

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
CAMPINAS - SÃO PAULO
BRASIL

Parecer

*Este exemplar corresponde a redação final de
tese defendida por Walter Rauen de Souza
aprovada pela Comissão julgadora em 14/11/89.
Campinas, 20 de Dezembro de 1989*

*Paulo Sérgio G. Magalhães
Presidente da Banca*

SUBSOLADOR: INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS
GEOMÉTRICOS NA
DISTRIBUIÇÃO DAS FORÇAS.

Walter Rauen de Souza
Orientador: Paulo S. G. Magalhães

Dissertação apresentada a Faculdade de Engenharia Agrícola da
Universidade Estadual de Campinas, para cumprimento parcial dos
requisitos para obtenção do título de MESTRE em Engenharia
Agrícola.

Novembro - 1989

Dedico
aos meus pais
Paulo (*in memoriam*)
e
Wanda,
e irmãos, pelo carinho,
apoio e amizade.

Ofereço
a minha esposa
Sônia Maria
pelo amor, compreensão
e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Paulo S. G. Magalhães pela orientação, dedicação e amizade.

A todos os professores do Departamento de Máquinas Agrícolas pelo apoio e colaboração oferecidos no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os funcionários do Departamento de Máquinas Agrícolas e em especial a José Maria da Silva e Francisco F. dos Santos Filho, pelo esforço e dedicação na construção do transdutor, dos equipamentos e na condução dos experimentos.

Ao Anésio Souza Nogueira, funcionário do Campo Experimental da FEAGRI, pelo esforço e dedicação demonstrados durante os experimentos preliminares e finais.

Ao Paulo J. R. Albuquerque e Célia Panzarim Gonçalves pelo auxílio na coleta e análise das amostras de solo.

Ao João E. Bergamo pelos desenhos realizados.

Aos colegas Maurício Pires Martins, Geraldo Ferretti e Alexandre Witier Mazzonetto que colaboraram com extrema dedicação na condução dos experimentos e em especial ao Maurício que auxiliou também na utilização do programa de estatística.

A minha esposa Sônia M. C. Rauen de Souza pelo auxílio na datilografia e revisão deste trabalho e na coleta de dados.

Ao Centro de Tecnologia da UNICAMP (CT) pelos ensaios de tração e pela permissão para utilização da Máquina Universal de Ensaaios.

Aos professores Robson Pederiva e Rodmar Cardinali do Grupo de Projetos Mecânicos (GEPROM) da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP pela colaboração oferecida na análise dos dados que foi imprescindível para a conclusão deste trabalho.

Ao Centro Pluridisciplinar de Pesquisas Químicas, Biológicas e Agrícolas (CPQBA) da UNICAMP pelo empréstimo da área experimental e de suas instalações.

Ao Departamento de Engenharia de Transportes da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP pela colaboração na análise do solo.

A Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP pelo apoio financeiro recebido durante o desenvolvimento deste trabalho.

A coordenadoria de pós-graduação e a diretoria da Faculdade de Engenharia Agrícola pelo apoio recebido.

Ao Centro Nacional de Engenharia Agrícola (CENEA) pelo empréstimo do condicionador de sinais.

A BRASIMET S/A pela doação do tratamento térmico do transdutor.

A CIVEMASA S/A - Indústria e Comércio pelo empréstimo do subsolador com as modificações solicitadas.

A ENGEWARE INFORMÁTICA pelo empréstimo do programa de elementos finitos *COSMOS/M^R*.

A todos os funcionários e professores da Faculdade de Engenharia Agrícola que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Conteúdo

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	xiv
1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS.	4
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Subsolador.	5
2.2 Transdutor.	17
2.2.1 Sistemas de medição.	17
2.2.2 Nível de esforços nas ferramentas e material de construção dos transdutores.	18
2.2.3 Equações utilizadas no projeto de transdutores.	20

3	MATERIAIS E MÉTODOS.	26
3.1	Materiais.	26
3.1.1	Subsolador e unidade de potência.	26
3.1.2	Transdutor	30
3.1.3	Instrumentação.	32
3.1.4	Solo utilizado no experimento.	33
3.1.5	Medidor do perfil de solo mobilizado.	33
3.2	Métodos.	35
3.2.1	Subsolador.	36
3.2.2	Transdutor.	48
4	RESULTADOS.	61
4.1	Subsolador.	61
4.1.1	Resultados gerais.	62
4.1.2	Largura da asa do subsolador.	62
4.1.3	Ângulo de envergadura da asa do subsolador.	70
4.1.4	Ângulo de ataque da asa do subsolador.	75
4.1.5	Área transversal de elevação superficial do solo.	78
4.1.6	Esforços máximos e mínimos.	80

4.2	Transdutor.	83
4.2.1	Material do transdutor.	83
4.2.2	Pontos de colagem dos extensômetros.	84
4.2.3	Características do transdutor.	84
5	DISCUSSÃO.	90
5.1	Subsolador.	90
5.1.1	Largura da asa.	90
5.1.2	Ângulo de envergadura da asa.	93
5.1.3	Ângulo de ataque da asa.	95
5.1.4	Área transversal de elevação superficial do solo.	96
5.1.5	Esforços máximos e mínimos observados.	96
5.2	Transdutor.	97
6	CONCLUSÕES.	99
7	BENEFÍCIOS ATINGIDOS COM ESTE TRABALHO.	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	103
	ABSTRACT	107

APÊNDICE A

109

APÊNDICE B

111

Lista de Figuras

2.1	Simbologia utilizada.	6
2.2	Aplicação das forças em um anel.	20
2.3	Anel octogonal estendido (2.3.a) e relação entre k (L/r), deformação (ε) e deflexão (ϕ) para um anel circular ex- tendido (2.3.b).	22
3.1	Haste e ponta do subsolador.	27
3.2	Tratamento 2.	28
3.3	Tratamento 3, 4 e 5.	28
3.4	Tratamento 6.	29
3.5	Tratamento 7, 8 e 9.	29
3.6	Perfilômetro.	35
3.7	Delineamento experimental.	37
3.8	Amostra de solo para C e ϕ	39
3.9	Subsolador e transdutor.	45

3.10	Instrumentação.	46
3.11	Forças aplicadas na ferramenta	49
3.12	Dimensões do anel octogonal estendido.	52
3.13	Modelo com elementos finitos do anel octogonal estendido.	54
3.14	Posição e circuito de ligação dos extensômetros.	56
3.15	Calibração da força horizontal.	58
3.16	Calibração da força vertical.	59
3.17	Calibração do momento devido a resultante das forças.	60
4.1	Forças, horizontal, vertical e resultante como função da largura da asa.	65
4.2	Ângulo e ponto de aplicação da resultante com relação à largura da asa.	67
4.3	Perfil do solo mobilizado com relação à largura da asa.	69
4.4	Forças, horizontal, vertical e resultante como função do ângulo de envergadura da asa.	72
4.5	Ângulo e ponto de aplicação da resultante para dois ângulos de envergadura.	73
4.6	Perfil do solo para dois ângulos de envergadura.	74
4.7	Ângulo e ponto de aplicação da resultante para dois ângulos de ataque.	77

4.8	Perfil do solo para dois ângulos de ataque.	78
4.9	Curva de distribuição de ocorrência.	81
4.10	Curva de calibração da força horizontal.	85
4.11	Curva de calibração da força vertical.	86
4.12	Curva de calibração para o momento devido a resul- tante das forças.	88
5.1	Pontas testadas.	95

Lista de Tabelas

3.1	Propriedades do Aço 4340	31
3.2	Propriedades mecânicas do solo.	33
3.3	Propriedades físicas do solo.	34
3.4	Tratamentos.	44
4.1	Forças, horizontal e vertical com relação à largura da asa.	64
4.2	Força resultante e ângulo com relação à largura da asa.	66
4.3	Área transversal de solo mobilizado e resistência específica com relação à largura da asa.	68
4.4	Forças, horizontal e vertical com relação ao ângulo de envergadura da asa.	71
4.5	Força resultante e ângulo com relação ao ângulo de envergadura da asa.	72
4.6	Área transversal de solo mobilizado e resistência específica com relação ao ângulo de envergadura.	74

4.7	Forças, horizontal e vertical com relação ao ângulo de ataque da asa.	76
4.8	Força resultante e ângulo com relação ao ângulo de ataque da asa.	77
4.9	Área transversal de solo mobilizado e resistência específica com relação ao ângulo de ataque.	79
4.10	Área de elevação superficial do solo.	80
4.11	Forças máximas e mínimas.	82
4.12	Propriedades do Aço 4340 temperado e revenido.	83

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo a investigação da distribuição de forças em um subsolador. Alguns parâmetros geométricos foram variados visando avaliar a influência dos mesmos sobre o desempenho global da ferramenta.

Utilizou-se um subsolador comercialmente disponível, com haste curva e ponta removível, o qual constituiu a configuração básica utilizada como referência neste estudo. As modificações foram efetuadas sobre a ponta do subsolador considerando-se três parâmetros distintos, largura, ângulo de ataque e ângulo de envergadura da asa do subsolador.

Para avaliar o desempenho da ferramenta mediu-se experimentalmente as forças, horizontal e vertical, o momento devido a resultante destas e a área transversal de mobilização do solo. Com base nestes resultados a resistência específica do solo foi calculada.

A análise estatística dos resultados indicou que o desempenho do subsolador foi melhor com uma asa de largura igual a 435 mm com os mesmos ângulos, de ataque e de envergadura, da asa utilizada na configuração básica da ferramenta. 35° e 15° respectivamente. Nesta condição o perfil de mobilização do solo apresentou um formato mais suave e a resistência específica foi menor.

Um transdutor do tipo anel octogonal estendido foi projetado e construído utilizando-se uma variação da equação usual de dimensionamento. Os pontos de colagem dos extensômetros foram determinados pelo método de elementos finitos. A linearidade, histerese e sensibilidade cruzada do transdutor apresentaram valores consistentes.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.

1.1 INTRODUÇÃO

O sistema de produção agrícola atual, onde o solo é utilizado de forma intensiva, vem despertando o interesse e a preocupação dos agricultores brasileiros com relação a compactação do solo.

Suspeita-se que a principal causa da compactação são as altas cargas impostas ao solo pelos tratores e máquinas agrícolas que são utilizadas desde o preparo do solo até a colheita. Porém, outros fatores tais como a umidade do solo no momento da operação agrícola, as práticas convencionais de preparo e a ausência de rotação de culturas contribuem para o problema da compactação.

O processo de compactação provoca danos a estrutura do solo que podem ser verificados através do aumento da densidade, da diminuição da porosidade e da taxa de infiltração e o aumento da resistência a penetração. Essas alterações podem ocorrer tanto na superfície do solo como na camada logo abaixo da zona de preparo do solo.

A compactação superficial do solo, devido ao tráfego de animais, de máquinas e ao impacto da chuva, que causa uma redução das trocas gasosas e frequentemente reduz a germinação das sementes e emergência das plantas pode ser aliviada com as operações normais de preparo de solo. Já a compactação na zona logo abaixo desta camada, geralmente denominada compactação subsuperficial, traz maiores preocupações devido as dificuldades de aliviá-la através destas operações. Este preparo periódico do solo, quando mal conduzido, contribui para o aumento da compactação na zona subsuperficial, como é o caso da compactação devido ao uso dos mesmos implementos ao longo de anos sempre na mesma profundidade.

Geralmente a compactação subsuperficial prejudica o desenvolvimento das culturas na medida em que limita o volume de solo disponível a ser explorado pelas raízes e ainda aumenta a suscetibilidade do solo aos processos de erosão e inundação.

Pode-se verificar então, que a compactação é um problema real da agricultura e como tal deve ser combatido. Sendo assim podemos trabalhar em três áreas de pesquisa distintas dentro da engenharia agrícola.

A primeira delas trata dos efeitos da compactação nas culturas, a segunda está ligada às pesquisas visando evitar a compactação e os problemas dela decorrentes e compreende por exemplo o projeto e desenvolvimento de veículos que proporcionem baixos níveis de compactação, o desenvolvimento e avaliação de sistemas de produção que empreguem controle de tráfego e outros estudos.

A terceira área de pesquisa, dentro da qual esta inserido o presente trabalho, diz respeito ao problema já existente e portanto deve-se tentar eliminá-lo ou reduzi-lo a um mínimo de modo a permitir o pleno desenvolvimento das culturas.

Neste caso podemos aliviar o problema da compactação de forma natural através de rotação de culturas com o uso de variedades que conseguem romper as camadas subsuperficiais compactadas ou mecanicamente através de ferramentas específicas.

O rompimento mecânico das camadas subsuperficiais compactadas é realizado com uma ferramenta de geometria adequada para esta função que denominamos subsolador. Esta ferramenta visa romper e descompactar as camadas subsuperficiais criando um sistema de fendas e fissuras que propiciará um melhor ambiente físico-químico para o desenvolvimento das culturas permitindo um aumento da produção agrícola e da eficiência dos fertilizantes aplicados.

Segundo DAVIES (1963) o uso do subsolador em áreas compactadas produziu um aumento médio, no primeiro ano, de 300 kgf/ha no plantio de cereais e no caso de pastagens um aumento de até 900 kgf/ha. Já IDE et alli (1987) obtiveram um aumento médio na produção de cereais e beterrabas da ordem de 5 a 10% com a subsolagem ao longo de 4 anos sucessivos.

O elevado nível de mecanização na agricultura e sua condução muitas vezes de forma inadequada, torna em alguns casos, a operação de subsolagem necessária para resolver o problema de compactação. Para a cultura de cana-de-açúcar onde existem mais informações com respeito aos custos de operações agrícolas, a subsolagem é a mais onerosa e apesar disso poucos estudos foram realizados no Brasil para avaliar a necessidade desta operação, a frequência que deve ser realizada e a eficiência da operação e dos subsoladores.

Com relação a eficiência dos subsoladores já foram realizados alguns trabalhos no Brasil com objetivo de comparar subsoladores comercialmente disponíveis, diferentes em sua geometria, avaliando o desempenho global dos mesmos. No entanto pouco foi realizado no sentido de avaliar a influência da variação de suas partes principais

tais como o ângulo e formato da haste do subsolador, a largura, o ângulo de ataque, o ângulo de envergadura e o formato da asa do subsolador sobre o desempenho global da ferramenta.

É importante conhecer como os parâmetros relativos a geometria do subsolador afetam seu desempenho e para isto é necessário conhecer como ocorre a distribuição de forças no mesmo e o padrão de ruptura do solo por ele desenvolvido. Desta forma teremos melhores informações para o projeto de um subsolador mais eficiente.

1.2 OBJETIVOS.

O presente trabalho tem como objetivos principais a investigação da distribuição de forças em um subsolador quando alguns parâmetros geométricos são variados e a avaliação da influência destes sobre o desempenho global do subsolador. Para tanto faz-se necessário também projetar e construir um transdutor específico para a medição de esforços em ferramentas simétricas.

Capítulo 2

REVISÃO DE LITERATURA

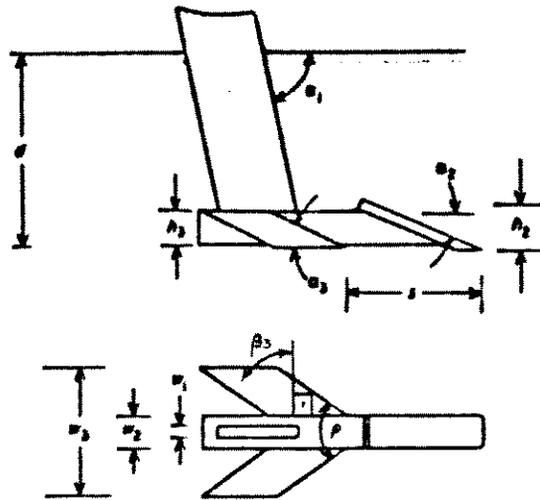
A revisão de literatura apresenta duas subseções, uma referente a avaliação da distribuição de forças no subsolador e a outra referente ao projeto e construção do transdutor.

2.1 Subsolador.

Para melhor compreensão desta parte a figura 2.1 ilustra as principais partes dos subsoladores.

PAYNE (1956) em experimentos realizados em laboratório e no campo com ferramentas verticais planas retangulares com razão entre profundidade e largura de 25:1 a 1:1 denominadas ferramentas estreitas verificou que:

- para diferentes velocidades a área de solo mobilizado não sofreu alterações significativas, mas o solo adjacente a ferramenta pareceu mais desagregado para altas velocidades. Ele cita também que outros autores confirmaram uma pequena mudança na força com relação a velocidade e um aumento na distância de deslocamento do solo desa-



Legenda:

d = profundidade

s = posição da asa em relação à ponta

h = altura de levante

w = largura

α = ângulo de ataque

ρ = ângulo de abertura

β = ângulo de envergadura

Fonte: SPOOR & GODWIN (1978)

Sufixos:

1 haste

2 ponta

3 asa

Figura 2.1: Simbologia utilizada.

gregado.

- a força de tração varia linearmente com a profundidade de trabalho.
- embora a coesão do solo, propriedade a qual a força de tração é mais sensível, apresente grandes variações entre os tipos de solo, o ângulo solo/metal e a adesão são comparativamente constantes.
- existe uma cunha de solo aderida a ferramenta que desloca-se do fundo para a superfície.
- o solo rompe-se em sucessivas camadas e o registro da força de tração apresenta-se na forma de uma onda devido aos valores máximos atingidos na ruptura e os valores mínimos que chegam a 30% do valor máximo.

PAYNE & TANNER (1959) em experimentos realizados em laboratório e no campo com uma larga gama de ferramentas planas retangulares com várias larguras e ângulos de ataque, com razão entre profundidade e largura de 6:1 a 1,5:1 concluíram que:

- a eficiência das ferramentas medida em termos de força por unidade de largura de solo mobilizado variou com as proporções da ferramenta mas foi extremamente sensível à variação do ângulo de ataque da mesma sendo aproximadamente 8 vezes superior em um ângulo de ataque de 20° em relação a um ângulo de 160° .
- ângulos de ataque da ferramenta entre 20° e 50° pouco afetaram o valor da força de tração, mas além de 50° esta [B aumentou rapidamente chegando a ser, a 160° , 5 vezes superior à força correspondente ao ângulo de 20° .
- para ferramentas inclinadas com ângulo de ataque inferior a 45° a reação do solo, que é a componente vertical da força, auxilia a penetração da ferramenta, mas com ângulos superiores essa reação opõe-se a penetração.

DRANSFIELD et alli (1964) em testes realizados em campos de plantio de trigo na Austrália com ferramentas planas retangulares

chegaram as seguintes conclusões:

- em solos soltos (desagregados) a força de tração em uma ferramenta vertical aumenta linearmente com a profundidade de trabalho confirmando os resultados encontrados por PAYNE (1956) , mas em solos com maior densidade essa linearidade deixa de existir para a força horizontal e somente a força vertical mantém essa característica.
- em solos soltos, a força de tração para ferramentas verticais é pouco afetada para uma variação de velocidade de até 8 km/hr mas em solos mais compactados a força aumenta de 10 a 15% a cada 1,6 km/hr. Forças verticais mantém-se razoavelmente constantes quando a velocidade é variada.
- a força de tração diminui com a diminuição do ângulo de ataque da ferramenta. O efeito mais benéfico da diminuição do ângulo é encontrado a 45° para solos soltos, mas para solos mais compactados é encontrado em ângulos menores. A força vertical cai para zero a 45° e inclusive pode inverter o sentido para ângulos menores. Estes resultados estão muito próximos dos encontrados por PAYNE & TANNER (1959).
- no registro das forças foi observado picos de força superiores a 75% da força média.

O'CALLAGHAN & FARRELLY (1964) estudando ferramentas planas retangulares verificaram que dois modos de ruptura do solo são possíveis para ferramentas posicionadas verticalmente . O primeiro modo ocorre com ferramentas trabalhando superficialmente e a ruptura inicial do solo ocorre em um plano vertical e o outro modo ocorre com ferramentas trabalhando em profundidade onde a ruptura inicial ocorre em um plano horizontal.

Com base nestes modos de ruptura foi proposto um modelo matemático para prever a força de tração total e para a validação do mesmo foram realizados testes em campo que resultaram nas seguintes conclusões:

- a Teoria Clássica da Mecânica de Solos pode ser utilizada para prever a força de tração em ferramentas agrícolas de configuração simples as quais são colocadas verticalmente no solo.
- as ferramentas verticais cuja relação entre profundidade e largura da ferramenta é inferior a 0,6 podem ser tratadas como “paredes de retenção” (ruptura no plano vertical) na mecânica de solos e as ferramentas com relação superior a 0,6 podem ser tratadas como sapatas (ruptura no plano horizontal).
- o parâmetro que determina sózinho, nas ferramentas verticais, o modo de ruptura é a relação profundidade/largura da ferramenta.

O'CALLAGHAN & McCULLEN (1965) em testes realizados no campo com ferramentas planas retangulares e planas com cunhas de 60° e 90° na face retangular, variando o ângulo de ataque concluíram que:

- o modelo proposto para ferramentas verticais (O'CALLAGHAN & FARRELLY-1964) pode ser utilizado também para ferramentas inclinadas e com cunha na face retangular.
- a diminuição do ângulo de ataque da ferramenta faz com que a resistência à deformação do solo na direção vertical diminua devido a uma componente da reação da ferramenta que passa a atuar no sentido da superfície do solo e conseqüentemente faz com que a transição entre os dois modos ocorra em maiores profundidades se comparados com as ferramentas verticais.
- a redução da força que ocorre com a diminuição do ângulo de ataque é devida principalmente ao fato de que a transição entre os dois modos de ruptura ocorre em maiores profundidades.
- a componente vertical da força atuando sobre a ferramenta diminui gradualmente até zero e eventualmente inverte sua direção na medida em que o ângulo de ataque diminui confirmando os resultados encontrados por outros pesquisadores.
- não existe diferença entre ferramentas planas com face retangular e

plana com face em forma de cunha.

a resistência específica (força/área de solo mobilizado) diminui com a diminuição do ângulo de ataque.

WILLAT & WILLIS (1965) realizaram experimentos em áreas de plantio de trigo com ferramentas planas retangulares, verticais e curvas inclinadas a 45° , para avaliar principalmente a área de mobilização produzida e observaram que as ferramentas curvas lançam mais solo para os lados e deixam um sulco mais pronunciado na superfície do que as ferramentas verticais mas não houve aumento significativo no volume de solo mobilizado. Além disso observaram que variando a velocidade para ferramentas verticais a área de mobilização produzida pela ferramenta aumenta ligeiramente, mas o efeito é pequeno.

SIEMENS et alli (1965) em testes realizados em caixa de solo (com solo artificial) com diversas ferramentas e vários ângulos de ataque observaram que a componente horizontal da força aumentou com a velocidade para todas as ferramentas testadas e encontraram que a força esta relacionada com a velocidade tanto em primeiro como segundo grau, concluindo assim que algum outro fator além da aceleração dos blocos de solo como unidades individuais causa aumento desta componente com o aumento da velocidade.

Neste trabalho observou-se que a inversão da força vertical ocorre com um ângulo de ataque em torno de 70° o que difere dos valores encontrados por DRANSFIELD et alli (1964) e por PAYNE & TANNER (1959).

O registro das forças apresentou a forma de onda como verificado em trabalhos anteriores sendo isto devido ao processo de ruptura do solo que ocorre em camadas sucessivas.

GODWIN & SPOOR (1977) desenvolveram um modelo para a previsão das forças atuantes nas ferramentas abrangendo uma gama razoável de variações entre a profundidade de trabalho e a largura da ferramenta. Este modelo inclui os dois modos de ruptura do solo (O'CALLAGHAN & FARRELY-1964) denominados aqui em, região de ruptura crescente do solo (ruptura na camada superficial) e região de ruptura lateral do solo (ruptura nas camadas profundas do solo). Na região de ruptura crescente o solo desloca-se em três direções, à frente, acima e aos lados da ferramenta. Já na região de ruptura lateral o solo desloca-se apenas em duas direções, à frente e aos lados da ferramenta. É proposto também um método para a determinação da profundidade crítica, isto é, a profundidade abaixo da qual o modo de ruptura muda de crescente para lateral.

Com relação ao ângulo de ataque da ferramenta eles observaram que a diminuição do ângulo leva a um aumento na profundidade crítica desde que a relação entre a profundidade e largura da ferramenta seja mantida como observado por O'CALLAGHAN & McCULLEN (1965). Observaram também que a profundidade crítica é muito sensível a variação da densidade do solo e ao ângulo de atrito interno do solo.

Em testes realizados em caixa de solos verificaram que o modelo para previsão das forças apresenta resultados mais próximos aos experimentais em solos mais compactados e o método para estimar a profundidade crítica pode ser utilizado para uma aproximação em solos com diferentes densidades.

SPOOR & GODWIN (1978) desenvolveram um trabalho mais amplo com subsoladores e outras ferramentas com formatos diferentes caracterizando vários parâmetros que influem no desempenho das mesmas. Os trabalhos foram desenvolvidos em dois tipos de solos argilosos com densidades de $1,2 t/m^3$ e $1,3 t/m^3$. Foi observado, em um dos testes realizados com ferramentas de formatos diferentes mas

com as mesmas larguras e ângulos de ataque da ponta da ferramenta (75 mm e 22°), que todas tinham aproximadamente a mesma profundidade crítica e quando trabalhavam além desta o padrão de ruptura próximo a superfície ficava dependente apenas da largura e ângulo da haste da ferramenta ao invés da largura e ângulo da ponta. Outro teste realizado em laboratório com variação do ângulo de ataque da ponta do subsolador mostrou que com um ângulo de 25° o solo movia-se para cima com pouca compactação mas quando o ângulo foi aumentado para 70° ocorreu uma compactação muito severa.

Quando as ferramentas trabalham acima da profundidade crítica formam-se fissuras horizontais em ambos os lados da ponta da ferramenta que normalmente contribuem pouco para a mobilização do solo, mas se forem colocadas asas na ferramenta posicionadas para trabalhar dentro dessas fissuras pode-se ter um aumento significativo na mobilização com um mínimo de aumento na energia dispendida.

Foram realizados testes com subsoladores alados e verificado que a adição de asas em subsoladores convencionais pode aumentar a profundidade crítica dentro de certos limites que dependem da largura da asa, da altura de levante da asa e das condições do solo. O subsolador alado provoca ainda um maior rearranjo das unidades mobilizadas no solo permitindo que os efeitos da subsolagem sejam mais permanentes. O maior rearranjo das unidades no solo esta diretamente ligado a maior altura de levante da asa.

Foi observado que a colocação de asas de 0,42 m de largura no subsolador aumentou em 40% a força de tração e duplicou a área transversal de solo mobilizado, isso resultou em uma redução significativa da resistência específica quando comparado com o subsolador sem asas.

As larguras de asas utilizadas, 0,30 m e 0,42 m, não ocasionaram efeitos significativos na força de tração nem na resistência

específica.

Com relação ao ângulo de ataque da haste do subsolador foi encontrado que uma redução de 82° para 65° reduziu a força necessária mas a diferença não foi significativa, contrastando com os resultados obtidos em outros trabalhos. No entanto eles acreditam que a pequena diferença deve-se ao fato de que a componente da força devido à haste do subsolador é relativamente pequena em comparação com a ponta.

Foi verificado que trabalhando com ferramentas superficiais em uma posição apropriada à frente do subsolador pode-se obter um aumento na área de solo mobilizado e uma redução na força total necessária para a tração diminuindo consideravelmente a resistência específica (força/área de solo mobilizado).

Com relação a geometria da asa SPOOR & GODWIN (1978) citam que BALATON (1971) já havia demonstrado previamente que a força de tração era pouco sensível ao ângulo de abertura das asas e que o ângulo de ataque ótimo para a asa era 25° . Utilizando este valor de ângulo de ataque em testes experimentais de ferramentas e variando nos testes a largura da asa, a altura de levante e a posição da asa em relação à ponta do subsolador, foi verificado que a altura de levante da asa influi na força para todas as larguras de asa e que a altura da asa em excesso além de um mínimo requerido para o desprendimento do solo aumenta a resistência específica apesar de aumentar o grau de rearranjo entre os torrões no solo e a profundidade crítica. Os autores afirmaram também que a posição da asa em relação à ponta do subsolador não tem influência significativa nas componentes horizontal e vertical da força e nem na área de solo mobilizado.

A ponta do subsolador foi muito importante pois reverteu o sentido da força vertical que passou a auxiliar a penetração da ferramenta e reduziu significativamente a força horizontal.

STAFFORD (1979) realizou testes em caixa de solos com dois tipos de solo um arenoso e outro argiloso com variação no teor de umidade e velocidade; as ferramentas utilizadas foram planas retangulares com dois ângulos de ataque, 45° e 90° . Verificou que para todas as condições de solo a força de tração aumenta com a velocidade mas a taxa de aumento está relacionada com o teor de umidade do solo e este determina dois regimes de ruptura do solo denominados frágil e escoado. A transição entre estes dois regimes ocorre próximo ao limite de plasticidade do solo.

A área de mobilização do solo aumenta com a velocidade, mas se comparada com o aumento da força de tração esse aumento na área torna-se muito pequeno. Houve evidências também de que a força de tração diminui com a diminuição do ângulo de ataque da ferramenta. Foi concluído que as forças devido ao solo foram determinadas em primeira instância por fatores relacionados com o teor de umidade e a resistência ao cisalhamento do solo e o tipo de solo somente afetou as forças em um segundo sentido naquele em que a textura do solo está relacionada com o teor de umidade.

AHMED & GODWIN (1983) verificaram em testes realizados no campo com solo argiloso que a posição longitudinal da asa no subsolador em relação à ponta não tem influência significativa sobre a força resultante ou a área de solo mobilizado e nem sobre a penetração do implemento.

PERUMPRAL et alli (1983) em experimentos conduzidos em laboratório objetivando validar um modelo baseado na análise do limite de equilíbrio para a determinação dos esforços em ferramentas, encontraram que a força de tração diminui com a diminuição do ângulo de ataque da ferramenta. como o observado em trabalhos anteriores, e aumenta com o quadrado da profundidade contrariando os resultados encontrados em trabalhos anteriores que obtiveram uma relação linear entre estes dois parâmetros. A força vertical auxilia a penetração da

ferramenta em ângulos de ataque inferiores a 70° invertendo o sentido a partir deste valor.

BELTRAME (1983) trabalhando com três subsoladores verificou que a subsolagem é mais eficiente quando executada em umidade do solo abaixo do limite inferior de plasticidade.

STAFFORD (1984) propõe um modelo matemático para previsão das forças atuantes na ferramenta levando em consideração os dois regimes de ruptura do solo (frágil e escoado). Este modelo inclui a geometria da ferramenta, velocidade e resistência do solo. Foram realizados testes para validação do modelo que mostraram ser este adequado para a previsão das forças.

SILVA et alli (1984) em estudos com 8 modelos de subsoladores, com hastes retas, curvas e parabólicas, para avaliar principalmente o esforço de tração, verificaram que a geometria da haste do subsolador não influenciou de forma decisiva na ação dos subsoladores avaliados.

LANÇAS & BENEZ (1987) em seu trabalho desenvolvido no campo com subsoladores com 3 tipos de hastes (reta vertical, reta inclinada e parabólica) e 2 tipos de pontas (com e sem asas) variando a velocidade durante os testes concluíram que:

- a área de solo mobilizado e a elevação do perfil do solo é maior em subsoladores com asas.
- a variação da velocidade não tem efeito significativo sobre a área de solo mobilizado para qualquer tipo de haste ou ponta.
- a haste reta vertical forneceu os piores resultados de mobilização do solo.

OWEN (1987) desenvolveu estudos com subsolador de haste reta vertical, com ponta de largura de 75 mm e um ângulo de ataque

de 20°. Foi testada também esta mesma ponta com uma asa de 260 mm de largura total, ângulo de abertura da asa de 40°, ângulo de envergadura da asa de 17° e um ângulo de ataque de 16°.

Os testes foram realizados em dois tipos de solo, argiloso e franco arenoso, e nas profundidades de 0,320 m, 0,520 m e 0,720 m.

Os resultados mostraram que existe uma profundidade crítica de operação para a subsolagem e esta foi maior no solo argiloso. Em termos da área de solo mobilizado foi verificado que o maior benefício do subsolador alado é aumentar a profundidade crítica permitindo assim um aumento da área de mobilização e a redução da densidade.

Através dos resultados observou-se que acima da profundidade crítica, as asas não trazem nenhum benefício e as áreas de mobilização ficaram muito próximas. Já as áreas de elevação do solo aumentaram com a colocação de asas.

Verificou-se também que o volume de solo mobilizado foi maior para o solo argiloso e que o subsolador alado foi mais eficaz para reduzir a densidade deste tipo de solo.

LANÇAS & BENEZ (1988) em trabalho desenvolvido no campo em condições semelhantes ao trabalho anterior (1987) verificaram que a velocidade do subsolador não influenciou significativamente nos resultados da força de tração.

LANÇAS & BENEZ (1989) desenvolveram um trabalho com três tipos de hastes, duas parabólicas e uma reta inclinada a 45°, verificando que os dois tipos de hastes parabólicas apresentaram maior mobilização do solo em relação à haste reta inclinada e esta apresentou a menor força média de tração. A resistência específica operacional (força/área média de mobilização do solo) apresentou diferença significativa entre as duas hastes parabólicas.

2.2 Transdutor.

Até o presente momento os trabalhos desenvolvidos no Brasil visando a determinação dos esforços atuantes em subsoladores e outras ferramentas agrícolas utilizam tradicionalmente transdutores que medem exclusivamente a força horizontal atuante, sendo assim muitas informações importantes deixam de ser obtidas devido a falta de um transdutor adequado.

Pensando nesta deficiência do sistema de aquisição de dados, principalmente no que diz respeito as ferramentas simétricas, como é o caso do subsolador, é que decidiu-se pela construção de um transdutor capaz de sanar este problema.

2.2.1 Sistemas de medição.

GODWIN (1982) descreve três sistemas de medição utilizados com frequência na avaliação de esforços em implementos agrícolas, os quais estão apresentados a seguir.

O primeiro sistema foi desenvolvido por ROGERS & TANNER (1955) e denominado dinamômetro de suspensão, pode ser usado para medir forças nos três planos principais. Sua construção é relativamente simples e o registro e análise das informações são simplificadas pois utiliza dinamômetros de tração/compressão comercialmente disponíveis. Cada dinamômetro move-se em todos os planos graças às articulações existentes.

Os erros devido a sensibilidade cruzada no dinamômetro são aceitáveis mas suas maiores limitações são os espaços necessários para construção do chassi principal e do subchassi e os erros envolvidos devido às articulações.

O segundo e o terceiro sistemas descritos, denominados viga em balanço e anel octogonal estendido, propostos por ROGERS & TANNER (1955) e GODWIN (1975) respectivamente, não apresentam articulações evitando assim erros devido a fricção nesses componentes. A viga em balanço é geralmente usada para a medição de uma força e um momento em uma dimensão, embora ROGERS & TANNER (1955) apresentem uma aplicação para o caso bidimensional. O anel octogonal foi inicialmente projetado para medir as forças em duas direções e momento devido a resultante.

A grande vantagem destes dois últimos sistemas é que eles podem ser construídos compactos o suficiente para serem usados em locais onde não é possível mudanças significativas no implemento e no seu sistema de acoplamento permitindo assim seu uso em vários componentes da ferramenta.

2.2.2 Nível de esforços nas ferramentas e material de construção dos transdutores.

SILVA et alli (1984) estudaram o efeito da profundidade de subsolagem sobre os esforços de tração em três modelos de subsoladores sem asas. Utilizando um dinamômetro de tração/compressão, trabalharam nas profundidades de 0,10 a 0,60 m. O esforço de tração máximo obtido nos testes estava em torno de 20 kN para a profundidade de 0,60 m.

SILVA et alli (1984) avaliando oito peças ativas de subsoladores sem asas, com relação ao esforço de tração necessário, trabalhando entre as profundidades de 0,33 m e 0,47 m obtiveram um esforço máximo de tração de cerca de 14 kN a 0,47 m de profundidade.

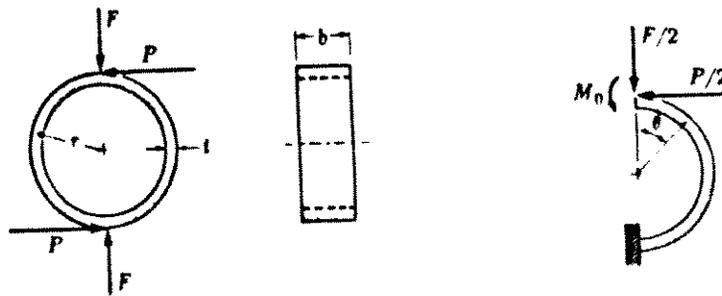
SPOOR & GODWIN (1978) trabalhando com quatro sub-

soladores diferentes sendo dois sem asas e com ângulo de ataque da haste de 65° e 82° e dois com largura da asa de 0,30 m e 0,42 m , encontraram o máximo valor da força de tração em torno de 43,66 kN a 0,42 m de profundidade para o subsolador alado com 0,30 m de largura da asa. Foram desenvolvidos também estudos em caixa de solo a profundidade de 0,15 m para avaliar o efeito da largura da asa sobre a força, mobilização do solo e resistência específica. Os resultados mostram que para qualquer condição a força vertical está entre 42% e 48% da força horizontal.

McKYES (1978) cita BALATON (1971) que descreve testes com um protótipo de subsolador alado o qual foi testado em solo franco argiloso com asas de largura variando entre 0,05 m e 1,00 m e nas profundidades de 0,20 a 0,70 m. Os resultados mostram valores do esforço de tração que variam de 10 kN para 0,50 m de profundidade e asa de 0,05 m de largura, a 33 kN para 0,50 m de profundidade com asa de 1,00 m de largura.

AHMED & GODWIN (1983) em estudos desenvolvidos para avaliar a influência da posição da asa, com relação a ponta do subsolador, sobre a penetração do subsolador e a mobilização do solo obtiveram o máximo valor para a força de tração em 22,8 kN à profundidade de 0,30 m com uma asa de 0,30 m de largura.

GODWIN (1982) comenta que os dois materiais mais comuns utilizados na construção de transdutores são as ligas de aço e de alumínio. O aço é utilizado onde a compacticidade e alta resistência são necessárias pois o aço possui cerca de três vezes mais resistência que o alumínio. Onde é necessário um transdutor leve, o alumínio é mais indicado pois sua densidade é um terço do aço. Outra vantagem do alumínio é seu menor módulo de elasticidade que proporciona transdutores mais sensíveis.



Legenda:

P = força horizontal

F = força vertical

r = raio médio do anel

t = espessura do anel

b = largura do anel

E = módulo de elasticidade do material

θ = posição angular do nó

Fonte: COOK & RABINOWICZ (1963)

Figura 2.2: Aplicação das forças em um anel.

2.2.3 Equações utilizadas no projeto de transdutores.

COOK & RABINOWICZ (1963) apresentam com detalhes a análise de um anel utilizado como célula de carga. O equacionamento utiliza a teoria da energia de deformação para determinar os nós, isto é, as posições onde não existe contribuição à deformação devido as outras componentes de força, apresentando também as equações da deformação do anel para os respectivos nós.

A análise baseou-se no esquema de distribuição de forças apresentadas na figura 2.2.

As equações obtidas para as deformações nos nós estão apre-

sentadadas a seguir:

$$\varepsilon_{39,6^\circ} = 2.31 \frac{Pr}{Ebt^2} \quad 2.2.1$$

$$\varepsilon_{90^\circ} = 1.09 \frac{Fr}{Ebt^2} \quad 2.2.2$$

Segundo os autores quando a rigidez horizontal máxima (na direção de P) não é necessária, anéis circulares presos ao sistema através de parafusos posicionados em $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 180^\circ$ são perfeitamente satisfatórios. Porém existe uma tendência do anel girar devido a força horizontal (P) e isto pode ser evitado fabricando-se um anel octogonal, isto é, a face externa do anel é dividida em oito partes retas de mesmo tamanho sendo que as partes superior e inferior apresentam uma espessura maior de forma a permitir uma melhor fixação.

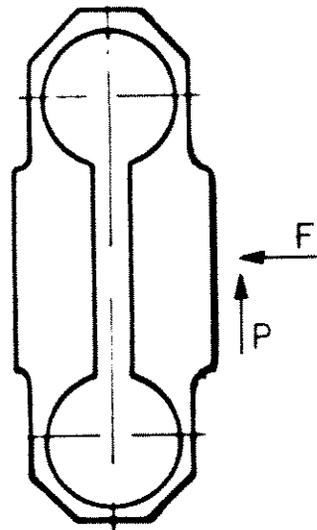
Para este tipo de anel não existe uma solução exata para a determinação dos nós e das equações de deformação. Soluções aproximadas foram obtidas através da análise fotoelástica, desta forma os nós foram encontrados em $\theta = 50^\circ$ para P e $\theta = 90^\circ$ para F e as equações aproximadas da deformação nos nós obtidas com este método, estão apresentadas abaixo.

$$\varepsilon_{50^\circ} = 1.4 \frac{Pr}{Ebt^2} \quad 2.2.3$$

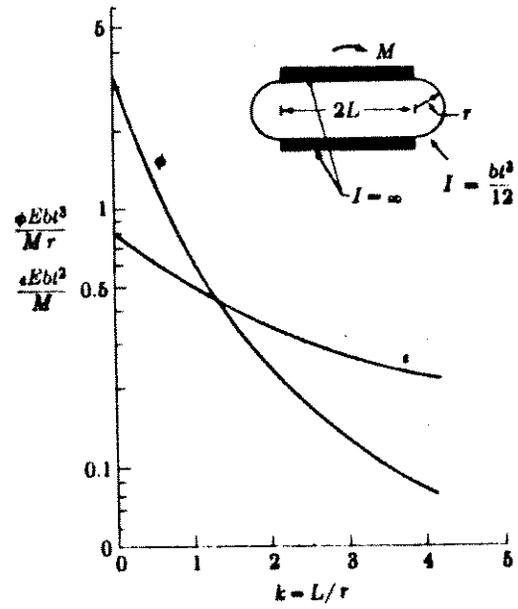
$$\varepsilon_{90^\circ} = 0,7 \frac{Fr}{Ebt^2} \quad 2.2.4$$

Os autores ressaltam ainda que se o anel octogonal for estendido, permite ganhar maior estabilidade e apresentam os resultados de uma análise de deformação (ε) e deflexão (ϕ) de um anel circular estendido (Figura 2.3).

O'DOGHERTY (1975) construiu um anel octogonal estendido para medir os esforços envolvidos em uma faca de corte da co-



2.3.a



2.3.b

Fonte: COOK & RABINOWICZ (1963)

Figura 2.3: Anel octogonal estendido (2.3.a) e relação entre k (L/r), deformação (ϵ) e deflexão (ϕ) para um anel circular estendido (2.3.b).

lhedora de beterraba açucarada. Ele apresenta as mesmas equações descritas por COOK & RABINOWICZ (1963), equações 2.2.3 e 2.2.4, com uma pequena diferença pois utiliza para força horizontal um valor de $\theta = 45^\circ$ não esclarecendo neste trabalho porque introduziu esta alteração.

No projeto do transdutor O'DOGHERTY define os valores do raio interno dos dois anéis do octogonal estendido, da distância entre os centros dos anéis, da largura do rasgo interno que liga os dois anéis, que proporciona flexibilidade ao octogonal, e da largura do mesmo, de maneira a satisfazer suas necessidades para a adaptação do conjunto transdutor/faca.

O único valor calculado é a espessura do anel, isto é, é utilizada a equação 2.2.3 assumindo ser esta adequada para o projeto pois resulta na maior deformação assumindo P e F iguais. Na equação 2.2.3, r é o valor do raio médio do anel que no caso foi assumido ser igual ao raio interno ocasionando assim uma diminuição de 4,5% no valor da espessura obtida.

CHANG & LAU (1986) descrevem a construção de um transdutor utilizando o anel octogonal estendido para medir o torque e as forças envolvidas em motores. São considerados os pontos $\theta = 50^\circ$ e $\theta = 90^\circ$, determinados por COOK & RABINOWICZ (1963), como os pontos para colagem dos extensômetros e as equações utilizadas são as mesmas. Salienta-se neste trabalho a importância da relação entre a distância entre centros dos anéis do octogonal (2L) e do diâmetro do anel (D) para dar rigidez ao anel octogonal estendido e considera-se os valores entre 3 e 5 mais apropriados para esta relação. A espessura do anel octogonal é considerada a dimensão mais crítica e deve ter precisão de 0.01 mm. O valor da espessura e a largura do anel octogonal podem ser usados para ajustar a sensibilidade do transdutor.

GODWIN (1975) descreve o projeto e os problemas encon-

trados no desenvolvimento de um transdutor utilizando anel octogonal estendido para leitura de duas componentes de força (vertical e horizontal) e um momento no plano das forças. O transdutor foi construído para medir os esforços em ferramentas simétricas de preparo de solo .

A equação utilizada para o dimensionamento foi aquela apresentada por COOK & RABINOWICZ (1963) para um anel circular estendido mostrado na figura 2.3.b assumindo que esta poderia ser utilizada para um anel octogonal estendido.

A equação utilizada neste trabalho esta apresentada a seguir:

$$\frac{\varepsilon E b t^2}{M} = 0,4 \text{ quando } k = 1,6 \quad 2.2.5$$

onde:

ε = deformação

E = módulo de elasticidade do material

b = largura do anel octogonal

t = espessura do anel octogonal

r = raio médio do anel octogonal

M = momento aplicado

$k = L/r$

$2L$ = distância entre os centros dos anéis

Na calibração do transdutor GODWIN detectou que com os extensômetros colados nos nós $\theta = 50^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ o transdutor apresentava linearidade entre o sinal de saída e a carga aplicada e a sensibilidade cruzada, isto é, a interferência de um canal no outro, era baixa mas o sinal de saída da força horizontal (F Figura 2.3.a) não era independente do ponto de aplicação da força, o que inviabilizava o uso do transdutor. Isto ocorria pois a parte superior do anel, maior que a distância entre centros dos anéis ($2L$), atuava na distribuição

de forças, alterando o ponto relativo de aplicação de carga.

Para resolver o problema foram colocadas duas placas, de comprimento menor que a distância entre centros dos anéis ($2L$), uma entre o transdutor e o sistema de suporte e outra entre o transdutor e a ferramenta mas com isso houve uma alteração na posição do nó relativo a força horizontal resultando em sérios problemas de sensibilidade cruzada.

GODWIN determinou experimentalmente a nova posição do nó, ponto onde a sensibilidade cruzada é mínima, através da colagem de extensômetros em diferentes posições angulares (θ) ao longo da face do octogonal. Os resultados indicaram que com a colocação das placas o nó mudou para $\theta = 34^\circ$ e nesta posição a sensibilidade cruzada foi desprezível e o sinal de saída da força permaneceu constante, independente do ponto de aplicação da mesma.

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS.

3.1 Materiais.

3.1.1 Subsolador e unidade de potência.

3.1.1.1 Carro porta subsolador.

Foi utilizado o carro modelo CPLS-1 da CIVEMASA S/A Indústria e Comércio que faz parte do modelo SMA-3 (subsolador médio de arrasto com três hastes subsoladoras). Este carro é composto de uma estrutura metálica, pneus 7.50x16, controle de profundidade do subsolador, através de um cilindro hidráulico de dupla ação, ligado ao sistema do trator e seu peso total é de aproximadamente 500 kgf.

3.1.1.2 Haste subsoladora.

Neste experimento foi utilizada apenas uma haste subsoladora montada no carro. Esta haste possui o formato curvo, espessura de 25,4 mm (1"), com borda não cortante e corresponde as hastes que

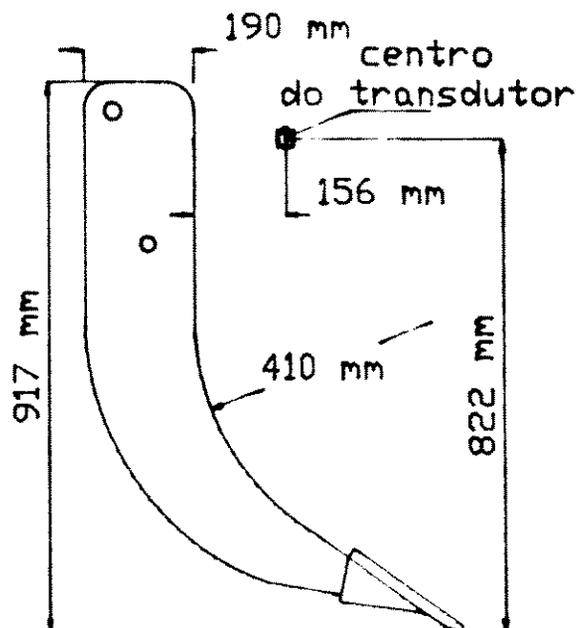


Figura 3.1: Haste e ponta do subsolador.

normalmente são utilizadas no subsolador leve de arrasto (SLA) da CIVEMASA com uma pequena alteração para permitir a fixação da mesma no SMA. A figura 3.1 ilustra a haste utilizada juntamente com a ponta.

3.1.1.3 Ponta do subsolador

Todas as alterações introduzidas neste subsolador e estudadas no presente trabalho foram executadas sobre as pontas as quais são fixadas na haste subsoladora através de um parafuso.

Além da ponta apresentada na figura 3.1, que é aquela na qual todas as alterações foram executadas e denominada aqui de tratamento 1, testou-se mais oito pontas que estão ilustradas nas figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 com as denominações de T2 a T9.

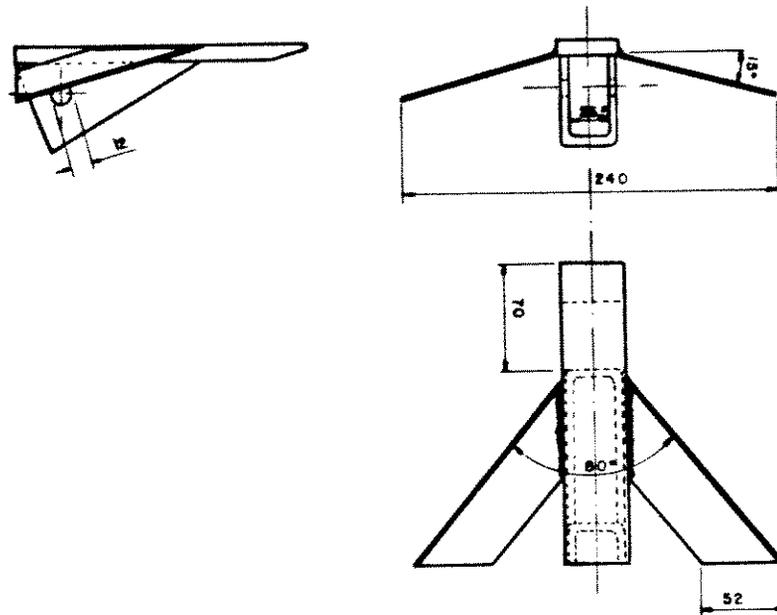


Figura 3.2: Tratamento 2.

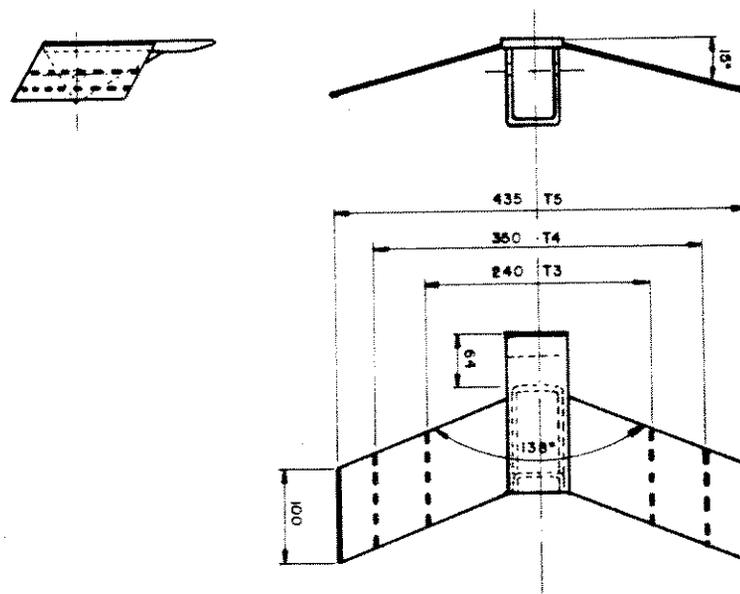


Figura 3.3: Tratamento 3, 4 e 5.

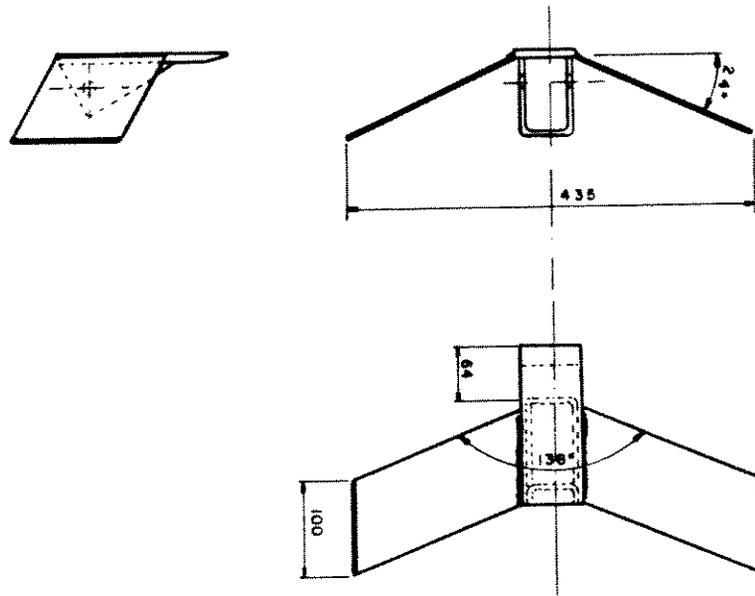


Figura 3.4: Tratamento 6.

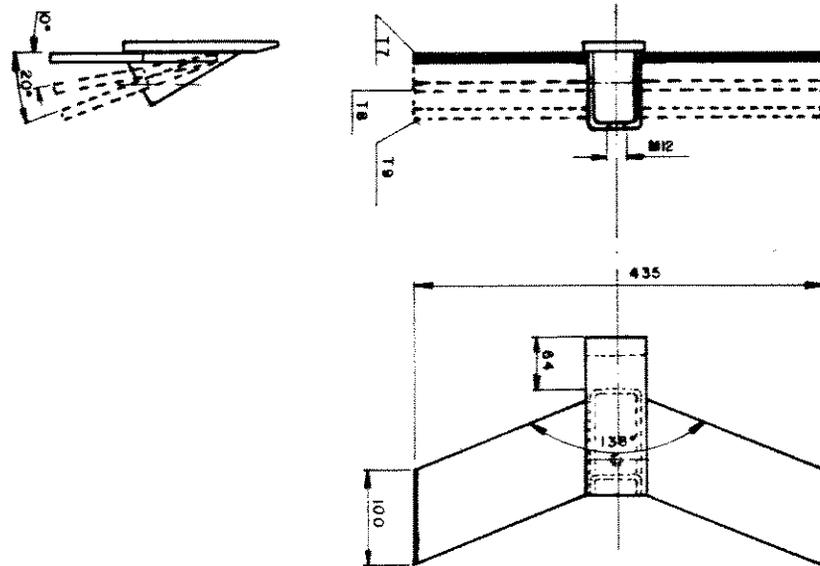


Figura 3.5: Tratamento 7, 8 e 9.

3.1.1.4 Unidade de potência.

Foi utilizada como unidade de potência para tracionar o subsolador um trator marca CBT, modelo 8440, 55 kW de potência, tração em duas rodas e pneus traseiros 18.4x15-30. Sobre este trator foi montada também toda a instrumentação utilizada no experimento.

3.1.2 Transdutor

A primeira etapa do projeto foi definir as necessidades às quais o transdutor deveria atender, podendo-se assim escolher o tipo de transdutor que melhor se adaptasse às nossas necessidades.

Como característica geral, um transdutor deve suportar as cargas impostas com deformações abaixo do limite de elasticidade e ao mesmo tempo ser sensível o suficiente para detectar pequenas cargas.

Neste caso específico, onde o transdutor vai ser utilizado com um subsolador, este deve ser capaz de medir duas componentes de força (vertical e horizontal) e o momento devido à resultante destas forças permitindo assim a determinação do ponto de aplicação desta sobre a ferramenta.

Além disso o transdutor deve ser compacto o suficiente para ser adaptado entre a ferramenta e o carro porta ferramenta, razoavelmente leve para ser transportado e acoplado e resistente para suportar as cargas impostas à ferramenta mantendo a linearidade dentro de sua faixa de operação.

Outra característica importante que o transdutor deve possuir é a capacidade de medir com precisão as componentes de força independente de ponto de aplicação das mesmas e possuir uma sensi-

Tabela 3.1: Propriedades do Aço 4340

CP	Limite de escoamento à 0,2%		Limite de resistência	
	kgf/mm^2	N/mm^2	kgf/mm^2	N/mm^2
1	70,8	694	100,4	985
2	70,1	688	100,5	985
Dureza do material: 27 Rc (Rockwell c)				
Módulo de elasticidade (E): $206 \times 10^3 N/mm^2$ ($21 \times 10^3 kgf/mm^2$)				

bilidade cruzada desprezível.

Avaliando-se as vantagens e desvantagens de cada tipo de transdutor concluiu-se que o transdutor mais adequado é o do tipo anel octogonal estendido devido a sua conveniência neste estudo, sua rigidez e sua alta sensibilidade.

Definido o tipo de transdutor passou-se a analisar o material a ser utilizado para sua construção. Alguns cálculos preliminares foram executados com dois materiais, aço 4340 e alumínio, avaliando-se as conveniências de um e de outro material concluiu-se que o aço seria o mais indicado pois possuindo uma resistência mais elevada possibilitaria a construção de um anel octogonal mais compacto com a vantagem adicional de poder-se aumentar ainda mais sua resistência, caso fosse desejado, através de um tratamento térmico.

O alumínio apesar de ser um material mais leve, seria inviável neste caso, pois um transdutor construído com este material de mesma capacidade de um com aço teria dimensões muito grandes.

Dois corpos de prova para ensaios de tração foram construídos com o material adquirido (Aço 4340) e suas características estão apresentadas na tabela 3.1.

Segundo HORGER (1965) que apresenta um gráfico relacionando o Aço 4340, em várias condições de têmpera e revenimento, com a dureza do material (Rockwell c), é possível aumentar a resistência deste aço podendo-se chegar a um limite de resistência de 1254 N/mm^2 (128 kgf/mm^2) e um limite de escoamento de 1117 N/mm^2 (114 kgf/mm^2) à uma dureza de 40 Rc. Por outro lado, analisando-se a fragilidade do material que a elevação da dureza proporciona, pode-se verificar que um valor de 40 Rc, apesar de parecer elevado, não acarreta risco nenhum ao transdutor.

Foram utilizados, como elemento sensor da deformação no anel octogonal, extensômetros elétricos de resistência da marca Kyowa-Eletronic Instruments Co.LTD com compensação de temperatura e resistência de $350,9 \Omega$.

3.1.3 Instrumentação.

A instrumentação utilizada na coleta e análise dos dados e na calibração do transdutor consistiu basicamente de:

- um condicionador de sinais marca Kyowa com 6 canais, 5 níveis de ajuste de sensibilidade e tensão de alimentação da ponte de $\pm 2,0 \text{ V}$.
- um indicador digital múltiplo para transdutores acoplado a um transdutor de tração/compressão de capacidade para 5 toneladas.
- um gravador de sinais em fita magnética da marca Hewlett-Packard com 4 canais de gravação, 6 velocidades e tensão de alimentação de 120 V .
- um analisador de sinais (Spectral Dynamics Signal Analyzer) da marca Scientific-Atlanta.
- três voltímetros e um inversor de tensão de 120 V para 12 V .

As especificações mais detalhadas de todos os materiais e

Tabela 3.2: Propriedades mecânicas do solo.

Tipo de solo	Teor de umidade (%)	Ângulo de atrito interno (ϕ) (graus)	Coefficiente de coesão (C) (kgf/cm^2)	Resistência a penetração (kgf/cm^2)	Peso específico dos grãos (γ) (g/cm^3) *
Argiloso	20,41	20	0,32	49	2,94

* NBR 6508

equipamentos utilizados estão apresentadas no apêndice B.

3.1.4 Solo utilizado no experimento.

O experimento foi conduzido no campo experimental do Centro de Pesquisas Químicas, Biológicas e Agrícolas (CPQBA) da Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP em um solo de textura argilosa, segundo o triângulo de classificação do USDA (United States Department of Agriculture).

As análises físicas e mecânicas do solo foram realizadas pelo Laboratório de Solos e Laboratório de Mecânica de Solos da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP e pelo Laboratório de Mecânica de Solos do Departamento de Engenharia de Transportes da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP.

As tabelas 3.2 e 3.3 apresentam as propriedades mecânicas e físicas do solo.

3.1.5 Medidor do perfil de solo mobilizado.

Foi construído especificamente para este trabalho um equipamento denominado perfilômetro, utilizado para medir o perfil do solo resultante na superfície bem como o perfil resultante em pro-

Tabela 3.3: Propriedades físicas do solo.

Granulometria (%) *				
Bloco	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa
I	56	13	16	9
II	56	12	15	9
III	59	10	15	8
a diferença para 100 % corresponde a areia muito fina				
Densidade global (g/cm^3)				
Profund. (cm)	I	II	III	Média
0 - 10	1,23	1,28	1,32	1,28
10 - 20	1,23	1,17	1,20	1,28
20 - 30	1,23	1,17	1,20	1,20
Média	1,23	1,25	1,27	1,25
Teor de umidade (%)				
0 - 10	19,13	18,69	19,56	19,13
10 - 20	20,14	19,49	20,12	19,92
20 - 30	22,70	21,54	22,29	22,18
Média	20,66	19,91	20,67	20,41
	Limite de liquidez (%) NBR 6451	Limite de plasticidade (%) NBR 7180	Índice de plasticidade (%) NBR 7180	
	40,7	28,3	12,4	

* Determinada pelo método da pipeta e classif. textural segundo o USDA

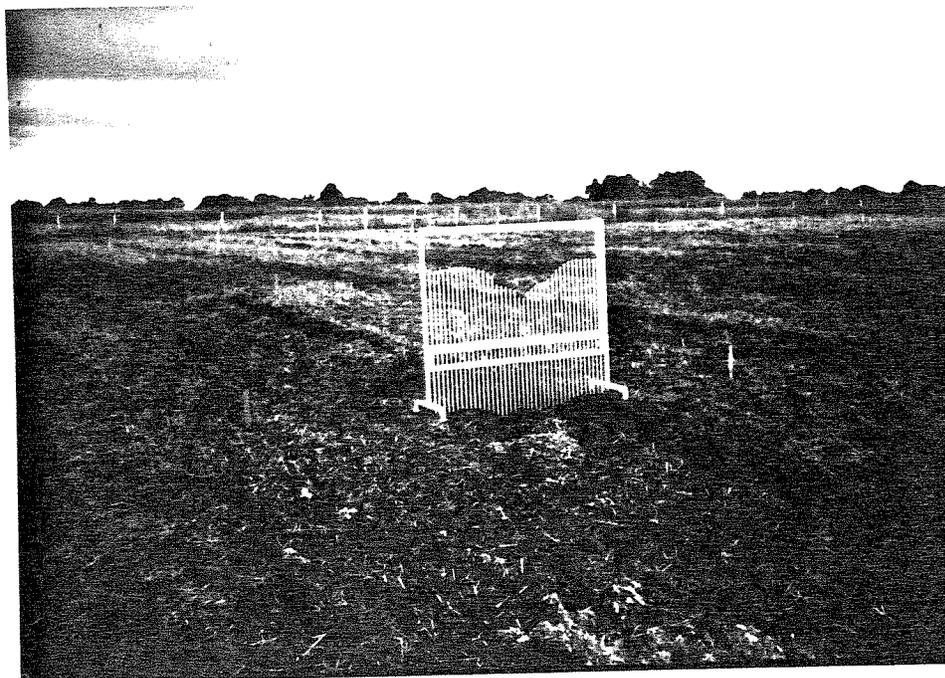


Figura 3.6: Perfilômetro.

fundidade. Este perfilômetro possui 40 hastes circulares de alumínio espaçadas entre si de 35 mm montadas em um estrutura também de alumínio com largura total de 1.52 m. Esta estrutura possui ainda um sistema de trava das hastes que facilita o manuseio do equipamento e o transporte.

A figura 3.6 ilustra o perfilômetro construído quando em uso nos experimentos.

3.2 Métodos.

A metodologia utilizada no desenvolvimento do projeto do transdutor e no desenvolvimento dos experimentos com o subsola-

dor são bem distintas, portanto dividiu-se este subcapítulo em duas partes, uma relativa ao trabalho experimental com o subsolador e a outra relativa ao transdutor.

3.2.1 Subsolador.

3.2.1.1 Delineamento experimental.

O experimento foi conduzido sobre um terreno bastante plano em 9 tratamentos delineados em 3 blocos casualizados com uma repetição por bloco totalizando assim 27 parcelas. A figura 3.6 ilustra o campo experimental utilizado.

Cada parcela possuiu 4 m de largura por 90 metros de comprimento sendo que os primeiros 30 metros foram destinados a regulação da profundidade da ferramenta e também para que a mesma entrasse em regime normal de trabalho. Os registros de força, velocidade e outros foram efetuados nos 50 metros seguintes e os últimos 10 metros ficaram para a saída do conjunto trator/subsolador e para manobras. Foi deixada também uma faixa de 4 metros de largura entre blocos para o trânsito do trator.

O delineamento experimental adotado tomou como base o trabalho de SPOOR & GODWIN (1978) que realizaram um experimento semelhante com subsoladores utilizando 3 blocos casualizados com uma repetição por bloco e o de LANÇAS & BENEZ (1987) que utilizaram 4 blocos casualizados com uma repetição por bloco e levando também em consideração a necessidade de realizar todos os experimentos em um único dia.

As análises estatísticas foram desenvolvidas segundo GOMES (1985), STEEL (1981) e com auxílio do programa SAS (SAS

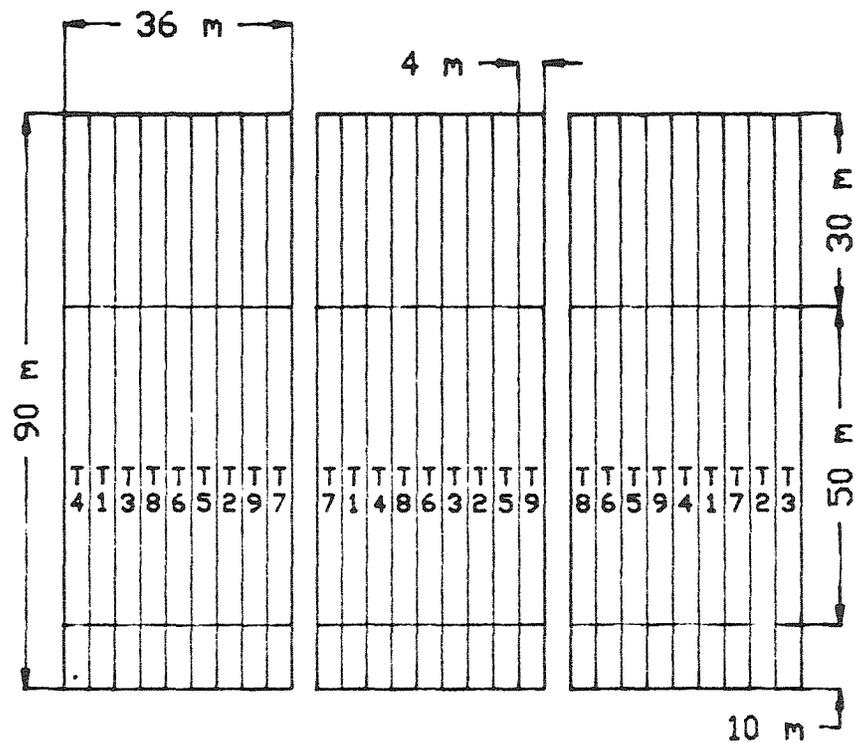


Figura 3.7: Delineamento experimental.

Institute Inc.).

A figura 3.7 ilustra o delineamento experimental adotado.

3.2.1.2 Determinação das propriedades do solo.

a) Teor de umidade.

O teor de umidade foi obtido pelo método tradicional da estufa a partir de três amostras de solo por parcela, que foram coletadas nas profundidades de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 30 cm.

b) Densidade global do solo.

Foram coletadas amostras de solo em três pontos equidistantes ao longo da diagonal de cada bloco com o uso de um anel volumétrico de borda cortante com 5,4 mm de diâmetro e 5,4 mm de altura. Em cada ponto retirou-se uma amostra entre as profundidades 0 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 30 cm e estas foram secas em estufa durante 24 horas a 105°C e depois pesadas. A densidade de solo base seca foi obtida através da relação entre o peso seco da amostra e o volume do anel coletor.

c) Ângulo de atrito interno do solo e coeficiente de coesão.

Para a determinação destes valores foram coletadas duas amostras em todo o campo experimental. Estas amostras foram obtidas colocando-se uma caixa metálica quadrada de 20 cm de lado sem fundo sobre o solo. Cuidadosamente retirou-se o solo ao redor da caixa fazendo-se com que esta descesse naturalmente até ser preenchida totalmente e em seguida sua base foi cuidadosamente cortada tendo-se assim uma amostra de solo intacta no interior. Esta caixa foi então colocada sobre uma base de madeira para ser desmontada, protegendo-se a amostra de solo com parafina e faixas de pano para que sua estrutura não se alterasse durante o transporte para o laboratório.

A figura 3.8 ilustra a amostra coletada no campo para a determinação do coeficiente de coesão (C) e do ângulo de atrito interno (ϕ) do solo.

Devido a presença de muitas raízes nas amostras coletadas e na impossibilidade de extrair subamostras cilíndricas para realização do ensaio triaxial optou-se pela realização de um ensaio de cisalhamento direto para a determinação destas propriedades do solo.

d) Resistência a penetração do solo

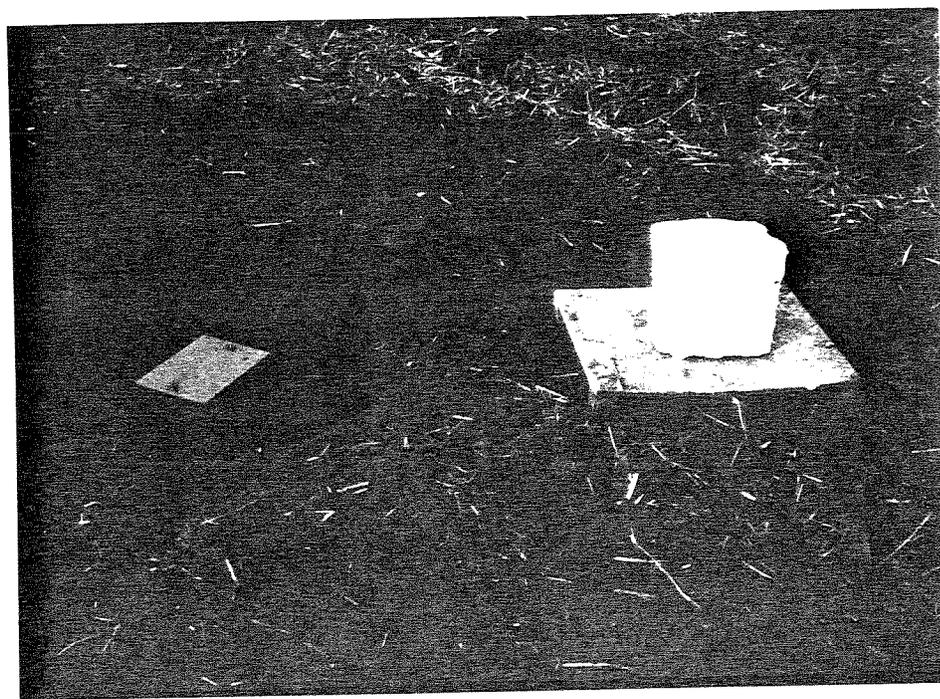


Figura 3.8: Amostra de solo para C e ϕ .

Para a determinação da resistência a penetração utilizou-se um penetrógrafo marca Soil Control, modelo SC 60 com um cone com ângulo de 30° e área da base de 0,20 pol^2 .

Em cada parcela foram registradas três medidas uma no centro da parcela e outras duas distantes 10 m das extremidades, inicial e final, da parcela.

O solo apresentou uma camada compactada em torno da profundidade de 7 cm a partir da qual não foi possível a penetração do cone.

3.2.1.3 Tratamentos.

Para o desenvolvimento dos experimentos visando atender os objetivos do presente trabalho, os tratamentos foram divididos em três grupos com o objetivo de analisar separadamente as influências da largura da asa, do ângulo de envergadura da asa e do ângulo de ataque da asa sobre as forças atuantes na ferramenta e a resistência específica.

Todos os tratamentos foram montados sobre uma ponta básica que é fornecida normalmente pelo fabricante junto com o subsolador. Como um dos objetivos deste trabalho é trazer benefícios concretos ao fabricante do equipamento, qualquer benefício advindo desta pesquisa poderá ser facilmente implantada na linha de produção deste equipamento sem grandes alterações e com custos reduzidos.

Não foram encontradas na revisão de literatura referências com relação ao ângulo de envergadura da asa portanto estas modificações além de trazerem benefícios com relação ao desempenho do subsolador poderão servir como subsídio para futuras pesquisas.

Em cada grupo de tratamento foi utilizada a ponta básica como testemunha e todos os grupos estão descritos a seguir de forma sucinta e apresentados resumidamente na tabela 3.4.

a) Largura da asa.

Neste grupo, que corresponde aos tratamentos 1 a 5 (T1, T2, T3, T4, T5), foram fixados o ângulo de ataque da asa em 35° e o ângulo de envergadura da asa em 15° . Estes ângulos coincidem com os ângulos da ponta alada produzida pelo fabricante.

O tratamento 1 corresponde a ponta básica (testemunha) que apresenta uma largura de 40 mm, ângulo de ataque de 35° e uma altura de levante do solo de 95 mm.

O tratamento 2 corresponde a ponta alada produzida pelo fabricante e apresenta as seguintes características:

- largura da asa = 240 mm
- ângulo de abertura da asa = 80°
- altura de levante da asa = 35 mm
- distância horizontal entre a asa e a ponta = 57 mm

Os demais tratamentos foram propostos para este estudo e apresentam asas com geometria diferente do tratamento 2.

As larguras das asas estabelecidas para estes tratamentos que são 240 mm, 350 mm e 435 mm para os tratamentos 3, 4 e 5 respectivamente, visam avaliar a influência destas no comportamento dos parâmetros medidos bem como a influência da diferença de formato de asa entre os tratamentos 2 e 3. As demais características das asas dos tratamentos 3, 4 e 5 são iguais e estão apresentadas a seguir:

- ângulo de abertura da asa = 138°
- altura de levante da asa = 57 mm

- distância horizontal entre a asa e a ponta = 52 mm

Os resultados obtidos por SPOOR & GODWIN (1978) e por AHMED & GODWIN (1983) mostram que o ângulo de abertura da asa e a distância desta em relação à ponta do subsolador não têm influência significativa nas forças e nem na área de solo mobilizado portanto estes valores foram assumidos neste trabalho buscando o melhor posicionamento para fixação desta na ponta básica.

As figuras 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam os tratamentos 1 a 5.

b) Ângulo de envergadura da asa.

Este grupo corresponde aos tratamentos 1, 5, 6 e 7 nos quais foram fixados para a asa o ângulo de ataque em 35° e a largura em 435 mm, pois sendo esta a condição extrema os efeitos devido a envergadura da asa seriam acentuados.

O ângulo de abertura da asa, a altura de levante do solo e a distância horizontal entre a asa e a ponta do subsolador são as mesmas dos tratamentos 3, 4 e 5.

Os ângulos de envergadura da asa para os tratamentos 5, 6 e 7 são 15° , 24° e 0° respectivamente.

É importante ressaltar que o ângulo de 15° não foi escolhido porque coincide com o adotado pelo fabricante mas sim porque neste ângulo todo o comprimento da asa permanece na horizontal o que confere uma característica desejada para este estudo.

O fator limitante para a escolha do ângulo de envergadura de 24° esta ligado ao fato de que ângulos maiores fariam com que a extremidade inferior da asa ultrapassa-se a profundidade atingida

pela ponta do subsolador.

c) Ângulo de ataque da asa.

Neste grupo, que corresponde aos tratamentos 1, 7, 8 e 9 foram fixadas a largura da asa em 435 mm e o seu ângulo de envergadura em 0° .

Os ângulos de ataque de 35° , 25° e 15° foram adotados para os tratamentos 7, 8 e 9 respectivamente objetivando encontrar o melhor ângulo para o posicionamento da asa na ponta do subsolador bem como avaliar a influência da altura de levante da asa sobre os parâmetros medidos. O ângulo de abertura da asa e a distância horizontal entre esta e a ponta do subsolador são as mesmas dos tratamentos 3, 4 e 5.

Com a variação do ângulo de ataque houve uma variação também da altura de levante da asa que assumiu os valores 42 mm e 26 mm para os tratamentos 8 e 9 respectivamente.

Em todos os tratamentos, T1 a T9, a profundidade de subsolagem foi regulada em torno de 0,30 m seguindo a recomendação do fabricante do subsolador.

3.2.1.4 Experimentos.

a) Determinação da área transversal de solo mobilizado.

O perfil de solo mobilizado tanto em profundidade como na superfície foi determinado em dois pontos distintos, um no centro e o outro distante 10 m da extremidade final da parcela, com o auxílio do perfilômetro.

Tabela 3.4: Tratamentos.

Trat.	largura da asa (mm)	ângulo de ataque (graus)	ângulo de envergadura (graus)	ângulo de abertura (graus)	altura de levante (mm)	distância entre a asa e a ponta (mm)
T1	sem asa	-	-	-	-	-
T2	240	35	15	80	35	57
T3	240	35	15	138	57	52
T4	350	35	15	138	57	52
T5	435	35	15	138	57	52
T6	435	35	24	138	57	52
T7	435	35	0	138	57	52
T8	435	25	0	138	42	52
T9	435	15	0	138	26	52

Antes da passagem do subsolador não foi necessário determinar o perfil do solo pois este apresentava-se plano.

Após a passagem colocou-se o perfilômetro transversalmente ao solo mobilizado na superfície e em seguida foram feitas as leituras das alturas de cada haste e transcritas em uma planilha.

Para a medição do perfil do solo em profundidade marcou-se os pontos onde a base do perfilômetro foi apoiada e em seguida retirou-se o aparelho para escavar o solo. Este foi retirado manualmente em um comprimento de aproximadamente 0,50 m ao longo do percurso até que a camada mais resistente fosse encontrada, isto é, a camada onde não ocorreu o distúrbio devido ao subsolador. Em seguida colocou-se o perfilômetro na mesma posição utilizada anteriormente e realizou-se a leitura da profundidade atingida pelas hastes.

Os dados obtidos na forma de coordenadas cartesianas foram introduzidos em um programa de computador que forneceu como resultados principais o perfil do solo mobilizado, a área transversal de mobilização do solo e a profundidade máxima atingida.



Figura 3.9: Subsolador e transdutor.

b) Montagem dos equipamentos.

O transdutor construído foi montado entre o subsolador e o carro porta ferramenta como pode ser visto na figura 3.9.

Os instrumentos utilizados para o condicionamento, registro e controle dos sinais produzidos no transdutor foram colocados no trator e constituíram-se basicamente do condicionador de sinais, do gravador, dos voltímetros e do inversor de tensão. A figura 3.10 ilustra a montagem dos instrumentos sobre o trator.

A utilização destes equipamentos no campo exigiu a montagem de uma estrutura especial capaz de reduzir as vibrações oriundas do trator sobre os mesmos.

c) Medição e análise dos esforços.

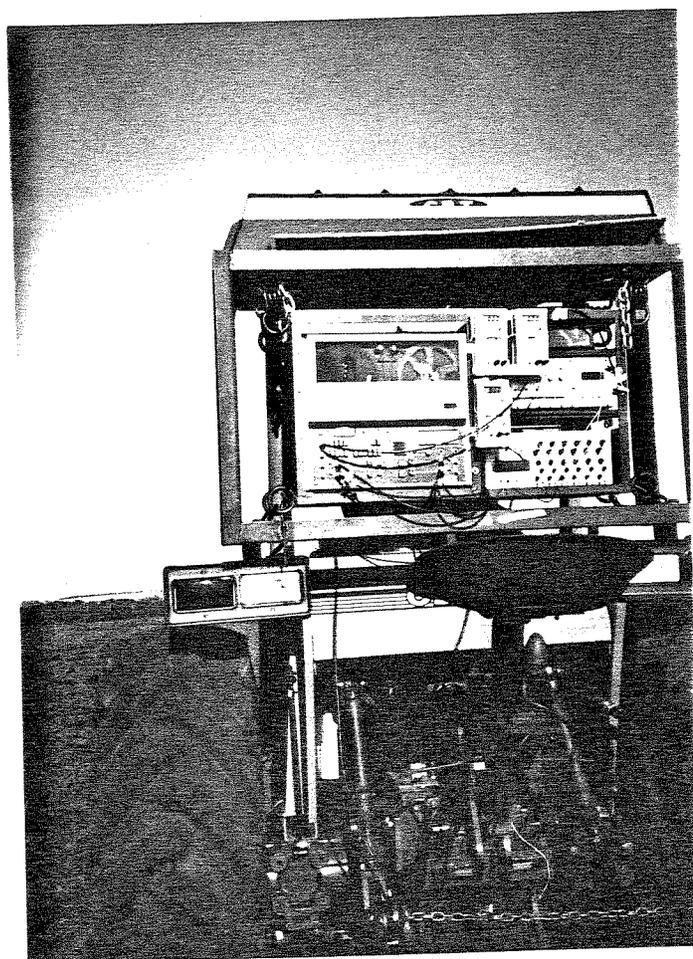


Figura 3.10: Instrumentação.

Para cada teste foi definido um sinal de gravação que permitiu identificar com precisão dentro da fita quando começava e terminava o teste e utilizou-se também o canal de voz para uma identificação mais grosseira.

Cada percurso de gravação foi de 50 metros sendo que antes do teste começar os canais foram zerados e o sinal de calibração de cada um gravado na fita possibilitando assim, a correção posterior dos valores registrados caso algum canal saísse de sua calibração original durante os testes. Em todos os testes a velocidade de gravação da fita foi de 0,19 m/s (7 1/2 pol/s).

Todos os testes foram realizados em um único dia para evitar que os resultados fossem influenciados pela variação dos parâmetros do solo que poderiam ocorrer.

A análise de todos os sinais gravados na fita foi realizada pelo analisador de sinais (Spectral Dynamics Signal Analyser) do Grupo de Projetos Mecânicos (GEPRON) ligado a Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

Este equipamento fornece como resultados as forças e momentos médios durante o percurso com seus respectivos desvios, a distribuição percentual de ocorrência das forças e momentos, o número de Kurtosis (relação desta distribuição com a distribuição normal de probabilidade) e o espectro de frequência dos sinais.

d) Determinação da velocidade média do trator.

Em todos os testes o trator trabalhou em primeira marcha reduzida com 1700 rpm no motor.

A velocidade média do trator foi determinada dividindo-se o percurso de 50 m pelo tempo gasto para percorrê-lo que foi crono-

metrado em cada teste.

3.2.2 Transdutor.

3.2.2.1 Dimensionamento do anel octogonal estendido.

Para o dimensionamento deste transdutor considerou-se uma profundidade de 0,40 m como a condição limite de trabalho da ferramenta e da análise dos trabalhos já desenvolvidos verificou-se que um valor de 19,60 kN poderia ser adotado para a força máxima de tração (força horizontal) e um valor de 7,84 kN para a força máxima vertical que representa 40% da força horizontal, sendo este valor próximo do encontrado por SPOOR & GODWIN (1978).

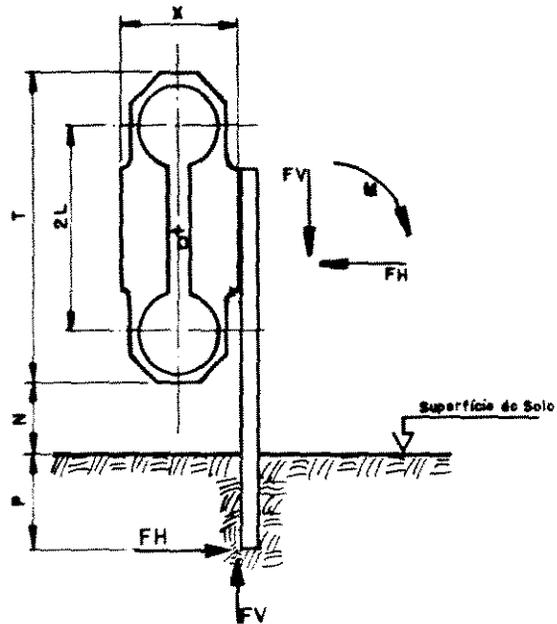
A equação 2.2.5 utilizada por GODWIN (1975) para o dimensionamento do anel octogonal estendido exige o conhecimento prévio do momento aplicado. Sendo assim procurou-se determiná-lo utilizando as forças definidas anteriormente aplicadas em uma ferramenta qualquer como mostra a figura 3.11 tendo-se desta forma um valor aproximado do momento para utilizá-lo no dimensionamento.

Temos então:

$$M_o = FH.(N + P + T/2) + FV.x/2 \quad 3.2.1$$

$$M_o = 13,05 \text{ kN.m}$$

É interessante notar que na equação utilizada por GODWIN (1975) quase todos os parâmetros de dimensionamento estão ligados de alguma forma e o mesmo não ocorre com O'DOGHERTY (1975) que adotou diversos valores para o dimensionamento calculando apenas o valor da espessura do anel (t).



Legenda:

$$T = 0,30 \text{ m} \quad F_H = 19,60 \text{ kN}$$

$$x = 0,08 \text{ m} \quad F_V = 0,4.F_H = 7,84 \text{ kN}$$

$$N = 0,10 \text{ m}$$

$$P = 0,40 \text{ m}$$

Figura 3.11: Forças aplicadas na ferramenta

Utilizando a equação proposta por GODWIN mas mantendo os valores de k variáveis, ver gráfico da figura 2.3.b, a equação 2.2.5 resulta em:

$$\frac{\sigma_e \cdot b \cdot t^2}{M_o \cdot F_s} = Y \text{ quando } k = X \quad 3.2.2$$

onde:

$$Y = 0,40 \text{ para } X = k = 1,6$$

$$0,30 \text{ para } X = 2,4$$

$$0,27 \text{ para } X = 3,0$$

$$0,21 \text{ para } X = 4,0$$

e σ_e = tensão de escoamento do material

$$\sigma_e = \varepsilon \cdot E$$

ε = deformação

E = módulo de elasticidade do material

b = largura do anel octogonal

t = espessura do anel octogonal

M_o = momento aplicado

$$k = L/r$$

2L = distância entre os centros dos anéis

r = raio médio do anel octogonal

F_s = fator de segurança

É importante salientar que a recomendação de CHANG & LAU (1986) para usar valores de L/r entre 3 e 5 para garantir suficiente rigidez ao anel octogonal é plenamente satisfatória pois observando-se a figura 2.3.b ou os valores acima verifica-se que estes são inversamente proporcionais e na medida em que o valor de k aumenta o comprimento total do anel estendido também aumenta diminuindo sua largura (b), desde que esteja fixa a espessura (t), proporcionando assim uma maior rigidez ao transdutor com relação ao momento aplicado.

Adotando-se este procedimento para o dimensionamento da

célula de carga apenas dois valores precisam ser assumidos um deles é a largura do rasgo interno do anel octogonal estendido que liga os dois anéis, seu valor é adotado de acordo com as necessidades de fixação do transdutor na ferramenta e na base e principalmente com relação as possibilidades de deformação do mesmo, o outro valor é a altura da saliência da base e do topo do transdutor a qual, segundo GODWIN (1975), garante a independência na medição das forças com relação ao ponto de aplicação das mesmas.

As relações entre a largura e o raio do anel do transdutor devem ainda ser tais que permitam a colagem dos extensômetros internamente ao anel com relativa facilidade.

Utilizando-se a equação 3.2.2 e considerando -se $\sigma_e = 1117 \text{ N/mm}^2$, um valor de $k = 2,4$ e um fator de segurança $F_s = 2,8$ próximo do recomendado por FAIRES (1982) para uma carga repetida, gradual e em um sentido chegou-se aos valores de $b = 90 \text{ mm}$ para a largura do anel octogonal estendido e $t = 10,5 \text{ mm}$ para a espessura. Foram adotadas para a largura do rasgo interno e altura da saliência 12 mm e 5 mm respectivamente. A figura 3.12 apresenta todas as dimensões do projeto final do anel octogonal estendido.

Após a usinagem do anel octogonal este foi submetido a um tratamento térmico, têmpera e revenimento, para que atingisse os valores de resistência utilizados nos cálculos, ou seja que a dureza final estivesse em torno de 40 Rc que corresponde teoricamente a um valor de $\sigma_e = 1117 \text{ N/mm}^2$. Foram tratados simultaneamente três corpos de prova para ensaio de tração para obter-se no final as características do material tratado termicamente.

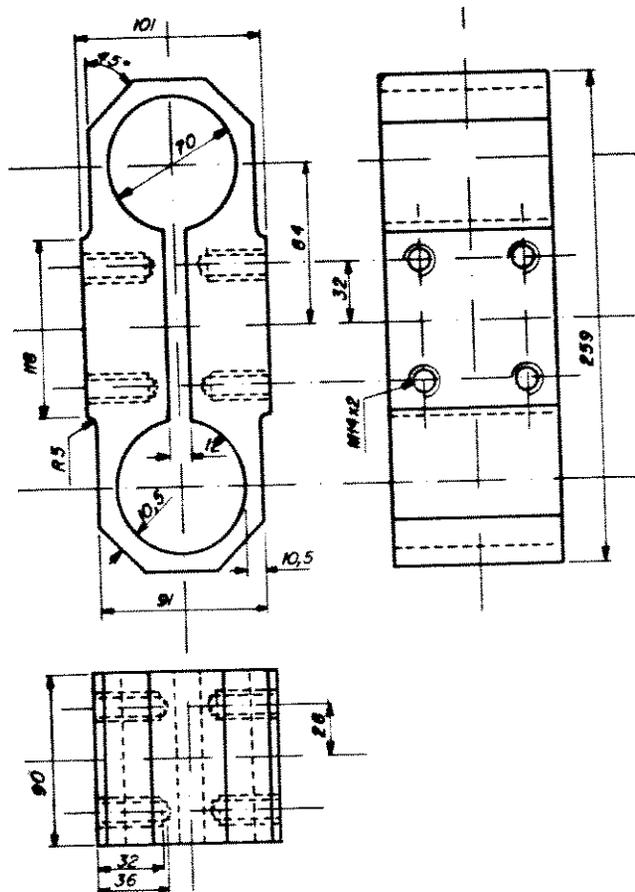


Figura 3.12: Dimensões do anel octogonal estendido.

3.2.2.2 Determinação dos pontos de colagem dos extensômetros.

Com objetivo de averiguar os resultados obtidos experimentalmente por GODWIN (1975) e determinar os pontos ideais para colagem dos extensômetros foi utilizado o método de elementos finitos, proposto em SEGERLIND (1984), como ferramenta para analisar a distribuição de tensões no transdutor quando sujeito as forças, horizontal e vertical, e ao momento devido a resultante destas forças.

Um programa de elementos finitos denominado *COSMOS/M^R* foi utilizado para os cálculos das tensões no transdutor. Como a acuracidade dos resultados está ligada ao modelamento adequado do mesmo, as regiões de maior interesse ao estudo devem apresentar um maior número de elementos de forma a permitir uma análise mais precisa da distribuição de tensões.

Utilizou-se 336 elementos sólidos retangulares, 88 elementos de membrana com espessura de $2,54 \times 10^{-9} mm$ e um total de 790 pontos no modelamento do transdutor e ao longo de sua largura foram colocadas duas camadas de elementos correspondendo cada uma a metade da largura total.

A figura 3.13 mostra o transdutor modelado, podendo-se observar que as regiões de interesse, que são os anéis nas extremidades do octogonal, possuem uma malha mais fina. As três faces laterais destes anéis foram revestidas com os elementos de membrana cuja espessura é muito pequena para influenciar nos resultados mas sua colocação facilitou demasiadamente a análise da distribuição de tensões nesta região.

O procedimento básico adotado para a análise da distribuição de tensões no modelo foi aplicar separadamente as forças, horizontal e vertical, e o momento na mesma direção e sentido das cargas

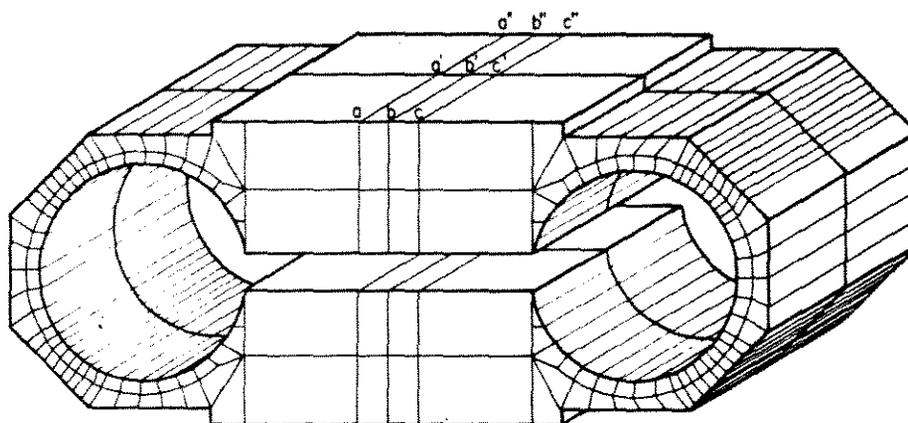


Figura 3.13: Modelo com elementos finitos do anel octogonal estendido.

aplicadas sobre o transdutor da figura 3.11, podendo-se desta forma localizar as regiões de maior e menor concentração de tensões.

Em todas as análises foram restringidos todos os movimentos, horizontal, vertical e lateral dos pontos da face de apoio do transdutor além da restrição ao movimento de rotação estabelecida para todos os pontos do modelo. Para cada condição de carga o programa forneceu como resultados as tensões de Von Mises em todos os pontos e no centro dos elementos.

Para a análise com relação a força horizontal aplicou-se três forças de 16,33 kN nos pontos b, b' e b'' da figura 3.13 produzindo assim uma força horizontal total (FH) de 49 kN que é 2,5 vezes superior a utilizada no dimensionamento pois desta forma tem-se também uma idéia da resistência do anel octogonal.

Da mesma forma foi aplicada uma força vertical total (FV) de 19,60 kN dividida em três componentes de 6,53 kN aplicadas nos mesmos pontos da força horizontal.

Para produzir um momento de 13,05 kN.m na posição cen-

tral do transdutor foram necessárias a aplicação de 6 forças na direção horizontal sendo três forças aplicadas a 0,10 m da posição central do transdutor nos pontos c, c' e c'' apresentados na figura 3.13 e outras três forças de sentido contrário aplicadas a -0,10 m da posição central correspondente aos pontos a, a' e a'' da figura 3.13 gerando assim o momento desejado.

3.2.2.3 Colagem dos extensômetros e montagem do circuito.

Os extensômetros utilizados para medir a força vertical (FV) foram colados nas posições $\theta = 34^\circ$ e $\theta = 124^\circ$ (figura 3.14) em cada um dos anéis do octogonal estendido, onde os efeitos da deformação devido a força horizontal tendem a zero.

Os extensômetros utilizados para medir a força horizontal (FH) e o momento (M) devido a resultante das forças foram colados a 90° em ambos os anéis do octogonal estendido, onde a influência da força vertical é mínima.

O circuito de ligação dos extensômetros utilizou o princípio de ponte de WHEATSTONE para medição, sendo montadas ao todo três pontes completas utilizadas para medir separadamente as forças, vertical e horizontal, e o momento devido a resultante das forças.

Uma camada de verniz e várias camadas de borracha de silicone foram aplicadas sobre os extensômetros e os terminais como proteção mecânica.

A figura 3.14 apresenta as posições de colagem dos extensômetros no transdutor e a ligação entre os mesmos formando as pontes de WHEATSTONE.

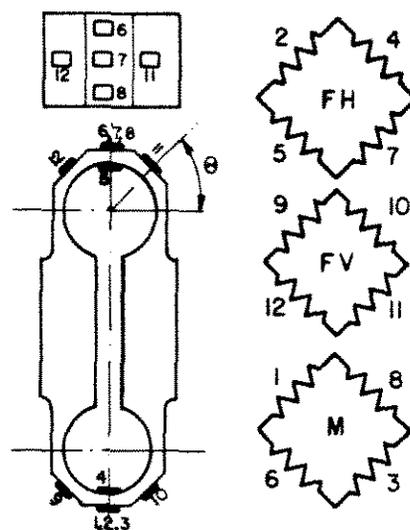


Figura 3.14: Posição e circuito de ligação dos extensômetros.

3.2.2.4 Calibração do transdutor.

Devido a dificuldade de obtenção de pesos calibrados de até 19,60 kN, que corresponde a força horizontal máxima para qual o transdutor foi dimensionado, utilizou-se um outro transdutor de tração/compressão com capacidade de 49 kN (5 ton) acoplado a uma prensa hidráulica, para efetuar a calibração.

Para diminuir os erros principalmente devido a histerese do transdutor de tração/compressão, a curva de calibração deste foi levantada através de uma Máquina Universal de Ensaios.

Para a calibração, as três pontes foram ligadas em três canais do condicionador de sinais e as saídas destes foram ligadas em três voltímetros para leitura da correspondente voltagem em cada ponte quando as cargas de calibração eram aplicadas.

Na determinação das curvas de calibração utilizou-se um

programa desenvolvido por GREGORY & FEDLER (1986) que fornece, para um dado modelo matemático, o coeficiente de correlação, o nível de significância e os coeficientes do modelo. Em nosso caso específico o programa foi alimentado com um modelo linear, $Y = A1 + A2.X1$.

A figura 3.16 mostra o condicionador, os voltímetros e o Indicador Digital Múltiplo ligado ao transdutor de 5 ton.

a) Calibração da força horizontal.

Para a calibração desta componente o transdutor foi carregado de 0 kN a 19,6 kN e descarregado em seguida. O incremento de carga durante o carregamento e descarregamento foi de 1,962 kN e a cada incremento os valores da voltagem nos três voltímetros eram anotados simultaneamente. O carregamento/d Descarregamento permite determinar a histerese do transdutor e a leitura da voltagem resultante em cada uma das pontes permite a verificação da interação entre elas, isto é, a sensibilidade cruzada. Foram realizadas três repetições de calibração.

A figura 3.15 mostra a montagem do transdutor na prensa para a calibração da força horizontal (FH).

b) Calibração da força vertical.

O mesmo procedimento utilizado anteriormente para a calibração da força horizontal foi adotado para a calibração da força vertical sendo que neste caso o carregamento/d Descarregamento foi realizado de 0 kN a 7,84 kN com incrementos de 0,981 kN.

A figura 3.16 mostra a montagem do transdutor na prensa para a calibração desta componente juntamente com os equipamentos utilizados.

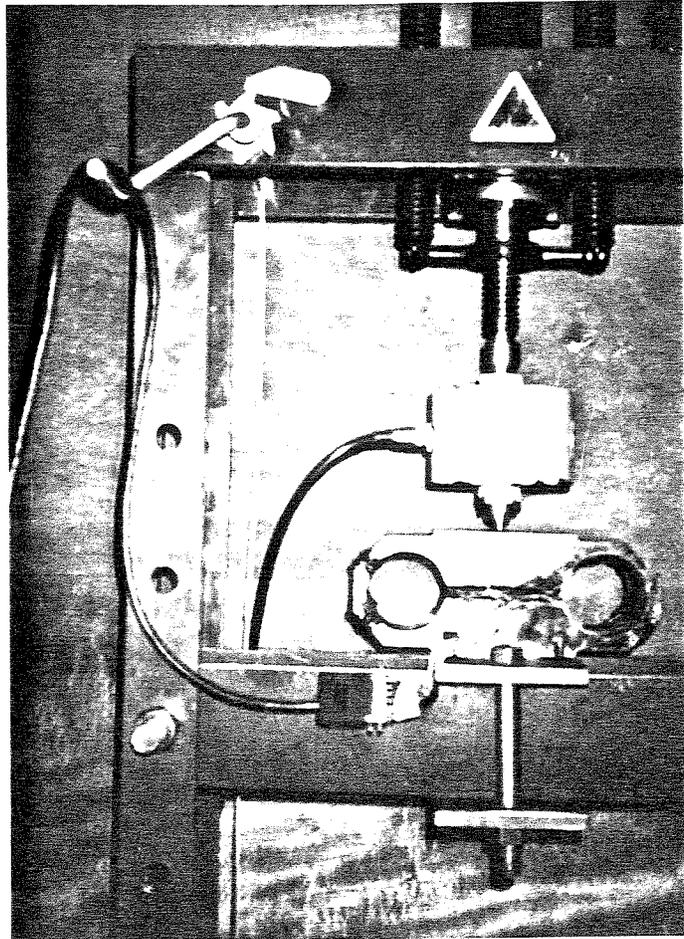


Figura 3.15: Calibração da força horizontal.

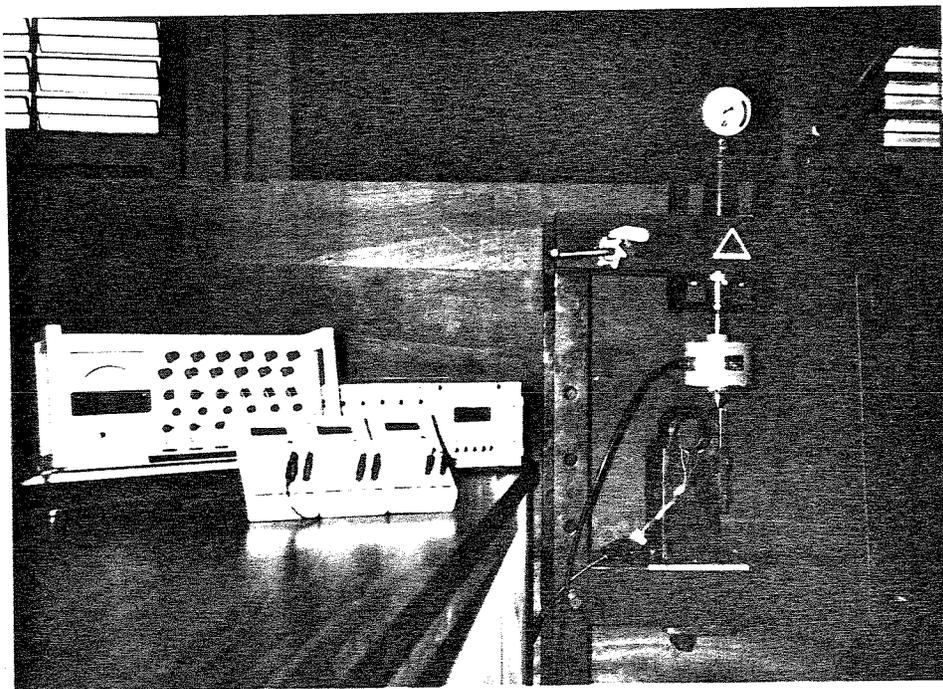


Figura 3.16: Calibração da força vertical.

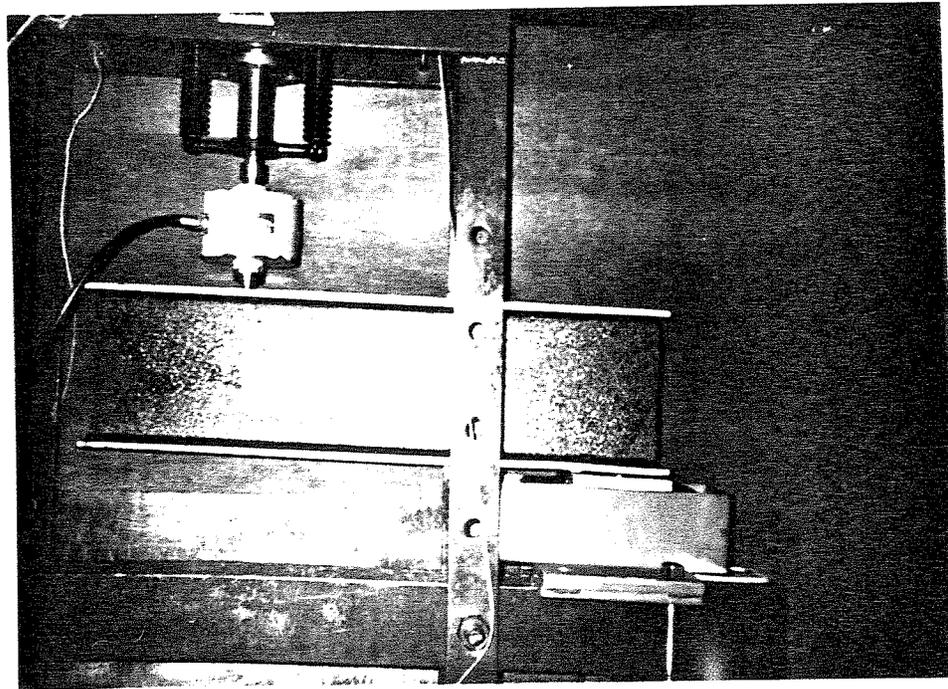


Figura 3.17: Calibração do momento devido a resultante das forças.

c) Calibração do momento devido a resultante das forças.

Para calibrar com relação ao momento aplicado, foi colocado sobre o transdutor uma viga de perfil "I" com 0.60 m de comprimento de forma a permitir a variação do ponto de aplicação da força horizontal e conseqüentemente do momento resultante. A força horizontal foi aplicada em três pontos distantes 0.145 m, 0.480 m e 0.580 m do centro do transdutor e em cada um desses pontos o mesmo procedimento de calibração para força horizontal foi adotado, obtendo-se portanto o triplo de pontos experimentais em relação a força horizontal na determinação da curva de calibração do momento aplicado.

A figura 3.17 mostra o esquema de montagem do transdutor na prensa.

Capítulo 4

RESULTADOS.

Este capítulo foi dividido em dois subcapítulos para tratar separadamente dos resultados obtidos com o ensaio do subsolador e com o transdutor.

4.1 Subsolador.

A apresentação dos resultados neste capítulo foi separada nos três grupos de tratamentos de interesse deste trabalho (largura da asa, ângulo de envergadura da asa e ângulo de ataque da asa) e em cada grupo estão apresentados os resultados com suas respectivas análises estatísticas bem como outros resultados calculados a partir dos dados de campo. No apêndice A é apresentado um quadro geral com todos os valores medidos que foram utilizados nas análises estatísticas.

Em todas as análises estatísticas convencionou-se que os tratamentos não seguidos de mesma letra são significativamente diferentes a um nível de confiança equivalente a 95% pelo teste de Tukey.

Todos os parâmetros medidos ou calculados estão apresentados separadamente dentro de cada grupo facilitando assim a análise e compreensão dos mesmos.

4.1.1 Resultados gerais.

4.1.1.1 Profundidade de subsolagem.

A profundidade média de 0,30 m para qual foi regulado o subsolador variou entre 0,279 a 0,304 m durante os ensaios sendo que, com todos os valores medidos no campo, foi realizada uma análise estatística, verificando -se que não existiram diferenças significativas entre as profundidades obtidas nos experimentos

4.1.1.2 Velocidade do trator.

Com o motor trabalhando a 1700 rpm e o trator em primeira marcha reduzida verificou-se que a diferença de velocidade do trator, entre os diferentes tratamentos, foi muito pequena e a velocidade média resultante de todos os tratamentos foi de 0,93 m/s (3,35 km/hr).

4.1.2 Largura da asa do subsolador.

Este grupo corresponde aos tratamentos 1 (ponta sem asas), 2 (largura de 240 mm fornecida pelo fabricante), 3 (largura de 240 mm), 4 (largura de 350 mm) e 5 (largura de 435 mm).

4.1.2.1 Força horizontal e vertical.

A força horizontal atuando sobre a ferramenta no sentido contrário ao deslocamento do trator tendeu a aumentar de intensidade quando a largura da asa passou de 240 mm para 435 mm como pode ser visto na figura 4.1. O aumento máximo com relação à ponta sem asas (T1) foi de aproximadamente 50% para o tratamento 5 que corresponde a maior largura de asa testada (435 mm).

Da análise estatística dos resultados verificou-se que não existiram diferenças significativas entre os tratamentos 4 (350 mm) e 5 (435 mm), entre os tratamentos 3 (240 mm) e 2 (240 mm do fabricante) e entre os tratamentos 2 e 1 (ponta sem asas).

A força vertical atuando sobre a ferramenta no sentido da superfície para baixo, isto é, auxiliando a penetração da ferramenta no solo, tendeu a diminuir de intensidade quando a largura da asa passou de 240 mm para 435 mm, figura 4.1. A diminuição encontrada com relação a ponta sem asas (T1) foi de aproximadamente 44% para o tratamento 5 embora a diminuição máxima tenha sido de 46% encontrada entre este último e o tratamento 2. Da análise estatística verificou-se que não existiram diferenças significativas entre os tratamentos 1, 2 e 3 e entre os tratamentos 3, 4 e 5.

A relação entre a força vertical e a força horizontal tendeu a diminuir com o aumento da largura da asa e o valor máximo encontrado foi de 26% para o tratamento 1.

A tabela 4.1 apresenta os resultados das análises estatísticas da força horizontal e da força vertical.

Tabela 4.1: Forças, horizontal e vertical com relação à largura da asa.

Tratamento	largura da asa (mm)	força horizontal FH (N)	força vertical FV (N)	FV/FH (%)
1	-	7503 c	1970 a	26,0
2	240	8720 b c	2037 a	23,4
3	240	9050 b	1590 a b	17,7
4	350	10597 a	1165 b	11,0
5	435	11227 a	1106 b	9,7

4.1.2.2 Força resultante.

A força resultante calculada a partir dos valores obtidos do transdutor para as forças, horizontal e vertical, tendeu a aumentar de intensidade quando a largura da asa passou de 240 mm para 435 mm como pode ser visto na figura 4.1. Os resultados obtidos da análise estatística mostraram não existirem diferenças significativas entre os tratamentos 4 e 5, 3 e 4, e 1, 2 e 3.

O comportamento das forças horizontal e vertical ocasionou uma diminuição do ângulo formado entre a força resultante e a direção horizontal fazendo com que esta última se aproximasse da direção horizontal quando a largura da asa passou de 240 mm para 435 mm. Com relação aos ângulos não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos 4 e 5, e 1 e 2.

O ponto de aplicação da força resultante sobre o subsolador foi determinado graficamente através dos valores do momento devido a força resultante registrados pelo transdutor durante os experimentos. Os resultados mostraram uma tendência do ponto de aplicação

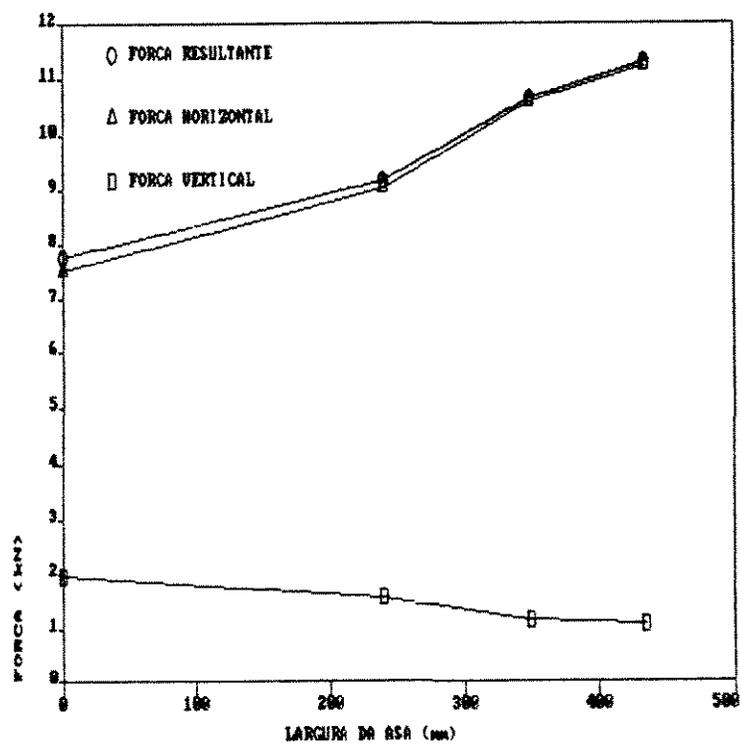


Figura 4.1: Forças, horizontal, vertical e resultante como função da largura da asa.

Tabela 4.2: Força resultante e ângulo com relação à largura da asa.

Tratamento	largura da asa (mm)	força resultante FR (N)	ângulo entre FR e a horizontal (graus)
1		7760 c	14,7 a
2	240	8953 c	13,0 a
3	240	9189 b c	10,0 b
4	350	10660 a b	6,0 c
5	435	11283 a	5,5 c

deslocar-se sobre a ponta do subsolador no sentido da superfície do solo quando a largura da asa foi aumentada. Isto pode ser observado através da figura 4.2.

A tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos da análise estatística realizada para a força resultante.

4.1.2.3 Área transversal do solo mobilizado e resistência específica.

Os resultados obtidos para a área de solo mobilizado mostraram uma tendência desta aumentar com o aumento da largura da asa. Na análise estatística dos resultados verificou-se que não existem diferenças significativas entre os tratamentos 3 e 4 e entre os tratamentos 2 e 3. Houve um aumento de 67% na área obtida com o tratamento 5 com relação a área obtida com o tratamento 1.

A resistência específica do solo apesar de ter sido menor para o tratamento 5 não apresentou nenhuma tendência definida com relação a largura da asa do subsolador e não existiram diferenças significativas entre os tratamentos. Contudo o perfil do solo mobilizado

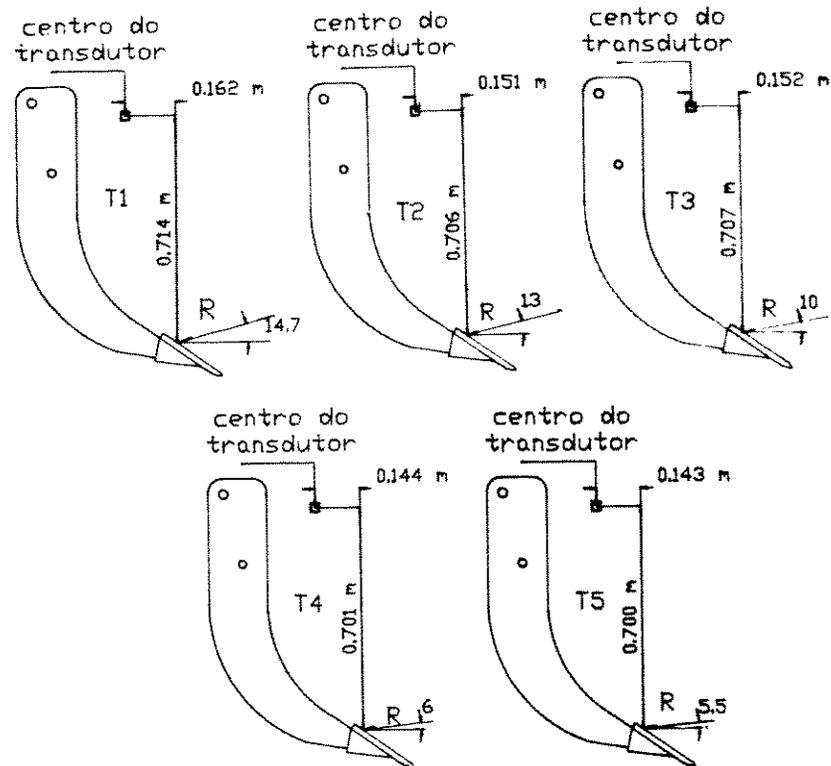


Figura 4.2: Ângulo e ponto de aplicação da resultante com relação à largura da asa.

Tabela 4.3: Área transversal de solo mobilizado e resistência específica com relação à largura da asa.

Tratamento	largura da asa (mm)	força horizontal (N)	área mobilizada (m^2)	resistência específica (kN/m^2)
1	–	7503 c	0,0810 d	92,657 a
2	240	8720 b c	0,1003 c	87,510 a
3	240	9050 b	0,1050 b c	86,640 a
4	350	10597 a	0,1173 b	90,580 a
5	435	11227 a	0,1353 a	83,493 a

pelo tratamento 1 apresenta um formato triangular bem distinto do obtido para o tratamento 5 que aproxima-se de um formato retangular. Isto será muito importante quando várias ferramentas forem colocadas lado a lado pois o perfil retangular permitirá um espaçamento entre ferramentas superior ao triangular e resultará também em uma área total de mobilização mais uniforme, isto é, a altura da saliência formada em profundidade, entre ferramentas adjacentes, será menor ocasionando um maior nivelamento do solo em profundidade.

A tabela 4.3 apresenta os resultados encontrados para a área transversal de solo mobilizado e para a resistência específica juntamente com a força horizontal.

A figura 4.3 apresenta o perfil do solo em profundidade para cada tratamento visando ilustrar as diferenças entre os mesmos.

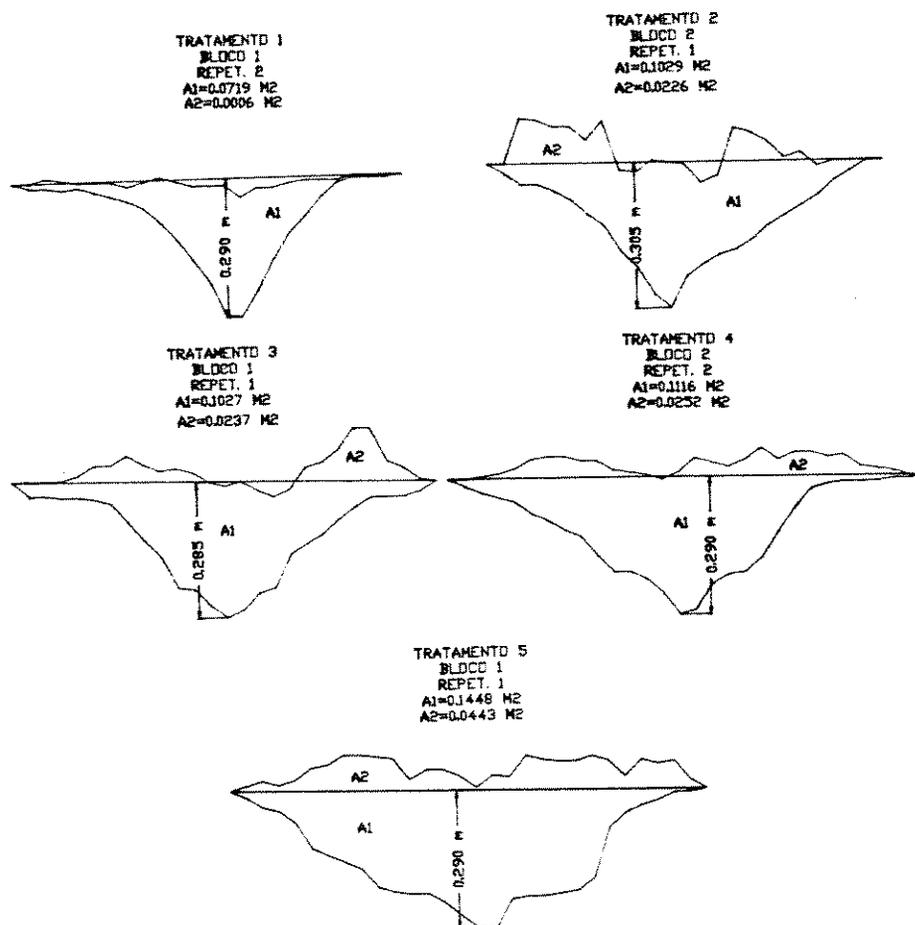


Figura 4.3: Perfil do solo mobilizado com relação à largura da asa.

4.1.3 Ângulo de envergadura da asa do subsolador.

Este grupo corresponde aos tratamentos 1 (ponta sem asas), 5 (15° de ângulo de envergadura da asa), 6 (24° de ângulo de envergadura da asa) e 7 (0° de ângulo de envergadura da asa).

4.1.3.1 Força horizontal e vertical.

A força horizontal que atua sobre a ferramenta aumentou de intensidade quando o ângulo de envergadura da asa passou de 0° para 24° como pode ser observado na figura 4.4. Os resultados mostraram que não existiram diferenças significativas entre os tratamentos 5 e 6 e entre os tratamentos 5 e 7.

Com relação a ponta sem asas (T1) verificou-se que a força horizontal teve um aumento máximo de 58% correspondente ao ângulo de envergadura de 24° (T6).

A força vertical, que atua no sentido de auxiliar a penetração do subsolador no solo, não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos 5, 6 e 7.

A tabela 4.4 ilustra os resultados obtidos da análise estatística para esses parâmetros.

4.1.3.2 Força resultante.

A força resultante sobre o subsolador, devido as forças horizontal e vertical, aumentou de intensidade quando o ângulo de envergadura da asa passou de 0° para 24°, figura 4.4. Não houve diferença significativa nos resultados da força resultante entre os tra-

Tabela 4.4: Forças, horizontal e vertical com relação ao ângulo de envergadura da asa.

Tratamento	ângulo de envergadura (graus)	força horizontal FH (N)	força vertical FV (N)	FV/FH (%)
1	–	7503 c	1970 a	26,0
5	15	11227 a b	1106 b	9,7
6	24	11833 a	1120 b	9,5
7	0	10687 b	1440 a b	13,4

tamentos 5 e 6 e entre 5 e 7. O resultado para o tratamento 1 diferiu significativamente dos demais e houve um aumento máximo de 53% no valor da resultante correspondente ao tratamento 6 quando comparado com o tratamento 1.

O ângulo formado entre a força resultante e a horizontal diminuiu quando o ângulo de envergadura passou de 0° para 24°. Dos resultados da análise verificou-se que não existiu diferença significativa entre os tratamentos 5 e 6.

O ponto de aplicação da força resultante no subsolador tendeu a deslocar-se sobre a ponta na direção contrária a superfície do solo na medida em que o ângulo de envergadura foi aumentado. Isto pode ser verificado através das figuras 4.2 e 4.5 que apresentam a resultante aplicada sobre o subsolador para os tratamentos 1, 5, 6 e 7.

A tabela 4.5 apresenta os resultados da análise estatística realizada com os valores da força resultante e do ângulo de inclinação.

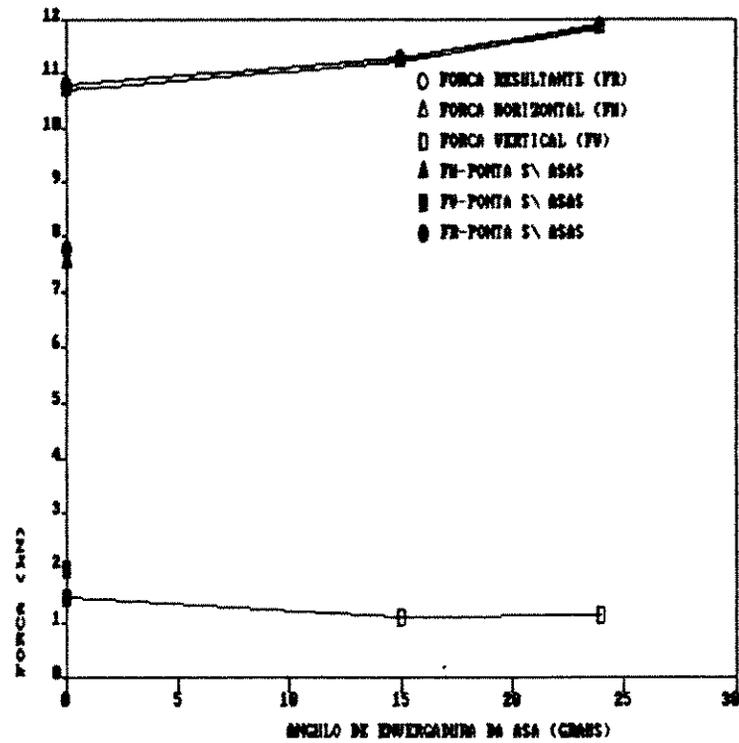


Figura 4.4: Forças, horizontal, vertical e resultante como função do ângulo de envergadura da asa.

Tabela 4.5: Força resultante e ângulo com relação ao ângulo de envergadura da asa.

Tratamento	ângulo de envergadura (graus)	força resultante FR (N)	ângulo entre FR e a horizontal (graus)
1	-	7760 c	14,7 a
5	15	11283 a b	5,5 c
6	24	11886 a	5,4 c
7	0	10783 b	7,7 b

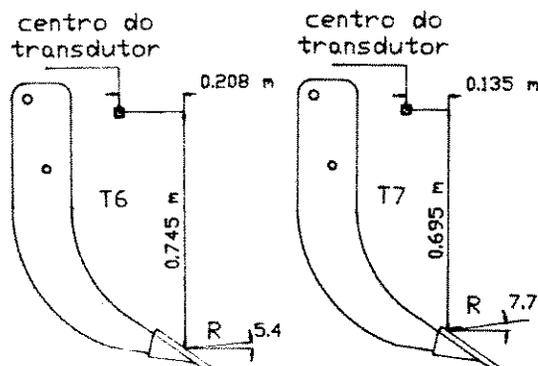


Figura 4.5: Ângulo e ponto de aplicação da resultante para dois ângulos de envergadura.

4.1.3.3 Área transversal de solo mobilizado e resistência específica.

Com relação a área transversal de solo mobilizado não houve diferença significativa entre os tratamentos 5 e 6 e pelos resultados verificou-se um aumento na área quando o ângulo de envergadura passa de 0° (T7) para 15° (T5), mas quando este passa de 15° para 24° (T6) este aumento de área é mínimo. O aumento máximo da área com relação ao tratamento 1 (ponta sem asas) foi de 68% obtido com o tratamento 6.

A resistência específica não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos 1, 6 e 7 e entre os tratamentos 5 e 6. Verificou-se que a resistência específica mínima foi obtida com o tratamento 5 que foi cerca de 10% inferior a resistência obtida com o tratamento 1.

Na tabela 4.6 estão apresentados os resultados obtidos para a força horizontal, área transversal de mobilização do solo e resistência

Tabela 4.6: Área transversal de solo mobilizado e resistência específica com relação ao ângulo de envergadura.

Tratamento	ângulo de envergadura (graus)	força horizontal (N)	área mobilizada (m^2)	resistência específica (kN/m^2)
1	-	7503 c	0,0810 c	92,657 a
5	15	11227 a b	0,1353 a	83,493 b
6	24	11833 a	0,1363 a	87,123 a b
7	0	10687 b	0,1149 b	93,502 a

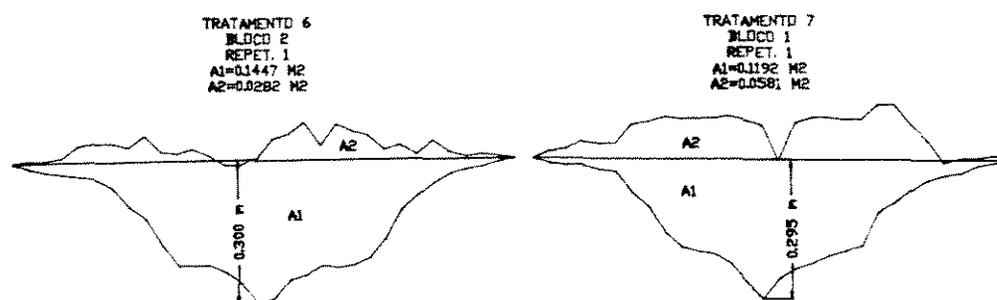


Figura 4.6: Perfil do solo para dois ângulos de envergadura.

específica.

As figuras 4.3 e 4.6 ilustram alguns perfis de solo em profundidade para os tratamentos 1, 5, 6 e 7.

4.1.4 Ângulo de ataque da asa do subsolador.

Este grupo compreende os tratamentos 1 (ponta sem asas) 7 (35° de ângulo de ataque), 8 (25° de ângulo de ataque) e 9 (15° de ângulo de ataque).

4.1.4.1 Força horizontal e vertical.

Os resultados obtidos para a força horizontal não apresentaram nenhuma relação de proporcionalidade entre os mesmos com a variação do ângulo de ataque da asa e não houveram diferenças significativas entre os tratamentos 7, 8 e 9. O tratamento 8 (25°) que apresenta um ângulo de ataque intermediário com relação aos demais (15° e 35°) foi o que apresentou a menor força horizontal. A elevação máxima da força horizontal com relação ao tratamento 1 foi de 48% que correspondeu ao tratamento 9.

Como em todos os tratamentos a colocação das asas sobre a ponta do subsolador reduziu a força vertical, mas esta não apresentou nenhuma diferença significativa entre os tratamentos apresentados neste grupo.

4.1.4.2 Força resultante.

Os resultados obtidos para força resultante aplicada sobre o subsolador, calculada a partir dos valores obtidos para a força horizontal e vertical, não apresentaram diferenças significativas para os ângulos de ataque de 15° (T9), 25° (T8) e 35° (T7) embora o tratamento 8 tenha apresentado menor força com relação aos tratamentos 7 e 9. A elevação máxima da força resultante com relação ao trata-

Tabela 4.7: Forças horizontal e vertical com relação ao ângulo de ataque da asa.

Tratamento	ângulo de ataque (graus)	força horizontal FH (N)	força vertical FV (N)	FV/FH (%)
1	-	7503 b	1970 a	26,0
7	35	10687 a	1440 a	13,4
8	25	10110 a	1333 a	13,1
9	15	11093 a	1440 a	13,2

mento 1 foi de 44% que correspondeu ao tratamento 9.

O ângulo entre a força resultante e a horizontal não diferiu significativamente entre os tratamentos 7, 8 e 9 sendo que todos os valores estão muito próximos e correspondem a aproximadamente a metade do valor obtido para o tratamento 1 (ponta sem asas).

O ponto de aplicação da força resultante sobre a ponta do subsolador também não diferiu significativamente entre os tratamentos 7, 8 e 9 e os valores obtidos estão muito próximos. Isto pode ser observado nas figuras 4.2, 4.5 e 4.7 onde a força resultante esta aplicada no subsolador para os tratamentos 1, 7, 8 e 9.

A tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos da análise estatística para força resultante e o ângulo de inclinação desta com a horizontal.

4.1.4.3 Área transversal de solo mobilizado e resistência específica.

Os resultados obtidos para a área transversal de solo mobilizado não diferiram significativamente entre os tratamentos 7, 8

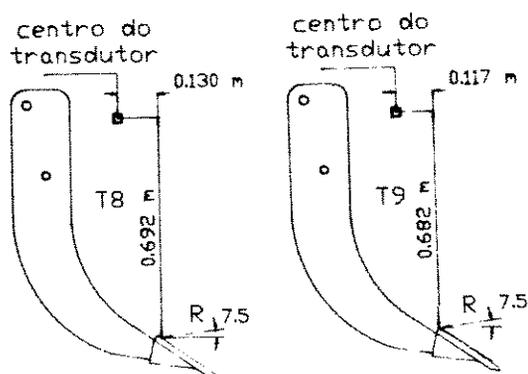


Figura 4.7: Ângulo e ponto de aplicação da resultante para dois ângulos de ataque.

Tabela 4.8: Força resultante e ângulo com relação ao ângulo de ataque da asa.

Tratamento	ângulo de ataque (graus)	força resultante FR (N)	ângulo entre FR e a horizontal (graus)
1	-	7760 b	14,7 a
7	35	10783 a	7,7 b
8	25	10199 a	7,5 b
9	15	11189 a	7,5 b

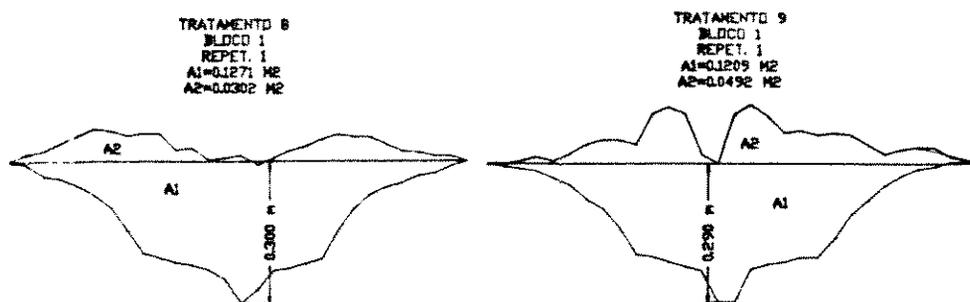


Figura 4.8: Perfil do solo para dois ângulos de ataque.

e 9. Os tratamentos 8 e 9 apresentaram resultados muito próximos e o tratamento 7 apresentou um resultado cerca de 7% inferior aos anteriores. O acréscimo máximo na área transversal em relação ao tratamento 1 foi de 53% correspondente ao tratamento 9.

A resistência específica não apresentou diferenças significativas entre nenhum dos tratamentos deste grupo. O tratamento 8 apresentou a menor resistência específica que corresponde a 89% da encontrada no tratamento 1.

As figuras 4.3, 4.6 e 4.8 apresentam alguns perfis de solo mobilizado obtidos com os tratamentos 1, 7, 8 e 9.

A tabela 4.9 apresenta os resultados da análise estatística realizada.

4.1.5 Área transversal de elevação superficial do solo.

Os valores da área de elevação obtidos nos experimentos foram afetados pelas condições do solo, a camada compactada existente favoreceu a formação de torrões de solo muito grandes que muitas vezes deslocavam-se com relação ao seu local de origem e con-

Tabela 4.9: Área transversal de solo mobilizado e resistência específica com relação ao ângulo de ataque.

Tratamento	ângulo de ataque (graus)	força horizontal (N)	área mobilizada (m^2)	resistência específica (kN/m^2)
1	-	7503 b	0,0810 b	92,657 a
7	35	10687 a	0,1149 a	93,502 a
8	25	10110 a	0,1225 a	82,770 a
9	15	11093 a	0,1238 a	90,228 a

sequentemente algumas medidas da elevação do solo ficaram posicionadas sobre estes torrões ou nas depressões deixadas quando estes deslocavam-se de sua posição original.

Considerando-se que nestas condições a área média de elevação do solo que realmente ocorreu durante o percurso foi afetada e não sendo esta um parâmetro decisivo na avaliação dos efeitos obtidos com os experimentos decidiu-se realizar a análise estatística de todos os 9 tratamentos no mesmo grupo para ter-se apenas uma idéia dos valores médios obtidos e das diferenças mais acentuadas que puderam ser comprovadas por observações durante os experimentos.

Na tabela 4.10 estão colocados todos os valores da área de elevação superficial do solo obtidos da análise estatística e onde observa-se que não houveram diferenças significativas entre eles, o que pode ter sido consequência da utilização de apenas duas repetições por bloco. No entanto, pela observação dos resultados, pode-se esperar que um experimento com um maior número de repetições evidencie estatisticamente que o tratamento 1 apresenta uma área de elevação menor que os demais tratamentos.

Tabela 4.10: Área de elevação superficial do solo.

Tratamento	largura da asa (mm)	ângulo de envergadura (graus)	ângulo de ataque (graus)	área de elevação (m^2)
1	-	-	-	0,0154 a
2	240	15	35	0,0374 a
3	240	15	35	0,0368 a
4	350	15	35	0,0181 a
5	435	15	35	0,0418 a
6	435	24	35	0,0357 a
7	435	0	35	0,0359 a
8	435	0	25	0,0358 a
9	435	0	15	0,0420 a

Alguns perfis de elevação superficial do solo podem ser vistos nas figuras 4.3, 4.6 e 4.8 juntamente com o perfil do solo mobilizado em profundidade.

4.1.6 Esforços máximos e mínimos.

A análise dos sinais registrados na fita efetuada com o analizador de sinais forneceu as forças e momentos médios com seus respectivos desvios durante o percurso de 50 metros de cada experimento bem como a distribuição percentual de ocorrência dos vários níveis de força, utilizados nos cálculos da distribuição de probabilidade.

As curvas de distribuição de ocorrências dos esforços permitiu determinar aproximadamente os níveis máximos e mínimos das

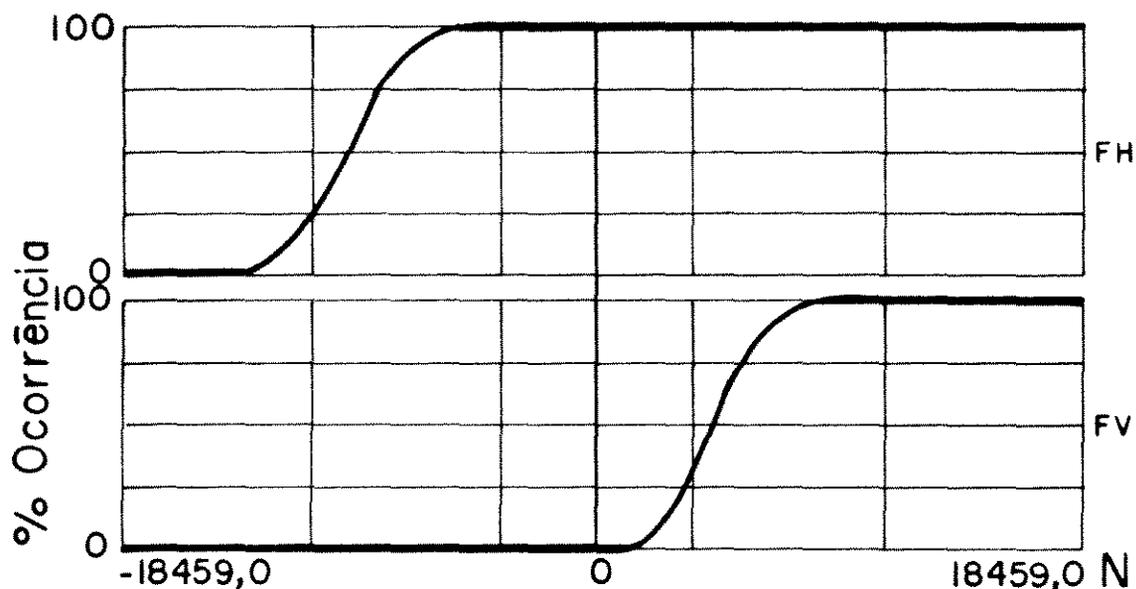


Figura 4.9: Curva de distribuição de ocorrência.

forças, horizontal e vertical que ocorreram em cada experimento. Estes níveis estão colocados na tabela 4.11 juntamente com a média obtida da análise dos sinais e a relação entre a força máxima e média. A figura 4.9 ilustra a curva de distribuição de ocorrência para um experimento.

Analizando-se as forças horizontais máximas registradas em todos os experimentos verifica-se que esta não ultrapassou 1,64 vezes a força média.

No caso das forças verticais foram registrados valores de até 6,12 vezes a força média embora na maioria dos registros não ocorreu valores desta magnitude ainda assim são relativamente altos quando comparados com a força horizontal.

Outro resultado importante obtido com relação a força vertical é a inversão de sentido desta em alguns experimentos que pode

Tabela 4.11: Forças máximas e mínimas.

T	BL	força horizontal (N)				força vertical (N)			
		máx.	méd.	min.	máx/méd	máx.	méd.	min.	máx/méd
1	1	9443	6350	3618	1,49	6071	1510	588	4,02
1	2	10325	7450	5089	1,38	6619	1840	1470	3,60
1	3	12943	8710	5589	1,49	9119	2560	1765	3,56
2	1	10796	7850	6030	1,37	5883	1840	1765	3,20
2	2	14414	8790	5295	1,64	8531	2090	1176	4,08
2	3	14400	9520	5677	1,51	7942	2180	1470	3,64
3	1	12649	8560	5530	1,48	5671	1540	824	3,68
3	2	14708	9080	5883	1,62	6560	1520	794	4,32
3	3	14414	9510	6030	1,51	6471	1710	647	3,78
4	1	15593	10700	7132	1,46	4754	906	-1132	5,24
4	2	15000	10500	7443	1,43	6254	1340	-509	4,67
4	3	15084	10590	6594	1,42	5943	1250	-1132	4,75
5	1	14461	10590	7075	1,36	4669	985	-849	4,74
5	2	15225	10590	7103	1,44	5094	834	-2264	6,12
5	3	17433	12500	8207	1,39	6792	1500	0	4,53
6	1	14433	10800	8292	1,34	4669	1020	-283	4,58
6	2	16697	11900	8150	1,40	5830	1120	-1132	5,20
6	3	15574	12800	7415	1,22	5943	1220	-1415	4,87
7	1	13689	9760	6632	1,40	5554	1290	0	4,30
7	2	13460	10700	7841	1,26	5619	1400	523	4,01
7	3	16335	11600	7514	1,41	6534	1630	990	4,01
8	1	13721	9920	7253	1,38	5390	1100	-327	4,90
8	2	14048	9820	6861	1,43	5554	1220	-392	4,55
8	3	16008	10590	5815	1,51	8037	1680	-425	4,78
9	1	13721	9980	7187	1,37	5554	1410	457	3,94
9	2	15780	10800	6697	1,46	8167	1640	0	4,98
9	3	17315	12500	8167	1,38	6871	1270	-1045	5,41
T = tratamento						BL = bloco			

Tabela 4.12: Propriedades do Aço 4340 temperado e revenido.

CP	Limite de escoamento à 0,2%		Limite de resistência	
	kgf/mm^2	N/mm^2	kgf/mm^2	N/mm^2
1	123,7	1213	132,6	1300
2	124,2	1218	133,7	1311
3	123,3	1210	132,9	1303
Dureza final do material: 41,5 Rc				

ser observado através da inversão dos sinais dos valores da força vertical mínima. Verifica-se que nos tratamentos 1, 2, 3 e 7 não houve em nenhum dos registros a inversão do sentido da força e nos demais tratamentos esta inversão ocorreu em pelo menos um bloco.

4.2 Transdutor.

4.2.1 Material do transdutor.

A tabela 4.12 apresenta os resultados obtidos com relação as propriedades do material do transdutor após o tratamento térmico realizado (têmpera e revenimento).

O limite de resistência obtido após o tratamento ficou muito próximo do indicado por HORGER (1965) que apresenta um valor para o limite de resistência de $136 kgf/mm^2$ com 41,5 Rc. Já o limite de escoamento obtido está um pouco acima daquele utilizado nos cálculos do anel mas em termos de resistência ou seja, na elevação do valor das forças adotadas inicialmente não houve nenhum acréscimo significativo.

4.2.2 Pontos de colagem dos extensômetros.

Os resultados obtidos através do programa *COSMOS/M^R* para a distribuição de tensões com relação a aplicação da força horizontal mostraram uma maior concentração de tensões na região de $\theta = 90^\circ$ da ordem de $110 N/mm^2$ e uma menor concentração de tensões na região de $\theta = 34^\circ$ da ordem de $25 N/mm^2$.

A distribuição de tensões referente a força vertical apresentou uma maior concentração na região de $\theta = 34^\circ$ da ordem de $105 N/mm^2$ e menor concentração na região de $\theta = 90^\circ$ da ordem de $17 N/mm^2$.

Com relação ao momento devido a resultante das forças, a distribuição de tensões no transdutor apresentou uma concentração em $\theta = 90^\circ$ e uma inversão do sinal das tensões (tração/compressão) quando $\theta = 34^\circ$.

Os resultados aqui obtidos para os pontos de colagem dos extensômetros coincidiram com os pontos determinados experimentalmente por GODWIN (1975) como nós para as forças horizontal e vertical, $\theta = 34^\circ$ e $\theta = 90^\circ$, podendo-se adotá-los neste caso específico sem a preocupação com a sensibilidade cruzada entre os canais.

4.2.3 Características do transdutor.

4.2.3.1 Curvas de calibração.

a) Força horizontal.

Os resultados da calibração mostraram que a força horizontal e a voltagem de saída no canal correspondente estão altamente

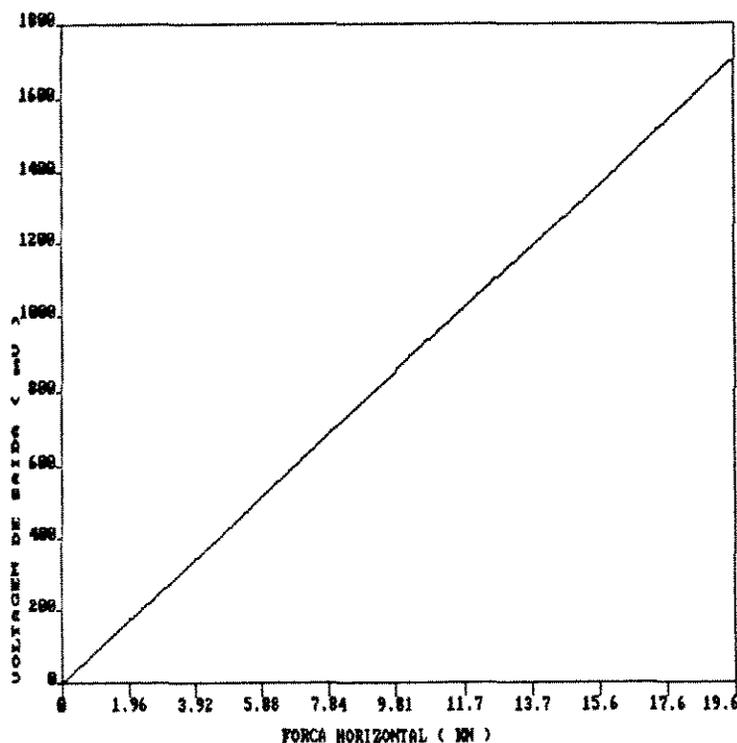


Figura 4.10: Curva de calibração da força horizontal.

correlacionadas apresentando um coeficiente de correlação, $R^2 = 1$ com um nível de significância de 99,9%.

A linearidade do transdutor para a força horizontal ficou entre -1,5% e 1,1% do fundo de escala e a histerese foi menor do que 1,7% do fundo de escala.

A equação de calibração obtida para este canal foi:

$$Y \text{ (mV)} = 0,0868.X1 \text{ (N)}$$

A figura 4.10 ilustra a curva de calibração obtida.

b) Força vertical.

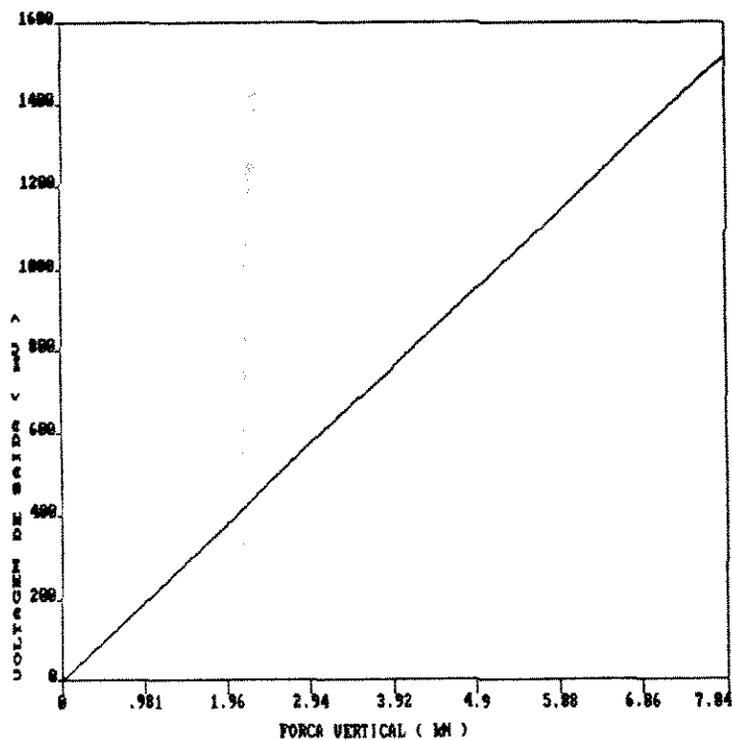


Figura 4.11: Curva de calibração da força vertical.

O coeficiente de correlação R^2 para este caso foi igual a 1 com um nível de significância de 99,9%.

A linearidade do transdutor para esta força ficou entre -1,6% e 1,7% do fundo de escala e a histerese foi menor que 2,2% do fundo de escala.

A equação de calibração obtida foi:

$$Y \text{ (mV)} = 0,1927 \cdot X1 \text{ (N)}$$

A curva de calibração desta componente esta ilustrada na figura 4.11.

c) Momento devido a resultante das forças.

Foram utilizados todos os valores obtidos para as distâncias 0,145 m, 0,480 m e 0,580 m na determinação da curva de calibração.

O coeficiente de correlação, R^2 obtido foi igual a 1 com um nível de significância de 99,9%.

A linearidade ficou entre -0,9% e 1,6% do fundo de escala e a histerese foi inferior a 2,3% do fundo de escala.

A equação de calibração obtida foi:

$$Y \text{ (mV)} = 0,1434.X1 \text{ (N)}$$

Nesta calibração pode-se verificar a influência do ponto de aplicação da força horizontal sobre o valor resultante da voltagem no canal da força, isto é, se a leitura da força horizontal independe do ponto de aplicação e os resultados apresentaram uma variação máxima de 3% entre os valores obtidos nos diferentes pontos de aplicação (0 a 0,580 m).

A figura 4.12 ilustra a curva de calibração para o momento.

4.2.3.2 Sensibilidade cruzada.

A sensibilidade cruzada, interação entre os canais das forças horizontal e vertical, foi calculada utilizando os resultados obtidos na calibração destas forças.

Foram utilizados os valores das voltagens obtidas com uma carga de 7,84 kN para os dois canais pois esta foi a carga máxima de calibração da força vertical.

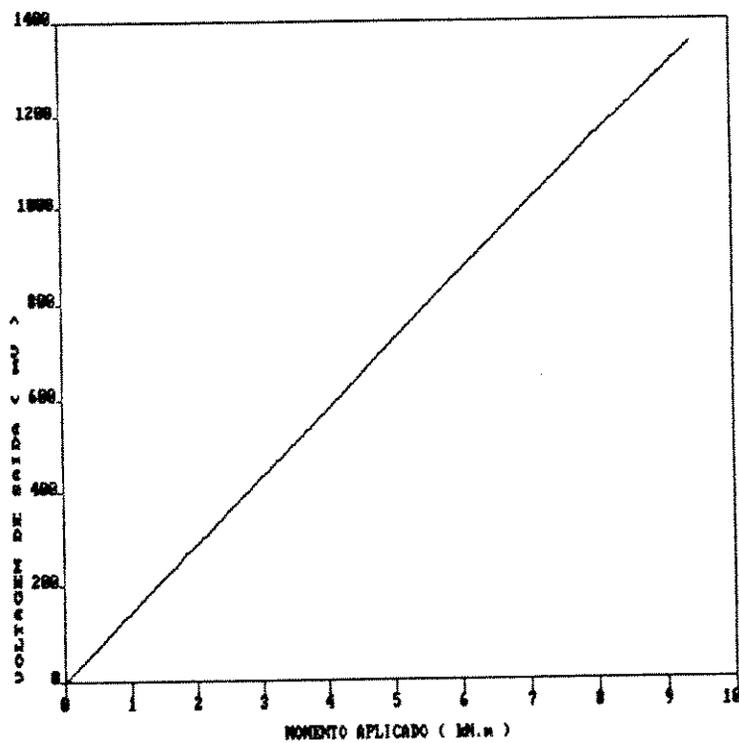


Figura 4.12: Curva de calibração para o momento devido a resultante das forças.

Portanto tem-se para o cálculo da sensibilidade cruzada os seguintes valores:

	FH (mV)	FV (mV)
FH (mV)	656,3	20
FV (mV)	4	1521,7

onde verifica-se que a interação da força horizontal (FH) na força vertical (FV) é de 1,3% e o inverso é de 0,61% .

Capítulo 5

DISCUSSÃO.

5.1 Subsolador.

Em nosso trabalho optou-se por manter a velocidade do trator constante para todos os tratamentos com base nos resultados obtidos por outros pesquisadores (PAYNE, DRANSFIELD et alli e LANÇAS & BENEZ) que mostraram que a área mobilizada do solo e a força de tração são pouco afetadas por variações da velocidade principalmente dentro da faixa de operação onde normalmente o subsolador é utilizado.

5.1.1 Largura da asa.

A colocação de asas de largura de 435 mm (T5 a T9) na ponta do subsolador ocasionou um aumento da força horizontal, com relação ao tratamento 1 (ponta sem asas), que variou entre 48% a 58% para os três grupos de tratamentos estudados. SPOOR & GODWIN (1978) trabalhando com um subsolador com geometria diferente encontrou um aumento de 40% para a força horizontal quando asas de

420 mm foram colocadas na ponta do subsolador. Analizando-se as diferenças de geometria entre o subsolador utilizado por estes pesquisadores e o utilizado neste trabalho pode-se verificar que o parâmetro que mais influenciou para esta diferença foi a largura da ponta. O subsolador utilizado por SPOOR & GODWIN possuía uma largura da ponta de 65 mm, 25 mm superior do que a utilizada neste trabalho, resultando assim em uma força horizontal consideravelmente maior quando comparados nesta condição (sem asas). Sendo assim a colocação de uma asa de 420 mm de largura proporcionou um aumento relativo menor (40%) na força horizontal quando comparada com as condições sem e com asas utilizadas neste trabalho.

Com relação a força vertical a colocação de asas de 435 mm na sapata básica reduziu esta de 32% a 44%.

Aumentando a largura da asa de 240 mm para 435 mm houve um acréscimo na força horizontal e uma diminuição na força vertical. SPOOR & GODWIN (1978) encontraram um aumento em ambas as forças quando a largura da asa foi aumentada. Consequentemente os resultados obtidos neste trabalho para a relação entre a força vertical e horizontal (FV/FH) diferiram totalmente dos encontrados por SPOOR & GODWIN. Em nossos resultados houve uma redução desta relação com o aumento da largura da asa e o valor máximo encontrado para esta foi de 26% para a ponta sem asas. Já, no trabalho desenvolvido por esses pesquisadores, houve um aumento desta relação e um valor de 42% foi encontrado para a ponta sem asas correspondendo ao valor mínimo obtido para esta relação.

Os resultados obtidos mostram que a força horizontal é a componente que mais influi na força resultante portanto esta apresentou a mesma tendência da força horizontal, isto é, apresentou uma tendência a aumentar de intensidade com o aumento da largura da asa. O ângulo de inclinação desta reflete bem o comportamento das componentes pois na medida em que a força horizontal cresce com

o aumento da largura da asa a força vertical diminui e consequentemente o ângulo de inclinação da resultante com a horizontal também.

Em nosso caso, é possível que o aumento da largura da asa além de um certo limite poderá ocasionar problemas de penetração do subsolador na medida em que a força vertical a qual auxilia a penetração, seja levada a um valor mínimo.

O deslocamento observado para o ponto de aplicação da força resultante sobre a ponta do subsolador quando a largura da asa foi aumentada, apesar de ser pequeno poderá trazer alguma vantagem no que se refere a diminuição da seção resistente do subsolador e também na reavaliação do projeto atual.

Ao contrário dos resultados obtidos por SPOOR & GODWIN (1978) onde houve um aumento de 40% na força horizontal e de 104% na área transversal, quando colocadas asas de 420 mm de largura na ponta do subsolador, resultando assim em uma redução significativa da resistência específica, neste trabalho houve um aumento de 50% na força horizontal e de apenas 67% na área transversal de solo mobilizado quando a asa de 435 mm de largura foi colocada.

A resistência específica, obtida da relação entre a força horizontal e a área transversal de solo mobilizado, não apresentou uma redução significativa como era esperado através dos resultados obtidos por SPOOR & GODWIN. Isto pode estar relacionado com a qualidade do trabalho final a qual não foi medida por esses pesquisadores.

Os resultados encontrados para os tratamentos 2 e 3 que apresentam asas de mesma largura mas com formato diferente não apresentaram diferenças significativas entre os parâmetros analisados, sendo que o tratamento 3 apresentou valores para a força horizontal e para a área transversal muito pouco superiores aos encontrados para o tratamento 2. Portanto nas condições testadas o formato da asa

não teve influência significativa nos resultados obtidos mas com asas de maior largura os resultados poderão apresentar diferenças mais acentuadas.

Analisando-se os tratamentos 3 (240 mm), tratamento 4 (350 mm) e tratamento 5 (435 mm) verificou-se que entre os tratamentos 4 e 5 somente existiu diferença significativa na área transversal de solo mobilizado que foi significativamente maior para o tratamento 5. Entre os tratamentos 3 e 4 existiu diferença significativa apenas na força horizontal que foi inferior para o tratamento 3. Estes resultados juntamente com os valores da resistência específica obtidos indicam que o tratamento 4 não é muito vantajoso pois a opção de escolha de uma largura de asa ficará entre os tratamentos 3 e 5.

5.1.2 Ângulo de envergadura da asa.

Existe uma tendência da força horizontal aumentar na medida em que o ângulo de envergadura da asa aumenta mas com relação a força vertical os resultados são inconclusivos, apenas pode-se dizer que a colocação das asas na ponta do subsolador reduziu a força vertical em todos os tratamentos.

Da mesma forma que a força horizontal a resultante das forças aumentou de intensidade e aproximou-se da horizontal quando o ângulo de envergadura foi aumentado de 0° para 24° . O ponto de aplicação da força resultante deslocou-se na direção contrária a superfície do solo quando o ângulo foi aumentado sendo que o deslocamento mais significativo ocorreu entre os tratamentos 5 e 6 onde para um aumento de ângulo de 9° houve um deslocamento de 79 mm do ponto de aplicação sobre a ponta do subsolador enquanto que entre os tratamentos 5 e 7 houve um aumento do ângulo de 15° com um deslocamento do ponto de aplicação de apenas 10 mm. Estes resul-

tados indicam que existe um ângulo de envergadura onde a partir do qual o ponto de aplicação da força resultante apresenta um gradiente de deslocamento maior.

A formação de fissuras horizontais no solo, observadas por SPOOR & GODWIN (1978), devido a penetração da ponta do subsolador, teve influência decisiva no deslocamento do ponto de aplicação da força resultante ocorrido entre os tratamentos 5 e 6. O ângulo de envergadura da asa de 15° correspondente ao tratamento 5 foi determinado de forma a manter toda a extensão da asa na horizontal e isto favoreceu a penetração da asa aproveitando as fissuras produzidas com a penetração da ponta do subsolador. Já o ângulo de 24° correspondente ao tratamento 6 fez com que a asa ficasse inclinada para baixo obrigando-a a romper mais o solo principalmente nas extremidades onde o efeito das fissuras produzidas pela ponta do subsolador é menor concentrando assim os esforços nessa região que elevou o valor da força resultante e deslocou o ponto de aplicação desta. Isto pode ser observado também na figura 5.1 onde o desgaste observado na extremidade da asa é maior para o tratamento 6.

Tanto a área de mobilização do solo quanto a resistência específica obtidos para os tratamentos 5 e 6 não diferiram significativamente sendo assim o ponto de aplicação da força resultante é o fator que deve ser levado em consideração para optar-se por um ângulo de envergadura mais adequado e este fato favoreceu o tratamento 5.

Excetuando-se o tratamento 1, o tratamento 7 (0° de ângulo de envergadura) foi o menos vantajoso pois além de ter resultado em uma maior resistência específica, com relação ao tratamento 5, apresentou uma área transversal de solo mobilizado significativamente inferior aos tratamentos 5 e 6.

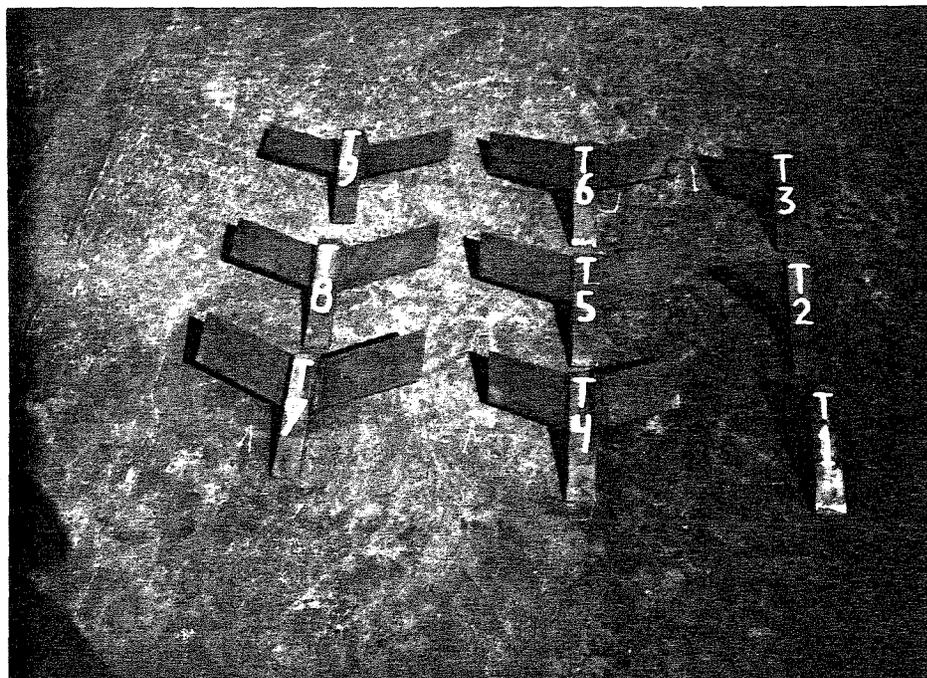


Figura 5.1: Pontas testadas.

5.1.3 Ângulo de ataque da asa.

Verificou-se que o ângulo de ataque intermediário (25°) foi o que apresentou a menor força de tração, embora não tenha havido diferenças significativas entre os três ângulos de ataque estudados ($15^\circ = T9$, $25^\circ = T8$ e $35^\circ = T7$). Basicamente os resultados obtidos para todos os parâmetros avaliados (força horizontal, força vertical, força resultante, área transversal de mobilização do solo e resistência específica) não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos 7, 8 e 9.

Apesar da não existência de diferenças significativas, o tratamento 8 apresentou os resultados mais favoráveis para todos os parâmetros avaliados concordando com a afirmação de BALATON (1971) citada por SPOOR & GODWIN (1978) de que o ângulo de ataque ótimo para a asa do subsolador é 25° .

5.1.4 Área transversal de elevação superficial do solo.

Neste trabalho os valores obtidos para a área de elevação superficial do solo não apresentaram diferenças significativas, mas foi possível verificar uma tendência da área aumentar quando as asas foram colocadas na ponta do subsolador. Isto é confirmado por OWEN (1987) que encontrou um aumento da área quando as asas foram colocadas.

O aumento da altura de levante da asa, que ocorre com os tratamentos 7, 8 e 9, não provocou nenhuma diferença significativa na área de elevação, não concordando assim com a afirmação de SPOOR & GODWIN (1978) de que uma maior altura de levante da asa ocasiona uma maior área de elevação do solo devido ao rearranjo entre os torrões de solo.

5.1.5 Esforços máximos e mínimos observados.

Estes resultados são muito importantes para o dimensionamento de subsoladores pois podem trazer uma contribuição com relação ao fator de segurança a ser adotado no projeto dessas ferramentas e de outras com características semelhantes.

No registro das forças foi observado para a força horizontal, um aumento máximo de 64% sobre o valor médio da força mas com relação a força vertical este aumento foi bem superior chegando a um máximo de 510% sobre o valor da força embora na média tenha ficado em torno de 350%.

É interessante notar que em alguns tratamentos, principalmente para aqueles com a maior largura da asa houve inversão do sentido da força vertical. Isto é condizente com a afirmação anterior

de que o aumento excessivo da largura da asa, neste caso, pode trazer dificuldades para a penetração do subsolador e também para a manutenção de uma profundidade de subsolagem constante.

5.2 Transdutor.

A utilização do aço 4340 na construção do transdutor provou, através dos resultados obtidos, ser bastante adequada principalmente no que diz respeito a transdutores de alta capacidade que exigem um material mais resistente de forma a permitir que as dimensões do transdutor sejam mantidas dentro de valores adequados.

Além disto a possibilidade de alteração das características de resistência deste material permitiu uma maior flexibilidade no projeto do transdutor no que diz respeito aos limites de resistência do material.

Os valores de resistência apresentados por HORGER (1965), os quais foram utilizados no projeto, ficaram muito próximos dos obtidos neste trabalho, mostrando assim que sua utilização foi plenamente satisfatória. Além disto, pelos resultados da calibração, verificou-se que o transdutor não apresentou fuga do valor 0 e que os resultados de histerese foram relativamente baixos comprovando assim que o material utilizado foi adequado.

A equação utilizada para o dimensionamento baseada nos resultados apresentados por COOK & RABINOWICZ (1963) para um anel circular estendido foi eficaz principalmente no que diz respeito a possibilidade de trabalharmos com diferentes valores de k permitindo assim a adequação perfeita do transdutor ao subsolador.

A recomendação de GODWIN (1975) com relação a co-

locação das placas entre o transdutor e o implemento e entre o carro porta ferramenta e o transdutor para evitar que o valor das forças fossem afetados pelo ponto de aplicação das mesmas foi seguida em nosso projeto sendo construídas, no corpo do anel octogonal, saliências de 5 mm em ambos os lados ao invés das placas. Os resultados da calibração mostraram que não houve variação maior que 3% para a força horizontal em diferentes pontos de aplicação.

Nos resultados obtidos com o transdutor quando em uso nos experimentos verificou-se que as saliências de 5 mm foram relativamente pequenas pois a deformação do transdutor fazia com que a caixa de proteção do mesmo encostasse no carro porta ferramenta interferindo nas leituras. Isto foi resolvido colocando-se uma placa de 5 mm para afastar mais o transdutor resultando assim em uma saliência total de 10 mm que acredita-se ser um valor razoável para o dimensionamento de outros transdutores de mesma capacidade ou superiores.

O método de elementos finitos utilizado na determinação dos pontos de colagem dos extensômetros possibilitou uma determinação precisa e provavelmente mais simples com relação a determinação experimental efetuada por GODWIN (1975).

Os valores do coeficiente de correlação e os níveis de significância obtidos para as curvas de calibração do transdutor comprovam que estas representam bem os pontos determinados na calibração.

Capítulo 6

CONCLUSÕES.

Os resultados obtidos nas condições em que se realizaram os experimentos permitiram chegar as seguintes conclusões.

– A colocação de asas na ponta do subsolador aumentou significativamente a força resultante e a área transversal de solo mobilizado mas em poucos tratamentos houve uma redução significativa da resistência específica do solo.

– O aumento da largura da asa, em alguns casos, provoca um aumento na força horizontal e uma diminuição na força vertical atuantes sobre o subsolador e faz com que o ponto de aplicação da força resultante sobre a ponta do subsolador se desloque no sentido da superfície do solo.

– O ângulo de envergadura da asa do subsolador deve assumir um valor que mantenha a asa posicionada horizontalmente, para as nossas condições este ângulo foi 15° .

– O aumento do ângulo de envergadura da asa do subsolador provoca um deslocamento do ponto de aplicação da força resultante no sentido contrário a superfície do solo.

- O ângulo de ataque da asa de 25° foi a condição mais favorável entre as estudadas neste trabalho.
- A resistência específica é um parâmetro importante mas não decisivo na avaliação de subsoladores.
- Não foi observada nenhuma correlação entre a altura de levante da asa e a área transversal de elevação superficial do solo e conseqüentemente com relação ao rearranjo entre os torrões do solo também.
- As pontas com asas provocam um aumento da área transversal de mobilização do solo.
- A metodologia utilizada para o dimensionamento e construção do transdutor foi eficiente, sendo comprovada através dos valores de linearidade, histerese e sensibilidade cruzada obtidos na calibração.
- O método de elementos finitos é uma ferramenta útil na determinação dos pontos de colagem de extensômetros em transdutores.

Capítulo 7

BENEFÍCIOS ATINGIDOS COM ESTE TRABALHO.

A construção do transdutor e seu uso no campo para a medição de esforços atuantes no subsolador trouxe um grande progresso no aprimoramento do sistema de aquisição de dados utilizado pelo Departamento de Máquinas Agrícolas da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP e provavelmente com relação ao sistema atualmente em uso no Brasil para a medição de esforços em implementos de preparo de solo.

Este trabalho desenvolvido em condições de campo permitiu o aprimoramento com relação ao uso de instrumentos de medição e registro nestas condições.

A determinação das componentes, da força resultante sobre o subsolador e do ponto de aplicação desta permitirá o redimensionamento desta ferramenta aumentando sua eficiência e reduzindo seu custo de fabricação.

Todos os resultados obtidos poderão ser utilizados de imediato na melhoria das condições de operação dos subsoladores atual-

mente comercializados no Brasil.

Os resultados obtidos para o perfil de solo mobilizado permitirão ainda o desenvolvimento de estudos para verificar o melhor espaçamento entre as hastes subsoladoras.

Não foi encontrada na literatura nenhuma referência com relação ao ângulo de envergadura da asa portanto os resultados aqui obtidos poderão servir como base para futuros trabalhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- AHMED, M. H.; GODWIN, R. J. The influence of wing position on subsoiler penetration and soil disturbance. *Journal agricultural engineering research*, 28:489-482, 1983.
- BELTRAME, L. F. S. Avaliação do desempenho de três subsoladores em latossolo vermelho escuro. *Eng. Agrícola*, 7(1):37-52, 1983.
- CHANG, C. S.; LAU, M. S. *Design of strain gauge transducer*. Singapura, 1986 12p. (mimeo).
- COOK, N. H.; RABINOWICZ, E. *Physical measurement and analysis*. New York. Addison-Wesley, 1963. 312p.
- COSMOS/M^R User guide-Stress, vibration, buckling, dynamics and heat transfer analysis*, version 1.51, Structural Research and Analysis Corporation (S.R.A.C.), Santa Mônica, Califórnia, U.S.A., 1988.
- DAVIES, D. B. *Subsoiling*. Leaflet 617, England, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, 1983. 10p.
- DRANSFIELD, P.; WILLATT, S. T.; WILLIS, A. H. Soil to implement reaction experienced with simple tines at various angles of attack. *Journal agricultural engineering research*, 9(3):220-234, 1964.

- FAIRES, V. M. *Elementos orgânicos de máquinas*. 2. ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1982. 326p.
- GODWIN, R. J. An extend octogonal ring transducer for use in tillage studies. *Journal agricultural engineering research*, 20:347-352, 1975.
- GODWIN, R. J.; SPOOR, G. Soil failure with narrow tines. *Journal agricultural engineering research*, 22(3):213-218, 1977.
- GODWIN, R. J. Force measurement on tillage implements. In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL SOIL TILLAGE RESEARCH ORGANISATION, 9. Osijek, 1982. *Anais*, Osijek, National College of Agricultural Engineering, 1982 p.1-6.
- GOMES, F. P. *Curso de estatística experimental*. 11. ed. São Paulo, Livraria Nobel, 1985. 466p.
- GREGORY, J. M.; FEDLER, C. B. *Model evaluation and research verification (MERV)*. St. Joseph, ASAE, 1986 (ASAE paper n° 86-5032).
- HORGER, O. J. *Metals engineering design*. 2. ed. New York, McGraw-Hill, 1965. 619p.
- IDE, G.; HOFMAN, G.; OSSEMERCT, C.; VAN RUYMBEKE, M. Subsoiling: time dependency of its beneficial effects. *Soil & Tillage Research*, 10:213-223, 1987.
- LANÇAS, K. P.; BENEZ, S. H. Avaliação da mobilização do solo agrícola na operação de subsolagem. *Energia na Agricultura*, 2(4):25-33, 1987.
- LANÇAS, K. P.; BENEZ, S. H. Influência da velocidade de subsolagem no consumo de combustível e na área mobilizada do solo. *Energia na Agricultura*, 3(1):25-30, 1988.

- LANÇAS, K. P.; BENEZ, S. H. Avaliação dos resultados operacionais obtidos para três formas geométricas de hastes subsoladoras. *Energia na Agricultura*, 4(1):27-34, 1989.
- McKYES, E. The calculation of draft forces and soil failure boundaries of narrow cutting blades. *Transactions of the ASAE*, 21(1):20-24, 1978.
- O'CALLAGHAN, J. R.; FARRELY, K. M. Cleavage of soil by tined implements. *Journal agricultural engineering research*, 9(3):299-270, 1964.
- O'CALLAGHAN, J. R.; McCULLEN, P. J. Cleavage of soil by inclined and wedge shaped tines. *Journal agricultural engineering research*, 10(3):248-254, 1965.
- O'DOGHERTY, M. J. A dynamometer to measure the forces on a sugar beet topping knife. *Journal agricultural engineering research*, 20:339-345, 1975.
- OWEN, G. T. Soil disturbance associated with deep subsoiling in compact soils. *Canadian agricultural engineering*, 30(1):33-37, 1987.
- PAYNE, P. C. J. The relationship between mechanical properties of soil and performance of simple cultivation implements. *Journal agricultural engineering research*, 1(1):23-50, 1956.
- PAYNE, P. C. J.; TANNER, D. W. The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements. *Journal agricultural engineering research*, 4(4):312-325, 1959.
- PERUMPRAL, J. V.; GRISSO, R. D.; DESAI, C. S. A soil tool model based on limit equilibrium analysis. *Transactions of the ASAE*, 26:991-995, 1983.
- SAS INSTITUT INC. *SAS: Introductory Guide*. Editation Cory, North Carolina, U.S.A., 1985. 97p.

- SEGERLIND, L. J. *Applied finite element analysis*. 2. ed. New York, John Wiley and Sons, 1984. 424p.
- SIEMENS, J. C.; WEBER, J. A.; THORBURN, J. H. Mechanics of soil as influenced by model tillage tools. *Transactions of the ASAE*, 8(1):1-7, 1965.
- SILVA, J. R.; MESQUITA, C. M.; KURACHI, S. A. H.; TESTA, A. *Avaliação de peças ativas de subsoladores quanto a exigência de tração.*, BT.94 Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1984. 15p.
- SILVA, J. R.; KURACHI, S. A. H.; MESQUITA, C. M.; BARRETO, J. N.; PETRONI, A. C. *Correlação entre esforço de tração e profundidade de subsolagem.* BT.96 Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1984. 16p.
- SPOOR, G.; GODWIN, R. J. An investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *Journal agricultural engineering research*, 23(3):243-258, 1978.
- STAFFORD, J. V. The performance of a rigid tine in relation to soil properties and speed. *Journal agricultural engineering research*, 24(1):41-55, 1979.
- STAFFORD, J. V. Force prediction models for brittle and flow failure of soil by draught tillage tools. *Journal agricultural engineering research*, 29:51-60, 1984.
- STELL, R. G. D.; JORRIE, J. H. *Principles and procedures of statistics: A Biometrical Approach*. 2. ed. Tokyo, McGraw-Hill, 1981. 633p.
- WILLAT, S. T.; WILLIS, A. H. A study of the trough formed by the passage of tines through the soil. *Journal agricultural engineering research*, 10(1):1-4, 1965.

ABSTRACT

The objective of the present work was to investigate the force distribution in a subsoiler. Geometric parameters were considered and its influence evaluated according to the implement performance.

A commercial available subsoiler was used with a curved leg and a removable tip which constituted the basic configuration of the implement used as reference. Modifications were made considering three different parameters on wing width, rake angle, and slope angle.

To study the tine performance, draught, vertical force and the associated moment were measured. From the obtained results the specific resistance was calculated.

The results were submitted to statistical analysis and showed that the implement has a better performance using a width wing of 435 mm, keeping the same rake and slope angles, 35° and 15° respectively, of the implement used as reference. Consequently, the disturbed area has a smooth shape and the least specific resistance.

An octagonal ring transducer was designed using a modified equation commonly adopted in these cases. The location to set the strain gauge was determined using a finite element methodology. The results indicated that linearity, hysteresis, and cross sensitivity were consistent.

APÊNDICE A

DADOS EXPERIMENTAIS

T	BL	Força horizontal (N)		Força vertical (N)		Momento (N.m)		Área do solo em profundidade (m ²)		Área de elevação do solo (m ²)	
		média	σ	média	σ	média	σ	rep. 1	rep. 2	rep. 1	rep. 2
1	1	6350	1290	1510	540	4820	1040	0.0761	0.0719	0.0025	0.0006
1	2	7450	1220	1840	559	5610	1000	0.0849	0.0885	0.0021	0.0171
1	3	8710	1750	2560	864	6610	1460	0.0866	0.0780	0.0334	0.0370
2	1	7850	1080	1840	425	5850	828	0.0907	0.0902	0.0367	0.0279
2	2	8790	2290	2090	822	6500	1750	0.1029	0.0863	0.0226	0.0252
2	3	9520	2030	2180	721	7040	1560	0.1162	0.1157	0.0365	0.0754
3	1	8560	1660	1540	540	6330	1260	0.1027	0.1141	0.0237	0.0329
3	2	9080	2020	1520	596	6660	1510	0.0961	0.0973	0.0327	0.0120
3	3	9510	1990	1710	596	6930	1500	0.1173	0.1027	0.0691	0.0507
4	1	10700	2020	906	603	7630	1540	0.1202	0.1307	0.0148	0.0245
4	2	10500	1780	1340	682	7540	1370	0.1127	0.1116	0.0192	0.0252
4	3	10590	1990	1250	730	7640	1520	0.1156	0.1130	0.0163	0.0087
5	1	10590	1640	985	508	7550	1230	0.1448	0.1381	0.0443	0.0362
5	2	10590	1800	834	737	7520	1360	0.1281	0.1438	0.0251	0.0462
5	3	12500	2360	1500	799	9020	2020	0.1334	0.1236	0.0713	0.0276
6	1	10800	1430	1020	505	8440	1160	0.1353	0.1433	0.0457	0.0374
6	2	11900	2060	1120	703	8950	1600	0.1447	0.1304	0.0282	0.0229
6	3	12800	2330	1220	769	9740	1880	0.1302	0.1337	0.0240	0.0562
7	1	9760	1690	1290	555	7020	1260	0.1192	0.1213	0.0581	0.0272
7	2	10700	1620	1400	508	7630	1230	0.1164	0.1094	0.0306	0.0290
7	3	11600	2070	1630	663	8210	1590	0.1199	0.1034	0.0345	0.0363
8	1	9920	1530	1100	552	7050	1140	0.1271	0.1186	0.0302	0.0147
8	2	9820	1700	1220	610	6930	1300	0.1255	0.1295	0.0584	0.0384
8	3	10590	2200	1680	914	7530	1700	0.1213	0.1132	0.0320	0.0411
9	1	9980	1540	1410	552	6960	1180	0.1209	0.1349	0.0492	0.0649
9	2	10800	2230	1640	750	7510	1710	0.1060	0.1277	0.0147	0.0448
9	3	12500	2220	1270	804	8770	1720	0.1356	0.1178	0.0430	0.0359

T = tratamento

BL = bloco

APÊNDICE B

ESPECIFICAÇÕES DOS MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.

1. TRANSDUTOR.

a) Extensômetro elétrico de resistência

Marca: Kyowa - Eletronic Instruments Co. LTD.

Tipo: KFC-5-350-C1-11

Resistência: $350,9 \pm 0,6$

Coefficiente de dilatação térmica aferido: $10,8 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$

Fator de resistência: $2,12 \pm 1\%$

Comprimento da resistência: 5 mm

Rendimento térmico: $\pm 1,8 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$

Mudança do fator de calibr. c/ a temperat.: $0,015 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$

b) Terminais.

Marca: Kyowa - Eletronic Instruments Co. LTD.

Tipo: T-F7

c) Adesivo.

Marca: Kratos dinamômetros S.A.

Tipo: KBR 610

Base: Epoxy

d) Proteção.

- Verniz.

Marca: Micro - Measurements MM

- Borracha de silicone.

Marca: Kratos dinamômetros S.A.

Tipo: SK

2. INSTRUMENTAÇÃO.

a) Prensa.

Marca: Schulz

Capacidade máxima: 15 ton

b) Transdutor tração/compressão.

Marca: Interface

Modelo: ULC 5k

Capacidade máxima: 5 ton

c) Máquina universal de ensaios.

Marca: Mohr & Federhaff AG Mannheim (Germany)

d) Voltímetros.

Marca: RE - SOM Eletrônica Ltda.

Modelo: MIC - 6600 C DMM

e) Condicionador de sinais.

Marca: Kyowa Electronic Instruments Co. LTD.

Modelo: DPM - 6G

Tensão de alimentação da ponte: $\pm 0,5V$ ou $\pm 2,0V$

Número de canais: 6

Calibração padrão: $\pm 100, \pm 300, \pm 1000, \pm 3000 \times 10^{-6} \mu\epsilon$

Ajuste de sensibilidade: 1, 1/3, 1/10, 1/30 e 1/100

Variação do ajuste: 1 a 1/4

f) Indicador digital múltiplo para transdutores.

Marca: Interface

Modelo: IM - 5

Tensão de alimentação da ponte: 10 V

g) Inversor de voltagem.

Marca: Itamarason

Potência: 200 W

Entrada: 12 V

Saída: 120 V

h) Gravador e reproduutor de sinais.

Marca: Hewlett-Packard

Modelo: 3964A

Número de canais: 4

Largura da fita: 1/4"

Velocidades da fita (pol/s): 15, 7 1/2, 3 3/4, 1 7/8, 15/16 e 15/32

Voltagem: 120 V

Sinais de calibração: $\pm DC$ 0; 1,0; 1,414; 2,5; 5,0 e 10 V

i) Cronômetro.

Professional Quartz Timer

Precisão: 1/100 s

j) Analizador de sinais

Spectral Dynamics Signal Analyzer

Marca: Scientific-Atlanta

Modelo: SD380