de Corte | 53 |
| 4.2.1.1. Efeito da profundidade de trabalho | 53 |
| 4.2.1.2. Efeito da velocidade de deslocamento | 54 |
| 4.2.2. Discos Duplos | 55 |
| 4.2.2.1. Efeito da profundidade de trabalho | 55 |
| 4.2.2.2. Efeito da velocidade de deslocamento | 57 |
| 4.2.3. Faca Rompedora | 58 |
| 4.2.3.1. Efeito da Profundidade de trabalho | 59 |
| 4.2.3.2. Efeito da velocidade de deslocamento | 60 |
| 5. CONCLUSÕES | 61 |
| 6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 62 |
| APÊNDICES | 65 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | Página |
|--|--------|
| 1. Variação da coesão e do ângulo de atrito interno em relação com o teor de umidade, para um solo com 36,6 % de argila | 12 |
| 2. Variação das forças de reação do solo devido ao ângulo de ataque e a profundidade de trabalho | 15 |
| 3. Dados coletados do teor de umidade, densidade volumétrica e resistência à penetração, durante a realização dos testes de campo | 36 |
| 4. Condições do solo durante a realização dos testes com disco de corte | 41 |
| 5. Dados coletados, em kg, das forças horizontal e vertical e calculados para a força resultante para um disco de corte trabalhando a 2,5 cm de profundidade | 42 |
| 6. Dados coletados, em kg, das forças horizontal e vertical e calculados para a força resultante para um disco de corte trabalhando a 5,0 cm de profundidade | 43 |
| 7. Condições do solo durante a realização dos testes com discos duplos | 44 |
| 8. Dados coletados, em kg, das forças horizontal e vertical e calculados para a força resultante, para discos duplos trabalhando a 2,5 cm de profundidade | 44 |
| 9. Dados coletados, em kg, das forças horizontal e vertical e calculados para a força resultante, para discos duplos trabalhando a 5,0 cm de profundidade | 45 |
| 10. Condições do solo durante a realização dos testes com faca rompedora | 46 |
| 11. Dados coletados, em kg, das forças horizontal e vertical e calculados para a força resultante para uma faca rompedora trabalhando a 2,5 cm de profundidade | 46 |
| 12. Dados coletados, em kg, das forças horizontal e vertical e calculados para a força resultante para uma faca rompedora trabalhando a 5,0 cm de profundidade | 47 |

| | |
|--|----|
| 13. Análise de forças de elementos rompedores em semeadeiras diretas comerciais, com diferentes velocidades de deslocamento e profundidade de trabalho | 48 |
| 14. Interação rompedor x profundidade - força horizontal, em kg | 49 |
| 15. Interação rompedor x profundidade - força vertical, em kg | 49 |
| 16. Interação rompedor x profundidade - força resultante, em kg | 49 |
| 17. Efeito da velocidade de deslocamento sobre as forças atuantes em três elementos rompedores, a diferentes profundidades de trabalho | 50 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Página |
|---|--------|
| 1. Faca rompedora de solo | 10 |
| 2. Disco de corte e discos duplos - Sistema de triplo disco | 10 |
| 3. Teor de umidade x força de tração para faca de 2,5 cm trabalhando a 10 cm de profundidade | 12 |
| 4. Força de tração x largura do rompedor, para uma profundidade de trabalho de 15 cm, em diferentes solos agrícolas | 16 |
| 5. Força de tração x ângulo de ataque para diferentes solos, em uma profundidade de trabalho de 15 cm | 16 |
| 6. Efeito da largura de corte em relação com o esforço específico e a velocidade, para arados de aiveca atuando em um solo franco-argiloso, a 22,9 cm de profundidade | 16 |
| 7. Velocidade x força de tração para uma faca de 2,5 cm tracionada a 10 cm de profundidade, em um solo com 22,5 % de argila, sob três índices de compactação e três teores de umidade | 19 |
| 8. Velocidade de deslocamento x força de tração e força vertical para uma faca plana retangular, em posição vertical, operando a 10 cm de profundidade, em diferentes solos agrícolas | 19 |
| 9. Velocidade de deslocamento x força de tração e força vertical para elementos rompedores empregados em semeadeiras diretas | 21 |
| 10. Efeito da velocidade no esforço específico de tração de um arado de discos, a uma umidade média de 27,8 % em solo argiloso | 21 |
| 11. Efeito da profundidade de trabalho x força de tração e força vertical, em subsolador tipo faca operando a 4,8 km/h em diferentes solos agrícolas | 23 |
| 12. Força vertical x profundidade de trabalho para dois elementos rompedores de solo empregados em semeadeiras diretas | 23 |
| 13. Resposta da força de tração e reação lateral de grades de disco a profundidade de trabalho e tipo de solo | 24 |

| | Página |
|--|--------|
| 14. Disco de corte : Vista lateral e superior | 27 |
| 15. Discos duplos: Vista lateral e frontal | 29 |
| 16. Faca rompedora de solo: Vista lateral e frontal | 30 |
| 17. Carro dinamométrico - Vista lateral | 31 |
| 18. Carro dinamométrico - Vista frontal | 31 |
| 19. Oscilógrafo registrador | 34 |
| 20. Anel dinamométrico | 34 |
| 21. Calibração da força horizontal | 39 |
| 22. Calibração da força vertical | 39 |
| 23. Efeito do tipo de rompedor x velocidade de deslocamento | 51 |
| 24. Efeito do tipo de rompedor x profundidade de trabalho | 52 |
| 25. Resultante (\bar{N}), da força horizontal (\bar{P}) e da força vertical (\bar{Q}) a tuante em: a) Disco de corte; b) Discos duplos; c) Faca rompedora | 56 |
| 26. Circuito transdutor para forças verticais, horizontais e momento. | 66 |
| 27. Caixa de cisalhamento direto | 66 |

1. INTRODUÇÃO

Discussões sobre a conservação de energia durante um cultivo normalmente relacionam-se com a necessidade de reduzir a quantidade de solo movimentado durante o estabelecimento de uma cultura.

Pesquisas neste sentido têm sido conduzidas desde a década de 40, quando pesquisadores britânicos demonstraram que as culturas poderiam se desenvolver perfeitamente em solos não preparados ou com preparo reduzido, desde que os mesmos estivessem livres de ervas daninhas.

Desde a descoberta dos herbicidas de contato, em 1956, agilizou-se o desenvolvimento e estabelecimento das técnicas e máquinas referentes ao conceito conhecido por semeadura direta, técnica segundo a qual as sementes e fertilizantes são introduzidos em solos sem prévio preparo, por meio de elementos rompedores especiais acoplados às semeadeiras diretas.

Nos últimos anos, em decorrência dos constantes aumentos nos preços dos derivados de petróleo, aliado à conscientização pela conservação do solo, cresceu o interesse dos agricultores por métodos de preparo reduzidos tais como o cultivo mínimo e a semeadura direta.

O uso de semeadeiras diretas tendo aumentado consideravelmente em curto espaço de tempo, exigiu numerosas investigações quanto ao seu desempenho operacional, mecânico e agrônômico. Das pesquisas realizadas na década de 70 desenvolveram-se três sistemas principais de elementos rompedores de solo:

a) Sistema de enxadas rotativas;

- b) Sistema de triplo disco;
- c) Sistema de faca rompedora.

O sistema de enxadas rotativas é composto de um rotor no qual são fixadas flanges com lâminas de corte, as quais preparam uma faixa de solo que varia entre 7 a 12 cm de largura, dependendo das condições de umidade do solo e resíduos na superfície. Semeadeiras que empregam este sistema são acopladas aos três pontos do trator, sendo que o rotor é acionado pela tomada de força. Nas pesquisas já efetuadas foi observado que o rendimento operacional das semeadeiras com enxadas rotativas está ao redor de 1,20 ha/hora, com um consumo médio de 10,0 l/ha de combustível, utilizando como limite mínimo, tratores de 70 HP de potência.

O sistema de triplo disco é composto de um suporte ao qual é fixado na parte frontal um disco de corte plano, liso e afiado, cuja função é cortar os resíduos da cultura anterior e romper uma estreita fenda no solo, e na parte posterior do suporte é fixado um conjunto de discos duplos, cuja função é reabrir o sulco (3-4 cm), introduzindo sementes e fertilizantes adequadamente. Semeadeiras que empregam este sistema são tracionadas por arraste. Foi observado que o rendimento operacional das semeadeiras com triplo disco está ao redor de 2,10 ha/hora, com um consumo médio de 4,9 l/ha de combustível, utilizando normalmente tratores de 50-60 HP de potência.

O sistema de faca rompedora é composto de um suporte ao qual é fixado na parte frontal um disco de corte plano, liso e afiado, cuja função é cortar os resíduos da cultura anterior e romper uma estreita fenda no solo, e na parte posterior é fixada uma faca rompedora de espessura reduzida (1,6 cm) com faces em cunha de modo a reabrir o sulco (3-5 cm), introduzindo sementes e fertilizantes adequadamente. Foi observado que o rendimento operacional das semeadeiras com facas rompedoras está ao redor de 1,60 ha/hora, com um consumo médio de 6,7 l/ha de combustível, utilizando normalmente tratores de 60 HP de potência.

Cada um destes sistemas atua distintamente quanto ao modo de cisa lhar e romper o solo, formando o sulco para deposição de sementes. Deste modo, as necessidades de potência, ou seja, a força exigida para tracionar semeadeiras de diferentes sistemas, é um dos tópicos de maior interesse en tre os usuários de tais máquinas.

Em nosso atual estágio de desenvolvimento sobre máquinas e implemen tos agrícolas pouco se conhece sobre o modo de atuação destes rompedores contra o solo, com exceção ao sistema de enxadas rotativas que já possui um estudo detalhado.

Repousa aqui o objetivo principal deste estudo, ou seja, estabelecer a magnitude e direção das forças atuantes nos elementos rompedores de so lo, de modo a permitir que, baseados nestes resultados, projetos possam ser elaborados com maior critério e informação. O que está sendo proposto é medir, em um solo de características agrícolas definidas (Latosolo Ro xo), as forças horizontal e vertical que atuam sobre os rompedores de solo. A força horizontal, que é paralela à direção de percurso do trator, usual mente é aceita como o esforço do implemento, Esta é, sem dúvida, a compo nente mais importante da força resultante, pois determina a tração reque rida para o trator. A componente vertical também é essencial na medida que esclarece a força necessária para penetrar e manter a profundidade de tra balho de um elemento rompedor, tanto quanto no esforço do implemento devi do às forças de fricção associadas com esta força vertical.

Deste modo, os principais objetivos do trabalho foram:

1. Medir as componentes de força envolvidas, para os elementos rompedores de solo encontrados nas principais semeadeiras diretas em uso no Brasil.
2. Verificar as variações que ocorrem nestas forças, decorrentes de mudan ças na velocidade de deslocamento, tanto quanto na profundidade de tra balho, para os diferentes rompedores.
3. Proporcionar dados para que pesquisas futuras nesta área venham a ser

estimuladas, de modo a conhecer efeitos semelhantes em outros tipos e condições de solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Histórico e Importância da Semeadura Direta

O preparo do solo é uma técnica na qual atuam vários implementos agrícolas, de diferentes ações mecânicas, com a finalidade única de obter condições adequadas para o estabelecimento de uma cultura.

Atualmente, no entanto, tem sido empregada uma técnica moderna de estabelecimento de culturas, denominada de semeadura direta. Segundo os princípios desta nova tecnologia são desnecessários os diferentes métodos de preparo do solo, em favor de um sistema aprimorado de colocação de sementes e fertilizantes em contato com o solo agrícola.

Segundo PHILLIPS & YOUNG (1973), semeadura direta pode ser definida como a técnica de colocação de sementes e fertilizantes em solo não preparado, através do rompimento de uma estreita fenda ou faixa de solo, suficientemente larga e profunda, de modo a propiciar o desenvolvimento da cultura semeada.

Pesquisas realizadas na Estação Experimental de Rothamsted, Inglaterra, demonstraram que as culturas podiam se desenvolver satisfatoriamente bem se o solo estivesse lavrado ou não, desde que livre de ervas daninhas. Na época, o uso de herbicidas residuais como alternativa para a capina foi desencorajado pelo fato de persistirem no solo, criando um longo e improdutivo tempo de espera. Entretanto a partir de 1961 com o lançamento do primeiro herbicida de ação por contato (atuam unicamente sobre a vegetação verde existente, tornando-se inativos em contato com o solo), denominado Paraquat, foi possível que cientistas e pesquisadores iniciassem suas pesquisas

na técnica de semeadura direta.

PHILLIPS et alii (1980), chamam a atenção para o fato de que já em 1978 haviam cerca de 1,5 milhões de hectares com milho, 1,0 milhões de hectares com soja, 272 mil hectares com trigo e 162 mil hectares com sorgo, em semeadura direta nos Estados Unidos. Em uma estimativa realizada em 1974 pelo Departamento de Agricultura dos EUA, concluiu-se que no ano 2000 a semeadura direta deverá estar sendo empregada em aproximadamente 62 milhões de hectares, ou seja, em 45 % da área agrícola daquele país.

Segundo o IAPAR - Instituto Agrônômico do Paraná, na mesma época, ou seja, 1978, havia na região Centro-Sul do Brasil uma área de 54 mil hectares em semeadura direta. Já em 1980 esta área era de 205 mil hectares na mesma região e havia uma estimativa realizada pela EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, de que aproximadamente 400 mil hectares haviam sido semeados diretamente, incluindo as novas áreas do Mato Grosso do Sul e oeste de São Paulo, em 1981.

CANNELL (1981), salienta que a semeadura direta ainda não é usada extensivamente em nenhum país, embora sua expansão seja acentuada. Cita que o Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos estimou que as práticas de "cultivo reduzido" aumentaram de 1,7 milhões de hectares em 1963 para 11 milhões em 1972 e 33 milhões em 1980, embora não mais do que 3 milhões houvessem sido semeados diretamente em igual período.

2.2. Semeadeiras Diretas

A limitação seguinte na adoção da semeadura direta (a primeira havia sido a disponibilidade de herbicidas), era que não haviam semeadeiras adaptadas para uso em solos não preparados, normalmente mais densos e difíceis de romper.

Até então, as semeadeiras vinham sendo desenvolvidas e fabricadas para trabalharem em áreas bem preparadas, livres de resíduos ou ervas daninhas.

nhas. A força de penetração dos elementos rompedores destas semeadeiras quando colocados em solos mais densos não era suficiente para o rompimento do solo e colocação adequada das sementes.

Foi rapidamente apreciada a idéia de que uma nova semeadeira com a estrutura reforçada e elementos rompedores condizentes com o tipo de trabalho, deveria ser desenvolvida. Esta nova semeadeira deveria ser capaz de colocar sementes e fertilizantes em solo sem preparo prévio, em áreas com resíduos ou restos culturais, tão bem como se estivesse sobre um solo cultivado.

KORONKA (1973), construiu um protótipo experimental em cuja barra de tração foi preso um cilindro hidráulico equipado com medidores de força para fornecer a força de tração; um segundo cilindro foi colocado sob a barra porta-ferramenta conectado através de uma mola de aço aos elementos em teste, fornecendo a força vertical necessária para penetrar os elementos a determinadas profundidades.

Koronka comparou, em centenas de testes realizados com vários tipos de solo e sob várias condições de campo, os sistemas de triplo disco (disco de corte conjugado com discos duplos) e disco de corte conjugado com uma faca rompedora. A análise dos dados coletados por Koronka demonstra que o sistema de triplo disco está mais próximo das especificações propostas para semeadeiras diretas.

LOGAN (1977), descreve o desempenho de diferentes sistemas de máquinas para semeadura direta. Segundo o autor, os sistemas com maiores potencialidades seriam o de triplo disco e o de facas, devido às performances obtidas nas semeaduras diretas de cereais e pastagens no Reino Unido.

FROHLICH (1979), testou duas semeadeiras diretas - uma com o sistema de facas (Haybuster 1206), e outra com o sistema de triplo disco (Melroe 702-3D). Segundo sua pesquisa foram necessários aproximadamente 180 kg de força vertical por linha de semeadura, para obter uma penetração adequada

(5-8 cm) dos elementos rompedores, principalmente sendo discos de corte.

A energia consumida na barra de tração de 1995 N/m para o sistema de discos e 3000 N/m para o sistema de facas. O tipo de solo, como era esperado, alterou a média de energia consumida. Foram gastos 1820 N/m em solos leves, 1885 N/m em solos médios e 2155 N/m em solos pesados.

Paralelamente às pesquisas em andamento na Europa e América do Norte foi iniciado em 1978, no Centro Nacional de Pesquisa de Trigo-EMBRAPA, um estudo comparativo de máquinas para semeadura direta.

Nesta pesquisa PORTELLA & RICHARDSON (1980), descrevem os diferentes elementos rompedores existentes nas semeadeiras diretas em uso no Brasil, apresentando resultados técnicos que comprovam a superioridade dos sistemas de triplo disco e facas quanto ao desempenho operacional e agrônomico.

A seguir, resumidamente, é feita uma descrição dos diferentes sistemas de rompedores de solo.

2.3. Elementos Rompedores de Solo

Rompedores são elementos mecânicos utilizados em semeadeiras, a maioria dos quais empregados para assegurar a deposição de sementes no solo, em ótimas condições para sua germinação e desenvolvimento. Considerando que as condições ótimas para o desenvolvimento das culturas depende do tipo de solo, suas condições físicas, teor de umidade, etc..., é óbvio que o projeto de rompedores não pode ser limitado a um tipo universal capaz de ser usado para qualquer situação. Três são os principais rompedores empregados em semeadeiras diretas no Brasil: faca rompedora, disco de corte e discos duplos.

2.3.1. Faca Rompedora

A faca rompedora apresentada na Figura 1 é um elemento rompedor cu

ja lâmina de corte em forma de cunha, rompe o solo e os restos culturais nele existentes, formando um sulco ou fenda de espessura semelhante à de sua maior secção transversal. Para diminuir a resistência oferecida pelo solo, bem como o cisalhamento superficial, um ângulo de ataque α é formado entre a face da faca rompedora e a direção de trabalho. Normalmente usam-se ângulos de ataque ao redor de $60-70^{\circ}$.

As facas rompedoras geralmente são feitas de aço carbono, sendo a lâmina do rompedor endurecida a uma dureza Brinell HB = 400 ~ 500. A espessura destas facas varia entre 15-20 mm.

2.3.2. Disco de Corte

São elementos rompedores geralmente empregados em frente a outros elementos com a finalidade de obter um pequeno canal no qual este outro possa realizar sua função com menor esforço e maior eficiência. Na Figura 2 pode-se observar a utilização de um disco de corte no conjunto triplo disco.

Os discos de corte empregados usualmente em semeadeiras diretas são planos, lisos e afiados de um lado, com um ângulo de fio $i = 12 \sim 15^{\circ}$; tendo diâmetros entre 300 ~ 350 mm.

2.3.3. Discos Duplos

Entre os elementos rompedores de solo também estão incluídos os chamados discos duplos. Este elemento rompedor é composto por dois discos planos montados de tal modo a formar um estreito sulco em forma de "V" onde são depositadas as sementes e os fertilizantes.

Um conjunto de discos duplos cortando a superfície do solo, passa com relativa facilidade sobre possíveis obstáculos encontrados em seu percurso, tais como pedras, torrões ou resíduos da cultura anterior, sendo portanto freqüentemente encontrados em semeadeiras diretas onde estas condições são comuns. Na Figura 2 pode-se observar a utilização dos discos

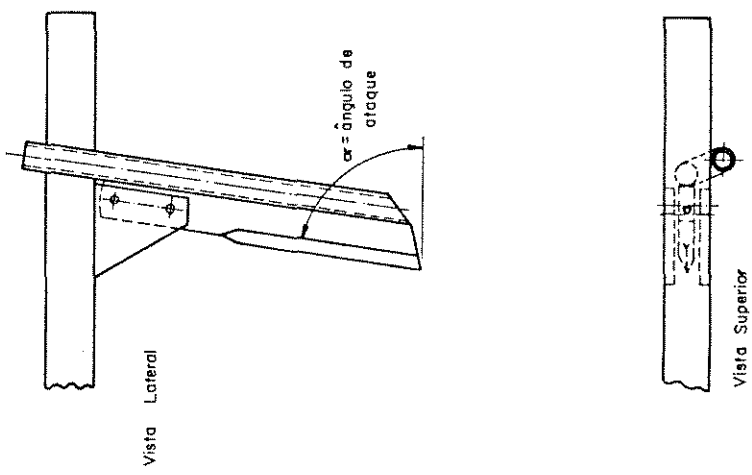


Fig. 1 - Faca Rempedora de Solo

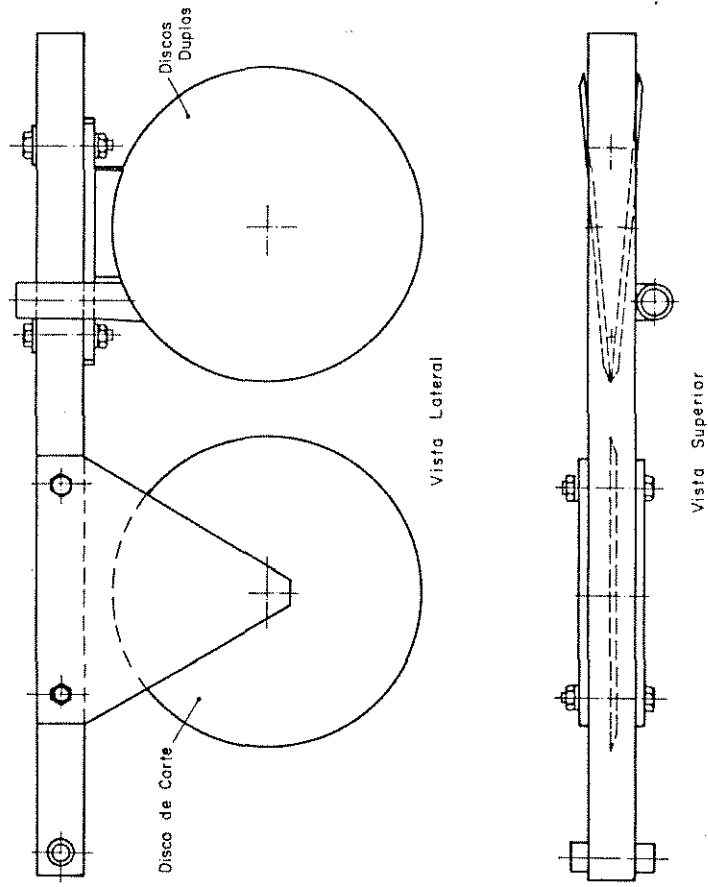


Fig. 2 - Disco de Corte • Discos Duplos — Sistema de Triplo Disco

duplos no conjunto triplo disco.

2.4. Forças Atuantes nos Elementos Rompedores

A análise das forças atuantes nos elementos rompedores de solo é de certo modo difícil, devido à complexidade da relação solo-implemento quando trabalhando a nível de campo.

As variáveis que compõe a relação solo-implemento podem ser agrupadas em: a) variáveis do solo; b) variáveis do implemento e c) variáveis operacionais.

As variáveis do solo incluem o teor de umidade, a natureza e textura do solo. As variáveis do implemento incluem formato e dimensões do implemento, ângulos de ataque, de fio, de inclinação, etc. As variáveis do último grupo são a velocidade de deslocamento e a profundidade de trabalho.

2.4.1. Efeito das Características do Solo

Dentre as características do solo que mais afetam as forças atuantes, existem referências bibliográficas interagindo o teor de umidade, a densidade, a coesão e o teor de argila do solo.

O efeito do teor de umidade foi descrito por NICHOLS (1930) trabalhando com facas subsoladoras, citando que a resistência ao corte aumentou linearmente com a umidade, em solos argilosos, até alcançar um máximo próximo ao limite de plasticidade, decrescendo rapidamente no limite de liquidez. Também TELISCHI et alii (1956) observaram efeitos significativos da umidade na força de tração, em presença de argila (Fig. 3).

AMIRANTE & DI CANDIA (1974) comprovaram que a força de tração de arados de discos aumenta com aumentos no teor de umidade. O teor de umidade altera consideravelmente o valor da coesão do solo, embora o ângulo de atrito interno pouco se modifique, como pode ser observado na Tabela 1.

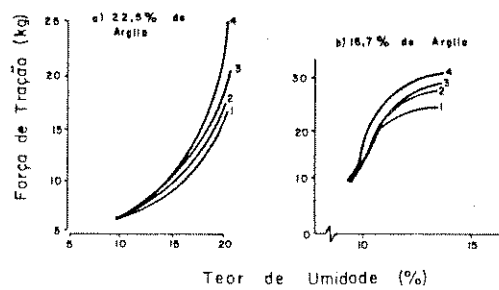


Fig.3 - Teor de Umidade X Força de Tração para Faca de 2,5 cm
Trabalhando a 10cm de Profundidade. Velocidades: 1=0,96; 2=1,50;
3=2,06; 4=2,83 km/h. (TELISCHI et alii, 1956)

Tabela 1. Variação da coesão e do ângulo de atrito interno em relação com o teor de umidade, para um solo com 36,6 % de argila

| Umidade (%) | Coesão (C) (N/m ²) | Ângulo de atrito interno (graus) |
|-------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 10,0 | 1,27 x 10 ⁴ | 45,5 |
| 13,1 | 0,95 x 10 ⁴ | 47,0 |
| 14,5 | 0,59 x 10 ⁴ | 48,0 |
| 16,1 | 0,39 x 10 ⁴ | 49,0 |
| 17,5 | 0,83 x 10 ⁴ | 46,0 |
| 19,5 | 0,86 x 10 ⁴ | 50,0 |
| 21,4 | 0,76 x 10 ⁴ | 46,6 |

Fonte: AMIRANTE & DI CANDIA (1974).

Quanto ao teor de argila presente no solo, OMETTO (1957) pesquisando em arados de aiveca notou um acréscimo de 31 % na força de tração ao variar o teor de argila de 11,6 % para 44,0 %. Este dado foi comprovado por GILL (1967) que cita como regra geral que aumentando o teor de argila e mantendo-se constantes os outros fatores do solo, ocorre um acréscimo na força de tração de um implemento.

A coesão e a densidade também contribuem para alterar significativamente as forças atuantes, na medida que variam no perfil do solo, à medida que a profundidade de trabalho aumenta. Assim sendo, variações destes fatores em função das condições de solo devem ser evitadas em trabalhos à nível de campo.

2.4.2. Efeito da Geometria do Elemento Rompedor

A penetração e deslocamento de um implemento no solo é uma ação que pode ser descrita por um comportamento composto, desde que o solo normalmente rompe-se por alguma combinação de corte, cisalhamento, compactação e fluxo, à medida que o rompedor é forçado dentro do solo.

Assim sendo, a geometria do rompedor é importante devido a influência da distribuição de tensão no solo. A geometria pode determinar se um elemento rompedor atua como uma faca que desliza através do solo sem erguê-lo para a superfície (pequeno coeficiente de deformação da leiva), ou se cria corpos compactados de solo (torrões) que se apresentam na superfície rompida, como quando atuam elementos com ação dinâmica (elevado coeficiente de deformação da leiva).

Na investigação da ação das relações solo-implemento tem sido demonstrado que a variação dos fatores de geometria do implemento está associada também a fatores externos, tais como a velocidade de deslocamento, a profundidade de trabalho e as condições do solo.

Variações na geometria dos sistemas solo-implemento, resultam em diferentes necessidades de esforço e tração e em diferentes reações do solo. A natureza exata das forças alteradas por tais mudanças não é bem conhecida, embora se reconheça que devam variar.

Em relação às forças atuantes existem poucos dados quanto às características do implemento. Estudos têm sido conduzidos, em sua maioria usando uma lâmina plana retangular perpendicular ou inclinada em relação à di

reção de trabalho, com relações profundidade/largura as mais diversas possíveis.

PAYNE (1956), estudando facas planas retangulares em diferentes tipos de solo, encontrou os primeiros dados sobre a variação da força de tração em função da largura ou espessura do elemento rompedor de solo (Fig. 4).

Mais tarde PAYNE & TANNER (1959), continuando seus estudos em facas retangulares, analisaram as relações profundidade/largura e inclinação da faca, tanto em laboratório quanto no campo. Notaram então que o esforço variou linearmente com a largura da faca e que os ângulos de ataque têm grande influência na força de tração (Fig. 5).

De acordo com suas observações houve uma pronunciada tendência para as curvas inclinarem-se rapidamente quando o ângulo de ataque da faca ultrapassava 48° .

DRANSFIELD et alii (1964), observaram que para uma inclinação positiva da faca ao redor de 45° , ocorria uma redução de 33 % na força de tração, sendo que a força vertical que atua no implemento diminui quase a zero. Além deste ângulo a força vertical torna-se negativa, isto é, existe uma "sucção" tendendo a puxar o implemento para baixo.

O'CALLAGHAN & McCULLEN (1965), compararam facas planas retangulares e facas com face em cunha; não encontraram diferenças significativas entre elas quanto às forças atuantes. A única vantagem prática das facas em cunha era a inexistência da cunha de solo que é formada quando facas planas retangulares são tracionadas em solos agrícolas.

SMITH et alii (1967), estudaram o funcionamento de um disco rompedor de solo, variando a profundidade de trabalho e a largura de corte. Segundo os autores, à medida que a profundidade de preparo aumenta, a necessidade de energia por unidade de área e por unidade de volume aumentam; também à medida que a largura de preparo aumenta, a necessidade de energia por unidade de área e volume diminuem.

REAVES & SCHAFER (1975), observaram em arados de aiveca de diferentes larguras de corte que, à medida que aumentava esta largura, aumentava o esforço específico de tração, sendo que esta situação era mais nítida em velocidades de deslocamento mais elevadas. Citam que o arado de menor diâmetro necessitou 10 % menos esforço específico a 2 m/s e 12 % a 3,5 m/s (Fig. 6).

Usadas atualmente em semeadeiras diretas encontramos facas rompedoras de espessura reduzida (10 a 15 mm). Estudos destas facas foram conduzidos por PAYNE (1956), O'CALLAGHAN & FARRELLY (1964) e HETTIARATCHI & REECE (1966).

STAFFORD (1981), notou que o modo de cisalhamento depende do ângulo do implemento. Para facas com ângulos de 45° a transição no modo de cisalhamento ocorreu entre os teores de umidade de 28 a 38 %; no entanto para facas verticais ($\alpha = 90^{\circ}$) a transição ocorreu entre 18 e 28 % de umidade. Então, a 28 % de umidade o comportamento foi característico de um rompimento quebradiço para um ângulo de 45° e em fluxo para um ângulo de 90° . A profundidade de trabalho foi de 15 cm para ambas as facas.

HARRISON (1982), observou que a força de tração e a força vertical são dependentes do ângulo de ataque do implemento, conforme demonstra a Tabela 2.

Tabela 2. Variação das forças de reação do solo devido ao ângulo de ataque e a profundidade de trabalho

| | | Horizontal (N/m) | Vertical (N/m) |
|-------------------------------|------|---------------------|-------------------|
| Ângulo de ataque (graus) | 15 | 860 | - 166 |
| | 30 | 1065 | - 212 |
| | 45 | 1526 | - 80 |
| Profundidade de trabalho (cm) | 7,5 | 990 | - 104 |
| | 10,0 | 1311 | - 202 |

Fonte: HARRISON (1982).

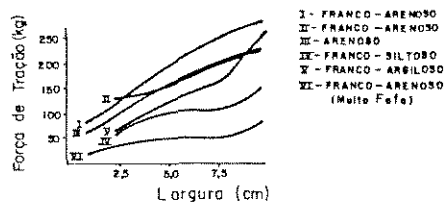


Fig. 4 - Força de Tração X Largura do Rompedor, para uma Profundidade de Trabalho de 15cm, em Diferentes Solos Agrícolas. (PAYNE, 1956)

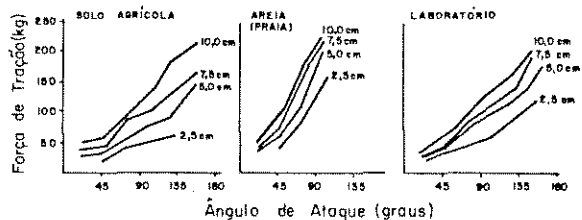


Fig. 5 - Força de Tração X Ângulo de Ataque para Diferentes Solos, em uma Profundidade de Trabalho de 15 cm. (PAYNE & TANNER, 1959)

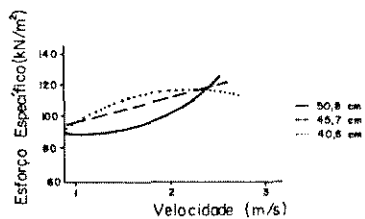


Fig. 6 - Efeito da Largura de Corte em Relação com o Esforço Específico e a Velocidade, para Arados de Aiveco Atuando em um Solo Franco - Argiloso, a 22,9 cm de Profundidade. (REAVES & SCHAFER, 1975)

2.4.3. Efeito das Condições de Trabalho

Existem dados experimentais que mostram ser a força de tração de um implemento de preparo uma função das condições de trabalho. Dentre estas condições, a velocidade de deslocamento e a profundidade de trabalho são os fatores mais representativos.

Coincidentemente tais variáveis são as que mais preocupam engenheiros agrícolas e projetistas de equipamentos, desde que um dos melhores métodos de aumentar a capacidade operacional e a performance de máquinas ou implementos é aumentando a velocidade de deslocamento, controlando a profundidade de trabalho em busca de melhores condições para as culturas.

2.4.3.1. Velocidade de deslocamento

Operar em altas velocidades é desejável porque elas oferecem um meio de aumentar a rentabilidade das operações, embora adicionando um fator a ser consumido na potência dos tratores. O aumento de esforço, associado à velocidade é um dos pontos mais limitantes ao uso intensivo dos implementos de preparo. Embora este fenômeno tenha sido demonstrado para arados, grades, subsoladores e cultivadores, pouco é conhecido sobre sua ação em relação aos elementos rompedores de solo empregados em semeadeiras diretas.

Em pesquisa realizada por RANDOLPH & REED (1936), em arados de aiveca observaram que o aumento na força de tração em função da velocidade se comporta segundo uma curva, onde para pequenos aumentos na velocidade correspondem grandes valores na força de tração. Observaram que existia um ponto onde os aumentos eram mais acentuados e a este ponto denominaram "ponto de inflexão da curva". Determinaram que este ponto varia de solo para solo, sendo importante o conhecimento do mesmo para que a escolha da velocidade corresponda a um menor consumo de energia.

PAYNE (1956) encontrou uma relação linear na força de tração quando variou a velocidade de deslocamento de 1,6 para 9,6 km/hora, obtendo incre

mento da ordem de 20 a 30 %.

Segundo TELISCHI et alii (1956), a equação geral $y = a \cdot x^b + c$ pode representar a relação entre a velocidade e a força de tração exigida por implementos de preparo, na qual y é a força de tração e x é a velocidade (Fig. 7).

Em solo arenoso ou em qualquer outro tipo de solo onde o teor de umidade é baixo, o expoente "b" é quase zero. Com o aumento de umidade e a porcentagem de argila, a inclinação das linhas aumenta e a relação deixa de ser linear.

ROWE & BARNES (1961), citam que em numerosos testes de implementos de preparo observou-se um aumento na força de tração entre 25 a 80 % quando a velocidade de deslocamento dobrou de 4,8 para 9,6 km/hora.

Trabalhando em condições de laboratório com uma faca plana retangular, agindo como se fosse um implemento, encontraram incrementos de 25 % na força de tração ao aumentar a velocidade de 1,1 para 2,2 km/hora, em solo com 35,6 % de argila; para um solo com apenas 2,7 % de argila o aumento na força de tração foi de 10,2 %.

DRANSFIELD et alii (1964), em suas pesquisas de laboratório com facas planas retangulares (verticais ou inclinadas), notaram que o efeito da velocidade em solos muito compactados é marcante, sendo considerado o mais significativo na força de tração. Observaram também que a velocidade tem pouco efeito sobre a força vertical que atua sobre o implemento (Fig. 8).

Para uma faca vertical a força de tração é levemente afetada pela variação de velocidade acima de 8 km/hora em solos fofos, mas em solos compactados ela aumenta cerca de 6 a 10 % por km/hora.

KORONKA (1973), pesquisando elementos rompedores de solo aplicados à semeadeiras diretas, observou que a força de tração alterava-se ao usar facas de corte em diferentes velocidade de deslocamento; ao empregar discos de corte havia variação considerada insignificante. Analisando a força ver

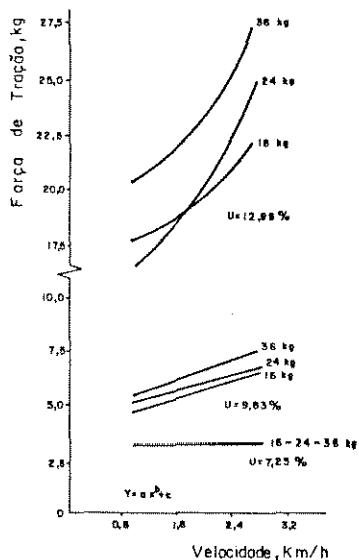


Fig. 7 - Velocidade X Força de Tração para uma Faca de 2,5 cm Tacionada a 10 cm de Profundidade, em um Solo com 22,5 % de Argila, Sob Três Índices de Compactação (16, 24 e 36 kg) e Três Teores de Umidade (7,25, 9,83 e 12,98 %). (TELISCHI et alii, 1956)

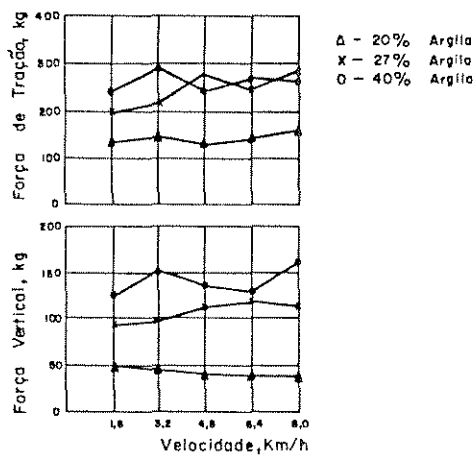


Fig. 8 - Velocidade de Deslocamento X Força de Tração e Força Vertical para uma Faca Plana Retangular, em Posição Vertical, Operando a 10 cm de Profundidade, em Diferentes Solos Agrícolas. (DRANSFIELD et alii, 1964)

tical notou não haver variação com a velocidade, embora a faca de corte e xigisse mais força para romper o solo (Fig. 9).

REAVES & SCHAFER (1975), em trabalho com arados de aiveca observaram haver um aumento na força de tração devido ao acréscimo da velocidade de trabalho (Fig. 6), especialmente em solos arenosos onde a variação da força de tração foi mais acentuada do que em solo franco argiloso ou argiloso.

SINGH et alii (1979), estudaram o efeito da velocidade em arados de díscos e de aiveca, confirmando as pesquisas anteriores, que mostram ser o esforço de tração linear com a velocidade segundo uma equação do tipo $D=139,1 + 49,4S$ (Fig. 10), onde D é o esforço específico, em KN/m^2 e S é a velocidade, em m/s .

A influência da velocidade na interação entre facas rompedoras e o solo é menos clara. Os resultados apresentados na literatura parecem estar em conflito tanto na magnitude do efeito da velocidade, quanto na relação entre a força de tração e a velocidade, embora seja geralmente aceito que o esforço de uma faca aumenta com a velocidade.

A relação entre esforço e velocidade na maioria das vezes é de ordem aproximadamente quadrática, isto é, semelhantes às relações para arados de aiveca, embora não se aplique a todos os casos possíveis.

2.4.3.2. Profundidade de trabalho

As operações de semeadura das principais culturas comerciais (trigo, soja, milho e sorgo) estão num limite de profundidade entre 2 a 7 cm. Assim sendo, a resistência que o solo oferece à penetração e movimento do elemento rompedor neste limite de profundidade está influenciada principalmente pelo teor de argila, grau de compactação e teor de umidade. O efeito da variação de profundidade sobre as forças atuantes em um implemento tem sido pesquisado exaustivamente.

Trabalhando com arados de disco, em solos arenosos no estado de São Paulo, LEME (1955) obteve um aumento de 18,6 % na força de tração ao variar a profundidade de trabalho de 16,5 para 24,0 cm.

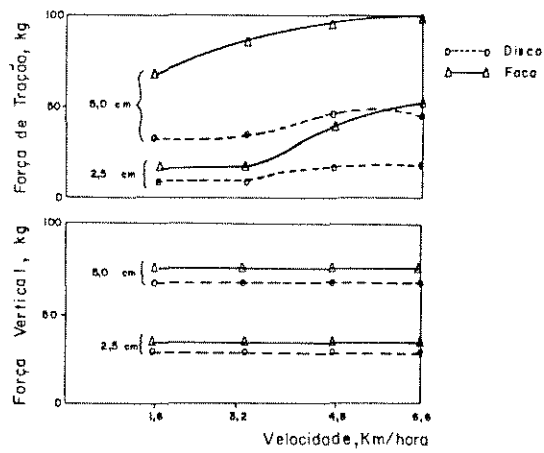


Fig. 9 - Velocidade de Deslocamento X Força de Tração e Força Vertical para Elementos Rompedores Empregados em Semeadeiras Diretas. (KORONKA, 1973)

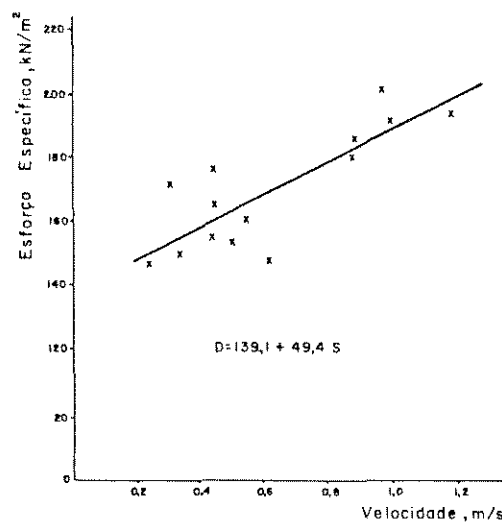


Fig 10 - Efeito da Velocidade no Esforço Específico de Tração de um Arado de Discos, a uma Umidade Média de 27,8% em Solo Argiloso. (SINGH et alii, 1979)

Em hipótese presume-se que a pressão que o solo faz contra os implementos de preparo seja proporcional à profundidade de trabalho. A dificuldade de investigar a relação entre o esforço e a profundidade é que a tensão do solo não pode ser prevista constante em todo o perfil.

Investigando esta condição PAYNE (1956) usou um solo franco arenoso e outro franco argiloso, neles variando quatro profundidades de trabalho, usando uma faca retangular plana como se fosse um implemento de preparo do solo. Após sua pesquisa concluiu que o esforço é uma função da profundidade. Esta função possui duas componentes: uma proporcional à profundidade que é a coesão; outra que varia com o quadrado da profundidade que é o peso do solo. Salienta ainda que para relações profundidade/largura abaixo de quatro esta última componente é pequena e pode ser desprezada.

DRANSFIELD et alii (1964), analisando as reações entre o solo e um implemento subsolador tipo faca, notaram que em solo muito arenoso (64 % de areia) a força variou linearmente com a profundidade; por outro lado em um solo argiloso (40 % de argila) as curvas mostraram um aumento acentuado nas maiores profundidades; as forças verticais aumentaram com a profundidade de trabalho, mas não a uma taxa uniforme (Fig. 11).

GILL & VANDEN BERG (1968), citam um trabalho realizado com arado de cinzel, de cinco hastes, em solo arenoso, onde obtiveram um acréscimo de 31,5 % na força de tração ao variarem a profundidade de 18,3 para 28,3 cm.

Também COOPER (1971), com arado de cinzel de quatro hastes determinou um acréscimo de 44,4 % na força de tração quando variou a profundidade de 30,5 para 50,8 cm.

KORONKA (1973), testando elementos rompedores de solo para semeadoras diretas observou significativa variação na força vertical exercida por facas e discos rompedores de solo a diferentes profundidades (Fig. 12).

Confirmando as observações já mencionadas, REAVES & SCHAFER (1975), afirmaram que o esforço específico requerido por arados de aiveca aumentou

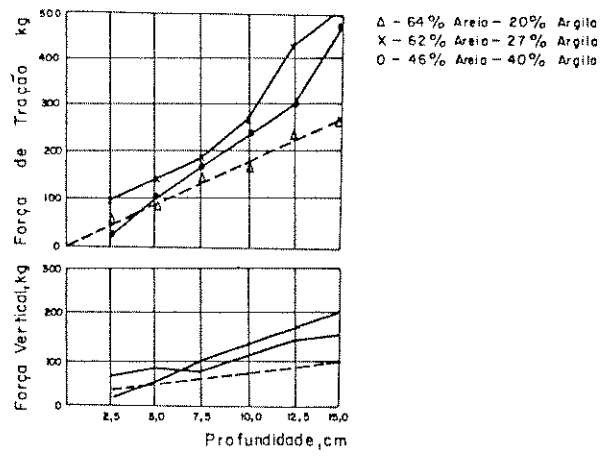


Fig. 11 - Efeito da Profundidade de Trabalho X Força de Tração e Força Vertical, em Subsolador Tipo Foca Operando a 4,8 km/h em Diferentes Solos Agrícolas. (DRANSFIELD et alii, 1964)

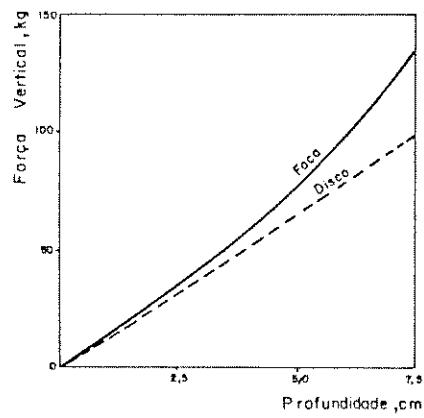


Fig. 12 - Força Vertical X Profundidade de Trabalho para Dois Elementos Rompedores de Solo Empregados em Semeadoras Diretas. (KORONKA, 1973)

com um acréscimo na profundidade, sendo que esta mudança foi menor em so los arenosos do que em solos argilosos.

HARRISON (1977), em grades de disco também observou uma variação sig nificativa na força de tração em relação à profundidade de trabalho (Fig. 13).

HARRISON (1982), pesquisando as reações do solo sobre lâminas planas inclinadas em relação à direção de trabalho, observou um aumento de aproxi madamente 33 % na força de tração, para uma variação entre 7,5 e 10,0 cm na profundidade.

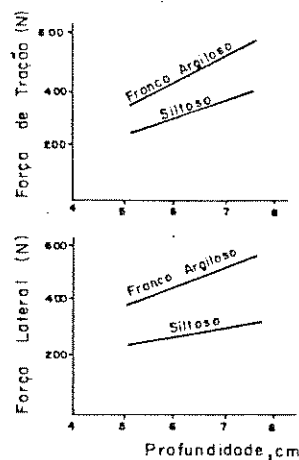


Fig.13- Resposta da Força de Tração e Reação Lateral de Grades de Disco à Profundidade de Trabalho e Tipo de Solo. (HARRISON, 1977)

2.4.4. Análise da Força Resultante

Segundo WELLS et alii. (1980), pode-se determinar a direção e a magnitude da força resultante de um implemento qualquer, desde que conheçamos a magnitude das forças verticais e horizontais atuantes sobre o mesmo, através do seguinte equacionamento:

$$\bar{N} = \bar{Q} + \bar{P} \quad (1)$$

onde: \bar{N} = força resultante

\bar{Q} = força vertical atuante sobre o rompedor.

\bar{P} = força horizontal exercida pelo rompedor para vencer a resistên
cia do solo.

Da equação (1) e pela Lei dos Cosenos, obtém-se:

$$N^2 = Q^2 + P^2 - 2 QP \cdot \cos \gamma$$

Desde que \bar{Q} e \bar{P} são vetores ortogonais, γ o ângulo entre eles é i
gual a 90° . Deste modo, $N = \sqrt{Q^2 + P^2}$ (2)

Podemos agora determinar a direção da força resultante usando a Lei
dos Senos.

$\frac{\text{sen } \gamma}{N} = \frac{\text{sen } \alpha}{Q}$, mas como $\gamma = 90^\circ$, chegamos à equação final

$$\alpha = \text{sen}^{-1} \left(\frac{Q}{N} \right) \quad (3)$$

onde: α = deslocamento angular da força resultante.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios relatados neste trabalho foram desenvolvidos em uma pista de teste instalada em área pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da UNICAMP, no distrito de Barão Geraldo, Campinas - SP, no período de agosto a outubro de 1982.

Empregando um carro dinamométrico foram medidas as forças horizontal e vertical atuantes sobre três elementos rompedores de solo utilizados em semeadeiras diretas comerciais no Brasil: disco de corte, discos duplos e faca rompedora. Variou-se a velocidade de deslocamento em três níveis (0,30 m/s, 0,56 m/s e 1,12 m/s), bem como a profundidade de trabalho em dois níveis (2,5 cm e 5,0 cm). As condições de solo foram registradas através do teor de umidade, densidade volumétrica e resistência à penetração (Cone Index), a cada teste de campo.

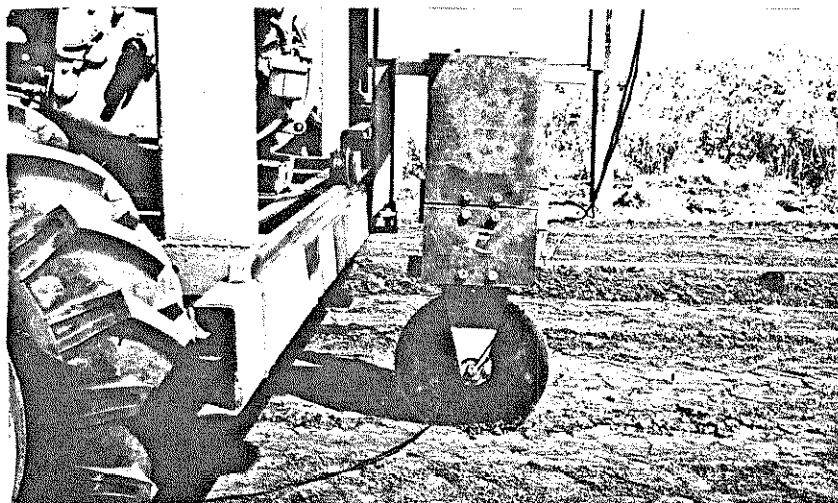
3.1. Materiais

3.1.1. Elementos Rompedores Testados

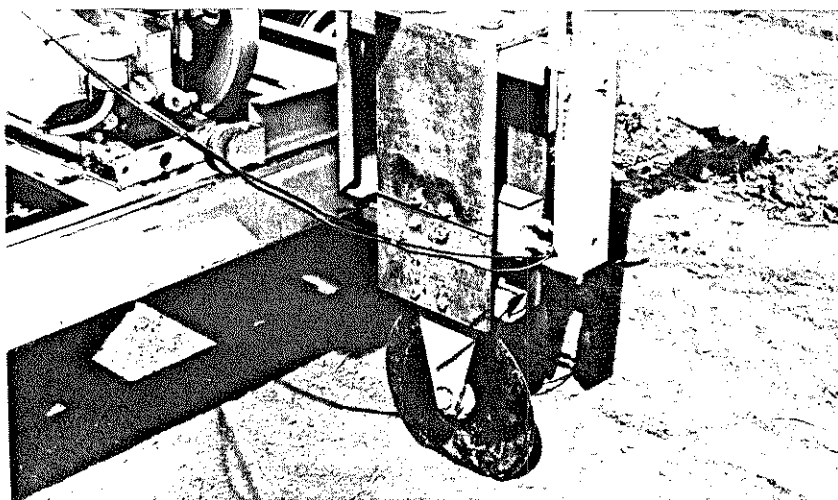
Todos os elementos rompedores testados são disponíveis comercialmente no Brasil, como a seguir:

3.1.1.1. Disco de corte

Foi utilizado um disco de corte de 355 mm de diâmetro, 3 mm de espessura e ângulo de fio $i = 12^\circ$. Na Figura 14 são apresentadas vistas lateral e superior deste equipamento.



a) Vista lateral



b) Vista superior

Figura 14. Disco de Corte

3.1.1.2. Discos duplos

Na montagem de discos duplos para esta pesquisa, foram empregados dois discos planos de 300 mm de diâmetro, 3 mm de espessura, posicionados um em relação ao outro a um ângulo $\beta = 12^\circ$. Na Figura 15 são apresentadas vistas lateral e frontal deste equipamento.

3.1.1.3. Faca rompedora

Foi utilizada uma faca rompedora especialmente projetada para sementeira direta. Na Figura 16 são apresentadas vistas laterais e frontais deste equipamento, cujas dimensões básicas são:

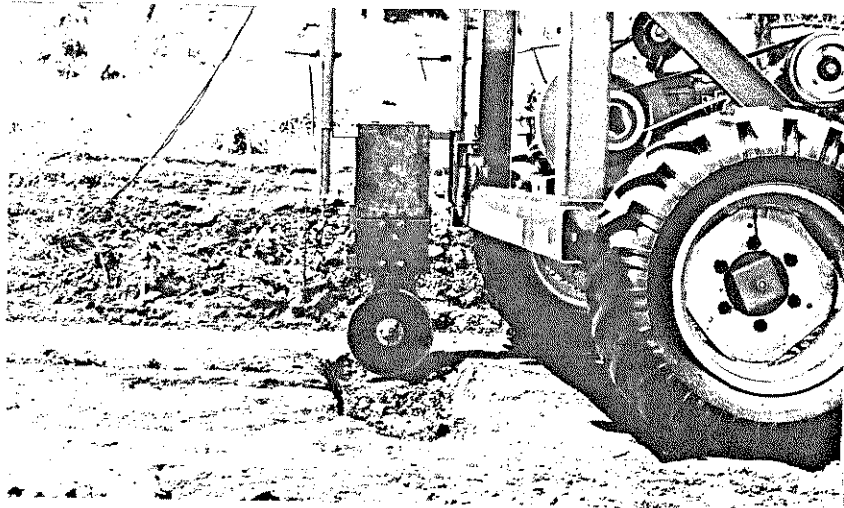
- comprimento total: 350 mm
- largura: 38 mm
- espessura: 16 mm
- ângulo da cunha (ϵ): 45°
- ângulo de ataque (α): 70°

3.1.2. Instrumentação

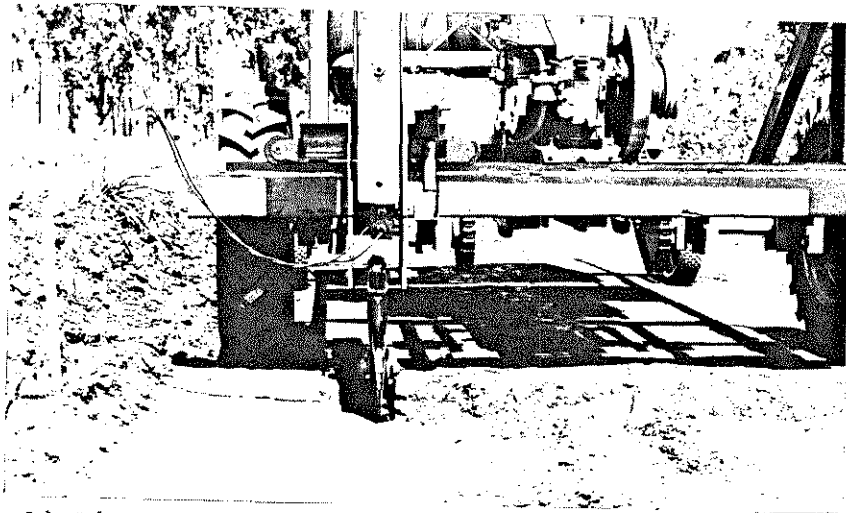
3.1.2.1. Carro dinamométrico

De modo a obter os dados de força requeridos neste estudo, foi empregado um carro dinamométrico projetado e construído por CHANG (1981). Este carro dinamométrico é uma estrutura de aço de 2,70 m de comprimento por 1,80 m de largura, montado sobre rodas, cuja tração é obtida com o auxílio de um microtrator Tobatta de 13 CV de potência, montado na parte central do carro (Fig. 17). A potência é transmitida do eixo do microtrator para o eixo da roda do carro através de um sistema de correntes. Duas embreagens do trator são empregadas para o controle de direção do carro dinamométrico.

A unidade de teste está montada na parte frontal do carro, como se fosse um cabeçote, sendo ajustável no sentido horizontal (Fig. 18), fornecendo um mínimo de 10 linhas de repetição com o carro posicionado na mesma faixa da pista de teste, tanto quanto no sentido vertical, quando o ajuste

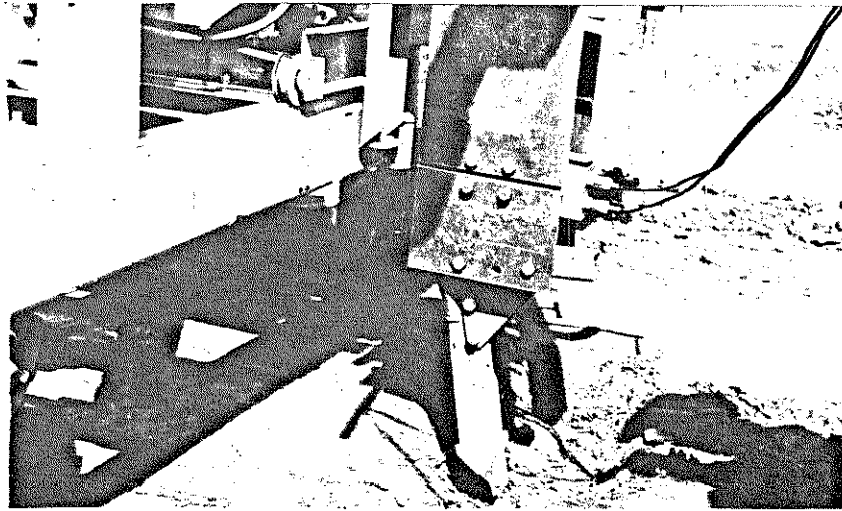


a) Vista lateral

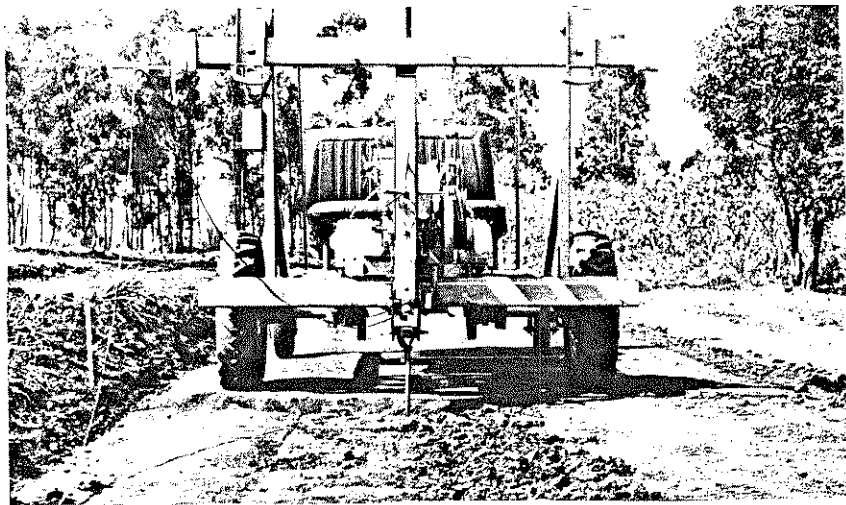


b) Vista frontal

Figura 15. Discos Duplos



a) Vista lateral



b) Vista frontal

Figura 16. Faca Rompedora de Solo

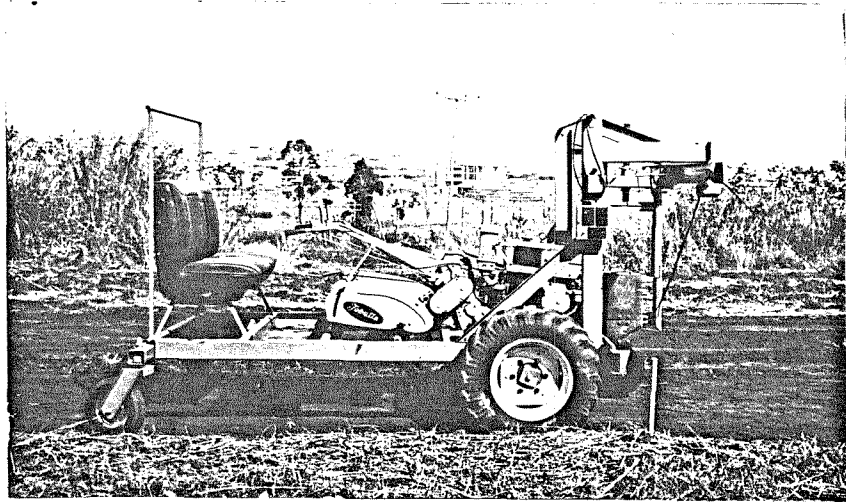


Figura 17. Carro Dinamométrico - Vista lateral

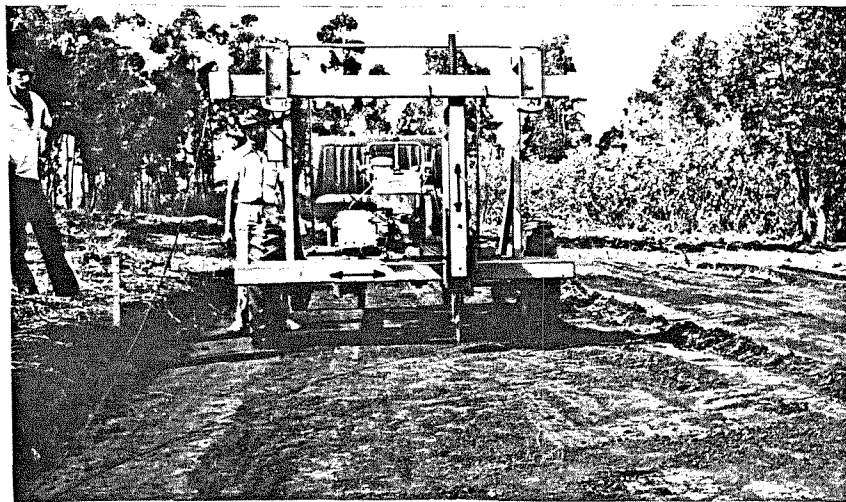


Figura 18. Carro Dinamométrico - Vista frontal

é feito por um parafuso de 2 pol. de diâmetro, montado na estrutura de tal modo a fornecer uma variação máxima de 25 cm na profundidade de trabalho do elemento em teste.

3.1.2.2. Dinamômetro de força (Transdutor)

O transdutor de forças usado para medir as forças dos implementos foi um anel octogonal instrumentado com extensômetros elétricos de resistência. Os extensômetros foram ligados em pontes de Wheatstone, uma para cada força medida, ou seja, F_H e F_V . A capacidade deste transdutor é de 100 kgf para a força horizontal e 200 kgf para a força vertical. Os sinais de cada ponte foram conduzidos através de cabos, para um pré-amplificador e finalmente para um aparelho de registro de dados. No Apêndice A, Figura 26 é apresentado um diagrama com dados complementares deste equipamento.

3.1.2.3. Pré-Amplificador

Foi empregado um pré-amplificador especialmente projetado para estudos desta natureza, de modo a fornecer sinais com sensibilidade de tensão que vão desde 0,1 a 200 mV para o fundo de escala.

3.1.2.4. Oscilógrafo registrador

Para registro dos dados foi empregado um oscilógrafo registrador modelo 7404 A da marca Hewlett Packard (Fig. 19), composto de quatro canais independentes de registro. A sensibilidade do aparelho é regulável numa faixa entre 20 mV/div à 5 V/div.

O instrumento possui um sistema de papel e canetas para registro à tinta dos sinais fornecidos. A velocidade da carta de registro é regulável entre 5 mm/min à 200 mm/s.

3.1.2.5. Anel dinamométrico

Para a calibração do dinamômetro de força foi utilizado um anel dina

mométrico de tração e compressão, modelo DCT - 1000, projetado e construído pelo Centro de Tecnologia da UNICAMP, apresentado na Figura 20.

3.1.2.6. Penetrômetro

Para medir a resistência oferecida pelo solo à penetração dos elementos rompedores, foi utilizado um penetrômetro com cone de 30° x 12,83 mm, padrão ASAE - B. As forças de penetração foram coletadas durante os ensaios de campo, nas profundidades de 2,5 cm e 5,0 cm e estão apresentadas na Tabela 3.

3.1.2.7. Planímetro

A integração dos sinais gravados na carta de registro foi feita com o auxílio de um planímetro de marca Plani Meter, modelo Zero Setting Device, com traço ótico de leitura.

3.1.2.8. Outros equipamentos

Foram ainda empregados equipamentos complementares à pesquisa, tais como:

- Tacômetro, para medir as rotações do motor do trator.
- Cronômetro, para medir a velocidade de deslocamento do conjunto em teste.
- Balança, para verificar a cada teste a calibração das forças vertical e horizontal.
- Régua, para verificar a profundidade de trabalho.

3.1.3. Propriedades Físicas e Mecânicas do Solo

Quando se está estudando uma relação solo-implemento, principalmente a nível de campo, torna-se fundamental o conhecimento preciso do tipo e características do solo que vai servir de base para os experimentos.

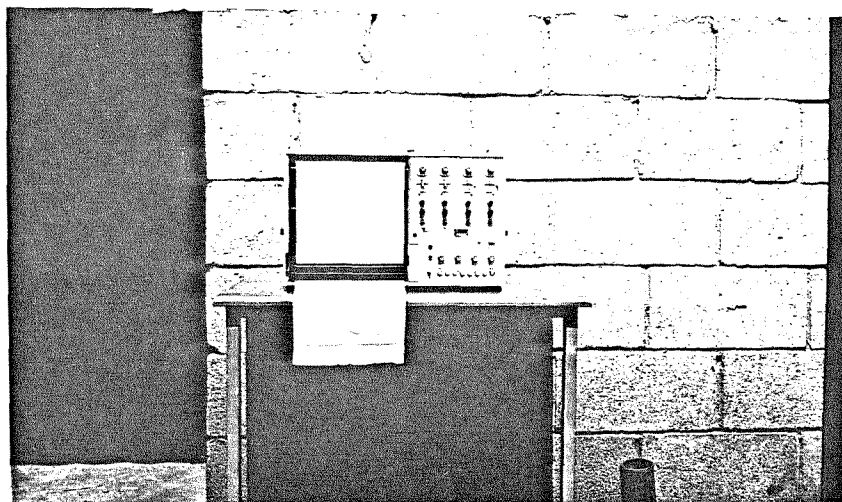


Figura 19. Oscilógrafo Registrador

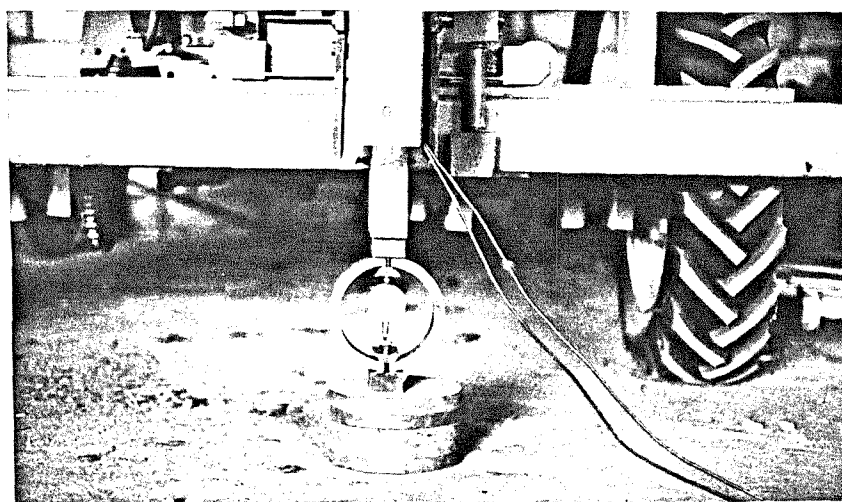


Figura 20. Anel Dinamométrico

Assim, sendo, a pista de teste para estes ensaios foi construída em um solo pertencente ao distrito de Barão Geraldo, incluso por mapeamento na quadrícula de Campinas-São Paulo e classificado por OLIVEIRA (1980), como sendo um Latossolo Roxo Eutrófico.

Suas principais características são:

- classe textural predominantemente argilo-siltosa;
- horizonte A apresentando estrutura granular estável;
- solos bastante bons para a agricultura, com ressalvas para o nível de fertilidade.

Durante a realização dos ensaios de campo foi feita uma coleta de a mostras deste solo, com vistas ao levantamento detalhado das propriedades físicas e mecânicas do mesmo. No Apêndice B são encontradas informações de talhadas sobre a metodologia e resultados deste levantamento, cujos dados médios são:

a) Análise Granulométrica

Areia grossa: 16 %

Areia fina: 35 %

Silte: 28 %

Argila: 21 %

b) Cisalhamento Direto

(γ) Densidade volumétrica: 1,628 g/cm³

(c) Coesão: 0,32 kg/cm²

(ϕ) Ângulo de atrito interno: 43^o

(U) Teor de umidade: 15,9 %

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos das coletas efetuadas a cada teste de campo. Cada par de valores corresponde a um teste de campo.

Tabela 3. Dados coletados do teor de umidade, densidade volumétrica e resistência à penetração, durante a realização dos testes de campo

| Repetições | Umidade (%) | Densidade (g/cm ³) | C.I. (2,5 cm) (kg/cm ²) | C.I. (5.0 cm) (kg/cm ²) |
|------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 14,6 | 1,557 | 3,8 | 7,3 |
| 2 | 17,4 | 1,736 | 5,0 | 7,8 |
| 3 | 15,5 | 1,710 | 4,3 | 8,2 |
| 4 | 16,2 | 1,623 | 4,2 | 8,8 |
| 5 | 13,7 | 1,691 | 4,7 | 7,9 |
| 6 | 14,0 | 1,662 | 4,7 | 6,9 |
| 7 | 16,1 | 1,912 | 5,3 | 8,7 |
| 8 | 15,2 | 1,475 | 3,9 | 8,3 |
| 9 | 17,5 | 1,594 | 4,4 | 7,9 |
| 10 | 16,1 | 1,562 | 4,7 | 8,0 |
| 11 | 17,6 | 1,483 | 4,6 | 8,6 |
| 12 | 17,1 | 1,529 | 4,5 | 8,7 |
| \bar{X} | 15,9 | 1,628 | 4,5 | 8,1 |
| C.V. | 11,3 % | 13,1 % | 10,5 % | 14,0 % |

3.2. Métodos

3.2.1. Teste de Campo

Duas pistas de testes foram construídas para a realização deste trabalho. Cada pista de aproximadamente 30 m de comprimento foi dividida em parcelas de 8 m de comprimento por 2 m de largura. Nesta parcela o carro dinamométrico foi posicionado e deslocado linearmente variando-se apenas a posição dos comandos horizontal e vertical que contêm a unidade em teste e o transdutor, de modo a obter as repetições necessárias ao experimento.

Foram testados três diferentes rompedores de solo (disco de corte, discos duplos e faca rompedora), variando-se três velocidades de deslocamento (1,1 km/hora, 2,0 km/hora e 4,0 km/hora) e duas profundidades de tra

balho (2,5 cm e 5,0 cm).

Tanto as velocidades, quanto as profundidades empregadas neste estudo foram em decorrência da capacidade operacional do carro dinamométrico. Em velocidades superiores a 4,0 km/hora houve muita dificuldade em controlar a linearidade de deslocamento, devido ao fato do comando direcional ser efetuado por um par de embreagens ao invés de volante. Do mesmo modo profundidades superiores a 5,0 cm não foram possíveis, pois a força de tração foi superior à desenvolvida pelas rodas motoras, ocorrendo patinamento, bem como alterações na linearidade de deslocamento.

3.2.1.1. Controle da velocidade de deslocamento

Foram selecionadas três marchas do trator Tobatta que movimentam o carro dinamométrico, fixando-se um limite de rotação do motor entre 1500 e 1700 rpm, para obtermos as velocidades aproximadamente constantes, mesmo variando a profundidade de trabalho.

Como a carta de registro do oscilógrafo registrador possui velocidades de deslocamento conhecidas, foi possível determinar com precisão o tempo consumido no percurso de 8 m de cada parcela. Os dados cronometrados e os da carta foram significativamente semelhantes, o que nos leva a afirmar serem reais e constantes as velocidades de deslocamento durante a realização dos ensaios.

3.2.1.2. Controle da profundidade de trabalho

Este foi o item mais difícil de controlar pois mesmo a pista estando nivelada com extremo cuidado, ainda assim pequenas variações ocorreram na profundidade. Na cabeceira de cada parcela foram abertas pequenas trincheiras, de largura inferior ao do rodado do carro dinamométrico. Estando a unidade de teste posicionada sobre esta trincheira, os ajustes eram efetuados, através de um parafuso de 2 pol., montado na estrutura de tal modo a permitir variações de até 25 cm de profundidade.

Com uma régua foi verificada a profundidade real de trabalho após cada repetição do teste. Para a profundidade $P_1 = 2,5$ cm houve uma variação entre 2,2 e 2,7 cm, facilmente perceptível ao analisar os resultados da força de tração; de igual forma para a profundidade $P_2 = 5,0$ cm houve uma variação entre 4,8 e 5,3 cm.

3.2.1.3. Controle das condições do solo

A cada teste de campo foram coletadas duas amostras de solo da pista para posterior análise do teor de umidade e densidade volumétrica; a resistência à penetração (Cone Index) foi medida em dez pontos ao acaso na pista de teste.

3.2.2. Calibração do Transdutor

O transdutor foi calibrado estaticamente, tanto para a força horizontal quanto para a força vertical, empregando-se o anel dinamométrico de tração e compressão.

3.2.2.1. Calibração da força horizontal

Empregando o anel dinamométrico entre o transdutor e uma armação adaptada para exercer força horizontal, fez-se a calibração horizontal até um limite de 100 kgf. Os sinais obtidos foram pré-amplificados e registrados pelo oscilógrafo com três diferentes sensibilidades: 200 mV/div, 500 mV/div e 1 V/div. Na Figura 21 é apresentada uma curva de calibração com força aplicada x nº de divisões na carta de registro para uma sensibilidade de 500 mV/div.

3.2.2.2. Calibração da força vertical

Empregando-se novamente o anel dinamométrico, fez-se a calibração da força vertical até um limite de 100 kgf. Foram utilizadas duas sensibilidades: 200 mV/div e 500 mV/div. Na Figura 22 é apresentada uma curva

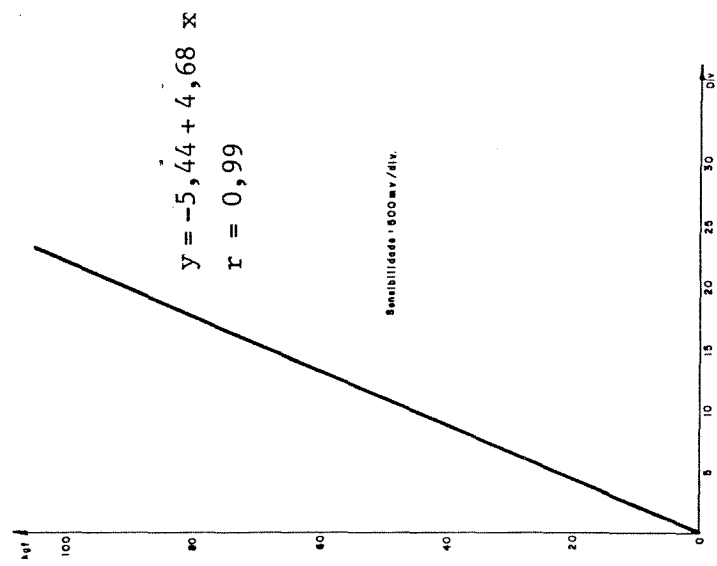


Fig. 21 - Calibração de Força Horizontal.

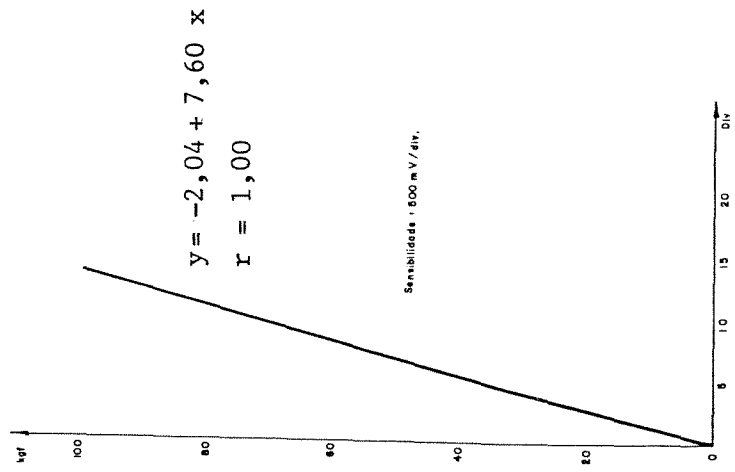


Fig. 22 - Calibração de Força Vertical.

de calibração com força aplicada x nº de divisões na carta de registro, para uma sensibilidade de 500 mV/div.

3.2.3. Propriedades Físicas e Mecânicas do Solo

Foram realizadas, com intuito de obter os principais parâmetros do solo, as seguintes análises:

- Análise granulométrica conjunta
- Teor de umidade
- Cisalhamento direto
- Densidade volumétrica

O ensaio de cisalhamento direto empregado para a obtenção destes resultados está descrito resumidamente no Apêndice B. A Figura 27 apresenta o equipamento utilizado neste ensaio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados dos Ensaios de Campo

Os testes foram realizados em três experimentos distintos. Cada qual composto da análise de um elemento rompedor, a duas profundidades de trabalho, com três variações na velocidade de deslocamento.

Experimento 1 - Disco de Corte

Foi empregado um disco de corte previamente descrito, a 2,5 e 5,0 cm de profundidade de trabalho, variando-se a velocidade de deslocamento nos níveis 0,30 m/s, 0,56 m/s e 1,12 m/s.

As condições de solo por ocasião dos testes apresentavam-se conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4. Condições do solo durante a realização dos testes com disco de corte

| Tipo de Rompedor | Profundidade (cm) | Umidade (%) | Densidade (g/cm ³) | Cone Index (kg/cm ²) |
|------------------|-------------------|-------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Disco de corte | 2,5 | 16,0 | 1,646 | 4,4 |
| | 5,0 | 15,8 | 1,666 | 8,5 |

Os resultados obtidos, das forças horizontal, vertical e resultante atuantes no disco de corte estão apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5. Dados coletados, em kg, das forças horizontal e vertical e calculados para a força resultante para um disco de corte trabalhando a 2,5 cm de profundidade

| Rompedor | Velocidade | Força Horizontal | | | | | | | | |
|----------------|----------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | \bar{X} | S | C.V. |
| Disco de corte | V ₁ | 10,49 | 9,52 | 8,78 | 14,14 | 15,60 | 13,65 | 12,03 | 2,79 | 23,23 |
| | V ₂ | 12,19 | 12,19 | 11,25 | 10,24 | 10,49 | 12,19 | 11,42 | 0,90 | 7,89 |
| | V ₃ | 12,19 | 12,19 | 14,62 | 12,19 | 15,60 | 14,62 | 13,57 | 1,55 | 11,44 |
| | | Força Vertical | | | | | | | | |
| Disco de corte | V ₁ | 43,03 | 27,53 | 45,72 | 41,85 | 28,77 | 38,75 | 37,61 | 7,67 | 20,40 |
| | V ₂ | 32,92 | 30,22 | 27,53 | 26,72 | 29,08 | 33,32 | 29,96 | 2,73 | 9,11 |
| | V ₃ | 36,02 | 41,08 | 43,77 | 42,62 | 31,00 | 32,18 | 37,78 | 5,49 | 14,53 |
| | | Força Resultante | | | | | | | | |
| Disco de corte | V ₁ | 44,29 | 29,13 | 46,56 | 44,17 | 32,29 | 41,08 | 39,59 | 7,16 | 18,10 |
| | V ₂ | 35,10 | 32,59 | 29,74 | 28,61 | 30,91 | 35,48 | 32,07 | 2,82 | 8,80 |
| | V ₃ | 38,03 | 42,85 | 46,15 | 44,33 | 34,70 | 35,34 | 40,23 | 4,86 | 12,08 |

Tabela 6. Dados coletados, em kg, das forças horizontal e vertical e calculados para a força resultante para um disco de corte trabalhando a 5,0 cm de profundidade

| Rompedor | Velocidade | Força Horizontal | | | | | | | | |
|----------------|----------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | \bar{X} | S | C.V. |
| Disco de corte | V ₁ | 21,45 | 23,54 | 28,74 | 24,38 | 23,44 | 22,44 | 24,00 | 2,53 | 10,55 |
| | V ₂ | 24,90 | 30,26 | 22,93 | 24,88 | 23,50 | 20,83 | 24,55 | 3,17 | 12,93 |
| | V ₃ | 20,88 | 21,51 | 32,66 | 34,12 | 32,68 | 24,58 | 27,74 | 6,08 | 21,94 |
| | | Força Vertical | | | | | | | | |
| Disco de corte | V ₁ | 70,96 | 82,12 | 61,76 | 68,47 | 78,18 | 53,51 | 69,17 | 10,51 | 15,20 |
| | V ₂ | 49,71 | 60,81 | 49,28 | 72,34 | 63,36 | 68,47 | 60,66 | 9,53 | 15,71 |
| | V ₃ | 63,51 | 63,36 | 68,47 | 67,74 | 51,10 | 77,45 | 65,27 | 8,63 | 13,22 |
| | | Força Resultante | | | | | | | | |
| Disco de corte | V ₁ | 74,13 | 85,43 | 68,12 | 72,68 | 81,62 | 58,02 | 73,33 | 9,77 | 13,33 |
| | V ₂ | 55,60 | 67,92 | 54,35 | 76,50 | 67,58 | 71,57 | 65,59 | 8,84 | 13,47 |
| | V ₃ | 66,85 | 66,91 | 75,86 | 75,85 | 60,66 | 81,20 | 71,22 | 7,64 | 10,72 |

Experimento 2 - Discos Duplos

Foi empregado um conjunto de discos duplos, a 2,5 e 5,0 cm de profundidade de trabalho, variando-se a velocidade de deslocamento nos níveis 0,30 m/s, 0,56 m/s e 1,12 m/s.

As condições de solo por ocasião dos testes apresentavam-se conforme descrito na Tabela 7.

Tabela 7. Condições do solo durante a realização dos testes com discos duplos

| Tipo de Rompedor | Profundidade (cm) | Umidade (%) | Densidade (g/cm ³) | Cone Index (kg/cm ²) |
|------------------|-------------------|-------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Discos duplos | 2,5 | 13,8 | 1,676 | 4,7 |
| | 5,0 | 15,6 | 1,693 | 8,5 |

Os resultados obtidos, das forças horizontal, vertical e resultante atuantes nos discos duplos, estão apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8. Dados coletados, em kg, das forças horizontal e vertical e calculados para a força resultante, para discos duplos trabalhado a 2,5 cm de profundidade

| Rompedor | Velocidade | Força Horizontal | | | | | | | | |
|---------------|----------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | \bar{X} | S | C.V. |
| Discos duplos | V ₁ | 14,02 | 15,42 | 11,13 | 9,20 | 13,53 | 16,24 | 13,26 | 2,65 | 20,02 |
| | V ₂ | 16,50 | 10,78 | 12,40 | 15,97 | 13,46 | 11,97 | 13,51 | 2,28 | 16,89 |
| | V ₃ | 11,60 | 18,29 | 12,19 | 13,40 | 11,50 | 14,08 | 13,51 | 2,55 | 18,90 |
| ----- | | | | | | | | | | |
| | | Força Vertical | | | | | | | | |
| Discos duplos | V ₁ | 31,00 | 33,70 | 31,00 | 31,87 | 43,06 | 43,15 | 35,63 | 5,87 | 16,48 |
| | V ₂ | 40,48 | 40,05 | 37,78 | 30,57 | 40,76 | 34,14 | 37,30 | 4,13 | 11,06 |
| | V ₃ | 48,42 | 40,89 | 41,88 | 25,23 | 21,73 | 43,93 | 37,01 | 10,85 | 29,33 |
| ----- | | | | | | | | | | |
| | | Força Resultante | | | | | | | | |
| Discos duplos | V ₁ | 34,02 | 37,06 | 32,95 | 33,17 | 45,14 | 46,10 | 38,07 | 6,04 | 15,85 |
| | V ₂ | 43,71 | 41,48 | 39,95 | 34,49 | 42,92 | 36,18 | 39,79 | 3,72 | 9,35 |
| | V ₃ | 49,79 | 44,79 | 43,62 | 28,57 | 24,58 | 46,13 | 39,58 | 10,36 | 26,18 |

Tabela 9. Dados coletados, em kg, das forças horizontal e vertical e calculados para a força resultante para discos duplos trabalhando a 5,0 cm de profundidade

| Rompedor | Velocidade | Força Horizontal | | | | | | | | |
|---------------|----------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | \bar{X} | S | C.V. |
| Discos duplos | V ₁ | 34,05 | 44,86 | 47,08 | 35,32 | 38,64 | 36,59 | 39,42 | 5,34 | 13,54 |
| | V ₂ | 42,59 | 39,72 | 35,00 | 36,86 | 38,41 | 31,42 | 37,33 | 3,88 | 10,38 |
| | V ₃ | 36,09 | 34,05 | 40,86 | 38,77 | 35,46 | 38,68 | 37,32 | 2,54 | 6,79 |
| | | Força Vertical | | | | | | | | |
| Discos duplos | V ₁ | 54,75 | 65,92 | 60,81 | 54,75 | 73,80 | 73,88 | 63,98 | 8,70 | 13,60 |
| | V ₂ | 56,28 | 56,28 | 59,50 | 66,94 | 52,12 | 56,65 | 57,96 | 4,99 | 8,61 |
| | V ₃ | 59,42 | 48,69 | 60,61 | 52,85 | 67,01 | 62,20 | 58,46 | 6,63 | 11,33 |
| | | Força Resultante | | | | | | | | |
| Discos duplos | V ₁ | 64,47 | 79,74 | 76,90 | 65,15 | 83,30 | 82,44 | 75,33 | 8,46 | 11,22 |
| | V ₂ | 70,58 | 68,88 | 69,03 | 76,42 | 64,74 | 64,78 | 69,07 | 4,32 | 6,26 |
| | V ₃ | 69,52 | 59,41 | 73,10 | 65,55 | 75,81 | 73,25 | 69,44 | 6,07 | 8,74 |

Experimento 3 - Faca Rompedora

Foi empregada uma faca rompedora, a 2,5 e 5,0 cm de profundidade de trabalho, variando-se a velocidade de deslocamento nos níveis 0,30 m/s, 0,56 m/s e 1,12 m/s.

As condições do solo por ocasião dos testes apresentavam-se conforme descrito na Tabela 10.

Tabela 10. Condições do solo durante a realização dos testes com faca rompedora

| Tipo de Rompedor | Profundidade (cm) | Umidade (%) | Densidade (g/cm ³) | Cone Index (kg/cm ²) |
|------------------|-------------------|-------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Faca rompedora | 2,5 | 16,8 | 1,578 | 4,6 |
| | 5,0 | 17,4 | 1,506 | 8,6 |

Os resultados obtidos, das forças horizontal, vertical e resultante atuantes na faca rompedora, estão apresentados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11. Dados coletados, em kg, das forças horizontal e vertical e calculados para a força resultante para uma faca rompedora trabalhando a 2,5 cm de profundidade

| Rompedor | Velocidade | Força Horizontal | | | | | | | | |
|----------------|----------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | \bar{X} | S | C.V. |
| Faca rompedora | V ₁ | 39,94 | 25,49 | 34,83 | 40,44 | 34,83 | 33,89 | 34,90 | 5,40 | 15,46 |
| | V ₂ | 31,94 | 39,49 | 38,43 | 29,15 | 40,76 | 27,96 | 34,62 | 5,61 | 16,20 |
| | V ₃ | 43,33 | 25,51 | 29,91 | 20,71 | 42,26 | 30,22 | 31,99 | 9,06 | 28,33 |
| ----- | | | | | | | | | | |
| | | Força Vertical | | | | | | | | |
| Faca rompedora | V ₁ | 5,77 | 7,01 | 4,80 | 5,92 | 6,14 | 6,60 | 6,04 | 0,76 | 12,59 |
| | V ₂ | 6,26 | 3,88 | 3,88 | 2,98 | 3,04 | 4,44 | 4,08 | 1,20 | 29,52 |
| | V ₃ | 5,67 | 6,48 | 4,62 | 4,40 | 5,86 | 5,02 | 5,34 | 0,80 | 14,94 |
| ----- | | | | | | | | | | |
| | | Força Resultante | | | | | | | | |
| Faca rompedora | V ₁ | 40,35 | 26,44 | 35,16 | 40,87 | 35,37 | 34,53 | 35,45 | 5,20 | 14,68 |
| | V ₂ | 32,55 | 39,68 | 38,62 | 29,30 | 40,87 | 28,31 | 34,89 | 5,52 | 15,84 |
| | V ₃ | 43,70 | 26,32 | 30,26 | 21,17 | 42,66 | 30,63 | 32,46 | 8,99 | 27,69 |

Tabela 12. Dados coletados, em kg, das forças horizontal e vertical e calculados para a força resultante para uma faca rompedora trabalhando a 5,0 cm de profundidade

| Rompedor | Velocidade | Força Horizontal | | | | | | | | |
|----------------|----------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | \bar{X} | S | C.V. |
| Faca rompedora | V ₁ | 36,64 | 37,82 | 35,14 | 38,68 | 46,67 | 43,13 | 39,68 | 4,36 | 10,99 |
| | V ₂ | 34,64 | 37,82 | 52,85 | 32,05 | 34,41 | 44,45 | 39,37 | 7,88 | 20,02 |
| | V ₃ | 32,42 | 44,49 | 32,14 | 32,42 | 45,40 | 43,77 | 38,44 | 6,72 | 17,47 |
| ----- | | | | | | | | | | |
| | | Força Vertical | | | | | | | | |
| Faca rompedora | V ₁ | 6,88 | 8,12 | 8,07 | 7,58 | 5,62 | 7,14 | 7,24 | 0,93 | 12,88 |
| | V ₂ | 5,92 | 5,87 | 7,78 | 8,15 | 9,03 | 6,25 | 7,17 | 1,33 | 18,61 |
| | V ₃ | 6,15 | 7,18 | 7,67 | 8,31 | 6,01 | 7,47 | 7,13 | 0,90 | 12,57 |
| ----- | | | | | | | | | | |
| | | Força Resultante | | | | | | | | |
| Faca rompedora | V ₁ | 37,28 | 38,68 | 36,05 | 39,42 | 47,01 | 43,72 | 40,36 | 4,18 | 10,35 |
| | V ₂ | 35,14 | 38,27 | 53,42 | 33,07 | 35,58 | 44,89 | 40,06 | 7,72 | 19,28 |
| | V ₃ | 33,00 | 45,06 | 33,04 | 33,47 | 45,81 | 44,40 | 39,13 | 6,55 | 16,73 |

Na Tabela 13 são apresentados dados médios da análise de forças para diferentes rompedores, velocidades de deslocamento e profundidade de trabalho.

Nas Tabelas 14, 15 e 16 são apresentadas as interações rompedor x profundidade para as forças horizontal, vertical e resultante, respectivamente.

Tabela 13. Análise de forças de elementos rompedores em semeadeiras diretas comerciais, com diferentes velocidades de deslocamento e profundidades de trabalho

| Tipo de Rompedor | Velocidade | Profundidade (cm) | Força Total Média (kg) | | Força Unitária (kg/cm) | | Resultante | |
|------------------|------------|-------------------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------|---------------------------|
| | | | Horizontal | Vertical | Horizontal | Vertical | Resistência (kg) | Ângulo α^* (graus) |
| Disco de corte | 0,30 | 2,5 | 12,03 | 37,61 | 4,82 | 15,04 | 39,59 | 72 |
| | | 5,0 | 24,00 | 69,17 | 4,80 | 13,83 | 73,33 | 71 |
| | 0,56 | 2,5 | 11,42 | 29,96 | 4,57 | 11,98 | 32,07 | 69 |
| | | 5,0 | 24,55 | 60,66 | 4,91 | 12,13 | 65,59 | 68 |
| | 1,12 | 2,5 | 13,57 | 37,78 | 5,43 | 15,11 | 40,23 | 70 |
| | | 5,0 | 27,74 | 65,27 | 5,55 | 13,05 | 71,22 | 66 |
| Discos duplos | 0,30 | 2,5 | 13,26 | 35,63 | 5,30 | 14,25 | 38,07 | 69 |
| | | 5,0 | 39,42 | 63,98 | 7,88 | 12,80 | 75,33 | 58 |
| | 0,56 | 2,5 | 13,51 | 37,30 | 5,40 | 14,92 | 39,79 | 70 |
| | | 5,0 | 37,33 | 57,96 | 7,47 | 11,59 | 69,07 | 57 |
| | 1,12 | 2,5 | 13,51 | 37,01 | 5,40 | 14,80 | 39,58 | 69 |
| | | 5,0 | 37,32 | 58,46 | 7,46 | 11,69 | 69,44 | 57 |
| Faca rompedora | 0,30 | 2,5 | 34,90 | 6,04 | 13,96 | 2,42 | 35,45 | 10 |
| | | 5,0 | 39,68 | 7,24 | 7,94 | 1,45 | 40,36 | 10 |
| | 0,56 | 2,5 | 34,62 | 4,08 | 13,85 | 1,63 | 34,89 | 7 |
| | | 5,0 | 39,37 | 7,17 | 7,87 | 1,43 | 40,06 | 10 |
| | 1,12 | 2,5 | 31,99 | 5,34 | 12,80 | 2,14 | 32,46 | 9 |
| | | 5,0 | 38,44 | 7,13 | 7,69 | 1,43 | 39,13 | 10 |

* α = deslocamento angular da força resultante.

Tabela 14. Interação rompedor x profundidade - força horizontal, em kg (desprezando-se o efeito da velocidade)

| | Profundidade 1 | | Profundidade 2 | |
|----------------|----------------|-------|----------------|-------|
| | 2,5 cm | C.V. | 5,0 cm | C.V. |
| Disco de corte | 12,34 | 16,42 | 25,42 | 16,97 |
| Discos duplos | 13,43 | 17,53 | 38,02 | 10,43 |
| Faca rompedora | 33,84 | 19,56 | 39,16 | 15,62 |

Tabela 15. Interação rompedor x profundidade - força vertical, em kg (desprezando-se o efeito da velocidade)

| | Profundidade 1 | | Profundidade 2 | |
|----------------|----------------|-------|----------------|-------|
| | 2,5 cm | C.V. | 5,0 cm | C.V. |
| Disco de corte | 35,09 | 18,55 | 65,03 | 14,87 |
| Discos duplos | 36,66 | 19,27 | 60,14 | 11,80 |
| Faca rompedora | 5,15 | 23,61 | 7,18 | 14,05 |

Tabela 16. Interação rompedor x profundidade - força resultante, em kg (desprezando-se o efeito da velocidade)

| | Profundidade 1 | | Profundidade 2 | |
|----------------|----------------|-------|----------------|-------|
| | 2,5 cm | C.V. | 5,0 cm | C.V. |
| Disco de corte | 37,30 | 16,72 | 70,05 | 12,73 |
| Discos duplos | 39,15 | 17,51 | 71,28 | 9,52 |
| Faca rompedora | 34,27 | 19,02 | 39,85 | 14,96 |

Na Tabela 17 são apresentados os efeitos da velocidade de deslocamento sobre as forças atuantes nos diferentes elementos rompedores. Na Figura 23 estes efeitos são apresentados graficamente para cada profundidade estudada.

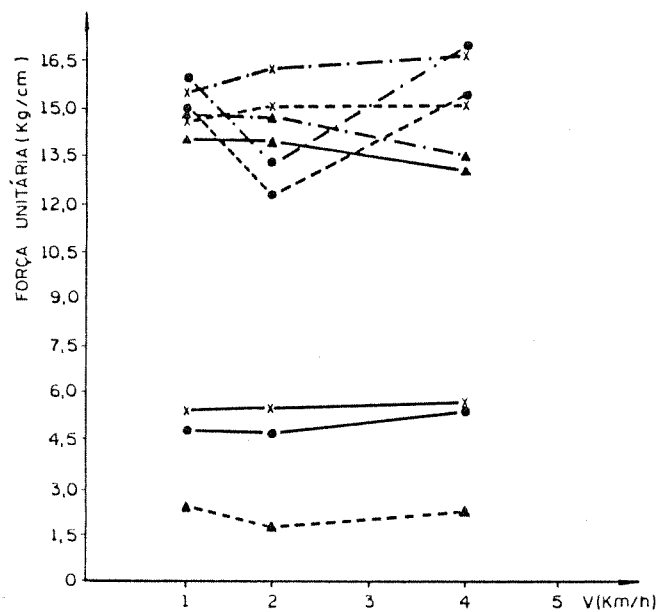
Na Figura 24 é apresentado o efeito do tipo de rompedor x profundidade de trabalho para as diferentes forças atuantes, bem como em relação à força total (kg) à força unitária (kg/cm), desprezando-se os efeitos da velocidade de deslocamento.

Tabela 17. Efeito da velocidade de deslocamento sobre as forças atuantes em três elementos rompedores, a diferentes profundidades de trabalho

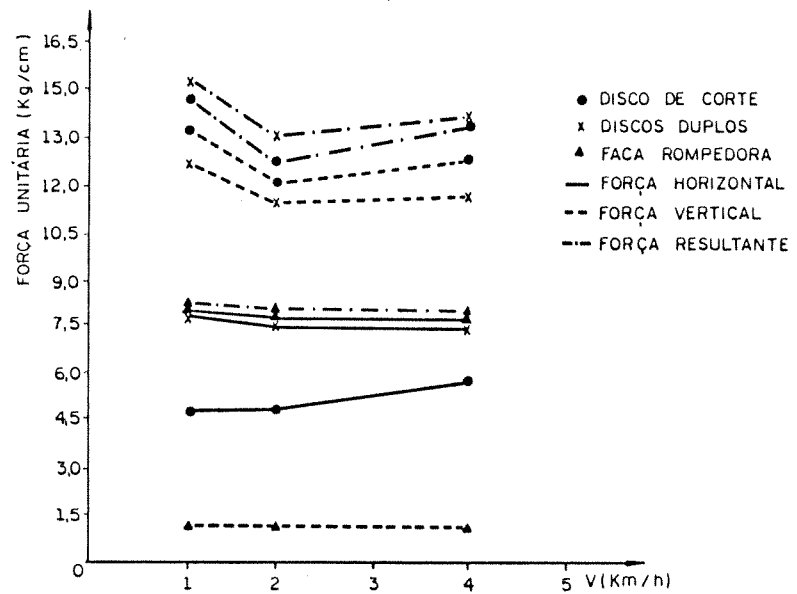
| | | Horizontal | | | \bar{X} | S | C.V. |
|----------------|-----|----------------|----------------|----------------|-----------|------|-------|
| | | V ₁ | V ₂ | V ₃ | | | |
| Disco de corte | 2,5 | 12,03 | 11,42 | 13,57 | 12,34 | 2,03 | 16,42 |
| | 5,0 | 24,00 | 24,55 | 27,74 | 25,43 | 4,32 | 16,97 |
| Discos duplos | 2,5 | 13,26 | 13,51 | 13,51 | 13,43 | 2,35 | 17,53 |
| | 5,0 | 39,42 | 37,33 | 37,32 | 38,02 | 3,97 | 10,43 |
| Faca rompedora | 2,5 | 34,90 | 34,62 | 31,99 | 33,84 | 6,62 | 19,56 |
| | 5,0 | 39,68 | 39,37 | 38,44 | 39,16 | 6,12 | 15,62 |
| | | Vertical | | | \bar{X} | S | C.V. |
| | | V ₁ | V ₂ | V ₃ | | | |
| Disco de corte | 2,5 | 37,61 | 29,96 | 37,78 | 35,12 | 6,51 | 18,55 |
| | 5,0 | 69,17 | 60,66 | 65,27 | 65,02 | 9,67 | 14,87 |
| Discos duplos | 2,5 | 35,63 | 37,30 | 37,01 | 36,62 | 7,06 | 19,27 |
| | 5,0 | 63,98 | 57,96 | 58,46 | 60,14 | 7,10 | 11,80 |
| Faca rompedora | 2,5 | 6,04 | 4,08 | 5,34 | 5,15 | 1,22 | 23,61 |
| | 5,0 | 7,24 | 7,17 | 7,13 | 7,18 | 1,01 | 14,05 |
| | | Resultante | | | \bar{X} | S | C.V. |
| | | V ₁ | V ₂ | V ₃ | | | |
| Disco de corte | 2,5 | 39,59 | 32,07 | 40,23 | 37,30 | 6,24 | 16,72 |
| | 5,0 | 73,33 | 65,59 | 71,22 | 70,05 | 8,92 | 12,73 |
| Discos duplos | 2,5 | 38,07 | 39,79 | 39,58 | 39,14 | 6,85 | 17,51 |
| | 5,0 | 75,33 | 69,07 | 69,44 | 71,28 | 6,79 | 9,52 |
| Faca rompedora | 2,5 | 35,45 | 34,89 | 32,46 | 34,27 | 6,52 | 19,02 |
| | 5,0 | 40,36 | 40,06 | 39,13 | 39,85 | 5,96 | 14,96 |

4.2. Discussão

A discussão dos resultados será dirigida de modo a distinguir os diferentes efeitos causados pelas variações na profundidade de trabalho e velocidade de deslocamento nos três elementos rompedores de solo.



a) 2,5 cm de profundidade



b) 5,0 cm de profundidade

Fig 23. Efeito do tipo de rompedor x velocidade de deslocamento.

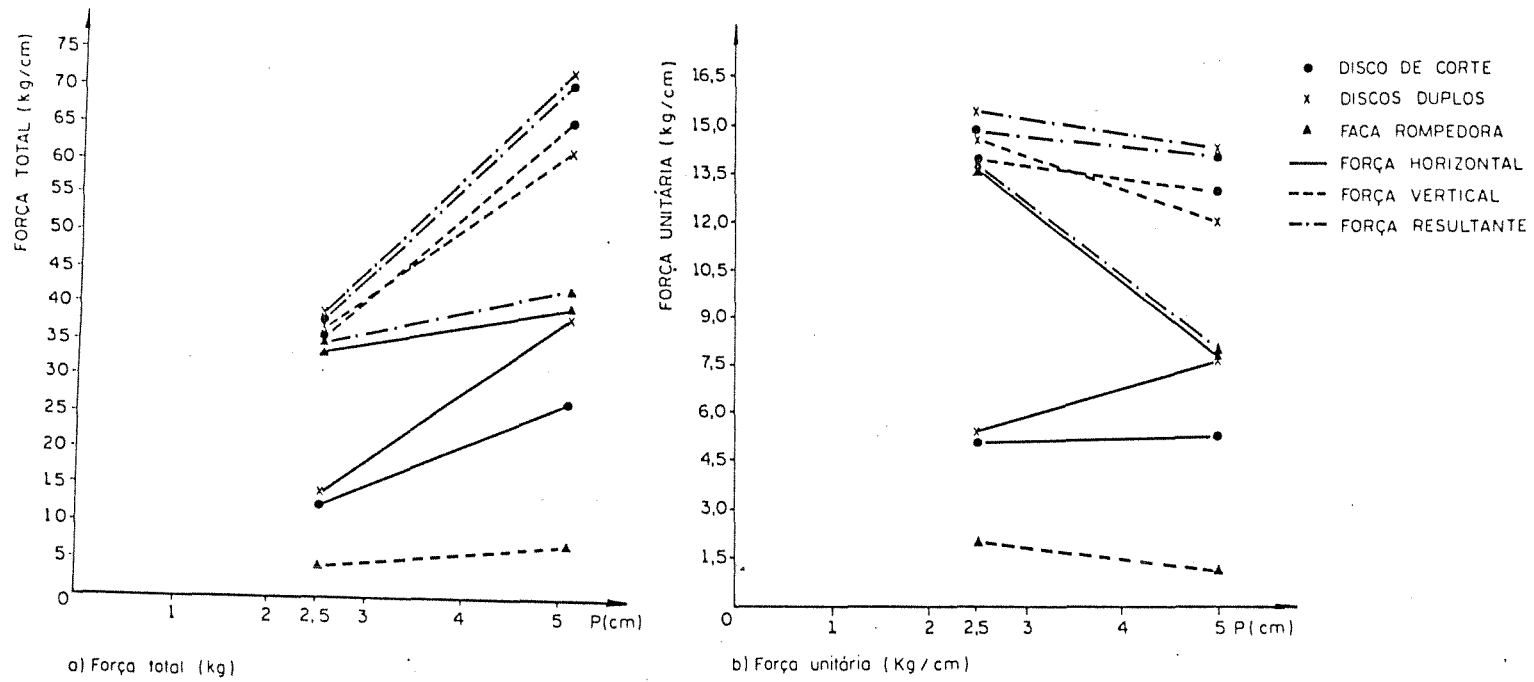


Fig. 24 Efeito do tipo de rompedor x profundidade de trabalho (desprezando-se o efeito da velocidade).

4.2.1. Disco de Corte

Este tipo de rompedor necessita de uma pequena força horizontal para vencer a resistência do solo, devido à pequena espessura do disco, da afiação do mesmo e por sua ação dinâmica sobre o solo. No entanto, para obter penetração foi necessário empregar uma força vertical elevada devido à resistência oferecida pelo solo à penetração. Deste modo, a força resultante é grande, em consequência desta força vertical que atua sobre o disco de corte. Na Figura 25a observa-se a formação de um ângulo $\alpha = 69^\circ$ entre a força resultante e a direção de trabalho (Equação 3).

Por ocasião dos testes de campo com o elemento rompedor disco de corte, a umidade do solo encontrava-se uniforme no limite compreendido entre 0-5,0 cm, de modo que a densidade neste mesmo intervalo, também apresentou-se uniforme, conforme pode ser observado na Tabela 4.

4.2.1.1. Efeito da profundidade de trabalho

De acordo com as referências bibliográficas existentes, houve uma variação considerada significativa entre a ação do disco de corte a 2,5 cm e 5,0 cm de profundidade. Nota-se nas Tabelas 5 e 6 uma tendência mais ou menos constante da força horizontal em elevar acima de 100 % o valor de seu esforço para romper o solo quando trabalhando a 5,0 cm, em relação ao valor encontrado a 2,5 cm de profundidade. Também a força vertical, necessária para manter a profundidade de trabalho, teve seus níveis de força alterados cerca de 85 % ao passar de 2,5 para 5,0 cm. Explica-se este efeito pelo volume de solo a ser rompido, bem como pela alteração na resistência à penetração (Cone Index) que praticamente dobrou de valor no segundo nível de profundidade. Segundo REAVES et alii (1981), como regra geral pode ser estabelecido que, dobrando a profundidade de trabalho, ocorre um aumento nas forças atuantes entre 100 e 300 %, concordando com os dados apresentados nesta pesquisa.

Apesar das profundidades terem sido superficiais, em relação a outros

preparos do solo, houve uma resposta significativa ao variar a profundida
de de trabalho.

A força resultante respondeu de modo semelhante à variação de profun
didade, alterando-se 88 % ao passar de um nível para o outro.

No entanto, na Tabela 13, observa-se que em relação à força unitária, isto é, a força exercida para romper cada centímetro de solo, não houveram grandes variações. Isto comprova que o elemento disco de corte tem um com
portamento uniforme em relação à profundidade de trabalho. Quanto à força
resultante unitária também houve pouca alteração, do mesmo modo que o seu deslocamento angular α .

Para ilustrar o que foi exposto, encontram-se nas Tabelas 14, 15 e 16 as interações médias existentes entre os fatores observados e calculados.

4.2.1.2. Efeito da velocidade de deslocamento

A princípio não houveram diferenças muito grandes nas forças medi
das, ao variar-se a velocidade de deslocamento.

Na Tabela 5, empregando-se o disco de corte a 2,5 cm de profundidade, observa-se que as forças atuantes decresceram entre 0,30 m/s e 0,56 m/s, tornando a aumentar de valor no intervalo seguinte. Embora não tenhamos da
dos próprios, ao analisarmos trabalhos já realizados com outros equipamen
tos de preparo do solo, observamos que existe um comportamento similar em relação à velocidade de deslocamento (DRANSFIELD at alii, 1964; KORONKA, 1973).

A 5,0 cm de profundidade, na Tabela 6, o efeito foi similar para as forças vertical e resultante. Entretanto, a força horizontal manteve-se
constante no primeiro intervalo, aumentando entre 0,56 m/s e 1,12 m/s.

Apesar dos limites empregados nesta pesquisa terem sido relativamen
te baixos em relação a outros citados na literatura, deveriam ser suficien
tes para acusar quaisquer variações, se houvessem.

Na Figura 23 foram agrupados dados médios dos testes de campo e o efeito da velocidade de deslocamento pode ser melhor visualizado. Observa-se um comportamento semelhante entre as três forças estudadas. É também interessante observar na Tabela 13, que o deslocamento angular α , da força resultante diminui à medida que a velocidade aumenta,

Na Tabela 17 observa-se que houve pouca influência da velocidade sobre as forças atuantes no disco de corte.

4.2.2. Discos Duplos

O rompedor de discos duplos por sua vez exigiu níveis de força muito semelhantes ao do disco de corte. Enquanto a força horizontal foi maior em relação àquela, devido a maior resistência encontrada pelos dois discos para romper o solo, a força vertical foi um pouco inferior devido principalmente à inclinação dos discos ao romperem o solo. Assim sendo, a força resultante foi semelhante em valor absoluto (+ 2,8 %), muito embora seu deslocamento angular α em relação à direção de trabalho tenha sido igual a 61° , conforme apresenta a Figura 25b.

Os testes de campo com o elemento rompedor discos duplos foram realizados já com o solo um pouco mais seco na superfície (13,8 % de umidade), embora os valores de densidade não diferissem muito conforme é apresentado na Tabela 7.

4.2.2.1. Efeito da profundidade de trabalho

Observa-se nas Tabelas 8 e 9 que a variação das forças atuantes foram ainda maiores do que para o disco de corte. O aumento da força horizontal devido à profundidade de trabalho pode ser parcialmente atribuído a um aumento da densidade do solo, tanto quanto ao aumento no volume de solo a ser rompido. O elemento que mais respondeu à variação de profundidade foi o disco duplo, principalmente devido ao aumento progressivo da

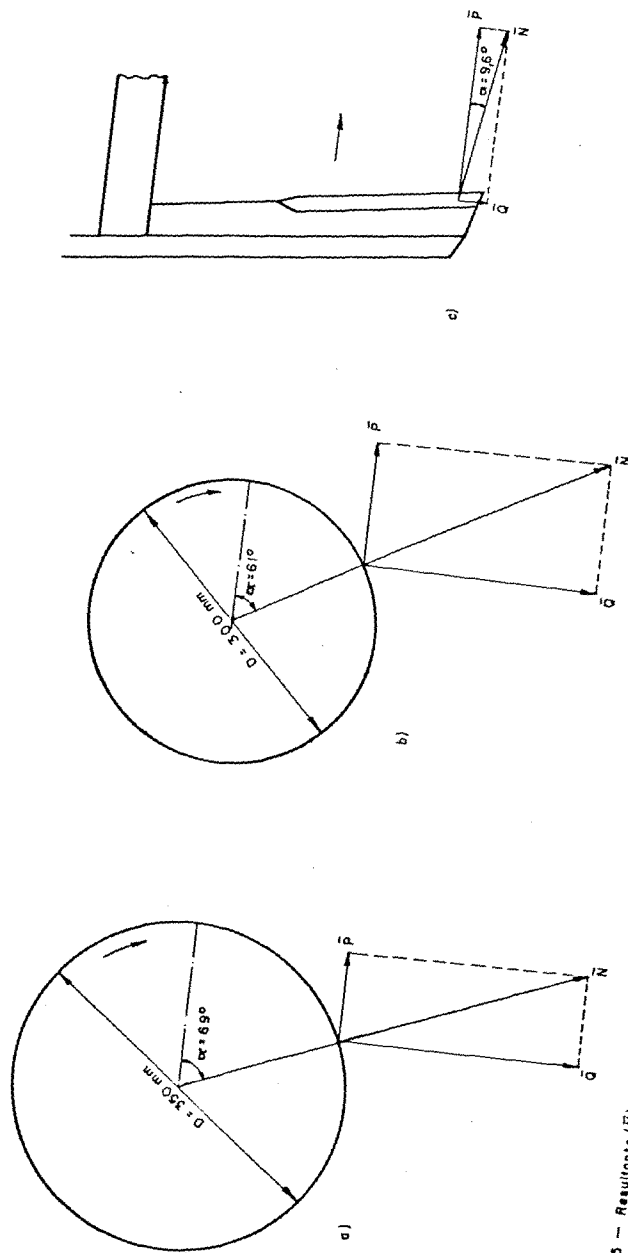


Fig. 25 — Resultante (N), da Força Horizontal (F) e da Força Vertical (G) Atuante em: a) Disco de Corte; b) Discos Duplos; c) Faca Rameadora.

área em contato com o solo. A força horizontal aumentou quase três vezes ao passar de um nível para outro. Já a força vertical foi mais estável, exigindo apenas mais 64 %. Também a força resultante aumentou apenas 82 % entre uma e outra profundidade.

Na Tabela 13, quanto à força unitária existe um fato curioso a ser discutido; para a força horizontal houve um acréscimo constante quando os discos foram empregados a 5,0 cm. Isto pode ser explicado pela presença dos dois discos em contato com o solo, cuja superfície de contato a 5,0 cm é muito maior do que a 2,5 cm. No entanto, a força vertical e a força resultante tiveram comportamento oposto, isto é, na maior profundidade a força unitária diminuiu de valor. Explica-se pelo fato dos discos trabalharem com um certo ângulo de inclinação propiciando uma fácil penetração, bem como por uma certa sucção feita pelo solo ao elemento inclinado (DRANSFIELD et alii, 1964; HARRISON, 1982). Quanto ao deslocamento angular α da força resultante é também significativo o efeito; quando a profundidade aumenta, diminui o deslocamento angular, em função da redução da força unitária vertical.

Nas Tabelas 14, 15 e 16 estão apresentadas as interações médias existentes entre os fatores observados.

4.2.2.2. Efeito da velocidade de deslocamento

Novamente as diferenças decorrentes da variação na velocidade de deslocamento não apresentaram valores significativos.

Ao contrário de muitos dados de pesquisa, não houve um comportamento que se enquadrasse na equação geral $Y = a \cdot x^b + c$ como relatam RANDOLPH & REED (1938), TELISCHI et alii (1956) e SINGH et alii (1979). Concorde, em termos gerais, com o trabalho de KORONKA (1973) que cita as forças atuantes constantes ao variar a velocidade de deslocamento entre 1,6 e 6,6 km/hora.

Na Tabela 8, empregando-se discos duplos a 2,5 cm de profundidade, observa-se que a velocidade de deslocamento não afeta a força horizontal e tem muito pouca ação nas forças vertical e resultante, embora tenha uma leve tendência a aumentar a resistência à penetração.

A 5,0 cm de profundidade, na Tabela 9, já existe um comportamento semelhante, mas com tendência contrária, isto é, a força horizontal tem um pequeno decréscimo ao aumentar a velocidade, enquanto que as forças vertical e resultante sofrem uma redução acentuada com maiores velocidades.

Analisando a Tabela 13, entretanto, nota-se que em relação à força unitária não existem diferenças apreciáveis com a variação de velocidade. Não houve variação no deslocamento angular α da força resultante em função da velocidade.

Na Tabela 17, tanto quanto na Figura 23 podem ser observados os efeitos pouco significativos da velocidade de deslocamento sobre as forças atuantes nos discos duplos.

4.2.3. Faca Rompedora

A faca rompedora, em forma de cunha, rompe o solo e as raízes nele contidas, formando um sulco ou fenda de espessura semelhante à de sua maior seção transversal, exigindo um nível de esforço de tração relativamente grande, dependendo do tipo e condições do solo, para superar a resistência que este oferece a seu avanço. A ação da faca contra o solo é substancialmente diferente daquela dos discos; por ter uma atuação menos dinâmica e uma seção transversal muito maior que a dos discos, sem dúvida alguma o fator que mais contribuirá na força de tração é o atrito entre ela e o solo.

Os testes de campo com a faca rompedora foram realizados cinco dias após uma leve chuva, estando a pista de teste com um teor de umidade médio de 17,1 % e a densidade praticamente uniforme conforme pode ser obser

vado na Tabela 10.

4.2.3.1. Efeito da profundidade de trabalho

Da revisão de literatura efetuada salienta-se a razão da faca rompedora pouco variar as forças atuantes quando altera a profundidade de trabalho- DRANSFIELD et alii (1964), explicam que facas ou lâminas de corte com determinado ângulo de ataque ($\alpha > 90^\circ - \varphi$) tendem a ser succionados pelo solo, gerando até mesmo valores negativos como os apresentados por HARRISON (1982), isto é, o solo ao invés de opor resistência à penetração, facilita-a pela sucção do implemento.

Neste estudo posicionou-se a faca rompedora a um ângulo de 70° em relação à direção de trabalho, de modo que a maior parte do solo rompido flue por sua superfície de contato na direção das aletas formadas pela cunha de corte, não exercendo pressão sobre elas. Isto é, quem realmente atua é a ponta afiada da cunha de corte. Assim, obtivemos grandes esforços horizontais para vencer a resistência do solo, mas pequenos esforços verticais para obter penetração, em função do posicionamento da faca rompedora.

Nota-se nas Tabelas 11 e 12 que houve uma tendência para a elevação do valor dos esforços horizontais, verticais e resultantes, em relação à variação da profundidade de trabalho. Entretanto, na Tabela 13, analisando a força unitária, observamos que realmente apenas a ponta da faca é responsável pelo nível de força exigida, uma vez que nas maiores profundidades o esforço unitário foi reduzido em 42 % horizontalmente e 30 % verticalmente. Também o deslocamento angular foi afetado pela variação de profundidade, aumentando com aumentos de profundidade. Na Figura 24 podem ser vistos graficamente os efeitos da profundidade de trabalho.

Encontram-se nas Tabelas 14, 15 e 16 as interações médias existentes entre os fatores observados.

4.2.3.2. Efeito da velocidade de deslocamento

Novamente a velocidade de deslocamento não teve variações significativas. Na Tabela 11, empregando-se a faca rompedora a 2,5 cm observa-se que a força horizontal pouco variou, embora houvesse uma leve tendência a diminuir, com aumentos de velocidade. Já a força vertical apresentou um declínio no primeiro intervalo e voltou a aumentar no intervalo seguinte. O comportamento da força resultante foi semelhante à horizontal, com tendências a diminuir. Na Tabela 12, empregando-se a faca rompedora a 5,0 cm observou-se uma tendência geral das forças atuantes a não variarem com a velocidade de deslocamento, confirmando os dados obtidos por KORONKA (1973).

Analisando-se a Tabela 13 também nota-se que as forças unitárias foram constantes com a variação de velocidade. Variou o deslocamento angular, diminuindo no primeiro intervalo e voltando a aumentar no intervalo seguinte.

Na Tabela 17 e na Figura 23 são apresentados os efeitos da velocidade de de deslocamento sobre as forças atuantes na faca rompedora, novamente confirmando a pequena significatividade da mesma.

5. CONCLUSÕES

Observando-se os limites deste trabalho, podemos concluir que:

- Existe um efeito muito acentuado nas forças atuantes sobre os elementos rompedores de discos ao variar-se a profundidade de trabalho de 2,5 cm para 5,0 cm. A faca rompedora não apresentou diferenças altamente significativas devido a seu modo de atuação contra o solo.
- A velocidade de deslocamento não teve influência significativa sobre as forças atuantes, mas via de regra tendeu sempre a mantê-las constantes ou a diminuí-las, à medida que aumentava.
- O tipo de rompedor empregado apresentou efeitos muito significativos nas forças atuantes. Quanto à força horizontal total foi substancial a diferença entre os elementos de discos e a faca rompedora; no entanto, quanto a força vertical, houve uma diferença muito significativa entre a faca rompedora e os discos. Analisando-se finalmente pela força resultante observa-se que as diferenças são favoráveis à faca rompedora, por exigir menos esforço total do que os demais elementos.
- A força unitária mostra que os elementos de discos comportam-se de maneira quase uniforme no perfil de solo estudado. Entretanto, a faca rompedora demonstra claramente seu modo de ação ao verificarmos que a força unitária diminui praticamente a metade na maior profundidade de trabalho, isto é, apenas uma parte da faca (a ponta) é responsável pela resistência oferecida ao corte, sendo que o solo flue pelas facas em cunha sem alterar a força total.

6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- AMIRANTE, P. & DI CANDIA, E. 1974. Influenza della coesione nell'applicazione del principio della similitude meccanica al sistema suolo-atrezzo. *Revista di Ingegneria Agraria*. v. 4(3/4):109-18.
- CANÁVATE, J.O. 1975. *Tecnica de La Mecanizacion Agraria - Tomo 1. Tractores y Aperos de Labranza y de cultivo*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Madrid. 324p.
- CANNEL, R.Q. 1981. Potentials and problems of simplified cultivation and Conservation tillage. *Outlook on agriculture*. v. 10(8):379-84.
- CHANG, C.S. 1981. Estudo das características de desemepnho e problemas de desenho do cultivador rotativo reverso para plantio em fileiras. *Relatório*. Fundação Tropical de Pesquisa e Tecnologia, Campinas, São Paulo, 57p.
- COOPER, A.W. 1971. Effects of tillage on soil compaction. In: ASAE - Compaction of Agricultural Soils. St. Joseph - ASAE, Cap. 7, p.315-66.
- DRANSFIELD, P. et alii. 1964. Soil-to-implement reactions experienced with simple tines at various angles of attack. *Journal Agric. Engng. Res.* v. 9(3):220-4.
- FROHLOCH, C.E. 1979. No-till drills. In: MANITOBA - NORTH DAKOTA ZERO TILLAGE WORKSHOP. s.n.t.
- GILL, W.R. 1967. Soil implement relations. Conference Proceedings: Tillage for Greater Crop Production. St. Joseph - ASAE publication, december 11 and 12, p.32, 36, 43.
- GILL, W.R. & VANDEN BERG. 1968. Soil Dynamics in Tillage and Traction *Agricultural Handbook USDA (316):1-511*. (516 ref.).
- GODWIN, R.J. & SPOOR, G. 1977. Soil failure with narrow tines. *Journal Agric. Engng. Res.* v. 22(4):213-28.
- HARRISON, H.P. 1977. Soil reacting forces for disks from field measurements. *Transactions of the ASAE*. v. 20(5):836-8.
- HARRISON, H.P. 1982. Soil reactions from laboratory studies with an inclined blade. *Transactions of the ASAE*. v. 25(1):7-17.

- HETTIARATCHI, D.R.P. et alii. 1966. The calculation of passive pressure in two-dimensional soil failure. *Journal Agric. Engng. Res.* v. 11(2): 89-107.
- IAPAR - Instituto Agronômico do Paraná. 1981. *Plântio Direto no Estado do Paraná*. Londrina, 244p. (Circular IAPAR n° 23).
- KORONKA, P. 1973. Machinery development for direct drilling. *Outlook on agriculture.* v. 7(4):190-5.
- LEME, H.A. 1955. Influência da profundidade de aração no coeficiente de resistência dos solos ao trabalho do arado de discos. *Revista da Agricultura*. Piracicaba - ESALQ. v. 28(5-6):189-98.
- LOGAN, I.C. 1977. Development in direct drilling machinery and some effects on soil conditions. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ENERGY CONSERVATION IN CROP PRODUCTION*. Massey University, Palmerston - New Zealand. p.199-204.
- NICHOLS, M.L. 1930. Dynamic propoerties of soil affecting implement design. *Agricultural Engineering.* v. 11(6):201-04.
- O'CALLAGHAN, J.R. & FARRELLY, K.M. 1964. Cleavage of soil by tined implements. *Journal Agric. Engng. Res.* v. 9(3):259-70.
- O'CALLAGHAN, J.R. & McCULLEN, P.J. 1965. Cleavage of soil by inclined and wedge-shaped tines. *Journal Agric. Engng. Res.* v. 10(3):248-54.
- OLIVEIRA, J.B. 1980. Características morfológicas, analíticas, limitações e aptidões agrícolas dos solos da quadrícula de Campinas. Instituto Agronômico de Campinas. 79p. (Circular 109).
- OMETTO, D.A. 1957. Influência da umidade do solo no trabalho de arados e no coeficiente de resistência. Tese de Doutorado, ESALQ. 46p.
- PAYNE, P.C.J. 1956. The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements. *Journal Agric. Engng. Res.* v. 1(1):23-50.
- PAYNE, P.C.J. & TANNER, D.W. 1959. The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements. *Journal Agric. Engng. Res.* v. 4(4):312-25.
- PHILLIPS, R.E. et. alii. 1980. No-tillage agriculture. *Science*, 208(4448):1108-13.
- PHILLIPS, S.H. & YOUNG, H.M. 1973. *No-Tillage Farming*. Milwaukee-Reiman Associates, 224p.
- PORTELLA, J.A. & RICHARDSON, L.I. 1980. Experimentos comparativos de máquinas para semeadura direta de trigo - 1978-1979. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE TRIGO, 11, Porto Alegre. Solos, ecologia, fisiologia e práticas culturais. Passo Fundo, EMBRAPA-CNPT. v. 3, p.46-61.
- REAVES, C.A. & SCHAFER, R.L. 1975. Force versus width of cut for moldboard bottoms, *Transactions of the ASAE.* v. 18(5):852-4.

- REAVES, C.A. et alii. 1981. Influence of width and depth of cut on disk forces. Transactions of the ASAE. v. 24(3):572-8.
- ROWE, R.J. & BARNES, K.K. 1961. Influence of speed on elements of draft of a tillage tools. Transactions of the ASAE. v. 4(1):55-7.
- SINGH, G. et alii. 1979. Effect of speed on specific draft of moldboard and disc plows in Bangkok clay. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. v. X(3):33-8, summer 1979.
- SMITH, E.M. et alii. 1967. Energy required to operate a disk furrower in Kentucky Bluegrass sod. Transactions of the ASAE. v. 10(3):333-6.
- STAFFORD, J.V. 1979. The performance of a rigid tine in relation to soil properties and speed. Journal Agric. Engng. Res. v. 24(1):41-56.
- STAFFORD, J.V. 1981. An application of critical state soil mechanics: the performance of rigid tines. Journal Agric. Engng. Res. v. 25(5):387-401.
- TAYLOR, P.A. 1967. Field measurements of forces and moments of wheatland plow disks. Transactions of the ASAE. v. 10(6):762-68.
- TELISCHI, B. et alii. 1956. Draft measurement for tillage tools. Agricultural Engineering. v. 37(9):605-8.
- WELLS, L.G. et alii. 1980. Ground driven powered tillage. Transactions of the ASAE. v. 23(6):1383-7.

APÊNDICES

APÊNDICE A

EQUIPAMENTOS

a) Dinamômetro de Força ou Transdutor

Este transdutor foi construído em um bloco de alumínio com módulo de elasticidade $E = 7,28 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$, utilizando-se extensômetros elétricos de resistência da marca Micro Measurements, modelo ED-DY-125 AD-350.

Foi projetado para uma capacidade de força horizontal igual a 100 kg e força vertical de 200 kg, e construído baseado no princípio do anel octogonal, cujos membros elásticos são os próprios anéis, onde estão aplicadas as resistências elétricas, conforme apresenta a Figura 19.

Forças verticais F_v atuam sobre os extensômetros 9, 10, 11 e 12, do mesmo modo que forças horizontais F_h atuam sobre 2, 4, 5 e 7 sendo que conectadas eletricamente formam Pontes de Wheaststone. Sendo as ligações independentes, os sinais gerados podem ser gravados simultaneamente em canais separados de um instrumento de medição.

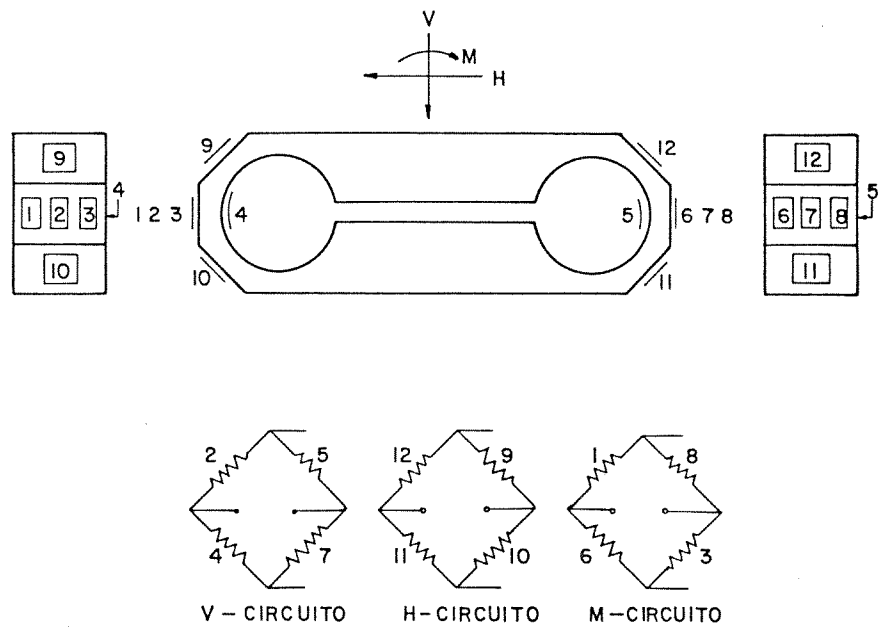


Fig. 26 - Circuito Transdutor para Forças Verticais, Horizontais e Momento.

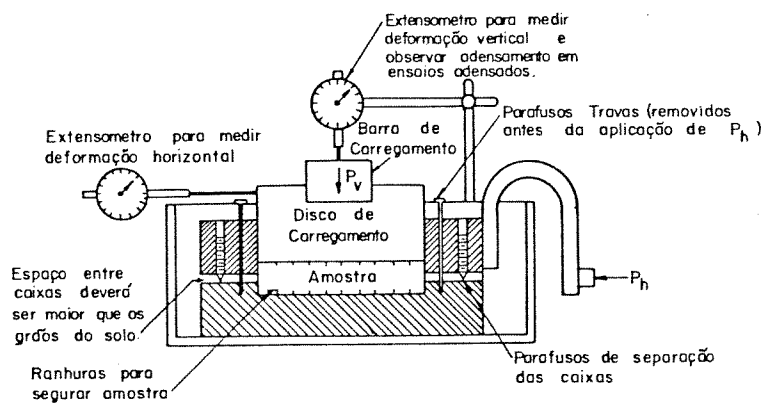


Fig. 27 - Caixa de Cisalhamento Direto

APÊNDICE B

Propriedades Físicas e Mecânicas do Solo

a) Análise Granulométrica Conjunta

A análise granulométrica de um solo é utilizada na identificação e classificação do mesmo, na determinação aproximada da permeabilidade e capilaridade, em drenagem de estrada, etc...

A análise granulométrica conjunta é composta de duas fases que são: Peneiramento e Sedimentação - A primeira consiste no peneiramento do solo através de uma série de peneiras sobrepostas em ordem decrescente de abertura das malhas. Estas aberturas representarão o diâmetro das partículas de solo, por definição. A segunda fase é efetuada sobre a fração de finos do solo (silte e argila), cujas partículas passaram através da peneira 200 (abertura de 0,074 mm).

Para a obtenção deste dado foram coletados cerca de 10 kg de solo de vários pontos da área em teste. Este volume de solo foi misturado sobre uma lona, sendo então coletada uma amostra de 0,5 kg representativa da condição de solo.

b) Teor de Umidade

O teor de umidade nada mais é do que a quantidade de água presente no solo, em relação ao peso do solo seco. Portanto: $W = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \%$

onde: W = teor de umidade

W_w = peso de água

W_s = peso de sólidos

A metodologia empregada foi coletar uma quantidade significativa de solo, da camada a ser trabalhada, dividi-la em três amostras, pesar em u ma balança analítica de precisão, colocando em estufa sob temperatura con trolável ($110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$), por 24 horas. Retira-se a amostra, pesa-se nova mente e, por diferença de peso obtemos o peso de sólidos. Aplica-se a e quação acima descrita obtendo o teor de umidade do solo que está sendo trabalhado.

c) Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto tem por finalidade a determinação dos parâmetros de resistência do solo C e ϕ :

onde: C = coesão, em kg/cm^2

ϕ = ângulo de atrito interno, em graus

Neste ensaio submete-se o solo ao estado de tensão através de um e quipamento esquematizado na Figura 27.

A tensão normal σ_n é aplicada à amostra verticalmente, e a tensão de cisalhamento τ é aplicada através de deslocamento horizontal da parte superior da caixa de cisalhamento. Devido ao método de ensaio, o plano de ruptura no solo é pré-fixado, ocorrendo horizontalmente entre a parte superior e a inferior da caixa de cisalhamento. As tensões atuantes neste plano são apresentadas como: $\sigma_n = \frac{P_v}{A}$; $\tau = \frac{P_h}{A}$

onde: P_v = peso aplicado ao solo através da barra de carregamento

P_h = força horizontal aplicada ao solo pela máquina de cisalhamento e medida em anel de deformação

A = área de secção transversal da amostra

As tensões σ_n e τ durante o ensaio de cisalhamento deverão satisfazer a equação de Coulomb: $\tau = C + \sigma_n \cdot \text{tg } \phi$

Os valores de C e ϕ podem ser determinados através da realização de pelo menos três ensaios de cisalhamento direto. Cada ensaio resultará em um par de valores σ_n e τ , correspondendo cada um deles a um ponto no Gráfico

fíco de Mohr.

Para obter as amostras necessárias ao ensaio de cisalhamento direto foram coletados blocos indeformados de solo na pista de teste, durante os ensaios de campo. Estes blocos foram cuidadosamente envoltos em papel alumínio, recebendo uma solução protetora de parafina, de modo a conservarem inalteradas as propriedades do solo inclusive a umidade, como se fosse um teste "in sito".

d) Densidade Volumétrica

Para obter o valor médio correspondente à densidade volumétrica do solo, foram coletadas doze amostras utilizando-se um cilindro de aço de volume constante e igual a $49,00 \text{ cm}^3$ que é introduzido no solo até a profundidade média de trabalho, sendo retirado e o solo contido em seu interior pesado, obtendo-se uma relação g/cm^3 .