UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE APARELHO AUTOMÁTICO PARA MEDIÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO

Geovanne Pereira Furriel

[UFG] & [EMC] [Goiânia - Goiás - Brasil] 25 de outubro de 2016





TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: [X] Dissertação [] Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Nome completo do autor: GEOVANNE PEREIRA FURRIEL

Título do trabalho: DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE APARELHO AUTOMÁTICO PARA ME-DIÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

Assinatura do (a) autor (a)

Data: 16 / 10 / 2016

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO



Ata de Dissertação de Mestrado

Ata da sessão de julgamento da Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação, área de concentração Engenharia Elétrica, do candidato **Geovanne Pereira Furriel** realizada em 16 de agosto de 2016.

Aos dezesseis dias do mês de agosto de dois mil e dezesseis, às 14:00 horas, na sala Caryocar Brasiliensis, bloco "A" da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG), reuniram-se os seguintes membros da Comissão Examinadora designada pela Coordenadoria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação: Os Doutores Wesley Pacheco Calixto - Orientador (EMC/UFG), Aylton José Alves - IFG, José Geraldo da Silva - EMBRAPA, Marco Antônio Assfalk de Oliveira - EMC e Marcelo Gonçalves Narciso -EMBRAPA, para julgar a Dissertação de Mestrado de Geovanne Pereira Furriel, intitulada "Desenvolvimento e Validação de Aparelho Automático para Medição da Compactação do Solo", apresentada pelo Candidato como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre, em conformidade com a regulamentação em vigor. O Professor Doutor Wesley Pacheco Calixto Presidente da Comissão, abriu a sessão e apresentou o candidato que discorreu sobre seu trabalho, após o que, foi argüido pelos membros da Comissão na seguinte ordem: Aylton José Alves, José Geraldo da Silva, Marco Antônio Assfalk de Oliveira e Marcelo Gonçalves Narciso. A parte pública da sessão foi então encerrada e a Comissão Examinadora reuniu-se em sessão reservada para deliberar. A Comissão julgou então que o Candidato, tendo demonstrado conhecimento suficiente, capacidade de sistematização e argumentação sobre o tema de sua Dissertação, foi considerado aprovado e deve satisfazer as exigências listadas na Folha de Modificação de Dissertação de Mestrado, em anexo a esta Ata, no prazo máximo de 60 dias, ficando o professor orientador responsável por atestar o cumprimento dessas exigências. Os membros da Comissão Examinadora descreveram as justificativas para tal avaliação em suas respectivas Folhas de Avaliação, anexas a esta Ata. Nada mais havendo a tratar, o presidente da Comissão declarou encerrada a sessão. Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-graduação desta Universidade, a presente Ata foi lavrada, lida e, julgada conforme, segue assinada pelos membros da Comissão supracitados e pelo Candidato. Goiânia, 16 de agosto de 2016.

Comissão Examinadora Designada

Wesley Pacheco Calixto - Orientador (EMC/UFG) (Avaliação: 10120090 mellellulu della Avlton José Alves -IFG (Avaliação: +PM ade José Geraldo da Silva - EMBRAPA (Avaliação: Mares antonio andall de aberra Marco Antônio Assfalle de Oliveira - EMC (Avaliação: Aprovado avelo arcup -1 Marcelo Gonçalves Narciso-EMBRAPA (Avaliação:

Candidato:

Geovanne Pereira Furriel

Av.Universitária, nº 1488, Qd.86, Bl.A – 3º piso – 74605-010 - Setor Leste Universitário -Goiânia – Goiás Fones: (62) 3209 6293 – (62) 3209-6079 Telefax: (62) 3209-6292 Home Page:www.mestrado.emc.ufg.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE APARELHO AUTOMÁTICO PARA MEDIÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO

Geovanne Pereira Furriel

Dissertação apresentada à Banca Examinadora como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação pela Universidade Federal de Goiás (UFG), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), sob a orientação do Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto e co-orientação do Prof. Dr. Aylton José Alves

> [UFG] & [EMC] [Goiânia - Goiás - Brasil] 25 de outubro de 2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) Sistemas da Bibliotecas da UFG, GO - Brasil

F983d Furriel, Geovanne Pereira, 06/07/1989.
Desenvolvimento e validação de aparelho automático para medição da compactação do solo [manuscrito]/ Geovanne Pereira Furriel. – [Goiânia - Goiás - Brasil]: [UFG] & [EMC], 25 de outubro de 2016.
110 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto; co-orientador: Prof. Dr. Aylton José Alves

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás (UFG), Escola de Engenharia Elétrica e de Computação (EEEC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2016.

Bibliografia. Anexos. Apêndice.

1. Compactação do solo - Teses. 2. Instrumentação -Metrologia - Teses. 3. Modelos matemáticos & computacionais - Teses. 4. Aparato para coleta de dados. 5. Geoprospecção. I. Furriel, Geovanne Pereira; II. Calixto, Wesley Pacheco; Alves, Aylton José. III. Universidade Federal de Goiás. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título

CDU 621.3

Copyright © 25 de outubro de 2016 by Federal University of Goias - UFG, Brazil. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, eletronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Library of UFG, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de aparelho automático para medição da compactação do solo através da resistência a penetração. Comumente, esta aferição é realizada por células de carga. Na metodologia e aparelho proposto, a resistência à penetração será medida diretamente pela corrente aplicada ao motor que realiza a penetração da haste no solo, em substituição da célula de carga. Os dados coletados são armazenados em *Datalogger* e posteriormente tratados de forma que possibilite a análise e a geração de mapas do terreno com valores da compactação do solo até determinada profundidade. Os resultados apresentados indicam maior precisão em relação ao método utilizado e controle sobre os parâmetros fundamentais da coleta de dados.

DEVELOPMENT AND VALIDATION OF AUTOMATIC DEVICE FOR MEASUREMENT OF SOIL COMPACTION

ABSTRACT

The purpose of this work is to present the development of automatic instrument for measuring soil compaction through penetration resistance. Commonly, this measurement is performed by load cells. In the proposed methodology and apparatus, the penetration resistance is directly measured by the current applied to the motor that performs penetration of the rod into the soil, thus replacing the load cell. The collected data are stored in Datalogger and further processed in order to enable analysis and the generation of maps of the surface with soil compaction values up to a certain depth. The presented results indicate greater precision and control of the fundamental parameters of data acquisition.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAI	CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO 19						
CAI	PÍTULO 2 COMPACTAÇÃO DO SOLO						
2.1	Origem e definições						
2.2	Fatores causadores e efeito da compactação do solo 27						
2.3	Métodos de investigação da compactação do solo 28						
2.3.1	Método de análise laboratorial						
2.3.2	Método de análise no campo						
2.4	Considerações						
CAI	PÍTULO 3 PENETRÔMETROS						
3.1	Penetrômetros						
3.2	Norma de utilização 36						
3.3	Tipos de penetrômetros						
3.4	Mecânica dos penetrômetros						
3.5	Considerações						
CAI	PÍTULO 4 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS EM PENETRÔ-						
	METROS						
4.1	Sensores						
4.2	Motor de corrente contínua 49						
4.3	Tipos de motores de corrente contínua						
4.4	Controle de velocidade						
4.5	Considerações						

\mathbf{CA}	PÍTULO 5 METODOLOGIA 59	9
5.1	Projeto mecânico	9
5.2	Projeto eletrônico	1
5.3	Validação do aparelho 6	4
5.4	Considerações	6
CA	PÍTULO 6 RESULTADOS	9
6.1	Instrumentos utilizados	9
6.2	Verificação dos parâmetros do MCC	7
6.3	Preparação das amostras	1
6.4	Resultados obtidos com o equipamento desenvolvido 8	4
CA	PÍTULO 7 CONCLUSÃO 8	9
7.1	Contribuições do trabalho	0
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	1
AN	EXO A FOLHA DE DADOS DO MOTOR 93	3
AN	EXO A ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DESENVOLVIDO 9	5
RE	FERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1

LISTA DE FIGURAS

Pág.

2.1	Efeito da compactação no solo, (a) solo pouco compactado e (b) solo compactado.	26
2.2	Ferramental utilizado para coleta, (a) trado holandês, (b) trado calador,	-
	(c) trado de caneco e (d) pá de corte	29
2.3	Extrator ou anel volumétrico.	29
2.4	Curva de compactação relacionando teor de umidade e peso específico. $% \left({{{\bf{x}}_{{\rm{s}}}}} \right)$.	31
3.1	Haste do penetrômetro.	36
3.2	Medição utilizando penetrômetro comercial.	36
3.3	Pontas padrão da haste de penetração, (a) cone tipo a, (b) cone tipo b e	
	(c) penetrômetro estático.	37
3.4	Penetrômetro Dinâmico.	38
3.5	Penetrômetro Estático.	39
3.6	Engrenagens acopladas diretamente.	41
3.7	Parafuso de potência detalhado	42
3.8	Diagrama de forças para (a) elevação e (b) abaixamento da carga	43
4.1	Célula de carga do tipo feixe de flexão (a) esquemático e (b) real	48
4.1 4.2	Célula de carga do tipo feixe de flexão (a) esquemático e (b) real Célula de carga com proteção de sobrecarga (a) esquemático e (b) real	48 48
4.1 4.2 4.3	Célula de carga do tipo feixe de flexão (a) esquemático e (b) real Célula de carga com proteção de sobrecarga (a) esquemático e (b) real Sentido da força aplicada nos condutores da armadura no MCC de 2 polos.	48 48 50
 4.1 4.2 4.3 4.4 	Célula de carga do tipo feixe de flexão (a) esquemático e (b) real Célula de carga com proteção de sobrecarga (a) esquemático e (b) real Sentido da força aplicada nos condutores da armadura no MCC de 2 polos. Circuito equivalente do MCC (a) normal e (b) simplificado	48 48 50 51
 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 	Célula de carga do tipo feixe de flexão (a) esquemático e (b) real Célula de carga com proteção de sobrecarga (a) esquemático e (b) real Sentido da força aplicada nos condutores da armadura no MCC de 2 polos. Circuito equivalente do MCC (a) normal e (b) simplificado MCC excitação separada	48 48 50 51 51
$\begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \\ 4.3 \\ 4.4 \\ 4.5 \\ 4.6 \end{array}$	Célula de carga do tipo feixe de flexão (a) esquemático e (b) real Célula de carga com proteção de sobrecarga (a) esquemático e (b) real Sentido da força aplicada nos condutores da armadura no MCC de 2 polos. Circuito equivalente do MCC (a) normal e (b) simplificado	48 48 50 51 51 52
 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 	Célula de carga do tipo feixe de flexão (a) esquemático e (b) real Célula de carga com proteção de sobrecarga (a) esquemático e (b) real Sentido da força aplicada nos condutores da armadura no MCC de 2 polos. Circuito equivalente do MCC (a) normal e (b) simplificado	48 48 50 51 51 52 52
$\begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \\ 4.3 \\ 4.4 \\ 4.5 \\ 4.6 \\ 4.7 \\ 4.8 \end{array}$	Célula de carga do tipo feixe de flexão (a) esquemático e (b) real Célula de carga com proteção de sobrecarga (a) esquemático e (b) real Sentido da força aplicada nos condutores da armadura no MCC de 2 polos. Circuito equivalente do MCC (a) normal e (b) simplificado	 48 50 51 51 52 52 53
$\begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \\ 4.3 \\ 4.4 \\ 4.5 \\ 4.6 \\ 4.7 \\ 4.8 \\ 4.9 \end{array}$	Célula de carga do tipo feixe de flexão (a) esquemático e (b) real Célula de carga com proteção de sobrecarga (a) esquemático e (b) real Sentido da força aplicada nos condutores da armadura no MCC de 2 polos. Circuito equivalente do MCC (a) normal e (b) simplificado	 48 50 51 52 52 53 55
$\begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \\ 4.3 \\ 4.4 \\ 4.5 \\ 4.6 \\ 4.7 \\ 4.8 \\ 4.9 \\ 4.10 \end{array}$	Célula de carga do tipo feixe de flexão (a) esquemático e (b) real Célula de carga com proteção de sobrecarga (a) esquemático e (b) real Sentido da força aplicada nos condutores da armadura no MCC de 2 polos. Circuito equivalente do MCC (a) normal e (b) simplificado	 48 48 50 51 52 52 53 55 56
$\begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \\ 4.3 \\ 4.4 \\ 4.5 \\ 4.6 \\ 4.7 \\ 4.8 \\ 4.9 \\ 4.10 \\ 4.11 \end{array}$	Célula de carga do tipo feixe de flexão (a) esquemático e (b) real Célula de carga com proteção de sobrecarga (a) esquemático e (b) real Sentido da força aplicada nos condutores da armadura no MCC de 2 polos. Circuito equivalente do MCC (a) normal e (b) simplificado	 48 48 50 51 51 52 52 53 55 56
$\begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \\ 4.3 \\ 4.4 \\ 4.5 \\ 4.6 \\ 4.7 \\ 4.8 \\ 4.9 \\ 4.10 \\ 4.11 \end{array}$	Célula de carga do tipo feixe de flexão (a) esquemático e (b) real Célula de carga com proteção de sobrecarga (a) esquemático e (b) real Sentido da força aplicada nos condutores da armadura no MCC de 2 polos. Circuito equivalente do MCC (a) normal e (b) simplificado MCC excitação separada	 48 48 50 51 51 52 52 53 55 56
$\begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \\ 4.3 \\ 4.4 \\ 4.5 \\ 4.6 \\ 4.7 \\ 4.8 \\ 4.9 \\ 4.10 \\ 4.11 \\ 5.1 \end{array}$	Célula de carga do tipo feixe de flexão (a) esquemático e (b) real Célula de carga com proteção de sobrecarga (a) esquemático e (b) real Sentido da força aplicada nos condutores da armadura no MCC de 2 polos. Circuito equivalente do MCC (a) normal e (b) simplificado	 48 48 50 51 51 52 52 53 55 56
$\begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \\ 4.3 \\ 4.4 \\ 4.5 \\ 4.6 \\ 4.7 \\ 4.8 \\ 4.9 \\ 4.10 \\ 4.11 \\ 5.1 \end{array}$	Célula de carga do tipo feixe de flexão (a) esquemático e (b) real Célula de carga com proteção de sobrecarga (a) esquemático e (b) real Sentido da força aplicada nos condutores da armadura no MCC de 2 polos. Circuito equivalente do MCC (a) normal e (b) simplificado	 48 48 50 51 52 52 53 55 56 56 60

5.3	Funcionamento da ponte-H com sentido de giro do MCC (a) horário e	
	(b) anti-horário.	63
5.4	Acoplamento de carga ao sistema (a) frontal, (b) lateral e (c) isométrica.	65
5.5	Modulo padrão de medição da compactação	65
6.1	Penetrômetro desenvolvido, (a) equipamento completo, (b) sistema de	
	transmissão utilizado e (c) detalhe do isolamento	70
6.2	Placa com unidade central de processamento.	71
6.3	Placa com o módulo de aquisição e <i>Datalogger</i>	71
6.4	Esquemático da ponte-H desenvolvida.	72
6.5	Driver da ponte-H, (a) esquemático e (b) placa desenvolvida.	73
6.6	Módulo de controle do <i>driver</i>	73
6.7	Placa de conexão do sensor de corrente utilizado.	74
6.8	Caixa de transmissão desenvolvida, (a) vista superior, (b) motor acoplado	
	a caixa de transmissão e (c) engrenagem em detalhe	75
6.9	Motor de corrente contínua utilizado.	76
6.10	Hastes de penetração utilizada, (a) hastes de cobre e aço e (b) haste	
	conectada ao equipamento proposto.	76
6.11	Medição com carga de $10kg$, $15kg \in 20kg$.	78
6.12	Medição com carga de $30kg$, $40kg$ e $45kg$.	79
6.13	Medição com carga de $50kg$, $55kg \in 60kg$.	80
6.14	Medição com carga de $70kg$, $80kg$ e $90kg$.	80
6.15	Corrente consumida aplicado durante o experimento.	81
6.16	Potência consumida aplicado durante o experimento.	81
6.17	Modelo padrão de solo para medição, (a) vista lateral com os moldes e	
	(b) vista superior com o solo.	82
6.18	Compactação gerada experimentalmente e compactação medida no equi-	
	pamento desenvolvido.	84
6.19	Erro pontual na medição.	84
6.20	Representação do perfil de compactação do solo	85
6.21	Comparação entre penetrômetro comercial e o desenvolvido em solo seco.	86
6.22	Comparação entre penetrômetro comercial e o desenvolvido em solo re-	
	cém umedecido	86
6.23	Comparação entre penetrômetro comercial e o desenvolvido em solo úmido.	87

LISTA DE TABELAS

Pág.

5.1	Formato de armazenamento de dados	•	•	• •			•		63
6.1	Parâmetros para criação da coluna padrão de solo.								83

LISTA DE SÍMBOLOS

V_m	_	Volume de solo no molde utilizado.
N_b	_	Número de bateladas.
P_m	_	Peso da massa utilizada no ensaio Proctor.
h_s	_	Altura da qual é liberado a massa no ensaio Proctor.
E	_	Esforço de compactação.
γ_s	_	Peso específico do solo.
ω_u	_	Teor de umidade.
$\gamma_{d_{max}}$	_	Máxima da densidade do solo.
$\omega_{u_{max}}$	_	Teor de umidade máxima do solo.
$P(\omega_{d_{max}}, \gamma_{d_{max}})$	—	Ponto de umidade ideal.
α	_	Ângulo do cone de penetração.
H_{pen}	_	Comprimento da haste de penetração.
F_a	_	Força aplicada na haste de penetração.
A_c	_	Área do cone de penetração.
H_b	_	Espaço para deslocamento da massa para testes em
		penetrômetros de impacto.
m	_	Massa em movimento do penetrômetro de impacto.
M	_	Massa total do penetrômetro de impacto sem a massa m .
g	_	Aceleração da gravidade.
x	_	Espaço percorrido pela haste no solo em cada batelada.
β	_	Ângulo entre a haste de penetração e o solo.
V_L	_	Velocidade linear.
r_1	_	Raio da engrenagem motora.
ϕ_1	_	Diâmetro da engrenagem motora.
ω_1	_	Velocidade angular em rad/s da engrenagem motora.
n_1	_	Velocidade angular em rpm da engrenagem motora.
r_2	_	Raio da engrenagem movida.
ϕ_2	—	Diâmetro da engrenagem movida.
ω_2	—	Velocidade angular em rad/s da engrenagem movida.
n_2	—	Velocidade angular em rpm da engrenagem movida.
T	—	Torque.
F_t	—	Força tangencial aplicada na engrenagem.
r	_	Raio da engrenagem.
T_1	—	Torque aplicado pela engrenagem motriz.
T_2	—	Torque aplicado no fuso helicoidal devido à T_1 .
r_2	—	Diferença entre o raio da engrenagem movida e o raio do fuso helicoidal.
d_m	_	Diâmetro médio da rosca.
ρ	_	Passo do fuso helicoidal.
,		

λ	_	Ângulo de entrada da rosca.
F_H	_	Decomposição horizontal da força aplicada no fuso helicoidal.
F_V	_	Decomposição vertical da força aplicada no fuso helicoidal.
N	_	Força normal resultante.
f	_	Coeficiente de atrito.
P_R	_	Forças resultantes à direita.
P_L	_	Forças resultantes à esquerda.
l	_	Equivalente ao passo, distancia entre duas faces do fuso quando
		planificado.
S_r	_	Função que representa a resposta do sensor.
S_m	—	Valor medido pelo sensor na geração da função representativa.
A_s	—	Valor base da função de resposta do sensor.
B_s	_	Angulação da curva do sensor.
k	—	Fator de potenciação.
y_1	_	Abertura de proteção da célula de carga.
y_2	_	Abertura de proteção da célula de carga.
E_A	_	Fonte de tensão ideal.
V_a	_	Tensão na armadura do MCC.
I_A	_	Corrente da armadura do MCC.
R_a	—	Resistência da armadura.
V_2	_	Tensão de campo.
V_{escova}	—	Queda de tensão nas escovas do MCC.
L_F	—	Representação da parte indutiva do enrolamento do MCC.
R_F	—	Representação da parte resistiva do enrolamento do MCC.
R_{ajuste}	—	Resistor variável para controle da corrente de campo.
K	—	Constante do motor.
ϕ	—	Fluxo de corrente no MCC.
ω	—	Velocidade angular.
$ au_{ind}$	_	Torque induzido aplicado pelo MCC.
V	—	Tensão genérica aplicada no MCC para equacionamento.
$P_o t$	_	Potência aplicada pelo MCC.
T_g	_	Torque gerado pelo motor.
L_A	—	Indutância dos enrolamentos do estator.
E_g	—	Força contra-eletromotriz.
J_L	—	Momento de inércia do motor.
K_W	—	Constante de torque do motor.
T_f	—	Torque constante de atrito.
$J_m d\omega/dt$	—	Torque originado pelo momento de inércia do motor.
T_L	—	Torque resistente da carga.
$J_L d\omega/dt$	—	Torque de inércia da carga.

$K_v \cdot \omega$	_	Torque de atrito viscoso da carga.
k_q	_	Constante do motor trabalhando como gerador.
T_{a}	_	Expressão mecânica do torque motor.
$ {R}$	_	Resistência entre os terminais do motor.
ω_{nl}	_	Velocidade do motor sem carga.
ώ	_	Velocidade de saída antes do controle.
T_{as}	_	Torque gerado pelo motor com o rotor bloqueado.
T_1^{j}	_	Tempo inicial do processo de medição.
V_1	_	Tensão aplicada aos terminais do motor.
I_1	_	Corrente consumida.
D_1	_	Profundidade alcançada pela haste.
Q1	_	Dispositivo de chaveamento.
Q2	_	Dispositivo de chaveamento.
Q3	_	Dispositivo de chaveamento.
Q4	-	Dispositivo de chaveamento.
V_{out}	_	Tensão de saída do conversor.
V_{in}	-	Tensão de entrada no conversor.
T_{on}	_	Tempo que o dispositivo permanece em condução.
T_{off}	_	Tempo que o dispositivo permanece aberto.
B	_	Módulos para avaliação da compactação do solo.
A	_	Acoplamento externo utilizado para manter os módulos B sobrepostos.
ξ	_	Esforço variável de compactação.
δ	_	Peso específico.
OUT_1	_	Saída da ponte $-H$ para o motor.
OUT_2	_	Saída da ponte $-H$ para o motor.
ξ_1	_	Esforço de variável de compactação na primeira camada.
Δh_1	_	Percentual de compactação na primeira camada
$h_{n'}$	—	Altura antes da compactação.
h_{n-1}	—	Altura da camada anterior.
h_n	_	Altura do solo apos a compactação .
K_e	-	Parâmetro de comparação entre o valor esperado e medido da
λ		Numero de colhos enlicado en colo
$I \mathbf{v}_b$	_	Numero de goipes aplicado ao solo.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MCC	_	Motor de Corrente Contínua
ASAE	_	American Society of Agricultural Engineers.
ASABE	_	American Society of Agricultural & Biological Engineers.
CPT	_	Cone Penetration Test.
MCC	-	Motor de Corrente Contínua.
I_C	_	Índice do cone.
RP	_	Resistência à penetração.
TDR	_	Reflectometria no domínio do tempo.
GPS	_	Sistema de posicionamento global.
ADC	_	Conversor analógico digital.
SPI	_	Interface de periféricos seriais.
RTC	_	Relógio de tempo real.
PWM	_	Modulação por largura de pulso.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Penetrômetros são equipamentos utilizados para mensurar a resistência à penetração no solo. Existem dois tipos de penetrômetros, os penetrômetros dinâmicos que realizam as medidas através de bateladas¹ e os penetrômetros estáticos, podendo ser automáticos ou não. Este último utiliza células de carga para mensurar a força aplicada na haste que penetra o solo.

O primeiro relato de equipamento semelhante ao penetrômetro foi realizado por Nicholaus Goldmann, no final do século XVII na Alemanha e seu funcionamento era baseado na quantidade de golpes aplicados a uma estaca de madeira até a fixação desta no solo (BURNHAM; JOHNSON, 1993). Posteriormente na França, Collin (1846) desenvolve método laboratorial em que é realizada a penetração vertical de uma agulha com 1mm de diâmetro, acoplada a massa de 1kg e liberada de altura padrão. Neste processo a profundidade de penetração da agulha se correlaciona estimativa da coesão de diferentes tipos de solos (SANGLERAT, 2012).

Künzel (1936) na Alemanha, desenvolve equipamento que ficou conhecido como *Prüfstab* ou teste da barra, promovendo a primeira evolução na técnica. Este equipamento foi também utilizado por Paproth (1943), que aplicou em investigações geológicas. Posteriormente, em 1974, foi padronizado como Penetrômetro leve, pela norma alemã DIN4094 (STANDARD, 1974). Concomitante com a norma alemã, outros países desenvolveram dispositivos de penetração normatizados (STENZEL; MELZER, 1978; KLEYN et al., 1982).

Thelen (1937) utiliza a taxa de compactação a partir do índice de penetração para avaliar a influência da temperatura do solo na construção de estradas, afirmando que quanto maior o índice de compactação menor a susceptibilidade do asfalto a sofrer deformações devido a variações de temperatura, desta forma podendo realizar inferências na qualidade do asfalto (ROMAN et al., 1943).

Taylor e Gardner (1963) utilizam penetrômetro na agricultura para mensurar a compactação do solo e sua influência no crescimento radicular, desta forma obtendo

¹Processo de liberação de massa com peso determinado e altura de referência, fazendo que cada ciclo de movimento (batelada) promova a penetração de parte da haste no solo, de acordo com a força potencial gravitacional aplicada.

as resistências criticas do solo para o crescimento das plantas. A compactação é caracterizada pelo aumento da densidade do solo devido a redução da porosidade, que ocorre com o rearranjo das partículas sólidas no interior do mesmo. Dados que relacionam resistência à penetração e compactação do solo são de interesse em ciências do solo (MOLIN; RABELLO, 2011).

O tipo de dado adquirido em cada tipo de penetrômetro é diferente. Os penetrômetros estáticos medem a resistência à penetração por unidade de área e os penetrômetros dinâmicos medem a resistência à penetração por unidade de profundidade (HERRICK; JONES, 2002). O primeiro tipo de penetrômetro a ter utilização difundida em campo para análises da compactação, provocada pelo manejo do solo, foi o penetrômetro dinâmico. Sua aceitação deu-se devido a não haver a necessidade de calibração frequente e os resultados não estarem diretamente ligado ao conhecimento do operador (CASAGRANDE et al., 2002).

Os penetrômetros estáticos, primeiramente manuais, dependem da força e habilidade do operador para realizar a penetração da haste no solo. Neste tipo de penetrômetro a velocidade de penetração deve ser constante. Caso o operador não mantenha a velocidade constante, ocorre acúmulo de erros na medição (LOWERY, 1986).

Existem no mercado vários tipos e modelos de penetrômetros. Equipamentos mais simples como o penetrômetro de impacto aos que mensuram o índice do cone através de cálculos indiretos (CARTER, 1967; BEUTLER et al., 2007), penetrômetros mecânicos com manômetro, até os mais práticos que coletam e armazenam dados em *datalogger*, como os penetrômetros eletrônicos, operados de forma manual ou mecânica (MOLIN et al., 2006). Existem também os penetrômetros estáticos-dinâmicos, que utilizam motores para realizar a penetração da haste no solo e célula de carga para mensurar a força de penetração. A utilização de motores promove velocidade de penetração constante, reduzindo os erros de medição (JUNIOR VALADÃO et al., 2014).

A medição dos dados obtidos em penetrômetros eletrônicos é realizada por meio de sensores eletromecânicos. Estes sensores fazem com que as células de carga tenham limitações quanto à força aplicada. Estas características limitam a utilização dos penetrômetros de acordo com o grau de compactação do solo (ŞTEFĂNESCU, 2011; LAMANDÉ et al., 2015).

Existem aparelhos que medem a compactação do solo em linhas horizontais, uti-

lizando equipamento que realiza o arraste de hastes, rompendo horizontalmente o solo e indicando a resistência mecânica do mesmo (EHRHARDT et al., 2001). Este sistema pode ser implementado para aferir a resistência do solo em diversas profundidades. Manor e Clark (2001) desenvolvem sistema com movimento contínuo de subida e descida de hastes que ao ser arrastado pelo solo detectam a resistência da camada superficial. Owen et al. (1987) e Sirjacobs et al. (2002) desenvolvem anéis transdutores octogonais montados em barra porta-ferramenta para medir as forças e o momento de torção na haste durante o arrasto. Sistemas capazes de mapear a resistência mecânica do solo simultaneamente em diferentes profundidades, durante a movimentação no campo, apresentam-se mecanicamente simples e produzem mapas em diferentes camadas² ou horizontes³ do solo (ADAMCHUK; MOLIN, 2006).

A American Society of Agricultural Engineers (ASAE) recomenda em seu comitê de divisão técnica de máquinas e potência, em dezembro de 1968, a utilização do penetrômetro dinâmico de cone, a qual estabelece a geometria da haste e a velocidade de penetração desta no solo (ASAE, 2000). Isto ocasionou a disseminação da técnica de medir a compactação do solo, que vem sendo reconfigurada e atualizada até a última versão publicada em 2013 pela American Society of Agricultural & Biological Engineers (ASABE, 2013).

No entanto, mensurar a compactação do solo não é algo trivial (SILVA FILHO, 2014). Fatores internos e externos interferem na compactação do solo, por exemplo, fatores externo: a carga aplicada ao solo através da utilização de maquinários, pisoteio animal, revolvimento por equipamentos de preparo do solo (COSTA et al., 2009) e fatores internos: o teor de água e o teor de argila, interferem no grau de compactação do solo (MOLIN et al., 2012). Solo com maior teor de argila, por exemplo, é suscetível à maior compactação, a presença de argila influencia na formação dos agregados e na macroporosidade, o que está diretamente relacionado com a compactação do solo (SOUZA et al., 2004; RIBON; Tavares Filho, 2008).

Assim como afirmado por Ștefănescu (2011), Lamandé et al. (2015) e Cho et al.

²Camada é seção de constituição mineral ou orgânica, aproximadamente paralela à superfície do solo, possuindo conjunto de propriedades não resultantes ou pouco influenciadas pela atuação dos processos pedogenéticos, e é utilizada na geoprospecção tendo em consideração a variação da condutividade elétrica do solo (SILVA FILHO, 2014).

³Horizonte pedogenético ou apenas horizonte é seção do solo, aproximadamente paralela à superfície do solo, com características produzidas pelos processos de formação dos solos e está ligado a diferentes características de composição química, textura, cor, porosidade, riqueza em matéria orgânica e/ou mineral (SILVA FILHO, 2014)

(2015), as técnicas de levantamento de dados utilizando células de carga, na agricultura de precisão e em outras áreas que necessitam do valor da compactação do solo, são baseadas em sensores de baixa precisão (células de cargas de diferentes faixas) e alto custo.

Testes de compactação do solo são utilizados em diversas áreas. Pinard et al. (2015) e Mejías-Santiago et al. (2015) utilizam o penetrômetro para identificar seções uniformes ao longo da área a ser pavimentada na construção de estradas avaliando, além do perfil de resistência das camadas, a compactação necessária para construção de novos pavimentos. Huang et al. (2012) analisa a compactação do solo em ferrovias e metrôs avaliando resistência do solo à carga aplicada aos trilhos. Na construção civil é utilizada para determinar a profundidade e tamanho das sapatas de sustentação para edificações (FARIAS et al., 2012)

As formas tradicionais de medir a compactação do solo, como a densidade do solo ou massa específica, porcentagem de macroporos, taxa de difusão de oxigênio, condutividade hidráulica saturada, são considerados métodos diretos ou precisos. A análise do perfil do solo e a resistência mecânica a penetração, são considerados métodos indiretos ou subjetivos. O método subjetivo ou indireto de calcular a resistência mecânica a penetração diminui o trabalho em laboratório. Lütticken (2000) afirma que a automação da amostragem de solo reduz os erros decorrentes da operação, tornando-a mais confiável, tanto na análise dos dados obtidos e sua variação espacial, como na amostragem exata do local proposto. Lütticken afirma ainda que o método indireto automatizado otimiza a operação, diminuindo o tempo gasto com coletas e aumenta a precisão na medida em profundidade.

Dada as configurações atuais dos penetrômetros comerciais, suas limitações nas medições devido aos sensores utilizados, necessidade de substituição das hastes de acordo com a compactação do solo e alto custo, tem-se a necessidade do desenvolvimento de novo aparato para medição e análise da compactação do solo com custo inferior e precisão superior aos de mercado.

Os penetrômetros automáticos utilizam motores para realizar a penetração da haste no solo. O motor é acoplado numa base do sistema de transmissão que realiza a conversão do torque angular em movimento linear (SHIGLEY et al., 2004). Entre o sistema de transmissão e a haste é inserida a célula de carga. Em motores de corrente contínua (MCC), quando há elevação no torque, é exigido o aumento da corrente elétrica para suprir o torque necessário e manter constante a velocidade de rotação, enquanto a tensão aplicada à seus terminais também se mantém constante (CHAP-MAN, 2005). Portanto, se a célula de carga mede a variação da força aplicada à haste e se esta força produz variação na corrente elétrica consumida pelo MCC, pode-se correlacionar a força aplicada para realizar a penetração da haste no solo com a potência elétrica consumida pelo motor. Desta forma, a elevação da potência elétrica consumida pelo MCC se dá devido ao aumento da compactação do solo. Logo, pode-se utilizar a potência elétrica consumida pelo MCC, para substituir a célula de carga, parte onerosa dos penetrômetros e utilizar o próprio MCC como sensor de força aplicada. Promovendo a redução do valor monetário e melhorando a acurácia dos dados coletados.

O objetivo deste trabalho é desenvolver aparato e sistema de levantamento da compactação do solo que realize a medição da resistência à penetração no mesmo, utilizando diretamente a potência aplicada pelo MCC, substituindo as células de carga utilizadas. Para isto serão desenvolvidos: i) sistema de aquisição de dados utilizando sensores de corrente, tensão e velocidade, que substituem a célula de carga, ii) sistema de análise de dados com georreferenciamento dos dados coletados e processados e iii) validação a partir da comparação do sistema desenvolvido com sistemas comerciais.

O tema desenvolvido faz parte de duas propostas de projeto de pesquisa, aprovado e financiado pelo CNPq, que tem como finalidade o desenvolvimento de sistema de mapeamento geofísico do solo. Estes projetos propõem a utilização de métodos geoelétricos em conjunto com análises da compactação do solo.

O trabalho foi dividido da seguinte forma: o Capítulo 2 descreve a compactação do solo, o Capítulo 3 apresenta os instrumentos de medida de resistência do solo à penetração e o Capítulo 4 é dedicado ao estudo dos sensores utilizados em instrumentos de medida da resistência do solo à penetração e aos parâmetros do motor de corrente contínua. O Capítulo 5 descreve a metodologia desenvolvida para a realização do trabalho, o Capítulo 6, os resultados e discussões referentes aos testes do aparato desenvolvido e por fim o Capítulo 7 com a conclusão.

CAPÍTULO 2

COMPACTAÇÃO DO SOLO

O intuito deste capítulo é apresentar as necessidades de conhecer os valores da compactação do solo. Descreve-se breve histórico e definições sobre a compactação do solo em diversas áreas, seguido pelos fatores causadores deste efeito no solo, finalizando com os métodos utilizados para mensurá-la.

2.1 Origem e definições

O problema da compactação do solo é antigo e surge com a própria agricultura (ZU-AZO; PLEGUEZUELO, 2008). A alta compactação do solo, sob a ótica da agricultura, reduz o crescimento radicular, infiltração, armazenamento de água e a aeração do solo, consequentemente dificultando o desenvolvimento natural da plantação (VRINDTS et al., 2005). A compactação é preocupação constante para estudiosos do solo, pois limita o crescimento radicular e consequentemente, o desenvolvimento da plantação em geral. (CHEN et al., 2014; BENGOUGH et al., 2011).

Na Engenharia Civil, a compactação do solo surge como parâmetro de escolha para locais de edificações, onde solos com maior índice de compactação são desejáveis (GUSMÃO; JR, 2002) e influencia em diversas áreas como análise do local para construção de barragens (RESENDE et al., 2013), velocidade de perfuração em poços (SILVA et al., 2015), estudo de fundação necessária para construção (COUTO, 2014), e possibilita avaliação da fragilidade do solo e da coesão do solo, influenciando a carga que o solo suporta sem que ocorra deslizamentos ou cisalhamento (OSMAN, 2013; ROSS, 2011).

Compactação do solo é caracterizada como sendo o adensamento e a redução da porosidade no mesmo, associada à mudanças na estrutura do solo, aumento da coesão e a redução da taxa de condutividade hidráulica (SOANE; OUWERKERK, 2013). Ocorre quando as partículas do solo são comprimidas, reduzindo assim o espaço entre elas, Fig. 2.1.

Na Fig. 2.1(a), tem-se a ilustração do solo pouco compactado e na Fig. 2.1(b) a ilustração de solo compactado. No solo compactado, o pouco espaço entre as partículas reduz o fluxo de água e ar na estrutura do solo e, consequentemente, reduz a taxa de infiltração, drenagem de água e nutrientes da camada compactada (IMHOFF et



Fig. 2.1 - Efeito da compactação no solo, (a) solo pouco compactado e (b) solo compactado.

al., 2000).

Com o aumento da compactação, tem-se o aumento da coesão do solo. Coesão do solo é a habilidade do solo em se manter estático com a aplicação de forças externas, solicitando assim que maior força seja aplicada para realizar a penetração na camada compactada do solo. Outro fator importante é a diminuição das trocas gasosas em solos compactados, causando problemas relacionados a aeração dos solos (DEJONG-HUGHES et al., 2001).

Devido ao fenômeno da compactação, o solo sofre o efeito de agrupamento das partículas reduzindo o volume de ar, aumentando a densidade sem mudança significativa no teor de umidade do solo (CRAIG, 2013). No entanto, a diminuição do teor de umidade devido à aplicação de carga¹ no solo é denominada adensamento e reduz o volume do solo devido a expulsão da água dos poros do solo (NOVAIS et al., 2000).

Secco (2003) define a densidade do solo como sendo a relação entre a massa de sólidos presente no solo e seu volume total, desta forma pode ser utilizada como medida direta do grau de compactação do solo. Para o cálculo da compactação pela densidade é necessário o conhecimento do teor de umidade do solo.

O teor de umidade do solo é a quantidade de água presente no espaço poroso do mesmo, pois parte do espaço vazio entre as partículas sólidas é ocupado essencialmente por água, minerais e matéria orgânica dissolvida (SENEVIRATNE et al., 2010). A porosidade do solo determina a capacidade do mesmo de conduzir matéria. Os

 $^{^1\}mathrm{Carga}$ caracterizada pela força externa aplicada no sentido vertical ao solo.

poros se encontram na parte do solo não preenchida por partículas sólidas. Em solos úmidos os poros são preenchidos por água, em solos secos os poros são ocupados por ar. Cada tipo de solo possui equilíbrio ideal entre poros contendo água e poros com ar (GROHMANN, 1960; LIPIEC et al., 2006).

A compactação é preocupação constante para estudiosos do solo, pois limita o crescimento radicular e consequentemente, o desenvolvimento da plantação em geral. Afeta também a coesão do solo, influenciando a carga que o solo suporta sem que ocorra deslizamentos ou cisalhamento (CHEN et al., 2014; BENGOUGH et al., 2011; OSMAN, 2013).

A resistência do solo à penetração é resultante de forças oriundas da compactação. Em geral, a resistência do solo à penetração aumenta proporcionalmente com o aumento da densidade e inversamente ao conteúdo de água (HAMZA; ANDERSON, 2005). A medição da resistência do solo a penetração é realizada a partir do Índice do Cone (I_C) , que é a pressão aplicada para realizar a penetração do cone padrão² no solo.

2.2 Fatores causadores e efeito da compactação do solo

Fatores internos e externos causam elevação do grau de compactação do solo. Internamente a compactação do solo é influenciada principalmente por: i) distribuição e tamanho dos grãos, ii) tipo de minerais, argila e características químicas, iii) conteúdo e tipo de substâncias orgânicas, iv) agregação induzida por expansão e compressão do solo devido a proliferação de raízes e substâncias orgânicas, v) densidade aparente, e vi) teor de água e potencial hidráulico do solo (RAPER; KIRBY, 2006).

Externamente, os fatores que influenciam a compactação do solo são: i) o tipo da carga aplicada (estático ou dinâmico), ii) a duração e quantidade de carga aplicada, iii) potencial de água durante o carregamento, iv) excesso de água no solo, devido a mudanças no regime hídrico e v) o manejo inadequado do solo (DUNCAN et al., 2014). Quando causada por fatores naturais, tais como raízes das plantas e variações no ciclo de chuvas, a compactação do solo é menos prejudicial exercendo influência no máximo até 5cm de profundidade. Efeitos antropogênicos causam maiores danos, por

²Cone de penetração padronizado pela ASABE (2013) caracterizada por ponta cônica, com angulo do cone de 30° , diâmetro e área da superfície do cone padronizados para: i) solos macios, diâmetro do cone de 20,27mm e área de superfície de $323mm^2$, ii) solos duros, 12,83mm de diâmetro do cone e área de superfície de $130mm^2$.

exemplo, o pisoteio animal e o trafego de máquinas pesadas, compactando maiores profundidades, entre 20cm a 60cm (NAWAZ et al., 2013).

2.3 Métodos de investigação da compactação do solo

A investigação da compactação do solo divide-se em duas partes: a mensuração da compactação, na qual são obtidos os valores da compactação e a análise, na qual será estudado o significado destes valores e suas influências.

Para mensurar a compactação do solo são utilizadas técnicas diretas ou indiretas. Como técnicas diretas tem-se a penetrometria e as investigações químicas realizadas em amostras (DEWIS et al., 1970). As técnicas indiretas consistem na relação da compactação do solo com outras medidas e normalmente ocorrem em pontos diferentes do ponto medido, por exemplo, os mapas gerados pelos métodos geoelétricos (IVO; MIELNICZUK, 1999).

Os métodos de análise da compactação do solo podem ser divididos em diversos tipos, com métodos diretos ou indiretos, métodos químicos, físicos ou mineralógicos, métodos invasivos ou não invasivos, entre outros. Pode-se ainda, dividir de duas formas, métodos de análises laboratoriais ou métodos de análises em campo.

2.3.1 Método de análise laboratorial

Os métodos laboratoriais consistem analisar material coletado em campo, geralmente utilizando equipamento conhecido por trado ou pá de corte. A Fig. 2.2 ilustra quatro equipamentos diferentes utilizados em coleta de solo para análise laboratorial da compactação, cada um com sua característica (OLIVEIRA et al., 2007). Testes laboratoriais utilizam análises de parâmetros químicos e físicos do solo.

Na Fig. 2.2(a) é ilustrado o trado holandês, Fig. 2.2(b) o trado calador, Fig. 2.2(c) o trado de caneco e na Fig. 2.2(d) a pá de corte. Cada ferramenta é indicada para determinado tipo de solo e de análise.

Utilizando os equipamentos ilustrados na Fig. 2.2, é possível coletar e armazenar volumes de solo em recipientes plásticos que inviabilizam a troca de umidade com o meio ambiente. Após a coleta o solo é enviado para análise em laboratórios. Na análise laboratorial o solo é avaliado de acordo com suas propriedades físicas e químicas, como pH, densidade e umidade.



Fig. 2.2 - Ferramental utilizado para coleta, (a) trado holandês, (b) trado calador, (c) trado de caneco e (d) pá de corte.

Outro equipamento utilizado na coleta do solo para análise é o anel volumétrico, ilustrado na Fig. 2.3. Neste anel a porção de solo é acumulada no recipiente inferior que é cravado na superfície da área a ser investigada. A base na parte superior recebe as bateladas ou pressão e na parte inferior é colocado o acoplamento com corte para facilitar a penetração do anel no solo.



Fig. 2.3 - Extrator ou anel volumétrico.

Neste método, ao ser cravado, o anel com dimensões conhecidas consegue manter

parcialmente as características físicas do solo, possibilitando a análise por pesagem e determinação do teor de umidade.

A umidade natural é o conteúdo de água que o solo possui na forma como é encontrado na natureza. É obtida a partir da relação entre o peso da água presente no solo e o peso do solo seco (MALTESE et al., 2010). A umidade que o solo possui quando seco ao ar livre é conhecida como umidade higroscópica. Solos com maior quantidade de argila terão maior teor de umidade higroscópica, em solos arenosos ela é praticamente desprezível (YAMAJI et al., 2013).

O teor de umidade a partir do qual o solo se torna maleável, deixando de apresentar consistência sólida, é conhecido como limite de plasticidade³. O teor de umidade a partir do qual o solo se torna líquido, deixando de apresentar consistência sólida, é conhecido como limite de liquidez (CHEN, 2013).

Na agricultura, existe a umidade ideal do solo para que a planta possa absorver os nutrientes. A umidade ideal, para determinado tipo de solo, neste caso é identificada utilizando a curva de retenção de água no solo. Outro ensaio aplicado é o Proctor Normal de compactação do solo que, determina a taxa de compactação e o peso específico aparente seco máximo associado à umidade ideal para determinado tipo de solo. É realizado utilizando molde com volume padrão V_m que acomoda de 3 a 5 camadas de solo, no qual cada camada recebe quantidade de bateladas N_b com peso padrão P_m de altura h_s . O esforço de compactação E é dado em referência à energia potencial gravitacional aplicada em (2.1) (DEWIS et al., 1970).

$$E = \frac{P_m \cdot h_s \cdot N_b \cdot n_s}{V_m} \tag{2.1}$$

A alteração do esforço de compactação por unidade de volume causa alteração na curva de umidade versus peso específico. Com o aumento do esforço de compactação, o peso específico seco máximo de compactação também aumenta, em outras palavras causa o aumento da densidade aparente. O teor de umidade ideal varia inversamente ao esforço de compactação (SECCO, 2003).

A curva relacionando o teor de umidade e o peso específico indica o grau de saturação do solo. Proctor (1933) estabelece, como princípio da avaliação da compactação

 $^{^{3}}$ Limite de plasticidade, segundo Atterberg (1911), é a fronteira entre o estado semi-sólido e o estado plástico.
do solo, que a densidade que o solo atinge quando compactado sobre determinada energia de compactação depende da umidade do solo no momento da compactação. Variando a energia de compactação para diferentes valores de umidade tem-se a Fig. 2.4.



Fig. 2.4 - Curva de compactação relacionando teor de umidade e peso específico.

Na Fig. 2.4, γ_s representa os valores de peso específico do solo e ω_u representa os valores do teor de umidade, $\gamma_{s_{max}}$ é o valor máximo da densidade do solo e $\omega_{u_{max}}$ é o teor de umidade máxima do solo. O comportamento da curva de saturação, que é a curva em que o solo não apresenta espaço porosos (curva tracejada), representa o limite de plasticidade do solo para os valores de peso específico do solo e teor de umidade. A curva de compactação (curva sólida), é gerada pelo esforço de compactação e o ponto de umidade ideal $P(\omega_{d_{max}}, \gamma_{d_{max}})$ é o ponto onde a compactação não consegue eliminar espaços porosos.

A densidade aparente é o parâmetro mais utilizado para caracterizar a compactação do solo (PANAYIOTOPOULOS et al., 1994). Porém, para obter medições precisas dos efeitos da compactação em diversos tipos de solos, a densidade aparente deve ser utilizada em conjunto com outros métodos como: i) taxa de difusão de oxigênio, pois a redução da aeração do solo é indício de compactação (NAWAZ, 2010), ii) teor de água, pois a compactação do solo reduz a porosidade total do solo e, principalmente, a quantidade de poros de tamanho elevado (SILVA et al., 2008) e iii) resistência à penetração (RP), que varia com a umidade e a densidade do solo (LIPIEC; HATANO, 2003).

A compactação do solo causa alteração no tamanho das partículas do solo. Esta alteração é mensurada utilizando processo conhecido como granulometria, que con-

siste em determinar os diâmetros das partículas existentes no solo e é dividida em: i) peneiramento grosso, ii) sedimentação⁴ e iii) peneiramento fino (TEDESCO et al., 1995).

2.3.2 Método de análise no campo

Os métodos geoelétricos utilizam a condutividade elétrica aparente do solo para determinar características físicas e químicas do solo (CALIXTO et al., 2010). A condutividade elétrica aparente é influenciada por parâmetros do solo como: i) composição físico-química, ii) porosidade, iii) teor de umidade iv) teor de argila e v) taxa de compactação (RHOADES et al., 1989). Desta forma a compactação do solo pode ser medida de forma indireta e com facilidade em relação aos demais métodos. O teor de água no solo influencia na medição da condutividade elétrica aparente. Devido a este fato deve-se medir a umidade do solo juntamente com a medição do condutividade (SILVA FILHO et al., 2015).

O teor de umidade do solo pode ser mensurada utilizando princípios de ondulatória. Baseado no tempo de deslocamento da onda a reflectometria no domínio do tempo (TDR⁵) analisa a variação na velocidade de propagação causada devido ao dielétrico do meio. As principais vantagens do TDR são: i) não depender da habilidade do operador e ii) possuir baixa influência da densidade do solo (NETO, 2007). Os valores obtidos pelo equipamento devem ser calibrados de acordo com o tipo do solo devido à características como o teor de ferro e densidade aparente.

A resistência à penetração é utilizada amplamente para medição da compactação do solo descrita como curva de resistência de compactação do solo, é utilizada para fazer inferências sobre as condições estruturais do mesmo (IMHOFF et al., 2000; FEDER et al., 2005). Deste ponto de vista, a avaliação da resistência do solo e a determinação da curva de resistência são importantes no estudo do efeito da compactação sobre as condições físicas do solo (FURRIEL et al., 2015).

2.4 Considerações

Avaliar a compactação do solo é imprescindível para as ciências do solo. Os parâmetros necessários são obtidos de avaliações diretas e indiretas das características do

 $^{^{4}}$ O método de sedimentação é baseado na dispersão das partículas em água e analisa a velocidade de sedimentação de cada grão, que aumenta com o diâmetro dos grãos (LIMA; LUZ, 2001)

⁵TDR, Time Domain Reflectometry.

solo. As características encontradas indicam a forma como deve ser manipulado o solo para se obter a correta utilização do mesmo. A medição da compactação do solo é realizada através da coleta de amostras ou testes em campo. Para as medições em campo são utilizados instrumentos de medição da resistência do solo a penetração.

CAPÍTULO 3

PENETRÔMETROS

Este capítulo é dedicado ao estudo do penetrômetro, apresentando normas de utilização, tipos de equipamentos existentes e princípios de construção.

3.1 Penetrômetros

A penetrabilidade do solo é a ação de medir a facilidade na qual objetos podem ser inseridos no solo. Qualquer dispositivo projetado para medição desta resistência a penetração pode ser chamado de penetrômetro (BRADFORD, 1986).

Penetrômetros são utilizados para avaliar a qualidade física do solo, levantando parâmetros referentes a resistência do solo à penetração (RP), compactação do solo, taxa de crescimento radicular, coesão do solo, entre outras características. Existem diferentes tipos de penetrômetro, geralmente possuem ponta redonda ou em forma de cone. O penetrômetro é solto ou pressionado contra a superfície do solo, medindo a resistência de penetração do solo até a profundidade alcançada pela haste padrão utilizada.

A evolução da técnica ocorreu devido a necessidade de conhecer os dados do subsolo não obtidos por outros modos. A utilização de hastes cravadas no solo para determinar a resistência à penetração do subsolo é antiga. No inicio dos estudos das ciências do solo foi desenvolvido o teste do cone, inicialmente com cone de $\alpha = 90^{\circ}$, que pressionado contra o solo indica a quantidade que é penetrado no mesmo, a porção de H_{pen} foi cravado no solo de acordo com a força F_a aplicada, como ilustrado na Fig. 3.1

Na utilização do penetrômetro aplica-se o teste de penetração do cone (CPT), para determinar parâmetros geotécnicos do solo. Consiste em aplicar a haste de metal cilíndrica com ponta cônica no solo com velocidade constante, com pressão aplicada ou golpes mecânicos de peso padrão. Desta forma, é medida a resistência à penetração pela profundidade da haste (SANGLERAT, 2012).

O padrão da apresentação dos dados adquiridos consiste em diagrama em que é apresentado no eixo das abscissas a resistência a penetração e no eixo das ordenadas a profundidade de penetração, como ilustrado na Fig. 3.2, onde é observado a



Fig. 3.1 - Haste do penetrômetro.

compactação do solo, em unidades de pressão, de acordo com a profundidade. A forma como é realizada a penetração determina o tipo do equipamento, podendo ser estático ou dinâmico (STEINER et al., 2013).



Fig. 3.2 - Medição utilizando penetrômetro comercial.

3.2 Norma de utilização

A norma S313.3, proposta pelo comitê de equipamentos, práticas e cultura e aprovada pelo comitê técnico da divisão de maquinas e potência da ASAE, entrou em vigor a partir de dezembro de 1968 como padrão de utilização do penetrômetro de cone (ASAE, 2000; ASABE, 2013). As hastes dos penetrômetros seguem as características ilustradas na Fig. 3.3. As características são utilizadas no intuito de apresentarem métodos padronizados e uniformes de caracterizar a resistência à penetração do solo. A força F_a aplicada sobre a haste do penetrômetro dividida pela área do cone $A_c \operatorname{com} \alpha = 30^\circ$ é igual ao índice do cone em (3.1), que pode ser relacionado com a resistência de penetração em pascal (*Pa*) (PATRIZZI et al., 2003)

$$IC = \frac{F_a}{A_c} \tag{3.1}$$



Fig. 3.3 - Pontas padrão da haste de penetração, (a) cone tipo a, (b) cone tipo b e (c) penetrômetro estático.

Como definido pela norma S3013.3, a haste é o conjunto da barra e da ponta cônica de 30° , e de acordo com a área do cone, ilustrada na Fig. 3.3, tem-se: i) cone tipo a, $323mm^2$ de área com 20, 27mm de diâmetro e haste com 15, 88mm de diâmetro, Fig. 3.3(a), e ii) cone tipo b, $130mm^2$ de área com 12, 83mm de diâmetro e haste com 9, 53mm de diâmetro, Fig. 3.3(b).

O modelo padrão de construção do dispositivo para mensurar a resistência à penetração do solo fornece valores específicos da resistência à penetração a cada porção de solo introduzido pela haste. Os resultados medidos são influenciados pelo método utilizado, indicado na norma EP542 (1999), da ASAE, onde é descrita a velocidade de penetração da haste em $30mm.s^{-1}$ e o número mínimo de 20 amostras por área investigada.

3.3 Tipos de penetrômetros

Os penetrômetros são classificados de acordo com a forma que a penetração é realizada no solo, podendo ser estáticos ou dinâmicos.

Penetrômetros dinâmicos ou de impacto são aqueles que a haste penetra o solo devido a queda de peso a partir de altura H_b constante e pré determinada, como ilustrado na Fig. 3.4. Por não ser necessária calibração frequente e os resultados possuírem menor dependência do operador, este tipo de penetrômetro foi o primeiro a ter utilização difundida no campo (CASAGRANDE et al., 2002).



Fig. 3.4 - Penetrômetro Dinâmico.

Na Fig. 3.4 o peso liberado na altura H_b promove uma batela. Sequências de bateladas são promovidas e a energia potencial crava a haste no solo. A resistencia à penetração R_p é calculada pela expressão (3.2) (HERRICK; JONES, 2002).

$$F_a = \frac{M \cdot g + m \cdot g + \left(\frac{M}{M+m} \cdot \frac{M \cdot g \cdot H_b}{x}\right)}{A_c} \tag{3.2}$$

onde R_p é a resistência à penetração da haste no solo em $kgf \cdot cm^{-2}$ ($kgf \cdot cm^{-2}$ $\cdot 0,098 = MPa$); A_c é a área do cone de penetração, m é a massa em movimento, Mé a massa total do sistema sem a massa m, g é a aceleração da gravidade e x é o espaço percorrido pela haste no solo em cada batelada.

Penetrômetros estáticos foram desenvolvidos com a mesma ideia dos penetrômetros dinâmicos. No entanto, nos penetrômetros dinâmicos a força F_a é constante e a variação na profundidade de penetração x não constante, dependendo da compactação do solo. Nos penetrômetros estáticos, não há bateladas, a velocidade de penetração e a variação na profundidade de penetração x são constantes e a força F_a será aplicada de forma não constante. Neste tipo de penetrômetros, a força F_a necessária para romper o solo será mensurada através de dinamômetros, como ilustrado na Fig. 3.5 (STOLF, 1991).



Fig. 3.5 - Penetrômetro Estático.

Nos penetrômetros estáticos, os tipos de dados adquiridos também são diferentes. Penetrômetros estáticos medem a resistência a penetração por unidade de área, e os penetrômetros dinâmicos a resistência a penetração por unidade de profundidade, não permitindo a comparação direta entre as medições (HERRICK; JONES, 2002). Surge primeiramente os penetrômetros estáticos manuais e dependentes da força e habilidade do operador para realizar a penetração da haste no solo, com velocidade constante. Os penetrômetros estáticos manuais obtêm medições com elevado índice de erro. Devido aos erros inerentes ao processo de romper o solo sem obter velocidade constantes, os penetrômetros automáticos, conhecidos como penetrômetros estáticos-dinâmicos, foram criados. A ideia é utilizar o penetrômetro estático com motor de forma que mantenha a velocidade constante e reduzindo os erros de medição (FRITTON, 1990; STOLF, 1991).

Penetrômetros estáticos automáticos possuem maior precisão e confiabilidade entre os métodos para aferir a compactação do solo. Utilizando motores para realizar a penetração da haste no solo com velocidade constante, porém, possui limitações quanto a força F_a aplicada, devido a utilização de células de carga¹ como elemento sensor (LOWERY, 1986).

3.4 Mecânica dos penetrômetros

O projeto mecânico utilizado nos penetrômetros possuem alguns princípios básicos como: i) sustentação e posicionamento correto, a penetração deve ser realizada perpendicularmente ao solo, ii) movimentação da haste, realizada utilizando como base os princípios de transmissão de movimento e energia, e iii) referências de medição, os sensores devem ser acoplados ao sistema de forma a realizar a medição dos parâmetros necessários.

A haste de penetração deve ser pressionada perpendicularmente ao solo, pois se o angulo β entre a haste e o solo for diferente de 90° a força normal medida F_n será diferente da aplicada F_a (3.3).

$$F_n = F_a \times sen(\beta) \tag{3.3}$$

O movimento do motor deve ser transmitido para a haste de forma linear. Esta transformação é realizada utilizando o princípio conhecido por parafuso de potência.

A velocidade linear V_L de acoplamento mecânico com parafusos ou engrenagens é a mesma para todos os pontos periféricos, pois, conforme apresentado na Fig. 3.6, não há escorregamento e desta forma tem-se (3.4):

$$V_L = r_1 \cdot \omega_1 = \frac{\phi_1 \cdot n_1 \cdot \pi}{60} \tag{3.4}$$

Onde r_1 é o raio da engrenagem motora, ϕ_1 o diâmetro da engrenagem motora, ω_1 a velocidade angular em rad/s e n_1 a velocidade angular em rpm. Analogamente

 $^{^1\}mathrm{As}$ células de carga serão melhor explicadas no Capítulo 4 Seção 4.1.

para engrenagem movida tem-se (3.5):

$$V_L = r_2 \cdot \omega_2 = \frac{\phi_2 \cdot n_2 \cdot \pi}{60} \tag{3.5}$$

Onde r_2 é o raio da engrenagem movida, ϕ_2 o diâmetro, ω_2 a velocidade angular em rad/s e n_2 a velocidade angular em rpm.



Fig. 3.6 - Engrenagens acopladas diretamente.

Comparando (3.4) e (3.5) obtém-se (3.6) que é a relação entre o tamanho da engrenagem e a velocidade angular em rpm.

$$\phi_1 n_1 = \phi_2 n_2 \tag{3.6}$$

Por definição, o torque T é igual ao produto da força tangencial pelo raio da engrenagem (3.7).

$$T = F_t r \tag{3.7}$$

onde F_t é a força tangencial aplicada na engrenagem e r é o raio da engrenagem, tem-se que a força tangencial é a mesma. Desta forma, o torque resultante pode ser alterado segundo (3.8).

$$F_t = \frac{T_1}{r_1} = \frac{T_2}{r_2} \tag{3.8}$$

onde ${\cal T}_1$ é o torque aplicado pela engrenagem motriz e r_1 o raio da mesma. ${\cal T}_2$ é

o torque aplicado no fuso helicoidal devido à T_1 e r_2 é a diferença entre o raio da engrenagem movida e o raio do fuso helicoidal.

As engrenagens são necessárias na transmissão de potência, pois, permitem a redução ou aumento do momento torsor, e aumento ou redução de velocidades, com mínimas perdas de energia por não sofrerem deslizamento. Esta alteração é realizada de acordo com a razão entre os diâmetros das engrenagens. Aumentando a rotação, o momento torsor diminui e vice-versa. Assim, para um par de engrenagens, a maior delas terá sempre rotação menor e transmitirá momento torsor maior. A engrenagem menor tem sempre rotação mais alta e momento torsor menor.

O movimento dos dentes das engrenagens processa-se de tal modo que no diâmetro primitivo (diâmetro da engrenagem sem considerar os dentes) não há deslizamento, havendo apenas aproximação e afastamento. Nas demais partes da face da engrenagem existe ação de deslizamento e rolamento. Desta forma as velocidades periféricas, ou tangenciais de ambas as rodas são iguais (SHIGLEY et al., 2004).

O parafuso de potência de rosca quadrada com diâmetro médio d_m , passo ρ e ângulo de entrada da rosca λ , sofrendo a ação de carga compressiva F_a é apresentado na Fig. 3.7.



Fig. 3.7 - Parafuso de potência detalhado.

Para obter a expressão do torque requerido para movimentar a carga, tem-se que a

distribuição de força é dada de acordo com o sentido da força aplicada para elevação da carga, Fig. 3.8(a), ou abaixamento da carga, Fig. 3.8(b).



Fig. 3.8 - Diagrama de forças para (a) elevação e (b) abaixamento da carga.

Analisando a Fig. 3.8 tem-se a expressão do sistema em equilíbrio para elevação da carga (3.9) e para o abaixamento da carga (3.10).

$$\sum F_H = P_r - N \cdot sen\lambda - f \cdot N \cdot cos\lambda = 0$$

$$\sum F_V = F + f \cdot N \cdot sen\lambda - N \cdot cos\lambda = 0$$
(3.9)

$$\sum F_H = -P_L - N \cdot sen\lambda + f \cdot N \cdot cos\lambda = 0$$

$$\sum F_V = F - f \cdot N \cdot sen\lambda - N \cdot cos\lambda = 0$$
(3.10)

onde F_H e F_V são as forças horizontais e verticais, respectivamente, F_a a força aplicada, N a normal resultante, f o coeficiente de atrito P_r e P_L as forças resultantes à direita e à esquerda. Das expressões (3.7), (3.9) e (3.10), obtém-se (3.11):

$$T_r = \frac{F_a \cdot d_m}{2} \left(\frac{l + \pi \cdot f \cdot d_m \cdot \sec\lambda}{\pi \cdot d_m - f \cdot l \cdot \sec\lambda} \right)$$
(3.11)

Para obter o valor da força F_a a partir de torque T_r aplicado é realizado manipulação algébrica na expressão (3.11) para obter (3.12):

$$F_a = \frac{2T_r}{d_m} \left(\frac{\pi \cdot d_m - \rho \cdot l \cdot \sec\lambda}{l + \pi \cdot f \cdot d_m \cdot \sec\lambda} \right)$$
(3.12)

onde F_a é a força aplicada verticalmente devido ao torque T_r , d_m é o diâmetro nominal do fuso, ρ é o passo, f é o coeficiente de atrito, λ é o ângulo de entrada do fuso.

Conhecendo a massa em movimento, utiliza-se manipulações algébricas de (3.9), (3.10) e (3.11), sendo possível obter a expressão (3.13), que representa o coeficiente de atrito.

$$f = \frac{\left(\pi \cdot d_m - \rho \cdot l \cdot \sec(\lambda)\right) \left(2 \cdot T_r - l\right)}{F_a \cdot d_m^2 \cdot \sec(\lambda)} \tag{3.13}$$

3.5 Considerações

Este capítulo discorre sobre os instrumentos de medição da resistência do solo à penetração, apresentando parâmetros dos instrumentos, norma de utilização e a mecânica utilizada nestes sistemas. O conhecimento dos instrumentos utilizados para medição da resistência do solo à penetração é fator determinante para escolha do equipamento a ser utilizado. O resultado obtido na medição difere de acordo com a metodologia e o instrumento aplicado na medição. As normas indicadas para medição são direcionadas a cada tipo de equipamento. A estrutura mecânica possuí características de acordo com o tipo da medição a que é destinado. Os sensores variam com o tipo de instrumento e indicam a precisão e a taxa de aquisição de dados.

CAPÍTULO 4

EQUIPAMENTOS UTILIZADOS EM PENETRÔMETROS

Este capítulo é dedicado ao estudo dos sensores utilizados em instrumentos de medida da resistência do solo à penetração. Descreve-se suas utilidades e características, suas vantagens e desvantagens. Apresenta-se ainda o motor de corrente contínua (MCC) com suas características básicas, funcionamento e controle.

4.1 Sensores

A aquisição de dados nos penetrômetros é baseada na utilização de sensores e transdutores. Os sensores possuem aplicações específicas e existem alguns princípios que devem ser considerados, tais como: i) faixa de medição, ii) função de transferência, iii) sensibilidade, iv) histerese, v) resolução, vi) acurácia, vii) precisão, viii) tipos de erro e ix) estatística das medições.

Na escolha dos sensores a serem utilizados deve-se conhecer a faixa de medição, ou *range*, parâmetro que descreve o valor mínimo e máximo da entrada ou saída do sensor. A faixa de medição total, ou valor de fundo de escala, é a diferença entre a resposta do sensor ao máximo e ao mínimo estímulo aplicado indicando se o sensor mede todos valores necessários ou se somente em parte do sistema (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011).

As características construtivas do sensor descrevem o relacionamento entre a medição e o sinal de saída. É representado por tabelas, gráficos ou função matemática. Como função matemática pode ser expressa como $S_r = F(S_m)$, onde S_m é o valor medido e S_r a resposta do sensor. As funções de transferência podem ser lineares ou não-lineares. Funções lineares se aproximam da reta segundo $S_r = A_s + B_s(S_m)$, onde A_s é o valor base da resposta e B_s é a angulação da curva do sensor. Funções nãolineares são utilizadas quando as funções lineares não aproximam adequadamente ao valor real, e são aproximadas utilizando funções logarítmicas (4.1), funções exponenciais (4.2) e funções polinomiais (4.3) (FRADEN, 2010).

$$S_r = A_s + B_s \cdot \ln(S_m) \tag{4.1}$$

$$S_r = A_s + B_s \cdot e^{k \cdot S_m} \tag{4.2}$$

$$S_r = A_s + B_s \cdot S_m^{\ k} \tag{4.3}$$

onde A_s e B_s são parâmetros e k é o fator da potenciação.

A mudança mínima requerida na entrada para produzir mudança na saída é conhecida como sensibilidade. Se a resposta do sensor é linear a sensibilidade será constante em toda faixa de medição. Sensores ideais terão sensibilidade significativamente constante. Se a resposta do sensor é não-linear, a sensibilidade pode variar ao longo da faixa de medição do sensor e podem ser encontrados por meio do cálculo da derivada de S_r em relação a S_m (RILEY et al., 1993).

A saída do sensor pode ser diferente para o mesmo intervalo de entrada, dependendo se este intervalo for crescente ou decrescente. Este fenômeno é conhecido como histerese e pode ser expresso como a diferença entre os valores de subida e descida para determinado intervalo de entrada. Este valor é normalmente expressa como porcentagem da amplitude do sensor e ocorre geralmente quando técnica de detecção baseia-se na deformação do material (SILVA, 2007).

A resolução é o menor incremento da grandeza mensurada que causa alteração detectável na saída. Se a resolução do sensor é muito grande para a aplicação, mudanças sutis podem não ser detectadas. Acurácia refere-se à capacidade do sensor fornecer saída perto do real valor do medido. Precisão descreve a capacidade da saída ser constantemente reproduzida. Sensores podem ser precisos e terem baixa acurácia (SILVA, 2007).

O erro é a diferença entre o valor medido e o valor real, onde o valor verdadeiro é a referência de padrão absoluto ou acordado. Existem duas formas de erro: i) erros sistemáticos que são reprodutíveis e as imprecisões podem ser corrigidos com métodos de compensação, como *feedback*, filtragem e de calibração. O erro sistemático é a diferença entre a média dos valores obtidos e o resultado esperado e ii) erro aleatório que é produto das variações nas medições que não seguem tendência fixa, mas que podem ser analisadas estatisticamente pelo cálculo de sua dispersão. (WILSON, 2004).

As características estatísticas são características que não podem ser exatamente descritas por fórmulas ou meio gráfico. Estas características sintetizam várias medições realizadas com único ou múltiplos sensores. As características estatísticas utilizadas para avaliação de sensores são a repetibilidade¹ e tolerância².

Penetrômetros comerciais utilizam sensores para medir a força F_a aplicada para realizar a penetração da haste no solo. Para mensurar esta força F_a utiliza-se células de carga e extensômetros (ANDRADE et al., 2001). Estes sensores trabalham em faixas de medição específicas devido a limitações quanto a força aplicada, podendo ser danificados caso tenham deformação maior que a nominal. São sensores de custo elevado e necessita da troca de hastes de acordo com o tipo de solo.

O extensômetro é o nome dado ao sensor sensível à tensão de deformação, cuja resistência elétrica é proporcional a tensão mecânica aplicada sobre a sua superfície, seu esquemático é ilustrado no corte da Fig. 4.1, onde pode ser observado a direção da variação da força aplicada, setas nas laterais, e os pontos de fixação, triângulos nas extremidades. Os extensômetros são sensíveis à temperatura, sendo necessário a utilização de correções na medida obtida de acordo com a variação da temperatura.

Células de carga possuem como elemento sensor o extensômetro ou piezoelétricos. O modelo mais simples de célula de carga é ilustrado na Fig. 4.1, amplamente utilizado em balanças comuns e medições cujo a faixa é conhecida, pois, em regime permanente possui precisão na medição e o valor final é obtido a partir da deformação do material utilizado.

Na Fig. 4.1(a), a base iv da célula de carga do tipo feixe de flexão é fixada pelos furos *i* e *ii*, a força F_a será aplicada no ponto *iii*, o feixe *v* sofrerá deflexão ocasionado pela aplicação de F_a . Caso a célula de carga utilize o extensômetro *vii*, este será adaptado do lado oposto a abertura da célula *vi*. A Fig. 4.1(b) apresenta a célula de carga real. Caso a célula utilize o piezoelétrico, o mesmo deverá ser acoplado de forma que esteja sujeito a deformações, gerando assim a variação do sinal medido.

O sensor piezoelétrico e o extensômetro possuem funcionamento semelhante, o extensômetro varia a resistência elétrica enquanto o piezoelétrico varia a tensão elétrica ao sofrerem deformação. No entanto, o sensor piezoelétrico é menos sensível a variações de temperatura, porém altamente sensível a vibrações (STEINER et al., 2013).

Células de carga com proteção de sobrecarga são utilizadas em penetrômetros comer-

 $^{^1{\}rm Repetibilidade}$ é a habilidade do sensor fornecer a mesma resposta quando submetido ao mesmo estímulo.

 $^{^2 {\}rm Tolerância}$ descreva as variações ocorrida nas medições devido a fabricação.



Fig. 4.1 - Célula de carga do tipo feixe de flexão (a) esquemático e (b) real.

ciais, constituídas por dois elementos deformantes sobrepostos de forma a proteger o elemento sensor, como ilustrado na Fig. 4.2(a) e na Fig. 4.2(b) é apresentado célula utilizada em penetrômetros comerciais. A forma dupla modela as lacunas para garantir a concentração da deformação no local de medição e possibilita o funcionamento para compressão e extensão. Porém esta geometria reduz a sensibilidade da célula de carga (ADAMCHUK et al., 2001). Na Fig. 4.2, as aberturas da célula de carga $y_1 e y_2$ são as proteções que garantem que F_a não ultrapasse o limite máximo suportado pela célula de carga. Quando $y_1 = y_2 = 0$, não poderá mais haver deformação no material.



Fig. 4.2 - Célula de carga com proteção de sobrecarga (a) esquemático e (b) real.

O sentido de aplicação da força é importante na utilização das células de carga de modo geral e seus elementos sensores são projetados para receber a deformação em sentido determinado pelo fabricante (WANG et al., 2009). Desta forma, ao realizar a penetração no solo, é imprescindível que seja realizada de forma perpendicular e sem deslocamento horizontal. Qualquer força aplicada formando ângulo diferente de 90° com a superfície de aplicação da forca, pode ser dividida em duas outras forças, vertical e horizontal, e a célula de carga avaliará somente a parte referente a força vertical.

O deslocamento linear vertical realizado pela haste é medido utilizando sensores ultrassom ou potenciômetro linear, para que se tenha o valor real da profundidade da haste, possibilitando análise da compactação em cada horizonte do solo.

A velocidade da penetração é medida a partir da taxa de variação do deslocamento linear em relação ao tempo. A velocidade é utilizada como referência no controle da velocidade de penetração, possibilitando que o valor padronizado de $30mm.s^{-1}$ seja mantido constante durante a utilização em penetrômetros automáticos.

O sistema de posicionamento global (GPS) também pode ser utilizado nas medições de resistência do solo à penetração, gerando mapas para processar os dados adquiridos juntamente com outras informações espaciais (FURRIEL et al., 2015).

4.2 Motor de corrente contínua

Para que a máquina de corrente contínua funcione como motor, devem ser considerados alguns princípios básicos: i) o torque eletromagnético desenvolvido deve produzir ou manter a rotação, ii) a tensão gerada nos condutores onde circula a corrente, força contra-eletromotriz, deve-se opor à corrente da armadura (Lei de Lenz), iii) a força contra-eletromotriz deve ser expressa por (4.4) (DICKINSON; MILANO, 2002).

$$E_A = V_A - I_A \cdot R_A \tag{4.4}$$

Ao conectar o MCC à fonte de alimentação com corrente contínua, E_A , é força eletromotriz induzida criada pelo campo magnético uniforme em seus polos. Desta forma, os condutores da armadura são forçados a conduzir corrente I_A , Fig. 4.3. Os comutadores exercem a função de orientar a direção da corrente nos condutores que estão sobre a influência do mesmo polo. De acordo com a definição da força de Lorentz o condutor conduzindo corrente quando inserido em campo magnético, sofre a ação de força que tende a move-lo. Os condutores presentes nas extremidades estão sujeitos a esta força, fazendo com que a armadura seja rotacionada. A armadura do MCC é rotacionada na direção do torque desenvolvido pelo motor, conhecido como torque de acionamento (RAO; RAVI, 2012).



Fig. 4.3 - Sentido da força aplicada nos condutores da armadura no MCC de 2 polos.

O circuito equivalente do MCC é ilustrado na Fig. 4.4(a). O circuito da armadura é representado pela fonte de tensão ideal E_A e o resistor R_A . Esta representação é o equivalente de Thevenin de toda estrutura do rotor. A queda de tensão nas escovas é representada pela bateria V_{escova} , e tem polaridade oposta à direção do fluxo de corrente na máquina. Os enrolamentos de campo são representados pelo indutor L_F e o resistor R_F . O resistor R_{ajuste} representa o resistor variável externo que controla a corrente de campo (FITZGERALD et al., 2003). Existem variações do circuito equivalente básico. A queda de tensão nas escovas pode ser considerada desprezível, em relação a magnitude da tensão na máquina. A resistência interna dos enrolamentos de campo pode ser agrupada com o resistor variável e o valor total é representado por R_F , como ilustrado na Fig. 4.4(b).

A tensão interna na máquina é dada por (4.5). A magnitude do torque é a mesma independente do sentido da corrente. O sentido da corrente é alterado com a inversão das polaridades na armadura do motor. O torque induzido, τ_{ind} aplicado pela máquina é dado por (4.6).



Fig. 4.4 - Circuito equivalente do MCC (a) normal e (b) simplificado.

$$E_A = K \cdot \phi \cdot \omega \tag{4.5}$$

$$\tau_{ind} = K \cdot \phi \cdot I_A \tag{4.6}$$

onde, K é a constante do motor, ϕ o fluxo de corrente, I_A a corrente na armadura e ω a velocidade angular.

4.3 Tipos de motores de corrente contínua

O motor de corrente contínua é dividido de acordo com a excitação do campo, podendo ser: i) excitação separada, ii) auto-excitado e iii) excitação por imã permanente.

No MCC de excitação separada, a alimentação do campo é realizada de forma separada da armadura, desta forma, a corrente da armadura não flui pelos enrolamentos de campo e o enrolamento de campo possui alimentação separada V_2 , como ilustrado na Fig. 4.5.



Fig. 4.5 - MCC excitação separada.

No MCC auto-excitado, o enrolamento de campo é conectado ao enrolamento da armadura. A forma como é realizada a ligação entre os enrolamentos dá origem a subdivisão através do tipo de auto-excitação: i) série, ii) composta e iii) em derivação (CHAPMAN, 2005).

A excitação em série é o tipo de ligação mais simples, em que o enrolamento do campo é conectado em série com o enrolamento da armadura. Neste tipo de ligação toda corrente que flui pelo enrolamento da armadura atravessa o enrolamento de campo, como ilustrado na Fig. 4.6.



Fig. 4.6 - MCC excitação em série.

O MCC auto-excitado de excitação composta contém essencialmente o enrolamento de campo conectado em série e em derivação ao enrolamento da armadura, como ilustrado na Fig. 4.7, possuindo assim características da excitação em série e em derivação.



Fig. 4.7 - MCC excitação composta.

O modelo de excitação composto pode ser realizado de dois modos: i) acumulativo, quando o fluxo do campo de derivação auxilia o fluxo do campo principal, o fluxo resultante é dado pelo somatório do fluxo do enrolamento em série com o fluxo do enrolamento em derivação, e ii) diferencial, o fluxo produzido pelo enrolamento de campo em derivação diminui o efeito do campo gerado pelo enrolamento em série, o fluxo resultante é dado pela diferença entre o fluxo em série e o fluxo em derivação (SLEMON, 1992). O MCC auto-excitado em derivação, também conhecido como *shunt*, possui enrolamento de campo alimentado diretamente a partir dos terminais da armadura do motor, Fig. 4.8.



Fig. 4.8 - MCC excitação em derivação.

As características de saída de velocidade do MCC excitado em derivação podem ser obtidas a partir das equações de tensão (4.5) e torque (4.6), juntamente com aplicações diretas da Lei de Kirchhoff das tensões, de forma que a expressão para o motor *shunt* é representada por:

$$V = E_A + I_A \cdot R_A \tag{4.7}$$

A tensão induzida é dada por $E_A = K \cdot \phi \cdot \omega$, portanto, escreve-se (4.8):

$$V_{in} = K \cdot \phi \cdot \omega + I_A \cdot R_A \tag{4.8}$$

O torque induzido é dado por (4.6), logo, a corrente I_A pode ser expressa por:

$$I_A = \frac{\tau_{ind}}{K \cdot \phi} \tag{4.9}$$

Pode-se analisar o torque induzido τ_{ind} em movimento, utilizando a velocidade an-

gular em $rad \cdot s^{-1}$ tensão e corrente da armadura.

$$\tau_{ind} = \left(V - I_A \cdot R_A\right) \frac{I_A}{\omega} \tag{4.10}$$

A potência aplicada P_{ot} pelo MCC pode ser calculada a partir do torque induzido τ_{ind} e a velocidade angular ω (4.11).

$$P_{ot} = \tau_{ind} \times \omega \tag{4.11}$$

Combinando (4.8) e (4.9) obtêm-se (4.12).

$$V = K \cdot \phi \cdot \omega + \frac{\tau_{ind}}{K \cdot \phi} \cdot R_A \tag{4.12}$$

Utilizando de manipulação algébrica, escreve-se (4.13), que é a expressão para velocidade angular.

$$\omega = \frac{V}{K \cdot \phi} - \frac{R_A}{(K \cdot \phi)^2} \cdot \tau_{ind}$$
(4.13)

O MCC de ímã permanente oferece benefícios comparados com os motores convencionais, por não necessitar de campo externo, o campo necessário é gerado por imãs, desta forma, não apresentam perdas associadas ao enrolamento de cobre. Entretanto possui o risco de desmagnetização dos imãs (GIERAS, 2002).

Este motor é utilizado em servomecanismos, sistemas de controle destinados a alcançar comando e quantidade de giros precisa, por exemplo, posição, velocidade e aceleração. Isto é devido à linearidade de suas características torque-velocidade, elevados torques de aceleração e possuir menor carcaça que outros tipos de motores, para mesma potência de saída.

Os circuitos equivalentes do motor e da carga estão ilustrados na Fig. 4.9,

onde: L_A é a indutância dos enrolamentos do estator, I_A a corrente nos enrolamentos do estator, T_g o torque gerado pelo motor, E_g a força contra-eletromotriz, R a resistência da armadura, V a tensão aplicada aos terminais, ω a velocidade angular, J_L o momento de inércia do motor e K_W a constante de torque do motor.



Fig. 4.9 - Motor de corrente contínua de ímã permanente com carga.

Analisando a Fig. 4.9 tem-se (4.14):

$$V = L_a \frac{dI_a}{dt} + R \cdot I_A + T_g \cdot \omega \tag{4.14}$$

A expressão (4.14) representa a modelagem elétrica da máquina referente ao torque mecânico gerado e parâmetros construtivos do MCC. Devido ao fluxo na armadura do MCC ser mantido constante a expressão do torque é dada por:

$$T_g = K_W \cdot I_A \tag{4.15}$$

O K_W é a constante de torque. Ao torque gerado T_g , opõem-se diversos torques; alguns tem origem dentro do motor, como T_f , que é o torque constante de atrito e $J_m d\omega/dt$ o torque originado pelo momento de inércia do motor. Outros são originados pela carga tais como $J_L d\omega/dt$, que é o torque de inércia da carga, $K_v \cdot \omega$ torque de atrito viscoso da carga, T_L torque resistente da carga. Equacionando estes torques tem-se (4.16), que representa a expressão mecânica do motor (CHAPMAN, 2005).

$$T_g = (J_m + J_L)\frac{d\omega}{dt} + K_v \cdot \omega + T_f + T_L$$
(4.16)

As expressões (4.14) e (4.16) representam a dinâmica do motor. Combinando-as, obtém-se o diagrama de blocos da Fig. 4.10.

No diagrama de blocos da Fig. 4.10, observa-se que a força contra-eletromotriz ajuda a reduzir a sensibilidade da velocidade às variações da carga. De fato, quando a velocidade decresce, o torque gerado pelo motor aumenta. Sem a realimentação interna $(K_g = 0)$ o torque gerado se manteria constante. A curva que relaciona T_g e a



Fig. 4.10 - Diagrama de blocos do motor.

velocidade em regime estacionário é ilustrada na Fig. 4.11. O gráfico da Fig. 4.11 pode ser obtido através da combinação de (4.14) e (4.15), considerando a diferencial da corrente I_A em relação ao tempo igual a *zero*, escrevendo a expressão (4.17) (SLE-MON, 1992):

$$V = \left(\frac{R}{K_W}\right)T_g + K_g \cdot \omega \tag{4.17}$$



Fig. 4.11 - Curva velocidade-torque para motor de corrente contínua de ímã permanente.

Se $\omega = 0$, então:

$$T_g = T_{gs} = \frac{V \cdot K_W}{R} \tag{4.18}$$

onde T_g é torque produzido pelo motor ligado e é conhecido por torque de aceleração ou torque de arranque, ω_{nl} é a velocidade sem carga.

4.4 Controle de velocidade

Os métodos de controle de velocidade em MCC mais utilizados são: i) a variação da resistência de campo R_{ajuste} , variando o fluxo do campo, ii) a utilização de resistências em série com o circuito da armadura e iii) a variação da tensão aplicada à armadura.

Tratando-se de MCC de imã permanente, devido ao fluxo ser constante, o modo de controle de velocidade indicado é a variação da tensão aplicada em seus terminais. Com a elevação da tensão V_A , a corrente da armadura I_A deve aumentar, proporcionando aumento no torque induzido $\tau_{ind} = K \cdot \phi \cdot I_A$, tornando τ_{ind} maior que o torque solicitado pela carga, desta forma, aumentando a velocidade angular ω do MCC.

A velocidade do MCC de imã permanente é controlada a partir da tensão aplicada aos polos e a elevação da carga aplicada, desta forma requerendo aumento de corrente para manutenção da velocidade. A variação do torque aplicado pelo motor pode correlacionar a variação da corrente consumida. Caso a fonte de alimentação não forneça a corrente necessária ocorrerá diminuição da velocidade, porém a correlação potência consumida pelo motor e torque aplicado ainda é mantida (FURRIEL et al., 2015).

4.5 Considerações

Nos instrumentos de medição é de grande importância a utilização de sensores de qualidade, pois, a precisão do sensor define a precisão do instrumento. Instrumentos que medem a resistência do solo a penetração em geral utilizam como elemento sensor células de carga. O instrumento fica limitado ao intervalo de operação da célula de carga. Em medições de resistência do solo à penetração, é necessário o controle da velocidade na qual a haste penetra o solo. As características do MCC permitem avaliar o torque gerado de acordo com a variação da corrente. Logo, ao utilizar o MCC em tensão constante a variação do torque produz variação diretamente proporcional na corrente, de forma a manter a velocidade constante.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos para: i) construção e testes do equipamento (penetrômetro) a ser desenvolvido, ii) metodologia de obtenção da força aplicada pelo motor de corrente contínua (MCC) no solo, iii) preparação das amostras para correlacionar conceitos de análise de compactação do solo com as propriedades do MCC e iv) metodologia de testes e validação do equipamento, v) analisar as relações entre a resistência do solo à penetração e parâmetros do motor de corrente contínua (MCC), permitindo a utilização do mesmo como instrumento sensor da força aplicada.

5.1 Projeto mecânico

Para a construção do equipamento que realize a penetração da haste no solo e utilize somente o MCC como sensor, é necessário que os parâmetros: i) sustentação e ii) penetração da haste no solo com velocidade constante sejam levados em consideração como parâmetros básicos de projeto.

O sistema de sustentação será o responsável por manter o equipamento na posição perpendicular ao solo. Além de servir como suporte para as demais partes do equipamento como o sistema de alimentação, deslocamento e penetração da haste no solo. Na base do sistema de sustentação será posicionada a bateria e o envolucro de proteção para impedir o acúmulo de poeira e outros resíduos nas engrenagens do equipamento.

Para a penetração da haste no solo será utilizada a força aplicada pelo MCC. Esta força será transmitida pela árvore de transmissão que é composta pela caixa de transmissão e os fusos helicoidais. A árvore de transmissão, ilustrada na Fig. 5.1(a), será responsável por transformar a velocidade angular, gerada pelo motor, em movimento linear, promovendo a penetração e retirada da haste do solo. Na Fig. 5.1(b) são ilustrados a transmissão com a conexão do motor no pinhão, acoplamento do pinhão na engrenagem e da engrenagem no fuso que promoverá a movimentação vertical.

Na transmissão do movimento angular, gerado pelo MCC, em movimento linear, deverá ser utilizados fusos e engrenagens. O MCC deverá ser conectado à caixa



Fig. 5.1 - Árvore de transmissão a ser utilizada, (a) vista frontal e (b) vista em ângulo de 30°.

de transmissão que, dotada de engrenagens especialmente desenvolvidas, funcionará como acoplamento do fuso e proporcionará o deslocamento linear a partir do movimento angular. O movimento linear resultante será aplicado a haste de penetração.

As hastes a serem utilizadas devem ser desenvolvidas de acordo com a norma (ASABE, 2013), a qual indica o formato da haste. Outro fator importante é o material constituinte da haste, de forma que deverá ser desenvolvido dois tipos de haste: i) haste de aço padrão amplamente utilizada, e ii) haste cobreada, possibilitando o aplicação de métodos geoelétricos através da mesma.

O parâmetro final a ser obtido é a força aplicada na haste de penetração a partir do torque aplicado pelo MCC. Portanto, será necessário primeiramente obter o torque do motor, utilizando a corrente, tensão e velocidade angular do mesmo.

A aquisição dos parâmetros corrente, tensão e velocidade angular do MCC será realizada a partir de sensores analógicos, de tensão e corrente e sensor digital, o *encoder*, para velocidade angular. Após realizada a aquisição, os dados devem ser analisados de forma a obter o valor do torque gerado pelo motor, utilizando a expressão (4.10).

De posse do valor do torque aplicado pelo MCC, realiza-se o cálculo da transmissão de potência na árvore de transmissão. Primeiramente deve-se analisar o acoplamento das engrenagens que promove o movimento angular que movimentará a haste verticalmente nos fusos helicoidais.

O motor será acoplado diretamente na engrenagem motriz, que promoverá a transmissão da rotação. Na engrenagem motriz (Fig. 5.1), serão acopladas duas engrenagens movidas. A transmissão de potência pode ser calculada utilizando a expressão (3.8). Após o cálculo do torque aplicado ao fuso helicoidal ser obtido, é possível realizar o cálculo da força aplicada ao fuso helicoidal. Para isto será utiliza-se a expressão (3.12).

O coeficiente de atrito será obtido a partir da força F_a aplicada para movimentação da haste antes de iniciar a penetração no solo, de forma que conhecendo a massa em movimento, é possível calcular o coeficiente de atrito utilizando a expressão (3.13). O coeficiente de atrito será calculado com o intuito de calibrar o sistema. O valor do coeficiente de atrito será utilizado como parâmetro indicativo de influências externas que se darão devido aos desgastes das peças, acúmulo de poeira e variação da temperatura.

O aparelho a ser desenvolvido é ilustrado na Fig. 5.2, onde (i) é o suporte do motor, (ii) é o MCC utilizado, (iii) a caixa de transmissão, (iv) são os fusos de apoio, (v) a haste de penetração, (vi) o cone de penetração, (vii) a fonte de alimentação, (viii) a placa controladora e (ix) a base de sustentação.

5.2 Projeto eletrônico

O projeto eletrônico será dividido de acordo com a aplicação: i) sistema de alimentação, ii) sistema de aquisição de dados, iii) sistema atuador e iv) sistema de controle.

O sistema de alimentação será desenvolvido utilizando duas baterias, uma com capacidade elevada de carga, a ser utilizada na alimentação do motor e outra a ser utilizada no sistema eletrônico em geral. Na parte de baixa potência a tensão será estabilizada utilizando conversor de corrente contínua do tipo *Buck*, que proporcionará rendimento superior aos reguladores lineares de tensão. A utilização de baterias é necessária para realização da medição em campo, sendo fator limitante para o tempo de utilização do equipamento em campo.

O sistema de aquisição de dados deverá ser montado em placa dedicada, que proporcionará elevada taxa de amostragem e maior confiabilidade na aquisição e pro-



Fig. 5.2 - Sistema proposto.

cessamento dos dados. Será utilizada memoria RAM como *buffer* na aquisição dos dados, que serão adquiridos de forma analógica utilizando conversor analógico digital (ADC¹), que enviará os parâmetros avaliados ao microcontrolador responsável pela manipulação, armazenamento e gravação dos dados.

Os sensores medirão indiretamente a força de penetração utilizando como dados tensão, por divisão de tensão, e corrente, utilizando sensor de efeito hall. A velocidade será mantida constante e garantirá que o cálculo da força de penetração seja preciso. A medição indireta proporcionará que influências externas sejam consideradas na calibração do instrumento.

O sistema de posicionamento indicará a posição do aparelho sobre a superfície do terreno a ser mapeado, com precisão relativa à precisão do mapa a ser obtido. A localização será mensurada utilizando o Sistema de Posicionamento Global (GPS), que indicará as coordenadas geográficas em que serão realizadas as medições.

A gravação dos dados será realizada pelo microcontrolador e posteriormente será armazenado em memória permanente, em forma de tabela, seguindo padrão apre-

¹ADC, Analog-to-Digital Converter

sentado na Tabela 5.1.

Horário	Ano, mês, dia, hora, minuto, segundo			
GPS	Latitude e Longitude			
Tempo	Tensão	Corrente	Velocidade	Profundidade
T_1	V_1	I_1	ω	D_1

Tabela 5.1 - Formato de armazenamento de dados.

Na Tabela 5.1, T_1 é o tempo inicial do processo de medição, V_1 é a tensão aplicada aos terminais do motor, I_1 corrente consumida, ω velocidade angular do motor e D_1 profundidade alcançada pela haste.

O sistema atuador será desenvolvido utilizando driver de potência com funcionamento baseado em conversor CC, conhecido como ponte-H, que devido ao posicionamento dos dispositivos de chaveamento Q1, Q2, Q3 e Q4, ativa o motor no sentido de rotação selecionado, conforme ilustrado na Fig. 5.3.



Fig. 5.3 - Funcionamento da ponte-H com sentido de giro do MCC (a) horário e (b) anti-horário.

Neste conversor a variação da tensão é dada pelo percentual de tempo que o dispositivo permanece em estado de condução (5.1), e a polaridade de acordo com a escolha dos dispositivos de chaveamento, indicando a direção do fluxo de corrente, utilizando método denominado PWM². A tensão de saída do conversor, V_{out} , é dada por:

² Pulse Width Modulation, modulação por largura de pulso.

$$V_{out} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \cdot V_{in} \tag{5.1}$$

onde, V_{in} a tensão de entrada, T_{on} é o tempo que os dispositivo permanece em condução e T_{off} o tempo que o dispositivo permanece como circuito aberto. O controle será implementado digitalmente em microcontrolador responsável pelo driver de potência, que receberá o valor da velocidade angular do motor, tensão nos terminais e corrente consumida. Com intuito de realizar controle pelo driver responsável pelo chaveamento da ponte-H, deverá ser desenvolvido sistema de ativação em alta velocidade de chaveamento.

Será realizado controle em malha fechada e como parâmetros de realimentação deverão ser utilizados a velocidade do motor e a tensão entre os terminais do mesmo. Quando a leitura de corrente apresentar valores acima do permitido (valor que será definido de acordo com o motor a ser utilizado), será indicativo de que houve travamento da haste de penetração, ocasionado por solo com elevada compactação, pedra ou raiz, inviabilizando a medição naquele determinado ponto.

5.3 Validação do aparelho

A validação do aparelho será dividida em duas etapas, primeiramente deve-se acoplar massas ao sistema com objetivo de simular a carga aplicada ao motor. O método de acoplamento é apresentado na Fig. 5.4. Na qual pode-se verificar

A seguir é necessário construção de recipiente em PVC (molde) com intuito de conter as amostras do solo. O molde a ser construído deverá possuir no minimo r = 100mmde raio interno, para evitar a influencia do molde na medição, e altura L = 100mmcomo ilustrado na Fig. 5.5.

A coluna após montada ficará com 600mm de altura, onde A representa o acoplamento externo utilizado para manter os módulos B sobrepostos. A haste utilizada será a mesma em todos experimentos, de forma a diminuir o erro acumulado entre as medições.

A metodologia proposta para validação do equipamento desenvolvido consiste em variar valores de compactação do solo para cada anel B. O solo contido em cada anel B será submetido a determinado esforço utilizando o ensaio Proctor Normal de



Fig. 5.4 - Acoplamento de carga ao sistema (a) frontal, (b) lateral e (c) isométrica.



Fig. 5.5 - Modulo padrão de medição da compactação.

compactação do solo, na qual o esforço é dado pela quantidades de golpes aplicados N_b , obtendo o esforço de compactação ξ (5.2). Determinada a altura das bateladas como sendo h, quanto maior a quantidade de golpes aplicados maior o ξ , o peso δ e, consequentemente, maior a compactação do solo.

$$\xi = \frac{K_e \cdot N_b}{\delta \cdot h} \tag{5.2}$$

Para avaliação da compactação do solo deve-se ter como procedimento: i) medir a massa do molde, ii) adicionar solo seco, previamente peneirado, no volume desejado, iii) medir o volume ocupado pelo solo, iv) compactar o solo com esforço de compactação utilizado o ensaio Procto Normal, v) medir o volume ocupado pelo solo compactado, vi) repetir os procedimentos (ii) à (v) até que o molde esteja totalmente preenchido.

O objetivo da preparação das amostras é obter diferentes tipos de compactação do solo para a realização dos experimentos de correlação entre os parâmetros do MCC e a resistência do solo à penetração. Desta forma, é possível validar o aparelho com acurácia da medição e influência da variação da velocidade na medição. As medições deverão ser repetidas para validação estatística.

O método proposto para relacionar resistência do solo à penetração (RP), tensão, corrente e velocidade angular do MCC, consiste em realizar medidas dos parâmetros do MCC ao realizar a penetração no solo variando a RP de acordo com o esforço de compactação ξ .

A cada incremento na profundidade da haste, deve ser medido os valores de tensão, corrente e velocidade angular no MCC. Para cada incremento de profundidade, a RP é obtida. Os valores encontrados utilizando o aparelho proposto, deverão ser comparados com valores de penetrômetros comerciais. Os dados a serem comparados serão os valores da compactação do solo em relação a profundidade da haste.

A fonte de alimentação a ser utilizada deve possuir carga suficiente para alimentar o motor sem que haja queda de tensão na fonte, fator este que acarretaria em queda da velocidade.

5.4 Considerações

A correta aplicação da metodologia de construção do equipamento é imprescindível para obter dados confiáveis do sistema de medição. Deve-se conhecer os parâmetros do motor utilizado, assim como o a árvore de transmissão e a corrente necessária para manutenção do torque pelo motor. Para validação das medições é utilizado o ensaio Proctor Normal, este ensaio é utilizado para avaliar a precisão de equipamentos e
métodos de medição da resistência do solo à penetração.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

Neste capítulo são dispostos os resultados obtidos utilizando as metodologias apresentadas no capítulo anterior. Este capítulo está dividido em três partes: i) apresentação do equipamento desenvolvido, ii) correlação entre os parâmetros do MCC e a resistência à penetração do solo e iii) validação do sistema.

6.1 Instrumentos utilizados

Para mensurar a resistência do solo à penetração foram utilizados dois equipamentos distintos: i) Penetrolog *PLG1020*, fabricado pela Falker, que realiza a medição da compactação do solo a partir da força aplicada pelo operador ao cravar a haste no solo; neste aparelho os dados são obtidos utilizando célula de carga e o controle da velocidade depende da habilidade do operador e ii) penetrômetro desenvolvido utilizando parâmetros do MCC para obtenção da compactação do solo, com velocidade de penetração controlada eletronicamente e com elevada taxa de aquisição de dados.

O equipamento desenvolvido é apresentado na Fig. 6.1. Na Fig. 6.1(a) tem-se o equipamento completo, com a grade de sustentação e o sistema de movimentação da haste. A Fig. 6.1(b) apresenta o motor e o sistema de transmissão utilizado para movimentação da haste. O encoder utilizado para medir a velocidade de rotação do motor é protegido pela caixa plástica entre os fusos. Na Fig. 6.1(c) tem-se o detalhe do acoplamento. O equipamento, sem baterias, possui massa de 32kg, o que facilita sua movimentação durante a aplicação do método.

Neste equipamento, os parâmetros necessários para os cálculos são obtidos utilizando conjunto de sensores que realizam a medição indireta da força de penetração da haste no solo, armazenando os dados em *Datalogger*. O software embarcado permite o controle da velocidade de penetração e a auto calibração, avaliando o coeficiente de atrito, que é o acumulador de ruídos nos dados coletados.

O equipamento desenvolvido possui taxa de aquisição de dados de 100 amostras por segundo. A velocidade de penetração padronizada pela ASABE (2013) é de $30 \ mms^{-1}$. Desta forma são realizadas aproximadamente 330 medições por centímetro. Estas medições passam por tratamento inicial, em que é calculada a média entre três medições e o valor obtido é armazenado, aumentando a taxa de repetibilidade



Fig. 6.1 - Penetrômetro desenvolvido, (a) equipamento completo, (b) sistema de transmissão utilizado e (c) detalhe do isolamento.

nas medições e armazenando 100 medições por centímetro.

Os componentes utilizados foram selecionados utilizando dois princípios básicos: i) aplicação correta no projeto e ii) equipamentos encontrados no mercado nacional. O sistema eletrônico foi dividido em módulos, de forma a possibilitar a avaliação individual para os ajustes necessários durante o desenvolvimento das placas. Os módulos são divididos em: i) unidade central de processamento, ii) aquisição e armazenamento e iii) controle e potência. O esquemático do sistema desenvolvido é apresentado no Apêndice A

A unidade central de processamento, apresentada na Fig 6.2, possui relógio de tempo real, indicativo de funcionamento (erro no sistema, medição ativada e placa energizada), botões de interface com o usuário para solicitar medição ou acusar erro, interface de rede para receber solicitação de medição a distância e comunicação SPI¹ com os demais módulos.

O módulo de aquisição e armazenamento de dados, apresentado na Fig. 6.3, utiliza microcontrolador responsável pelo tratamento inicial dos dados, conversor analógico digital (ADC) *MCP3204*, que possui 12*bits* de resolução. Devido a quantidade de amostras é necessário a utilização de memória acessória para armazenar temporariamente uma medição completa. As medições são armazenadas via SPI em memória RAM dedicada, 23LC1024 que possui 1024Kbits. Posteriormente, medições arma-

¹SPI, Interface serial entre periféricos utilizada em pequenas distâncias



Fig. 6.2 - Placa com unidade central de processamento.

zenadas na memória RAM são enviadas a memória de longo prazo.



Fig. 6.3 - Placa com o módulo de aquisição e Datalogger.

Os dados são armazenados no formato indicado na Tabela 5.1. Para cada medição o *Datalogger* armazena novo arquivo (tabela). O *Datalogger*, apresentado na Fig. 6.3, necessita dos parâmetros de localização espacial e temporal e estes parâmetros são obtidos através do relógio de tempo real (RTC) DS1307 e do GPS U-Blox-M6, com precisão em áreas abertas de 1, 5m.

O sistema de controle e potência tem como variável controlada a velocidade de rotação do MCC. O controle é realizado utilizando microcontrolador que habilita modulação PWM, que ativa o conversor CC (ponte-H), ilustrado na Fig 6.4. A ativação dos dispositivos de chaveamento realiza a variação da velocidade e direção

de rotação. O dispositivo de chaveamento escolhido é do tipo MOSFET IRFP2907, possibilitando fluxo de potência de até 470W.



Fig. 6.4 - Esquemático da ponte-H desenvolvida.

O funcionamento é baseado na ativação dos *MOSFET*, que ao habilitar a modulação PWM em Q1, sature Q3 e aterre o *gate* de Q2 e Q4, desta forma, tem-se a polarização do motor em OUT_1, positivo e OUT_2, negativo. Do mesmo modo, ao habilitar modulação PWM em Q2, satura Q4 e aterra o *gate* de Q1 e Q3, obtendo a polarização inversa no MCC, como ilustrado na Fig. 5.3(b).

A ponte-H foi desenvolvida para a reduzir o custo e diminuir as perdas por chaveamento. Para isto, foi utilizado MOSFET do tipo N, devido ao custo elevado e dificuldade de aquisição de MOSFET do tipo P. No momento do chaveamento ocorrem as perdas no dispositivo, para diminuir estas perdas foi utilizado o PWM apenas na parte da ponte-H ligada ao terminal positivo da bateria, a parte conectada ao polo negativo da bateria é saturada, reduzindo pela metade as perdas por chaveamento.

De forma a realizar a comutação dos dispositivos de chaveamento, foi utilizado o circuito integrado (CI) IR2112. Este CI funciona como *driver* para ativação do MOSFET, que realiza o chaveamento a partir do sinal digital enviado pelo micro-controlador, com a tensão necessária para saturação, reduzindo as perdas devido ao MOSFET não obter saturação completa. O esquemático do *driver* é ilustrado na Fig. 6.5(a) e o *driver* desenvolvido é apresentado na Fig. 6.5(b).

Na Fig. 6.6, é apresentado o controlador embarcado ao driver de ativação dos dis-



Fig. 6.5 - Driver da ponte-H, (a) esquemático e (b) placa desenvolvida.

positivos de chaveamento utilizados. A placa de controle foi projetada para receber os comandos, interpretá-los e enviá-los como requisição para o *driver*.



Fig. 6.6 - Módulo de controle do driver

Os sensores utilizados foram selecionados pela taxa de aquisição e faixa de medição. O sensor de corrente utilizado foi o de efeito Hall ACS758LCB, Monolítico CB, 5 pinos com alimentação de 3V à 5,5V, conectado a placa da Fig. 6.7, na qual é apresentado o modulo de conexão do circuito a ser aferido e a conexão com a placa de aquisição de dados, também responsável pela alimentação do sensor. Este sensor possibilita a medição bidirecional de corrente, de -100A a 100A. Junto ao sensor de corrente foi conectado o conversor MCP3204 ADC de 12 bits, taxa de aquisição de 100 mil amostras por segundo, 4 entradas, desta forma possibilitando resolução de 48,82mA.

A medição da profundidade de penetração é realizada pelo sensor ultrassom HC-SR04 e comparada com a velocidade média da haste. A velocidade é medida utilizando *encoder* óptico, de 300 pulsos por revolução, que conta o tempo entre os



Fig. 6.7 - Placa de conexão do sensor de corrente utilizado.

pulsos e obtém a velocidade angular.

A penetração é realizada verticalmente no solo, sendo assim, necessário caixa de transmissão onde o movimento angular é transformado em movimento linear. A caixa de transmissão, apresentada na Fig. 6.8, é dividida em duas partes: i) redução inicial com a utilização de engrenagens, a menor acoplada ao eixo do motor é a engrenagem motriz, conectada a duas engrenagens motoras e ii) transmissão vertical utilizando a engrenagem motora, com rosca interna, compatível com o fuso utilizado possibilitando o movimento vertical a partir da rotação do motor, conforme apresentado na Fig. 5.1.

Ao rotacionar o motor, o conjunto entra em movimento utilizando o fuso de sustentação como guia linear. O princípio de transferência de potencia utilizando fuso helicoidal possibilita o aumento de torque necessário para realizar a penetração mesmo em solos com alto índice de compactação.

A Fig. 6.8(a) apresenta a vista superior da caixa de transmissão com o motor e os fusos helicoidais utilizados. Na Fig. 6.8(b) é apresentado o acoplamento do motor no mandril, e deste na engrenagem motriz. A Fig. 6.8(c) apresenta detalhes das engrenagens utilizadas para movimentação do sistema. ; A redução obtida nas engrenagens é de 3:1, onde a engrenagem motora possui 9 dentes e a engrenagem motriz possui 27 dentes. O fuso helicoidal utilizado possui rosca do tipo ACME², passo $\rho = 5,08mm$ e diâmetro médio dm = 25mm, que a cada 3 rotações do motor a haste desloca um passo do fuso, 5,08mm, assim para obter a velocidade padrão de penetração, $30mms^{-1}$, é necessário controlar a rotação do motor em 355rpm.

O MCC utilizado é o HC683LG-021 fabricado pela *Johnson Motors* e vendido no Brasil pela *Bosh* como acessório da parafusadeira modelo GSR14-4, apresentado na

 $^{^2 \}rm Rosca do tipo ACME é utilizada em transmissão de potência devido a menor influência do atrito em comparação com os demais tipos de rosca.$



(c)

Fig. 6.8 - Caixa de transmissão desenvolvida, (a) vista superior, (b) motor acoplado a caixa de transmissão e (c) engrenagem em detalhe.

Fig. 6.9. Este MCC possui caixa de redução primária e mandril utilizado para fixação do motor à engrenagem motora. O conjunto motor e redução primária oferece rotação de 1.400*rpm* em tensão de 14, 4V e torque rotor de 15Nm. Ao passar pela segunda redução de 3:1, o torque rotor eleva-se para 45Nm. Porém, como são utilizados dois fusos, o valor total do torque é dividido por dois, tornando-se 22, 5Nm para cada fuso. De posse da força de atrito f = 0, 154N, se calcula, a partir de (3.12), a força vertical aplicada $F_a = 5.125, 3N$ ou 522, 63kgf.

O módulo de controle recebe a requisição de manter a velocidade de penetração constante, recebe ainda os parâmetros de *feedback* para o sistema, que são: i) velocidade atual de penetração, ii) tensão nos terminais do motor, ii) corrente consumida e iv) profundidade alcançada. O controle é realizado digitalmente, aplicando modu-



Fig. 6.9 - Motor de corrente contínua utilizado.

lação por largura de pulso, PWM, no chaveamento do *driver* de potência, que possui sistema de segurança para evitar danos devido a sobrecarga quando encontrado pedras, galhos ou qualquer meio que obstrua a penetração da haste no solo.

A haste de penetração utilizada é apresentada na Fig. 6.10. Na Fig. 6.10(a) tem-se as duas hastes, uma desenvolvida em cobre e outra em aço padrão comercial. A moeda é utilizada como referência para o tamanho do cone de penetração das hastes. A Fig. 6.10(b) apresenta o equipamento montado com a haste conectada seguindo o padrão da ASABE (2013). Todo este conjunto garante que os valores medidos estão relacionados ao índice do cone dado por (3.1), de forma que os resultados são obtidos em unidades de pressão, kPa.



Fig. 6.10 - Hastes de penetração utilizada, (a) hastes de cobre e aço e (b) haste conectada ao equipamento proposto.

6.2 Verificação dos parâmetros do MCC

Após a preparação do equipamento, realizaram-se testes para verificação da força aplicada pelo MCC, com o intuito de observar a relação entre os parâmetros de corrente, tensão velocidade e torque. Inicialmente, colocou-se o equipamento em espera, sem a haste, com a base a altura de 70*cm* do solo. Em seguida, realizou-se testes de aquisição com o sistema à vazio. Posteriormente, foram adicionados pesos nas extremidades do sistema.

O objetivo destes testes foi verificar a movimentação do sistema, validar o sistema de aquisição e obter parâmetros de correlação da força aplicada na haste de penetração. Nas Fig. 6.11 à Fig. 6.14 são apresentados os resultados de corrente, tensão, velocidade e torque para diferentes massas adicionadas como carga no sistema.

Para realizar as medições, o sistema foi apoiado ao solo e as cargas foram fixadas, através de cabos no local onde a haste será conectada. Desta forma, quando o sistema desce, simulando a penetração da haste, as cargas solicitam torque ao sistema. Assim, o eixo das abscissas apresenta o deslocamento vertical do sistema. As medições iniciam-se no valor -10cm devido ao deslocamento percorrido antes de iniciar a aplicação da carga.

Nas Fig. 6.11(a) à Fig. 6.14(a) são apresentados os resultados obtidos da corrente consumida para levantar as cargas. As Fig. 6.11(b) à Fig. 6.14(b) são apresentados os resultados obtidos da tensão aplicada ao MCC para levantar as cargas. Nas Fig. 6.11(c) à Fig. 6.14(c) são apresentados os resultados obtidos na medição da velocidade de rotação no levantamento das cargas e as Fig. 6.11(d) à Fig. 6.14(d) são apresentados o torque aplicado pelo motor no levantamento das cargas.

A Fig. 6.11 apresenta os resultados obtidos para massas de 10kg, $15kg \in 20kg$. Na Fig. 6.12 são apresentados os resultados para os testes com massas de 30kg, $40kg \in 45kg$. A Fig. 6.13 apresenta os resultados de medição para as massas de 50kg, $55kg \in 60kg$ e na Fig. 6.14 são apresentados os resultados para os testes com massas de 70kg, $80kg \in 90kg$.

A primeira análise visual do gráfico de resultados do método proposto, apresenta parâmetro com acurácia superior a do aparelho comercial, pois, o aparelho comercial inicia as medições em 6*cm* de solo, devido a vibração não absorvida pela célula de carga nos inicio da penetração. Já o aparelho desenvolvido obtém resultados



Fig. 6.11 - Medição com carga de 10kg, 15kg e 20kg.

completos.

Os dados adquiridos neste primeiro experimento permitiram gerar curvas que relacionam corrente, tensão, velocidade e torque com as cargas utilizadas. Observa-se que a tensão e a velocidade permanecem quase que inalteradas. O valor da corrente variou de acordo com a carga aplicada com valor mínimo de 2A e valor máximo de 4, 9A. A corrente atinge valor médio de aproximadamente 3, 5A com desvio padrão de aproximadamente 0, 81A. O torque solicitado variou de 0, 6Nm a 3, 4Nm, com média de 1, 75Nm e desvio padrão de 0, 85Nm.

Com a variação do torque solicitado pela carga, tem-se a variação da corrente, desta forma, é verificada a relação do torque necessário para movimentação da haste e a variação da corrente consumida pelo MCC, corroborando a hipótese de que a corrente está relacionada com a força aplicada verticalmente na haste de penetração.

Para efeito de comparação, na Fig. 6.15 apresenta-se os valores obtidos de corrente para os diferentes tipos de carga aplicada. A Fig. 6.16 apresenta a potência elétrica consumida pelo MCC, dada por (4.11).



Fig. 6.12 - Medição com carga de 30kg, 40kg e 45kg.

Com os valores obtidos nos testes e os valores nominais do motor, é possível prever a força máxima que pode ser aplicada pelo motor. A potência máxima utilizada com 90kg aplicados ao sistema foi de 210W. Seguindo a linearidade deste MCC, cujo a potência nominal é de 417W, pode-se garantir a aplicação de 175kg com esta máquina. O conjunto motor transmissão possui redução adicional de três vezes, assim possibilitando a aplicação de força de até 525kg, porém não recomendado devido à limitação mecânica do aparelho.

A partir dos valores obtidos da tensão, corrente e torque é possível calcular o índice do cone, dado por (3.1). De posse de (3.1), (3.12) e (4.10) é possível obter (6.1), que expressa os valores da compactação do solo utilizando os parâmetros do MCC. Esta é a expressão que representa a modelagem do sistema proposto.

$$IC = \frac{\left(\frac{2I_A(V-I_A\cdot R_A)}{d_m\cdot\omega}\right)\cdot\left(\frac{\pi\cdot d_m-\rho\cdot l\cdot sec\lambda}{l+\pi\cdot f\cdot d_m\cdot sec\lambda}\right)}{A_c}$$
(6.1)







Fig. 6.14 - Medição com carga de 70kg, 80kg e 90kg.



Fig. 6.15 - Corrente consumida aplicado durante o experimento.



Fig. 6.16 - Potência consumida aplicado durante o experimento.

6.3 Preparação das amostras

Para preparação das amostras utilizou-se solo coletado na região sul do município de Goiânia, no Estado de Goiás, Brasil. Este solo foi coletado a um metro de profundidade da superfície, caracterizado como latossolo vermelho distrófico. A compactação das camadas dos moldes, apresentado na Fig. 6.17, foi realizada de forma decrescente, diminuindo a influência do esforço de compactação nas camadas inferiores.

Ao realizar a sobreposição dos moldes é gerado o solo padrão de medição, segundo



Fig. 6.17 - Modelo padrão de solo para medição, (a) vista lateral com os moldes e (b) vista superior com o solo.

o esforço variável de compactação ξ_i , referente a cada camada *i* do solo, que é dado por (5.2). Desta forma, ao adicionar novas camadas ao molde, as camadas inferiores serão compactadas. A relação que exprime a compactação das camadas inferiores com relação as camadas superiores é dada por:

$$\Delta h_1 = \frac{h_1}{h_{1'}} \tag{6.2}$$

$$\Delta h_i = \frac{h_i - h_{i-1}}{h_{i'} - h_{i-1}} \tag{6.3}$$

onde h_i é a altura total do solo após a compactação, $h_{i'}$ altura antes da compactação e h_{i-1} é a altura da camada anterior. Desta forma tem-se aproximação referente a compactação em cascata a qual o solo está sujeito na sobreposição de camadas, possibilitando gerar gráfico de compactação variável. O esforço de compactação foi gerado com os parâmetros descritos na Tabela 6.1, para cada uma das seis camadas do molde. Cada molde possui quatro camadas de compactação decrescente onde a última camada de solo não sofreu compactação. Cada molde foi compactado separadamente e sobreposto para simular a estrutura real do solo.

	h_i	N_b	Δh_i	ξ_i
	33	30	0,66	5450
Camada 1	31	25	0,7381	4061,1
	29	20	0,8056	2976,8
	7	1	1	119,9
	37	40	$0,\!6167$	7777,3
Camada 2	33	30	$0,\!6471$	5559
	21	25	0,7	4282,1
	9	1	1	119,9
	43	28	0,7167	4684,5
Camada 3	32	22	0,7619	3462,1
	21	15	$0,\!84$	2141,1
	4	1	1	119,9
	52	30	$0,\!65$	5533,8
Camada 4	36	25	0,75	3996,7
	11	22	0,7857	3357,2
	1	1	1	119,9
	58	22	0,7733	3410,9
Camada 5	34	20	$0,\!8095$	2962,2
	7	12	0,875	1644,3
	1	1	1	119,9
	49	30	0,7	$5138,\! 6$
Camada 6	39	25	0,7647	$3919,\!8$
	10	18	0,8333	2589,8
	2	1	1	$119,\!9$

Tabela 6.1 - Parâmetros para criação da coluna padrão de solo.

A partir dos valores de ξ calculados e dispostos na Tabela 6.1, pode-se gerar o gráfico da Fig. 6.18. E a partir do sistema desenvolvido pode-se comparar os resultados obtidos analiticamente e experimentalmente. Os dados experimentais foram adquiridos e tratados computacionalmente.

Na Fig. 6.18, a curva azul representa os dados analíticos e a curva em vermelho os dados práticos coletados pelo sistema desenvolvido. Os valores obtidos analiticamente são comparados com os valores obtidos experimentalmente. Utilizando os valores analíticos como referência é possível calcular o erro obtido entre eles, podendo ser realizada a análise estatística e permitindo a análise de erro durante a medição e o erro acumulado como apresentado na Fig. 6.19.

Analisando a Fig. 6.19, é possível observar que o erro ocorre especialmente na mudança das camadas em função da variação da taxa de penetração da haste no solo. O erro quadrático médio calculado sobre os 5 testes realizado é da ordem de 3.2%, indicando a precisão do equipamento desenvolvido. Devido a camada não compac-



Fig. 6.18 - Compactação gerada experimentalmente e compactação medida no equipamento desenvolvido.



Fig. 6.19 - Erro pontual na medição.

tada de um molde estar em contato com a camada mais compactada de outro molde, ocorre a transição brusca entre um molde e outro, observado na Fig. 6.18, onde os valores de profundidade da curva medida distancia-se dos valores de profundidade da curva calculada. Este fato é indicativo de variação na velocidade. Esta variação ocorre devido a alterações de força necessária para realizar a penetração, diminuindo simultaneamente a taxa de compressão e a força. A velocidade acima da padronizada induz erros nas medições.

6.4 Resultados obtidos com o equipamento desenvolvido

O equipamento desenvolvido foi utilizado em campo com intuito de: i) analisar o perfil de compactação do solo e ii) comparar o equipamento desenvolvido com o comercial.

Primeiramente, foi selecionado terreno na Escola de Agronomia da UFG, na coordenada $S16^{\circ}35'38$ " $W49^{\circ}17'24$ " para coleta de dados, a qual foi realizada sobre uma linha na superfície do solo com comprimento de 9m. Esta linha foi subdividida em espaçamentos de 1m em 1m. A análise do perfil de compactação do solo sobre a linha foi realizada a partir da construção das isolinhas de compactação, utilizando os valores obtidos. A Fig. 6.20 é a apresentação dos dados coletados na forma de mapa de isocompactação que relaciona a profundidade pela posição da medição e a compactação ponto a ponto. Esta análise possibilita avaliar a estrutura do subsolo relacionado a compactação na parcela estudada.



Fig. 6.20 - Representação do perfil de compactação do solo.

Posteriormente, compactou-se o solo seco de forma aleatória com o intuito de simular diferentes camadas de solo. Após a compactação, foi acoplado o *Penetrolog 1020*, fabricado pela *Falker* ao penetrômetro desenvolvido. O intuito deste experimento é comparar o resultado do sistema desenvolvido com o penetrômetro comercial. A Fig. 6.21 apresenta a comparação dos resultados obtidos pelo penetrômetro comercial e o sistema proposto em solo seco.

O mesmo experimento foi realizado em solo seco com adicional de água (recémumedecido). A Fig. 6.22 apresenta os resultados que permitem comparar o penetrômetro comercial e o sistema proposto no solo recém-umedecido. Na Fig. 6.23 é apresentado os resultados obtidos para o mesmo experimento realizado com solo úmido e compactado após 30 minutos da adição de água. Analisando as Fig. 6.21,



Fig. 6.21 - Comparação entre penetrômetro comercial e o desenvolvido em solo seco.

Fig. 6.22 e Fig. 6.23 é possível observar a suavização da curva obtida pelo equipamento desenvolvido. Esta suavização ocorre devido ao fato do equipamento desenvolvido ter taxa de aquisição de dados elevada, o penetrômetro comercial entrega medição por centímetro e o desenvolvido entrega 100 medições por centímetro. Este fator é indicativo do aumento na precisão dos dados coletados.



Fig. 6.22 - Comparação entre penetrômetro comercial e o desenvolvido em solo recém umedecido.

A utilização do MCC como elemento sensor, no penetrômetro desenvolvido, ao invés das tradicionais células de carga, promoveu redução no custo monetário do equipamento. O custo do equipamento desenvolvido ficou aproximadamente 44% do custo



Fig. 6.23 - Comparação entre penetrômetro comercial e o desenvolvido em solo úmido.

do equipamento comercial utilizado para os testes. No entanto, o equipamento desenvolvido realiza coleta de dado com penetração no solo de forma automática. Quando comparado o equipamento desenvolvido com o equipamento automático comercial, o custo do equipamento desenvolvido fica em aproximadamente 18% do valor do penetrômetro comercial. Isto indica a viabilidade da proposta.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver aparato de medição da compactação do solo. Desta forma, desenvolveu-se equipamento que, substituindo as células de carga ou sensores gráficos visuais, possibilita a análise da compactação do solo.

O trabalho desenvolvido proporcionou análise diferenciada da compactação do solo, utilizando parâmetros básicos do funcionamento do motor de corrente contínua (MCC). Promoveu a substituição das células de carga, atualmente utilizadas em penetrômetros comerciais, pelo MCC, contribuindo com redução significativa no preço do equipamento.

O equipamento proposto realiza medições de forma automática e com controle de velocidade. A taxa de aquisição de dados deste aparelho cerca de 100 vezes maior que a do penetrômetro comercial utilizado para comparação nos testes, fator importante para a análise da compactação do solo. Os dados obtidos são armazenados automaticamente em *Datalogger* e georreferenciados.

A metodologia para teste e validação do sistema utilizou moldes com compactação padrão. Desta forma, foi possível realizar análise estatística avaliando o erro médio e percebendo o ruido provocado quando a velocidade não se mantém constante.

O sistema de comunicação consiste em interface serial de comunicação, do tipo RS485 Fator este que possibilita, através de ajustes simples, a alteração para interface de comunicação, como por exemplo *bluetooth* ou *Wi-Fi*, tanto para solicitação de medições quanto para envio de resultados.

Os resultados corroboram com a hipótese proposta de que o valor da corrente do MCC pode ser relacionado com a força de penetração no solo. Assim, pode-se produzir novas metodologias para gerar modelos de compactação do solo e equipamento de medição da resistência do solo à penetração utilizando os parâmetros do MCC.

O maior problema encontrado nas células de carga é a relação deformação pela tensão. Esta relação não é linear, forçando os fabricantes a trabalharem na região linear de cada tipo de célula de carga. Isto reduz o desempenho e amplitude de medição de cada célula. Para produzir penetrômetros que meçam a compactação do solo em grandes profundidades, existe o empecilho devido as características estruturais de fabricação da célula de carga. A proposta deste trabalho elimina este empecilho, pois, o problema fica reduzido à potência do motor.

Outro resultado é a possibilidade de produzir equipamento com tecnologia 100% nacionalizada, promovendo o desenvolvimento da indústria nacional.

7.1 Contribuições do trabalho

As contribuições podem assim ser descritas:

Artigos em congresso:

- Intelligent system for measuring soil compaction on croplands
 Publicado em IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC).
 Congresso realizado entre 10 e 13 de junho de 2015, em Roma, Itália.
- ◊ Desenvolvimento de aparelho para medição da compactação do solo
 Publicado em XII Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão (CONPEEX)
 UFG

Congresso realizado entre 19 e 21 de outubro de 2015, em Goiânia, Goiás

\diamond Automatic instrument for measuring soil penetration resistance

Publicado em CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON). Congresso realizado entre 28 e 30 de outubro de 2015, em Santiago, Chile.

♦ Methodology for Validating Measurement Systems of Soil Compaction Publicado em IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC).

Congresso realizado entre 4 e 10 de junho de 2016, em Florença, Itália.

Patentes:

♦ Aparelho automático e processo para medição da compactação do solo baseado no cálculo do índice do cone Número do pedido: BR 10 2015 013604 8

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- \diamondsuit Análise de desgaste mecânico do equipamento.
- \diamondsuit Implementar deslocamento automático.
- ♦ Acoplar o sistema desenvolvido ao pivô de irrigação e obter mapas tridimensionais de compactação do solo.
- ◊ Implementar método de geoprospecção em arranjos de vários penetrômetros acoplados a estrutura do pivô de irrigação para obtenção de mapas tridimensionais da condutividade elétrica do solo.
- ♦ Associar funções de medições de condutividade e resistividade elétrica ao equipamento, fator que permitirá a aplicação de variados métodos de mapeamento geoelétrico do solo.

ANEXO A

FOLHA DE DADOS DO MOTOR

HC683LG-021

Low Voltage DC Motors

Characteristics:

High Power Density, High Reliability

Specifications:

Dimensions	:	Ø 35.8 X 57.0 mm
Shaft Diameter	:	Ø 3.175 mm
Input Voltage	:	14.4 V DC
No Load Speed	:	23475 rpm
Stall Torque	:	678.73 mNm
Maximum Output Power	:	417.31 W
Maximum Efficiency	:	77 %
Weight	:	235 g
Operation Temperature	:	-10 to 50 °C
Storage Temperature	:	-20 to 80 °C
Electrical Connection	:	Terminal



Performance Data:

	No Load	Stall	Max Efficiency	Max Power
Current (A)	2.01	117.59	15.63	59.84
Efficiency (%)	-	-	77	48
Output Power (W)	-	-	172.84	417.31
Speed (rpm)	23475	-	20722	11738
Torque (mNm)	-	678.73	79.62	339.37

Application Examples:

Drills, Screw Drivers

Johnson Motor

sales@johnsonelectric.com

http://www.johnsonmotor.com

Drawing:





Units in Metric

APÊNDICE A

ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DESENVOLVIDO









•

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMCHUK, V.; MORGAN, M.; SUMALI, H. Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on-the-go. **Transactions of the ASAE**, American Society of Agricultural Engineers, v. 44, n. 6, p. 1377–1383, 2001. 48

ADAMCHUK, V. I.; MOLIN, J. P. Hastes instrumentadas para a mensuração da resistência mecânica do solo. **Engenharia Agrícola**, Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, v. 26, n. 1, 2006. 21

ANDRADE, P.; ROSA, U.; UPADHYAYA, S.; JENKINS, B.; AGUERA, J.; JOSIAH, M. Soil profile force measurements using an instrumented time. [S.1.]: ASAE St. Joseph, MI, USA, 2001. 47

ASABE, A. S. of A. . B. E. **S313.3: Soil cone penetrometer**. [S.l.], 2013. 21, 27, 36, 60, 69, 76

ASAE. Soil cone penetrometer. ASAE Standard. [S.l.], 2000. 21, 36

ATTERBERG, A. Die plastizität der tone. Internationale Mitteilungen für Bodenkunde, v. 1, p. 10–43, 1911. 30

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. Instrumentação e fundamentos de medidas (instrumentation and measurement fundamentals). Vol. II, Livros
Técnicos e Científicos, Brazil, Rio de Janeiro, v. 658, 2011. 45

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B.; HALLETT, P.; VALENTINE, T. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, Soc Experiment Biol, v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011. 25, 27

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de latossolos. **Engenharia Agrícola**, SciELO Brasil, v. 27, n. 1, p. 146–151, 2007. 20

BRADFORD, J. Penetrability. Methods of Soil Analysis: Part 1âPhysical and Mineralogical Methods, Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, n. methodsofsoilan1, p. 463–478, 1986. 35

BURNHAM, T.; JOHNSON, D. In situ foundation characterization using the dynamic cone penetrometer. [S.l.]: Citeseer, 1993. 19 CALIXTO, W. P.; NETO, L. M.; WU, M.; YAMANAKA, K. Parameters Estimation of a Horizontal Multilayer Soil Using Genetic Algorithm. [S.l.]: IEEE - Transactions on Power Delivery, 2010. 32

CARTER, L. M. Portable penetrometer measures soil strength profiles. Agric. Eng, v. 48, p. 348–349, 1967. 20

CASAGRANDE, A.; MORAES, M.; MÜLLER, M.; FOLONI, J. Compactação e manejo do solo na cultura da cana-de-açúcar. Qualidade física do solo: métodos de estudo-sistemas de preparo e manejo do solo. Jaboticabal: Funep, p. 150–197, 2002. 20, 38

CHAPMAN, S. Electric machinery fundamentals. [S.l.]: Tata McGraw-Hill Education, 2005. 23, 52, 55

CHEN, W.-F. Limit analysis and soil plasticity. [S.l.]: Elsevier, 2013. 30

CHEN, Y. L.; PALTA, J.; CLEMENTS, J.; BUIRCHELL, B.; SIDDIQUE, K. H.; RENGEL, Z. Root architecture alteration of narrow-leafed lupin and wheat in response to soil compaction. **Field Crops Research**, Elsevier, v. 165, p. 61–70, 2014. 25, 27

CHO, Y.; LEE, D. H.; PARK, W.; LEE, K. S. Development of a real-time measurement system for horizontal soil strength. **Journal of Biosystems Engineering**, Korean Society for Agricultural Machinery, v. 40, n. 3, p. 165–177, 2015. 22

COLLIN, A. Recherches experimentales sur les glissements spontanes des terrains argileux, accompagnees de considerations sur quelques principes de la mecanique terrestre par Alexandre Collin. [S.l.]: Carilian-Goeury, 1846. 19

COSTA, A. d.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, Á. L.; SILVA, F. R. d. Propriedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 2, p. 235–244, 2009. 21

COUTO, P. M. F. Estudo de soluções de contenção periférica em função das condicionantes de execução. 2014. 25

CRAIG, R. F. Mecânica dos solos. [S.l.: s.n.], 2013. 26
DEJONG-HUGHES, J.; MONCRIEF, J. F.; VOORHEES, W.; SWAN, J. Soil compaction: Causes, effects and control. **Extension publications (MN)**, St. Paul, MN: University of Minnesota Extension Service, 2001. 26

DEWIS, J.; FREITAS, F. et al. Physical and chemical methods of soil and water analysis. **FAO Soils Bulletin**, n. 10, 1970. 28, 30

DICKINSON, R.; MILANO, S. Isolated open loop current sensing using hall effect technology in an optimized magnetic circuit. Allegro MicroSystems, Inc.(Last visited: 7 th November 2007), 2002. 49

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. Soil strength and slope stability. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014. 27

EHRHARDT, J. P.; GRISSO, R.; KOCHER, M.; JASA, P.; SCHINSTOCK, J. Using the Veris electrical conductivity cart as a draft predictor. [S.l.]: ASAE, 2001. 21

EP542, A. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. St. Joseph, MI, 1999. 37

FARIAS, A. B. de; FUCALE, S. P.; GUSMÃO, A. D. Use of ccw (civil construction waste) in soil improvement. Journal of Civil Engineering and Architecture, David Publishing Company, Inc., v. 6, n. 7, p. 913, 2012. 22

FEDER, F.; TROLARD, F.; KLINGELHÖFER, G.; BOURRIÉ, G. In situ mössbauer spectroscopy: evidence for green rust (fougerite) in a gleysol and its mineralogical transformations with time and depth. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Elsevier, v. 69, n. 18, p. 4463–4483, 2005. 32

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D.; FITZGERALD, A. E.; FITZGERALD, A. E.; ENGINEER, E. **Electric machinery**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2003. 50

FRADEN, J. Pressure sensors. In: Handbook of Modern Sensors. [S.l.]: Springer, 2010. p. 375–397. 45

FRITTON, D. A standard for interpreting soil penetrometer measurements. Soil Science, LWW, v. 150, n. 2, p. 542–551, 1990. 40

FURRIEL, G.; CALIXTO, W.; ALVES, A.; CAMPOS, P.; DOMINGUES, E. Intelligent system for measuring soil compaction on croplands. In: Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1357–1361. 32, 49, 57

GIERAS, J. F. Permanent magnet motor technology: design and applications. [S.l.]: CRC press, 2002. 54

GROHMANN, F. Distribuição e tamanho de poros em três tipos de solos do estado de são paulo. **Bragantia**, SciELO Brasil, v. 19, n. 21, p. 319–328, 1960. 27

GUSMÃO, A. D.; JR, I. H. C. Estudo dos efeitos da interação solo-estrutura em uma edificação com fundação em terreno melhorado. XII COBRAMSEG, São Paulo, SP, ABMS, Anais, v. 3, p. 1743–1752, 2002. 25

HAMZA, M.; ANDERSON, W. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. Soil and tillage research, Elsevier, v. 82, n. 2, p. 121–145, 2005. 27

HERRICK, J. E.; JONES, T. L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. Soil Science Society of America Journal, Soil Science Society, v. 66, n. 4, p. 1320–1324, 2002. 20, 38, 39

HUANG, D.; YANG, Y.; HUANG, J.; SUN, F. Study on the assessment indexes of compaction quality for railway subgrade constructed by gobi coarse-grained soil filler [j]. China Railway Science, v. 2, p. 005, 2012. 22

IMHOFF, S.; SILVA, Á. d.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, SciELO Brasil, v. 35, n. 7, p. 1493–1500, 2000. 26, 32

IVO, W.; MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. **Bras. Ci. Solo**, SciELO Brasil, v. 23, p. 135–143, 1999. 28

JUNIOR VALADÃO, D. D.; BIACHINI, A.; VALADÃO, F. C. A.; ROSA, R. P. Penetration resistance according to penetration rate, cone base size and different soil conditions. **Bragantia**, SciELO Brasil, n. AHEAD, p. 0–0, 2014. 20

KLEYN, E.; MAREE, J.; SAVAGE, P. F. Application of a portable pavement dynamic cone penetrometer to determine in situ bearing properties of road pavement layers and subgrades in South Africa. [S.l.], 1982. 19

KÜNZEL, E. Der âprüfstab â, ein einfaches mittel zur bodenprüfung. **Bauwelt Bd**, v. 21, p. 327, 1936. 19

LAMANDÉ, M.; KELLER, T.; BERISSO, F.; STETTLER, M.; SCHJØNNING, P. Accuracy of soil stress measurements as affected by transducer dimensions and shape. Soil and Tillage Research, Elsevier, v. 145, p. 72–77, 2015. 20, 21

LIMA, R. M. F.; LUZ, J. A. M. d. Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de stokes. **Rem: Revista Escola de Minas**, SciELO Brasil, v. 54, n. 2, p. 155–159, 2001. 32

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, Elsevier, v. 116, n. 1, p. 107–136, 2003. 31

LIPIEC, J.; KUŚ, J.; SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZ, A.; NOSALEWICZ, A. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. **Soil and Tillage research**, Elsevier, v. 89, n. 2, p. 210–220, 2006. 27

LOWERY, B. A portable constant-rate cone penetrometer. Soil Science Society of America Journal, Soil Science Society of America, v. 50, n. 2, p. 412–414, 1986. 20, 40

LÜTTICKEN, R. Automation and standardisation of site specific soil sampling. **Precision Agriculture**, Springer, v. 2, n. 2, p. 179–188, 2000. 22

MALTESE, A.; CAMMALLERI, C.; CAPODICI, F.; CIRAOLO, G.; LOGGIA, G. L. Surface soil humidity retrieval using remote sensing techniques: a triangle method validation. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Remote Sensing**. [S.l.], 2010. p. 782425–782425. 30

MANOR, G.; CLARK, R. L. Development of an instrumented subsoiler to map soil hard-pans and real-time control of subsoiler depth. [S.l.]: Citeseer, 2001. 21

MEJÍAS-SANTIAGO, M.; GARCÍA, L.; EDWARDS, L. Assessment of material strength using dynamic cone penetrometer test for pavement applications. In: Airfield and Highway Pavements 2015. [S.l.: s.n.], 2015. p. 837–848. 22

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. d. S.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 16, p. 584–590, 2012. 21

MOLIN, J. P.; MAGALHÃES, R. d.; FAULIN, G. D. Análise espacial da ocorrência do índice de cone em área sob semeadura direta e sua relação com fatores do solo. **Engenharia Agrícola**, SciELO Brasil, v. 26, p. 442–452, 2006. 20

MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola**, SciELO Brasil, v. 31, n. 1, p. 90–101, 2011. 20

NAWAZ, M. F. Geochemistry of hydromorphic soils and waters under rice culture and forest-continuous measurements, thermodynamic modelling and kinetics. Tese (Doutorado) — Université Aix-Marseille, 2010. 31

NAWAZ, M. F.; BOURRIE, G.; TROLARD, F. Soil compaction impact and modelling. a review. **Agronomy for sustainable development**, Springer, v. 33, n. 2, p. 291–309, 2013. 28

NETO, L. M. Instrumentação avançada em ciência do solo. [S.l.]: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2007. 32

NOVAIS, R.; ALVAREZ, V.; SCHAEFER, C. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: SBCS, v. 1, p. 352, 2000. 26

OLIVEIRA, F. H. T. d.; ARRUDA, J. d.; SILVA, I. d.; ALVES, J. d. C. Amostragem para avaliação da fertilidade do solo em função do instrumento de coleta das amostras e de tipos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, SciELO Brasil, v. 31, n. 5, p. 973–983, 2007. 28

OSMAN, K. T. Soil degradation, conservation and remediation. [S.l.]: Springer, 2013. 25, 27

OWEN, G.; DRUMMOND, H.; COBB, L.; GODWIN, R. An instrumentation system for deep tillage research. Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers (USA), 1987. 21

PANAYIOTOPOULOS, K.; PAPADOPOULOU, C.; HATJIIOANNIDOU, A. Compaction and penetration resistance of an alfisol and entisol and their influence on root growth of maize seedlings. Soil and Tillage Research, Elsevier, v. 31, n. 4, p. 323–337, 1994. 31

PAPROTH, E. Der prüfstab künzel, ein gerät für baugrunduntersuchungen. **Bautechn. Bd**, v. 21, p. 327, 1943. 19

PATRIZZI, V.; VAZ, C.; IOSSI, M.; PRIMAVESI, O. Modelamento do efeito da umidade e densidade na resistência à penetração dos solos. In: SBCSUNESP RIBEIRÃO PRETO. **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**. [S.1.], 2003. v. 29. 37

PINARD, M. I.; PAIGE-GREEN, P.; HONGVE, J.; MUKANDILA, E. New approach for upgrading gravel roads to a low-volume sealed standard based on the use of the dynamic cone penetrometer. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, n. 2473, p. 136–143, 2015. 22

PROCTOR, R. R. Fundamental principles of soil compaction. Engineering News Record, v. 111, n. 9, p. 245–248, 1933. 30

RAO, S. S.; RAVI, N. Design of low rating axial flux permanent magnet brushless dc motor. **Programmable Device Circuits and Systems**, v. 4, n. 7, p. 359–362, 2012. 50

RAPER, R. L.; KIRBY, J. M. Soil compaction: how to do it, undo it, or avoid doing it. [S.l.]: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006. 27

RESENDE, L. R. M.; FILHO, W. L. de O.; NOGUEIRA, C. de L. Uso do aparelho dcp para avaliação da compactação de alteamentos de barragens de rejeitos de mineração. **Rem: Revista Escola de Minas**, SciELO Brasil, v. 66, n. 4, 2013. 25

RHOADES, J.; MANTEGHI, N.; SHOUSE, P.; ALVES, W. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations. **Soil Science Society of America Journal**, Soil Science Society of America, v. 53, n. 2, p. 433–439, 1989. 32

RIBON, A. A.; Tavares Filho, J. Estimativa da resistência mecânica à penetração de um latossolo vermelho sob cultura perene no norte do estado do paraná.
Revista Brasileira de Ciência do Solo, SciELO Brasil, v. 32, n. 5, p. 1817–1825, 2008. 21

RILEY, W. F.; MCCONNELL, K. G.; DALLY, J. W.; DALLY, J. W.; DALLY, J. W. DALLY, J. W. Instrumentation for engineering measurements. [S.l.]: Wiley, 1993. 46

ROMAN, L. O. et al. Asphalt manufacture. [S.l.]: Google Patents, abr. 20 1943. US Patent 2,317,150. 19

ROSS, J. L. S. Ensaios e experimentos na análise da fragilidade dos ambientes naturais: O penetrômetro de percussão-doi: 10.7154/rdg. 1997.0011. 0006. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 11, p. 57–66, 2011. 25

SANGLERAT, G. The penetrometer and soil exploration. [S.l.]: Elsevier, 2012. 19, 35

SECCO, D. Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois latossolos sob plantio direto, UFMS Santa Maria, RS, Brasil. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado, 2003. 26, 30

SENEVIRATNE, S. I.; CORTI, T.; DAVIN, E. L.; HIRSCHI, M.; JAEGER, E. B.; LEHNER, I.; ORLOWSKY, B.; TEULING, A. J. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. **Earth-Science Reviews**, Elsevier, v. 99, n. 3, p. 125–161, 2010. 26

SHIGLEY, J. E.; BUDYNAS, R. G.; MISCHKE, C. R. Mechanical engineering design. McGraw-Hill, 2004. 22, 42

SILVA, C. W. D. Sensors and actuators: control system instrumentation. [S.l.]: CRC Press, 2007. 46

SILVA FILHO, A. M.; FURRIEL, G. P.; CALIXTO, W. P.; ALVES, A. J.; PROFETA, F. A.; DOMINGOS, J. L.; DOMINGUES, E. G.; NARCISO, M. G. Methodology to correlate the humidity, compaction and soil apparent electrical conductivity. In: Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), 2015 CHILEAN Conference on. [S.l.: s.n.], 2015. p. 729–734. 32

SILVA FILHO, A. M. d. Metodologia para correlacionar a umidade, compactação e a condutividade elétrica aparente do solo. Universidade Federal de Goiás, 2014. 21

SILVA, S. R. d.; BARROS, N. F. d.; COSTA, L. M. d.; LEITE, F. P. Soil compaction and eucalyptus growth in response to forwarder traffic intensity and

load. **Revista brasileira de ciência do solo**, SciELO Brasil, v. 32, n. 3, p. 921–932, 2008. 31

SILVA, U. F.; MANOEL, I.; FURRIEL, G. P.; SILVA, A. H.; ALVES, A. J.; CALIXTO, W. P. Application of conformal mapping in the calculation of geological pressures. In: Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), 2015 CHILEAN Conference on. [S.l.: s.n.], 2015. p. 711–715. 25

SIRJACOBS, D.; HANQUET, B.; LEBEAU, F.; DESTAIN, M.-F. On-line soil mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture. **Soil and Tillage Research**, Elsevier, v. 64, n. 3, p. 231–242, 2002. 21

SLEMON, G. R. Electric machines and drives. [S.l.]: Addison-Wesley, 1992. 53, 56

SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van. Soil compaction in crop production. [S.l.]: Elsevier, 2013. 25

SOUZA, Z. M. de; Pereira Júnior, J. M.; PEREIRA, G. T.; FERNANDOMOREIRA, L. Variabilidade espacial do ph, ca, mg e v% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, SciELO Brasil, v. 34, n. 6, p. 1763, 2004. 21

STANDARD, G. N. Subsoil - Field investigations - Part 1: Cone penetration tests. [S.l.]: Deutsches Institut Fur Normung, 1974. 19

ŞTEFÅNESCU, D. M. Strain gauges and wheatstone bridgesâbasic instrumentation and new applications for electrical measurement of non-electrical quantities. In: IEEE. Systems, Signals and Devices (SSD), 2011 8th International Multi-Conference on. [S.l.], 2011. p. 1–5. 20, 21

STEINER, A.; KOPF, A. J.; LâHEUREUX, J.-S.; KREITER, S.; STEGMANN, S.; HAFLIDASON, H.; MOERZ, T. In situ dynamic piezocone penetrometer tests in natural clayey soilsâa reappraisal of strain-rate corrections. **Canadian Geotechnical Journal**, NRC Research Press, v. 51, n. 3, p. 272–288, 2013. 36, 47

STENZEL, G.; MELZER, K. Soil investigations with penetration tests according to din 4094. **Tiefbau**, v. 20, n. 3, 1978. 19

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência de solo. **Revista brasileira de ciência do solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 15, n. 3, p. 229–235, 1991. 39, 40

TAYLOR, H. M.; GARDNER, H. R. Penetration of cotton seedlingn taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. **Soil Science**, LWW, v. 96, n. 3, p. 153–156, 1963. 19

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. et al. Análises de solo, plantas e outros materiais. [S.l.]: Ufrgs Porto Alegre, 1995. 32

THELEN, E. A method for measuring the rheological properties of materials of great consistency such as asphalts. **Journal of Applied Physics**, AIP Publishing, v. 8, n. 2, p. 135–137, 1937. 19

VRINDTS, E.; MOUAZEN, A. M.; REYNIERS, M.; MAERTENS, K.; MALEKI, M.; RAMON, H.; BAERDEMAEKER, J. D. Management zones based on correlation between soil compaction, yield and crop data. **Biosystems Engineering**, Elsevier, v. 92, n. 4, p. 419–428, 2005. 25

WANG, B.-j.; LI, K.; SHI, B.; WEI, G.-q. Test on application of distributed fiber optic sensing technique into soil slope monitoring. **Landslides**, Springer, v. 6, n. 1, p. 61–68, 2009. 49

WILSON, J. S. Sensor technology handbook. [S.l.]: Elsevier, 2004. 46

YAMAJI, F. M.; VENDRASCO, L.; CHRISOSTOMO, W.; FLORES, W. de P. Análise do comportamento higroscópico de briquetes. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 28, n. 1, p. 11–15, 2013. 30

ZUAZO, V. H. D.; PLEGUEZUELO, C. R. R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. a review. **Agronomy for Sustainable Development**, Springer, v. 28, n. 1, p. 65–86, 2008. 25