

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel**  
**Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar**  
**Curso de Agronomia**



**Tese**

**Modelo matemático simplificado para previsão do esforço de tração em  
ferramentas estreitas de mobilização do solo**

**Emilia Estefania Villalba Morinigo**

Pelotas, 2023

**Emilia Estefania Villalba Morinigo**

**Modelo matemático simplificado para previsão do esforço de tração em  
ferramentas estreitas de mobilização do solo**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Lilles Tavares Machado (DER-FAEM-UFPEL)

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Lilles Tavares Machado (DER-FAEM-UFPEL)

Pelotas, 2023

**Emilia Estefania Villalba Morinigo**

**Modelo matemático simplificado para previsão do esforço de tração em  
ferramentas estreitas de mobilização do solo**

Tese de doutorado apresentada como requisito para obtenção do grau de Doutor em Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 21/07/2023

Banca examinadora:

.....  
Prof. Dr. Antônio Lilles Tavares Machado (Orientador)  
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

.....  
Prof. Dr. Carlos Ricardo Trein  
Doutor em Engenharia Agrícola pela Cranfield University

.....  
Prof. Dr. Mauro Fernando Ferreira  
Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas

.....  
Prof. Dr. Tiago Rodrigo Francetto  
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Santa Maria

"...ao menos uma vez na vida você precisa de um médico, de um advogado,  
de um policial e um padre...

Mas todo dia, por três vezes, precisamos de um AGRICULTOR".

Brenda Schoepp.

Ao meu pai (in memoriam)

Aos meus irmãos e sobrinhos, esta conquista é por  
você e que seja um ponto de partida.

## **Agradecimentos**

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado saúde e colocar ao meu caminho pessoas maravilhosas que me iluminaram e fizeram este desafio menos árduo.

Aos meus familiares e amigos do Paraguai que compreenderam a minha ausência e por estar sempre me apoiando apesar da distância.

Agradeço ao grupo Coimbra de Universidades Brasileiras e a Capes pela concessão da bolsa que conjuntamente me oportunizaram a realização de este sonho.

Meu maior respeito e gratidão à Universidade Federal de Pelotas, pelo ensino gratuito de qualidade e ao Programa de Pós-graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar que me abriu as portas para ampliar a minha formação profissional e pessoal.

Ao corpo de professores do PPGSPAF e do Núcleo de Inovação em Máquinas e Equipamentos Agrícolas que com tanto esmero transmitem seus conhecimentos e experiência aos alunos.

Aos meus Orientadores, Prof. Dr. Antônio Lilles Tavares Machado e o Prof. Dr. Roberto Lilles Tavares Machado que me receberam com muita cordialidade no laboratório do NIMEq e que sem dúvida contribuíram grandemente para meu conhecimento do mundo das máquinas e equipamentos agrícolas. Sempre ficarei grata por todo o apoio, a confiança e amizade que me brindaram desde minha chegada ao Programa.

Aos meus queridos amigos e colegas de curso Ramón, Luciana, Henrique, Marlon, Nixon, Douglas, Cesar e Elka.

Ao professor Mauro Ferreira que acreditou na minha capacidade, obrigada por me dar suporte além da sua obrigação.

A Jamile Santiago que se dedicou junto comigo, sempre me incentivando e me animando, pelas tantas correções e traduções contribuiu para a melhoria da compreensão da língua portuguesa. Obrigada pelo carinho e cuidado que tens comigo.

A todos que de forma direta ou indireta, colaboraram na realização e conclusão deste trabalho que me deu muita satisfação pessoal apesar da pandemia.

## Resumo

MORINIGO-VILLALBA, Emilia Estefania. **Modelo matemático simplificado para previsão do esforço de tração em ferramentas estreitas de mobilização do solo.** 2023. 137p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

Equipamentos como escarificadores e subsoladores, por proporcionarem menor mobilização do solo tem sido cada vez mais utilizados na realização das tarefas de mobilização inicial do solo para implantação de culturas. O dimensionamento deste tipo de equipamento a partir de parâmetros técnicos contribuem na racionalização da sua utilização. A estimativa da força necessária a tração de um determinado equipamento pode ser realizada através de ensaios a campo e modelagens matemáticas. No Brasil existem poucos estudos sobre a utilização de modelos matemáticos na obtenção do esforço de tração das ferramentas estreitas de mobilização do solo, tais como escarificadores, subsoladores e hastes sulcadoras de semeadoras de plantio direto. Diversos são os modelos matemáticos que permitem a estimativa, tanto o esforço de tração como da mobilização provocada por estas ferramentas no solo. O objetivo principal deste trabalho consistiu no estudo de diferentes modelos matemáticos a fim de identificar-se, entre estes, os mais promissores para as condições brasileiras. Posteriormente buscou-se sua simplificação e incorporação em um aplicativo móvel, no sentido de possibilitar o cálculo do esforço requerido por haste e a potência necessária ao trator, de forma simples, rápida e precisa. A metodologia deste trabalho dividiu-se em três fases; a primeira: pesquisa sistemática, a segunda: simplificação e comparação e a terceira: desenvolvimento de um aplicativo móvel. Foram selecionados os modelos de: Reece (1965); Hettiaratchi & Reece (1967); Godwin & Spoor (1977), McKyes & Ali (1977); Grisso *et al.* (1980) e Perumpral *et al.* (1983). Para aplicá-los foram utilizados estudos em trabalhos de campo de diversos autores brasileiros. O processo de simplificação dos modelos baseou-se na exclusão das características com maior dificuldade de obtenção e que também possuíam pouca interferência no resultado final. Os resultados obtidos foram então comparados, sendo que o modelo proposto por Hettiaratchi & Reece (1967), de forma simplificada foi o que apresentou a maior aproximação, para maioria das comparações com os resultados de campo. Este modelo foi o selecionado para inserção no aplicativo, o qual foi confeccionado para plataforma Android, disponibilizando os resultados de esforço de tração em Kgf e de potência em CV; KW e HP, com um nível de variabilidade de dez por cento para mais ou para menos. Foram executados testes de validação onde comparou-se os dados de campo entre o modelo sem simplificação, o modelo simplificado e o calculado pelo aplicativo, tendo-se obtido resultados que demonstram que o aplicativo cumpre adequadamente o objetivo de auxiliar no cálculo de esforço de tração de forma simples, rápida e eficiente.

**Palavras-chaves:** descompactadores, preparo do solo, previsão de esforço de tração, modelos matemáticos.

## Abstract

MORINIGO-VILLALBA, Emilia Estefania. "**Simplified mathematical model for predicting traction force in narrow soil mobilization tools.**". 2023. 137p. Tese (Doctorate in Agronomy) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

Equipment such as scarifiers and subsoilers, due to their lower soil mobilization, have been increasingly used in the initial soil mobilization tasks for crop establishment. Sizing this type of equipment based on technical parameters contributes to the rationalization of its use. The estimation of the force required for the traction of a specific piece of equipment can be performed through field tests and mathematical modeling. In Brazil, there are few studies on the use of mathematical models to obtain the traction effort of narrow soil mobilization tools, such as scarifiers, subsoilers, and furrow openers for no-till seeders. There are several mathematical models that allow for the estimation of both the traction effort and the mobilization caused by these tools in the soil. The main objective of this work was to study different mathematical models in order to identify, among them, the most promising ones for Brazilian conditions. Subsequently, efforts were made to simplify them and incorporate them into a mobile application, in order to enable the calculation of the required effort per shank and the power needed for the tractor, in a simple, fast, and accurate manner. The methodology of this work was divided into three phases: the first phase involved systematic research, the second phase involved simplification and comparison, and the third phase involved the development of a mobile application. The selected models were: Reece (1965); Hettiaratchi & Reece (1967); Godwin & Spoor (1977), McKyes & Ali (1977); Grisso et al. (1980) and Perumpral et al. (1983). To apply them, studies from various Brazilian authors' fieldwork were used. The simplification process of the models was based on excluding features that were more difficult to obtain and also had little interference in the final result. The obtained results were then compared, and the model proposed by Hettiaratchi & Reece (1967), in its simplified form, showed the highest approximation for most of the field comparison results. This model was selected for insertion into the application, which was developed for the Android platform, providing traction effort results in Kgf and power in CV; KW and HP, with a variability level of ten percent plus or minus. Validation tests were conducted comparing field data between the unsimplified model, the simplified model, and the calculation by the application, obtaining results that demonstrate that the application adequately fulfills the objective of assisting in the calculation of traction effort in a simple, fast, and efficient manner.

**Keywords:** Subsoilers, soil preparation, traction force prediction, mathematical models.

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Preparo do solo .....	26
<b>Figura 2</b> - Diagrama de Mohr – Coulomb, que representa a ruptura de solo. ....	27
<b>Figura 3</b> - Comportamento típico para três tipos de solo: A) Solo pesado ou textura .....	28
<b>Figura 4</b> - Efeito de diferentes de ângulos de ataque e de diferentes larguras atuando na mesma profundidade.....	30
<b>Figura 5</b> - Modelo de profundidade crítica por Godwin (1974). ....	38
<b>Figura 6</b> - Modelo de profundidade crítica por (KOSTRITSYN, 1956). ....	39
<b>Figura 7</b> - Diferença entre a profundidade de trabalho e largura das ferramentas. ..	40
<b>Figura 8</b> - Avaliação de equipamento de mobilização do solo a campo.....	41
<b>Figura 9</b> - Movimentação do solo por uma ferramenta estreita apresentado por Payne (1956). ....	42
<b>Figura 10</b> - Escarificador .....	42
<b>Figura 11</b> - Subsolador .....	43
<b>Figura 12</b> - Haste de escarificador/subsolador de formato parabólico. ....	44
<b>Figura 13</b> - Evolução histórica dos modelos matemáticos. ....	46
<b>Figura 14</b> - Modelo de ruptura de solo por ferramentas estreitas apresentadas por Payne (1956). ....	48
<b>Figura 15</b> - Modelo de ruptura de solo apresentadas por O'Callaghan & Farrelly (1964). ....	49
<b>Figura 16</b> - Modelo de ruptura de solo por ferramentas estreitas A e B, apresentadas por Hettiaratchi e Reece (1967). ....	51
<b>Figura 17</b> - Modelo de ruptura de solo por ferramentas estreitas apresentadas por Godwin & Spoor (1977).....	54
<b>Figura 18</b> - Modelo de ruptura de solo por ferramentas estreitas apresentadas por McKyes & Ali (1977).....	56
<b>Figura 19</b> - Modelo de ruptura de solo por ferramentas estreitas apresentadas por Grisso <i>et al.</i> (1980).....	58
<b>Figura 20</b> - Modelo de ruptura de solo por ferramentas estreitas apresentadas por Perumpral <i>et al.</i> (1983).....	60
<b>Figura 21</b> - Lista de atividades e metodologia desenvolvida.....	64
<b>Figura 22</b> - Fluxograma do aplicativo móvel .....	71

<b>Figura 23</b> - Resultados de esforço de tração obtidos em campo e pela utilização dos modelos .....	89
<b>Figura 24</b> - Metodologia de análises para simplificação dos modelos matemáticos.	90
<b>Figura 25</b> - Resultados de esforço de tração medidos a campo por Bellé <i>et al.</i> (2014) .....	92
<b>Figura 26</b> - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Santos <i>et al.</i> (2015).....	94
<b>Figura 27</b> - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Machado & Trein (2013).....	96
<b>Figura 28</b> - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Machado & Trein (2013).....	97
<b>Figura 29</b> - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Machado & Trein (2013).....	99
<b>Figura 30</b> - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Machado & Trein (2013).....	100
<b>Figura 31</b> - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Rosa <i>et al.</i> (2011).....	102
<b>Figura 32</b> - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Machado <i>et al.</i> (2015) .....	104
<b>Figura 33</b> - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Salvador <i>et al.</i> (2008).....	106
<b>Figura 34</b> - Síntese das comparações entre os modelos matemáticos originais e os modelos simplificados .....	108
<b>Figura 35</b> - Primeira tela do aplicativo móvel. ....	111
<b>Figura 36</b> - Segunda tela do aplicativo móvel. ....	112
<b>Figura 37</b> - Terceira tela do aplicativo móvel. ....	113
<b>Figura 38</b> - Quarta tela do aplicativo móvel. ....	114
<b>Figura 39</b> - Quinta tela do aplicativo móvel.....	115
<b>Figura 40</b> - Sexta tela do aplicativo móvel. ....	116
<b>Figura 41</b> - Sétima tela do aplicativo móvel. ....	117
<b>Figura 42</b> - Oitava tela do aplicativo móvel.....	118
<b>Figura 43</b> - Nona tela do aplicativo móvel.....	119
<b>Figura 44</b> - Decima tela do aplicativo móvel. ....	120

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1</b> - Valores típicos de coesão e ângulo de atrito segundo Ashburner & Sims (1984).....	68
<b>Tabela 2</b> - Relação entre os níveis de teor de água, ângulo de atrito interno e coesão do solo Machado (2010) e Silva <i>et al.</i> (2004).....	68
<b>Tabela 3</b> - Valores típicos de densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) do Estado do Rio Grande do Sul segundo Machado (2010) e Silva <i>et al.</i> (2004). ....	69
<b>Tabela 4</b> - Modelos matemáticos analíticos selecionados. ....	75
<b>Tabela 5</b> - Identificação de casos de estudos independentes. ....	76
<b>Tabela 6</b> - Descrição das características do solo.....	77
<b>Tabela 7</b> - Descrição das características da ferramenta. ....	78
<b>Tabela 8</b> - Resultados da demanda de força de tração para cada ferramenta em condição dinâmica a campo. ....	78

## Lista de quadros

<b>Quadro 1</b> - Teste de validação do aplicativo móvel. ....	121
<b>Quadro 2</b> - Comparação dos resultados da demanda de força medido a campo, com os diferentes modelos matemáticos na integral e com os simplificados. ....	149

## Lista de símbolos

### Solo

A	Área de solo mobilizada pela ferramenta;
c	Índice de coesão do solo ( $\text{N}\cdot\text{cm}^2$ );
$CF_1$	Força coesa na linha de ruptura;
$CF_2$	Força coesa nas laterais;
$F_a$	Resistência à adesão;
$N_\gamma$	Fator de densidade do solo;
$N_c$	Fator do índice de coesão do solo;
$N'_c$	Fator do índice de coesão do solo;
$N_{ca}$	Fator do índice de adesão do solo;
$N_q$	Fator de sobretaxa vertical;
$N'_q$	Fator de sobretaxa vertical;
$N_{sc}$	Fator de coesão horizontal definida na parte inferior;
$N_{sy}$	Fator de fricção horizontal definida na parte inferior;
$P_s$	Peso da cunha do solo;
q	Sobretaxa de pressão vertical aplicada na superfície do solo;
q'	Pressão horizontal;
r	Raio da ruptura lateral crescente (cm);
s	A largura final do solo mobilizado lateralmente;

### Ferramenta

d	Profundidade de trabalho da ferramenta (m);
d'	Profundidade efetiva de trabalho (m);
$d_c$	Profundidade crítica;
g	Aceleração devido à gravidade ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ );
H	Força de tração (kN);
h	Elevação do solo que ocorre na frente da ferramenta;
K	O fator de inclinação da ferramenta definido na parte inferior;
$K_b$	Fator de inclinação da ferramenta;
$K_o$	Coeficiente de pressão da terra em repouso;
P	Força total da ferramenta (N);
$P_2$	Força necessária para mobilizar as zonas laterais (kN);
Q	Força total (kN);

- R Força normal a superfície elevada à frente da ferramenta;
- $R_2$  Forças aplicadas nos lados;
- w Largura da ferramenta (m);
- v Velocidade de deslocamento da ferramenta ( $\text{km.h}^{-1}$ );

### Ferramenta-solo

- $c_a$  Índice de adesão solo – material (kPa);
- d Profundidade da ferramenta;
- $N_\gamma, N_c$  e  $N_q$  Fatores que não dependem apenas da resistência ao atrito do solo, mas também na geometria da ferramenta e as ferramentas para resistência do solo;
- SF<sub>1</sub> Fator de segurança;
- SF<sub>2</sub> Força de atrito nas laterais;
- w' Largura efetiva da lâmina estreita no solo;
- z Profundidade média na qual o centroide da cunha de solo é localizado, com relação a superfície;

### Símbolos gregos

- $\alpha$  Ângulo de ataque da ferramenta (°);
- $\beta$  Ângulo de ruptura do solo a frente da ferramenta (°);
- e Base de logaritmos naturais, cujo valor ou número irracional é 2,718281828;
- $\pi$  (Pi) Número irracional cujo valor é 3,141592654;
- $\tau$  Tensão máxima cisalhante do solo;
- $\sigma$  Tensão normal;
- $\theta$  Teor de água no solo;
- $\eta$  Ângulo de ruptura do solo entre a parte central da cunha de ruptura e a parte lateral de ruptura (°);
- $\rho$  Ângulo entre a parte central da cunha de ruptura e as linhas laterais de ruptura (°);
- $\rho_0$  Pressão do solo em repouso;
- $\delta$  Ângulo de atrito solo - material (°);
- $\mu$  Coeficiente de atrito interno do solo (°);
- $\phi$  Ângulo de atrito interno do solo (°);
- $\gamma$  Densidade do solo ( $\text{kg.m}^{-3}$ );

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>17</b>
1.1	Objetivos .....	20
1.1.1	Objetivo Geral .....	20
1.1.2	Objetivos Específicos .....	20
1.2	Hipóteses .....	21
<b>2</b>	<b>Revisão bibliográfica</b> .....	<b>22</b>
2.1	Considerações iniciais .....	22
2.2	Mobilização do solo .....	25
2.3	Resistência ao cisalhamento do solo.....	26
2.4	Fatores que influenciam na mobilização do solo .....	30
2.5	Profundidade crítica.....	37
2.6	Ferramentas estreitas de mobilização do solo.....	40
2.6.1	Escarificadores e subsoladores .....	42
2.7	Previsão de esforço de tração com modelos matemáticos .....	45
2.7.1	Modelo de ruptura de solo proposto por Payne (1956) .....	48
2.7.2	Modelo de ruptura de solo proposto por O'Callaghan & Farrelly (1964).....	48
2.7.3	<b>Modelo matemático proposto por Reece (1965)</b> .....	<b>49</b>
2.7.4	Modelo matemático proposto por Hettiaratchi e Reece (1967) .....	51
2.7.5	Modelo matemático proposto por Godwin & Spoor (1977).....	53
2.7.6	Modelo matemático proposto por McKyes & Ali (1977) .....	55
2.7.7	Modelo matemático proposto por Grisso <i>et al.</i> (1980) .....	57
2.7.8	Modelo matemático proposto por Perumpral <i>et al.</i> (1983) .....	59
2.8	Aplicativo móvel .....	61
<b>3</b>	<b>Metodologia</b> .....	<b>64</b>
3.1	Primeira fase; pesquisa sistemática .....	65
3.1.1	Pesquisa e caracterização dos modelos matemáticos.....	65
3.1.2	Pesquisa da fonte de dados bibliográficos sobre ferramentas estreitas.....	65
3.1.3	Seleção dos ensaios a campo da fonte de literatura.....	66
3.2	Segunda fase: simplificação e comparação.....	67
3.2.1	Seleção dos modelos matemáticos e ensaios a campo .....	67
3.2.2	Estabelecimento das variáveis pré-determinadas das características físicas do solo e das ferramentas. ....	67
3.2.3	Análise e simplificação dos modelos matemáticos .....	69

3.2.4	Comparação dos resultados previstos e medidos experimentalmente.....	70
3.3	Terceira fase; aplicativo móvel .....	70
3.3.1	Função global - entrada e saída de dados.....	70
3.3.2	Construção do aplicativo .....	71
3.4	Softwares .....	72
3.4.1	Python.....	72
3.4.2	Kivy .....	73
3.4.3	Buildozer .....	73
3.5	Teste de validação do aplicativo móvel .....	73
<b>4</b>	<b>Resultados e discussões</b> .....	<b>74</b>
4.1	Primeira fase; pesquisa sistemática .....	74
4.1.1	Pesquisa e caracterização dos modelos matemáticos.....	74
4.1.2	Pesquisa da fonte de dados bibliográficos sobre ferramentas estreitas.....	74
4.2	Segunda fase; simplificação e comparação.....	74
4.2.1	Seleção dos modelos matemáticos e ensaios a campo.....	74
4.2.2	Análise e simplificação dos modelos matemáticos aplicados .....	79
4.2.3	Modelo de Reece 1965 (Equação Universal de Mobilização do Solo) .....	79
4.2.4	Modelo de Hettiaratchi e Reece (1967) .....	80
4.2.5	Modelo de Godwin e Spoor (1977) .....	82
4.2.6	Modelo de McKyes & Ali (1977).....	83
4.2.7	Modelo de Grisso <i>et al.</i> (1980).....	85
4.2.8	Modelo de Perumpral <i>et al.</i> (1983) .....	87
4.3	Comparação entre os resultados previstos e medidos experimentalmente .	91
4.3.1	Caso: Bellé <i>et al.</i> (2014) .....	91
4.3.2	Caso: Santos <i>et al.</i> (2015).....	93
4.3.3	Caso: Machado & Trein (2013A) .....	95
4.3.4	Caso: Machado & Trein (2013B) .....	98
4.3.5	Caso: Rosa <i>et al.</i> (2011).....	101
4.3.6	Caso: Machado <i>et al.</i> (2015) .....	103
4.3.7	Caso: Salvador <i>et al.</i> (2008) .....	105
4.4	Análises dos resultados das comparações dos modelos.....	108
4.5	Terceira fase; aplicativo.....	110
4.5.1	Construção.....	110
4.6	Função global - Entradas e saídas de dados.....	110

4.7	Teste de validação do aplicativo móvel .....	121
<b>5</b>	<b>Conclusões</b> .....	<b>126</b>
	<b>Referências</b> .....	<b>127</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>140</b>

## 1 Introdução

Existem registros do começo da civilização demonstrando que o homem sempre buscou alternativas para reduzir a penosidade da produção de alimentos. Dentre todas as tarefas da lavoura agrícola, o preparo do solo é considerado de grande importância no que diz respeito ao estabelecimento da cultura, produtividade e na eficiência do processo produtivo, o qual também deve incluir o uso de energia na execução das tarefas.

O condicionamento periódico do solo sempre é uma preocupação para o produtor rural no que diz respeito ao tempo que demanda a realização da tarefa e o custo financeiro que possa implicar. Trata-se de uma das tarefas agrícolas que mais demanda energia; além disso existem outros fatores que se deve considerar na hora de realizar os trabalhos como a descompactação, a necessidade de controle de plantas espontâneas e a conservação dos solos que fazem parte do processo de preparar o solo para o plantio.

Os agricultores familiares estão procurando cada vez mais ferramentas estreitas como escarificadores e subsoladores para romper as camadas compactadas e mobilizar o solo mantendo sua estrutura de forma a evitar a degradação dos mesmos. Porém, há dificuldade na seleção e o dimensionamento adequado do implemento com o trator, no que diz respeito ao conhecimento antecipado de demanda de potência. Os operadores se baseiam na experiência anterior, porém, com os novos equipamentos disponíveis no mercado, a experiência prévia com implementos obsoletos pode ser pouco confiável.

Estudos realizados no Brasil sobre o dimensionamento das máquinas agrícolas têm demonstrado que a escolha do maquinário, a partir de parâmetros técnicos como a demanda de esforço de tração contribuem na racionalização e seleção o que pode evitar o sub ou superdimensionamento e o aumento dos custos de produção.

A estimativa da força necessária a tração de um determinado equipamento pode ser realizada através de ensaios a campo e modelagens matemáticas. Os ensaios são mais dispendiosos e demorados, já o modelamento matemático vem a ser de custo mais baixo, sendo comprovado que é capaz de proporcionar resultados muito próximos aos de campo. Poucas pesquisas têm sido conduzidas no Brasil com relação ao modelamento matemático, no sentido de obter-se o esforço de tração para

os diversos equipamentos utilizados, notadamente para ferramentas de hastes estreitas.

Os modelos matemáticos para obtenção de esforço de tração proporcionados por ferramentas estreitas propostos por Reece (1965); Hettiaratchi & Reece (1967); Godwin & Spoor (1977), Mckyes & Ali (1977), Grisso *et al.* (1980) e Perumpral *et al.* (1983) permitem prever comportamentos que envolvem fatores complexos com múltiplas variáveis que agem durante a ruptura do solo e que produzem vários efeitos simultâneos, levando em conta parâmetros referentes as propriedades físicas do solo a ser trabalhado, a ferramenta e a interação com ela.

A correta utilização desses parâmetros permite não só o projeto de ferramentas que possibilitem uma diminuição do consumo de energia, redução do esforço de tração e melhor mobilização do solo, como também uma adequada seleção da potência necessária à sua tração.

No entanto, uma característica comum e pouco atraente da maioria dos modelos matemáticos é sua complexidade matemática, traduzida pelo grande número de etapas necessárias para chegar-se ao resultado final. Tal fato é uma limitação para sua utilização fora dos meios acadêmicos.

Aproveitar a exatidão proporcionada pelos modelos matemáticos na previsão do esforço de tração para ferramentas estreitas e utilizá-lo de forma menos complexa, possibilitando fácil acesso ao público em geral é o motivo que justificou-se a realização deste trabalho de pesquisa. O objetivo básico, portanto, consiste no estudo dos modelos analíticos, mais conhecidos, com a finalidade da verificação de quais seriam os mais adequados à situação brasileira.

Para isto foram utilizados dados de esforço de tração de campo obtidos por diversos pesquisadores (coletados em bases de dados de artigos científicos). Posteriormente, foram escolhidos os que apresentam resultados mais compatíveis com aqueles de campo, a fim de se proceder às simplificações sem afastar-se demais de sua acuracidade. A simplificação dos modelos atende o objetivo de torná-los mais fáceis de serem usados, buscando-se desta forma ampliar sua aplicação.

Obtidos os modelos considerados mais precisos, após a simplificação proposta, desenvolveu-se um aplicativo para celular. A ideia do aplicativo é que a utilização desta ferramenta complexa de cálculo (modelo matemático) seja facilitada e possa vir a ser apropriada pelo produtor rural e outros profissionais da área. Assim a tarefa do produtor ou profissional, de escolher o equipamento e trator mais adequado ao

mesmo, além de precisa torna-se bastante simples. De outra forma, projetistas de máquinas agrícolas também contarão com uma ferramenta digital que lhes dará subsídio no momento de projetar a geometria do equipamento.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Propor um modelo matemático simplificado baseado em modelos empíricos existentes que melhor se ajustem para obtenção do esforço de tração em ferramentas de hastes estreitas de mobilização do solo, mantendo adequada precisão, com posterior confecção de um aplicativo que facilite sua utilização.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a importância e o percentual de participação, no resultado, de cada um dos fatores que compõem os modelos matemáticos mais utilizados para previsão do esforço de tração em ferramentas de hastes estreitas de mobilização do solo;

- Determinar valores do domínio/variáveis dos modelos matemáticos e avaliar os que melhor se ajustam para serem simplificados.

- Eleger entre os modelos matemáticos analisados os que sejam os mais promissores, em função da comparação dos resultados calculados com aqueles de pesquisas de campo;

- Validar os modelos matemáticos simplificados propostos utilizando-se dados de pesquisas que obtiveram o esforço de tração para ferramentas estreitas em condições de trabalho à campo;

- Desenvolver um aplicativo para facilitar a aplicação do modelo matemático principalmente por parte dos agricultores.

## 1.2 Hipóteses

- a) Suprimindo alguns dos componentes dos modelos matemáticos empíricos existentes, as equações poderão manter o equilíbrio matemático;
- b) Com a supressão de componentes menos expressivos dos modelos matemáticos empíricos existentes terá o desempenho igual na obtenção do esforço de tração em ferramentas de hastes estreitas de mobilização do solo, mantendo adequada precisão;
- c) Este modelo matemático poderá ser inserido em um aplicativo para sua aplicação mais simples e rápida.

## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1 Considerações iniciais

As máquinas agrícolas, quando dimensionadas de acordo com as necessidades do estabelecimento agrícola, possibilitam segurança no investimento, por permitir ao produtor a diminuição dos riscos e custos de produção, obtendo em contrapartida aumento dos lucros.

No entanto, para o agricultor familiar vem a ser um desafio escolher um trator ou um implemento que lhe proporcione o melhor custo/benefício, visto que normalmente estes produtores ocupam pequenas áreas, tendo limitado acesso ao financiamento (ARTUZO *et al.* 2015).

No levantamento realizado por Scherer *et al.* (2015) sobre as informações técnicas disponibilizadas pelos fabricantes de escarificadores no mercado de máquinas agrícolas no Brasil, os autores obtiveram 44 modelos distribuídos em 5 principais fabricantes. Além disso, estabeleceram uma classificação de acordo, número de hastes, largura de trabalho, massa média e potência requerida para tração.

Outro trabalho semelhante foi realizado por Becker *et al.* (2015), analisando as características técnicas de subsoladores agrícolas, onde verificaram 139 modelos e a partir deles classificaram-nos de acordo com a largura de trabalho, massa, potência requerida, número de hastes e profundidade de trabalho.

De acordo com as duas pesquisas, constata-se que no mercado de máquinas agrícolas (escarificadores e subsoladores), existe um universo diverso de alternativas independentemente da marca e o modelo que evolui de forma acelerada com as inovações tecnológicas e que na mesma velocidade exige que os operadores e pequenos agricultores acompanhem essa evolução (MIALHE, 1996).

Entre outras dificuldades para a seleção de implementos agrícolas tem-se a falta de ensaios oficiais e de padronização de informações nos catálogos dos fabricantes. Por exemplo, a potência do motor indicada em CV, kW ou HP e a força de tração indicada em kN ou kgf, dificultam a comparação e tomada de decisão (FERREIRA, 2019).

No mercado de máquinas agrícolas do Brasil é comum a utilização das especificações técnicas dos equipamentos fornecidos pelos fabricantes no sentido de ter a demanda de potência que eles exigirão do trator, sem considerar-se os tipos de

solos e situações diversas em que o equipamento será utilizado baseando-se num padrão de máximo esforço exigido.

Em virtude da falta de uma legislação que regule essas deficiências, tem-se a tendência dos catálogos dos fabricantes em superestimarem a necessidade de força de tração dos implementos com a tentativa de evitar maiores prejuízos ao pequeno produtor, que na maioria dos casos não respeita os limites de potência exigida. Em consequência recomenda-se a utilização do trator com potência superior ao que realmente se faz necessário, implicando em altos custos fixos e variáveis ou caso contrário, que também pode acontecer, um parque de máquinas que não atenda as tarefas planejadas em quantidade e qualidade. Isto, na maioria das vezes leva na utilização das máquinas agrícolas de forma inadequada, o que pode pôr em perigo o futuro do empreendimento e segurança alimentar da família (LEVIEN & MAZURNA, 2021).

De acordo com Mialhe (1996), para estabelecer o uso racional do maquinário é necessário conhecer os sistemas de manejo de solo que este vai atender e as condições desejáveis que o solo deve apresentar após a tarefa, a energia consumida e sua capacidade de trabalho efetiva.

Serpa (1997); Godwin & O'Dogherty (2007) destacam em suas pesquisas que determinar a demanda de potência de implementos não é uma tarefa simples, exige um profundo conhecimento do comportamento dinâmico das propriedades do solo e muita experiência no que concerne as máquinas agrícolas, sendo que diferentes sistemas de cultivos, tipos de solos e ferramentas apresentam diferentes demandas de energia.

Gill & Vanden Berg (1968) salientam que um dos critérios utilizados para avaliar e adequar uma máquina de preparo de solo se dá através do conhecimento da força necessária para tracioná-lo. Por outro lado Rosa (1977) determinou que são dois fatores principais os que afetam a tração, quais sejam, as forças inerciais e o cisalhamento. O primeiro influencia principalmente os solos arenosos (solos de fricção), em câmbio os solos argilosos não são muito sensíveis as forças inerciais, mas sim ao cisalhamento, a resistência aumenta consideravelmente ao aumentar a velocidade de cisalhamento. As forças de inércia envolvem-se de forma contínua com o aumento da velocidade em solos de fricção, acontecendo de maneira similar com os fatores dependentes da taxa de deformação em solos coesos.

Marconi (2016) definiu que a força de tração exigida por um escarificador está ligada ao número de hastes, parâmetros operacionais (velocidade e profundidade de trabalho) e textura do solo.

Dada a real necessidade de informações com relação a dinâmica solo-máquina, percebe-se que são limitados os mecanismos desenvolvidos que venham a facilitar o acesso a informações para atender a essa demanda. Entre os principais segmentos interessados no estudo do desempenho operacional de máquinas agrícolas tem-se:

**Fabricantes de máquinas agrícolas:** a previsão de esforço de tração é uma informação de interesse primário para projetistas e fabricantes de máquinas e equipamentos agrícolas, o processo de projeto pode ser facilitado (no que diz respeito ao tempo de fabricação de um novo produto) (GODWIN & O'DOGHERTY, 2007). Estes precisam de informações e ou mecanismos que permitam prever o comportamento do conjunto mecanizado em situação real de trabalho, principalmente no que se refere ao esforço de tração exigido pelo trator e à demanda de energia dos equipamentos que interagem diretamente com o solo, tal fato pode ser de utilidade para a escolha do material de fabricação sendo mais ou menos resistentes a abrasão, adequados para diferentes tipos e condições de solos;

**Revendedores de máquinas agrícolas:** os consultores de vendas de equipamentos agrícolas são os principais intermediários entre os fabricantes e os usuários, cujo papel é de máxima importância na promoção e transferência de informações técnicas. Os gargalos neste setor, em muitos casos, estes carecem de experiência no campo ou de recursos para facilitar as melhores informações sobre o produto. Ou caso desejem realiza-lo, recebem pouco apoio por parte dos fabricantes (MIALHE, 1996).

**Agricultores, cooperativas ou operadores de máquinas:** os usuários necessitam estimar a demanda de esforço de tração, além disso, entender os aspectos básicos para operar os equipamentos agrícolas e definir o grau de importância das operações além das questões técnicas, econômicas e financeiras para determinar, seja a compra ou o uso de um implemento ou máquina agrícola, esta é conhecida como uma tarefa difícil dada a sua complexidade, onde o inadequado uso e interpretação pode causar erros de seleção (ARTUZO *et al.* 2015).

## 2.2 Mobilização do solo

Gill & Vanden Berg (1968) classificam as propriedades físicas do solo em estáticas e dinâmicas. As estáticas são aquelas que podem ser medidas antes e depois da mobilização e as dinâmicas são aquelas que vem a ser a reação destas propriedades ante as forças que são impostas. Portanto, os autores consideram propriedades dinâmicas do solo as mais difíceis de medir, pois é a reação do solo quando aplicada determinada força. Desta forma, o comportamento depende das propriedades físicas estáticas e do tipo e da magnitude da força aplicada, sendo esta reação imprevisível, não podendo ser controladas, pois são manifestadas durante a mobilização do solo e as medições devem ser feitas no momento da ação. Por exemplo, quando é utilizado um arado ou um escarificador, a reação do solo será totalmente diferente em ambos os casos e ainda será influenciada pela condição em que se encontra o solo no momento que recebe essa alteração.

Os equipamentos podem apresentar desempenho de maneira distinta ante diferentes tipos de solos, pois haverá a estrutura pode ser alterada como resultado da mobilização do solo.

As propriedades físicas do solo exercem uma influência direta na dinâmica solo-máquina e sobre o crescimento das plantas, sendo sensíveis a variações ou adaptações para diversos sistemas. Silva (2010), diz que o estudo das características físicas envolve uma série de fatores como a natureza das partículas sólidas, granulometria, densidade, textura e estrutura que influenciam o movimento do ar e da água através do solo e fora dele. O conhecimento desses fatores é fundamental para realizar um bom manejo e evitar possíveis danos.

Sob o ponto de vista agrícola o objetivo principal do preparo do solo é melhorar as características físicas através de meios mecânicos, desde uma condição conhecida ou indesejada para outra desejada, no sentido de favorecer o desenvolvimento das raízes das plantas, as trocas gasosas e o teor de água, figura 1. O sucesso ou fracasso das lavouras agrícolas muitas vezes dependem delas (RICHART *et al.* 2005).

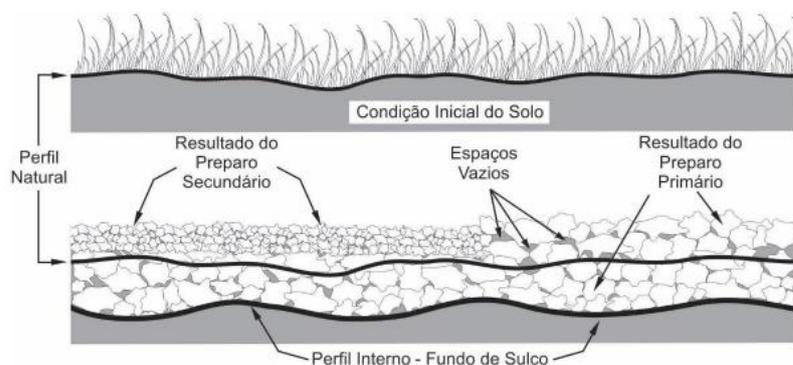


Figura 1. Preparo do solo  
Fonte: Molina (2017).

Kochhann *et al.* (2000), salientam que é muito importante considerar, primeiramente, as características físicas como a textura, a densidade de solo e a identificação da camada de solo mais densa, para determinar a frequência das operações requeridas e seu custo energético.

### 2.3 Resistência ao cisalhamento do solo

Alakuku *et al.* (2003); Machado *et al.* (2005) relatam que a resistência ao cisalhamento do solo pode ser definida como a propriedade que apresenta em suportar as cargas que lhe são impostas, conservando sua estabilidade, sendo assim vem a ser uma das propriedades mais importantes do solo. Além disso, pode auxiliar na escolha do tipo de maquinário mais apropriado a ser utilizado segundo o sistema de manejo (OHU *et al.* 1986).

De acordo com Payne & Fountaine (1952), a resistência do cisalhamento é uma propriedade do solo que pode afetar o desempenho das culturas e dos implementos agrícolas. O mesmo, define a tensão de cisalhamento, sendo uma propriedade que depende da natureza do solo. A medição deste fator define a força necessária para provocar o seu corte ou ruptura.

Diversos autores estudaram a resistência ao cisalhamento do solo, entre eles Ayers & Perumpral (1982); Chung & Sudduth (2006); Schjonning (1991) com a finalidade de estimar o grau de compactação. O ensaio de cisalhamento direto tem sido pouco utilizado nos estudos de solos agrícolas no Brasil (ROCHA *et al.* 2002; SILVA & CABEDA, 2005), sendo usualmente empregado em geotecnia, para avaliar a resistência de taludes de terra ao deslizamento (ORTIGÃO, 1995; PINTO, 2000).

McKyes et al. (1994), determinaram que os principais fatores que influenciam a resistência do solo ao cisalhamento são a distribuição de partículas do solo, a densidade, a estrutura e o teor de água no solo.

Swick & Perumpral (1988) relataram que a resistência ao cisalhamento do solo e o atrito solo-metal aumentou com o aumento das taxas de cisalhamento.

O cisalhamento por ferramentas estreitas obedece ao critério de falha de Mohr-Coulomb, como é mostrado na Figura 1, representando a máxima tensão de cisalhamento em um plano de um determinado material. A teoria é baseada na mecânica dos solos, cuja equação foi apresentada pela primeira vez por Coulomb (1776), sendo expressa da seguinte forma:

$$\tau = c + \sigma * \tan\phi \quad (1)$$

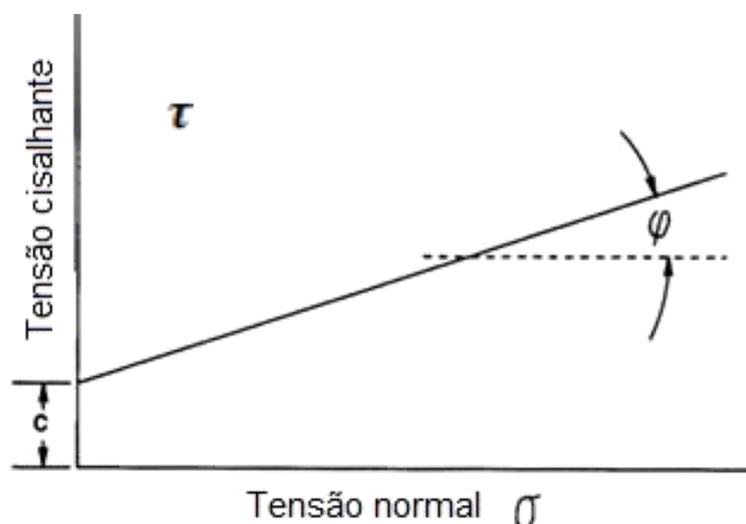


Figura 2 - Diagrama de Mohr – Coulomb, que representa a ruptura de solo.  
Fonte: Adaptado Srivastava *et al.* (2006).

Na equação (1), tem-se a máxima tensão cisalhante do solo ( $\tau$ ) para uma determinada tensão normal ( $\sigma$ ). A união destas máximas tensões cisalhantes para cada tensão normal forma uma reta cuja inclinação vem a ser igual à tangente do ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ). A distância onde esta reta encontra o eixo das ordenadas (eixo da tensão cisalhante), em relação ao eixo das abscissas (eixo das tensões normais) caracteriza a coesão do solo ( $c$ ).

Esses parâmetros representam características intrínsecas do solo, sendo determinados por suas propriedades e atributos, como a textura, estrutura, teor de matéria orgânica, densidade, mineralogia e teor de água (LEBERT & HORN, 1991; ROCHA *et al.* 2002; SILVA *et al.* 2004; ZHANG & JIANQIAO, 2006).

Assim, para um mesmo solo, espera-se que alterações de densidade, estrutura teor de água e matéria orgânica provocadas pelo sistema de manejo, possam resultar em variações nos parâmetros da resistência ao cisalhamento, como se apresenta na Figura 2. Por isso a importância do conhecimento desses fatores para a compreensão do processo de ruptura do solo.

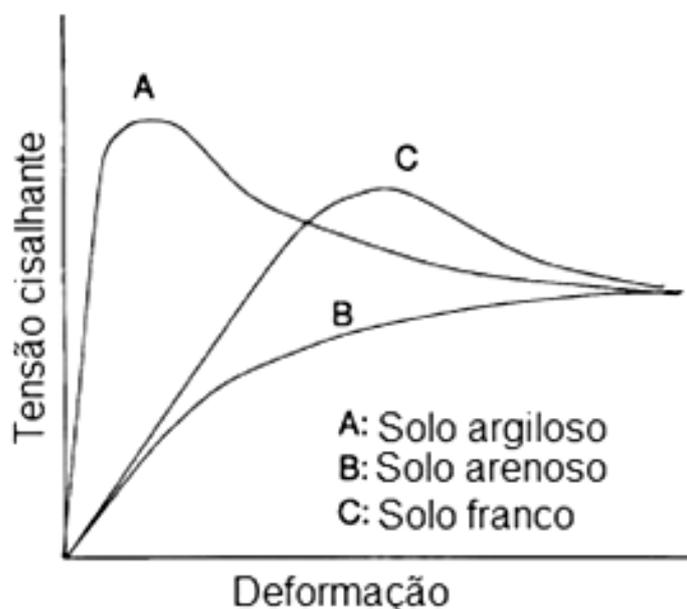


Figura 3 - Comportamento típico para três tipos de solo: A) Solo pesado ou textura argilosa; B) Solo leve ou textura arenosa; C) Solo intermédio ou textura franco.  
Fonte: Adaptado de Srivastava *et al.* (2006).

Wiermann *et al.* (1999), observaram nos solos friccionais (arenosos), que a tensão cisalhante alcança um valor máximo para uma deformação relativamente pequena, para depois descender e estabilizar. Entretanto, nos solos coesivos (argilosos) pode não existir o pico e a curva crescer continuamente para passar sem interrupção de um comportamento elasto-plástico ao plástico, como se ilustra na Figura 2.

As características de cisalhamento do solo são representadas pela coesão, ângulo de atrito interno e resistência do solo ao cisalhamento (ORTIGÃO, 1995). No estudo realizado por Osman (1964), este demonstrou que a análise da força e a forma da ruptura da interação solo-ferramenta depende exclusivamente da coesão, atrito e densidade do solo.

Payne (1956) assume que o atrito possui dois componentes, um proporcional à carga normal aplicada e outro proporcional à área de contato.

Da mesma maneira Pinto (2000), comprova que o ângulo de atrito interno representa as características friccionais entre as partículas do solo, definido como o

ângulo máximo que a força transmitida ao solo pode fazer com a força normal à superfície de contato, sem realizar o cisalhamento do solo no plano de ruptura. O ângulo de atrito interno do solo depende de fatores como grau de compactação, percentagem e tipo de argila, tamanho e forma dos grãos de areia do solo.

Gill & Vanden Berg (1968), descrevem o atrito como uma resultante da dinâmica do solo, ele só é determinado até que o solo seja removido.

Srivastava *et al.* (2006), indicam que existe três tipos de parâmetros de atrito, sendo o metal-solo ( $\mu'$ ), solo-solo ( $\mu$ ) e interno do solo (tangente  $\Phi$ ). Ressalta-se que existe diferença entre o atrito solo-solo e o atrito interno do solo, no primeiro o solo se movimenta como um corpo rígido contra outra superfície do solo e no atrito interno representa a deformação ante uma tensão cisalhante. Portanto, ao aplicar-se mais tensão em um teste de cisalhamento, se estará medindo o comportamento de atrito solo-solo.

O principal fator que afeta a resistência do solo ao cisalhamento, é a natureza do solo, sendo necessário caracterizar os solos através das propriedades físicas, como densidade, porosidade e resistência à penetração (GIAROLA *et al.* 2001; LIMA *et al.* 2004).

Da mesma forma, diversos trabalhos estudaram a resistência ao cisalhamento de solos de acordo com o tipo de solo, grau de intemperismo e influência de minerais (ROCHA *et al.* 2002; SILVA *et al.* 2004; SILVA & CABEDA, 2005; SILVA & CARVALHO, 2007).

Os solos coesos têm como característica peculiar horizontes minerais subsuperficiais, que apresentam consistência friável quando úmidos; contudo, quando secos, apresentam consistência dura, muito dura ou extremamente dura, exibindo forte coesão (JACOMINE, 1996; RIBEIRO, 2001). A determinação da coesão do solo e resistência ao cisalhamento, bem como sua correlação com atributos como óxidos de Fe, Si e Al, teor de argila e densidade do solo, pode contribuir para caracterização dos horizontes coesos.

Outro fator que afeta a resistência ao cisalhamento, é a intensidade e a maneira como as forças externas são aplicadas, as falhas (ou fraturas) provocadas no solo pelas ferramentas de mobilização são classificadas de acordo com a reação à tensão a ele imposta.

A determinação de parâmetros como curva tensão-deformação, tensão cisalhante máxima e deformação máxima, coesão e ângulo de atrito interno do solo

se faz em laboratório com uso de equipamentos como prensa de cisalhamento direto. A capacidade de suporte ao cisalhamento de um solo é proporcional a carga vertical aplicada, sendo aceito, de forma geral o critério de ruptura de Coulomb (UPADHYAYA *et al.* 1994).

## 2.4 Fatores que influenciam na mobilização do solo

A mobilização do solo envolve um conjunto de fatores como um todo, os mesmos devem ser considerados na hora de realizar determinadas tarefas que envolva o uso de máquinas agrícolas e o solo. De modo geral, no que diz respeito ao preparo do solo são quatro os principais fatores que influenciam na mobilização a regulagem do implemento, entre eles a própria ferramenta (geometria), a condição do solo, a interação solo-ferramenta e a condição de operação como a velocidade e a profundidade.

Diversos estudos têm mostrado que a variação dos parâmetros da ferramenta como a geometria, a largura e ângulo de ataque influenciam diretamente nos requerimentos de força de tração, no desempenho operacional e na distribuição das tensões no preparo de solo (GILL & VANDEN BERG, 1968; SANTOS, 2011), figura 4.

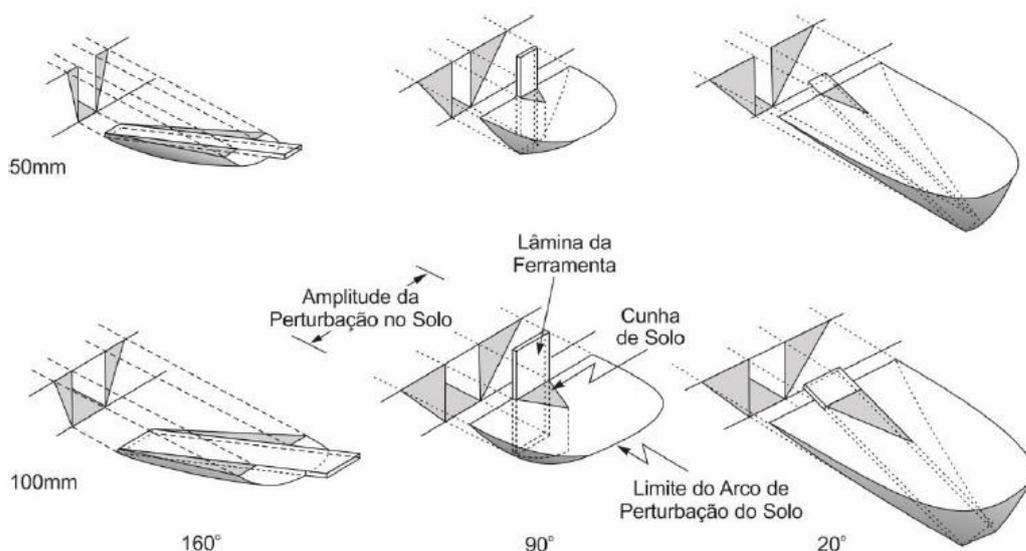


Figura 4 - Efeito de diferentes de ângulos de ataque e de diferentes larguras atuando na mesma profundidade.

Fonte: Adaptado de Payne e Tanner (1959).

De acordo com Godwin (2007), o ângulo de ataque e a geometria da ferramenta apresentam influência direta na grandeza da força vertical que atua sobre a ponteira.

Considera fundamental o conhecimento das características geométricas dos subsistemas do equipamento, para que a descompactação do solo seja efetuada de forma eficiente e haja uma demanda energética coerente com a operação, pois dependendo da geometria das ferramentas ocorrem padrões de ruptura diferenciados nos solos.

Em concordância Siqueira & Casão Jr (2004), comparando modelos comerciais de hastes na mesma profundidade de trabalho, constataram que a força de tração requerida varia muito entre os diferentes modelos, devido ao ângulo de ataque, a largura da ponteira e o formato da haste.

Segundo Molina (2017) o volume de solo mobilizado tem uma relação direta com o ângulo de ataque, no entanto, quanto menor for a inclinação, maior será o volume de solo perturbado.

Por outro lado, Conte *et al.* (2008) determinaram que a geometria das hastes, a profundidade de atuação e o grau de compactação dos solos podem modificar a demanda por força de tração (SÁNCHEZ-GIRÓN *et al.* 2005).

Machado & Chang (1996), analisaram a geometria de ponteiros de escarificadores em caixa de solo, os resultados demonstraram que a ponteira com ângulo de ataque igual a 20° e borda de corte reta proporcionou o menor consumo de energia por unidade de área de solo mobilizado, confirmando dessa maneira que a geometria da ferramenta influencia diretamente na demanda de força de tração.

Cohron (1971) relata que, em geral, implementos que movimentam o solo tendem a gerar compactação localizada abaixo da linha mobilizada, originada pelo alto coeficiente de atrito e adesão do solo a ferramenta em virtude, também, do ângulo de ataque impróprio (ângulo formado entre a ponteira e o solo).

Com relação, a condição do solo, conhece-lo é de extrema importância para seu correto manejo e conservação. Nesse sentido é importante considerar os fatores físicos, químicos e biológicos que estão ligados aos mesmos.

Verificar a condição inicial do solo antes de realizar uma tarefa de mobilização é imprescindível. Uma forma de realizá-lo é através do estudo da consistência, que trata sobre a manifestação das forças físicas de coesão e adesão que atuam a nível molecular e em diferentes condições de umidade. Esta característica torna possível a plasticidade das argilas, o que possibilita que a parte sólida do solo possa reter água e de alguma ou outra maneira controlar sua movimentação e seu uso (MAZURANA, 2016).

A coesão e adesão pode ser expressa como a resposta do solo à ação de forças externas que tendem a deformá-lo. Essas forças externas podem ser classificadas como normais, podendo ser o tráfego (animais, máquinas, pessoas) e forças tangenciais como a tração por hastes de preparo de solo e semeadoras (MAZURANA, 2016).

Entende-se por coesão do solo a força de atração entre a superfície das partículas do solo da mesma natureza, podendo ser real ou aparente. De acordo com Mazurana (2016), essa atração se produz devido a vários fatores como atração hidrostática, atração molecular, materiais coloidais, pontes de cátions e as áreas superficiais das partículas.

Segundo Mullins *et al.* (1990), a coesão real é resultado do efeito de agentes cimentantes como argilas silicatadas; já a coesão aparente é o resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo que constitui uma parte da resistência ao cisalhamento de solos parcialmente saturados (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

A adesão, por sua vez, se caracteriza pela atração de partículas de naturezas distintas (exemplo: solo-líquido ou solo-metal), causada pela tensão superficial da água, que é o fator responsável pelo fenômeno da capilaridade o qual determina como a água se movimenta dentro do solo: quanto menor for o diâmetro das partículas e maior o teor de água, maior é a força de adesão (SRIVASTAVA *et al.* 2006).

Na medida que a umidade aumenta, as moléculas de água são adsorvidas pelas superfícies das partículas, diminuindo a coesão: quando maior a superfície de contato das partículas, menor será a coesão do solo (MACHADO *et al.* 1996; SILVA & CABEDA, 2005).

O teor de água e o tipo de solo são as variáveis que mais influenciam nas operações de preparo do solo. A escarificação e a subsolagem são extremamente dependentes do teor de água para uma operação efetiva. A variação do nível de umidade regula a intensidade com que se manifestam as forças físicas principalmente na propagação destas para fraturar o solo nas laterais, devido ao mecanismo de corte do solo por meio das ferramentas estreitas em três dimensões (MOLINA, 2017; MAZURANA, 2016; LANÇAS, 2002).

A água se distribui no solo coeso de maneira desigual e descontínua. A água capilar forma pontes líquidas pendulares que produzem as forças capilares e viscosas dinâmicas produzidas entre o líquido e as partículas do solo; essas duas forças são

os principais fatores que afetam o comportamento mecânico dos solos coesos (ZHANG & JIANQIAO, 2006).

O preparo do solo realizado com teores de água excessivamente altos (consistência plástica) causa uma tensão de compressão, amassamento, que resulta na compactação do solo, enquanto o preparo com teores de água excessivamente baixos (consistência dura) resulta em pulverização do solo e em um alto consumo de energia, sendo o ponto ideal o limite inferior de friabilidade ou umidade baixa (HILLEL, 1980). Nesse sentido, Stafford (1981) verificou que, em altos níveis de umidade do solo, existe compressão e fluidez do solo à frente e ao lado da ferramenta.

Braunack & Mcphee (1991), avaliaram o efeito do teor de água no solo sobre o tamanho dos agregados no momento do preparo, e concluíram que solos mobilizados que possuem baixos teores de água formam agregados menores.

Em um estudo levado a cabo por Rajaram & Gee-Clough (1988) sobre a mobilização do solo e a força correspondente às ferramentas estreitas sob solo argiloso com umidade do solo variável, revelaram que a natureza da ruptura depende do nível de umidade.

Manuwa & Ademosun (2007) realizaram um ensaio em caixa de solo com ferramentas com hastes estreitas, muito estreitas e largas e encontraram um aumento significativo na força de tração na medida em que os teores e umidade e índices de cone aumentaram (de 11 para 22,5%) em solo franco-argiloso e arenoso.

A compressão e deformação das partículas sólidas corresponde à propriedade do solo de decrescer em volume, quando submetido a uma carga ou força. Este fenômeno chama-se compressibilidade, o qual diminui à medida em que aumenta a pressão sobre ele. As cargas impostas ao solo ocasionam a saída de ar e água dos poros, a aproximação entre as partículas, a redução do volume de solo e a reorientação das partículas do solo, até o ponto em que o solo é capaz de suportar, acima disso o efeito é irreversível, vindo a ser chamado de compactação (MACHADO, 2001).

Os fatores que influenciam na compressibilidade do solo podem ser externos (intensidade e frequência da carga aplicada), e internos: teor de água (principal fator que influencia), textura, estrutura e densidade do solo.

Outro aspecto relacionado com a condição do solo é a compactação, considerado um dos maiores problemas a serem enfrentados na agricultura moderna, encontrado em todos os sistemas de cultivo no mundo inteiro (RAGHAVAN *et al.*

1990). Esta alteração típica que ocorre no solo, se refere ao processo de degradação das características físicas do solo, a qual corresponde ao aumento da densidade e diminuição do volume através de determinadas forças ou pressão externa aplicada (LIMA *et al.* 2004). A sua origem pode ser variada desde as gotas de chuva, atividade antrópica, tráfego com máquinas agrícolas ou animais (HORN, 1995; HORN & FLEIGE, 2003; SCHAEFER *et al.* 2002).

A compactação do solo pode ser definida como a agregação das partículas do solo, depois do deslocamento da parte líquida ou gasosa, redução da porosidade, que causa a diminuição do volume ocupado e o aumento da densidade do solo (SAINI & CHOW, 2003; SEIXAS, 1988).

Batey & Mckenzie (2006); Gill & Vanden Berg (1968) descrevem que a compactação reduz a permeabilidade do solo à água, de modo que o escoamento e a erosão podem ocorrer e, além disso, a aeração é reduzida e em consequência diminui a atividade metabólica prejudicando as raízes das plantas.

Drescher *et al.* (2012), determinaram que a compactação do solo afeta a disponibilidade de água e de nutrientes para as plantas, reduzindo a fotossíntese, o crescimento e o rendimento de grão da cultura.

Conforme Moraes & Tamburús (1993), o efeito da compactação do solo pode ser muito prejudicial no desenvolvimento da planta, visualmente é possível perceber quando o solo se encontra compactado, a raiz apresenta dificuldade a penetração vertical em profundidade, o volume de solo explorado por elas é reduzido, porém desenvolve-se horizontalmente, há diminuição da infiltração, que resulta em uma limitação na disponibilidade de água e nutrientes para as raízes. Camargo (1983) indica que esse impedimento ocorre quando o diâmetro da raiz é superior ao diâmetro dos poros do solo.

São diversos os fatores que interferem na compactação do solo, como o tipo de textura, teor de matéria orgânica, presença de resíduos de culturas sobre a superfície do solo, teor de água entre outros. Para Soane (1970), o teor de matéria orgânica e o conteúdo de argila são fatores que com frequência determinam os índices de compactação; como o tipo de mineral de argila, que exerce influência no processo.

Eavis (1972), afirma que os solos secos são mais resistentes a mudanças e distribuição do tamanho dos poros, sendo que essa resistência é reduzida com o aumento do teor de água. Umidade acima da capacidade de campo, atingindo os

limites plásticos, reduz a densidade, podendo causar níveis críticos de compactação e perda de estrutura original do solo (SILVA, 1984).

Uma das principais características físicas utilizadas para avaliar a compactação é a densidade que vem a ser uma característica física que sofre alterações com o manejo (MACHADO *et al.* 1996). Existem parâmetros de densidade pré-estabelecidos que dependem do tipo do solo como no caso de planossolos cuja densidade varia de 1,5 a 1,6 kg dm<sup>-3</sup> (SILVEIRA *et al.* 1989).

Atualmente a forma de estimar o nível de compactação mais rápida e a mais utilizada é através da resistência à penetração mecânica, pela facilidade de execução e por ser um indicador confiável (CHANCELLOR, 1994; GIRARDELLO *et al.* 2014; MOLIN *et al.* 2012).

As atividades agrícolas de diferentes níveis de mecanização, dependem fortemente dos tratores como fonte de tração, sendo comum usar um mesmo trator para a execução de diferentes tarefas, daí um mesmo solo é exposto a repetidas tensões compressivas da mesma proporção, resulta na formação de camadas compactadas (ABEBE, 1989).

Com o avanço da tecnologia foi se aumentando o tamanho das máquinas agrícolas, conjuntamente com o aumento de potência aumentou o peso destas máquinas, gerando outros problemas como a compactação (CUNHA, 2003; LANÇAS, 2002; CHAMEN, *et al.* 2015).

Vários estudos sobre as causas da compactação do solo demonstram que cargas ou pressões aplicadas nos pneus têm uma incidência direta sobre o aumento da resistência, a diminuição da porosidade e a permeabilidades do solo (ABREU *et al.* 2004; HORN & FLEIGE, 2003; SILVA *et al.* 2006).

Segundo Barbosa (2002) e Håkansson (2005) a principal causa da compactação dos solos agrícolas, trafegados por tratores e máquinas em sua maioria montados sobre rodados pneumáticos, ocorre quando o trabalho se realiza com teor de água inadequado (em excesso) no solo, ou seja, quando o solo está acima do ponto de friabilidade ou próximo ao limite plástico.

Para Boeni (2000); Porterfield (1986); Warkotsch *et al.* (1994) o teor de água no momento do tráfego, o tipo de máquina e rodados; tamanho, forma, pressão de inflação nos pneus e o número de passadas são os fatores majoritários causadores da compactação do solo.

De acordo com Wood & Burt (1987) quando um rodado se desloca sobre uma superfície, gera tensões perpendiculares e tangenciais a ela, essas tensões, são denominadas tensões normal e cisalhante, que são transmitidas à massa de solo, a partir da área de contato rodado-solo.

Outro aspecto que envolve o processo de compactação é o aumento da carga ao solo pelas semeadoras quando da implantação das culturas, cuja compactação induzida (quando em excesso) reduz a emergência de plantas; também foi observado em pulverizações e na colheita que ao longo do tempo cria uma camada compactada, o que se conhece como histórico de tensões do solo (CZYZ, 2004).

Mentges *et al.* (2010), estudando a demanda energética do escarificador, verificaram que a compactação aumenta a demanda de tração pela haste escarificadora, ressaltando que a escarificação não eleva o estado de compactação abaixo da profundidade de trabalho em textura franco arenosa sob plantio direto.

Eko (2005), determinou a necessidade da compreensão das propriedades mecânicas dos solos para avaliar a compactação do solo, mas principalmente para evitá-los como possível. O estudo da compactação é extremamente importante devido a que seu efeito pode aumentar a necessidade de energia para o preparo do solo e pelo efeito adverso sobre o desenvolvimento das plantas.

Com relação a interação solo-ferramenta, a ação de adesão do solo nas superfícies das ferramentas de mobilização do solo, interfere na qualidade e na quantidade do trabalho realizado, ou seja, na eficiência operacional das ferramentas manuais ou implementos agrícolas (MOLINA, 2017). O tipo de material de fabricação tem a ver com a adesão solo-material, alguns apresentam mais ou menos aderência solo-material.

O fator relativo à condição de operação é determinado pela velocidade e profundidade de operação. Esses dois fatores influenciam a relação máquina-solo, destacando-se a velocidade como o fator de maior influência no que diz respeito ao teor de água no solo durante a realização do preparo do solo.

Nesse sentido Machado *et al.* (1996), estudando o esforço de tração por um escarificador em Planossolo, verificaram que a potência exigida na barra de tração foi influenciada significativamente pela velocidade de trabalho, mas não pelo teor de água (o menor valor de resistência operacional foi obtido na velocidade igual a 4,8 km.h<sup>-1</sup> e teor de água no solo de 7,2%).

Staffort (1984), diz que conforme ocorre o deslocamento da ferramenta há uma deformação permanente do solo, entretanto, este pode deformar-se de maneiras diferentes de acordo com a velocidade da ferramenta.

## 2.5 Profundidade crítica

O entendimento da profundidade crítica é considerado chave para a previsão de esforço de tração das ferramentas estreitas (GODWIN & O'DOGHERTY, 2007). O conceito de profundidade crítica ( $d_c$ ) foi introduzido no cálculo pela primeira vez por O'Callaghan & McCullen (1965) e observado inicialmente por Kostritsyn (1956) e Zelenin (1950), os quais mostraram que o padrão de ruptura do solo por ferramentas estreitas era diferente daquele produzido pelas ferramentas largas. Somente a parte superior do solo e dos lados eram mobilizadas e que embaixo dela não ocorria nenhum movimento ascendente, ou seja, que este não é capaz de levantar totalmente o solo sobre a superfície da sua profundidade.

A profundidade crítica, vem a ser aquela na qual o solo não é mobilizado em direção à superfície, mas sim comprimido lateralmente, ou seja, é o limite de profundidade em relação à largura da ferramenta, formando um sulco no sentido de deslocamento devido a sua passagem, isto pode variar dependendo da ferramenta e da estrutura do solo (GRAZIANO, 2014; MCKYES, 1985; MOLINA, 2017).

Acima da profundidade crítica, o solo move-se horizontalmente e para cima, em câmbio, quando a ação da ferramenta deixa de ocorrer ao longo da linha horizontal na direção do deslocamento ou diminui sensivelmente a ação de mobilização de solo é chamada de profundidade crítica ( $d_c$ ) (McKYES, 1978), Figura 3 e 4.

De acordo com Spoor & Fry (1983) a profundidade crítica é a profundidade abaixo da ferramenta na qual a quantidade de solo afrouxado é mínima e a extensão lateral do plano de ruptura do solo mudam pouco com a profundidade crescente.

Para Spoor & Godwin (1978) há uma profundidade crítica de trabalho para todas as hastes de escarificadores abaixo das quais ocorre compactação ao invés de afrouxamento do solo. Ela depende da largura, inclinação real, altura de elevação da ponteira, estado de umidade e densidade do solo. A profundidade crítica não é afetada pelas forças gravitacionais, mas sim pelas tensões geostáticas do solo (DESIR, 1981).

O'Callaghan & Farrelly (1964) observaram profundidades críticas da mesma ordem de magnitude que a largura da lâmina ao testar lâminas de aço verticais em areia e argila.

Miller (1971), usando ferramentas semelhantes em areia compacta, observou que a profundidade crítica pode ser de 12 até 14 vezes maior com relação à largura da ferramenta ao contrário de Kostritsyn (1956), com sua experiência determinou que essa profundidade é geralmente sete a oito vezes a largura da ferramenta.

Smith *et al.* (1989) estabelece que a profundidade crítica:

- a) aumenta com a diminuição do ângulo de inclinação da ferramenta ( $\alpha$ );
- b) diminui com o aumento da umidade do solo;
- c) diminui com a diminuição da densidade do solo.

Godwin (1974), observou em solo argilo-arenoso a profundidade crítica pode ser de 10 a 16 vezes maior do que à largura dependente ângulo de inclinação da ferramenta. O mesmo autor postulou um modelo matemático, com o qual o regime de forças no solo pode ser analisado quando a profundidade crítica esteja presente, o solo é mobilizado para os lados da ferramenta em profundidades maiores do que a crítica em espiral logarítmica, semelhante ao modelo postulado por Meyerhof (1951), Figura 3.

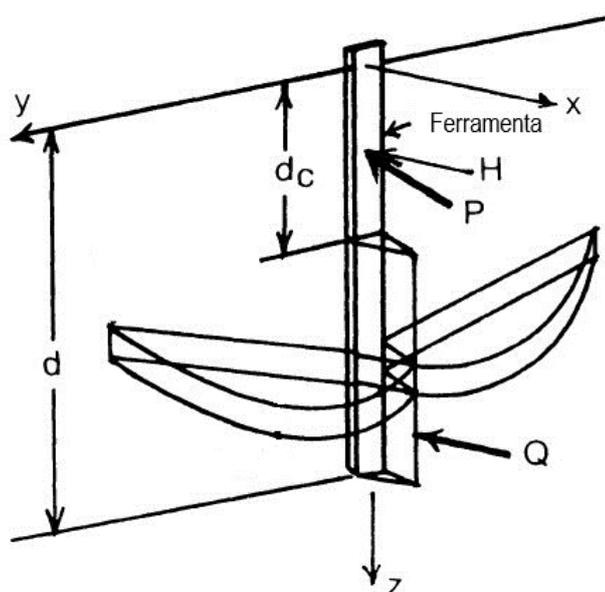


Figura 5 - Modelo de profundidade crítica por Godwin (1974).  
Fonte: Adaptado de McKyes (1985).

A equação de Meyerhof (1951), é usada para calcular a pressão que atua na face da ferramenta. Para determinar a profundidade crítica, de acordo com a equação Godwin (1974), deve-se utilizar um processo iterativo, no qual calcula-se os valores

da força (Q) que é a força horizontal abaixo da profundidade crítica relacionada com a pressão exercida pela ferramenta ( $q'$ ), a profundidade de trabalho (d), a profundidade crítica ( $d_c$ ) e a força calculada até o início da profundidade crítica (H), onde o solo está sendo mobilizado para frente e para cima. As forças Q e H são calculadas separadamente e somados (Q+H), correspondendo à força total.

Para o valor mínimo da força total haverá um valor correspondente da profundidade de trabalho que é a profundidade crítica (GRAZIANO, 2014).

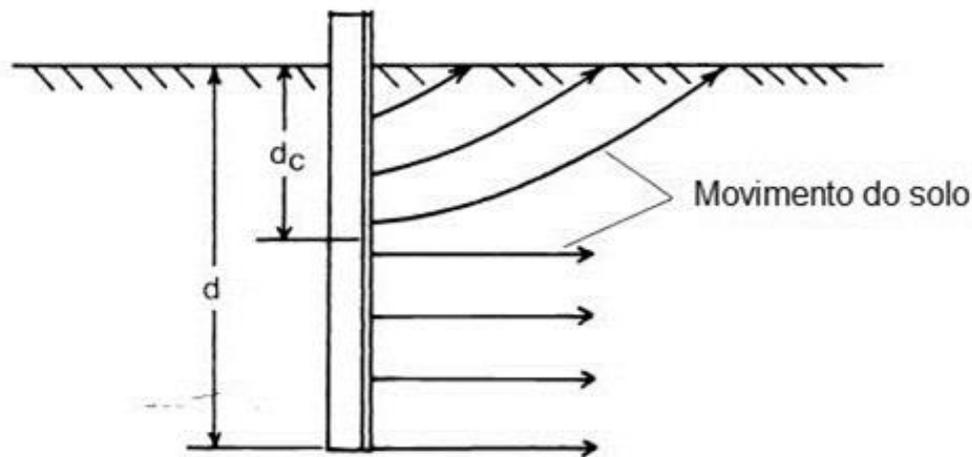


Figura 6 - Modelo de profundidade crítica por (KOSTRITSYN, 1956).  
Fonte: Adaptado de McKyes (1985).

Na equação 2, equação de Godwin (1974), Q - corresponde a força total. Os fatores  $N'_q$  - Fator de sobretaxa vertical,  $N'_c$  - Fator do índice de coesão do solo,  $q'$  - Máxima tensão vertical ( $\text{kgf/cm}^2$ ),  $p_0$  - Tensão de sobre carga ( $\text{kgf/cm}^2$ ),  $K_0$  - Coeficiente de pressão do solo,  $d_c$  - Profundidade crítica. São calculados de acordo com a equação de Meyerhof, sendo necessária a distância de ruptura ( $\beta$ ) e o ângulo de ataque ( $\alpha$ ); além disso o resultado está ligado aos valores da coesão (c) e o ângulo de atrito do solo ( $\phi$ ). Godwin & O'Dogherty (2007), observaram em solos granulares e soltos que em um determinado valor de coesão (c) torna-se progressivamente menor a profundidade crítica ( $d_c$ ) na medida que o ângulo de atrito do solo ( $\phi$ ) torna-se menor.

$$Q+H = [c \cdot N'_c \cdot (d - d_c) + \frac{1}{2} \gamma \cdot g \cdot K_0 \cdot N'_q \cdot (d^2 - d_c^2)] \cdot w \quad (2)$$

Onde:

$$N'_q = \left[ \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right] e^{2 \cdot \left( \frac{\pi}{2} + \phi \right) \cdot \tan \phi} \quad (3)$$

$$N'_c = \cot \phi * \left\{ \left[ \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right] e^{2 * \left( \frac{\pi}{2} + \phi \right) * \tan \phi} - 1 \right\} \quad (4)$$

$$q' = c * N'_c + p_0 * N'_q = c * N'_c + \gamma * g * z * K_0 * N'_q \quad (5)$$

$$p_0 = \gamma * g * z \quad (6)$$

$$K_0 = \gamma * g * z * [1 - \sin(\phi)] \quad (7)$$

## 2.6 Ferramentas estreitas de mobilização do solo

De acordo com Mialhe (1996) as máquinas de preparo do solo são aquelas destinadas a promover alterações na estrutura macroscópica dos horizontes superiores do perfil do solo, abrangendo os chamados leito de semeadura ou leito radicular.

Por sua parte Gill & Vanden Berg (1968) denominam as ferramentas de preparo de solo em um único elemento de trabalho, enquanto um equipamento ou máquina é uma estrutura composta por uma armação com rodas, um grupo de elementos de trabalho e outras unidades estruturais necessárias para uma orientação ou suporte.

Muitos autores classificam as ferramentas de mobilização do solo em largas, e estreitas como mostrado na Figura 5. De acordo com Godwin *et al.* (1981) são consideradas ferramentas estreitas, quando a relação entre a profundidade de trabalho (h) e a largura da ferramenta (b) é igual ou maior a 6 ( $h/b > 6$ ).

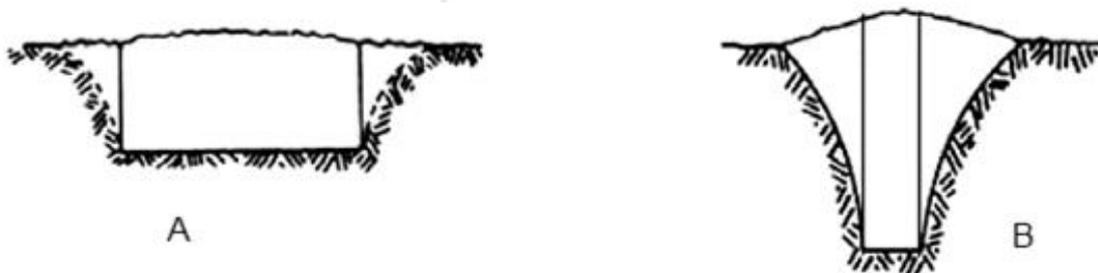


Figura 7 - Diferença entre a profundidade de trabalho e largura das ferramentas. A) Ferramenta larga e B) Ferramenta estreita.

Fonte: Adaptado de Smith *et al.* (1989).

Apesar dos grandes avanços tecnológicos conquistados na agricultura ainda existe uma lacuna na interação ferramenta–solo, devido à complexidade dos fatores envolvidos, entre o solo e os efeitos dinâmicos desta interação e pelo seu

comportamento não linear, por exemplo, nas condições de trabalho em campo é extremamente difícil de observar a direção da movimentação do solo.

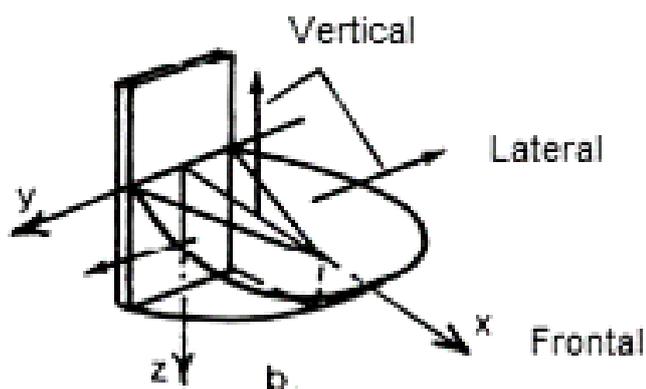
De um modo geral, os modelos matemáticos podem ser aplicados para ferramentas largas (modelos bidimensionais), tais como arados de discos, grades, arados de aiveca entre outros e para ferramentas estreitas (modelos tridimensionais) que incluem cultivadores, grade de dentes, subsoladores e escarificadores, sendo adaptáveis para utilização em diversos tipos de solos (McKYES, 1985; KUSHWAHA *et al.* 1993).

As primeiras equações para previsão da força necessária para movimentar o solo em três dimensões foram apresentados por Payne (1956), O'Callaghan & Farrelly (1964) e Hettiaratchi e Reece (1967), a partir das observações, figura 8.



Figura 8 – Avaliação de equipamento de mobilização do solo a campo  
Fonte: (PAYNE, TANNER, SPOOR, 1964)

Estes autores consideram que a ruptura de solo tridimensional representava melhor a forma de mobilização produzido por uma ferramenta estreita, a qual consiste em uma zona de falha crescente frontal e dois blocos laterais, observaram também que a demanda de tração é maior por unidade de largura do que para uma ferramenta larga, o modelo de ruptura se apresenta na Figura 6.



### Direção da movimentação do solo

Figura 9 - Movimentação do solo por uma ferramenta estreita apresentado por Payne (1956).  
Fonte: Adaptado de McKyes (1985).

#### 2.6.1 Escarificadores e subsoladores

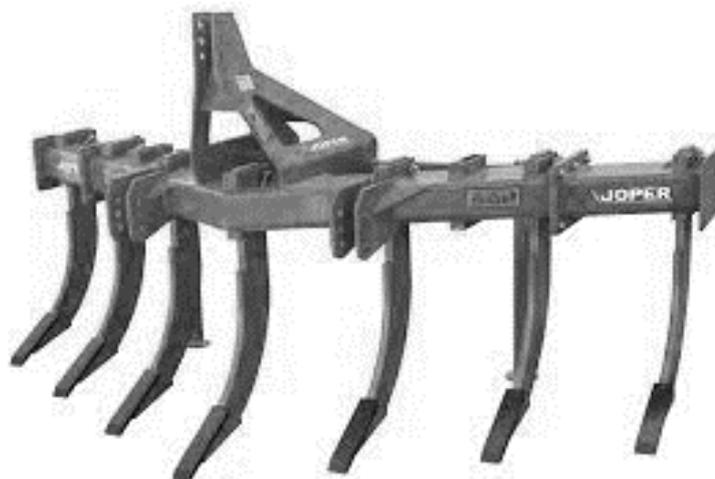
Para realizar a operação de preparo do solo, existe uma diversidade de implementos agrícolas, entre eles ferramentas largas, estreitas e grades de discos que podem ser escolhidas pelos agricultores dependendo do sistema de cultivo adotado (MOLINA, 2017; SRIVASTAVA *et al.* 2006).

As ferramentas estreitas escarificadores figura 7 e subsoladores figura 8, são uma alternativa viável do manejo conservacionista devido a mínima mobilização e a não inversão do solo; é possível atingir profundidades maiores quando comparadas a outros implementos de preparo primário.



**Figura 10** - Escarificador  
Fonte: Adaptado Joper.

Por meio da utilização destes implementos se consegue reduzir os efeitos negativos da compactação, seja na parte superficial ou nas camadas mais profundas do solo, que podem ocorrer devido ao excesso de mobilização ou pela utilização de máquinas sempre na mesma profundidade de trabalho (ABREU *et al.* 2001; BOTTA *et al.* 2006; LANÇAS, 2002; SOUZA, 2014).



**Figura 11 - Subsolador**

Fonte: Adaptado Joper.

Na atualidade, os escarificadores vem substituindo os arados e grades em muitas regiões do Brasil, sendo uma prática recomendada para o preparo periódico antes da implantação do sistema de plantio direto ou de cultivo mínimo, para o sucesso do sistema (LANÇAS, 2002). As hastes trabalham em profundidades maiores que outros implementos, demandando de 35 a 45% menos força de tração para uma mesma largura de trabalho e volume de solo mobilizado, em comparação a um arado (SCHERER *et al.* 2015).

Por outro lado, a subsolagem é considerada operação de alto consumo energético, provavelmente a maior entre todas as tarefas agrícolas, visto que é realizada em profundidades superiores a 0,30 m, portanto somente deve ser realizada quando realmente se faz necessária (operação de correção e não periódica). Levantamentos iniciais sobre as condições de densidade, resistência mecânica à penetração, teor de umidade e profundidade da camada compactada, são necessárias para a tomada de decisão (LANÇAS, 2002). Vários pesquisadores reportaram os efeitos positivos da escarificação, Badinelli *et al.* (2019); Sartori *et al.* (2016), demonstraram que a descompactação de solos hidromórficos com escarificador até

0,25 m no dia da semeadura, melhorou o desenvolvimento radicular das plantas e o rendimento da soja.

Foi observado por Rosa *et al.* (2008), que a escarificação é mais eficiente no aumento da macroporosidade, na camada superficial em Latossolo Vermelho, mas o seu efeito decresce em dois a quatro anos após sua utilização.

Por outro lado, Drescher *et al.* (2017), verificaram que as semeadoras de plantio direto equipadas com mecanismos rompedores como facão e disco promoveram a mitigação da compactação do solo na camada de 0,7 a 0,15 m, aumentando a macroporosidade, reduzindo a microporosidade, densidade do solo, resistência do solo a penetração mecânica e força exercida na barra de tração da máquina agrícola em comparação ao uso de semeadoras com discos sem a haste ou facão. Dessa maneira demonstraram que as hastes, seja no implemento que for, possuem uma capacidade de aprofundamento maior e de mobilização dos solos do que os discos.

A Figura 9 mostra uma haste típica de subsolador. Vale salientar que o mesmo equipamento pode executar tanto a escarificação quanto a subsolagem dependendo de sua profundidade de atuação, se trabalhar até 0,30 m de profundidade estará executando uma escarificação, caso a profundidade de trabalho seja maior que 0,30 m estará executando uma subsolagem. A diferença entre subsoladores e escarificadores são conceituais e funcionais, o primeiro tem a função de romper camadas de solo adensadas ou compactadas, subsuperficiais, acima de 0,30 m de profundidade (MACHADO *et al.* 2005).

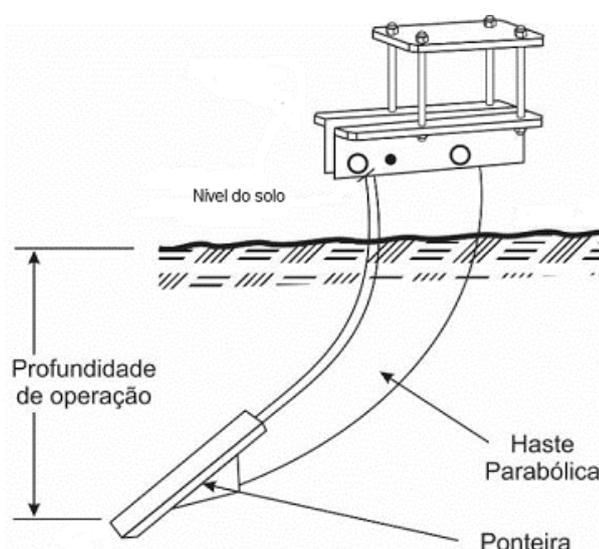


Figura 12 - Haste de escarificador/subsolador de formato parabólico.  
Fonte: Adaptado de Lanças (2002).

Os escarificadores não promovem a inversão nem a mistura entre camadas como normalmente realizam os arados de aiveca ou arados de disco; o rompimento é realizado nas linhas de fraturas naturais para frente, para cima e para os lados, chamado de rompimento tridimensional do solo em blocos (LANÇAS, 2002; MACHADO *et al.* 2005). Estes equipamentos realizam a fragmentação do solo em profundidade, com formação de grandes fissuras e terra fina, permitindo dessa maneira maior infiltração ou circulação de água, aumento da capacidade de retenção de água no solo, entre outros (BOTTA *et al.* 2006; COLLARES *et al.* 2006; XU & MERMOUD, 2001). Para obter o máximo benefício dos efeitos da utilização destes equipamentos há necessidade de que o solo esteja na sua friabilidade.

A escolha do equipamento adequado para as condições do solo leva a uma maior eficiência do uso da energia e do maquinário (PAYNE *et al.* 1964). Caso contrário, as práticas mecânicas podem prejudicar a estrutura do solo, proporcionando maiores gastos seja pelo aumento desnecessário no consumo de combustível ou pela aquisição de equipamentos inadequados e execução de tarefas de forma incorreta, levando o agricultor a ter prejuízos financeiros, visto que o custo inicial do maquinário e os combustíveis vêm a ser um dos maiores custos em uma propriedade agrícola (MACHADO, 2001).

## **2.7 Previsão de esforço de tração com modelos matemáticos**

A medição das propriedades dinâmicas do solo se refere ao solo em movimento e pode ser definida como a relação entre as forças aplicadas e a reação resultante do solo. As forças aplicadas pelo homem usando algum tipo de máquina ou equipamento, é chamada de força mecânica. Esta definição diz respeito as forças aplicadas no solo de origem natural como água, vento entre outros, sendo que a medição da magnitude dessas forças é de interesse para prever o desempenho das ferramentas de preparo do solo (GILL & VANDEN BERG, 1968).

As propriedades físicas do solo como a resistência ao cisalhamento e o ângulo de atrito interno apresentam uma grande influência na previsão do esforço necessário a tração, portanto sua medição deve ser realizada com precisão.

A revisão das teorias e modelos matemáticos desenvolvidos anteriormente é necessária quando se pensa em simplificar um modelo matemático de previsão de esforço de tração para ferramentas estreitas. A maioria dos estudos desenvolvidos

inicialmente sobre a resistência passiva, capacidade de suporte dos solos e modelos matemáticos de previsão de esforço de tração foram baseadas a partir da teoria da pressão passiva do solo de Terzaghi (1943), como pode se observar na Figura 10.

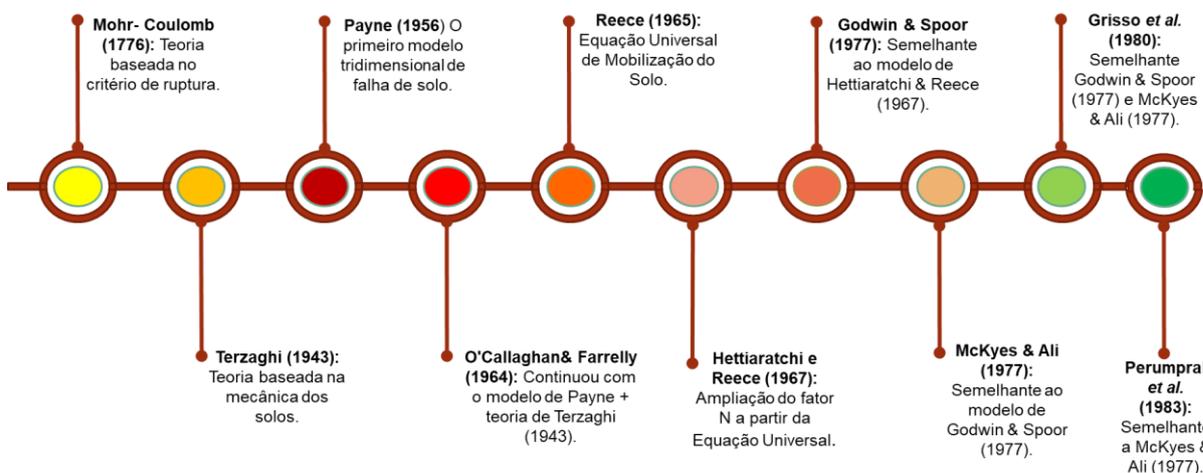


Figura 13 - Evolução histórica dos modelos matemáticos.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Por tanto, os modelos matemáticos empíricos basicamente são equações trigonométricas que são baseadas em figuras geométricas de corte de solo fundamentadas nas suposições e aproximações entre a tensão cisalhante e a reação do solo. Para prever a força necessária para produzir uma ruptura por uma haste, são consideradas as propriedades físicas do solo como a coesão, adesão, densidade e a fricção com peso e atrito, por outro lado a força da ferramenta que depende da largura, profundidade entre outros.

Dentro das análises de previsão são comuns utilizar os termos de esforço/força de tração e potência. O primeiro, vem a indicar a força necessária para deslocar uma máquina/implemento no campo, com seus órgãos ativos para mobilizar o solo, também designada como esforço tractório, no plano vertical longitudinal, o esforço tractório é dividido em duas forças: a: componente vertical e b: componente horizontal, paralela a superfície do solo com direção do deslocamento da máquina, denominada força de tração, mensurados em kN (MIALHE, 1996). Em câmbio, a potência é definida como a quantidade de trabalho realizado em um intervalo de tempo,  $P = T/t = Fd/t = F.V$ . Medido no sistema técnico em mKgf e no sistema Internacional (SI)  $J/s = W$  (MIALHE, 1996).

Com os avanços dos sistemas computacionais nos últimos anos, permitiu aos investigadores usar diferentes tipos de métodos numéricos, especialmente o método

de elementos finitos (FEM) para analisar o processo de corte de ferramentas de cultivo, com os quais podem realizar-se simulações em duas ou três dimensões.

Inicialmente o modelo foi desenvolvido por Duncan & Chang (1970), a partir disso, vários pesquisadores utilizaram o método FEM e foram adaptando criando outros a partir deles por exemplo a abordagem contínua, podendo citar alguns: Chi & Kushwaha (1991); Davoudi *et al.*(2008); Fielke (1999), sendo estes modelos estáticos, ao contrário Kushwaha & Shen (1995) que incluíram o efeito da velocidade; Mouazen & Nemenyi (1999); Plouffe *et al.*(1999A); Plouffe *et al.*(1999B); Rosa & Wulfsohn (1999). Outro método desenvolvido com uma abordagem descontínua foi o de elementos discretos (DEM), por Cundall & Strack (1971), o efeito descontínuo deste método permite simular o efeito não linear da interação solo–ferramenta, dessa maneira o método vem a ser considerado promissor para realizar simulações mais precisas a fim de otimizar projetos de máquinas. Também se encontram outros trabalhos aplicando o método da dinâmica dos fluidos computacionais (CFD) Karmakar & Kushawa (2005); Karmakar *et al*, (2009); Karmakar *et al.* (2007).

Em linhas gerais os modelos analíticos tradicionais são baseados no cálculo da zona de falha e na profundidade da ruptura do solo, mas, não conseguem analisar amplitude dos efeitos secundários das ferramentas que em consequência limitam para uma projeção com precisão de uma ferramenta, não entanto, ainda estes modelos são relevantes desde o ponto de vista da sua adequação para qualquer tipo de solo e geometria de ferramenta.

Na simulação do método FEM mostra uma maior flexibilidade para mostrar os efeitos das ferramentas, não entanto ainda possui limitações como, muito tempo para o processamento, programação e cálculos dos dados, além disso, os ensaios ainda são promissores e aplicados somente para solos arenosos principalmente na Austrália (KUSHWAHA *et al.*, 1993).

Upadhyaya *et al.* (2002) concluíram que o método FEM de elementos contínuos é adequado para ferramentas estreitas. Por outro lado, Plouffe *et al.*(1999A) encontrou limitações no FEM, principalmente na dificuldade de simular efeito das ferramentas no preparo do solo primário como a separação, mistura das camadas, rachaduras e fluxo de partículas do solo. Por tanto, os modelos analíticos foram escolhidos para serem estudados nesta pesquisa visto serem os mais representativos na literatura pelo amplo uso e pela aplicabilidade, em termos de determinação de parâmetros, tal como foram demonstrados por Serpa (1997) e Machado (2010).

### 2.7.1 Modelo de ruptura de solo proposto por Payne (1956)

O primeiro modelo tridimensional proposto a partir de observações foi realizado por Payne (1956), o qual indica que a forma da ruptura do solo por uma ferramenta estreita consiste em duas zonas, uma com movimento vertical na frente da ferramenta e outra horizontal, empurrados para fora da cunha, tendo-se uma cunha central triangular (formada pelo próprio solo) e as falhas em dois blocos laterais ou asas crescentes como se apresenta na Figura 11.

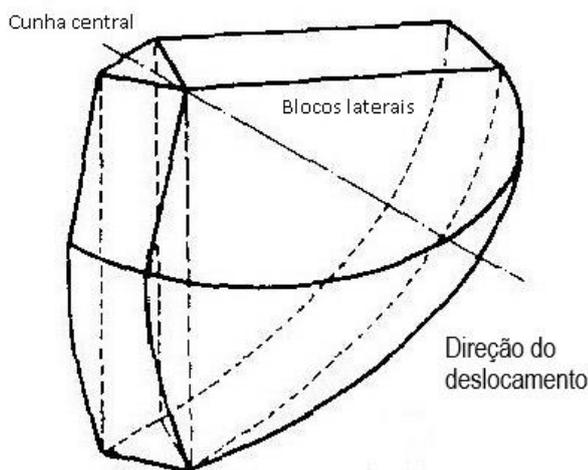


Figura 14 - Modelo de ruptura de solo por ferramentas estreitas apresentadas por Payne (1956).  
Fonte: Adaptado de (HETTIARATCHI, 1988)

Estudos posteriores apresentados por Payne & Tanner (1959), indicaram que a forma da ruptura é alterada pela geometria, o ângulo de ataque, a profundidade e largura da ferramenta estreita.

### 2.7.2 Modelo de ruptura de solo proposto por O'Callaghan & Farrelly (1964)

Quem continuou com o modelo de Payne foram O'Callaghan & Farrelly (1964), os quais utilizaram a teoria clássica da mecânica do solo de Terzaghi (1943). Estes autores testaram três diferentes condições de solo, a partir das suas observações, propondo um novo modelo, que consiste numa falha frontal acima da profundidade crítica e outra falha horizontal sob a profundidade crítica.

O'Callaghan & Farrelly (1964), observaram uma mudança no padrão de falha do solo com relação à profundidade/ferramenta, na medida em que aumentava, apresentava dois modos distintos de falha, sendo que esta zona de transição delimita

a profundidade crítica. A Figura 12, mostra a maneira como ocorre a mobilização do solo, segundo O'Callaghan & Farrelly (1964) acima e abaixo da profundidade crítica.

O modelo foi anterior ao conhecido modelo bidimensional de Hettiaratchi & Reece (1967) e não incluiu o efeito da gravidade, adesão e nem o efeito entre o solo e material (atrito).

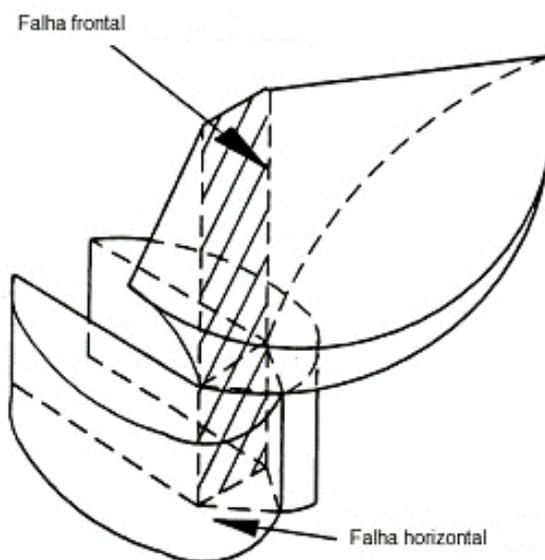


Figura 15 - Modelo de ruptura de solo apresentadas por O'Callaghan & Farrelly (1964).  
Fonte: Adaptado de Kushwaha *et al.* (1993).

De acordo com Smith *et al.* (1989) as principais limitações do modelo proposto por estes autores são:

- a) o modelo aplica-se a uma faixa limitada de ângulos de inclinação da ferramenta;
- b) o componente de força vertical é muito pequeno para ferramentas verticais;
- c) a falta de um componente de peso do solo e
- d) a suposição de que não há pressão sobre o solo, ou seja, o solo não é restringido em profundidade.

### 2.7.3 Modelo matemático proposto por Reece (1965)

O modelo desenvolvido por Reece (1965), talvez seja o mais conhecido, devido a ter sido o primeiro a ser proposto sendo comumente chamado como a Equação Universal de Mobilização do Solo (MOLINA, 2017; McKYES, 1985).

Reece (1965) identificou que o solo mobilizado, sempre é levado para um estado de falha total, portanto os princípios da mecânica do solo devem permitir o desenvolvimento de teorias para máquinas de mobilização de solo, sendo

teoricamente possível determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, em estado denso ao contrário de Micklethwaite's (1944), que estabeleceu a teoria aplicada apenas para solos argilosos (OSMAN, 1964).

A equação 8, apresenta o modelo matemático proposto por Reece em (1965), para o cálculo do esforço necessário à ruptura do solo por uma ferramenta estreita (Equação Universal de Mobilização do Solo):

$$H = P * \text{sen}(\alpha + \varphi) + c * d * w * \cot \alpha \quad (8)$$

Onde P é igual a:

$$P = (\gamma * g * d^2 * N_\gamma + c * d * N_c + q * d * N_q) * w \quad (9)$$

$$N_\gamma = \left(\frac{1}{2}\right) / (\cot \alpha + \cot \beta) / [\cos(\alpha + \delta) + \text{sen}(\alpha + \delta) * \cot(\beta + \phi)] \quad (10)$$

$$N_c = [1 + \cot \beta * \cot(\beta + \phi)] / \{\cos(\alpha + \delta) + [\text{sen}(\alpha + \delta) * \cot(\beta + \phi)]\} \quad (11)$$

$$N_q = 2 * N_\gamma \quad (12)$$

$$q = \gamma * g * d \quad (13)$$

#### Lista de símbolos

<b>H</b>	Força de tração (kN);
<b>P</b>	Força total da ferramenta (N);
<b>c</b>	Índice de coesão do solo (N.cm <sup>2</sup> );
<b>γ</b>	Densidade do solo (kg.m <sup>-3</sup> );
<b>d</b>	Profundidade de trabalho da ferramenta (m);
<b>w</b>	Largura da ferramenta (m);
<b>N<sub>γ</sub></b>	Fatores que dependem da resistência ao atrito do solo,
<b>N<sub>c</sub></b>	geometria da ferramenta e as ferramentas para resistência do solo;
<b>N<sub>q</sub></b>	Sobretaxa de pressão vertical aplicada na superfície do solo;
<b>q</b>	Ângulo de atrito interno do solo (°);
<b>φ</b>	Ângulo de ruptura do solo a frente da ferramenta (°);
<b>β</b>	Ângulo de ataque da ferramenta (°);
<b>α</b>	Ângulo de ataque da ferramenta (°);
<b>g</b>	Aceleração devido à gravidade (m.s <sup>-2</sup> );

Outros modelos como os de Godwin e Spoor (1977); McKyes e Ali (1977) e Hettiaratchi e Reece (1967) para ferramentas largas e estreitas foram desenvolvidos a partir da equação proposta por Reece (1965), realizando modificações principalmente quanto a inclusão do fator (P, N e q). Uma maneira de comparar os diferentes métodos é relacionar a forma da aplicação desse fator para a previsão de uma mesma ferramenta e solo (McKYES, 1985).

#### 2.7.4 Modelo matemático proposto por Hettiaratchi e Reece (1967)

O modelo tridimensional proposto por Hettiaratchi & Reece (1967), para ferramentas estreitas se baseia na teoria da pressão passiva da terra, apresentado após o desenvolvimento do modelo bidimensional para ferramentas largas (McKYES, 1985; GRISSO & PERUMPRAL, 1985). Neste modelo, a ruptura de solo foi dividida em duas, uma frontal (vertical), à frente da interface solo-ferramenta e a outra transversal (horizontal) com movimento do solo para longe da linha de corte Figura 13A. Além disso, inclui os efeitos das propriedades do solo, do material e da geometria da ferramenta como o ângulo de ataque, profundidade da ferramenta; largura, onde (P<sub>2</sub>) corresponde a força para mover ambas as zonas laterais como observado na Figura 13B (GRISSO & PERUMPRAL, 1985).

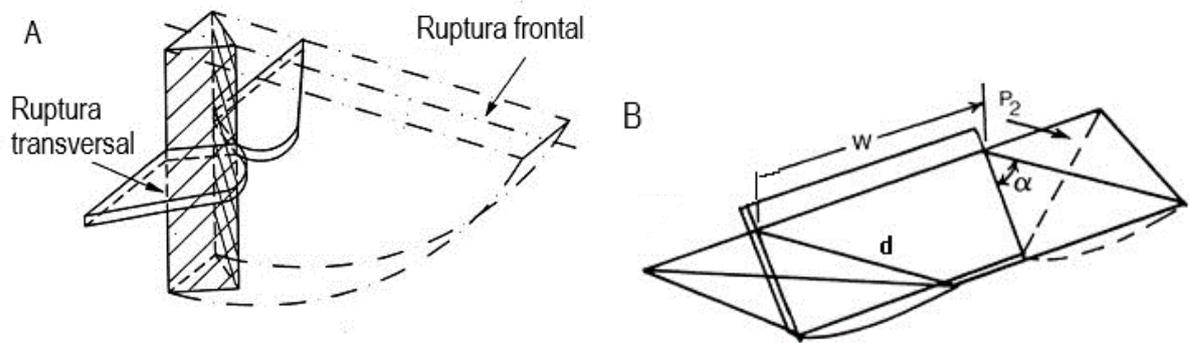


Figura 16 - Modelo de ruptura de solo por ferramentas estreitas A e B, apresentadas por Hettiaratchi e Reece (1967).

Fonte: Hettiaratchi e Reece (1967).

A força total é determinada pela resultante da somatória da ruptura frontal e transversal semelhante ao expresso por O'Callaghan & Farrelly (1964), incluído uma componente gravitacional (equação 14).

$$H = (\gamma * g * d^2 * N_\gamma + c * d * N_c + q * d * N_q + c_a * d * N_{ca})w * \text{sen}(\alpha + \delta) + c_a * d * w * \text{cot } \alpha + P_2 * \sin \alpha \quad (14)$$

$$N_\gamma = \left(\frac{1}{2}\right) / (\text{cot } \alpha + \text{cot } \beta) / [\cos(\alpha + \delta) + \text{sen}(\alpha + \delta) * \text{cot}(\beta + \phi)] \quad (15)$$

$$N_c = [1 + \text{cot } \beta * \text{cot}(\beta + \phi)] / \{\cos(\alpha + \delta) + [\text{sen}(\alpha + \delta) * \text{cot}(\beta + \phi)]\} \quad (16)$$

$$N_q = 2 * N_\gamma \quad (17)$$

$$N_{ca} = [1 - \text{cot } \alpha * \text{cot}(\beta + \phi)] / \{\cos(\alpha + \delta) + [\text{sen}(\alpha + \delta) * \text{cot}(\beta + \phi)]\} \quad (18)$$

$$P_2 = [\gamma * g * (d' + q / \{\gamma * g\})^2 * w' * N_{sy} + c * w' * d' * N_{sc}] * K_b \quad (19)$$

$$N_{sy} = \text{sen}^3 \mu * e^{\pi * \tan \phi} / (\cos \mu * \cos \phi) \quad (20)$$

$$N_{sc} = \tan \mu * [\text{sen} \mu * (N_c + N_{ca} + 2 * \tan \mu * N_q) + 1] \quad (21)$$

$$K_b = [\tan^{-1}(\text{sen} \alpha * \cot \mu)] / [\pi/2 - \mu] \quad (22)$$

### Lista de símbolos

<b>H</b>	Força de tração (kN);
<b>P</b>	Força total da ferramenta (N);
<b>c</b>	Índice de coesão do solo (N.cm <sup>2</sup> );
<b>c<sub>a</sub></b>	Índice de adesão solo – material (kPa);
<b>γ</b>	Densidade do solo (kg.m <sup>-3</sup> );
<b>d</b>	Profundidade de trabalho da ferramenta (m);
<b>d'</b>	Profundidade efetiva de trabalho (m);
<b>w</b>	Largura da ferramenta (m);
<b>N<sub>y</sub></b> ,	Fatores que dependem da resistência ao atrito
<b>N<sub>c</sub></b> e	do solo, geometria da ferramenta e as
<b>N<sub>q</sub></b>	ferramentas para resistência do solo;
<b>N<sub>ca</sub></b>	Fator do índice de adesão do solo;
<b>N<sub>q</sub></b>	Fator de sobretaxa vertical;
<b>N<sub>sc</sub></b>	Fator de coesão horizontal definida na parte inferior;
<b>N<sub>sy</sub></b>	Fator de fricção horizontal definida na parte inferior;
<b>q</b>	Sobretaxa de pressão vertical aplicada na superfície do solo;
<b>φ</b>	Ângulo de atrito interno do solo (°);
<b>β</b>	Ângulo de ruptura do solo a frente da ferramenta (°);
<b>α</b>	Ângulo de ataque da ferramenta (°);
<b>g</b>	Aceleração devido à gravidade (m.s <sup>-2</sup> );
<b>K</b>	O fator de inclinação da ferramenta definido na parte inferior;
<b>θ</b>	Teor de água no solo;
<b>μ</b>	Coeficiente de atrito interno do solo (°);
<b>w'</b>	Largura efetiva da lâmina estreita no solo;
<b>P<sub>2</sub></b>	Força necessária para mobilizar as zonas laterais (kN);
<b>K<sub>b</sub></b>	Fator de inclinação da ferramenta;

O fator (P2) é calculado mediante as forças de adesão, coesivas e gravitacionais como a profundidade efetiva; a largura efetiva da ferramenta; e os fatores (N<sub>y</sub>, N<sub>c</sub>, N<sub>q</sub>, N<sub>ca</sub>, N<sub>sy</sub>, N<sub>sc</sub>) são adimensionais dependentes da geometria do implemento e propriedades mecânicas do solo como o atrito e a coesão (KUSHWAHA *et al.* 1993), dada pela equação 19. A distância de ruptura ou ângulo (β) é calculado em função do ângulo de ataque (α). O fator (K) calculada como se indica na equação 23:

$$K = \tan \mu * \text{sen}(\alpha + \theta) / (2 * \text{sen} \theta) \quad (23)$$

$$\theta = \frac{1}{2} / [\delta + \phi + 90^\circ + \text{sen}^{-1}(\frac{\text{sen} \delta}{\text{sen} \phi})] \text{ em radianos} \quad (24)$$

$$w' = d/k \quad (25)$$

Para Grisso y Perumpral (1985) os modelos desenvolvidos por O'Callaghan & Farrelly (1964) e Hettiaratchi & Reece (1967) superestimam a força de tração. Essas observações feitas por Grisso y Perumpral (1985) não concordam com o obtido por Machado (2001), o qual na comparação entre modelos matemáticos em dois tipos de solos, verificou que o modelo proposto por Hettiaratchi & Reece (1967) apresentou valores próximos aos de campo.

#### 2.7.5 Modelo matemático proposto por Godwin & Spoor (1977)

O modelo apresentado por Godwin & Spoor (1977), é baseado na suposição de que a movimentação do solo obedece ao critério de falha de Mohr-Coulomb (pela formação do arco de perturbação ao passar da ferramenta), sendo ele apto para uma ampla gama de relações de profundidade e largura.

Os autores observaram que a mobilização do solo por ferramentas estreitas corresponde a uma forma elíptica, mas não muito longe de ser perfeitamente circular, assim propuseram que uma forma circular seria mais razoável e precisa para calcular o volume do solo mobilizado, como apresentado na Figura 14.

O padrão de falha sob profundidade crítica é diferente, mas é próxima aquela da superfície do solo, sendo semelhante aos modelos de ruptura horizontal apresentado por O'Callaghan & Farrelly (1964) e Hettiaratchi & Reece (1967). Godwin e Spoor (1977), propuseram que a profundidade crítica fosse obtida de modo que os dois modos de falha dessem um valor mínimo para a força de tração para qualquer largura de ponteira e ângulo de ataque.

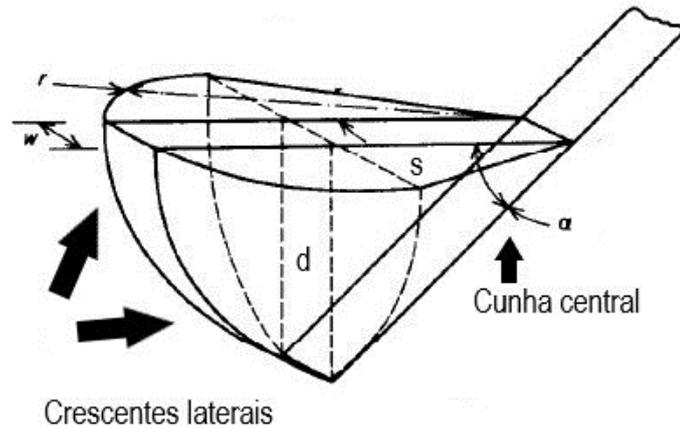


Figura 17 - Modelo de ruptura de solo por ferramentas estreitas apresentadas por Godwin & Spoor (1977).

Fonte: Adaptado de Godwin & Spoor (1977).

O volume do solo mobilizado frente a ferramenta é representado por uma largura ( $w$ ); as perturbações laterais, consideradas simétricas podem ser calculadas a partir da interação de áreas infinitesimais aproximadas a um triângulo. Os fatores tridimensionais "N" de falha são aplicados para o cálculo da cunha central e o ângulo ( $\beta$ ) é função do ângulo ( $\alpha$ ).

Para o cálculo do corte bidimensional, utilizaram um método integrado que consiste em um pequeno cisalhamento lateral, assumido como circular. Para determinar a força total foram consideradas as três dimensões, como demonstra-se na equação 26 a seguir:

$$\mathbf{H} = (\gamma * g * d^2 * N_{\gamma} + c * d * N_c + c_a * d * N_{ca} + q * d * N_q) * (w + s) * \text{sen}(\alpha + \delta) + c_a * d * w * \text{cot} \alpha \quad (26)$$

Onde os fatores da equação são calculados da seguinte maneira:

$$s = r * \text{sen} \rho' = [1 - (d * \text{cot} \alpha / r)^2]^{1/2} \quad (27)$$

$$r = d * [\text{cot} \beta + \text{cot} \alpha] \quad (28)$$

$$N_{\gamma} = \left(\frac{1}{2}\right) / (\text{cot} \alpha + \text{cot} \beta) / [\cos(\alpha + \delta) + \text{sen}(\alpha + \delta) * \text{cot}(\beta + \phi)] \quad (29)$$

$$N_c = [1 + \text{cot} \beta * \text{cot}(\beta + \phi)] / \{\cos(\alpha + \delta) + [\text{sen}(\alpha + \delta) * \text{cot}(\beta + \phi)]\} \quad (30)$$

$$N_q = 2 * N_{\gamma} \quad (31)$$

$$N_{ca} = [1 - \text{cot} \alpha * \text{cot}(\beta + \phi)] / \{\cos(\alpha + \delta) + [\text{sen}(\alpha + \delta) * \text{cot}(\beta + \phi)]\} \quad (32)$$

### Lista de símbolos

<b>H</b>	Força de tração (kN);
<b>P</b>	Força total da ferramenta (N);
<b>c</b>	Índice de coesão do solo (N.cm <sup>2</sup> );
<b>c<sub>a</sub></b>	Índice de adesão solo – material (kPa);
<b>γ</b>	Densidade do solo (kg.m <sup>-3</sup> );
<b>d</b>	Profundidade de trabalho da ferramenta (m);
<b>w</b>	Largura da ferramenta (m);
<b>N<sub>γ</sub></b>	Fatores que dependem da resistência ao atrito do solo, geometria da ferramenta e as ferramentas para resistência do solo;
<b>N<sub>c</sub></b>	Fator do índice de adesão do solo;
<b>e</b>	Sobretaxa de pressão vertical aplicada na superfície do solo;
<b>N<sub>q</sub></b>	Ângulo de atrito interno do solo (°);
<b>N<sub>ca</sub></b>	Ângulo de ruptura do solo a frente da ferramenta (°);
<b>q</b>	Ângulo de ataque da ferramenta (°);
<b>φ</b>	Aceleração devido à gravidade (m.s <sup>-2</sup> );
<b>β</b>	O fator de inclinação da ferramenta definido na parte inferior;
<b>α</b>	Coeficiente de atrito interno do solo (°);
<b>g</b>	Raio da ruptura lateral crescente (cm);
<b>K</b>	A largura final do solo mobilizado lateralmente;
<b>μ</b>	Laterais de ruptura (°);
<b>r</b>	
<b>s</b>	
<b>ρ</b>	

Para a utilização do modelo de Godwin & Spoor (1977) se faz necessário o conhecimento prévio da distância de ruptura; para tal, estes autores desenvolveram um gráfico utilizando informações de Hettiaratchi & Reece (1967); Payne (1956); Payne & Tanner (1959), no sentido de descrever a relação entre a distância de ruptura/profundidade e o ângulo da ferramenta (KUSHWAHA *et al.* 1993).

#### 2.7.6 Modelo matemático proposto por McKyes & Ali (1977)

O modelo analítico de previsão de forças para ferramentas estreitas ou cisalhamento tridimensional proposto por de McKyes & Ali (1977), consiste em uma cunha central com ruptura a frente da ferramenta de mobilização de solo e duas laterais crescentes, semelhante ao modelo proposto por Godwin & Spoor (1977) e ao método da triangularização. A única diferença está na forma do corte da superfície inferior da cunha central, considerada como uma superfície plana e a parte inferior das laterais crescentes consideradas como uma linha reta como se observa na Figura 15. Assume-se que o segmento lateral ( $r$ ) vem a ser considerado como um semicírculo de raio, ( $q$ ) a sobretaxa de pressão vertical aplicada na superfície do solo, ( $\alpha$ ) o ângulo de ataque, ( $\beta$ ) a distância de ruptura é em função do ângulo e das propriedades internas do solo, desta forma se tem na região central a largura da ferramenta ( $w$ ), já

( $\delta$ ) o ângulo de átrio do solo em relação ao material é expresso em função da inclinação da ponteira, como se apresenta na figura 13.

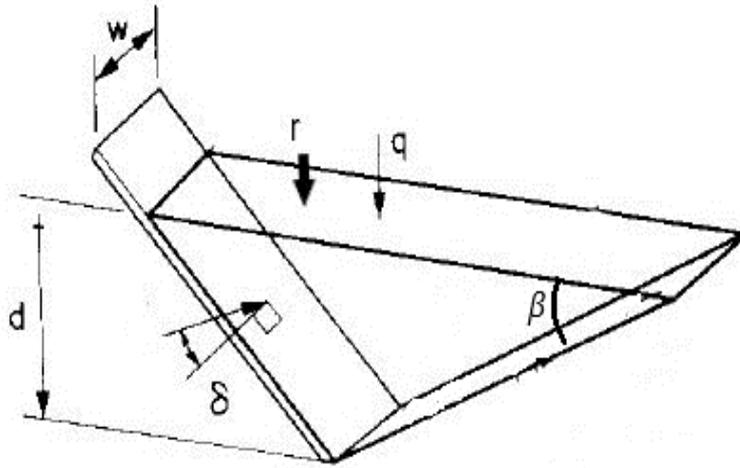


Figura 18 - Modelo de ruptura de solo por ferramentas estreitas apresentadas por McKyes & Ali (1977).

Fonte: Adaptado de McKyes & Ali (1977).

A estimativa baseia-se no cálculo da falha para cada geometria da ferramenta, associada com as propriedades do solo, que permite estimar a área de solo mobilizada a frente da ferramenta, a profundidade da ferramenta ( $d$ ) e a força por unidade de área ( $N$ ), o cálculo da força total se apresenta na equação 33.

$$H = P * \text{sen}(\alpha + \delta) + c_a * d * w * \text{cot} \alpha \quad (33)$$

Onde o fator  $P$  é como segue:

$$P = (\gamma * g * d^2 * N_\gamma + c * d * N_c + q * d * N_q + c_a * d * N_{ca}) * w \quad (34)$$

A área do solo mobilizada pode ser calculada como segue:

$$N_\gamma = \left(\frac{1}{2}\right) / (\text{cot} \alpha + \text{cot} \beta) / [\text{cos}(\alpha + \delta) + \text{sen}(\alpha + \delta) * \text{cot}(\beta + \phi)] \quad (35)$$

$$N_c = [1 + \text{cot} \beta * \text{cot}(\beta + \phi)] / \{\text{cos}(\alpha + \delta) + [\text{sen}(\alpha + \delta) * \text{cot}(\beta + \phi)]\} \quad (36)$$

$$N_q = 2 * N_\gamma \quad (37)$$

$$N_{ca} = [1 - \text{cot} \alpha * \text{cot}(\beta + \phi)] / \{\text{cos}(\alpha + \delta) + [\text{sen}(\alpha + \delta) * \text{cot}(\beta + \phi)]\} \quad (38)$$

$$q = \gamma * g * d \quad (39)$$

$$\beta = (45 - (\phi / 2)) \quad (40)$$

### Lista de símbolos

<b>H</b>	Força de tração (kN);
<b>P</b>	Força total da ferramenta (N);
<b>c</b>	Índice de coesão do solo ( $N.cm^2$ );
<b>c<sub>a</sub></b>	Índice de adesão solo – material (kPa);
<b><math>\gamma</math></b>	Densidade do solo ( $kg.m^{-3}$ );
<b>d</b>	Profundidade de trabalho da ferramenta (m);
<b>w</b>	Largura da ferramenta (m);
<b>N<sub><math>\gamma</math></sub>, N<sub>c</sub> e N<sub>q</sub></b>	Fatores que dependem da resistência ao atrito do solo, geometria da ferramenta e as ferramentas para resistência do solo;
<b>q</b>	Sobretaxa de pressão vertical aplicada na superfície do solo;
<b><math>\phi</math></b>	Ângulo de atrito interno do solo (°);
<b><math>\beta</math></b>	Ângulo de ruptura do solo a frente da ferramenta (°);
<b><math>\alpha</math></b>	Ângulo de ataque da ferramenta (°);
<b>g</b>	Aceleração devido à gravidade ( $m.s^{-2}$ );

McKyes & Ali (1977) buscaram uma abordagem para simplificar os cálculos de forças em cada seção, sendo as mesmas calculadas diretamente utilizando o método da mecânica do equilíbrio, em lugar de usar a equação (para ruptura bidimensional), sem a necessidade do conhecimento prévio sobre a distância de ruptura,

dependendo somente do ângulo que a superfície de ruptura cria no solo ( $\beta$ ).

#### 2.7.7 Modelo matemático proposto por Grisso *et al.* (1980)

O modelo de Grisso *et al.* (1980), vem a ser similar aos modelos de Godwin & Spoor (1977) e McKyes & Ali (1977), o modelo pressupõe que a superfície de ruptura do solo é plana, que se estende desde a ponta da ferramenta até a superfície, com ângulo ( $\beta$ ) desconhecido (McKYES, 1985).

Em lugar de descrever a forma das crescentes laterais adjacentes à zona de ruptura da cunha central ( $w$ ), apresenta várias forças verticais e horizontais para ao cálculo da força total. As forças ( $R$ ,  $SF_2$  e  $CF_1$ ,  $CF_2$ ) são as forças que substituem os lados da crescente lateral, para representar a pressão passiva do solo e a força de cisalhamento exercida na direção do movimento da ferramenta, Figura 16. As forças ( $ADF$  e  $F_1$ ) são as forças de resistência adesiva e coesiva da ferramenta na parte inferior da cunha (McKYES, 1985).

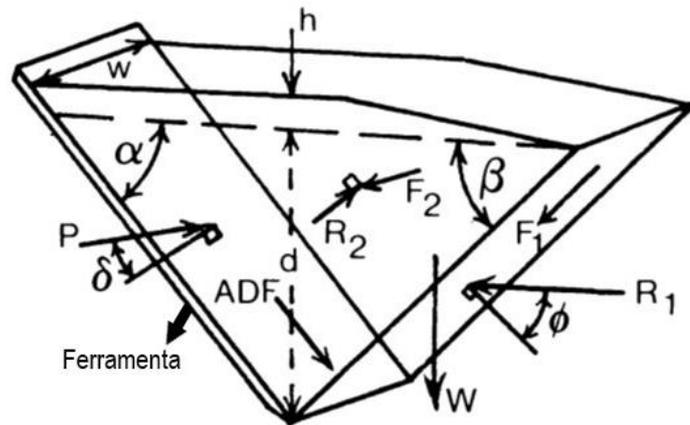


Figura 19 - Modelo de ruptura de solo por ferramentas estreitas apresentadas por Grisso *et al.* (1980).

Fonte: Adaptado de Grisso (1980) apud McKyes, (1985).

Grisso recomenda a determinação do ângulo ( $\beta$ ), minimizando a força total ( $P$ ) com respeito ao ângulo ( $\beta$ ), o solo mobilizado na frente da ferramenta representa a altura ( $h$ ), e ( $w$ ) representa a largura da ferramenta, a força de aceleração ( $g$ ) é igual a zero, e ( $\delta$ ) o ângulo de atrito do solo em relação ao material é expresso nesta equação em função do ângulo da ferramenta.

Na condição de equilíbrio, permite calcular a força mediante a equação universal de mobilização do solo proposto por Reece, com a exceção da expressão  $q$ , como aparece na Equação 41.

$$P = (\gamma * g * d^2 * N_{\gamma} + c * d * N_c + c_a * d * N_{ca}) * w \quad (41)$$

$$N_{\gamma} = \frac{A}{w * d^2} * \left[ \frac{2 * k_0 * z * \text{sen} \phi + w * \text{sen} (\beta + \phi)}{\text{sen} (\alpha + \beta + \phi + \delta)} \right] \quad (42)$$

$$N_c = \frac{\cos \phi * \left( \frac{2 * A}{w * d} + \frac{1}{\text{sen} \beta} \right)}{\text{sen} (\alpha + \beta + \phi + \delta)} \quad (43)$$

$$N_{ca} = \frac{\left( 1 + \frac{h}{d} \right) * \cos (\alpha + \beta + \phi)}{\text{sen} (\alpha + \beta + \phi + \delta) * \text{sen} \alpha} \quad (44)$$

$$A = \frac{d^2}{2} * \left( 1 + \frac{h}{d} \right) * \left\{ \left( 1 + \frac{h}{d} \right) * \cot \alpha + \cot \beta \right\} \quad (45)$$

$$z = (d + h) / 3 \quad (46)$$

$$k_0 = (1 - \text{sen} \phi) \quad (47)$$

### Lista de símbolos

<b>H</b>	Força de tração (kN);
<b>P</b>	Força total da ferramenta (N);
<b>c</b>	Índice de coesão do solo (N.cm <sup>2</sup> );
<b>c<sub>a</sub></b>	Índice de adesão solo – material (kPa);
<b>γ</b>	Densidade do solo (kg.m <sup>-3</sup> );
<b>d</b>	Profundidade de trabalho da ferramenta (m);
<b>w</b>	Largura da ferramenta (m);
<b>N<sub>γ</sub> e N<sub>c</sub></b>	Fatores que dependem da resistência ao atrito do solo, geometria da ferramenta e as ferramentas para resistência do solo;
<b>N<sub>ca</sub></b>	Fator do índice de adesão do solo;
<b>N<sub>q</sub></b>	Fator de sobretaxa vertical;
<b>A</b>	Área de solo mobilizada pela ferramenta;
<b>h</b>	Elevação do solo que ocorre na frente da ferramenta;
<b>z</b>	Profundidade média na qual o centroide da cunha de solo é localizado, com relação a superfície;
<b>φ</b>	Ângulo de atrito interno do solo (°);
<b>β</b>	Ângulo de ruptura do solo a frente da ferramenta (°);
<b>α</b>	Ângulo de ataque da ferramenta (°);
<b>g</b>	Aceleração devido à gravidade (m.s <sup>-2</sup> );
<b>μ</b>	Coeficiente de atrito interno do solo (°);
<b>P<sub>2</sub></b>	Força necessária para mobilizar as zonas laterais (kN);
<b>K<sub>o</sub></b>	Coeficiente de pressão da terra em repouso;

#### 2.7.8 Modelo matemático proposto por Perumpral *et al.* (1983)

No modelo tridimensional de Perumpral *et al.* (1983) assume que a zona de falha é semelhante ao modelo proposto por McKyes & Ali (1977) e Godwin & Spoor (1977), a diferença é que as duas crescentes laterais foram substituídas por um conjunto de duas forças atuando ao lado desta cunha central, Figura 17.

No entanto, os planos laterais da cunha central foram tratados como planos deslizantes e a falha real incluiu apenas uma cunha central. O deslizamento da superfície inferior da ferramenta foi considerado linear, também assumiram que o solo é mobilizado apenas na frente da ferramenta.

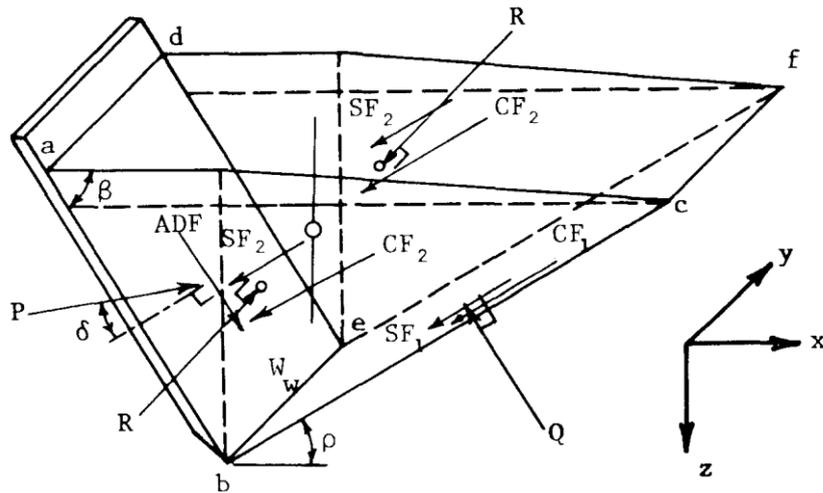


Figura 20 - Modelo de ruptura de solo por ferramentas estreitas apresentadas por Perumpral *et al.* (1983).

Fonte: Adaptado Perumpral *et al.* (1983).

A força total é determinada considerando um equilíbrio entre as forças que atuam na cunha central, como aparece na equação 48. O ângulo ( $\beta$ ) da zona de falha é determinado minimizando a força total ( $P$ ). A equação se apresenta a seguir:

$$H = [1/\text{sen}(\alpha + \varphi + \beta + \delta) * \{-Fa * \cos(\alpha + \varphi + \beta) + 2 * SF_2 + \cos \varphi + P_s * \text{sen}(\varphi + \beta) + 2 * CF_2 * \cos \varphi + CF_1 * \cos \varphi\}] \quad (48)$$

$$Fa = ca * w * d * (1 + h/d) * \text{sen} \alpha \quad (49)$$

$$SF_2 = R * \tan \phi \quad (50)$$

$$P_s = \gamma * W * A' \quad (51)$$

$$CF_2 = c * A' \quad (52)$$

$$CF_1 = c * w * d / \text{sen} \beta \quad (53)$$

$$R = \gamma * K_o * Z * A' \quad (54)$$

$$A' = 0,5 * d^2 * (1 + h/d) * [(1 + h/d) * \cot \alpha + \cot \beta] \quad (55)$$

$$K_o = (1 - \text{sen} \phi) \quad (56)$$

(z) é determinado em função do ângulo ( $\beta$ ).

$$z = 1/3 * (d + h) \quad (57)$$

### Lista de símbolos

<b>H</b>	Força de tração (kN);
<b>P</b>	Força total da ferramenta (N);
<b>c</b>	Índice de coesão do solo ( $N.cm^2$ );
<b>c<sub>a</sub></b>	Índice de adesão solo – material (kPa);
<b><math>\gamma</math></b>	Densidade do solo ( $kg.m^{-3}$ );
<b>d</b>	Profundidade de trabalho da ferramenta (m);
<b>w</b>	Largura da ferramenta (m);
<b>CF<sub>1</sub></b>	Força coesa na linha de ruptura;
<b>CF<sub>2</sub></b>	Força coesa nas laterais;
<b>F<sub>a</sub></b>	Resistência à adesão;
<b>P<sub>s</sub></b>	Peso da cunha do solo;
<b>SF<sub>1</sub></b>	Fator de segurança;
<b>SF<sub>2</sub></b>	Força de atrito nas laterais;
<b>A'</b>	A área lateral da cunha central
<b>h</b>	Elevação do solo que ocorre na frente da ferramenta;
<b>R</b>	Força normal a superfície elevada à frente da ferramenta;
<b>z</b>	Profundidade média na qual o centroide da cunha de solo é localizado, com relação a superfície;
<b><math>\phi</math></b>	Ângulo de atrito interno do solo (°);
<b><math>\beta</math></b>	Ângulo de ruptura do solo a frente da ferramenta (°);
<b><math>\alpha</math></b>	Ângulo de ataque da ferramenta (°);
<b>g</b>	Aceleração devido à gravidade ( $m.s^{-2}$ );
<b><math>\mu</math></b>	Coeficiente de atrito interno do solo (°);
<b>K<sub>o</sub></b>	Coeficiente de pressão da terra em repouso;

As expressões (F<sub>a</sub>): força de adesão; (CF<sub>1</sub>): a força de coesão no plano de ruptura; (CF<sub>2</sub>): a força de coesão nas laterais com relação a cunha central (SF<sub>2</sub>): força de atrito proporcionada pelas cunhas laterais; (R): força que atua normal à superfície elevada à frente da ferramenta; (K<sub>o</sub>): o coeficiente de empuxo ao repouso; (z): a medida da profundidade na qual o centroide da cunha de solo é localizado com relação à superfície; A': a área lateral da cunha central; (P<sub>s</sub>): o peso da cunha.

## 2.8 Aplicativo móvel

Nos últimos anos os aplicativos ganharam popularidade e preferência pela acessibilidade, flexibilidade, portabilidade e confiabilidade, pois realizam diversas tarefas simultâneas (CHAROUSSET, *et al.* 2016; MURTA, 2015). Além disso, a tecnologia móvel permite ao usuário utilizá-los em qualquer lugar, prestigiando as atividades e consultas que ocorrem fora do modelo tradicional de escritório, o que inclui as lavouras dos agricultores (RÉQUIA, 2013).

Segundo Réquia (2013), o mercado de celulares smartphones e tablets com sistema operacional Android se popularizou na comunidade geral, tanto na zona rural como no meio urbano. Além das utilidades básicas do telefone, os smartphones se tornaram uma ferramenta de trabalho para o produtor rural, que os utiliza para o planejamento, monitoramento das atividades e sanidade das culturas.

No play store, ainda não encontra-se disponível ao público aplicativos que sejam desenvolvidos na área agrícola voltada a simulações do preparo de solo, a grande maioria, são para a regulagem de semeadora, distribuição de fertilizantes e corretivos, calibração do pulverizador e estimativa de perdas na colheita como é o Mecagrícola (NESMA, 2023) e outros como o Maqcampo da John Deere sobre a manutenção e peças de tratores, pulverizadores e colheitadeiras, por outro lado a Embrapa possui uma diversidade de apps que são para o gerenciamento de um estabelecimento agropecuário e entre os mais importantes desenvolvido por eles o Zarc – plantio certo que trata sobre o zoneamento agrícola utilizado como referência pelo governo para a concessão de créditos e o seguros agrícolas.

No entanto, de acordo com a literatura, encontram-se diversos programas de computador que foram desenvolvidos para modelagem matemática para seleção de conjunto mecanizados de acordo ao custo operacional (BAIO et al. 2013; ARTUZO et al. 2015), modelo computacional para dimensionamento de tratores e equipamentos baseado no modelo da ASAE D 230.3 por (SILVA 1996), baseado na norma ASAE D 497.4 – Agricultural Machinery Management Data por (KLAVAR et al. 2013).

Os especialistas indicam três linguagens mais utilizadas para o desenvolvimento dos aplicativos: o nativo, Webapp e os híbridos. A linguagem híbrida normalmente é escolhida para desenvolver aplicativos simples e demandam menos tempo e recurso (por exemplo o *bluetooth*, caixas de texto, botões, calculadoras entre outros). Por sua vez, a linguagem nativa é utilizada para aplicativos de funcionalidade complexa e exigem mais tempo e recursos para seu desenvolvimento, oferecem maior segurança e velocidade para os usuários, sendo, em contrapartida, mais oneroso (BOCARD, 2020; PLOTZE, 2015).

A escolha do tipo de linguagem de programação irá depender do tipo ou da funcionalidade do aplicativo, por exemplo, a linguagem nativa utiliza o Java ou kotlin para Android e objective-c ou swift para iOS. A linguagem híbrida emprega javascript ou dart; Webapp utiliza javascript ou PHP e ferramentas como HTML5 e CSS3 (BOCARD, 2020).

A linguagem de programação orientada a objeto, compatível com os modelos matemáticos, é chamada Python 3, considerada de alto nível em virtude da sua alta produtividade e ampla gama de bibliotecas disponíveis. Conjuntamente é utilizada uma ferramenta gratuita que opera sobre a licença MIT chamada Kivy que é uma biblioteca de código aberto, capaz de rodar em múltiplas plataformas, como Linux, Windows, OS X, Android, IOS e Raspberry Pi. Esta permite o rápido desenvolvimento de aplicativos e suas interfaces gráficas, inclusive com multitoque. Para finalizar é utilizado buildozer, uma ferramenta que facilita o processo de *package* do aplicativo, fazendo o download de todos os pré-requisitos como Android SDK, NDK, entre outros.

### 3 Metodologia

Esta pesquisa pertence à classificação teórico-conceitual: desta forma adotou-se o método baseado na revisão de literatura sistemática por meio de consulta às bases de dados disponíveis no portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). A mesma foi conduzida em três fases distintas, e na Figura 18 detalha-se as fases como as atividades foram realizadas dentro da metodologia adotada para a consecução dos objetivos do projeto.



Figura 21 - Lista de atividades e metodologia desenvolvida.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

### **3.1 Primeira fase; pesquisa sistemática**

#### **3.1.1 Pesquisa e caracterização dos modelos matemáticos**

Na primeira fase, realizou-se a busca sistemática de estudos sobre os modelos matemáticos na base da Web of Science, Scopus, Google Student, no portal da American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) e no site de teses e dissertações da CAPES. Primeiramente, foram definidas as palavras-chave relacionadas ao tema de pesquisa para a realização da consulta sistematizada. Foram utilizados dois eixos, incorporando no primeiro eixo, modelos matemáticos e no segundo eixo, dentes estreitos e na segunda busca corte de solo no primeiro eixo e no segundo eixo tridimensional.

Como critério de inclusão foram selecionados artigos, livros, teses e artigos de congressos onde esses termos foram incluídos no título, resumo e/ou palavras-chave disponíveis na íntegra, gratuitamente, independentemente do ano e do idioma utilizado fosse inglês, espanhol ou português.

Posteriormente, todos os artigos foram analisados e excluídos os não alinhados com o assunto da pesquisa. Realizou-se a tradução dos documentos, caso fossem em inglês, e a posterior leitura dos resumos dos artigos. Aqueles que não tratavam sobre os modelos matemáticos e ferramentas estreitas foram excluídos; os selecionados passaram para a etapa de análise sistemática, que consistiu na leitura integral com o intuito de indentificar e verificar as principais metodologias das equações matemáticas e sua aplicabilidade para as ferramentas estreitas.

#### **3.1.2 Pesquisa da fonte de dados bibliográficos sobre ferramentas estreitas**

Na segunda pesquisa, realizou-se o levantamento de fonte de dados da literatura sobre ensaios a campo de ferramentas estreitas (escarificadores e subsoladores) realizados anteriormente, somente no Brasil.

Repetindo a mesma metodologia de busca inicial, utilizou-se a base da Web of Science, Scopus, Google Student, site de teses e dissertações da CAPES e os sites de repositório institucional dos principais Programas de Pós-graduação em Engenharia Agrícola do Brasil, Federais e Estaduais.

Estabeleceu-se como critério de inclusão os artigos que investigaram temas com termos no título, no resumo e/ou palavras-chave, colocando-se no primeiro eixo desempenho operacional e no segundo eixo utilizando as palavras descompactador, escarificador, subsolador e/ou força de tração, mobilização e preparo do solo primário, no Brasil, disponíveis na íntegra, gratuitamente, independentemente do ano de publicação e do idioma utilizado fosse este português ou inglês.

Foram selecionados textos e acesso livre de fonte qualificados (artigos, livros e anais de congressos), realizou-se o pré-processamento de seleção para verificar a qualidade dos dados referentes a caracterização das propriedades físicas do solo e da ferramenta com vistas a selecionar apenas aqueles que reuniriam os dados suficientes para atingir o objetivo da pesquisa.

### 3.1.3 Seleção dos ensaios a campo da fonte de literatura

Uma vez terminada a primeira etapa da análise, utilizou-se uma metodologia para a caracterização da fonte de dados da literatura, mediante a criação de uma base de dados em uma planilha eletrônica, registrando primeiramente os autores e a localização, identificando-os através da frase caso, o tipo de solo e o tipo de implemento.

As informações das principais variáveis da fonte de dados foram padronizadas antes de serem registradas. As características do solo equivaleram a: textura, densidade do solo ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) teor de água no solo no momento do ensaio ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ), ângulo de atrito interno do solo ( $^{\circ}$ ), índice de adesão solo-material (kPa) e índice de coesão do solo (kPa).

Para caracterizar as ferramentas, foram consideradas as seguintes características básicas: largura da ferramenta (m); número de hastes; ângulo de ataque ( $^{\circ}$ ); velocidade de trabalho ( $\text{km.h}^{-1}$ ); profundidade de trabalho (m); força de tração por haste (kN). No entanto, neste estudo não foi considerado o efeito do patinamento. Utilizou-se a equação da potência requerida pelo implemento para passar de kW para kN, como se especifica na equação 58.

$$Pr_{(kW)} = \frac{Ft*v}{3,6} \quad (58)$$

Onde

**Pr** = Potência requerida na barra de tração solicitada pelo implemento (kW);

**Ft** = Força de tração na barra (kN);

**v**= Velocidade teórica de deslocamento da ferramenta (Km.h<sup>-1</sup>).

**3,6** = Fator de conversão de unidades.

## 3.2 Segunda fase: simplificação e comparação

### 3.2.1 Seleção dos modelos matemáticos e ensaios a campo da fonte de literatura

A segunda fase, foi realizada em decorrência da primeira, onde inicialmente aplicou-se os modelos matemáticos. Para a seleção destes os mesmos foram testados com os dados da revisão de literatura. Os modelos matemáticos para previsão do esforço de tração escolhidos foram os de: Reece (1965); Hettiaratchi & Reece (1967); Godwin & Spoor (1977), McKyes & Ali (1977); Grisso *et al.* (1980) e Perumpral *et al.* (1983), visto serem os mais representativos na literatura pelo amplo uso e pela aplicabilidade, em termos de determinação de parâmetros. Executaram-se os cálculos dos seis modelos matemáticos selecionados, utilizando-se os resultados de Machado & Trein (2013).

### 3.2.2 Estabelecimento das variáveis pré-determinadas das características físicas do solo e das ferramentas.

Para a realização dos cálculos de previsão, verificou-se a necessidade de estabelecimento de parâmetros pré-determinados para as características do solo e da interação ferramenta-solo como: ângulo de atrito interno do solo; índice de coesão do solo; índice de adesão solo-material; ângulo de atrito solo-material, para tanto foram utilizados estudos encontrados na literatura a fim de se estabelecer as médias gerais correspondentes ao tipo de solo. Para o fator ângulo de ruptura do solo à frente da ferramenta utilizou-se a equação 59, para a obtenção desse dado.

$$\beta = 45 - \varphi \div 2 \quad (59)$$

Foram utilizados estudos de literatura e ensaios a campo como referência para estimar os valores típicos característicos para cada tipo de solo, de acordo com a

textura, para a realização dos cálculos de previsão de esforço de tração nos modelos matemáticos utilizados.

O estudo realizado por Ashburner & Sims (1984), foi escolhido para se obter as estimativas dos dados pré-estabelecidos do solo, de acordo com sua textura, estado que este se encontre compactado o solto, ângulo de atrito solo e coesão, os quais são apresentados nas tabelas 1.

Tabela 1 - Valores típicos de coesão e ângulo de atrito segundo Ashburner & Sims (1984).

Textura de solo	Estado	$\varphi$ (°)*	c (kN.m <sup>-2</sup> )**
Areia média	Compactado	38-40	0-0
	Solto	32-35	
Areia fina com Matéria orgânica	Compactado	25-30	0-0
	Solto	18-22	
Franco - arenoso	Friável	24-28	20-25
	Plástico	24-28	10-15
Franco	Friável	22-26	25-30
	Plástico	15-19	15-20
Argiloso	Friável	17-19	40-60
	Plástico	10-14	25-30

\*  $\varphi$ = Ângulo de atrito interno do solo; \*\* c = Índice de coesão do solo.

Estudos desenvolvidos por Machado (2001), Silva *et al.* (2004); foram escolhidos para realizar as estimativas dos dados pré-estabelecidos de solo, tais como ângulo de atrito interno e coesão do solo de acordo com o teor de água, os quais são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Relação entre os níveis de teor de água, ângulo de atrito interno e coesão do solo Machado (2010), Silva *et al.* (2004).

Planossolo			Argissolo-vermelho			Latossolo-vermelho		
Ug* (kg.kg <sup>-1</sup> )	c** (kN.m <sup>-2</sup> )	$\varphi$ *** (°)	Ug (kg.kg <sup>-1</sup> )	c (kN.m <sup>-2</sup> )	$\varphi$ (°)	Ug (kg.kg <sup>-1</sup> )	c (kN.m <sup>-2</sup> )	$\varphi$ (°)
0,19	21,02	32,24	0,19	26,40	33,19	0,16	106	80
0,14	31,36	32,31	0,14	32,19	38,63	0,27	58	67
0,12	31,65	33,34	0,12	72,34	41,17	0,38	28	65

\* Ug= teor de água; \*\* c = Índice de coesão do solo; \*\*\*  $\varphi$ = Ângulo de atrito interno do solo.

Os trabalhos realizados por Silva *et al.* (2004) foram escolhidos para realizar as estimativas dos dados pré-estabelecidos de densidade de cada tipo de solo, apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Valores típicos de densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) do Estado do Rio Grande do Sul segundo Machado (2001) e Silva *et al.* (2004).

<b>Latossolo</b>	<b>Planossolo</b>	<b>Argissolo</b>
1,21	1,51	1,57
0,96	1,60	1,48
1,12	1,55	1,51

### 3.2.3 Análise e simplificação dos modelos matemáticos

A metodologia para a primeira simplificação dos modelos consistiu no seguinte: Aplicou-se as equações dos seis modelos matemáticos de Reece (1965), Hettiaratchi & Reece (1967), Godwin & Spoor (1977), McKyes & Ali (1977), Grisso *et al.* (1980) e Perumpral *et al.* (1983), utilizando os dados do trabalho de Machado (2001); Machado & Trein (2013) - Planossolo T2 e analisou-se o processo da equação integral determinando-se o percentual de participação de cada fator que compõe a equação definidora do modelo. Para o mesmo, foi utilizada regra de três simples, o resultado da equação integral foi levado a 100%. Após da análise, suprimiu-se fatores com menor participação em algumas situações e em outras, os fatores de maior complexidade para sua obtenção, posterior a isso, foram executados novamente, os cálculos de esforço de tração e comparados com o modelo integral. Determinou-se dessa maneira a essencialidade de cada fator para cada modelo.

Procedeu-se, então, para uma segunda simplificação com o intuito de realizar as comparações entre os modelos e observar a repercussão dele entre os diferentes tipos de solos. Para uma melhor compreensão fez-se a classificação de acordo com a previsibilidade, a forma de obtenção e a exclusão dos fatores que não foram possíveis estimar sem prejudicar o processo, Figura 19.

Posteriormente, todas as equações foram aplicadas na íntegra e em forma simplificada com os trabalhos de Salvador *et al.* (2008); Machado (2010); Rosa *et al.* (2011); Machado & Trein (2013); Bellé *et al.* (2014); Santos *et al.* (2015); (com as duas repetições de cada tipo de solo), Machado *et al.* (2015) e, os resultados foram comparados com o resultado real a campo, o qual serviu como referência, sendo os

resultados analisados de acordo com a sua aproximação. Ressalta-se, que a força de tração calculada pelos modelos é a bruta sem descontar a resistência ao rolamento assim como os dados dos experimentos de comparação.

Por último, procedeu-se a escolha tomando-se por base a situação que apresentasse resultado percentual mais próximo do obtido a campo e que também fosse de menor complexidade.

#### 3.2.4 Comparação dos resultados previstos e medidos experimentalmente

Para apresentar os resultados das comparações dos trabalhos obtidos na literatura e dos previstos pelas equações utilizou-se figuras para sua melhor interpretação para , além disso, foi realizada um quadro de resumo para uma melhor visualização (anexo quadro 2).

### **3.3 Terceira fase; aplicativo móvel**

#### 3.3.1 Função global - entrada e saída de dados

A última fase, iniciou-se a partir da obtenção do modelo simplificado na fase anterior. Realizou-se a identificação dos fatores que influenciam na execução do cálculo de esforço de tração, relacionadas com o solo, com a ferramenta e a interação entre estes dois fatores. Definiu-se os dados a serem ingressados pelo usuário e os que serão pré-determinados pelo aplicativo, figura 19.

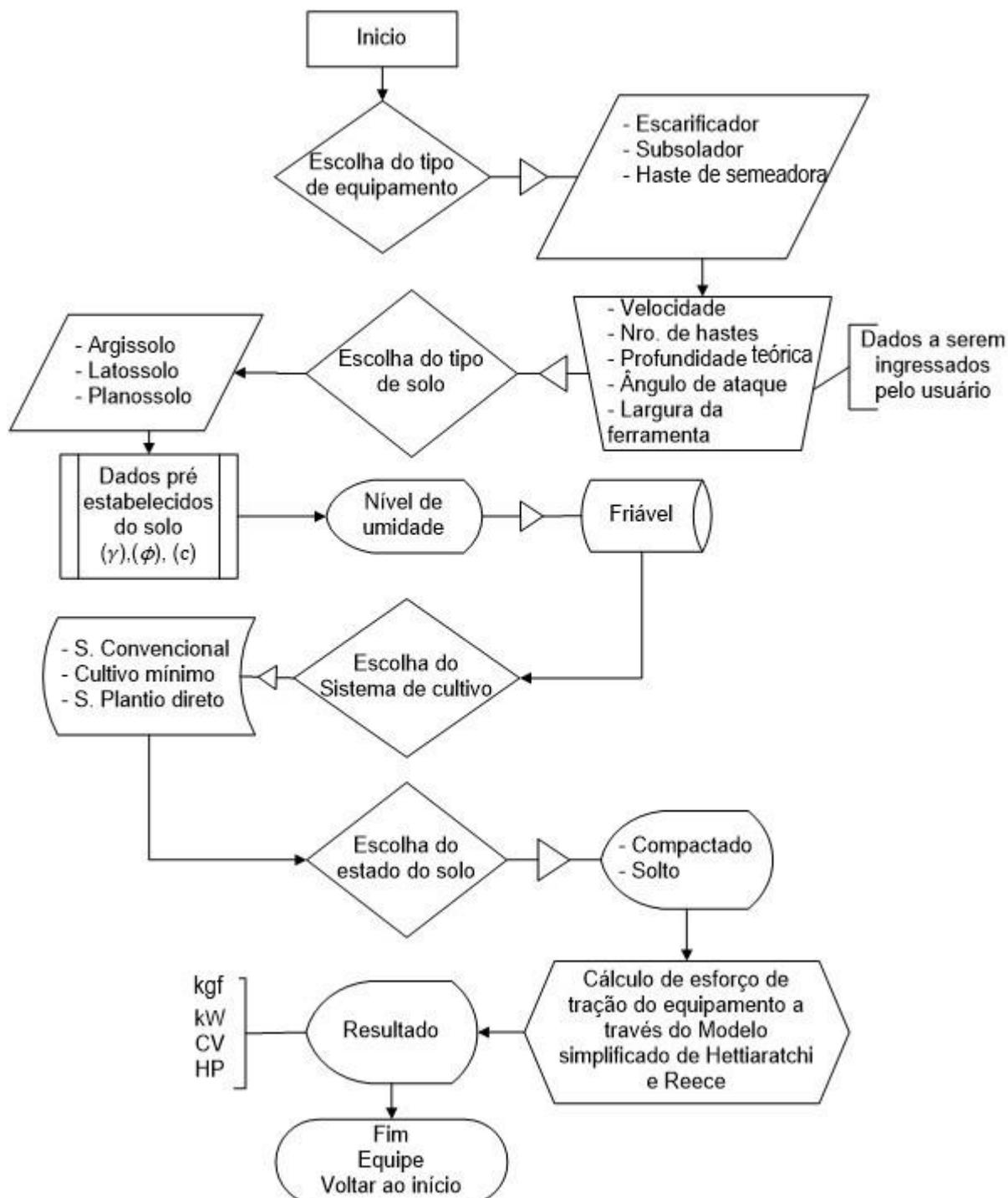


Figura 22 – Fluxograma do aplicativo móvel

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

### 3.3.2 Construção do aplicativo

Para a construção do aplicativo móvel, foi seguida uma hierarquia de tomada de decisões: definiu-se primeiramente a plataforma do aplicativo (Android) após elegeu-se o tipo de linguagem de programação a ser utilizada para atender a complexidade da demanda do modelo matemático, assim também, definiu-se os

implementos utilizados, os tipos de solos, as variáveis envolvidas para a construção do aplicativo e por fim o teste do mesmo.

Este foi programado de modo que alguns dados possam vir a ser inseridos pelo usuário como o tipo de ferramenta, a velocidade, número de hastes, profundidade de trabalho, ângulo de ataque, largura da ferramenta, sistema de cultivo, estado e o tipo de solo. Para os demais dados, necessários a execução do aplicativo, foram utilizadas médias dos parâmetros pré-estabelecidos, escolhidos de acordo com o tipo de solo, textura ou estado seja este solto ou compactado como se indicam nas Tabelas 1, 2 e 3, formando-se um banco de dados armazenado pelo aplicativo das propriedades físicas de três tipos de solos (Planossolo, Argissolo e Latossolo) que foram: densidade do solo ( $\gamma$ ), índice de coesão do solo ( $c$ ) e ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) em duas condições solto e compactado, todos eles obtidos na literatura, sendo estes valores médios no estado de friável, (como aparece no fluxograma, Figura 17).

Prestou-se especial atenção em cada fase da construção do desempenho do aplicativo uma abordagem simples para um público leigo, facilidade de acesso, a adoção de conteúdo visual com especificações técnicas, a condução para adotar boas práticas agrícolas e a usabilidade. Além disso, para apresentar os resultados foram utilizadas diferentes fórmulas de conversão, escolhendo-se como referência o estabelecido pelo Schlosser (1988), para expressar os resultados em (Kgf); (CV); (kW) e (HP) e expressar a demanda de potência no motor e na barra de tração.

### 3.4 Softwares

#### 3.4.1 Python

Para o desenvolvimento do aplicativo móvel foi escolhida a linguagem de programação de alto nível, e orientada a objeto, Python (versão 3.7.10). Em virtude da sua alta produtividade e ampla gama de bibliotecas disponíveis, que suporta diversas tarefas de programação em nível de aplicativo, desde *text pattern matching* (correspondência de padrões de texto) até *scripts* (programa) de rede de acesso gratuito e portátil para as principais plataformas Linux, Windows entre outros (KHALID, 2021; LUTZ & ASCHER, 2007).

### 3.4.2 Kivy

Dentre as bibliotecas, a principal utilizada chama-se Kivy e é uma biblioteca de código aberto, que é capaz de rodar em múltiplas plataformas, como Linux, Windows, OS X, Android, IOS e Raspberry Pi. É uma ferramenta gratuita que opera sobre a licença MIT, permitindo o rápido desenvolvimento de aplicativos e suas interfaces gráficas, inclusive com multitoque (DOCUMENTATION, MAR,2022).

### 3.4.3 Buildozer

Buildozer é uma ferramenta que facilita o processo de *package* do aplicativo, fazendo o *download* de todos os pré-requisitos como Android SDK, NDK, entre outros. Foi utilizada para compilar o aplicativo para a plataforma Android, por ser esta a mais popular no meio rural dada sua preferência pela acessibilidade, flexibilidade, portabilidade e confiabilidade (DOCUMENTATION, JAN, 2022; CHAROUSSET, *et al.* 2016; MURTA, 2015).

## 3.5 Teste de validação do aplicativo móvel

Após o término da versão preliminar, iniciaram-se com os testes, o primeiro consistiu na execução dos cálculos e ajustes no formato do aplicativo e/ou na equação, utilizando-se o banco de dados elaborado com as diferentes ferramentas e tipos de solos. Posteriormente, realizou-se testes de validação comparando os resultados do aplicativo com os dados a campo com o modelo matemático integral e o modelo simplificado como se apresenta na Tabela 9. Por último, compartilhou-se o aplicativo com professores, colegas e produtores no sentido de que utilizassem o mesmo e retornassem com observações pertinentes ao funcionamento.

## **4 Resultados e discussões**

### **4.1 Primeira fase; pesquisa sistemática**

#### 4.1.1 Pesquisa e caracterização dos modelos matemáticos

Na primeira etapa da pesquisa sistemática que tratou dos modelos matemáticos para ferramentas estreitas, obteve-se 1.437 documentos entre artigos científicos, teses e livros publicados em periódicos internacionais, os quais foram revisados e analisados um por um, concluindo-se que 83 encontravam-se alinhados com o assunto da pesquisa. Os modelos matemáticos escolhidos são derivados da “Equação Universal de Mobilização do Solo” de Reece (1965), utilizando-se os mesmos símbolos dentro de cada processo.

#### 4.1.2 Pesquisa da fonte de dados bibliográficos sobre ferramentas estreitas

Na segunda etapa da pesquisa sistemática, sobre as ferramentas estreitas tanto para escarificadores e subsoladores, obteve-se no total 107 documentos publicados no portal de periódicos da Capes, Google student e nos repositórios institucionais do Brasil, os quais foram revisados e analisados um por um, dos quais 42 estavam alinhados com o assunto da pesquisa.

### **4.2 Segunda fase; simplificação e comparação**

#### 4.2.1 Seleção dos modelos matemáticos e ensaios a campo da fonte de literatura

Os principais modelos matemáticos analíticos selecionados para realizar os cálculos de esforço de tração de ferramentas estreitas são apresentados na Tabela 4. Os mesmos foram escolhidos com base na sua semelhança com relação ao procedimento de cálculo e por usarem praticamente os mesmos fatores, além disso os modelos de Reece (1965); Hettiaratchi & Reece (1967); Godwin & Spoor (1977); McKyes & Ali (1977); Grisso et al. (1980) e Perumpral *et al.* (1983) já foram amplamente estudados por (PLASSE *et al.* 1985; MCKYES, 1985; SERPA 1997;

MACHADO, 2001; DESIR, 1981) tanto em condições brasileiras, no exterior como no Canadá e em simulações computacionais.

Tabela 4 - Modelos matemáticos analíticos selecionados.

<b>Autores</b>	<b>Modelos matemáticos</b>
Reece (1965)	$H = P * \text{sen}(\alpha + \varphi) + c * d * w * \cot \alpha$
Hettiaratchi & Reece (1967)	$H = (\gamma * g * d^2 * N_\gamma + c * d * N_c + q * d * N_q + c_a * d * N_{ca})w * \text{sen}(\alpha + \delta) + c_a * d * w * \cot \alpha + P_2 *$
Godwin & Spoor (1977)	$H = (\gamma * g * d^2 * N_\gamma + c * d * N_c + c_a * d * N_{ca} + q * d * N_q) * (w + s) * \text{sen}(\alpha + \delta) + c_a * d * w * \cot \alpha$
McKyes & Ali (1977)	$H = P * \text{sen}(\alpha + \delta) + c_a * d * w * \cot \alpha$
Grisso <i>et al.</i> (1980)	$P = (\gamma * g * d^2 * N_\gamma + c * d * N_c + c_a * d * N_{ca}) * w$
Perumpral <i>et al.</i> (1983)	$H = [1 / \text{sen}(\alpha + \varphi + \beta + \delta) * \{-Fa * \cos(\alpha + \varphi + \beta) + 2 * SF_2 + \cos \varphi + P_s * \text{sen}(\varphi + \beta) + 2 * CF_2 * \cos \varphi + CF_1 * \cos \varphi\}]$

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Selecionaram-se seis estudos independentes de ensaios a campo, entre os mais recentes encontrados na literatura, para a coleta de dados no que se refere a resultados experimentais de campo. A caracterização da fonte de dados apresenta-se na tabela 5.

Tabela 5 - Identificação de casos de estudos independentes.

<b>Caso</b>	<b>Localização</b>	<b>Solo</b>	<b>Implemento</b>
Salvador <i>et al.</i> (2008)	Botucatu, São Paulo.	Nitossolo Vermelho Distroférico.	Subsolador
Rosa <i>et al.</i> (2011)	Santa Maria, Rio Grande do Sul.	Argissolo Vermelho-amarelo distrófico arênico	Subsolador
Machado & Trein (2013A)	Pelotas, Rio Grande do Sul.	Planossolo	Escarificador
Machado & Trein (2013B)	Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul.	Argissolo Vermelho	Escarificador
Bellé <i>et al.</i> (2014)	Boa Vista do Incra, Rio Grande do Sul.	Latossolo Vermelho Distrófico típico	Escarificador
Santos <i>et al.</i> (2015)	Campinas, São Paulo.	Latossolo Vermelho Escuro	Escarificador
Machado <i>et al.</i> (2015)	Botucatu, São Paulo.	Nitossolo Vermelho Distroférico	Subsolador

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Observa-se na tabela 6, dentro do conjunto dos dados, quatro tipos de solos diferentes, entre eles Latossolo, Argissolo, Planossolo e Nitossolo: cabe destacar que todos se encontram no estado do Rio Grande do Sul.

Os principais parâmetros do solo registrados correspondem a textura, densidade ( $\gamma$ ), teor de água registrado antes do ensaio ( $\text{Kg.kg}^{-1}$ ), ângulo de atrito interno ( $\varphi$ ) e adesão solo-material ( $c_a$ ). A tabela 6 descreve as principais características do solo registradas.

Tabela 6 - Descrição das características do solo.

<b>Caso</b>	<b>Textura</b>	<b>*<math>\gamma</math> (kg.dm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Teor de água (kg.kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>** <math>\varphi</math> (°)</b>	<b>***C<sub>a</sub> (kPa)</b>
Salvador <i>et al.</i> (2008)	Argilosa	1,40	0,26	42,00	8,82
Rosa <i>et al.</i> (2011)	Franco-arenosa	1,71	0,29	39,63	6,30
Machado & Trein (2013A)	Argilosa	1,51	0,12	33,34	3,28
Machado & Trein (2013B)	Argilosa	1,57	0,12	33,19	6,97
Bellé <i>et al.</i> (2014)	Franco-argilosa	1,66	0,16	23,50	7,80
Santos <i>et al.</i> (2015)	Argilosa	1,41	0,22	20,00	5,40
Machado <i>et al.</i> (2015)	Argilosa	1,34	0,20	43,00	9,03

\*  $\gamma$  = densidade do solo; \*\*  $\varphi$  = Ângulo de atrito interno do solo; C<sub>a</sub> = índice de adesão solo-material. Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Com relação às ferramentas (escarificadores e subsoladores), utilizadas nos ensaios experimentais de campo, os mesmos foram identificados de acordo com as seguintes características básicas descritas como: largura da ponteira (m); número de hastes de composição do implemento; ângulo de ataque (°); velocidade média operacional (km.h<sup>-1</sup>) e profundidade média teórica de trabalho (m). Estes dados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Descrição das características da ferramenta.

<b>Caso</b>	<b>Largura da ponteira (m)</b>	<b>N° de hastes</b>	<b>Ângulo de ataque (°)</b>	<b>Velocidade (Km.h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Prof. de trabalho (m)</b>
Salvador <i>et al.</i> (2008)	0,050*	3	20,0	2,12	0,30
Rosa <i>et al.</i> (2011)	0,080	1	20,0	4,30	0,23
Machado & Trein (2013A)	0,075	1	17,3	3,00	T1= 0,19 T2= 0,21
Machado & Trein (2013B)	0,075	1	17,3	3,00	T1= 0,22 T2= 0,19
Bellé <i>et al.</i> (2014)	0,015	1	20,0	5,89	0,25
Santos <i>et al.</i> (2015)	0,076	5	23,0	4,31	0,20
Machado <i>et al.</i> (2015)	0,060	5	24,0	4,51	0,35

\*Dado ponteira alada;

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Os dados referentes ao esforço de tração por haste, em kN, por cada tipo de ferramenta e em cada sistema de manejo do solo, foram registrados e apresentados na tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da demanda de força de tração para cada ferramenta em condição dinâmica a campo.

<b>Caso</b>	<b>Ferramenta</b>	<b>Sistema de manejo do solo</b>	<b>Força por haste (kN)</b>
Salvador <i>et al.</i> (2008)	Subsolador	C	13,47
Rosa <i>et al.</i> (2011)	Subsolador	PD	18,57
Machado & Trein (2013A)	Escarificador	PN	T1= 3,17 T2= 3,70
Machado & Trein (2013B)	Escarificador	PD	T1= 7,73 T2= 4,18
Bellé <i>et al.</i> (2014)	Escarificador	PD	4,11
Santos <i>et al.</i> (2015)	Escarificador	PN	3,27
Machado <i>et al.</i> (2015)	Subsolador	C	4,36

\*PD: plantio direto; \* PN: pastagem natural; \*PC: pastagem cultivada \* C: convencional

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

#### 4.2.2 Análise e simplificação dos modelos matemáticos aplicados

Os valores de esforço de tração foram obtidos mediante a aplicação das equações na forma integral com sua respectiva simplificação, a partir dos dados do trabalho de Machado & Trein (2013A) - Planossolo T2 medidos a campo. O procedimento de cada um deles se apresentam a seguir.

#### 4.2.3 Modelo de Reece 1965 (Equação Universal de Mobilização do Solo)

$$H = P \cdot \text{sen}(\alpha + \phi) + c \cdot d \cdot w \cdot \cot \alpha$$

$$H = 1,29(49,6\%) \cdot 0,76(29,23\%) + 31,65 \cdot 0,21 \cdot 0,075 \cdot 3,21 (62\%)$$

$$H = 0,98 (38\%) + 1,60 (62\%)$$

$$H = 2,60(100\%)$$

Simplificação do modelo de Reece (1965)

$$H = P \cdot \text{sen}(\alpha + \phi) + c \cdot d \cdot w \cdot \cot \alpha$$

$$H = 1,29(54,66\%) \cdot 0,76(32,20\%) + 31,61 \cdot 0,21 \cdot 0,075 \cdot 3,21(68\%)$$

$$H = 0,76 (32,2\%) + 1,60 (68\%)$$

$$H = 2,36 (91\% \text{ do valor da equação original})$$

Para simplificar o modelo matemático de Reece (1965), os fatores foram agrupados em duas partes; por um lado os fatores  $P \cdot \text{sen}(\alpha + \phi)$ , onde P (esforço total demandado pela ferramenta), igual a  $(\gamma \cdot g \cdot d^2 \cdot N_\gamma + c \cdot d \cdot N_c + q \cdot d \cdot N_q) \cdot w$ . Os fatores referentes a P são os seguintes :  $\gamma$ : densidade do solo; g: efeito da aceleração devido a gravidade; d: profundidade da ferramenta; c: índice de coesão do solo; q: sobrecarga de pressão vertical aplicada na superfície do solo w: largura da ferramenta e  $N_\gamma$ ,  $N_c$  e  $N_q$  que são fatores que não dependem apenas da resistência ao atrito do solo, mas também da geometria da ferramenta. O segundo fator, dado por  $c \cdot d \cdot w \cdot \cot \alpha$ , compõe-se de c: índice de coesão do solo; d: profundidade da ferramenta; w: largura da ferramenta e  $\alpha$ : ângulo de ataque da ferramenta. A primeira parte, representa 38% do valor total e a segunda parte a 62% respectivamente. Visto a equação do Reece a de

menor complexidade em comparação com as outras, considerou-se mais adequada a supressão do fator de maior complexidade de cálculo, optou-se em excluir o fator P para avaliar sua repercussão no resultado final, buscando facilitar mais ainda seu cálculo por uma aplicação.

O valor de esforço de tração obtido através da equação original de Reece (1965), comparado com o resultado da equação simplificada demonstra uma diferença de cerca de 9%, entre eles. Observa-se que o esforço de tração obtido na equação original foi de 2,60 kN, já no processo de simplificação, onde foi excluído o fator  $P = 1,29$  kN, que representa 49,6% do valor da equação integral, o valor final resultou em uma diminuição de 9%, tendo-se como resultado, neste caso, 2,36 kN, ou seja, 91% do valor obtido quando se aplica a equação na sua integralidade.

No trabalho realizado por Machado & Trein (2013), foi obtido para o esforço de tração, medido a campo, o valor médio de 3,70 kN na profundidade de 0,21 m. Os autores aplicaram vários modelos matemáticos para o cálculo do esforço de tração, entre eles o de Reece (1965). Tais autores salientam que os modelos de Hettiaratchi & Reece (1967) e de Reece (1965) foram os que apresentaram os resultados mais próximos daquele obtido a campo.

Analisando a diminuição do resultado em 9% da equação simplificada observada, torna-o ainda mais distante do resultado real a campo de Machado & Trein (2013) - Planossolo T2 utilizado como parâmetro de referência, dessa forma o valor subestimado de 2,36 kN fica distante em torno a 36% do valor real a campo, que vem a ser de 3,70 kN, ficando dessa maneira o procedimento de simplificação não satisfatório, devido a ficar fora do parâmetro de esforço de tração aceitável.

#### 4.2.4 Modelo de Hettiaratchi e Reece (1967)

$$H = (\gamma * g * d^2 * N_\gamma + c * d * N_c + q * d * N_q + c_a * d * N_{ca}) * w * \text{sen}(\alpha + \delta) + c_a * d * w * \text{cot} \alpha + P_2 * \text{sen} \alpha$$

$$H = ((1,51 * 9,81 * (0,21)^2 * 2,39 + 31,65 * 0,21 * 1,89 + 3,11 * 0,21 * 4,78 + 3,28 * 0,21 * 0,69 * 0,075 * 0,74) + (3,28 * 0,21 * 0,075 * 3,21) + (19,77 * 0,30))$$

$$H = 0,95(14\%) + 0,17(2\%) + 5,9(84\%)$$

$$H = 7(100\%)$$

Simplificação do modelo de Hettiaratchi e Reece (1967)

$$H = (\gamma \cdot g \cdot d^2 \cdot N_\gamma + c \cdot d \cdot N_c + q \cdot d \cdot N_q + c_a \cdot d \cdot N_{ca}) \cdot w \cdot \text{sen}(\alpha + \delta) + c_a \cdot d \cdot w \cdot \cot \alpha + P_2 \cdot \text{sen} \alpha$$

$$H = (1,51 \cdot 9,81 \cdot (0,21)^2 \cdot 2,39 + 31,65 \cdot 0,21 \cdot 1,89 + 3,11 \cdot 0,21 \cdot 4,78 + 3,28 \cdot 0,21 \cdot 0,69 \cdot 0,075 \cdot 0,74) + (3,28 \cdot 0,21 \cdot 0,075 \cdot 3,21) + (19,77 \cdot 0,30)$$

$$H = 0,95(14\%) + 0,17(2,5\%) + 5,9(86\%)$$

$$H = 6,85(98\% \text{ do valor da equação original})$$

Para simplificar a equação de Hettiaratchi & Reece (1967), os fatores foram agrupados em três partes, calculando-se o valor percentual de cada grupo. onde P é igual a  $(\gamma \cdot g \cdot d^2 \cdot N_\gamma + c \cdot d \cdot N_c + q \cdot d \cdot N_q + c_a \cdot d \cdot N_{ca}) \cdot w \cdot \text{sen}(\alpha + \delta)$ , que correspondeu a 14% do valor total. Como segundo fator tem-se  $c_a \cdot d \cdot w \cdot \cot \alpha$ , que correspondeu a 2% e por último  $P_2 \cdot \text{sen} \alpha$ , que correspondeu a 84% do valor total. Optou-se, na simplificação do modelo pela exclusão do segundo fator, o qual tem menor incidência percentual, no resultado final.

O resultado do esforço de tração obtido mediante a utilização da equação original de Hettiaratchi & Reece (1967), comparado com aquele obtido pela utilização da equação simplificada item 4.2.2.2, demonstra a possibilidade de utilização da equação simplificada. Obteve-se o valor do esforço de 7 kN utilizando-se a equação original. Após a simplificação, excluindo-se da equação original os fatores  $c_a \cdot d \cdot w \cdot \cot \alpha$  que representa 0,17 kN, obteve-se uma diminuição de 2% no valor final da equação, sendo o resultado igual a 6,85 kN.

Verificou-se a diminuição do resultado em 2%, equação simplificada, mesmo assim o resultado ainda se encontra superestimado com relação ao real de campo, utilizado como parâmetro de referência. Dessa forma o valor de esforço de tração da equação simplificada 6,85 kN dá uma diferença de 85% acima do valor real a campo, que é 3,70 kN, ficando dessa maneira o procedimento de simplificação não satisfatório, devido a ficar fora do parâmetro de esforço de tração aceitável.

Comparando os resultados desta equação na forma integral e simplificada, verifica-se que o resultado obtido é superior ao de Machado & Trein (2013), que aplicaram o mesmo modelo matemático em Planossolo, sendo o resultado do cálculo conseguido por eles de 2,65 kN, na profundidade de 0,21m, ficando mais próximo ao resultado medido a campo de 3,70 kN na profundidade de 0,21 metros. De acordo com a literatura os modelos de Grisso *et al.* (1980), Perumpral *et al.* (1983) e

Hettiaratchi & Reece (1967) tendem a superestimar o esforço de tração, o mesmo foi evidenciado nos resultados da presente comparação. No entanto, é difícil de determinar a razão que proporciona diferença no cálculo quando se utiliza as mesmas variáveis, já que no trabalho de Machado & Trein (2013) não acompanha o processo da equação.

#### 4.2.5 Modelo de Godwin e Spoor (1977)

$$H = (\gamma * g * d^2 * N_{\gamma} + c * d * N_c + c_a * d * N_{ca} + q * d * N_q) * (w + s) * \text{sen}(\alpha + \delta) + c_a * d * w * \text{cot} \alpha$$

$$H = (1,51 * 9,81 * (0,21)^2 * 2,39) + (31,65 * 0,21 * 1,89) + (3,28 * 0,21 * -0,69) + (3,11 * 0,21 * 4,78) * (0,075 + 0,32) * 0,76 + (3,28 * 0,21 * 0,075 * 3,21)$$

$$H = 5 \text{ (96,72\%)} + 0,17 \text{ (3,28\%)}$$

$$H = 5,17 \text{ (100\%)}$$

#### Simplificação do modelo de Godwin e Spoor (1977)

$$H = (\gamma * g * d^2 * N_{\gamma} + c * d * N_c + c_a * d * N_{ca} + q * d * N_q) * (w + s) * \text{sen}(\alpha + \delta) + c_a * d * w * \text{cot} \alpha$$

$$H = (1,51 * 9,81 * (0,21)^2 * 2,39) + (31,65 * 0,21 * 1,89) + (3,28 * 0,21 * -0,69) + (3,11 * 0,21 * 4,78) * (0,075 + 0,32) * 0,76 + \cancel{(3,28 * 0,21 * 0,075 * 3,21)}$$

$$H = 5 \text{ (96,7\%)} + \cancel{0,17 \text{ (3,3\%)}}$$

$$H = 5 \text{ (96,7\% do valor da equação original)}$$

Para simplificar a equação de Godwin e Spoor (1977), seguiu-se o mesmo procedimento realizado na equação anterior, onde os fatores foram agrupados, neste caso em duas partes, calculando-se o valor percentual de cada grupo. onde P igual a  $\gamma * g * d^2 * N_{\gamma} + c * d * N_c + c_a * d * N_{ca} + q * d * N_q * w + s * \text{sen}(\alpha + \delta)$ , correspondendo a 96,7%. Já o segundo fator  $c_a * d * w * \text{cot} \alpha$  correspondeu a 3,28%, tendo sido excluído devido a sua menor participação percentual.

No item 4.2.2.3, encontram-se o resultado referente ao esforço de tração, obtido mediante a aplicação da equação original de Godwin e Spoor (1977), comparado com o resultado da equação simplificada. A utilização da equação original proporcionou um resultado de esforço de tração calculado de 5,17 kN. Ao simplificar-

se a equação foram excluídos os fatores  $c_a * d * w * \cot \alpha$ , os quais representam um valor de 0,17 kN com relação a equação integral, resultando numa diminuição de 3,28%, no valor da equação original. O resultado do esforço para a equação simplificada foi igual a 5 kN, ou seja, 96,7% com relação ao valor obtido pela utilização da equação original.

Obteve-se a diminuição do resultado em 3,28% para a equação de Godwin & Spoor (1977) simplificada, mesmo assim este resultado ainda se encontra superestimado com relação ao real a campo utilizado como parâmetro de referência. Dessa forma o valor de esforço de tração da equação simplificada, 5 kN, proporciona uma diferença de 35% acima do valor real a campo, que é 3,70 kN, ficando dessa maneira o procedimento de simplificação não satisfatório, por ficar fora do parâmetro de esforço de tração aceitável.

Comparando os resultados deste trabalho com os que obtiveram Machado & Trein (2013), os quais aplicaram o mesmo modelo matemático de Godwin & Spoor (1977), os valores não foram muito diferentes, sendo o obtido por estes autores igual a 4,92 kN. De acordo com a análise estatística realizada, por eles, não houve diferença significativa com relação ao valor medido a campo sendo este de 3,70 kN na profundidade de 0,21 metros.

#### 4.2.6 Modelo de McKyes & Ali (1977)

$$H = P * \text{sen}(\alpha + \delta) + c_a * d * w * \cot \alpha$$

$$H = 1,26 * 0,76 + (3,28 * 0,21 * 0,075 * 3,21)$$

$$H = 1,26 \text{ (112\%)} * 0,76 \text{ (68\%)} + 0,16 \text{ (15\%)}$$

$$H = 0,96 \text{ (85\%)} + 0,16 \text{ (15\%)}$$

$$H = 1,12 \text{ (100\%)}$$

#### Simplificação do modelo de McKyes & Ali (1977)

$$H = P * \text{sen}(\alpha + \delta) + c_a * d * w * \cot \alpha$$

$$H = 1,26 * 0,76 + (3,28 * 0,21 * 0,075 * 3,21)$$

$$H = 1,26 \text{ (112\%)} * 0,76 \text{ (81\%)} + 0,17 \text{ (18\%)}$$

$$H = 0,76 \text{ (81\%)} + 0,17 \text{ (18\%)}$$

$$H = 0,94 \text{ (83\% do valor da equação original)}$$

Para simplificar a equação do McKyes & Ali (1977), os fatores que a compõem foram agrupados em duas partes; os fatores  $P \cdot \text{sen}(\alpha + \delta)$  onde  $P$  é igual a  $\gamma \cdot g \cdot d^2 \cdot N_\gamma + c \cdot d \cdot N_c + q \cdot d \cdot N_q + c_a \cdot d \cdot N_{ca} \cdot w$ , estes fatores são semelhantes ao modelo de Reece com a adição dos fatores Índice de adesão solo – material  $c_a$  e índice de adesão do solo  $N_{ca}$  e os fatores  $c \cdot d \cdot w \cdot \cot \alpha$ . Da mesma forma como foi realizado com a equação do Reece procedeu-se na supressão do fator de maior complexidade de cálculo, optou-se em excluir o fator  $P$  para avaliar sua repercussão no resultado final, buscando facilitar mais ainda seu cálculo por uma aplicação.

Os resultados do esforço de tração obtidos aplicando-se a equação original de McKyes & Ali (1977), comparado com os resultados da equação simplificada constam no item 4.2.2.4. Os valores de esforço de tração foram da ordem de 1,12 kN para a equação original e na simplificação do modelo, onde exclui-se o fator  $P$  que representava um valor de 1,26 kN, ou seja 112% referente a equação original. Ao excluí-lo obteve-se como resultado 0,94 kN de esforço de tração, ou seja, um valor igual a 83% daquele obtido quando da utilização do modelo na sua integralidade, ficando a diferença acima do valor percentual admitido para a diferença que é de cerca de 10%.

A diminuição do resultado em 83% com relação a equação de McKyes & Ali (1977) simplificada, se encontra subestimado com relação ao resultado real a campo utilizado como parâmetro de referência, dessa forma o valor de esforço de tração da equação simplificada 0,94 kN difere em 75% abaixo do valor real a campo, qual é 3,70 kN. Dessa forma o procedimento de simplificação vem a ser não satisfatório, por ficar fora do parâmetro de esforço de tração aceitável.

Ao comparar os resultados obtidos com o trabalho de Machado & Trein (2013), que aplicaram o mesmo modelo matemático no Planossolo, onde obtiveram resultado da ordem de 0,90 kN, para uma profundidade de 0,21m. Verifica-se que ambos os cálculos proporcionaram resultados abaixo do esforço medido a campo. De modo geral observou-se que o modelo de McKyes & Ali (1977) tem tendência a dar resultados muito baixos, quando se compara com os resultados obtidos até aqui com os modelos do Reece (1965), Hettiaratchi & Reece (1967) e Godwin & Spoor (1977).

Serpa (1997) realizou um estudo comparativo, avaliando o desempenho de dois conjuntos mecanizados a campo, escarificadores de 5 e 7 hastes e subsolador de 3 hastes, com aqueles obtidos pela utilização modelos matemáticos modificados por ele. Verificou, pela utilização deste modelo, que o valor calculado superou o limite de aceitação para o escarificador de 7 hastes, em 75% e para o subsolador em 154%. Com a utilização do modelo original, observou-se neste trabalho que o valor do esforço foi da ordem de 12% acima do parâmetro de comparação, ficando dentro do limite de aceitação. Utilizando-se o modelo simplificado observou-se que este subestimou o valor de campo em 17%. Machado & Trein (2013) também aplicaram e compararam o referido modelo modificado por Serpa (1997), estes autores observaram que houve uma superestimativa do valor do esforço de tração em todas as análises.

#### 4.2.7 Modelo de Grisso *et al.* (1980)

$$P = (\gamma * g * d^2 * N_{\gamma} + c * d * N_c + c_a * d * N_{ca}) * w$$

$$P = ((1,51 * 9,81 * (0,21)^2 * 3,56) + (31,65 * 0,21 * 14,59) + (3,28 * 0,21 * 0,66)) * 0,075$$

$$P = ((2,32(32\%) + 96,97(1,296\%)+0,45(6\%)) * 0,075(1\%))$$

$$P = 7,48 (100\%)$$

#### Simplificação do modelo de Grisso *et al.* (1980)

$$P = (\gamma * g * d^2 * N_{\gamma} + c * d * N_c + c_a * d * N_{ca}) * w$$

$$P = ((1,51 * 9,81 * (0,21)^2 * 3,56) + (31,65 * 0,21 * 14,59) + (3,28 * 0,21 * 0,66)) * 0,075$$

$$P = ((2,32(31\%) + 96,97(1,301\%)+0,45(6\%)) * 0,075(1\%))$$

$$P = 7,45(99,6\% \text{ do valor da equação original})$$

A metodologia seguida para simplificar a equação do Grisso *et al.* (1980), consistiu no agrupamento dos fatores que compõem o fator P que vem a ser igual a  $\gamma * g * d^2 * N_{\gamma} + c * d * N_c + c_a * d * N_{ca} * w$ . Os fatores da equação são semelhantes ao modelo

de Reece (1965), com a exceção do fator  $q$ . Procedeu-se ao agrupamento em quatro grupos; o primeiro grupo correspondeu a  $\gamma \cdot g \cdot d^2 \cdot N_\gamma$ , o segundo grupo a  $c \cdot d \cdot N_c$ , o terceiro grupo a  $c_a \cdot d \cdot N_{ca}$  e o último foi direcionado como o fator  $w$ .

Os valores de esforço de tração obtidos mediante a aplicação da equação original do Grisso *et al.* (1980) comparado com o resultado advindo da aplicação da equação de forma simplificada encontram-se no item 4.2.2.5. O esforço de tração calculado por meio da utilização da equação original foi de 7,48 kN. Na simplificação do modelo, foram excluídos os fatores  $c_a \cdot d \cdot N_{ca}$  que representam 0,45 kN, quando da utilização da equação original, resultando numa diminuição da ordem de 0,4%, no valor original. Portanto, o resultado obtido por meio da simplificação do modelo foi de 7,45 kN, ou seja, igual a 99,6% do valor integral.

Mesmo com a diminuição do resultado final em 0,6% para a equação de Grisso *et al.* (1980) simplificada, verifica-se que este resultado ainda se encontra superestimado com relação ao resultado real a campo utilizado como parâmetro de referência. Dessa forma o valor de esforço de tração da equação simplificada 7,45 kN dá uma diferença de 101% acima do valor real a campo, que é 3,70 kN, ficando dessa maneira o procedimento de simplificação não satisfatório, por ficar fora do parâmetro de esforço de tração aceitável.

Machado & Trein (2013), não aplicaram o modelo matemático de Grisso *et al.* (1980). De acordo com a literatura, o modelo proposto por Grisso *et al.* (1980) vem a ser similar aos modelos de Godwin & Spoor (1977) e McKyes & Ali (1977), na forma como pressupõe a superfície de ruptura e semelhante ao modelo de Perumpral *et al.* (1983) ao substituir as crescentes laterais por um conjunto de forças adjacentes a cunha central que atuam de forma vertical e horizontal. Portanto, é válido realizar a comparação com os três modelos.

Realizando uma análise dos resultados das equações observou-se que os resultados obtidos por Grisso *et al.* (1980) apresentaram uma tendência de superestimar o esforço de tração, da mesma forma que aconteceu com Godwin & Spoor (1977), Hettiaratchi & Reece (1967) e Perumpral *et al.* (1983).

Comparando-se o resultado obtido pela aplicação do modelo de Grisso *et al.* (1980) com o obtido por Machado & Trein (2013), pela utilização do modelo de Perumpral *et al.* (1983), observa-se que são similares. O esforço de tração calculado por estes autores foi da ordem de 7,17 kN, na profundidade de 0,21m. Ambos

resultados sobre estimaram o esforço de tração medido a campo que foi de 3,70 kN na profundidade de 0,21 metros.

No entanto, em outro trabalho realizado por Machado *et al.* (1996), avaliando o desempenho de escarificador em Planossolo, operando com três hastes na profundidade média de 0,20 m, estes autores obtiveram o valor do esforço de tração de 21,39 kN na velocidade de 2,6 km.h<sup>-1</sup>, equivalente a 7,13 kN por haste. Isso demonstra que o esforço de tração para um solo é muito variável e que depende de diversos fatores tais como a própria ferramenta (geometria), a condição do solo, a interação solo-ferramenta e a condição de operação (velocidade e profundidade).

#### 4.2.8 Modelo de Perumpral *et al.* (1983)

$$H = [1/\text{sen}(\alpha + \phi + \beta + \delta) * \{-Fa * \text{cos}(\alpha + \phi + \beta) + 2 * SF_2 * \text{cos}\phi + P_s * \text{sen}(\phi + \beta) + 2 * CF_2 * \text{cos}\phi + CF_1 * \text{cos}\phi\}]$$

$$H = (1/ 0,93 * \{(-0,02 * 0,19) + (2 * 0,003 * 0,84) + (0,01 * 0,88) + (2 * 3,54 * 0,84) + (1,05 * 0,84)\})$$

$$H = (1/ 0,93 * \{6,8\})$$

$$H = (1,07(14,7\%) * \{6,8 (93\%)\})$$

$$H = 7,29 (100\%)$$

#### Simplificação do modelo de Perumpral *et al.* (1983)

$$H = [1/\text{sen}(\alpha + \phi + \beta + \delta) * \{-Fa * \text{cos}(\alpha + \phi + \beta) + 2 * SF_2 * \text{cos}\phi + P_s * \text{sen}(\phi + \beta) + 2 * CF_2 * \text{cos}\phi + CF_1 * \text{cos}\phi\}]$$

$$H = (1/ 0,93 * \{-0,02 * 0,19 + 2 * 0,003 * 0,84 + 0,01 * 0,88 + 2 * 3,54 * 0,84 + 1,05 * 0,84 (14\%)\})$$

$$H = 6,3 (87\% \text{ do valor da equação original})$$

A metodologia seguida para simplificar a equação do Perumpral *et al.* (1983), consistiu no agrupamento dos fatores que compõem a equação  $[1/\text{sen}(\alpha + \phi + \beta + \delta) * \{-Fa * \text{cos}(\alpha + \phi + \beta) + 2 * SF_2 * \text{cos}\phi + P_s * \text{sen}(\phi + \beta) + 2 * CF_2 * \text{cos}\phi + CF_1 * \text{cos}\phi\}]$ . Os mesmos foram agrupados em três grupos, o primeiro correspondeu a  $[1/\text{sen}(\alpha + \phi + \beta + \delta)]$ , o

segundo a  $-Fa \cdot \cos(\alpha + \phi + \beta) + 2 \cdot SF_2 \cdot \cos\phi + P_s \cdot \sin(\phi + \beta) + 2 \cdot CF_2 \cdot \cos\phi$ , o terceiro a  $CF_1 \cdot \cos\phi$ , o qual foi escolhido para exclusão dada a dificuldade para sua obtenção e pela sua baixa participação percentual no resultado final.

Utilizando-se o modelo proposto por Perumpral *et al.* (1983), obteve-se os valores de esforço de tração como segue no item 4.2.2.6, sendo o mesmo de 7,29 kN, quando da utilização da equação original. Na simplificação do modelo, exclui-se os fatores  $CF_1 \cdot \cos\phi$  que representam 0,88 kN, no modelo original, o que resulta numa diminuição de 12% no valor original, superando o parâmetro estabelecido de tolerância de cerca de 10%. Desta forma o resultado obtido foi de 6,3 kN, ou seja, 87% do valor originalmente calculado quando da utilização deste modelo.

Analisando-se o resultado da equação de Perumpral *et al.* (1983) simplificada, observou-se uma diminuição de 3% em relação a equação original, mesmo assim este valor ainda se encontra superestimado com relação ao resultado real a campo utilizado como parâmetro de referência. Dessa forma o valor de esforço de tração da equação simplificada 6,3 kN dá uma diferença de 70% acima do valor real a campo, que é 3,70 kN, ficando dessa maneira o procedimento de simplificação não satisfatório, por ficar fora do parâmetro de esforço de tração aceitável.

Da mesma forma que para as equações anteriores, realizou-se a comparação com o resultado obtido por Machado & Trein (2013) que na aplicação do modelo de Perumpral *et al.* (1983), obtiveram um esforço de tração da ordem de 7,17 kN, na profundidade de 0,21m, valores semelhantes ao obtido neste trabalho. Cabe ressaltar que o resultado deste estudo, quando da aplicação deste modelo superestimou o valor obtido a campo, da mesma forma que ocorreu quando da aplicação do modelo de Grisso *et al.* (1980) e Hettiaratchi & Reece (1967). O esforço de tração medido a campo por Machado & Trein (2013), foi de 3,70 kN na profundidade de 0,21 metros.

Apresenta-se na figura 20, o resumo das comparações entre os resultados de esforço obtido mediante a aplicação dos modelos originais e dos modelos simplificados com o valor de esforço de tração real medido a campo por Machado & Trein (2013) no Planossolo T2.

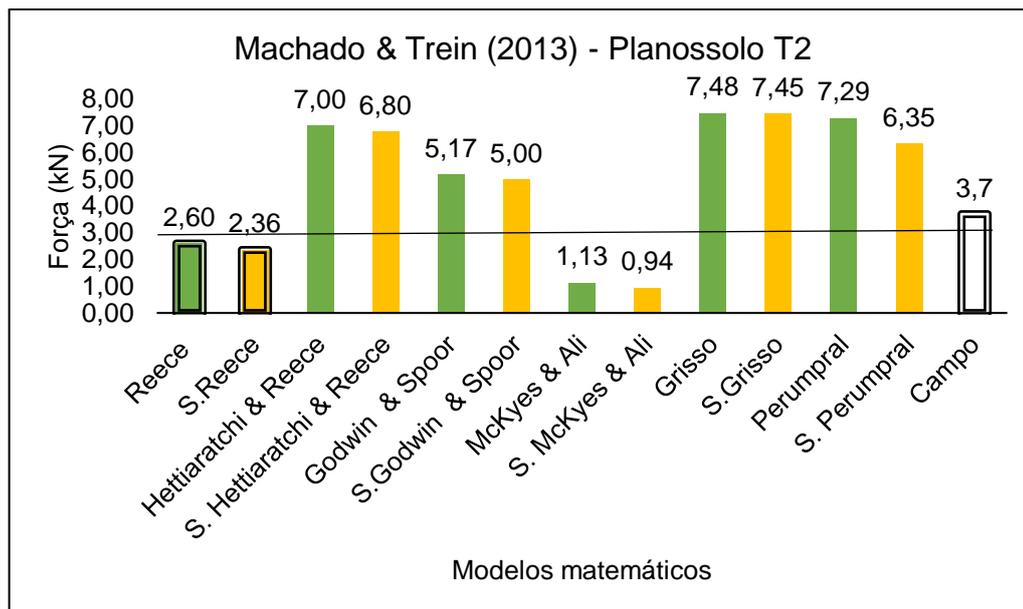


Figura 23 - Resultados de esforço de tração obtidos em campo e pela utilização dos modelos originais e simplificados. Obs: Em verde: modelos originais; Em amarelo: modelos simplificados.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Destaca-se em verde os resultados dos modelos originais e em amarelo os resultados dos modelos simplificados, comparados aos resultados do esforço de tração medido em campo. Analisando-se a figura 18 verifica-se, de modo geral nesta primeira simplificação, que mesmo com a exclusão de alguns dos fatores que compõem os diferentes modelos matemáticos é possível obter-se resultados de esforço de tração satisfatórios, quando da comparação com o modelo original.

Desta forma comprova-se que vem a ser possível simplificar as equações. Realizando-se a exclusão de alguns fatores nos modelos produziu-se uma variação dentro do padrão aceito de cerca de 10% de diferença, com relação a equação original, para a maioria dos modelos estudados, a exceção dos modelos de McKyes & Ali (1977), onde se obteve um valor de 83% e Perumpral *et al.* (1983), onde se obteve um valor de 87%, em comparação a equação original.

Após a exclusão de fatores com menor percentual de participação, verificou-se que o modelo proposto por Reece (1965), tanto na forma original quanto na forma simplificada foi o mais promissor ao apresentar o menor percentual de diferença de valor com relação ao original e também, por apresentar o valor mais próximo aquele obtido no campo. No entanto, todos os procedimentos de simplificação não foram satisfatórios considerando o resultado real a campo de Machado & Trein (2013) -

Planossolo T2 utilizado como referência, por ficar fora do parâmetro de esforço de tração aceitável.

Portanto, considerou-se que uma forma mais eficiente de simplificar e comparar os modelos seria excluindo-se os mesmos fatores de cada equação. Desta forma, resolveu-se reavaliar novamente os fatores que compõem os modelos como tem-se na Figura 21.

Reece (1966)	Hettiaratchi & Reece (1967)	Godwin & Spoor (1977)	McKyes & Ali (1977)	Grisso <i>et al.</i> (1980)	Perumpral <i>et al.</i> (1983)
$C_a$	$C_a$	$C_a$	$C_a$	$C_a$	$C_a$
$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$
$c$	$c$	$c$	$c$	$c$	$c$
$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$
$\delta$	$\delta$	$\delta$	$\delta$	$\delta$	$\delta$
$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$
$g$	$g$	$g$	$g$	$g$	$g$
$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$
$w$	$w$	$w$	$w$	$w$	$w$
$d$	$d$	$d$	$d$	$d$	$d$
	Termo não utilizado na equação				
	É possível estimar mediante Ashburner & Sims (1984)				
	Termo passível de exclusão da equação				
	"g" constante;				
	"β" calculado;				
	"dados relativos à ferramenta e ao trabalho em campo"				

Figura 24 - Metodologia de análises para simplificação dos modelos matemáticos.  
Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Como ponto de partida para uma nova análise dos fatores que compõem as equações, foi levada como premissa que os modelos estudados foram desenvolvidos a partir da equação Universal de Mobilização do Solo proposta por Reece (1965), avaliando a dificuldade de obtenção e a interferência de cada um dos fatores, os mesmos foram dispostos diferenciando-os com cores diferentes com relação a especificação de cada um deles como aparece na figura 19.

Dada a dificuldade de obtenção e a interferência muito pequena no resultado final os fatores índice de adesão solo-material ( $c_a$ ) e ângulo de atrito solo-material ( $\delta$ ), observados na primeira simplificação, que são fatores inerentes a interação solo-material, bem como a inexistência de dados sobre os mesmos na literatura, optou-se pela retirada dos mesmos dos modelos, já visando a sua utilização na previsão por meio do aplicativo móvel. O índice de adesão solo-material ( $c_a$ ) não faz parte do modelo proposto por Reece (1965). Entretanto o ângulo de atrito solo-material ( $\delta$ ),

apresenta influência nos fatores  $N_\gamma$ ,  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_{ca}$  e  $P_2$ , embora estes fatores ocorram na interação solo ferramenta constantes do modelo.

Por fim, ambos fatores o índice de adesão solo-material ( $c_a$ ) e o ângulo de atrito solo-material ( $\delta$ ), foram retirados de todas as equações para uma nova aplicação e posterior comparação.

### 4.3 Comparação entre os resultados previstos e medidos experimentalmente

Neste segundo estudo dos modelos matemáticos, os mesmos foram aplicados na forma original. A simplificação do modelo ocorreu por meio da exclusão de dois fatores; índice de adesão solo-material ( $c_a$ ) e ângulo de atrito solo-material ( $\delta$ ). Inicialmente apresenta-se a caracterização das condições em que foram feitos ensaios selecionados da literatura. Posteriormente é apresentada novamente a comparação entre os resultados dos modelos originais, os modelos simplificados e os dados a campo utilizando o método gráfico.

#### 4.3.1 Caso: Bellé *et al.* (2014)

Bellé *et al.* (2014) realizaram um experimento utilizando a escarificação, em Latossolo-vermelho distrófico típico, em área agrícola cultivada com soja em rotação com aveia, adotando o sistema de plantio direto há 15 anos. A haste utilizada para o ensaio foi do formato parabólico com o auxílio de um disco de corte posicionado à frente do elemento descompactador, trabalhando a uma profundidade de 0,10 m e a distância de 0,60 m entre hastes.

Os dados referentes aos parâmetros de solo, ferramenta e a interação ferramenta-solo utilizados para a realização dos cálculos foram os seguintes: Teor de água igual a 0,16  $\text{Kg.kg}^{-1}$ ; textura do solo: areia grossa 47%; areia fina 9%; silte 9%; argila 30%.

A velocidade média de trabalho foi de 5,89  $\text{km.h}^{-1}$ ; densidade do solo ( $\gamma$ ) = 1,66  $\text{g.cm}^{-3}$ ; aceleração devido a gravidade ( $g$ ) = 9,81  $\text{m.s}^{-2}$ ; ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) = 23,50°; largura da ferramenta ( $w$ ) = 0,015 m; profundidade de trabalho ( $d$ ) = 0,25m; ângulo de atrito solo-material ( $\delta$ ) = 35,22°; ângulo de ataque ( $\alpha$ ) = 20°; índice de coesão do solo ( $c$ ) = 32,90 kPa; ângulo de ruptura do solo na frente à ferramenta

( $\beta$ ) = 33,25°; índice de adesão solo-material ( $c_a$ ) = 7,80 kPa. Os resultados dos valores de esforço de tração obtidos a campo e por meio dos modelos matemáticos são apresentados na Figura 22.

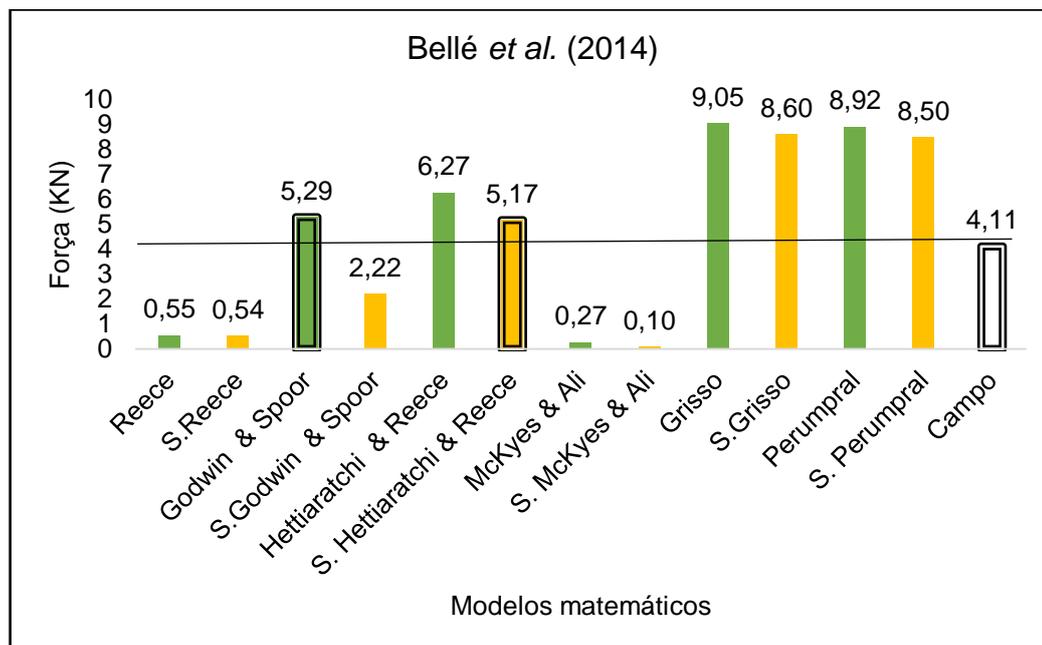


Figura 25 - Resultados de esforço de tração medidos a campo por Bellé *et al.* (2014) e calculados pelos modelos matemáticos originais e simplificados. Obs: Em verde: modelos originais; Em amarelo: modelos simplificados.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Os seis modelos matemáticos originais foram comparados conjuntamente com o modelo simplificado para cada uma das equações, utilizando-se como parâmetro base para análise da correção dos dados o valor de esforço de tração real obtido a campo por Bellé *et al.* (2014) que foi 4,11 kN. Destaca-se em verde os resultados dos modelos originais e em amarelo os resultados dos modelos simplificados.

De acordo com os resultados verificados na figura 20, observa-se que o modelo proposto por Hettiaratchi & Reece (1967) simplificado proporciona um valor de 5,17 kN para o esforço de tração, valor mais próximo ao de campo numa taxa de 26% acima deste. O modelo de Godwin & Spoor (1977), sem simplificação, proporcionou taxa de 29% acima do valor de campo com valor de 5,29 kN para o esforço de tração. Evidenciou-se dessa maneira que a simplificação além de permitir estimar a demanda de esforço de tração, consegue um melhor ajuste ao valor obtido em campo, neste caso o modelo de Hettiaratchi & Reece (1967) simplificado.

Realizando uma análise com relação a demanda de esforço de tração obtido por Bellé *et al.* (2014), 4,11 kN, verifica-se que este não foi muito diferente de outros resultados de ensaios, como aqueles obtidos por Machado & Trein no Planossolo a.T1

(2013) 3,17 kN e Machado & Trein a.T2 (2013) 3,70 kN, mesmo estes estudos tendo sido realizados em condições de manejos e tipos de solos diferentes, (Latossolo-vermelho com plantio direto e Planossolo com pastagem natural).

Ao analisar outros estudos na tentativa de estimar o esforço de tração de escarificadores encontra-se o trabalho realizado por Santos (2010), que comparou teorias de simulação, dados empíricos obtidos em condições reais a campo e o modelo ASAE D497.4. Avaliou o desempenho de um escarificador dotado de cinco hastes na profundidade de trabalho de 0,20m, observou a superestimativa por parte das teorias comparadas aos valores medidos experimentalmente para força de tração. O valor de esforço de tração medido experimentalmente foi de 22,31 kN (4,46 kN por haste) e o resultado obtido pela aplicação do modelo da ASAE foi de 16,34 kN (3,2 kN por haste 72%), subestimando o valor do esforço de tração obtido em condições reais de trabalho. Com isto, demonstra-se mais uma vez que mediante a utilização dos modelos matemáticos e a simplificação deles, é possível obter-se valores mais ajustados aos medidos a campo comparados com o modelo da ASAE D497.4 e as teorias de simulação.

#### 4.3.2 Caso: Santos *et al.* (2015)

O trabalho de Santos *et al.* (2015) foi executado utilizando um escarificador, em Latossolo-vermelho escuro, em uma área de relevo plano, roçada periodicamente. Nos ensaios os autores utilizaram o equipamento com 5 hastes semirrígidas, tipo cinzel, com ponta dupla em 3 espaçamentos, os quais variaram entre 0,18 m; 0,30 m e 0,35m. Os dados referentes aos parâmetros de solo, ferramenta e a interação ferramenta-solo utilizados para a realização dos cálculos foram os seguintes: Teor de água = 0,22 Kg.kg<sup>-1</sup>; textura de solo: areia grossa 9,83%; areia fina 13,67 %; areia muito fina 11,46 %; silte 6 %; argila 59,04 %, velocidade de 4,31 km.h<sup>-1</sup>; densidade do solo ( $\gamma$ ) = 1,41 g.cm<sup>-3</sup>; aceleração devido à gravidade ( $g$ ) = 9,81 m.s<sup>-2</sup>; ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) = 20°; largura da ferramenta ( $w$ ) = 0,076 m; profundidade de trabalho ( $d$ ) = 0,20 m; ângulo de atrito solo-material ( $\delta$ ) = 34,26°; ângulo de ataque ( $\alpha$ ) = 23°; índice de coesão do solo ( $c$ ) = 32,00 kPa; ângulo de ruptura do solo na frente da ferramenta ( $\beta$ ) = 35°; índice de adesão solo-material ( $c_a$ ) = 5,40 kPa. Os resultados dos valores de esforço de tração obtidos a campo e por meio dos modelos matemáticos são apresentados na Figura 23.

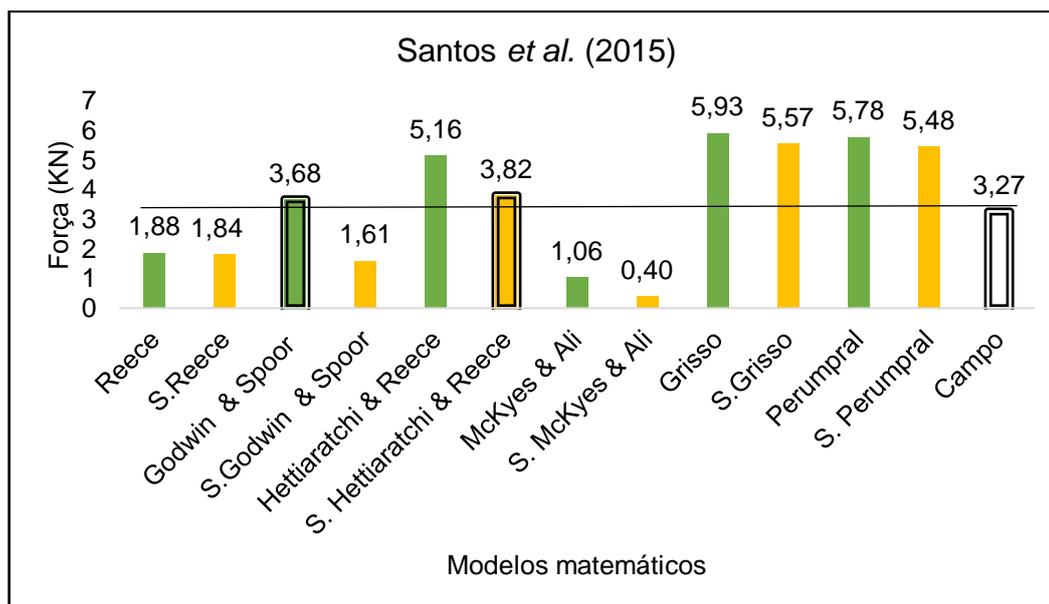


Figura 26 - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Santos *et al.* (2015) entre os calculados pelos modelos matemáticos e os simplificados. Obs: Em verde: modelos originais; Em amarelo: modelos simplificados.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Os dados obtidos para os seis modelos matemáticos na forma original e simplificada foram comparados com o valor de esforço de tração real, obtido em campo, por estes autores. Destaca-se em verde os resultados dos modelos originais e na amarelo os resultados dos modelos simplificados.

Dentre os resultados obtidos, verificou-se que a aplicação do modelo proposto por Godwin & Spoor (1977), sem simplificação foi o que proporcionou o valor mais aproximado ao de campo, cerca de 12% a mais. Outro modelo que proporcionou resultado semelhante ao dado de campo foi o de Hettiaratchi & Reece (1967) simplificado, o qual foi cerca de 16% superior ao resultado de campo.

Analisando-se o resultado de esforço e tração obtido por Santos *et al.* (2015), o qual foi de 3,27 kN num Latossolo-vermelho escuro; verifica-se que este não vem a ser muito diferente do resultado obtido por Bellé *et al.* (2014), 4,11 kN no Latossolo-vermelho distrófico típico. Machado & Trein a.T2 (2013), obtiveram 3,70 kN de esforço de tração trabalhando num Planossolo. Mesmo que estes trabalhos tenham sido realizados em condições de manejos e tipos de solos diferentes, verifica-se proximidade entre os resultados obtidos. Desta forma observa-se que um mesmo modelo matemático, na integra ou de forma simplificada, pode ser utilizado para estimar-se a demanda de esforço de tração em campo. No presente caso os modelos

de Godwin & Spoor (1977), sem simplificação e o modelo de Hettiaratchi & Reece (1967) simplificado, foram os que proporcionaram os melhores ajustes.

#### 4.3.3 Caso: Machado & Trein (2013A)

##### **Tratamento 1**

Neste estudo os autores utilizaram uma haste de escarificador em um Planossolo, com pastagem natural que não vinha sendo trabalhada há cerca de dez anos, sendo a mesma roçada antes da realização dos ensaios. A haste utilizada para o ensaio foi do formato parabólico com ponteira estreita.

Os dados referentes aos parâmetros de solo, ferramenta e a interação ferramenta-solo utilizados para a realização dos cálculos foram os seguintes: Teor de água =  $0,12 \text{ Kg.kg}^{-1}$ ; textura do solo: quantidade de areia 62%; silte 26%; argila 11 %, velocidade =  $3,00 \text{ km.h}^{-1}$ ; densidade do solo ( $\gamma$ ) =  $1,51 \text{ g.cm}^{-3}$ ; aceleração devido à gravidade ( $g$ ) =  $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ; ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) =  $33,34^\circ$ ; largura da ferramenta ( $w$ ) =  $0,075 \text{ m}$ ; profundidade de trabalho ( $d$ ) =  $0,19 \text{ m}$ ; ângulo de atrito solo-material ( $\delta$ ) =  $32,11^\circ$ ; ângulo de ataque ( $\alpha$ ) =  $17,30^\circ$ ; índice de coesão do solo ( $c$ ) =  $31,65 \text{ kPa}$ ; ângulo de ruptura do solo na frente da ferramenta ( $\beta$ ) =  $28,33^\circ$ ; índice de adesão solo-material ( $c_a$ ) =  $3,28 \text{ kPa}$ . Os resultados dos valores de esforço de tração obtidos a campo e por meio dos modelos matemáticos são apresentados na Figura 24.

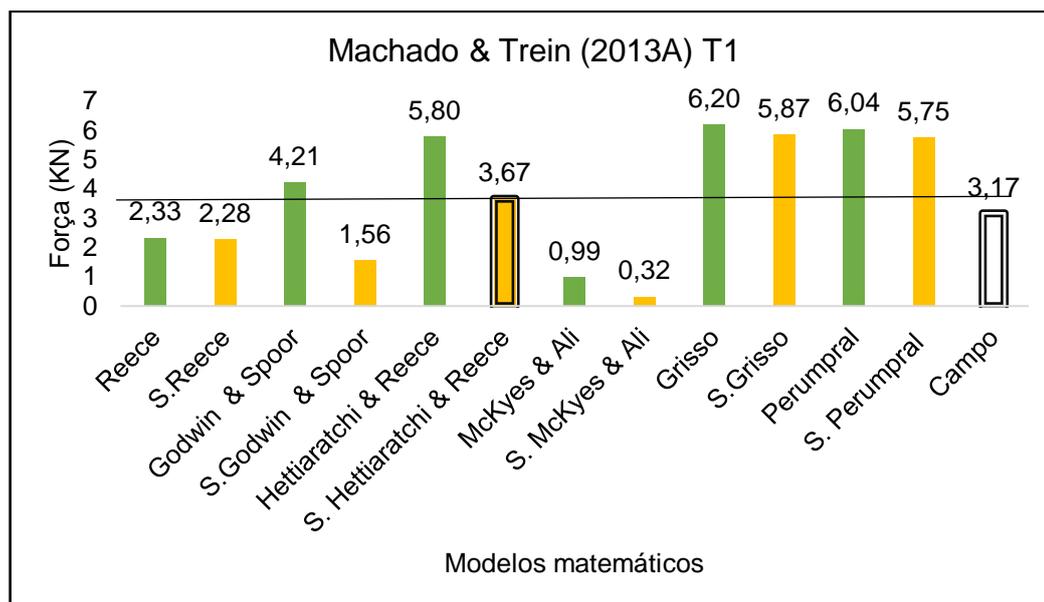


Figura 27 - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Machado & Trein (2013) entre os calculados pelos modelos matemáticos e os simplificados. Obs: Em verde: modelos originais; Em amarelo: modelos simplificados.  
Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Os seis modelos, com e sem simplificação, foram comparados ao valor de esforço de tração real de campo. Destaca-se em verde os resultados dos modelos originais e em amarelo os resultados dos modelos simplificados.

Dentre os resultados obtidos verifica-se que o modelo proposto por Hettiaratchi & Reece (1967), simplificado, foi o que proporcionou o valor mais aproximado àquele obtido a campo, proporcionando cerca de 16% a mais de esforço de tração.

Machado & Trein (2013), observaram que os modelos propostos por Hettiaratchi & Reece (1967) e Reece (1965) não apresentaram diferenças significativas, ao nível de 1% de significância, com relação ao valor medido a campo. O mesmo serve como parâmetro de validação dos resultados deste trabalho, onde também se observou os mesmos resultados quando da aplicação do modelo de Hettiaratchi & Reece (1967) simplificação.

Comparando os resultados de esforço de tração obtidos por Machado & Trein (2013), no tratamento 1 que foi de 3,17 kN e no tratamento 2 que foi de 3,70 kN ao de Bellé *et al.* (2014) que foi de 4,11 kN, verifica-se que mesmo os ensaios tendo sido realizados em condições de manejo e tipos de solos diferentes, são bastante semelhantes. Tal fato favorece a utilização de um mesmo modelo matemático para estimar a demanda esforço de tração, sendo que no presente caso o modelo de Hettiaratchi & Reece (1967) simplificado, foi o que proporcionou melhor ajuste.

## Tratamento 2

Neste trabalho os autores utilizaram o mesmo escarificador anteriormente descrito, no mesmo local e condições, sendo a única diferença a profundidade de trabalho.

Os dados referentes aos parâmetros de solo, ferramenta e a interação ferramenta-solo usados para a realização dos cálculos foram os seguintes: Teor de água =  $0,12 \text{ Kg.kg}^{-1}$ ; textura do solo: quantidade de areia 62%; silte 26%; argila 11 %, velocidade de trabalho =  $3,00 \text{ km.h}^{-1}$ ; densidade do solo ( $\gamma$ ) =  $1,51 \text{ g.cm}^{-3}$ ; aceleração devido à gravidade ( $g$ ) =  $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ; ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) =  $33,34^\circ$ ; largura da ferramenta ( $w$ ) =  $0,075 \text{ m}$ ; profundidade de trabalho ( $d$ ) =  $0,21 \text{ m}$ ; ângulo de atrito solo-material ( $\delta$ ) =  $32,11^\circ$ ; ângulo de ataque ( $\alpha$ ) =  $17,30^\circ$ ; índice de coesão do solo ( $c$ ) =  $31,65 \text{ kPa}$ ; ângulo de ruptura do solo na frente da ferramenta ( $\beta$ ) =  $28,33^\circ$ ; índice de adesão solo-material ( $c_a$ ) =  $3,28 \text{ kPa}$ . O valor de esforço de tração obtido a campo e por meio da utilização dos modelos matemáticos são apresentados na Figura 25.

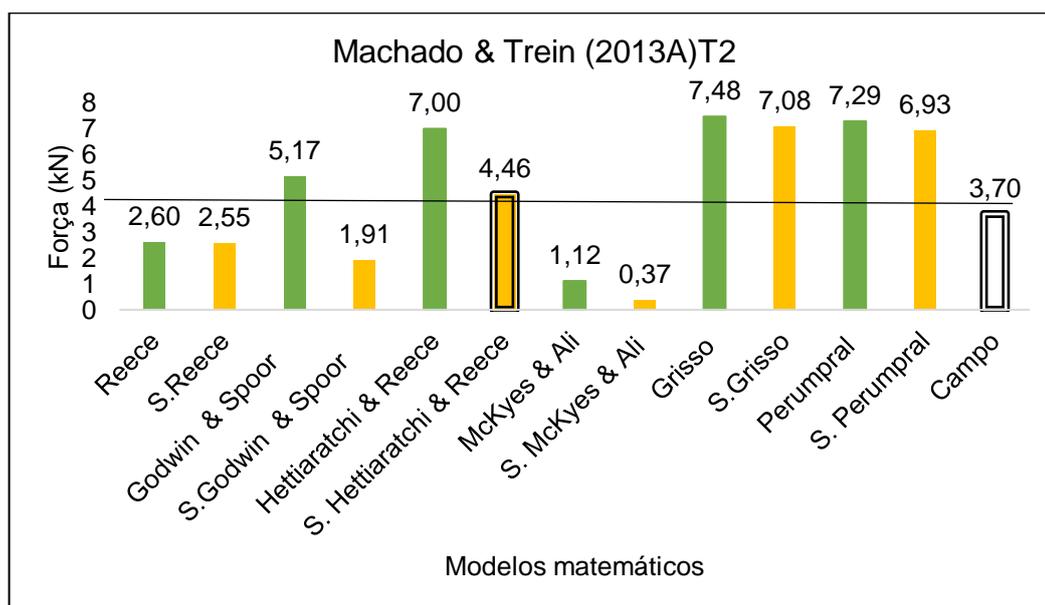


Figura 28 - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Machado & Trein (2013) entre os calculados pelos modelos matemáticos e os simplificados. Obs: Em verde: modelos originais; Em amarelo: modelos simplificados.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Os resultados obtidos pelo cálculo com a utilização dos seis modelos matemáticos na sua forma original e foram comparados ao valor do esforço de tração real obtido a campo.

Ao comparar-se os valores obtidos pela utilização dos modelos ao resultado obtido a campo por estes autores, observa-se que o modelo proposto de Hettiaratchi & Reece (1967) simplificado, foi o que proporcionou o valor mais próximo aquele obtido a campo, num acréscimo de cerca de 20% do valor, em condições reais de trabalho.

Machado & Trein (2013), neste trabalho, verificaram que os resultados proporcionados pelos modelos propostos por Reece (1965), Hettiaratchi & Reece (1977) e Godwin & Spoor (1977), não apresentaram diferenças significativas, ao nível de 1% de significância, com relação ao valor medido a campo.

Realizando uma análise da demanda de esforço de tração determinado por Machado & Trein a T2 (2013), 3,70 kN, verifica-se que esta não foi muito diferente do resultado do ensaio realizado por Bellé *et al.* (2014), 4,11 kN e Machado & Trein a.T1 (2013), 3,17kN, mesmo estes tendo sido realizados em condições de manejo e tipos de solos diferentes. Desta forma verifica-se, como nos casos anteriores, que a utilização de um modelo matemático permite estimar adequadamente a demanda de esforço de tração proporcionando dados próximos àqueles obtidos em campo. Neste caso o modelo de Hettiaratchi & Reece (1977) simplificado, foi o que melhor se adequou.

#### 4.3.4 Caso: Machado & Trein (2013B)

### Tratamento 1

Neste trabalho os autores utilizaram a mesma haste de escarificador descrita anteriormente, mas agora em outra localização de solo, ou seja, num Argissolo vermelho em uma área com pastagem anual, cuja vegetação predominante vinha a ser trevo e azevém. Da mesma forma que no caso anterior a área foi roçada antes da realização dos ensaios.

Os dados referentes aos parâmetros de solo, ferramenta e a interação ferramenta-solo utilizados para a realização dos cálculos foram os seguintes: Teor de água = 0,13 Kg.kg<sup>-1</sup>; textura do solo: quantidade de areia 67%; silte 15%; argila 17%, velocidade de trabalho = 3,00 km.h<sup>-1</sup>; densidade do solo ( $\gamma$ ) = 1,57 g.cm<sup>-3</sup>; aceleração devido à gravidade ( $g$ ) = 9,81 m.s<sup>-1</sup>; ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) = 33,19°; largura da ferramenta ( $w$ ) = 0,075m; profundidade média de trabalho ( $d$ ) = 0,22 m;

ângulo de atrito solo-material ( $\delta$ ) = 30,31°; ângulo de ataque da ponteira ( $\alpha$ ) = 17,30°; índice de coesão do solo ( $c$ ) = 26,40 kPa; ângulo de ruptura do solo na frente da ferramenta ( $\beta$ ) = 28,41°; índice de adesão solo-material ( $c_a$ ) = 6,97 kPa. O resultado do valor do esforço de tração obtido a campo e por meio dos modelos matemáticos são apresentados na Figura 26.

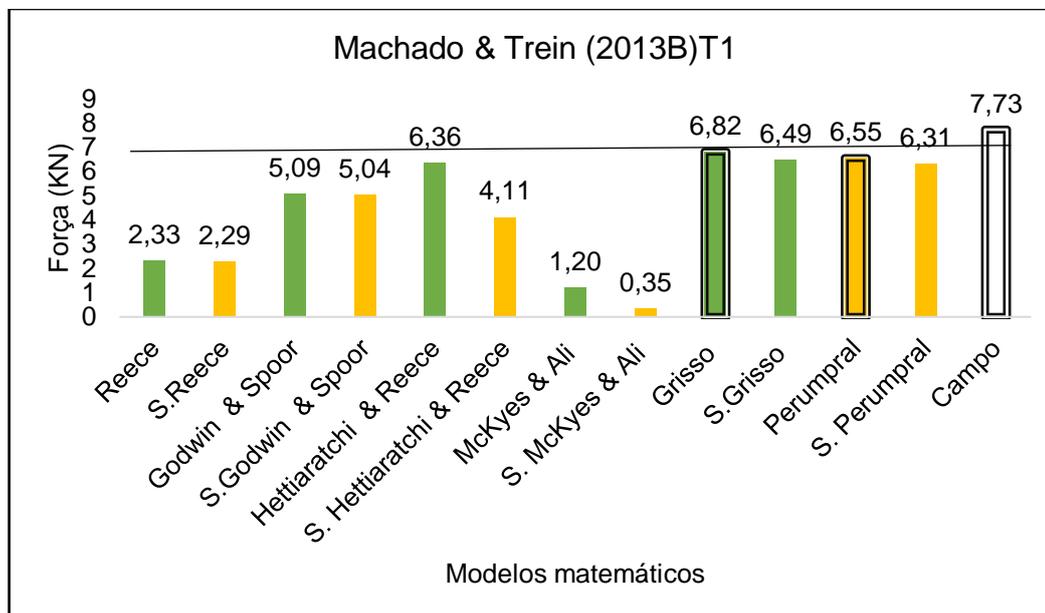


Figura 29 - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Machado & Trein (2013) entre os calculados pelos modelos matemáticos e os simplificados. Obs: Em verde: modelos originais; Em amarelo: modelos simplificados.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Da mesma forma que nos casos anteriores os seis modelos matemáticos foram comparados em sua forma original e com simplificação, utilizando-se como parâmetro de ajuste o valor de esforço de tração real de campo. Destaca-se em verde os resultados dos modelos originais e em amarelo os resultados dos modelos simplificados.

Dentre os resultados se destaca o modelo de Grisso *et al.* (1980), sem simplificação, que obteve o valor mais aproximado ao de campo, cerca de 12% a menos, seguido pelo modelo de Perumpral *et al.* (1983) sem simplificação que proporcionou um valor a menor em relação ao de campo de 15%.

Neste trabalho Machado & Trein (2013), obtiveram o resultado mais próximo ao de campo por meio da utilização dos modelos propostos por Reece (1965) e Hettiaratchi & Reece (1967), os quais não apresentaram diferenças significativas, ao nível de 1% de significância, com relação ao valor medido a campo, o qual foi diferente ao obtido neste trabalho.

## Tratamento 2

A condição de trabalho do escarificador foi a mesma do Tratamento 1, ou seja, em uma área com pastagem anual, Argissolo-vermelho, com vegetação predominante de trevo e azevém, sendo roçada antes da realização dos ensaios, tendo sido utilizada a mesma haste e ponteira dos casos anteriores.

Os dados referentes aos parâmetros de solo, ferramenta e a interação ferramenta-solo usados para a realização dos cálculos foram os seguintes: Teor de água =  $0,12 \text{ Kg.kg}^{-1}$ ; textura do solo: quantidade de areia 67%; silte 15%; argila 17%, velocidade =  $3,00 \text{ km.h}^{-1}$ ; densidade do solo ( $\gamma$ ) =  $1,57 \text{ g.cm}^{-3}$ ; aceleração devido à gravidade ( $g$ ) =  $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ; ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) =  $33,19^\circ$ ; largura da ferramenta ( $w$ ) =  $0,075 \text{ m}$ ; profundidade de trabalho ( $d$ ) =  $0,19 \text{ m}$ ; Ângulo de atrito solo-metal ( $\delta$ ) =  $30,31^\circ$ ; ângulo de ataque da ponteira ( $\alpha$ ) =  $17,30^\circ$ ; índice de coesão do solo ( $c$ ) =  $26,40 \text{ kPa}$ ; ângulo de ruptura do solo na frente da ferramenta ( $\beta$ ) =  $28,41^\circ$ ; índice de adesão solo-material ( $c_a$ ) =  $6,97 \text{ kPa}$ . Os resultados dos valores de esforço de tração obtidos a campo e por meio dos modelos matemáticos são apresentados na Figura 27.

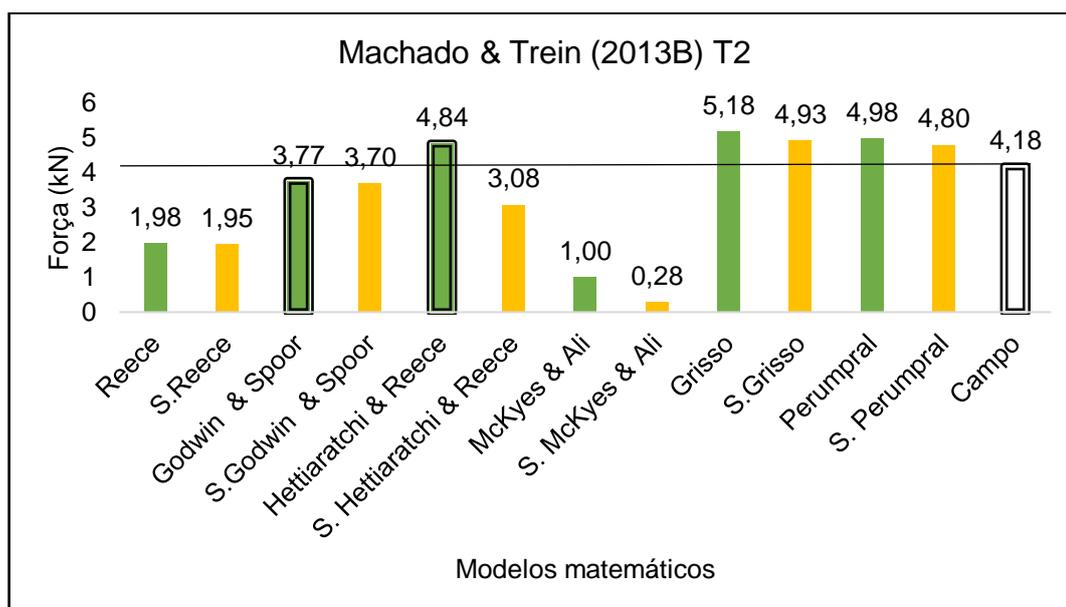


Figura 30 - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Machado & Trein (2013) entre os calculados pelos modelos matemáticos e os modelos simplificados. Obs.: Em verde: modelos originais; Em amarelo: modelos simplificados. Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Da mesma forma que nos casos anteriores os seis modelos matemáticos em seu formato original e simplificado foram comparados ao valor de esforço de tração

real obtido em campo, pelos referidos autores. Destaca-se em verde os resultados dos modelos originais e em amarelo os resultados dos modelos simplificados.

Dentre os resultados verifica-se que o modelo proposto por Godwin Spoor (1977) sem simplificação e de Hettiaratchi & Reece (1967) também sem simplificação foram os que proporcionaram resultados mais próximos aquele obtido em campo. Para o primeiro modelo citado, Godwin Spoor (1977), obteve-se um resultado 10% inferior ao campo, enquanto para o segundo modelo citado, Hettiaratchi & Reece (1967), o valor obtido foi de 16% acima daquele obtido a campo pelos autores citados.

Machado & Trein b.T2 (2013), neste trabalho, verificaram que o valor obtido utilizando o modelo proposto por Reece (1965) e Hettiaratchi & Reece (1967), não apresentou diferença significativa, ao nível de 1% de significância, com relação ao valor medido a campo: tal fato corrobora o resultado obtido neste trabalho.

#### 4.3.5 Caso: Rosa *et al.* (2011)

Nesta pesquisa os autores utilizaram um subsolador em Argissolo vermelho, num trabalho de escarificação, onde a área se encontrava em condição de semeadura direta há 13 anos. No momento do ensaio a área apresentava-se com restos culturais de soja sobre a superfície.

Os dados referentes aos parâmetros de solo, ferramenta e a interação ferramenta-solo utilizados para a realização dos cálculos foram os seguintes: teor de água = 0,29 Kg.kg<sup>-1</sup>; textura do solo: quantidade de areia grossa 8,29%; areia fina 22,91%; silte 23,50%; argila 45,31%, velocidade de trabalho do implemento durante a realização dos ensaios = 4,3 km.h<sup>-1</sup>; densidade do solo ( $\gamma$ ) = 1,71 g.cm<sup>-3</sup>; aceleração devido à gravidade ( $g$ ) = 9,81 m.s<sup>-2</sup>; ângulo de atrito solo-material ( $\delta$ ) = 31,80; largura da ferramenta ( $w$ ) = 0,080 m; profundidade de trabalho ( $d$ ) = 0,23 m; ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) = 39,63°; ângulo de ataque da ponteira ( $\alpha$ ) = 20,00°; índice de coesão do solo ( $c$ ) = 32,20 kPa; ângulo de ruptura do solo à frente da ferramenta ( $\beta$ ) = 25,20°; índice de adesão solo-material ( $c_a$ ) = 6,30 kPa. Os resultados dos valores de esforço de tração obtidos a campo e por meio dos modelos matemáticos são apresentados na Figura 28.

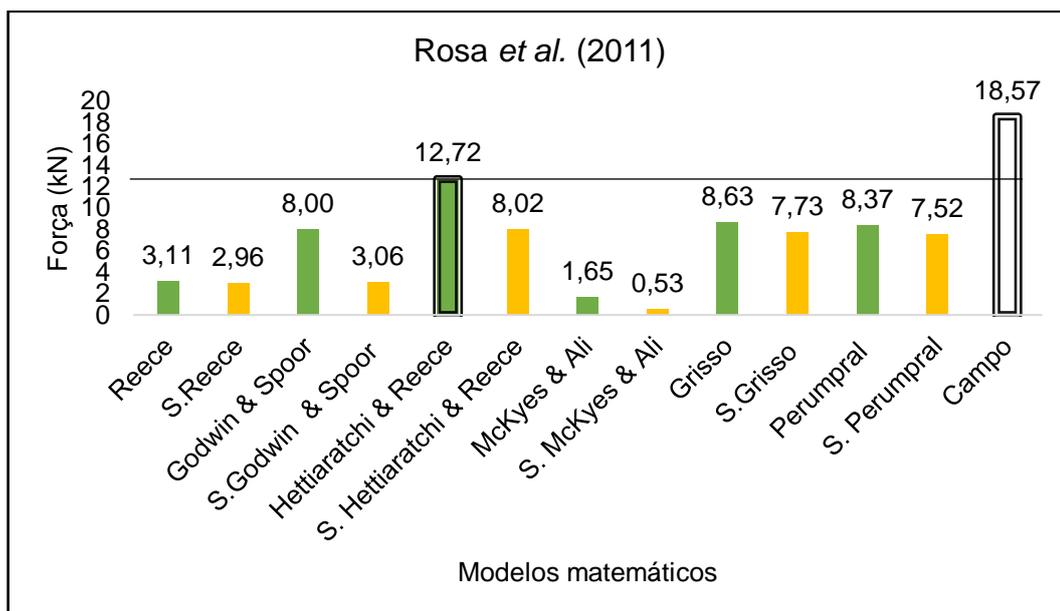


Figura 31 - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Rosa *et al.* (2011) entre os calculados pelos modelos matemáticos e os modelos simplificados. Obs: Em verde: modelos originais; Em amarelo: modelos simplificados.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Os resultados obtidos pela utilização dos seis modelos matemáticos de forma original e simplificada foram comparados ao valor de esforço de tração real de campo. Destaca-se em verde os resultados dos modelos originais e em amarelo os resultados dos modelos simplificados.

Observa-se que o modelo proposto por Hettiaratchi & Reece (1967) sem simplificação foi o que apresentou o valor mais próximo a aquele encontrado no campo proporcionando um resultado de cerca de 32% inferior ao de campo.

Dada a diferença entre os valores de esforço de tração medido a campo e os resultados dos modelos matemáticos, na forma original e simplificada, bem como a densidade e umidade apresentada por este solo quando foi realizado o ensaio, pode-se deduzir que o mesmo se encontrava compactado e com alto teor de água no solo. Tal fato concorda com o encontrado na literatura, onde Manuwa & Ademosun (2007) determinaram um aumento significativo na força de tração na medida em que os teores e umidade e índices de cone aumentaram (de 11 para 22,5%) em solo franco-argiloso. Isto demonstra a importância considerar os parâmetros ideais para a realização de trabalhos de mobilização do solo para não incorrer no consumo de energia e esforço de tração desnecessários.

#### 4.3.6 Caso: Machado *et al.* (2015)

Neste trabalho os autores utilizaram um subsolador em Nitossolo vermelho distroférico, a profundidade de trabalho foi relativa à uma escarificação (0,30 m). O local de ensaio inicialmente encontrava-se compactado devido a sua utilização como área para ensaio de máquinas. Para estabelecer uma condição homogênea a área foi mobilizada previamente com subsolador a 0,40 m e em seguida feita uma passada com rolo compactador para simular uma área com índice de cone abaixo de 2 MPa, de forma como se um trator estivesse operando no local sem a necessidade de subsolagem. O subsolador apresentava discos verticais para o corte da palha na superfície, com distância entre hastes de 0,40 m. A parcela que não contava com restos vegetais no momento do ensaio.

Os dados referentes aos parâmetros de solo, ferramenta e a interação ferramenta-solo usados para a realização dos cálculos foram os seguintes: Teor de água = 0,20 Kg.kg<sup>-1</sup>; quantidade de areia 17,4%; silte 31,40%; argila 51,20%, velocidade = 4,51 km.h<sup>-1</sup>; densidade do solo ( $\gamma$ ) = 1,34 g/cm<sup>3</sup>; aceleração devido à gravidade ( $g$ ) = 9,81 m.s<sup>2</sup>; ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) = 26,70°; largura da ferramenta ( $w$ ) = 0,060 m; profundidade de trabalho ( $d$ ) = 0,35 m; ângulo de atrito solo-material ( $\delta$ ) = 39,00°; ângulo de ataque da ponteira ( $\alpha$ ) = 24,00°; índice de coesão do solo ( $C$ ) = 45,00 kPa; ângulo de ruptura do solo na frente da ferramenta ( $\beta$ ) = 31,65°; índice de adesão solo-material ( $c_a$ ) = 8,82kPa. Os resultados dos valores de esforço de tração obtidos a campo e por meio dos modelos matemáticos são apresentados na Figura 29.

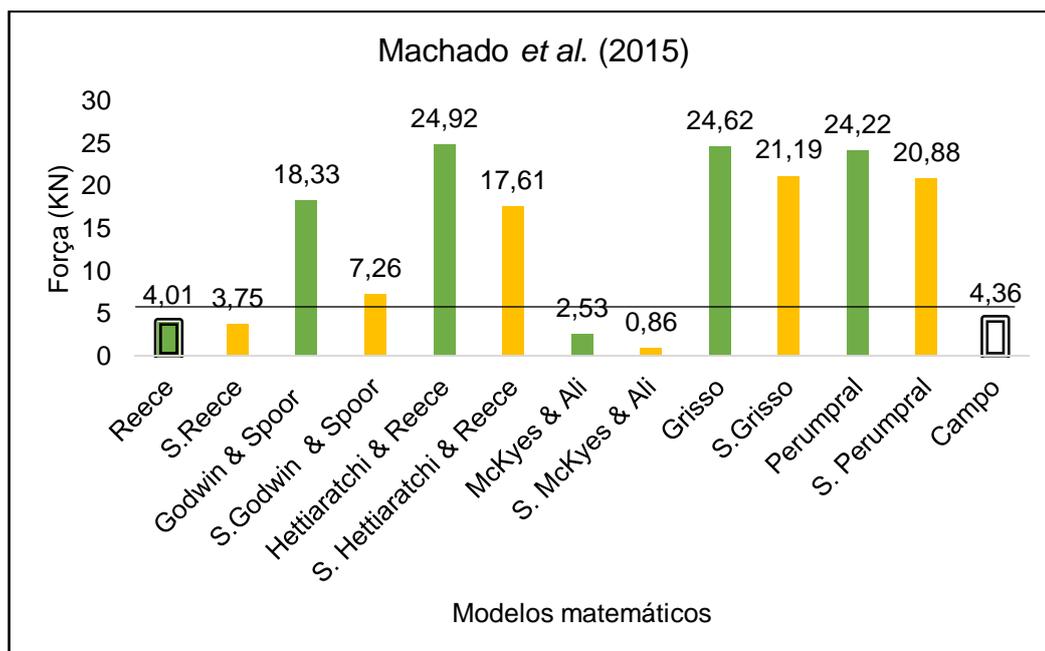


Figura 32 - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Machado *et al.* (2015) entre os calculados pelos modelos matemáticos e os modelos simplificados. Obs.: Em verde: modelos originais; Em amarelo: modelos simplificados.  
Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Da mesma forma que realizado anteriormente os resultados obtidos pela utilização dos seis modelos em sua forma original e simplificada foram comparados ao valor de esforço de tração real de campo. Destaca-se em verde os resultados dos modelos originais e em amarelo os resultados dos modelos simplificados.

Dentre os resultados obtidos destaca-se o modelo de Reece (1965) sem simplificação que proporcionou o valor mais aproximado àquele obtido em campo, cerca de 8% inferior a este.

Analisando-se a figura 27, pode-se determinar que a maioria dos resultados de esforço de tração, tanto por parte das equações originais quanto por parte dos modelos simplificados superestimaram o esforço de tração, com a exceção dos modelos de Reece (1965) original e simplificado e do modelo de McKyes & Ali (1977) original e simplificado. Esse fato pode ser explicado pelos valores elevados do índice de coesão do solo,  $C = 45,00$  kPa, e índice de adesão solo-material,  $c_a = 8,82$  kPa, característico deste tipo de solo, sendo estes superiores aos demais tipos de solos estudados. No entanto, o modelo de Reece (1965) não sofreu influência devido ao fato de não requerer esses dados na sua concepção.

A demanda de esforço de tração obtido por Machado *et al.* (2015), que foi de 4,36 kN, não foi muito diferente do resultado do ensaio realizado por Machado & Trein *a.T1* (2013), 3,17 kN, mesmo estes trabalhos tendo sido realizados em condições de

manejo e tipos de solos diferentes. Desta forma, de acordo com as observações anteriores, facilita-se a utilização de modelos matemáticos na estimativa da demanda de esforço de tração em condições de campo. Neste caso o modelo de Reece (1965) simplificado, foi o mais adequado.

#### 4.3.7 Caso: Salvador *et al.* (2008)

Da mesma forma que no caso anterior estes autores utilizaram um subsolador de arrasto em um Nitossolo vermelho distriférico, em condição de escarificação, ou seja, 0,30 m de profundidade de trabalho. A área onde foram executados os trabalhos havia sido cultivada por vários anos com a cultura de milho, ininterruptamente em sistema de preparo do solo convencional. O subsolador utilizado possuía hastes parabólicas com ponteiros aladas, espaçadas de 0,70 m.

Os dados referentes aos parâmetros de solo, ferramenta e a interação ferramenta-solo usados para a realização dos cálculos foram os seguintes: teor de água =  $0,26 \text{ Kg.kg}^{-1}$ ; textura do solo: quantidade de areia 17,4%; silte 31,40%; argila 51,20%, velocidade de trabalho =  $2,14 \text{ km.h}^{-1}$ ; densidade do solo ( $\gamma$ ) =  $1,40 \text{ g.cm}^{-3}$ ; aceleração devido à gravidade ( $g$ ) =  $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ; ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) =  $26,70^\circ$ ; largura da ferramenta ( $w$ ) = 0,050 m; profundidade de trabalho ( $d$ ) = 0,30 m; ângulo de atrito solo-material ( $\delta$ ) =  $39,00^\circ$ ; ângulo de ataque da ponteira ( $\alpha$ ) =  $20,00^\circ$ ; índice de coesão do solo ( $c$ ) = 45,00 kPa; ângulo de ruptura do solo à frente da ferramenta ( $\beta$ ) =  $31,65^\circ$ ; índice de adesão solo-material ( $c_a$ ) = 8,82 kPa. Os resultados dos valores de esforço de tração obtidos a campo e por meio dos modelos matemáticos são apresentados na Figura 30.

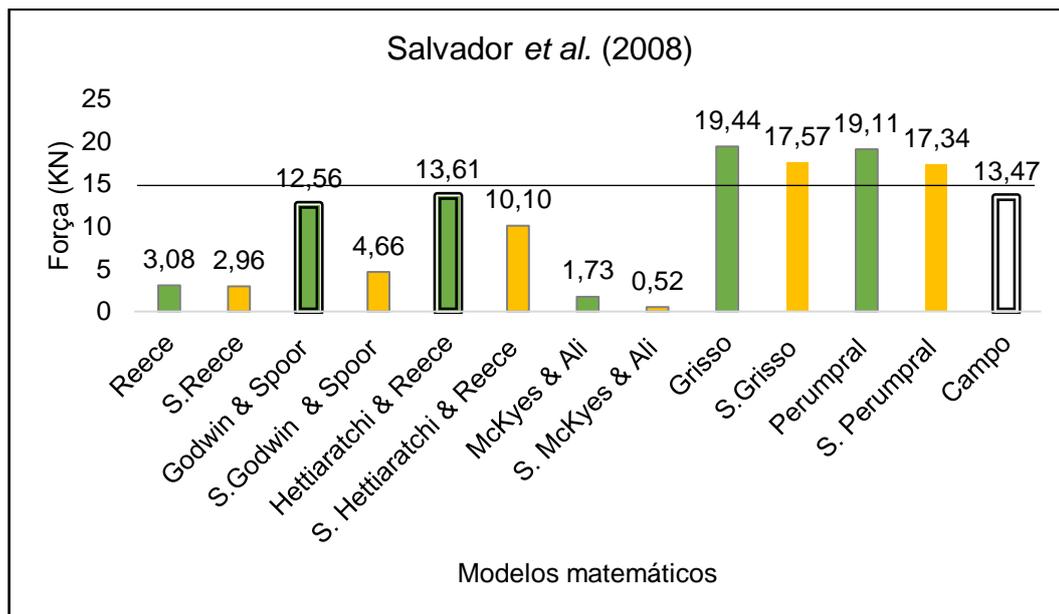


Figura 33 - Comparação dos resultados de esforço de tração medidos a campo por Salvador *et al.* (2008) entre os calculados pelos modelos matemáticos e os modelos simplificados. Obs.: Em verde: modelos originais; Em amarelo: modelos simplificados.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Os dados obtidos pela utilização dos seis modelos matemáticos de forma original e simplificada foram comparados ao valor de esforço de tração real de campo, destacado em verde o resultado obtido pela utilização do modelo em sua forma original e em amarelo o resultado obtido pela utilização dos modelos em sua forma simplificada.

Dentre os resultados obtidos destaca-se aqueles obtidos com a utilização do modelo de Hettiaratchi & Reece (1967) em sua forma original, apenas 1% acima do valor de campo, seguido pelo modelo original proposto por Godwin & Spoor (1977) que proporcionou um valor 7% menor do que aquele obtido em campo.

Analisando-se a demanda de esforço de tração elevado obtido por Salvador *et al.* (2008), 13,47 kN, nas condições onde foi realizado o ensaio, pode-se deduzir que o solo se encontrava acima do estado ideal para sua mobilização, ou seja, friabilidade. Isto comprova-se com os dados de Manuwa & Ademosun (2007), os quais determinaram que na medida em que os teores e umidade e índices de cone aumentaram (de 11,0 para 22,5%) ocorre um aumento significativo no esforço de tração em solo franco-argiloso. No entanto, mesmo com os valores de esforço de tração elevados, o modelo matemático de Hettiaratchi & Reece (1967) original proporcionou valores dentro dos parâmetros aceitáveis e ajustados com relação aos valores medidos a campo.

Cabe ressaltar, que ao comparar-se os resultados obtidos na figura 27, com os da figura 28, a maioria dos cálculos de esforço de tração obtidos pela utilização das equações originais e simplificadas proporcionaram valores superestimados, com a exceção dos modelos de Reece (1965) original e simplificado e do modelo de McKyes & Ali (1977) original e simplificado. Estes modelos são influenciados pelos valores elevados do índice de coesão do solo  $C = 45,00$  kPa e índice de adesão solo-material  $c_a = 8,82$  kPa característicos deste tipo de solo. Desta maneira comprova-se que os fatores que influenciam a mobilização do solo encontrados na literatura (SANCHEZ-GIRÒN *et al.* 2005; CONTE, 2008), quais sejam; a geometria, a natureza e a condição do solo no momento da realização do ensaio a campo, assim como o estado de umidade e/ou compactação podem apresentar influência sobre a demanda do esforço de tração por haste.

Por outro lado, Klaver *et al.* (2013) mediante um programa computacional para calcular a potência requerida de máquinas e implementos agrícolas que se baseia na Norma ASAE D497.4, compararam os resultados obtidos por Salvador *et al.* (2008) e pelo programa, obtiveram demanda de potência na barra de tração, dentro do limite de aceitação da Norma ASAE D497.4, que foi de 21,01 kW, para 23,80 kW para 3 hastes (11,89 kN por haste e 13,47 kN). Nesse sentido nota-se que o resultado obtido pela utilização do modelo matemático proposto por Hettiaratchi & Reece (1967) proporcionou o valor mais aproximado ao de campo com 13,61 kN. Cabe ressaltar que a principal limitação do modelo baseado na Norma ASAE é que se baseia em variáveis de características de solo e ferramentas Norte-Americanas, entretanto, os modelos matemáticos permitem a utilização destas variáveis obtidas localmente.

#### 4.4 Análises dos resultados das comparações dos modelos

As diferenças encontradas entre os resultados previstos pelos modelos matemáticos simplificados e os modelos matemáticos originais e o comparativo do esforço de tração obtido a campo, estão apresentadas no quadro 2 do anexo.

Na figura 31, apresenta-se a interpretação dos resultados da comparação entre os modelos matemáticos originais, a segunda simplificação e sua aproximação com os resultados medidos a campo, destacado em verde o resultado obtido pela utilização do modelo em sua forma original e em amarelo o resultado obtido pela utilização dos modelos em sua forma simplificada.

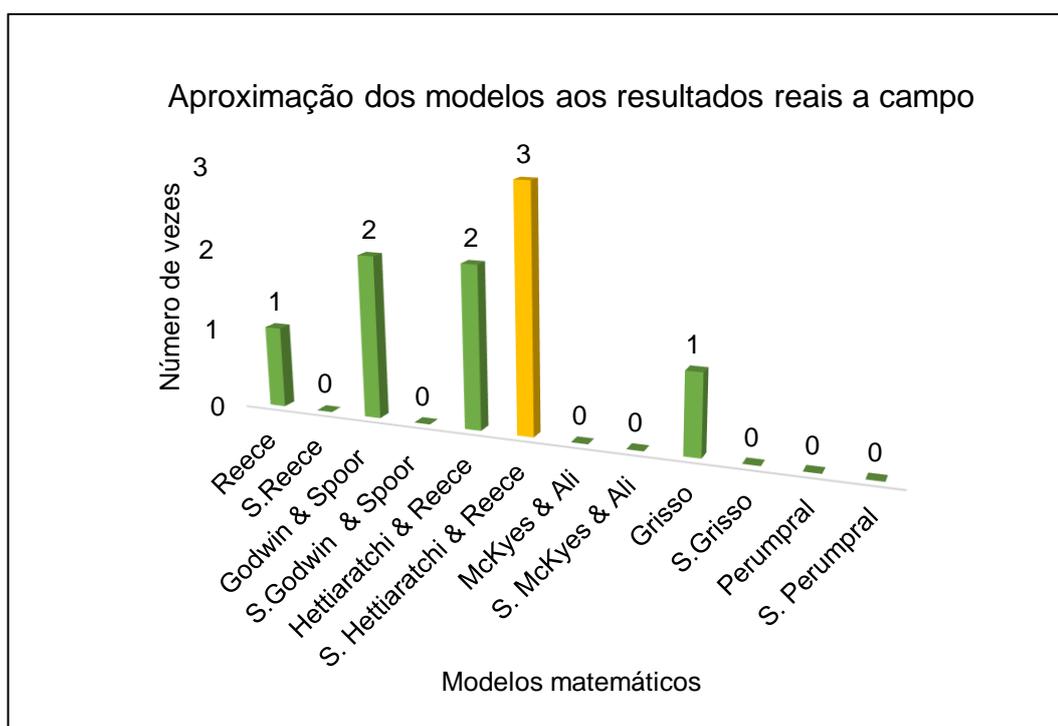


Figura 34 - Síntese das comparações entre os modelos matemáticos originais e os modelos simplificados e a quantidade de vezes que ficaram mais próximos aos dados de campo. Em verde os modelos originais; Em amarelo os modelos simplificados.  
Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Analisando-se a figura 31, verifica-se nesta segunda simplificação, que o modelo de Hettiaratchi & Reece (1967) simplificado foi o que se aproximou na maior quantidade de vezes aos resultados reais obtidos a campo com um total de 3 vezes entre todos os casos analisados. Assim como no formato original ficou próximo em duas vezes o modelo original de Hettiaratchi & Reece (1967), junto com o modelo proposto por Godwin & Spoor (1977).

Comparando os resultados pela utilização dos modelos matemáticos com aqueles obtidos por Machado & Trein (2013), verifica-se que os melhores ajustes se deram com os modelos propostos por Reece (1965) junto com os modelos de Hettiaratchi & Reece (1967) e Godwin & Spoor (1977). Este fato se registrou na mesma proporção neste estudo com os modelos de Hettiaratchi & Reece e Godwin & Spoor.

A mesma resposta foi registrada com os modelos matemáticos propostos por McKyes & Ali (1977) e Perumpral et al. (1983) o primeiro com os menores valores de esforço de tração e o segundo por superestimar o esforço de tração na totalidade dos casos, o que também foi identificado por Machado & Trein (2013).

Dada a semelhança com relação aos resultados de campo obtidos tanto pela utilização do modelo de Hettiaratchi & Reece (1967) simplificado e original, definiu-se a escolha do modelo simplificado para ser inserido no aplicativo móvel.

Tal fato deve-se a possibilidade que o mesmo oferece em realizar o cálculo de esforço de tração com menor complexidade, possibilitando um resultado semelhante ao modelo original e aqueles obtidos em campo. Dessa maneira, o modelo de Hettiaratchi & Reece, equação 14, simplificado, foi o escolhido para utilização no aplicativo móvel de acordo com o que se tem na equação 60:

$$H = (\gamma * g * d^2 * N_{\gamma} + c * d * N_c + q * d * N_q + d * N_{ca}) * w * \text{sen} \alpha + d * w * \text{cot} \alpha + P_2 * \text{sen} \alpha \quad (60)$$

Evidenciou-se que para o Latossolo-vermelho e Planossolo o modelo de Hettiaratchi & Reece simplificado proporcionou o valor de esforço de tração mais próximo ao medido a campo. Já para Argissolo-vermelho e Nitossolo-vermelho o modelo de Hettiaratchi & Reece original foi o que resultou em valor de esforço de tração mais próximo ao medido a campo. Isso indica que é possível utilizar o referido modelo para diferentes tipos de solos reafirmando novamente o que foi postulado por Machado & Trein (2013) que recomendam a utilização do modelo matemático de Hettiaratchi & Reece (1967) para o cálculo de esforço de tração para Planossolos.

## **4.5 Terceira fase; aplicativo**

### **4.5.1 Construção**

Nesta parte, será apresentada a maneira como foi construído o aplicativo móvel, bem como seu funcionamento, entrada e saída de dados. Com a utilização deste aplicativo pretende-se contar com uma ferramenta que permita, de forma fácil, rápida e precisa a execução do cálculo do esforço de tração para ferramentas estreitas. Os cálculos estabelecidos no aplicativo foram executados de acordo com os modelos matemáticos estudados e eleitos como mais adequados para utilização.

A inclusão dos dados necessários aos cálculos foi pensada para ser executada de forma bastante simples e interativa, para tanto sempre que possível utilizou-se imagens explicativas.

## **4.6 Função global - Entradas e saídas de dados**

O aplicativo móvel possui compatibilidade com dispositivos Android seja aparelhos celulares, tablets ou computadores, utilizando aproximadamente 46,26 MB do armazenamento interno do dispositivo, não requerendo utilização ou autorização prévia de nenhum recurso do telefone, sendo apresentado em português, nesta primeira versão. Após a instalação do aplicativo, é possível utilizá-lo com o dispositivo off-line e sem a necessidade da criação de um perfil.

O mesmo apresenta uma tela inicial, figura 32, onde se tem os logotipos do Núcleo de Inovação em Máquinas e Equipamentos Agrícolas, da Universidade Federal de Pelotas e do Programa de Pós-graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar. Indicando sua função tem-se a seguinte frase: Aplicativo desenvolvido para auxiliar no cálculo da potência requerida no motor e na barra de tração utilizando escarificador/subsolador de hastes com ponteiras. Na parte inferior da tela tem-se o botão “iniciar” o qual como o nome indica permite a inicialização do mesmo.



Figura 35 - Primeira tela do aplicativo móvel.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

O aplicativo é uma ferramenta interativa, de fácil entendimento, para que qualquer usuário fora do âmbito acadêmico possa utilizá-lo. Na primeira parte o usuário ingressa com os dados para que posteriormente seja feita a execução dos cálculos. Também conta com imagens ilustrativas para ajudar ao usuário na inserção dos dados de forma correta.

Como mostrado na Figura 33, a utilização deste aplicativo encontra-se direcionada somente para implementos que estejam dentro da classificação das ferramentas estreitas, que possuam como órgãos ativos de mobilização de solo as chamadas hastes ou dentes estreitos os quais equipam equipamentos como escarificadores, subsoladores, cultivadores e/ou hastes sulcadoras de adubo de semeadoras-adubadoras. Para iniciar primeiramente o usuário deve selecionar o tipo de equipamento para o qual pretende calcular o esforço de tração.



Figura 36 - Segunda tela do aplicativo móvel.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Após escolher o tipo de equipamento, ao apertar o menu avançar passa-se para a terceira tela onde o usuário determina a velocidade de operação da tarefa que deseja realizar e o número de hastes do implemento, como indica-se na Figura 34.



Figura 37 - Terceira tela do aplicativo móvel.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Cabe ressaltar que, para cada implemento foi estabelecida a velocidade mínima e máxima sendo de 2 até 6  $\text{km.h}^{-1}$  para escarificador; para subsolador de 1 até 5  $\text{km.h}^{-1}$  e para hastes sulcadoras ou cultivador de 5 até 12  $\text{km.h}^{-1}$ . Indicando indiretamente dessa maneira a faixa de velocidade recomendada para estas tarefas.

Após escolher a velocidade e o número de hastes, ao apertar o menu avançar passa-se para a quarta tela, onde o usuário seleciona a profundidade de trabalho da operação que deseja realizar com o implemento. Ressalta-se que para cada implemento foi estabelecida uma profundidade mínima e máxima de trabalho da seguinte forma; entre 0,05 m a 0,30 m para escarificador; entre 0,30 m e 1,00 m para subsoladores e entre de 0,05 m e 0,60 m para sulcador de semeadora. Sugerindo dessa maneira a faixa de profundidade mínima e máxima para cada tarefa, como indica na figura 35. Cabe lembrar que o cálculo realizado pelo aplicativo é em base à velocidade teórica, desconsiderando o efeito do patinamento.

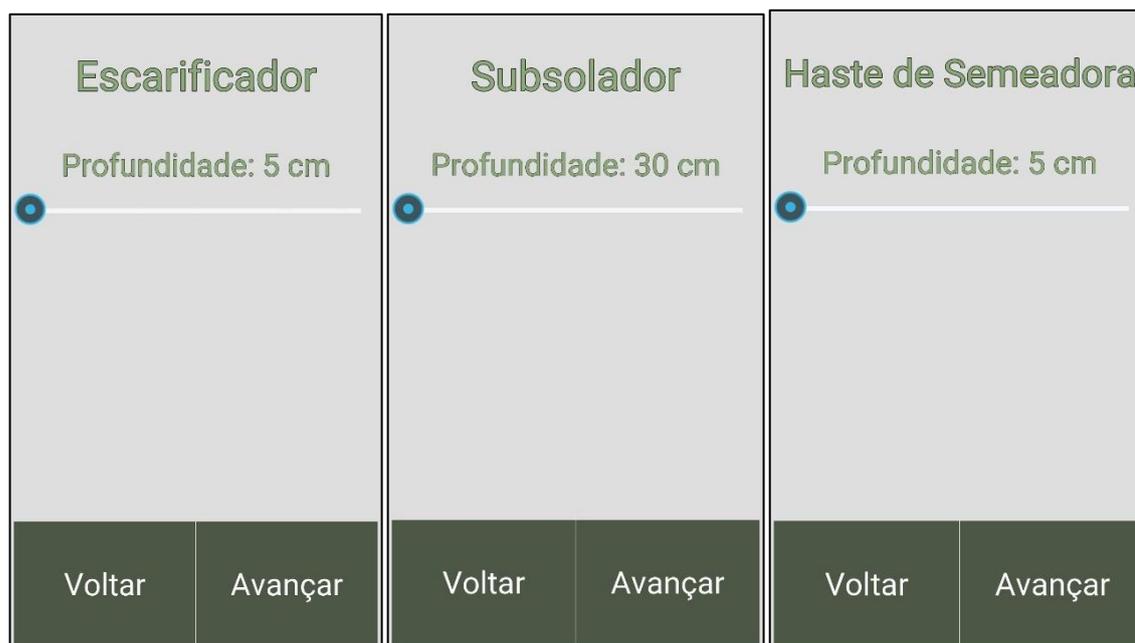


Figura 38 - Quarta tela do aplicativo móvel.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Após escolher a profundidade de trabalho, o usuário avança para o passo seguinte onde deve ingressar com o ângulo de ataque e a largura da ferramenta.

Nesta tela, apresentam-se imagens ilustrativas que indicam como o usuário pode determinar o ângulo de ataque e a largura da ferramenta para cada equipamento.

Com relação a estes parâmetros não foram colocados valores mínimos, apenas os valores máximos para o ângulo de ataque que foi de  $45^\circ$  e a largura máxima da ferramenta que foi de 0,20 m, conforme pode-se visualizar na figura 36.

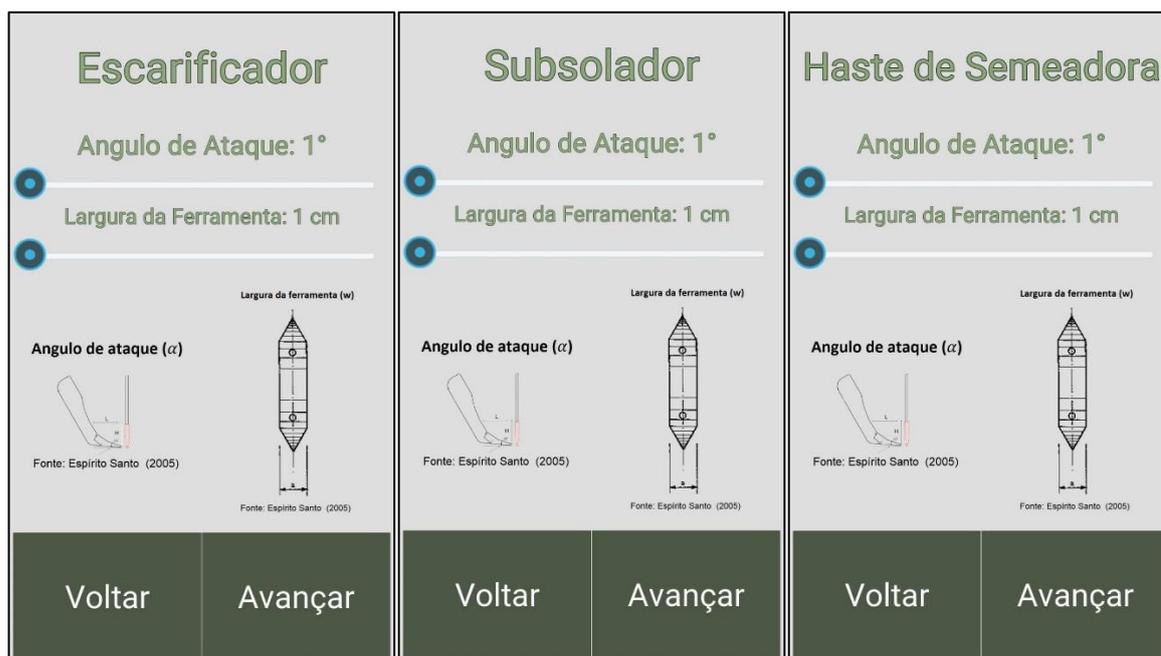


Figura 39 - Quinta tela do aplicativo móvel.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Após a escolha do ângulo de ataque da ponteira e da largura da ferramenta, avança-se para o passo seguinte onde o usuário escolhe o tipo de solo da sua propriedade, conforme pode ser visualizado na figura 37. Neste caso optou-se por utilizar os tipos de solos agricultáveis predominantes no Estado do Rio Grande do Sul: Argissolo, Latossolo e Planossolo. Embora o aplicativo tenha sido projetado para estes tipos de solos, não há impedimento de utilização para outros que possuam características semelhantes.

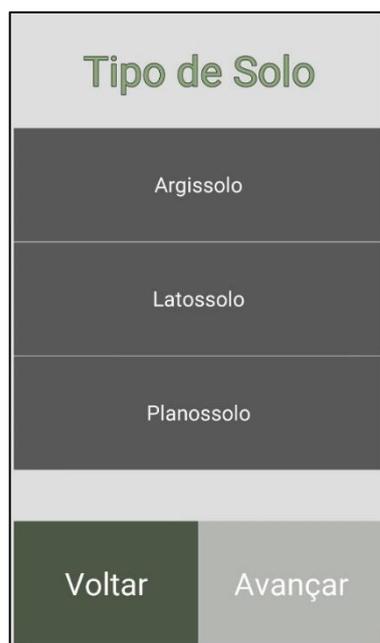


Figura 40 - Sexta tela do aplicativo móvel.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Posteriormente a seleção do tipo de solo o usuário avança para a indicação do nível de umidade do solo, no qual pretende executar o cálculo. Vale ressaltar que este fator é decisivo para a realização qualquer atividade que envolva a mobilização do solo, pois influencia tanto na qualidade do serviço quanto no esforço de tração da ferramenta. Dado a este fato optou-se por colocar imagens ilustrativas nesta tela, com a finalidade de ajudar ao usuário a determinar corretamente a umidade do solo para a qual pretende executar os cálculos, figura 38.

Como uma maneira de ressaltar a importância deste fator estabeleceu-se que o avanço do cálculo somente ocorrerá após o ingresso, por parte do usuário, do estado de umidade do solo.



Figura 41 - Sétima tela do aplicativo móvel.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Após a seleção do nível de umidade do solo, passa-se para o passo seguinte onde o usuário deve determinar o sistema de cultivo, conforme consta na figura 39. Nesta tela colocou-se os sistemas de cultivos mais utilizados no Brasil.



Figura 42 - Oitava tela do aplicativo móvel.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Tendo sido selecionado o sistema de cultivo, avança-se para a escolha do estado em que se encontra o solo, como tem-se na figura 40. Da mesma forma que se fez anteriormente, nesta tela foram incluídas figuras e especificações com a finalidade de facilitar ao usuário a seleção da opção mais adequada a sua situação de trabalho.



Figura 43 - Nona tela do aplicativo móvel.  
 Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Selecionado o estado do solo, avança-se para a tela onde vão estar a os resultados finais de potência necessária na barra de tração e no motor do trator, em diferentes unidades de medida, figura 41. Caso o usuário queira modificar alguns dos dados ingressados, isto não será um problema para o aplicativo, pois os dados ficam guardados durante a execução até o novo início, a cada alteração de parâmetro, os resultados serão atualizados automaticamente sem necessidade de novo ingresso de dados. Isto pode ser facilmente realizado apertando-se a opção voltar, em seguida a modificação executada aparecerá a opção avançar até o resultado.

A última tela do aplicativo apresenta os créditos a equipe e agência financiadora da bolsa de estudos, UFPEI, NIMEq e PPGSPAF, havendo a possibilidade do usuário de retornar à tela inicial do aplicativo para um novo cálculo.



Figura 44 - Decima tela do aplicativo móvel.

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.

Cabe ressaltar que o cálculo realizado por meio deste aplicativo móvel está sujeito a variabilidade do solo e da geometria da ferramenta visto que estes fatores estão relacionados as estimativas das propriedades físicas de cada tipo de solo como a densidade, índice de coesão e ângulo de atrito interno do solo.

Além disso a precisão dos resultados está ligada as informações fornecidas pelo usuário, ou seja, exige que o operador do aplicativo possua um entendimento ou conhecimento prévio sobre as características da ferramenta e como a mesma será utilizada, tais como o ângulo de ataque da ponteira, profundidade de trabalho e largura da ferramenta.

Visto que no mercado existe uma diversidade de modelos e marcas, algumas sendo até de fabricação artesanal, optou-se por deixar a critério o usuário ingressar com os dados do seu equipamento a fim de não se criar restrições nesse aspecto. Por tanto os resultados podem apresentar uma margem de erro de aproximadamente 10% para mais ou para menos.

#### 4.7 Teste de validação do aplicativo móvel

Para validar os cálculos de esforço de tração, utilizou-se o trabalho realizado por Machado & Trein (2013A) no Planossolo. Compararam-se os valores obtidos com o modelo original de Hettiaratchi & Reece (1967), o modelo simplificado, o resultado real a campo e o realizado pelo aplicativo móvel, os mesmos encontram-se agrupados no Quadro 1.

**Quadro 1** - Teste de validação do aplicativo móvel.

<b>Caso: Machado &amp; Trein (2013 A) T1</b>				
<b>Dados</b>	<b>Campo</b>	<b>Modelo original</b>	<b>Modelo simplificado</b>	<b>Aplicativo</b>
Ferramenta	Escarificador	Escarificador	Escarificador	Escarificador
Velocidade	3,00 km.h <sup>-1</sup>	3,00 km.h <sup>-1</sup>	3,00 km.h <sup>-1</sup>	3,00 km.h <sup>-1</sup>
Hastes	1	1	1	1
Profundidade	0,19 m	0,19 m	0,19 m	0,19 m
Ângulo de ataque	17,30°	17,0°	17,0°	17,0°
Largura da ferramenta	0,075m	0,07m	0,07m	0,07m
Tipo de solo				Planossolo
Nível de umidade				Friável
Sistema de cultivo				Plantio direto
Estado do solo				Compactado
( $\gamma$ )	1,51 g.cm <sup>-3</sup>	1,60 g.cm <sup>-3</sup>	1,60 g.cm <sup>-3</sup>	1,60 g.cm <sup>-3</sup>
( $c_a$ )	3,28 kPa	3,28 kPa	0	0
( $\beta$ )	28,33°	25,67°	25,67°	25,67°
(c)	31,65 kPa	31,10 kPa	31,10 kPa	31,10 kPa
( $\delta$ )	32,11°	32,11°	0	0
(g)	9,81 m.s <sup>-2</sup>	9,81 m.s <sup>-2</sup>	9,81 m.s <sup>-2</sup>	9,81 m.s <sup>-2</sup>
( $\phi$ )	33,34°	37°	37°	37°
<b>Resultados</b>				
	kN=3,17	kN=5,22	kN=3,4	kN=3,4
Resultado da força necessária na barra				Kgf=189.17
Resultado da potência no motor				
				CV=3,8
				KW=2,8
				HP=3,7
Resultado da potência na barra				
				CV=2,1
				KW=1,55
				HP=2,07

Ao analisar-se os resultados observados no quadro 1, observa-se que aquele proporcionado pelo modelo simplificado e aquele calculado pelo aplicativo foram iguais ficando os mesmos mais próximos ao resultado real medido a campo. Ao comparar-se os resultados verifica-se que aquele obtido com a utilização do modelo original superestimou o valor de esforço de tração.

Para realizar a comparação entre o modelo original, o modelo simplificado e o aplicativo móvel utilizaram-se os mesmos dados ingressados pelo aplicativo a exceção do modelo original que utilizou o mesmo valor de ângulo de atrito solo-material e índice de adesão solo-material medido a campo, a repercussão da utilização dos mesmos demonstra-se na diferença entre os resultados de esforço de tração.

Portanto, a tendência do aplicativo móvel de superestimar o valor deixaria a seleção do conjunto mecanizado com um excedente de potência disponível, sem estar operando na potência máxima no motor, caso ocorresse o contrário, poderia ser prejudicial visto que proporcionaria a seleção de um trator de menor potência, ter possíveis consequências como o acelerado desgaste das peças, maior patinamento, maior consumo do combustível e até o não cumprimento da tarefa devido a impossibilidade de tração.

Entre as principais facilidades oferecidas pelo aplicativo móvel encontra-se a utilização de médias para cada tipo de solo, com relação a variáveis como densidade do solo, índice de coesão do solo e ângulo de atrito interno do solo, que necessitam de tempo para sua determinação, dada a necessidade de coleta de material, testes de laboratório e interpretação dos resultados. O ângulo de ruptura do solo à frente da ferramenta é calculado por meio de uma equação, sendo a aceleração devido à gravidade considerada constante e igual a  $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ . Por último, para completar os fatores que compõe a equação, as variáveis, ângulo de atrito solo-material e o índice de adesão solo-material foram consideradas contendo valor zero.

As estimativas são realizadas de forma indireta por meio da seleção do tipo de solo, nível de umidade, sistema de cultivo e estado que este se encontre, seja solto ou compactado. Ressalta-se que outra vantagem oferecida pelo aplicativo vem a ser a apresentação do resultado final em diferentes unidades de medida (kgf, kW, CV e HP), o que facilita e amplia a aplicabilidade do mesmo, seja para o âmbito acadêmico e técnico, bem como a maior facilidade de interpretação por parte do produtor.

Analisando os dados dos manuais de instruções de implementos agrícolas verificam-se que as demandas de esforço de tração indicadas não são precisas, apresentando a tendência de sobrestimar em até 50% o valor da potência de tração necessária no motor. Estes dados não consideram a profundidade, o nível de compactação e o nível de umidade do solo. Já

o aplicativo Dina Haste Solo, oferece facilidade de uso de forma rápida e precisa o que torna este aplicativo uma ferramenta bastante útil no auxílio para a previsão de esforço de tração de ferramentas estreitas.

### - Dificuldades encontradas

No desenvolvimento do trabalho encontrou-se algumas limitações associadas à coleta de dados através da pesquisa bibliográfica as quais foram relacionadas aos seguintes aspectos:

- Foi observada grande variação nos dados de esforço de tração de um estudo para outro em alguns casos realizados no mesmo local, assim também, diferenças entre os modelos preditivos e os dados medidos a campo para o esforço de tração o que dificultou a escolha do modelo mais adequado para realizar a previsão de esforço de tração;

- A medição do comportamento mecânico dos solos encontra-se ligada a diversos fatores intrínsecos e extrínsecos referentes a regulagem da máquina e em especial aos fatores externos ao solo e a interação dele com a ferramenta. A validade dos dados depende da correta precisão das medições a campo, interpretação das mesmas e o teor de água no momento dos ensaios para um determinado tipo de solo. Nesse sentido foram observados trabalhos cujos ensaios foram feitos em níveis de umidade acima do estado recomendado qual seja, o estado friável. De acordo com a literatura a umidade é um fator de fundamental importância para a eficiência na realização da mobilização dos solos com ferramentas estreitas;

- Outras limitações encontradas foram a falta de padronização das unidades de medida dos dados, a caracterização das propriedades físicas do solo deficientes e a caracterização de dados referente à interação solo-ferramenta deficientes, além disso, não todas as análises acompanham o CV que do experimento;

- Por último e não menos importante o limitado estudo sobre os modelos matemáticos nas condições do solo do Brasil para a utilização como referência para validação de futuros estudos.

## - Sugestões para trabalhos futuros

1. **Estudo de equações:** Prosseguir e aprofundar o estudo dos modelos matemáticos com a finalidade de determinar outros mecanismos de simplificação e outras equações que se adequem a uma maior diversidade de solos e tipos de ferramenta. Explorar outras opções de previsão de esforço de tração oferecidas pela tecnologia e a inovação, como os modelos numéricos, simulações em 2D e 3D de métodos de elementos finitos e métodos de elementos discretos que ainda apresentam resultados promissores em solos arenosos.
2. **Validação dos modelos matemáticos:** Ampliar o número de comparações com ensaios a campo e referências bibliográficas, acompanhar os estudos bibliográficos e cálculos com modelos matemáticos com ensaios a campo para uma maior precisão.
3. **Aplicativo móvel:** Continuar com outras versões do aplicativo, ampliar o estudo e caracterização de diferentes tipos de solos, de ferramentas estreitas criando um banco de acesso para seleção de ferramentas estreitas disponíveis no mercado. Adicionar mais idiomas e a adaptá-lo para outras plataformas como iOS, para que o aplicativo possa ser utilizado em outras regiões e em diferentes aparelhos eletrônicos.

## 5 Conclusões

A realização deste trabalho permitiu comprovar que os modelos matemáticos possibilitam a obtenção de resultados aproximados com relação aqueles obtidos em campo.

Na primeira simplificação, onde foram excluídos fatores aleatórios com menor percentual de participação no resultado, a maioria deles manteve uma adequada precisão na ordem 99,6% Grisso *et al.* (1980); 97% Hettiaratchi & Reece (1967); 96% Godwin & Spoor (1977); 91% Reece (1965), a exceção dos modelos de Perumpral *et al.* (1983) 87% e Mckyes & Ali (1977) 83%.

Na primeira simplificação, o modelo proposto por Reece original e simplificado forneceram os resultados mais próximos aqueles medidos em campo, destacando-se na precisão e na facilidade de aplicação.

Os modelos propostos por Hettiaratchi e Reece (1967), simplificado, Hettiaratchi e Reece (1967), original e Godwin & Spoor (1977) deram os resultados mais aproximados, quando comparados com aqueles obtidos em campo, na segunda simplificação.

A previsão de esforço de tração de ferramentas estreitas de mobilização dos solos por meio do modelo simplificado através do aplicativo móvel, possibilita o dimensionamento adequado deste tipo de equipamento agrícola para um determinado trabalho, em condições predeterminadas, com maior segurança e com menor dispêndio de energia de forma prática e rápida.

O aplicativo móvel “Dina Haste Solos” torna-se uma ferramenta digital bastante simples de utilizar proporcionando um bom subsídio para estudantes, pesquisadores, projetistas, produtores e profissionais da área no momento de projetar a geometria do equipamento, na hora da tomada de decisão para a realização de uma tarefa agrícola e/ou na hora da aquisição de um equipamento.

## Referências

ABEBE, A.T; TANAKA, T; YAMAZAKI, M. Soil compaction by multiple passes of a rigid wheel relevant for optimization of traffic. **Journal of Terramechanics**, Vol. 26, No. 2, pp. 139-148, 1989.

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 519-531. 2004.

ALAKUKU, L. *et al.* Prevention strategies for field traffic induced subsoil compaction: a review. Part 1. Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, v.73, p.145-160, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198703001077>>. Acesso em: 10 out. 2020. doi: 10.1016/S0167-1987(03)00107-7.

ARTUZO, F. D. *et al.* Tomada de decisão a partir da análise econômica de viabilidade: estudo de caso no dimensionamento de máquinas agrícolas. Custos e @gronegócio on line - ISSN 1808-2882. v. 11, n. 3 – p. 183-205. Jul/Set -2015.

ASHBURNER, J.; SIMS, B. Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza. San José: IICA, 473p. 1984.

AYERS, P. D.; PERUMPRAL, J. V. Moisture and density effect on cone index. Transactions of the ASAE. **Am. Sci. Agric. Eng.**, 21: p.1169-1172. 1982.

BADINELLI, Pablo Gerzson. *et al.* Estratégias de Descompactação de Solos hidromórficos Cultivados com Soja. In **XI Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado** Balneário Camboriú 12 a 16 de agosto de 2019.

BARBOSA, J. A. **Efeito do tráfego de rodados pneumáticos em propriedades mecânicas de um argissolo vermelho-amarelo**. 2002. 119p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

BATEY, T.; MCKENZIE, D. C. Soil compaction: identification directly in the field. Soil use and Management. Oxford, v.22, p.123-131. 2006.

BECKER, RAFAEL SOBROZA. *et al.* Análise das características técnicas de subsoladores agrícolas. In **XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2015**. Hotel Fazenda Fonte Colina Verde - São Pedro – SP. 13 a 17 de setembro de 2015.

BELLÉ, Mateus P. Demanda energética e mobilização do solo com o uso de escarificadores em sistemas de semeadura direta. **R. Bras. Eng. Agric. Ambiental**, v.18, n.5, p.551–558, 2014.

BOCARD, Taysa. Como criar um aplicativo: Tire a ideia do papel em 13 passos. Usemobile. 2020. Disponível em: <https://usemobile.com.br/como-criar-um-aplicativo/> Acesso em: 07. dez. 2020.

BOENI, M. **Comportamento mecânico de solos escarificação em função do teor de água é pressão de inflação dos pneus**. 2000. 99f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós -Graduação em Ciências do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BOTTA, G. F. *et al.* Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields. **Soil and Tillage Research**, v.1, p.164-172, 2006.

BRAUNACK, M. V. & McPHEE, J.E. The effect of initial soil water content and tillage implement on seedbed formation. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, 20:5-17, 1991.

CAMARGO, O. A. Compactação do solo e desenvolvimento de plantas. Campinas: Fundação Cargill, 44p. 1983.

COHRON, G. T. Force's causing soil compaction. In: Barnes, K. K.; Carleton, W. M.; Taylor, H. M.; Throckmorton, R. I.; Vanden Berg, G. E. Compaction of agricultural soils. Michigan: **ASAE** p.106-124. 1971.

COLLARES, G. L. *et al.* Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 11, p1663 -1674, nov. 2006.

CONTE, Osmar. *et al.* Resistência mecânica do solo e força de tração em hastes Sulcadoras de semeadoras adubadoras em sistema de integração Lavoura-pecuária. **Eng. Agríc. Jaboticabal**, v.28, n.4, p.730-739. 2008.

CUNHA, J. P. A. R. Compactação do solo causada pelo tráfego de trator. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 26, n. 1. p.17-21. 2003.

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. **Geotechnique**, 1971. 29, p. 47-65.

COULOMB, C. A. Essai sur une application des règles de maximis et minimis a quelques problèmes de statique, relatifs a l'architecture. **Mémoires de Marhématique de l'Académie Royale des Sciences**, Paris, 7, p.343-382. 1776.

CZYZ, E. A. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. **Soil & Tillage Research**, v.79, p.153-166. 2004.

DAVOUDI, S *et al.* A two dimensional finite element analysis of a plane tillage tool in soil using a non-linear elasto-plastic model. **American e Eurasian Journal of Agricultural & Environment Sciences**, 2008. 3(3), p.498-505.

DESIR, Finbar Lambert. **A field evaluation of the wedge approach to the analysis of soil cutting by narrow blades**. 1981. 260f. Thesis (Master of Science). McGill. University, Montreal, Quebec, Canada. 1981.

DOCUMENTATION, Bulldozer. Kivy's Developers. JAN, 2022. Release 0.11. Disponível em: <https://bulldozer.readthedocs.io/en/latest/>. Acesso em: 16 mar. 2022.

DOCUMENTATION, Kivy. The Kivy Developers: Release 2.2.0. dev 0. MAR,2022. Disponível em: <https://kivy.org/#home>. Acesso em: 06 mar. 2022.

DRESCHER, Marta Sandra. *et al.* Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em latossolo vermelho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.6, p.1836-1844,2012.

DRESCHER Marta Sandra. *et al.* Fertilizer shanks to promote soil decompaction in the seeding operation. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20160026>. ISSN e 1678-4596. SOIL SCIENCE. **Ciência Rural**, v.47, n.2, 2017.

DUNCAN, J. M. AND C. Y. CHANG. 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers** 96:1629-1653.

EAVIS, B. W. Soil physical conditions affecting seedling root growth: 1- mechanical impedance, aeration, and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil. **Plant and Soil**, v.36, p.613-622. 1972.

EHRHARDT, J.P. *et al.* Using the veris electrical conductivity cart as a draft predictor. **ASAE Paper** No. 011012 at Sacramento Convention Center, Sacramento, CA, Jul, 29–Ag. 2001.

EKO, Robert Medjo. Use of triaxial stress state framework to evaluate the mechanical behaviour of an agricultural clay soil. **Soil & Tillage Research** 81 p.71–85. 2005.

FERREIRA, M. F. P. Seleção de Máquinas e Implementos. Curso de mecanização agrícola em propriedades familiares da UFPEL. 2019.

FIELKE, J. M. Finite element modelling of the interaction of the cutting edge of tillage implements with soil. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 1999. 74(1), p.91 e101.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. Soil mechanics for unsaturated soils. New York, John Wiley, 517p. 1993.

GIAROLA, N. F. B. *et al.* Similaridades entre o caráter coeso dos solos e o comportamento hardsetting. Estudo de caso. **R. Bras. Ci. Solo**, 25: p.239-247. 2001.

GILL, William R.; VANDEN BERG, Glen E. Soil dynamics in tillage and traction. Agriculture. Handbook No. 316. Washington, DC.: **Agricultural Research Service (USDA)** United States Department of Agriculture, 524p. 1968.

GIRARDELLO, V. C. *et al.* Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38(4), p.1234-1244. 2014.

GRAZIANO, Magalhães Paulo. **Projeto de máquinas de preparo de solo: profundidade crítica**. Campinas, SP: Escrito, 2014. 14 slides, color, 25x20.

FEAGRI.UNICAMP. Disponível em: <https://www.slideserve.com/mea/projeto-de-mquinas-de-preparo-de-solo>. Acesso em: 13 out. 2020.

GODWIN, R. J. A. Review of the effect of implements geometry on soil failure and implement forces. **Soil & Tillage Research**, v.97, p.331-340. 2007.

GODWIN, R. J. **An investigation into the mechanics of narrow tines in frictional soils**. PhD thesis, University of Reading, 1974.

GODWIN, R. J.; O'DOGHERTY, M. J. Integrated soil tillage force prediction models. **Journal of Terramechanics**, n.44, p.3-14. 2007.

GODWIN, R. J.; SPOOR, G. Soil failure with narrow tines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 22(4):213-228. 1977.

GODWIN, R. J., SPOOR, G., LEEDS-HARRISON, P. B. An experimental investigation into the soil disturbance and force mechanics aspects of mole ploughs. **Journal of Agricultural Engineering Research**, n. 26, p.477-497. 1981.

GODWIN, R. J. *et al.* A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed. **Biosystems Engineering**, 97(1), p.117-129. 2007.

GRISSE, R. D.; PERUMPRAL, J. V. Review of model for predicting performance of narrow tillage tool. **Transactions of the ASAE**, 28(4): p.1062-1067. 1985.

GRISSE, R. D., PERUMPRAL, J. V., & DESAI, C. S. A soil and tool interaction model for narrow tillage tools. St. Joseph, MI 49085: **ASAE**.p.80-1518.1980.

GRISSE, R. D., YASIN, M., KOCHER, M. F. Tillage implement forces operating in silty clay loam. **Trans. of the ASAE**, St. Joseph, V. 39, n. 6, p.1977-1982. 1996.

HÅKANSSON, I. Machinery-induced compaction of arable soils: incidence, consequences, counter-measures. Uppsala, Sweden: Departament. of Soil Sciences, Division of Soil Management, 153p. 2005.

HETTIARATCHI, D. R. P.; REECE, A.R. Symmetrical three-dimensional soil failure. **Journal of Terramechanics**, 4(3):45-67. 1967.

HETTIARATCHI, D. R. P. Theoretical Soil Mechanics and Implement Design. **Soil & Tillage Research**, 11. 325-347. 1988.

HILLEL, Daniel. Applications of Soil Physics. New York, N.Y.: Academic Press. ISBN -10: 0124314120 p.400 1980.

HORN, R. *et al.* Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.35, p.23-36. 1995.

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil and Tillage Research**, v.73, p.89-99, 2003.

CHAMEN, W.C.T. *et al.* Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. **Soil and Tillage Research** 146, 10–25. 2015

CHANCELLOR, W. J. Soil physical properties. In: CHANCELLOR, W. J. (Coord.). *Advances in soil dynamics*. Saint Joseph: **ASAE**, p. 21-254.1994.

CHAROUSSET, Dominik; HIESGEN, Raphael; SCHMIDT, Thomas C. Revisiting actor programming in C++. *Computer Languages, Systems & Structures* 45 p.105–131. 2016.

CHI, L.; KUSHWAHA, R. L. Three-dimensional, finite element interaction between soil and simple tillage tool. **Transactions of the ASAE**,1991. 34(2), 361-366.

CHUNG, S. O.; SUDDUTH, K. A. Soil failure models for vertically operating and horizontally operating strength sensors. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* ISSN 0001–2351. **Trans. ASABE**, Vol. 49(4): 851–863. 2006.

JACOMINE, P. K. T. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos tabuleiros costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS: “Pesquisa & Desenvolvimento para os tabuleiros costeiros”, Cruz das Almas. 1996. **Anais**. Cruz das Almas, Embrapa/CPATC/CNPMF/IGUFAB, p.13-24. 1996.

JAQUES, Patrícia Augustin. *Programação Básica em Java*. UNISINOS. Apostila. 124p. 2007.

KARMAKAR, S.; KUSHAWA, R. L. Simulation of soil deformation around a tillage tool using computational fluid dynamics. **Transactions of the ASAE**, 2005. 48(3), 23-32.

KARMAKAR, S.; ASHRAFIZADEH, S. R.;KUSHWAHA, R. L. Experimental validation of computational fluid dynamics modeling for narrow tillage tool draft. **Journal of Terramechanics**. 2009. 46(6), 277-283.

KARMAKAR, S.; KUSHAWA, R. L.; LAGUE, C. Numerical modelling of soil stress and pressure distribution on a flat tillage tool using computational fluid dynamics. **Biosystems Engineering**, 2007. 97(407),14.

KHALID, Muhammad Yasoob Ullah. *Python Intermédio*. 2021. Versão 0.1. Traducción: ellibrodepython.com. Disponível em: <https://www.python.org>. Acesso em: 16 mar. 2022.

KLAVER, Pablo Pereira Corrêa. *et al.* Programa computacional para calcular a potência requerida de máquinas e implementos agrícolas. **Rev. Ceres, Viçosa**, v. 60, n.6, p. 890-895, nov/dez, 2013

KOCHHANN, R. A. *et al.* Compactação e descompactação de solos. Passo Fundo: Embrapa Trigo, Documentos, 19. 20p. 2000.

KOSTRITSYN A. K. Cutting of a cohesive soil mechanism with knives and cones. Translation 58, NIAE, Silsoe, Bedford, 1956.

KUSHWAHA, R. L.; SHEN, J. Finite element analysis of the dynamic interaction between soil and tillage tool. **Transactions of the ASAE**, 1995. 37(5), 1315-1319.

KUSHWAHA, R. L.; CHI, L.; SHEN, J. Analytical and numerical models for predicting soil forces on narrow tillage tools- A review. **Canadian Agricultural Engineering**. Vol. 35, No. 3, p. 183-193 July/August/Sep. 1993.

LANÇAS, Kleber Pereira. Subsolagem ou escarificação. Pelotas: Cultivar Máquinas, n. 14, p.34-37. 2002.

LEBERT, M.; HORN, R. A. Method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil Tillage Res**, v.19, p.275-286. 1991.

LEVIEN, Renato & MAZURANA, Michael. Como dimensionar sua frota de tratores e implementos. Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS. CULTIVAR MÁQUINAS. TRATORES. Grupo Cultivar de Publicações Ltda., Pelotas. RS: 15 jan. 2021. Disponível em: <https://www.grupocultivar.com.br/noticias/como-dimensionar-sua-frota-de-tratores-e-implementos>. Acesso em: 15 abr. 2021.

LIMA, H. V. *et al.* Identificação e caracterização de solos coesos no Estado do Ceará. **R. Bras. Ci. Solo**, 28:467-476. 2004.

LUTZ, Mark & ASCHER, David. Aprendendo python-2ed.-Porto Alegre: Bookman, ISBN 978-85-7780-013.1568 p. 2007.

MACHADO, Antônio Lilles Tavares. **Esforço de tração para ferramentas de hastes com ponteiros estreitas em dois solos do Rio Grande do Sul**. 2001. 172 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MACHADO, Antônio Lilles T.; CHANG Cheu-Shang. Influência da geometria no desempenho de ponteiros aladas de escarificadores. **Rev. Bras. de AGROCIÊNCIA**, v. 2, nº 1, p.11-16. Jan.-Abr. 1996.

MACHADO, Antônio Lilles Tavares & TREIN, Carlos R. Draft prediction models for soil engaging tines in two soils of Rio Grande do Sul, Brazil. **Eng. Agric., Jaboticabal**, v.33, n.1, p.167-175, jan./fev. 2013.

MACHADO, Antônio Lilles Tavares. *et al.* Máquinas para preparo do solo, semeadura, adubação e tratamentos culturais. 2 ed. Pelotas: Gráfica e Editora Universitária, Universidade Federal de Pelotas, UFPel, 253p. 2005.

MACHADO, Roberto Lilles Tavares. *et al.* Avaliação do desempenho de escarificador em planossolo. **Rev. Bras. de AGROCIÊNCIA**, v.2, nº 3, 151-154, Set.-Dez., 1996.

MACHADO, Thiago M. Estimativa de gasto energético da operação de subsolagem em profundidades variáveis. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.19, n.11, p.1121–1125, 2015.

MANUWA, S. J.; ADEMOSUN, O. C. Draught and soil disturbance of model tillage tines under varying soil parameters. **Agricultural Engineering International: The CIGRE Journal**, Mar. v.9, p.1-18, 2007.

MARCONI Ribeiro Furtado Júnior. **Desenvolvimento de uma plataforma dinamométrica para ensaios de tração em implementos montados**. 2016. 80f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. Minas Gerais – Brasil. 2016.

MAZURANA, Michael. **Física do Solo**: Vídeo aula sobre compactação do solo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2016. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=-w6eWQVjYpM> . Acessado em 26 de Out. de 2020.

McKYES, E. Soil Cutting and Tillage. Department of Agricultural Engineering 7, McDonald College of McGill University, Ste-Anne de Bellevue, Quebec, Canada. Elsevier Science Publishing Company: ISBN 044442548- 9 Vol. 7. 226p. 1985.

McKYES, E. Soil Cutting and Tillage. Developments in Agricultural Engineering 10, Macdonald College of McGill University, Department of Agricultural Engineering, P.O. Box 950, Ste. Anne de Bellevue, Quebec. Canada. **Elsevier Science Publishing Company**, ISBN 0-444-88080-1, Vol. 10. 298p. 1989.

McKYES, E.; NYAMUGAFATA, P.; NYAMAPFENE, K. W. Characterization of cohesion, friction and sensitivity of two hardsetting soils from Zimbabwe. **Soil Till. Res**, 29: p.357-366. 1994.

McKYES, E.; ALI. O. S. The cutting of soil by a narrow blade. **Journal of Terramechanics**. 14(2): p.43-58. 1977.

McKYES, E. The calculation of draft forces and soil failure boundaries of narrow cutting blades. **Trans. of the ASAE**, St. Joseph, V. 21, p.20–24. 1978.

MENGUE, Fabio. Curso de Java básico. Centro de computação de UNICAMP. Apostila. 35p. 2019.

MENTGES, Marcelo Ivan. *et al.* Propriedades físico-hídricas do solo e demanda energética de haste escarificadora em Argissolo compactado. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.45, n.3, p.315-321, mar. 2010.

MEYERHOF, G. G. Ultimate bearing capacity of foundations. *Geotechnique* 2:301-332. 1951.

MIALHE, Luiz Geraldo. Máquinas Agrícolas: Ensaio & Certificação. Piracicaba, SP: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996.

MICKLETHWAITES, E. I. E. Soil Mechanics in Relation to Fighting Vehicles: Military College of Science, Chertsey, 1944.

MILLER, P. C. H. **Soil failure and the nature of force system with very narrow tines**. B. Se. dissertation. NCAE, University of Reading, England. 1971.

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. S.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 16(5), p.584-590. 2012.

MOLINA, Walter Francisco Jr. Comportamento Mecânico do Solo em Operações Agrícolas. Piracicaba. ESALQ/USP. ISBN:978-85-922384-0-7. DOI: 10.11606/9788592238407, 223p. 2017.

MORAES, M. H.; TAMBURÚS, C. E. Influência da compactação na densidade, porosidade, retenção de água e condutividade hidráulica de dois solos argilosos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, Ilhéus, 1993. **Anais**. Ilhéus, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. p.2234-2248. 1993.

MOUAZEN, A. M.; NEMENYI, M. Finite element analysis of subsoiler cutting in non homogeneous sandy loam soil. **Soil and Tillage Research**. 1999. 51, p.1-15.

MULLINS, C. E. *et al.* Hardsetting soils: Behavior, occurrence and management. **Adv. Soil Sci.**, 11: p. 37-108. 1990.

MURTA, Leonardo Gresta Paulino. Orientação a Objetos em Java. Instituto de Computação – UFF. 65p. 2015.

O'CALLAGHAN, J. R.; FARRELLY, K. M. Cleavage of soil by tined implements. **Journal of Agricultural Engineer in Research**, 9: p.259-270. 1964.

O'CALLAGHAN, J. R.; MCCULLEN, P. J. Cleavage of Soil by Inclined and Wedge-Shaped Tines. Mechanical Engineering Department, University Coliepe. Dublin.1965

OHU, O. J *et al.* Shear strength prediction of soils with varying added organic matter contents. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng.**,29: p.351-355.1986.

OLIVEIRA, Victor Adriel de Jesus. Introdução ao Desenvolvimento para Dispositivos Móveis. Instituto de Informática INF –UFRGS p.55. 2019.

ORTIGÃO, J. A. R. Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos. 2.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 378p. 1995.

OSMAN, L. S. **The Mechanics of Soil Cutting Blades**. Ph. D. Tesis, University of Newcastle upon Tyne, 1964.

PAYNE, P. C. The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements. **J. Agric. Eng. Res.**, 1(1):p. 23-50. 1956.

PAYNE, P. C. J.; FOUNTAINE, R. Field method of measuring the shear strength of soils. **J. Soil Sci.** (No. 1). p 3. 1952.

PAYNE, P. C. J.; TANNER, D. W. The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 4(4): p.312-325. 1959.

PAYNE, P. C. J, TANNER, D. W. SPOOR, G. A review of the relevance of soil mechanics in earth-moving. Session 1-Soil Mechanics. Proc Instn Mech Engrs, Vol 179 Pt 3F. 1964.

PERUMPRAL, J. V.; GRISSO, R. D.; DESAI, C. S. A soil tool model based on limit equilibrium analysis. **Transactions of the ASAE**, 26(4): p.991-995. 1983.

PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos. São Paulo, Oficina de Textos, 247p. 2000.

PLASSE, R.; RAGHAVAN, G. S. V.; MCKYES, E. Simulation of Narrow Blade Performance in Different Soils. American Society of Agricultural Engineers. **Transactions of the ASAE**. Vol. 28(4):Jul-Aug. 1985

PLOTZE, Rodrigo. Programação para dispositivos móveis. Ed: Universidade Estácio Sá. UNISEB Centro Universitário Estácio, 136p. 2015.

PLOUFFE, C *et al.* Moldboard plow performance in a clay soil: simulation and experiment. **Transactions of the ASAE**, 1999A. 42(6), p.1531-1539.

PLOUFFE, C *et al.* Validation of moldboard plow simulations with FEM on a clay soil. **Transactions of the ASAE**, 1999B. 42(6), p.1523-1529.

PORTERFIELD, J. W.; CARPENTER, T. G. Soil compaction: An Index of potential compaction for agricultural tires. **Transactions of the ASAE**, v.29, n.4, p.917-922. 1986.

RAGHAVAN, G.S. V. ALVO, P. and MCKYES, E. Advances in Soil Science. Soil Degradation. Soil Compaction in Agriculture: A View Toward Managing the Problem. ED: **Springer-Verlag. New York Inc.** ISSN: 0176-9340. Volume11 p.359. 1990.

RAJARAM G D; GEE-CLOUGH D. Force–distance behavior of tine implements. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 41(2), 81–98.1988.

REECE, A. R. The fundamental equation of earth-moving mechanics. In Symposium on Earth-Moving Machinery, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 179(3F): p.16-22. 1965.

RÉQUIA, Gustavo Heydt. **Desenvolvimento de aplicativos CR campeiro móbil - caso de teste**: Sistema Operacional Android. 2013. 70f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria. Colégio Politécnico da UFSM. Santa Maria, RS. Programa de Pós-Graduação em Agricultura De Precisão. 2013.

RIBEIRO, M. R. Características morfológicas dos horizontes coesos dos solos de Tabuleiros Costeiros. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS. Aracaju. 2001. **Anais**. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, p.161-168. 2001.

RICHART, Alfredo. *et al.* Compactação do solo: causas e efeitos/ REVISÕES /**Semina**: Ciências Agrárias, Londrina, v. 26, n. 3, p.321-344. jul./set. 2005.

ROCHA, W. W *et al.* Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras MG.R. **Bras. Ci. Solo**, v 26: p.297-303. 2002.

ROSA, U. A. **Performance of narrow tillage tools with inertial and strain rate effects**. Ph.D. Thesis.1977. Department of Agricultural and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada. 1977.

ROSA, U. A.; WULFSOHN, D. Constitutive model for high speed tillage using narrow tools. **Journal of Terramechanics**, 1999. 36, p.221-234.

ROSA, David Peres da *et al.* Cultivo mínimo: Efeito da compactação e deformação abaixo da atuação da ponteira do subsolador. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.15, n.11, p.1199–1205, 2011.

ROSA, David Peres da *et al.* Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. **Pesq. agropec. bras., Brasília**, v.43, n.3, p.395-400, mar. 2008.

ROSA, David Peres da; BITENCOURT, Dioni Glei Bonini; MACHADO, Antônio Lilles Tavares. Adequação de modelos matemáticos para a previsão de esforço de tração para um escarificador. In: XV SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E XII FEIRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA UFRGS 2003, Porto Alegre. Adequação de Modelos Matemáticos para a Previsão de Esforço de Tração para um Escarificador, 2003.

SAINI, G. R.; CHOW, T. L. Effect of compacted subsoil and water stress and shoot and root activity of corn (*Zea mays* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.) in a growth chamber. **Plant and Soil**, The Hague, 66(3): p.291-298. 1984.

SALVADOR, Nilson; BENEZ, Sérgio H; MION Renildo, L. Consumo de combustível na operação de subsolagem realizada antes e depois de diferentes sistemas de preparo periódico do solo. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.28, n.2, p.256-262, abr./jun. 2008.

SÁNCHEZ-GIRÓN, V *et al.* Effect of soil compaction and water content on the resulting forces acting on three seed drill furrow openers. **Soil and Tillage Research, Amsterdam**, v.81, n.1, p.25-37. 2005.

SANTOS, João Carlos dos; NETO, Fernando Cartaxo Rolim; JUNIOR, José Machado Coelho; WANDERLEY, Ricardo Andrade. Desempenho de um escarificador com dois tipos de ponteiras e três espaçamentos entre hastes. **Ciência & Engenharia**, v. 24, n. 2, p. 143 – 151, jul. – dez. 2015.

SANTOS, Michele da Silva; ALONÇO, Airton dos Santos e BAUMHARDT, Ulisses Benedetti. Principais fatores que influenciam o desempenho de escarificadores e subsoladores. Uma revisão de literatura. **Tecnol. & Ciên. Agropec.**, João Pessoa, v.5, n.1, p.13-19, mar. 2011

SANTOS, Paula Machado dos. **Modelagem do desempenho em tração de conjuntos mecanizados visando ao dimensionamento do trator.**2010. 154f. Monografia (tese) – Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2010.

SARTORI, Gerson Meneghetti Sarzi. *et al.* Sistemas de preparo do solo e de semeadura no rendimento de grãos de soja em área de várzea. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.46, n.3, p.492-498, mar, 2016.

SEGOVIA, Armando; DÍAZ, Arquímedes; GARDUÑO, Mayra. Integrating native code into a Java application for controlling a mobile robot via a PC's serial port. **Computers and Electrical Engineering**, v 27 p.109-117. 2001.

SEIXAS, F. Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. **Circular técnica**, IPEF, n.163, p.1-10. 1988.

SERPA, Fabio Marcelo. **Estimativa de esforços em implementos de preparo de solos e adequação trator- implemento.**1997. 109 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, SP 1997.

SCHLOSSER, J. F. Motores e tratores agrícolas. Caderno didático, DER/CCR/UFSM, 76p.1997.

SCHJONNING, P. Soil strength as influenced by texture, water content and soil management. **Soil Till. Res.**, 12: p.277-283. 1991.

SCHAEFER, C. E. R. *et al.* Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos micro-estruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.03, p.669-678, 2002.

SCHERER, Vítor P *et al.* Avaliação das informações técnicas disponibilizadas pelos fabricantes de escarificadores. In **XXX Jornada Acadêmica Integrada – JAI.** Universidade Federal de Santa Maria, 19 e 23 de Out. de 2015.

SILVA, Álvaro Pires da. Material extraído do livro: The nature and properties of soil 13<sup>a</sup> ed. Editorial Prentice Hall: Física do solo. Departamento de Ciência do solo. Piracicaba. p 109. 2010.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Influência de diferentes sistemas de uso e manejo na coesão, resistência ao cisalhamento e óxidos de Fe, Si e Al em solo de tabuleiro costeiro de Alagoas. **R. Bras. Ci. Solo**, 29: p. 447-457. 2005.

SILVA, A. J. N. & CARVALHO, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **R. Bras. Ci. Solo**, 31: p.853-862. 2007.

SILVA, A. R. *et al.* Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 207-216. 2006.

SILVA, A. P. **Influência da compactação nas propriedades físicas do solo e no sistema radicular de plântulas de algodão (*Gossypium hirsutum* L.)**. 1984. 92f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1984.

SILVA, R. B. *et al.* Resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes usos e manejo. **R Bras. Ci. Solo**, v.28, n.1, p.165-173. 2004.

SILVEIRA, R. J. C. *et al.* Levantamento de características químicas, físicas e mineralógicas dos principais solos do RS. Pelotas, EMBRAPACPATB, n.p. v.1. 1989.

SIQUEIRA, R.; CASÃO, Junior, R. Trabalhador no cultivo de grãos e oleaginosas: Máquinas para manejo de coberturas e semeadura no sistema de plantio direto. Curitiba: SENAR-PR, 88 p. 2004.

SMITH, D. L. O.; GODWIN, R. J.; SPOOR, G. Modeling soil disturbance due to tillage and traffic. In: *Mechanics and Related Processes in Structured Agricultural Soils*. Springer Netherlands, p.121-136.1989.

SOANE, B. D. The effects of traffic and implements on soil compaction. **The Agricultural Engineer**, Belford, 25(3):p.115-128. 1970.

SOUZA, Rômulo. Mecanização Agrícola: Preparo periódico do solo. Arados de Aivecas, Subsolador e Escarificador. Bareiros IFPE. 2014 21 slides, color, 25x20. Disponível em:<https://pt.slideshare.net/RomuloViniciusTioRominho/083-preparo-periodico-arados-de-aivecas-subsolador-e-escarificador> Acesso em: 13 out. 2020.

SPOOR, G; FRY, R. K. Soil Disturbance Generated by Deep-working Low Rake Angle Narrow Tines. **Journal Agricultural Engineering Res.** 28, 217-234. 1983.

SPOOR, G.; GODWIN, R. J. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. **Journal Agricultural Engineering Res.**, London, v. 23, p.243-258. 1978.

SRIVASTAVA, Ajit K. *et al.* Soil Tillage: chapter 8 in engineering principles of agricultural machines. 2. ed. St. Joseph, Michigan: **ASABE**, Copyright American Society of Agricultural and Biological Engineers, 62 p. 169-229. 2006.

STAFFORD, J. V. Force Prediction Models for Brittle and Flow Failure of Soil by Draught Tillage Tools. **J. agric. Eng. Res.** 29, 51-60. 1984.

STAFFORD, J. V. The Performance of a Rigid Tine in Relation to Soil Properties and Speed. **J. agric. Eng. Res.** 24, 41-56. 1979.

STAFFORD, J. V. Force prediction models for brittle and flow failure of soil by draught tillage tools. **J. Agric. Eng. Res**, 29(1): p.51-60. 1984.

STAFFORD, J. V. An application of critical state soil mechanics: the performance of rigid tines. **J. agric. Eng. Res.**, 26 (5) 387- 401. 1981.

SWICK, W. C.; PERUMPRAL, J. V. A model for predicting soil-tool interaction. **Journal of Terramechanics**, 25(l): p.43-56. 1988.

TERZAGHI, K. Theoretical Soil Mechanics. **John Wiley and Sons Inc.**, New York, NY, 1943.

UPADHYAYA, S. K *et al.* Advances in soil dynamics. St. Joseph, **American Society of Agricultural Engineers**, 313p. 1994.

UPADHYAYA, S. K., *et al.* "Application of the finite element method in agricultural soil mechanics". **Advances in Soil Dynamics 2**. 117-153. 2002

WARKOTSCH, W. The impact of harvesting operation on timber quality: causes and remedies. **South African Forestry Journal**, Jun. n.169. 1994.

WIERMANN, C. *et al.* Effects of various dynamics loads on stress and strain behavior of a Norfolk sandy loam. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.50, p.127-135. 1999.

WOOD, R. K; BURT, E. C. Thrust and motion resistance from soil tire stress measurements. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.30, n.5, p.1288-1292.1987.

XU, D.; MERMOUD, A. Topsoil properties as affected by tillage practices in North China. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, 9 Jan/Apr. v. 60, n. 1-2, p.11. 2001.

ZAIED, Moayad B *et al.* Effect of Tine Depth and Width on Soil Failure Angle, Cutting Coefficients and Power in Three-Dimensional Case: Computer Modeling. **World Journal of Agricultural Research**, Vol. 4, No. 1, 24-30. 2016.

ZELLENIN, A. N. Basic theory of the physics of soil cutting. 1<sup>st</sup> edition. Akademii Nauk SSR, Moscow, NIAE Translation. 1950.

ZHANG, Rui & JIANQIAO, Li. Simulation on mechanical behavior of cohesive soil by Distinct Element Method. **Journal of Terramechanics** 43 p. 303–316. 2006.

Anexos

## Cálculo auxiliar das equações matemáticas

### 1- Reece 1965 (Equação Universal de Mobilização do Solo)

#### Dados

$$\gamma = 1,51 \text{ g.cm}^3; \quad g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}; \quad \delta = 32,11^\circ; \quad w = 0,075\text{m}; \quad d = 0,21\text{m};$$

$$\phi = 33,34^\circ; \quad \alpha = 17,30^\circ; \quad c = 31,65 \text{ kPa}; \quad \beta = 28,33^\circ; \quad \text{sen}(\alpha + \phi) = 0,76^\circ;$$

$$\text{cota} = 3,21^\circ; \quad \text{cot} \beta = 1,85^\circ; \quad \text{cos}(\alpha + \delta) = 0,65^\circ; \quad \text{sen}(\alpha + \delta) = 0,76^\circ;$$

$$\text{cot}(\beta + \phi) = 0,54^\circ;$$

$$\beta = (45 - (\phi/2)) \quad \beta = (45 - (32,34/2)) \quad \beta = \underline{28,33}$$

Onde P é igual a:

$$P = (\gamma * g * d^2 * N_\gamma + c * d * N_c + q * d * N_q) * w$$

$$P = (1,51 * 9,81 * (0,21)^2 * 2,38) + (31,61 * 0,21 * 1,89) + 2,22 * 0,21 * 4,76 * 0,075$$

$$P = \underline{1,29}$$

$$N_\gamma = \left(\frac{1}{2}\right) / (\text{cot} \alpha + \text{cot} \beta) / [\text{cos}(\alpha + \delta) + \text{sen}(\alpha + \delta) * \text{cot}(\beta + \phi)]$$

$$N_\gamma = ((3,21 + 1,85) / 2) / (0,65 + (0,76 * 0,54)) \quad N_\gamma = \underline{2,38}$$

$$N_c = [1 + \text{cot} \beta * \text{cot}(\beta + \phi)] / \{\text{cos}(\alpha + \delta) + [\text{sen}(\alpha + \delta) * \text{cot}(\beta + \phi)]\}$$

$$N_c = 1 + (1,85 * 0,54) / (0,65 + (0,76 * 0,54)) \quad N_c = \underline{1,89}$$

$$N_q = 2 * N_\gamma \quad N_q = 2 * 2,38 \quad N_q = \underline{4,76}$$

$$q = \gamma * g * d \quad q = 1,51 * 9,81 * 0,15 \quad q = \underline{2,22}$$

## 2- Hettiaratchi e Reece (1967)

### Dados

$$\gamma = 1,51 \text{ g.cm}^3; \quad g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}; \quad \delta = 32,11^\circ; \quad w = 0,075\text{m}; \quad d = 0,21\text{m};$$

$$\phi = 33,34^\circ; \quad \alpha = 17,3^\circ; \quad c = 31,65 \text{ kPa}; \quad \beta = 28,33^\circ; \quad c_a = 3,28 \text{ kPa};$$

$$\text{sen}(\alpha + \phi) = 0,76^\circ; \quad \text{cot}\alpha = 3,21^\circ; \quad \text{cot}\beta = 1,85^\circ; \quad \text{cos}(\alpha + \delta) = 0,65^\circ;$$

$$\text{sen}(\alpha + \delta) = 0,76^\circ; \quad \text{cot}(\beta + \phi) = 0,54^\circ; \quad \text{cos}\mu = 0,47^\circ; \quad \text{cos}\phi = 0,84^\circ;$$

$$\text{tan}\mu = 1,85^\circ; \quad \text{sen}\mu = 0,88^\circ; \quad \text{sen}\phi = 0,55^\circ; \quad \text{sen}\theta = 0,90^\circ; \quad \text{tag}\phi = 0,66;$$

$$\text{sen}\delta = 0,53^\circ; \quad \frac{\text{sen}\delta}{\text{sen}\phi} = 0,76^\circ; \quad \text{sen}^{-1}\left(\frac{\text{sen}\delta}{\text{sen}\phi}\right) = 97^\circ; \quad \text{sen}\alpha = 0,30^\circ;$$

$$\text{cot}\mu = 0,54^\circ; \quad \text{sen}(\alpha + \theta) = 0,73^\circ; \quad \text{sen}\alpha + \text{cot}\mu = 0,16; \quad \text{tag}^{-1}(\text{sen}\alpha + \text{cot}\mu) = 9,09$$

$$\beta = (45 - (\phi/2)) \quad \beta = (45 - (33,34/2)) \quad \beta = \underline{28,33}$$

$$\mu = (45 + (\phi/2)) \quad \mu = (45 + (33,34/2)) \quad \mu = \underline{61,67}$$

$$N_\gamma = \left(\frac{1}{2}\right) / (\text{cot}\alpha + \text{cot}\beta) / [\text{cos}(\alpha + \delta) + \text{sen}(\alpha + \delta) * \text{cot}(\beta + \phi)]$$

$$N_\gamma = ((3,21 + 1,85) / 2) / (0,65 + (0,76 * 0,54)) \quad N_\gamma = \underline{2,38}$$

$$N_c = [1 + \text{cot}\beta * \text{cot}(\beta + \phi)] / \{\text{cos}(\alpha + \delta) + [\text{sen}(\alpha + \delta) * \text{cot}(\beta + \phi)]\}$$

$$N_c = 1 + (1,85 * 0,54) / (0,65 + (0,76 * 0,54)) \quad N_c = \underline{1,89}$$

$$N_{ca} = [1 - \text{cot}\alpha * \text{cot}(\beta + \phi)] / \{\text{cos}(\alpha + \delta) + [\text{sen}(\alpha + \delta) * \text{cot}(\beta + \phi)]\}$$

$$N_{ca} = 1 - (1,85 * 0,54) / (0,65 + (0,76 * 0,54)) \quad N_{ca} = \underline{-0,69}$$

$$N_q = 2 * N_\gamma \quad N_q = 2 * 2,38 \quad N_q = \underline{4,76}$$

$$q = \gamma^* g^* d \quad q = 1,51 * 9,81 * 0,21 \quad q = \underline{3,11}$$

$$P_2 = [\gamma^* g^* (d' + q / \{\gamma^* g\})^2 w' * N_{sy} + c^* w' * d' * N_{sc}] * K_b$$

$$P_2 = 1,51 * 9,81 * (0,21 + 3,11 / 1,51 * 9,81)^2 * (0,28 * 2,43) + (31,61 * 0,28 * 0,21 * 32,75) * 0,37$$

$$P_2 = \underline{19,79}$$

$$N_{sy} = \text{sen}^3 \mu * e^{\pi * \tan \phi} / (\cos \mu * \cos \phi)$$

$$N_{sy} = ((\text{sen} * (61,67 * (e^{(\pi * 0,66)})))^3 / (0,47 * 0,84)) \quad N_{sy} = \underline{1,28}$$

$$N_{sc} = \tan \mu * [\text{sen} \mu * (N_c + N_{ca} + 2 \tan \mu * N_q) + 1]$$

$$N_{sc} = 1,85 * (0,88 * (1,89 + -0,69 + (2 * 0,54) * 4,76) + 1) \quad N_{sc} = \underline{32,75}$$

$$K_b = [\tan^{-1} * (\text{sen} \alpha * \cot \mu)] / [\pi / 2 - \mu]$$

$$K_b = (\tan^{-1} * (0,30 * 0,54) / 90^\circ - 61,67) \quad K_b = \underline{0,32}$$

$$\theta = (\delta + \phi + 90^\circ + \text{sen}^{-1}(\frac{\text{sen} \delta}{\text{sen} \phi}) / 2) \text{ em radianos}$$

$$\theta = (32,11 + 33,34 + 90^\circ + 97) / 2 \quad \theta = \underline{115,73}$$

$$K = \tan \mu * \text{sen}(\alpha + \theta) / (2 * \text{sen} \theta)$$

$$K = (1,85 * 0,73) / (2 * 0,90) \quad K = \underline{0,75}$$

$$w' = d/k \quad w' = 0,21 / 0,75 \quad w' = \underline{0,28}$$

### 3- Goldwin e Spoor (1977)

#### Dados

$$\gamma = 1,51 \text{ g.cm}^3; \quad g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}; \quad \delta = 32,11^\circ; \quad w = 0,075\text{m};$$

$$d = 0,21\text{m}; \phi = 33,34^\circ; \quad \alpha = 17,3^\circ; \quad c = 31,65 \text{ kPa}; \quad \beta = 28,33^\circ;$$

$$c_a = 3,25 \text{ kPa}; \cot\alpha = 3,21^\circ; \quad \cot\beta = 1,85^\circ; \quad \cos(\alpha + \delta) = 0,65^\circ;$$

$$\text{sen}(\alpha + \delta) = 0,76^\circ; \quad \cot(\beta + \phi) = 0,54^\circ$$

$$\beta = (45 - (\phi/2)) \quad \beta = (45 - (32,34/2)) \quad \beta = \underline{28,33}$$

$$N_\gamma = \left(\frac{1}{2}\right) / (\cot\alpha + \cot\beta) / [\cos(\alpha + \delta) + \text{sen}(\alpha + \delta) * \cot(\beta + \phi)]$$

$$N_\gamma = ((3,21 + 1,85) / 2) / (0,65 + (0,76 * 0,54)) \quad N_\gamma = \underline{2,38}$$

$$N_c = [1 + \cot\beta * \cot(\beta + \phi)] / \{\cos(\alpha + \delta) + [\text{sen}(\alpha + \delta) * \cot(\beta + \phi)]\}$$

$$N_c = 1 + (1,85 * 0,54) / (0,65 + (0,76 * 0,54)) \quad N_c = \underline{1,89}$$

$$N_{ca} = [1 - \cot\alpha * \cot(\beta + \phi)] / \{\cos(\alpha + \delta) + [\text{sen}(\alpha + \delta) * \cot(\beta + \phi)]\}$$

$$N_{ca} = 1 - (1,85 * 0,54) / (0,65 + (0,76 * 0,54)) \quad N_{ca} = \underline{-0,69}$$

$$N_q = 2 * N_\gamma \quad N_q = 2 * 2,38 \quad N_q = \underline{4,76}$$

$$q = \gamma * g * d \quad q = 1,51 * 9,81 * 0,21 \quad q = \underline{3,11}$$

$$s = r * \text{sen } \rho' = [1 - (d * \cot\alpha / r)^2]^{1/2}$$

$$s = 0,68 * (1 - ((0,21 * 3,21) / 0,68)^2)^{1/2} \quad s = \underline{0,32}$$

$$r = d * [\cot\beta + \cot\alpha] \quad r = 0,21 * (1,85 + 3,21) \quad r = \underline{1,06}$$

#### 4- McKyes & Ali (1977)

##### Dados

$$\gamma = 1,51 \text{ g.cm}^{-3}; \quad g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}; \quad \delta = 32,11^\circ; \quad w = 0,075\text{m}; \quad d = 0,21\text{m};$$

$$\phi = 32,34^\circ; \quad \alpha = 17,3^\circ; \quad c = 31,65 \text{ kPa}; \quad \beta = 28,33^\circ; \quad c_a = 3,25 \text{ kPa};$$

$$\cot\alpha = 3,21^\circ; \quad \cot\beta = 1,85^\circ; \quad \cos(\alpha + \delta) = 0,65^\circ; \quad \text{sen}(\alpha + \delta) = 0,76^\circ;$$

$$\cot(\beta + \phi) = 0,54^\circ$$

$$\beta = (45 - (\phi/2)) \quad \beta = (45 - (32,34/2)) \quad \beta = \underline{28,33}$$

Onde P é igual a:

$$P = (\gamma * g * d^2 * N_\gamma + c * d * N_c + q * d * N_q + c_a * d * N_{ca}) * w$$

$$P = (1,51 * 9,81 * (0,21)^2 * 2,38) + (31,61 * 0,21 * 1,89) + (2,22 * 0,21 * 4,76) + (3,25 * 0,21 * 0,69) * 0,075$$

$$P = \underline{1,26}$$

$$N_\gamma = \left(\frac{1}{2}\right) / (\cot\alpha + \cot\beta) / [\cos(\alpha + \delta) + \text{sen}(\alpha + \delta) * \cot(\beta + \phi)]$$

$$N_\gamma = ((3,21 + 1,85) / 2) / (0,65 + (0,76 * 0,54)) \quad N_\gamma = \underline{2,38}$$

$$N_c = [1 + \cot\beta * \cot(\beta + \phi)] / \{\cos(\alpha + \delta) + [\text{sen}(\alpha + \delta) * \cot(\beta + \phi)]\}$$

$$N_c = 1 + (1,85 * 0,54) / (0,65 + (0,76 * 0,54)) \quad N_c = \underline{1,89}$$

$$N_q = 2 * N_\gamma \quad N_q = 2 * 2,38 \quad N_q = \underline{4,76}$$

$$N_{ca} = [1 - \cot\alpha * \cot(\beta + \phi)] / \{\cos(\alpha + \delta) + [\text{sen}(\alpha + \delta) * \cot(\beta + \phi)]\}$$

$$N_{ca} = 1 - (1,85 * 0,54) / (0,65 + (0,76 * 0,54)) \quad N_{ca} = \underline{-0,69}$$

$$q = *g*d \quad q = 1,51 * 9,81 * 0,21 \quad q = \underline{3,11}$$

## 5- Grisso et al. (1980)

### Dados

$$\gamma = 1,51 \text{ g.cm}^3; \quad g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}; \quad \delta = 32,11^\circ; \quad w = 0,075\text{m};$$

$$d = 0,21\text{m}; \phi = 33,34^\circ; \quad \alpha = 17,3^\circ; \quad c = 31,65 \text{ kPa}; \quad \beta = 28,33^\circ;$$

$$c_a = 3,25 \text{ kPa}; \quad h = 0\text{m}; \quad \cos \phi = 0,84^\circ; \quad \text{sen} \beta = 0,47^\circ;$$

$$\cot \alpha = 3,21^\circ; \quad \cot \beta = 1,85^\circ; \quad \text{sen} \phi = 0,55^\circ; \quad \text{sen} (\beta + \phi) = 0,88^\circ;$$

$$\text{sen} (\alpha + \beta + \phi + \delta) = 0,93^\circ; \quad \cos (\alpha + \beta + \phi) = 0,19^\circ \quad \text{sen} \alpha = 0,3$$

$$\text{sen} (\alpha + \beta + \phi) = 0,98$$

$$\beta = (45 - (\phi/2)) \quad \beta = (45 - (32,3/2)) \quad \beta = \underline{28,85}$$

$$N_\gamma = \frac{A}{wd^2} * \left[ \frac{2 * k_0 * z * \text{sen} \phi + w * \text{sen} (\beta + \phi)}{\text{sen} (\alpha + \beta + \phi + \delta)} \right]$$

$$N_\gamma = \frac{0,11}{0,075 * (0,21)^2} * \left[ \frac{2 * 0,45 * 0,07 * 0,55 + 0,075 * 0,88}{0,93} \right] \quad N_\gamma = \underline{3,56}$$

$$A = \frac{d^2}{2} * \left( 1 + \frac{h}{d} \right) * \left\{ \left( 1 + \frac{h}{d} \right) * \cot \alpha + \cot \beta \right\}$$

$$A = \frac{(0,21)^2}{2} * \left( 1 + \frac{0}{0,21} \right) * \left\{ \left( 1 + \frac{0}{0,21} \right) * 3,21 + 1,85 \right\} \quad A = \underline{0,11}$$

$$N_c = \frac{\cos \phi * \left( \frac{2A}{wd} + \frac{1}{\text{sen} \beta} \right)}{\text{sen} (\alpha + \beta + \phi + \delta)} \quad N_c = \frac{0,84 * \left( \frac{2 * 0,11}{0,075 * 0,21} + \frac{1}{0,47} \right)}{0,93} \quad N_c = \underline{14,59}$$

$$N_{ca} = \frac{\left(1 + \frac{h}{d}\right) * \cos(\alpha + \beta + \phi)}{\sin(\alpha + \beta + \phi + \delta) * \sin \alpha} \quad N_{ca} = \frac{\left(1 + \frac{0}{0,21}\right) * 0,19}{0,93 * 0,30} \quad N_{ca} = \underline{0,66}$$

$$z = (d+h) / 3 \quad z = (0,21+0) / 3 \quad z = \underline{0,07}$$

$$K_0 = (1 - \sin \phi) \quad K_0 = (1 - 0,55) \quad K_0 = \underline{0,47}$$

## 6- Perumpral et al. (1983)

### Dados

$$\gamma = 1,51 \quad g = 9,81 \delta = 32,11 \quad w = 0,075 \quad d = 0,21 \quad \phi = 33,34$$

$$\alpha = 17,3 \quad c = 31,65 \quad \beta = 28,33 \quad c_a = 3,25 \quad \sin \alpha = 0,30 \quad \sin \phi = 0,55$$

$$\cos \phi = 0,84 \quad \sin(\phi + \beta) = 0,88 \quad \tan \phi = 0,66 \quad \cot \alpha = 3,21 \quad \sin \beta = 0,47$$

$$\cos \beta = 0,88 \quad \cos \alpha = 0,95 \quad \sin \delta = 0,53 \quad \cot \beta = 1,85 \quad \sin(\alpha + \phi + \beta + \delta) = 0,93$$

$$\cos(\alpha + \phi + \beta) = 0,19$$

$$\beta = (45 - (\phi/2)) \quad \beta = (45 - (32,3/2)) \quad \beta = \underline{28,85}$$

$$F_a = c_a * w * d * (1 + h/d) * \sin \alpha$$

$$F_a = 3,25 * 0,075 * 0,21 * (1 + 0/0,21) * 0,30 \quad F_a = \underline{0,02}$$

$$SF_2 = R * \tan \phi \quad SF_2 = 0,001 * 0,66 \quad SF_2 = \underline{0,003}$$

$$CF_1 = c * w * d / \sin \beta \quad CF_1 = 31,65 * 0,075 * 0,21 / 0,47 \quad CF_1 = \underline{1,05}$$

$$CF_2 = c * A' \quad CF_2 = 31,65 * 0,11 \quad CF_2 = \underline{3,54}$$

$$P_s = \gamma * w * A' \quad P_s = 1,51 * 0,075 * 0,10 \quad P_s = \underline{0,01}$$

$$R = \gamma * K_o * Z * A' \quad R = 1,51 * 0,45 * 0,07 * 0,1 \quad R = \underline{0,001}$$

$$z = 1/3 * (d + h) \quad z = 1/3 * (0,21 + 0) \quad z = \underline{0,07}$$

$$A' = 0,5 * d^2 * (1 + h/d) * [(1 + h/d) * \cot \alpha + \cot \beta]$$

$$A' = 0,5 * (0,21)^2 * (1 + 0/0,21) * (1 + 0/0,21) * 3,21 + 1,85 \quad A' = \underline{0,11}$$

$$K_o = (1 - \sin \phi) \quad K_o = 1 - 0,55 \quad K_o = \underline{0,45}$$

**Quadro 2** - Comparação dos resultados da demanda de força medido a campo, com os diferentes modelos matemáticos na integral e com os simplificados.

Caso	Força a campo (kN)	Reece (1965)	S. Reece (1965)	Godwin & Spoor (1977)	S. Godwin & Spoor (1977)	Hettiaratchi & Reece (1967)	S. Hettiaratchi & Reece (1967)	McKye s & Ali (1977)	S. McKye s & Ali (1977)	Grisso <i>et al.</i> (1980)	S. Grisso <i>et al.</i> (1980)	Perumpral <i>et al.</i> (1983)	S. Perumpral <i>et al.</i> (1983)
Salvador <i>et al.</i> (2008)	<b>13,47</b>	3,08	2,96	12,56	4,66	13,61	10,10	1,73	0,52	19,44	17,57	19,11	17,34
Rosa <i>et al.</i> (2011)	<b>18,57</b>	3,11	2,96	8,00	3,06	12,72	8,02	1,65	0,53	8,63	7,73	8,37	7,52
Machado & Trein (2013A)	<b>3,17</b>	2,33	2,28	4,21	1,56	5,80	3,67	0,99	0,32	6,20	5,87	6,04	5,75
Machado & Trein (2013A)T <sub>2</sub>	<b>3,70</b>	2,60	2,55	5,17	1,91	7,00	4,46	1,12	0,37	7,48	7,08	6,29	6,93
Machado & Trein (2013B)	<b>7,73</b>	2,33	2,29	5,09	5,04	6,36	4,11	1,20	0,35	6,82	6,49	6,55	6,31
Machado & Trein (2013B) T <sub>2</sub>	<b>4,18</b>	1,98	1,95	3,77	3,70	4,84	3,08	1,00	0,28	5,18	4,93	4,98	4,80
Bellé <i>et al.</i> (2014)	<b>4,11</b>	0,55	0,54	5,29	2,22	6,27	5,17	0,27	0,10	9,05	8,60	8,92	8,50
Santos <i>et al.</i> (2015)	<b>3,27</b>	1,88	1,84	3,68	1,61	5,16	3,82	1,06	0,40	5,93	5,57	5,78	5,48
Machado <i>et al.</i> (2015)	<b>4,36</b>	4,01	3,75	18,33	7,26	24,41	17,23	2,53	0,86	24,62	21,19	24,22	20,88

Fonte: Elaboração da autora (2021), a partir dos dados da pesquisa.