



DIEGO EDUARDO COSTA COELHO

**DIGITALIZAÇÃO DE DEFORMAÇÕES
FÍSICAS DO SOLO POR MEIO DE UMA
CÂMERA DIGITAL**

LAVRAS – MG

2016

DIEGO EDUARDO COSTA COELHO

**DIGITALIZAÇÃO DE DEFORMAÇÕES FÍSICAS DO SOLO POR
MEIO DE UMA CÂMERA DIGITAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Roberto Alves Braga Junior

Coorientador

Dr. Antônio Donizette de Oliveira

LAVRAS – MG

2016

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Coelho, Diego Eduardo Costa.

Digitalização de deformações físicas do solo por meio de uma
câmera digital / Diego Eduardo Costa Coelho. – Lavras : UFLA,
2016.

86 p. : il.

Tese(doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2016.

Orientador(a): Roberto Alves Braga Júnior.

Bibliografia.

1. Agricultura. 2. Máquinas Agrícolas. 3. Deformações do solo.
4. Técnicas tradicionais. 5. Técnica óptica. I. Universidade Federal
de Lavras. II. Título.

DIEGO EDUARDO COSTA COELHO

**DIGITALIZAÇÃO DE DEFORMAÇÕES FÍSICAS DO SOLO POR
MEIO DE UMA CÂMERA DIGITAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 05 de dezembro de 2016.

Dr. Antonio Carlos Loureiro Lino	IAC
Dr. Antônio Donizette de Oliveira	UFLA
Dr. Fernando Pujaico Rivera	UFLA
Dr. Inácio Maria Dal Fabbro	UNICAMP
Dr. Roberto Alves Braga Júnior	UFLA

Dr. Roberto Alves Braga Junior
Orientador

LAVRAS – MG
2016

*A José Fernandes, meu pai, e a Siomara, minha mãe,
pessoas maravilhosas e exemplos para mim.*

A Dália e Fernanda, minhas irmãs, pelo companheirismo e carinho.

Ao Kauã, meu sobrinho, pelas brincadeiras e diversões.

Ao meu tio Walter, pelo amor incondicional.

Aos meus entes queridos, pelos conselhos e incentivos.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por me proporcionar saúde, inteligência e dedicação ao longo dessa caminhada.

Aos meus queridos pais, José Fernandes e Siomara, por confiarem em meu potencial e serem minha fonte incentivadora, principalmente nos momentos delicados.

À minha avó Teresinha e ao meu tio Aluísio, que hoje estão em um lugar especial, orando, abençoando e guiando os meus passos.

Aos meus queridos(as) amigos(as), parentes e conhecidos(as) que torceram fortemente por minha vitória.

Ao meu querido professor orientador e, acima de tudo, meu grande amigo, Dr. Roberto Alves Braga Jr, pela sábia e dedicada orientação, pelo apoio, paciência e compreensão em todos os momentos, requisitos que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Ao meu coorientador, Dr. Antônio Donizette de Oliveira, pela colaboração, amizade e dedicação.

Aos amigos do Centro de desenvolvimento de Instrumentação Aplicada à Agropecuária (CEDIA), pela amizade e pela ajuda profissional.

A todos do corpo docente e de servidores do Departamento de Engenharia desta universidade.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia, pela oportunidade concedida para a realização do doutorado.

À CAPES, pelo financiamento e desenvolvimento de todo o trabalho.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O crescimento da população mundial traz consigo maior demanda por energia, água e alimentos produzidos de forma sustentável, sem desmatamento e sem a abertura de novas fronteiras agrícolas. Nesse contexto, diversas técnicas vêm sendo utilizadas para o aumento da produtividade agrícola, como, por exemplo, melhoramento genético das culturas, análise da fertilidade do solo e também utilização de máquinas e implementos agrícolas. Entretanto, a utilização da mecanização agrícola requer conhecimento das operações agrícolas a serem realizadas, do funcionamento e das regulagens do maquinário, de forma a explorar todo o seu potencial durante a operação e, também, para minimizar impactos ambientais e efeitos sobre o solo. O tráfego das máquinas e implementos em áreas agrícolas pode provocar deformações físicas e mecânicas no solo, o que pode comprometer o crescimento das plantas e a safra como um todo. Dessa forma, entender a interação solo-máquina, bem como mensurar as deformações ocasionadas pelo tráfego delas, é fundamental para o gerenciamento das operações agrícolas, e técnicas ópticas são interessantes opções para a quantificação dessas alterações na estrutura física dos solos. A técnica de Moiré consiste em uma técnica óptica não invasiva e não destrutiva que vem sendo utilizada para a análise e a avaliação da perfilometria de diferentes materiais na agropecuária. Assim, o presente trabalho foi realizado com os objetivos principais de avaliar a deformação de solos, quando trafegados por máquinas agrícolas, por meio da técnica de Moiré e propor uma metodologia para a digitalização do perfil do solo após ser trafegado pelo trator agrícola. O trabalho está dividido em duas etapas, inicialmente no ambiente laboratorial e posteriormente no campo, com o foco principal no trabalho de campo. Na primeira etapa foi digitalizada uma semiesfera de isopor, de forma a encontrar a melhor disposição de equipamentos, sendo esta uma preparação primordial para a próxima fase. Na segunda etapa foram utilizadas cinco parcelas, de forma a avaliar o comportamento do perfil do solo e observar, por meio de duas técnicas tradicionais e também por meio da técnica óptica de Moiré, diferentes deformações ao longo de cada parcela, para posteriores comparações entre as diversas técnicas em posições coincidentes. A técnica óptica de Moiré mostrou grande qualidade na digitalização das superfícies, assim como agilidade e precisão no objetivo proposto pelo trabalho.

Palavras-chave: Técnica óptica. Perfil do solo. Técnicas tradicionais. Compatibilidade.

ABSTRACT

Soil is a natural body composed by parcels in solid, liquid and gaseous state that contains living matter and occupy the greater portion of the earth surface. The agriculture development is based among thers in mechanization that has been important to get higher productivities. However, the intense use of machinery and implements in agriculture requires knowledge of their interaction with the soil, in order to reduce the damages that bring problems to the development of the cultures and to the environment. In this context, it is necessary to understand the effects of the tractor is tires during the transit on agricultural areas. Thus, this study aimed to evaluate the deformation of soil when trafficked by agricultural machinery through the Moiré technique and to propose a methodology for scanning the soil profile in comparison to the traditional methods. The work was divided in two stages: In the laboratory environment and in the field. In the first stage, we have scanned a styrofoam hemisphere, in order to find the best equipment available, as an essential preparation for the next stage. In the second step as repeated five plots, in order to evaluate the soil profile behavior and observed by means of two traditional techniques and also by the optical technique of Moiré. The Moiré optical technique showed great quality scanning of surfaces, as well as presented high speed and accuracy in comparison to the traditional methods.

Keywords: Optical technology, the soil profile, traditional techniques, compatibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Área de contato entre o pneu e a superfície do solo, para diferentes condições de umidade do solo. Pneu 9-40, 690 kg de carga e pressão de insulflagem de 83 kPa (12,0 psi). Adaptado de Inns (1978)	21
Figura 2	Área de contato para diferentes calibrações em pneus agrícolas. Adaptado de Arnal Atares e Laguna Branca (1980).	23
Figura 3	Rugosímetro de varetas apoiado na superfície do solo	24
Figura 4	Exemplificação das franjas de Moiré	25
Figura 5	Sistema experimental para Moiré de projeção	26
Figura 6	Moiré de projeção com deslocamento de fase	27
Figura 7	Método da mudança de fase. a. Imagem inicial. b. Imagem com franja de fase mudada $\frac{1}{2}\pi$. c. Imagem com franja de fase mudada π . d. Imagem com franja de fase mudada $\frac{3}{2}\pi$. e. Mapa de fases empacotadas	29
Figura 8	Desempacotamento de fases. a. Mapa de fases empacotadas de um perfil. b. Fases desempacotadas no mesmo perfil	30
Figura 9	Modelo digital de elevação da superfície do solo, em que o eixo x, y varia de 0 a 800 mm, representando a região analisada, e o eixo z representa o resultado da técnica de Moiré	32
Figura 10	Etapas realizadas para o atendimento do objetivo proposto	34
Figura 11	Arranjo experimental do método de calibração da posição de uma semiesfera, para a utilização da técnica de Moiré de projeção. Vista superior (A), vista lateral (B) e disposição dos equipamentos (C)	36
Figura 12	Imagens das grades após o pré-processamento	38

Figura 13	Perfil do objeto na posição de 18 centímetros	39
Figura 14	Rugosímetro de varetas validando as elevações do perfil da calota de isopor	40
Figura 15	Setup utilizando a técnica do gesso combinada ao rugosímetro de varetas	41
Figura 16	Validação do levantamento do perfil do protótipo da semiesfera de isopor, por meio do rugosímetro de varetas	42
Figura 17	Planta mostrando a posição relativa entre a câmera digital e o projetor, em cm; (B) visão AA', mostrando a altura em relação ao solo da câmera digital e do projetor, em cm; (C) projeção das grades ou grids no solo	45
Figura 18	Imagens das grades antes do pré-processamento	46
Figura 19	Imagens ilustrativas referentes à aplicação da técnica óptica de Moiré de projeção	47
Figura 20	Imagens ilustrativas referentes à aplicação da técnica do rugosímetro de varetas	48
Figura 21	Imagem ilustrativa referente ao perfilômetro, com o respectivo número de varetas, espaçamento entre varetas e deslocamento do equipamento, ao longo do gabarito de madeira	49
Figura 22	Imagens ilustrativas referentes à aplicação da técnica do gesso.....	50
Figura 23	Imagens dos protótipos referentes a cada parcela utilizando a técnica do gesso.....	51
Figura 24	Imagem da formação do perfil nas posições (18, 48, 78, 108 cm), utilizando-se a técnica de Moiré. O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros.....	53

Figura 25	Imagem da caracterização do perfil pelo rugosímetro de varetas nas posições 18, 48, 78, 108 cm. O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros.....	55
Figura 26	Imagens dos protótipos nas posições 18, 48, 78, 108 cm, utilizando-se a técnica do gesso. O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros.....	57
Figura 27	Imagem comparando as diversas técnicas para a posição de 18 cm. O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros	58
Figura 28	Imagem comparando as diversas técnicas para a posição de 48 cm. O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros	59
Figura 29	Imagem comparando as diversas técnicas para a posição de 78 cm. O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros.....	60
Figura 30	Imagem comparando as diversas técnicas para a posição de 108 cm. O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros.....	61
Figura 31	Imagens do solo digitalizado correspondente às parcelas 03 e 04, com comprimento (cm), largura (cm) e profundidade em tons de cinza	62

Figura 32	Imagem do perfil do solo referente à terceira parcela, utilizando o rugosímetro de varetas, com o espaçamento entre varetas, deslocamento do perfilômetro e profundidade, em centímetros	63
Figura 33	Imagem do perfil do solo referente à quarta parcela, utilizando o rugosímetro de varetas, com o espaçamento entre varetas, deslocamento do perfilômetro e profundidade, em centímetros	63
Figura 34	Correlação entre a técnica do rugosímetro de varetas e a técnica do gesso nas diversas posições, em que “g” e “r” representam os valores retornados pelas técnicas do gesso e do rugosímetro de varetas, e R^2 , a correlação de Pearson.....	64
Figura 35	Correlação entre a técnica do rugosímetro de varetas e a técnica do gesso na posição de 20 cm	65
Figura 36	Correlação entre as diversas técnicas na posição de 35 cm	66
Figura 37	Correlação entre as diversas técnicas na posição de 50 cm	67
Figura 38	Imagens do perfil do solo referente à quarta parcela nas posições de 20 cm (A), 35 cm (B) e 50 cm (C). O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros ..	68
Figura 39	Imagens do perfil do solo referente à primeira parcela, nas posições de 20 cm (A), 35 cm (B) e 50 cm (C). O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros ..	70

LISTA DE TABELA

Tabela 1	Fatores de distribuição (%) de peso do trator na condição estática recomendada, para diferentes configurações.....	20
----------	--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	Geral	18
2.2	Específicos	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
3.1	Máquinas agrícolas	19
3.2	Distribuição da carga do trator no solo	19
3.3	Rodados pneumáticos e pressão de inflação	20
3.4	Técnicas tradicionais de estudo e monitoramento da ação do contato dos pneus e das máquinas agrícolas com o solo	23
3.5	A técnica óptica de Moiré de projeção	25
3.6	Moiré de projeção com deslocamento de fase (Phase shifting)	27
3.7	Aplicações da técnica de Moiré de projeção, com a técnica do Phase shifting	31
3.8	Processamento de imagens utilizando o plugin Landmark Correspondences (Fiji), versão 2015	33
4	MATERIAL E MÉTODOS	34
4.1	Análise comparativa entre a técnica óptica de Moiré de projeção, a técnica do rugosímetro de varetas e a técnica do gesso, no ambiente laboratorial	35
4.1.1	Análise da técnica óptica de Moiré de projeção	35
4.1.1.1	Pré-Processamento para utilização da técnica óptica de Moiré de projeção	37
4.1.1.2	Processamento utilizando a técnica óptica de Moiré de projeção	38
4.1.2	Análise da técnica do rugosímetro de varetas	39
4.1.2.1	Processamento das imagens relacionadas a técnica do rugosímetro de varetas	40
4.1.3	Análise da técnica do gesso	41
4.1.3.1	Processamento das imagens relacionadas a técnica do gesso...	42
4.2	Análise comparativa entre a técnica óptica de Moiré de projeção, a técnica do rugosímetro de varetas e a técnica do gesso, no campo de trabalho	43
4.2.1	Aplicação da técnica óptica de Moiré de projeção no campo	44
4.2.1.1	Pré-Processamento das imagens de campo, para utilização da técnica de Moiré de projeção	46
4.2.1.2	Processamento das imagens de campo, com a utilização da técnica de Moiré de projeção	46
4.2.2	Técnica do rugosímetro de varetas na etapa de campo	47

4.2.3	Aplicação da técnica do gesso na etapa de campo	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1	Análise comparativa entre a técnica óptica de Moiré de projeção, a técnica do rugosímetro de varetas e a técnica do gesso, no ambiente laboratorial	52
5.2	Análise comparativa entre a técnica óptica de Moiré de projeção, a técnica do rugosímetro de varetas e a técnica do gesso, no campo de trabalho	61
6	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS	72
	ANEXOS	76

1 INTRODUÇÃO

O solo é uma coleção de corpos naturais constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, formadas por materiais minerais e orgânicos, contendo matéria viva, ocupando a maior porção do manto superficial das extensões continentais do planeta e proporcionando o desenvolvimento da agricultura, essencial, e insubstituível, à vida humana.

O agronegócio é, historicamente, uma das principais bases da economia do Brasil, desde os primórdios da colonização até o século XXI, evoluindo das extensas monoculturas para a diversificação da produção.

A predição da demanda por alimentos devido ao crescimento populacional revela a necessidade de aumentos significativos na produção, sem que haja a abertura de novas áreas agricultáveis e desmatamentos de biosistemas nativos. Para se alcançar tais propósitos deve-se aumentar a produtividade agrícola, o que pode ser realizado pela adoção de estratégias para uso da terra, por meio de incentivos que promovam a prática sustentável, de técnicas de melhoramento genético de plantas, da análise da fertilidade do solo e da utilização de máquinas e implementos agrícolas, dentre outros parâmetros.

A utilização de máquinas e implementos tende a aumentar a produtividade agrícola, devido ao aumento da capacidade operacional de trabalho, substituição do trabalho manual e redução do custo final. Todavia, o sucesso da mecanização agrícola está atrelado ao conhecimento pleno dos tratores e implementos, de suas regulagens, como conduzi-los durante uma operação de campo e também como seu rodado interage com o solo.

As cargas dos rodados e implementos agrícolas aplicadas ao solo produzem tensões na interface solo-pneu e solo-implemento, em superfície e em profundidade, respectivamente. Essas tensões compactam as camadas do solo e,

em situações em que as cargas distribuídas superam a resistência interna do solo, há alterações nas propriedades físicas do solo.

Dessa forma, o tráfego contínuo e inadequado de máquinas e implementos agrícolas pode degradar o solo, com alterações físicas e mecânicas em sua estrutura, comprometendo a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas e, conseqüentemente, redução da produtividade.

Nesse contexto, compreender a interação máquina-solo é importante para desenvolver ou aprimorar os métodos de gerenciamento da frota agrícola, o que passa pela quantificação das deformações causadas pelo tráfego das máquinas em solo agrícola.

Atualmente, destacam-se, na literatura, métodos tradicionais que avaliam e quantificam deformações de solos. Dentre eles, o rugosímetro de varetas permite avaliar a rugosidade orientada por meio de medidores de pinos nos sulcos e elevações formados pelos implementos utilizados no preparo do solo, semeadura, aplicação de agrotóxicos químicos e colheita, e a utilização do gesso, que possibilita a construção dos perfis ou contornos topográficos por meio de moldes ou recortes, proporcionando a quantificação da profundidade do perfil do solo através de placas formadas com a representação da superfície em questão.

Técnicas ópticas são capazes de estimar os índices de rugosidade do solo na superfície do sulco, utilizando fotogrametria estéreo. Nesse contexto, a técnica de Moiré pode determinar a perfilometria dos objetos, sendo uma alternativa para estudos perfilométricos do solo, como o tráfego de máquinas agrícolas, que pode provocar excesso de carga no solo e possíveis danos ao desenvolvimento de culturas.

O trabalho foi realizado como objetivo de comparar a sensibilidade de técnicas manuais tradicionais com a técnica óptica de Moiré, sendo, em primeira ocasião, no ambiente laboratorial e, posteriormente, no campo de trabalho. O

intuito foi o de apresentar uma metodologia para a digitalização de solos deformados pela passagem de um trator usando a técnica de Moiré com apenas uma câmera digital e corrigindo as perspectivas por meio de processamento de imagens.

Os resultados demonstraram que a técnica de Moiré associada a um ideal processamento digital de imagens traz diversas vantagens, se comparada às técnicas tradicionais. Observou-se que as duas técnicas tradicionais, a do rugosímetro de varetas e a do gesso, também apresentam bons resultados, se conduzidas corretamente, porém, são técnicas destrutíveis e invasivas, mostrando, assim, suas limitações. A técnica óptica apresenta maior destaque em face da rapidez, da versatilidade e da ágil coleta e manipulação de dados.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho foi o de analisar a viabilidade da técnica óptica de Moiré para a digitalização da superfície do solo, ao ser submetido ao tráfego de um trator agrícola.

2.2 Específicos

Especificamente, os objetivos foram:

- a) comparar as superfícies digitalizadas de uma semiesfera de isopor por meio da técnica óptica de Moiré, da técnica do rugosímetro de varetas e da técnica do gesso, ambas no ambiente laboratorial;

- b) comparar as superfícies digitalizadas por meio da técnica óptica de Moiré, da técnica do rugosímetro de varetas e da técnica do gesso, ambas no campo de trabalho, ao serem submetidas ao tráfego de um trator agrícola.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Máquinas agrícolas

O surgimento de máquinas e de implementos para a agricultura mudou definitivamente a trajetória das técnicas de produção e a oferta de produtos agrícolas no mundo, assim como a necessidade de envolvimento de mão de obra na atividade agrícola. Isso porque os aumentos de produtividade levaram à substituição do trabalho do homem, possibilitando o acesso a novas e melhores práticas de produção (VIAN; ANDRADE JÚNIOR, 2010).

Como principal fonte de potência na agricultura, o trator é utilizado, em conjunto com diversos equipamentos, na realização de várias tarefas, desde o preparo do solo até a colheita. Segundo Mialhe (1980), o trator agrícola é uma máquina auto propelida provida de meios que conferem apoio estável sobre uma superfície horizontal, com capacidade de tracionar, transportar e fornecer potência mecânica para movimentar os órgãos ativos de máquinas e de implementos agrícolas, podendo utilizar tecnologias avançadas.

A aplicação de cargas dinâmicas por rodados e implementos agrícolas no solo produz tensões na interface solo/pneu e solo/implemento, em superfície e em profundidade, respectivamente. Essas tensões deformam as diferentes camadas do solo, sendo alvo de diversos estudos relacionados à perfilometria (SILVA et al., 2003).

3.2 Distribuição da carga do trator no solo

A distribuição da carga do trator é função das características do pneu, da pressão de inflação, da carga em cada roda e das condições do solo. Ao determinar a distribuição da carga, deve-se conhecer a área de contato da

interface solo-rodado. Porém, a distribuição da carga não é feita de forma uniforme sobre toda a área de contato (KELLER, 2005).

A distribuição da carga no eixo dianteiro e no eixo traseiro depende da tração nos eixos, isto é, tração somente no eixo traseiro ou tração nas quatro rodas, bem como do tipo de acoplamento, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 Fatores de distribuição (%) de peso do trator na condição estática recomendada, para diferentes configurações.

Configuração de tração	Distribuição de peso (%)	
	Dianteiro	Traseiro
4 X 2, com implemento de tração	25	75
4 X 2, com implemento semimontado	30	70
4 X 2, com implemento montado	35	65
4 X 2 (TDA)	40	60
4 X 4	60	40

Fonte: Corrêa (2003)

3.3 Rodados pneumáticos e pressão de inflação

Os rodados são elementos que se apoiam sobre o solo, suportam o peso do trator, permitem sua locomoção e direcionamento, e têm a função de promover equilíbrio e esforço tratório (BARBOSA et al., 2005). Para o funcionamento correto e para uma maior durabilidade dos rodados, os cuidados a serem tomados são calibragem dos pneus e limpeza da face externa, dentre outros (ARNAL ATARES; LAGUNA BLANCA, 1980).

A pressão dos pneus determina fatores importantes, como a capacidade de carga, que depende da capacidade de tração ou força tangencial que a roda

transmite ao solo, que é dependente da carga exercida, das dimensões e da pressão dos pneus e do desenho da banda de rodagem. Em geral, em solos agrícolas, quanto menor a pressão, maior a capacidade de tração, porém, este valor não deve ficar abaixo de 80 kPa (11,6 psi), para pneus diagonais (ORTIZ-CANAVATE; HERNANZ, 1989).

Um dos efeitos danosos da mecanização agrícola é a compactação do solo. Soane et al. (1981) citam que a pressão de inflação, o tamanho do pneu e a resistência da carcaça determinam a distribuição da força sobre a área de contato com o solo. Nesta interface, a resistência inicial do solo controla a magnitude e a distribuição das tensões do solo abaixo do pneu, como mostrado na Figura 1.

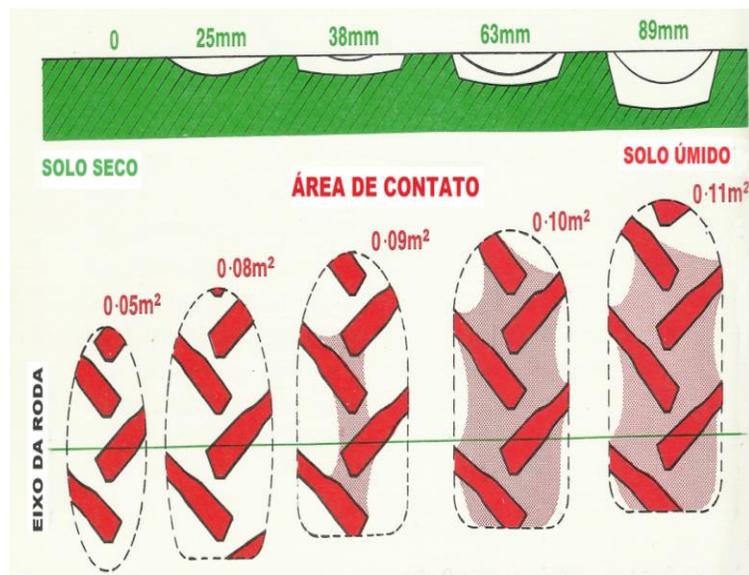


Figura 1 Área de contato entre o pneu e a superfície do solo, para diferentes condições de umidade do solo. Pneu 9-40, 690 kg de carga e pressão de insulflagem de 83 kPa (12,0 psi)
Fonte: Adaptado de Inns (1978).

Arnal Atares e Laguna Blanca (1980) explicam os efeitos de uma má calibração da seguinte forma: quando a calibração dos pneus for excessiva, acontecem perda de tração, aumento na patinagem e aumento do consumo de combustível. As pressões de apoio concentram-se na linha média da banda de rodagem, desgastando rapidamente esta região de pneu. O pneu do trator afunda-se mais no terreno, dificultando a locomoção do trator e aumentando a compactação sob a região de interface solo-pneu.

Se a calibração dos pneus for insuficiente, a roda e o pneu não ficam solidários entre si e, ao deslizar-se um sobre o outro, pode-se danificar ou, até mesmo, arrancar a válvula do pneu, as lonas de corpo podem romper por flexão excessiva, o raio do rodado diminui e, conseqüentemente, diminui a velocidade de avanço, aumentando a possibilidade de pedras cortarem os pneus, promovendo o desgaste rápido na lateral da banda de rodagem, devido ao fato de as pressões de apoio se concentrarem nesta região (ARNAL ATARES; LAGUNA BLANCA, 1980).

O comportamento do rodado e a área de contato para diferentes calibrações estão ilustrados na Figura 2.

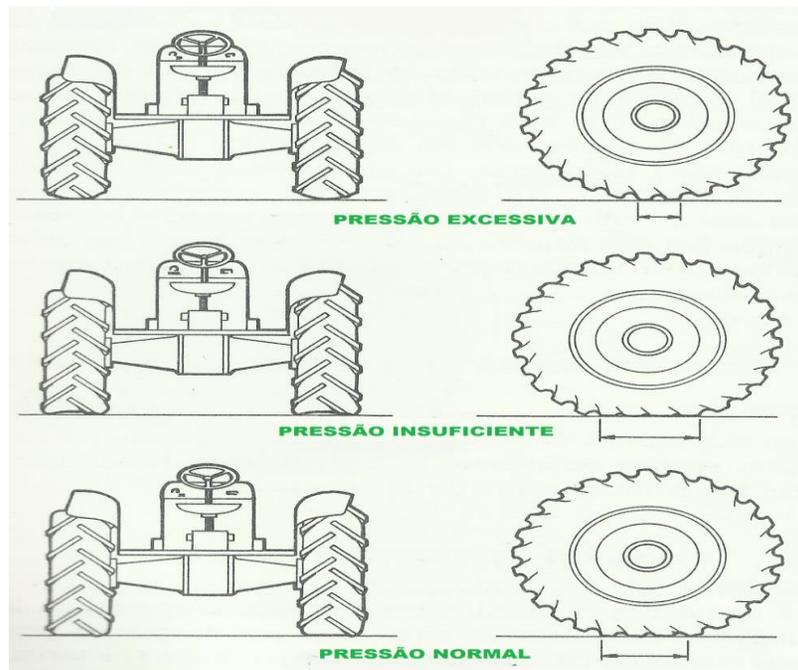


Figura 2 Área de contato para diferentes calibrações em pneus agrícolas
 Fonte: Arnal Atares e Laguna Blanca (1980).

3.4 Técnicas tradicionais de estudo e monitoramento da ação do contato dos pneus das máquinas agrícolas com o solo

Destacam-se duas técnicas tradicionais mencionadas na literatura. Uma é a do rugosímetro de varetas, que consiste de uma estrutura sobre a qual é apoiado um conjunto de varetas alinhadas que podem ser movimentadas horizontalmente e verticalmente, com o objetivo de permitir a leitura de vários conjuntos de medidas do micro relevo superficial do solo, como mostrado na Figura 3.



Figura 3 Rugosímetro de varetas apoiado na superfície do solo
Fonte: Correa et al. (2012).

O rugosímetro de varetas permite avaliar a rugosidade orientada por meio de medidores de pinos (GARCIA MORENO, 2008) nos sulcos e elevações formados pelos implementos utilizados no preparo do solo, na semeadura, na aplicação de defensivos agrícolas e na colheita (ALLMARAS et al., 1966; CURRENCE; LOVELY, 1970).

A segunda técnica utilizada é a do gesso, que possibilita a construção dos perfis ou contornos topográficos por meio de moldes ou recortes (DEXTER; HEIN; HEWITTT, 1982), proporcionando a quantificação da profundidade do perfil do solo por meio de placas formadas com a representação da superfície em questão (BOTTA et al., 2009). Esse método manual é materialmente barato, porém, demorado, fornecendo dados limitados para digitalização, e destrutível, dificultando o rápido monitoramento.

Ambas as técnicas visam avaliar o perfil do solo, de forma a estudar o seu comportamento ao ser submetido a algum esforço, como, por exemplo, o tráfego de uma máquina agrícola. Essas técnicas necessitam do contato com o material para melhores análises e, nesse contexto, uma técnica óptica, não

invasiva e promissora, ganha espaço na análise da superfície do solo (CORREA et al., 2012).

3.5 A técnica óptica de Moiré de projeção

Ao se sobrepor dois conjuntos de linhas, é possível perceber algumas irregularidades que formarão um padrão conhecido como franjas de Moiré (FM), nome este que, em francês, designa um tecido de seda importado da antiga China (SCIAMMARELLA, 1982). Utiliza-se a interação entre um retículo modelo e um retículo de referência, na obtenção das FM, conforme Figura 4.

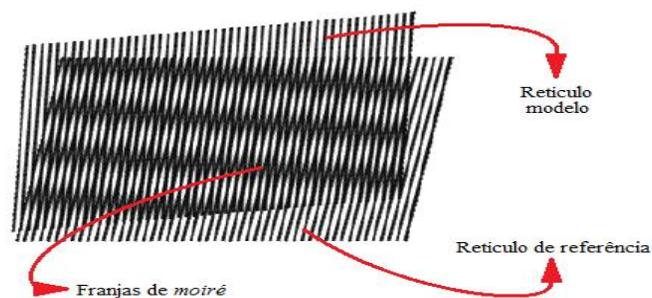


Figura 4 Exemplificação das franjas de Moiré
Fonte: Assundi e Yung (1991) e Costa (2006).

Na Técnica de Moiré de projeção, um retículo é projetado obliquamente à superfície do objeto. Ele é deformado, modulando ou acompanhando a topografia do elemento. Obtém-se uma imagem desse retículo. O mesmo retículo é, então, projetado sobre a superfície de um plano colocado no mesmo lugar do objeto estudado, obtendo-se sua imagem. As franjas são formadas pela sobreposição das duas imagens. Essas franjas correspondem a linhas de mesma cota.

Cloud (1998) determina que a diferença de cota ($\Delta z = z1-z2$) entre dois pontos localizados na superfície a ser analisada é dada por

$$\Delta z = \frac{Np}{\text{sen}\alpha}$$

em que N é o número de ordem da franja, p é o período do retículo e α é o ângulo de projeção da grade sobre o objeto (Figura 5).

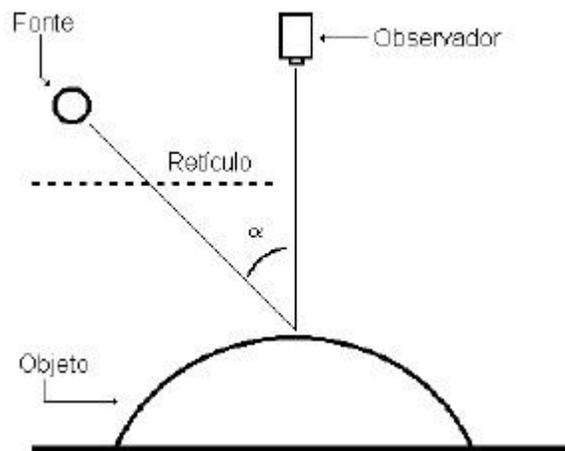


Figura 5 Sistema experimental para Moiré de projeção
Fonte: Lino (2002).

Moiré é uma técnica óptica que pode determinar a perfilometria dos objetos (HERTZ et al., 2005) e mostra-se versátil, ágil e de fácil coleta e manipulação de dados. Destaca-se por ser um método não invasivo, cuja medição é simples e rápida, sendo uma alternativa para estudos perfilométricos do solo, como o tráfego de máquinas agrícolas, que pode provocar excesso de carga no solo e possíveis danos ao desenvolvimento de culturas (LINO; DAL FABBRO, 2004).

3.6 Moiré de projeção com deslocamento de fase (*phase shifting*)

Onuma, Nakamura e Kuwashima (1996) desenvolveram um método que, aplicado à interferometria, pode aumentar grandemente as resoluções espacial e vertical, quando comparado à interferometria convencional, além de permitir a automatização do processo de geração dos MDT, uma vez que ele reconhece, automaticamente, picos e vales. Utiliza múltiplos interferogramas, nos quais as fases são mudadas ou deslocadas entre um e outro; ele é chamado de método da mudança de fase (*phase shifting*). Na Figura 6 está ilustrada uma defasagem de $\theta = 2\pi.a/d$ graus radianos, em que as linhas contínuas representam a projeção da grade e as linhas pontilhadas representam a projeção original das grades. Do lado direito situam-se as linhas defasadas e, do lado esquerdo, as linhas sem defasagem.

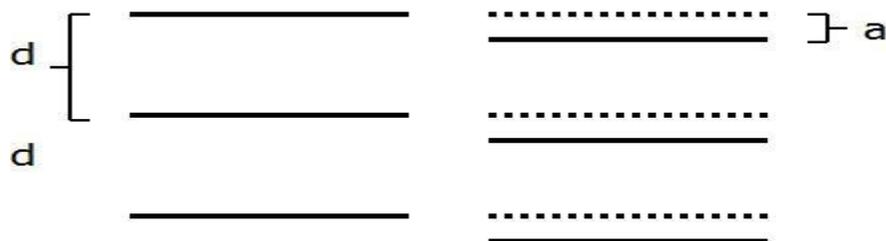


Figura 6 Moiré de projeção com deslocamento de fase
Fonte: Do autor (2016)

Su e Chen (2001) apontam que o método da mudança de fase é utilizado por várias técnicas óticas, como perfilometria por medição de fase (PMF), perfilometria por transformada de Fourier (PTF), perfilometria por medição de modulação (PMM), detecção espacial de fase (DEF) e projeção de franjas de cores codificadas (PFCC). Além das técnicas óticas, várias outras técnicas de

medição de fase têm sido desenvolvidas, destacando-se a Ressonância Magnética (RM) e a Interferometria Terrestre por Radar de Abertura Sintética.

Dirkx, Decraemer e Dielis (1988) aplicaram o método da mudança de fase à TM, obtendo uma resolução, na prática, no mínimo 10 vezes maior que a simples medição de franjas para um dado arranjo experimental. Além disso, é mais rápido e é capaz de determinar a concavidade e a convexidade da superfície.

Wang (2001), descrevendo o método de mudança de fase aplicado à técnica de Moiré de sombra, afirma que são necessárias quatro imagens das franjas de Moiré. Em cada uma delas o objeto é aproximado ou afastado do retículo de referência (Rr) de maneira a produzir deslocamentos das franjas de Moiré $1/2\pi$, 1π e $3/2\pi$ de fase.

A intensidade luminosa em cada uma das imagens é descrita pelas equações:

$$I_1(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos \phi(x, y) \quad (\text{I})$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos[\pi/2 + \phi(x, y)] \quad (\text{II})$$

$$I_3(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos[\pi + \phi(x, y)] \quad (\text{III})$$

$$I_4(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos[3\pi/2 + \phi(x, y)] \quad (\text{IV})$$

em que:

$I_1(x, y)$ = intensidade luminosa do objeto menos a intensidade luminosa da grade defasada 0°

$I_2(x, y)$ = intensidade luminosa do objeto menos a intensidade luminosa da grade defasada 90°

$I_3(x, y)$ = intensidade luminosa do objeto menos a intensidade luminosa da grade defasada 180°

$I_4(x, y)$ = intensidade luminosa do objeto menos a intensidade luminosa da grade defasada 270°

(x, y) = representa o pixel analisado

$a(x, y)$ = intensidade luminosa do fundo em cada ponto da imagem.

$b(x, y)$ = intensidade de modulação em cada ponto da imagem.

$\cos \phi$ = é a fase a ser determinada.

Resolvendo-se as quatro equações simultaneamente, pode-se obter o termo fase ($\cos \phi$) para cada ponto da imagem, conforme a equação V.

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{(I_4(x, y)) - (I_2(x, y))}{(I_1(x, y)) - (I_3(x, y))} \right] \quad (\text{V})$$

O cálculo da fase feito pelo computador resulta em valores que variam de $-\pi$ a π , por isso imagem resultante, que é chamado de mapa de fases empacotadas, apresenta descontinuidades. Na Figura 7 são mostradas as quatro imagens de um circuito impresso, com as franjas de fases mudadas de 0 , $1/2\pi$, π e $3/2\pi$

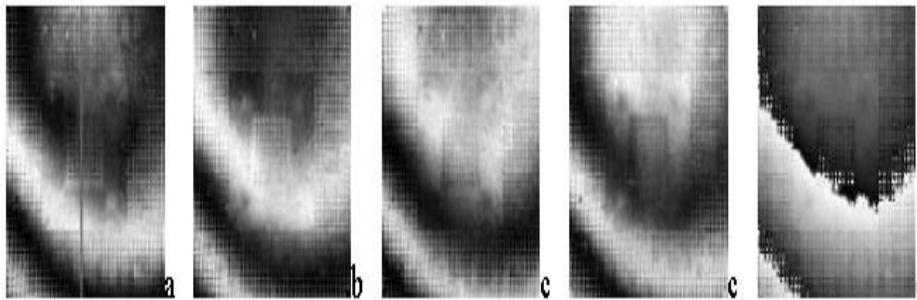


Figura 7 Método da mudança de fase. a. Imagem inicial. b. Imagem com franja de fase mudada $1/2\pi$. c. Imagem com franja de fase mudada π . d. Imagem com franja de fase mudada $3/2\pi$. e. Mapa de fases empacotadas

Fonte: Wang (2001)

Estas discontinuidades são removidas por um processo chamado desempacotamento de fase (*phase unwrapped*). Na Figura 8 mostram-se o perfil de um objeto com mapa de fases empacotadas (a) e o mesmo perfil com as fases desempacotadas (b).

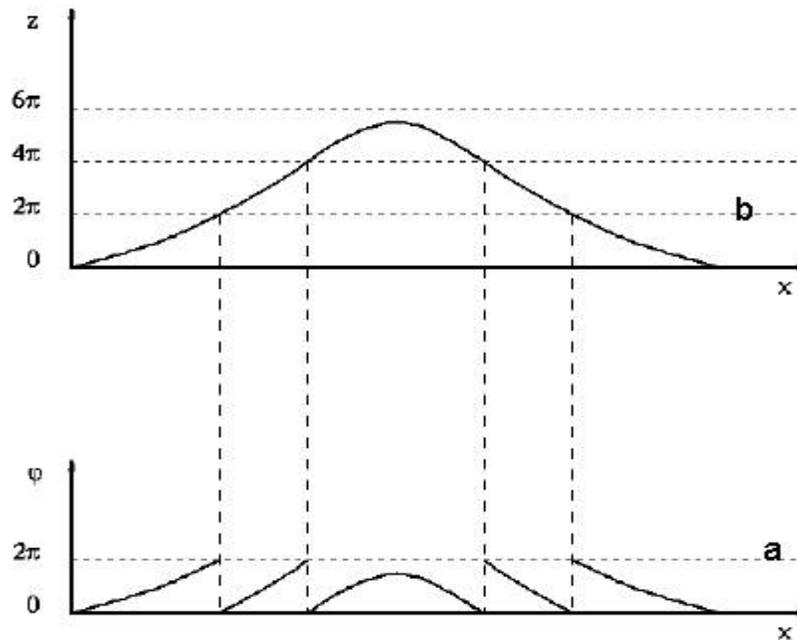


Figura 8 Desempacotamento de fases. a. Mapa de fases empacotadas de um perfil. b. Fases desempacotadas no mesmo perfil
Fonte: Lino (2002).

Soille (2000) cita que o processo de desempacotamento de fase não é um processo trivial, pois pode apresentar erros devido a:

- a. ruídos eletrônicos e speckle;
- b. presença de formas arbitrárias como furos, cantos, etc.;
- c. regiões com baixa modulação;
- d. mudanças de fase abruptas, devido a discontinuidades maiores que π .

Dirkx e Decraemer (1990), afirmam que a exatidão do sistema depende da calibração do arranjo experimental, e que é possível saber perfeitamente a distância entre duas franjas de Moiré.

Lino (2002) afirma que, apesar da sua alta acurácia, esta técnica exige a movimentação, ou do objeto ou do retículo de referência, entre uma imagem e outra, o que inviabiliza a sua utilização em linhas de produção, ficando restrito apenas ao uso científico.

Estas propriedades tornam as técnicas alternativas para definir perfis, contornos topográficos, formas, relevos e deformações (COSTA et al., 2008), sem a necessidade de contato com o objeto (GOMES et al., 2009). A técnica perfilométrica é a mais comumente utilizada, devido à simplicidade, à rapidez (LINO et al., 2011), aos baixos custos e à relativa confiabilidade (GOMES et al., 2009).

3.7 Aplicações da técnica de Moiré de projeção, com a técnica do *phase shifting*

No contexto das ciências agrárias, há trabalhos nos quais se estimam a área superficial de frangos de corte (SILVA, 2007) e a topografia de ovos, estimando a massa da gema, da clara, da casca e de todo o ovo (SILVA et al., 2011). Também podem ser observadas investigações perfilométricas em protótipos mecânicos, buscando baixos custos e flexibilidade (GOMES et al., 2009), além da análise postural de seres humanos (FERNANDES et al., 2003), de deformações em madeiras (COSTA, 2006) e em análises do perfil do solo (MCKENZIE, 2015), dentre outros.

Como a técnica tem a capacidade de avaliar objetos em três dimensões (comprimento, largura e altura), é possível mensurar o volume de frutos oleaginosos, como, por exemplo, a macaúba (COSTA et al., 2016). Em face da simplicidade, apresenta boa relação com o material e não está sujeita a fatores

externos, como pressão e temperatura (GOMES, 2005), porém, a angulação, o tipo e a quantidade de fontes luminosas influenciam a qualidade do resultado (HERTZ et al., 2005). O efeito de Moiré é conseguido por meio da projeção de grades periódicas (MAZZETI FILHO, 2004), subtraindo-se as imagens para a obtenção das franjas de Moiré (LINO, 2002).

A técnica de Moiré de projeção permite a construção de modelos digitais de elevação (MDE) comparando os mesmos retículos, de referência e modelo, sendo o primeiro sem deformação e o segundo, a superfície que se deseja mapear, projetando grades sobre estas superfícies e sobrepondo-as. Obtêm-se, como resultado, novamente, as franjas de Moiré, que revelam o comportamento da superfície do objeto utilizado na criação de mapas tridimensionais, como o esforço provocado pelo pneu do trator no solo (MCKENZIE et al., 2012), conforme se verifica na Figura 9.

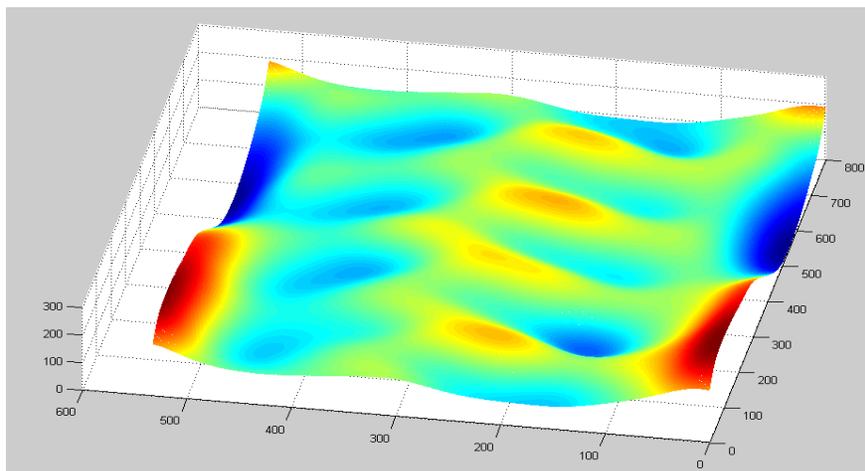


Figura 9 Modelo digital de elevação da superfície do solo, em que o eixo x, y varia de 0 a 800 mm, representando a região analisada, e o eixo z representa o resultado da técnica de Moiré
Fonte: Coelho (2013).

O modelo digital de elevação permite avaliar, por exemplo, situações de baixa calibração dos pneus dos tratores, assim como excesso de cargas suportadas pelo solo, provocadas pelo peso excessivo dos equipamentos.

3.8 Processamento de imagens utilizando o *plugin* Landmark Correspondences (Fiji) versão 2015

Segundo Sthepan (2008), o Landmark Correspondences é um *plugin* utilizado no software ImageJ, cuja função é calcular uma transformação entre dois marcos correspondentes e, assim, tornar a imagem transformada. Os marcos são lidos a partir da seleção de pontos ao longo das duas imagens. A transformação é não linear e não invertível, e utiliza o método de mínimos quadrados em movimento que são oferecidos através de uma malha de triângulos cuja resolução é um parâmetro do *plugin*.

Mínimo quadrados é uma técnica de otimização matemática que procura identificar o melhor ajuste para um conjunto de dados, com o objetivo de otimizar a soma dos quadrados diferentes entre o valor estimado e os dados observados.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Centro de Desenvolvimento de Instrumentação Aplicada à Agropecuária (CEDIA) e na área experimental de campo do Departamento de Engenharia, ambos da Universidade Federal de Lavras (UFLA), no município de Lavras, MG, localizado na latitude $21^{\circ} 14' 43''$ Sul, na longitude $44^{\circ} 59' 59''$ Oeste, a 919 m de altitude.

O presente trabalho foi dividido em duas etapas, laboratorial e de campo, para o atendimento dos objetivos propostos, conforme a representação da Figura 10.

Ambiente laboratorial

- Técnica óptica de moiré



- Técnica do rugosímetro de varetas



- Técnica do gesso



Trabalho de campo

- Técnica óptica de moiré



- Técnica do rugosímetro de varetas



- Técnica do gesso



Figura 10 Etapas realizadas para o atendimento do objetivo proposto
Fonte: Do autor (2016).

4.1 Análise comparativa entre a técnica óptica de Moiré de projeção, a técnica do rugosímetro de varetas e a técnica do gesso, no ambiente laboratorial

A primeira etapa do experimento foi conduzida no Laboratório de Óptica n° 4 do CEDIA, com o objetivo de avaliar se as três técnicas são coincidentes. De forma a percorrer toda a extensão de uma semiesfera de 12,5 cm de diâmetro e com 3,9 cm de espessura, foram comparadas três posições com as diferentes técnicas.

Os materiais utilizados foram os seguintes:

- a) câmera digital fotográfica Canon EOS 400D;
- b) projetor Epson Power Lite S8+/W8+;
- c) computador ACER (ASPIRE 5536), com os softwares Gerador de Grades, Scilab, ImageJ;
- d) tripé para os equipamentos;
- e) rugosímetro de varetas;
- f) semiesfera de isopor com 12,5 cm de diâmetro e 3,9 cm de espessura;
- g) recipiente de plástico de, aproximadamente, 20 litros;
- h) placa de vidro;
- i) sulfato de cálcio;
- j) espátula.

4.1.1 Análise da técnica óptica de Moiré de projeção

Inicialmente, foi necessário definir um *setup* para a aplicação da técnica. Buscando a calibração ideal da posição de uma semiesfera de isopor, o objeto foi posicionado num ponto central das projeções das franjas de Moiré. Posteriormente, a câmera foi deslocada em vinte posições, de forma a obter a

melhor configuração e, assim, o melhor detalhamento da superfície do objeto (COELHO, 2013).

Com isso, a câmera foi posicionada a 1,40 m e o projetor a 1,30 m, ambos em relação à superfície, com distância relativa entre eles de 40 cm. O ângulo formado entre o centro da câmera e o centro do objeto foi de $54,3^\circ$, assim como o ângulo formado entre o centro do projetor e o centro do objeto, foi de $48,3^\circ$. As posições foram espaçadas de 5 cm em 5 cm, a fim de descobrir o ângulo ideal, de forma que a câmera captasse o objeto com a melhor uniformidade, visto que o anteparo é fixo e a câmera é móvel, conforme mostrado na Figura 11.

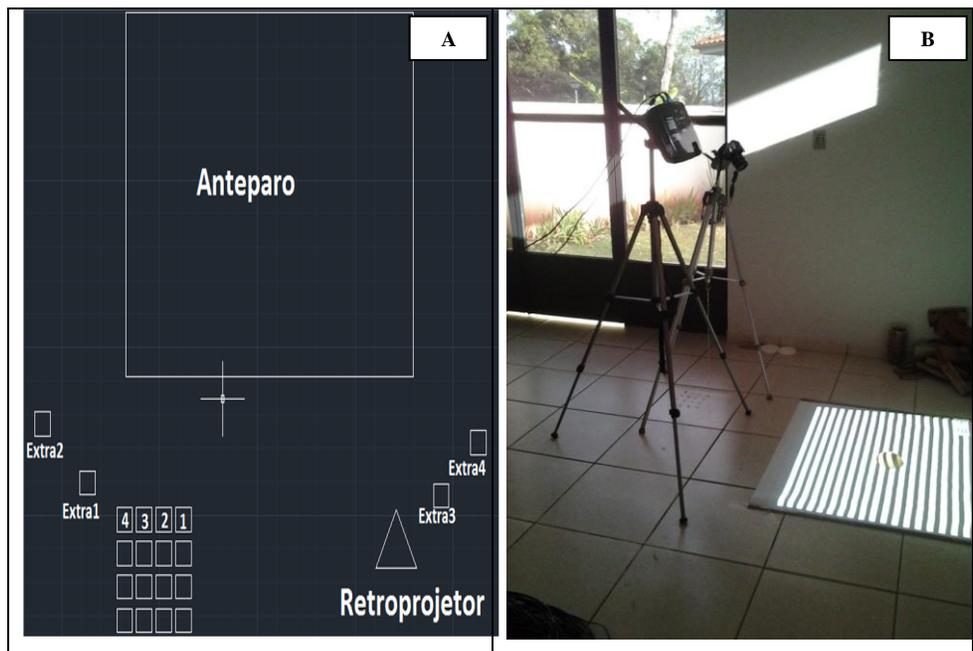


Figura 11 Arranjo experimental do método de calibração da posição de uma semiesfera, para a utilização da técnica de Moiré de projeção. Vista superior (A), vista lateral (B) e disposição dos equipamentos (C) (...continua...)

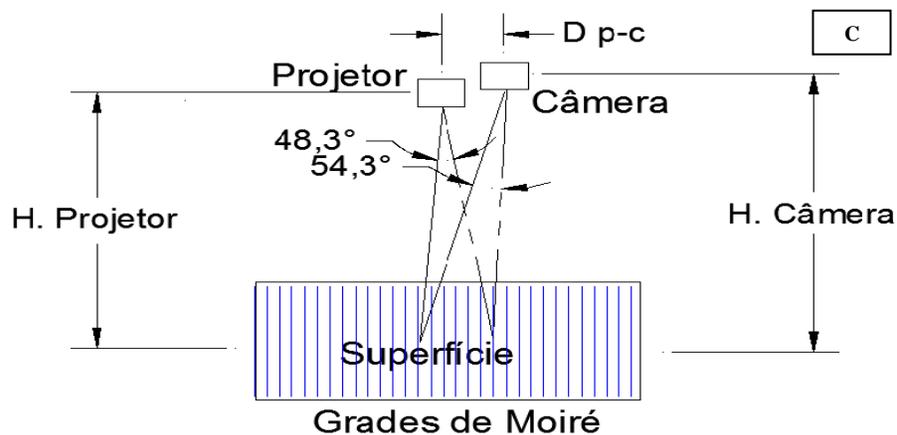


Figura 11 Arranjo experimental do método de calibração da posição de uma semiesfera, para a utilização da técnica de Moiré de projeção. Vista superior (A), vista lateral (B) e disposição dos equipamentos (C)
Fonte: Coelho (2013).

Após definido o arranjo experimental, a semiesfera de isopor foi digitalizada por meio de imagens para o posterior pré-processamento e processamento.

4.1.1.1 Pré-processamento para utilização da técnica óptica de Moiré de projeção

Coletadas as fotos, realizou-se o pré-processamento das imagens, transformando-as em 8-bits (256 diferentes graduações de cinza), assim como se reduziu o tamanho das imagens de 1.936 x 1.288 pixels para 800 x 532 mm e, assim, foram salvas no formato TIFF.

A imagem de referência sofreu defasamento de 90°, 180° e 270°, para permitir a utilização do processamento de *phase shift*, conforme descrito por Onuma, Nakamura e Kuwashima (1996), resultando, assim, em quatro imagens

das grades de referência e uma grade sobre o objeto, atendendo à necessidade do algoritmo que se encontra no anexo 1-C, como se pode observar na Figura 12.

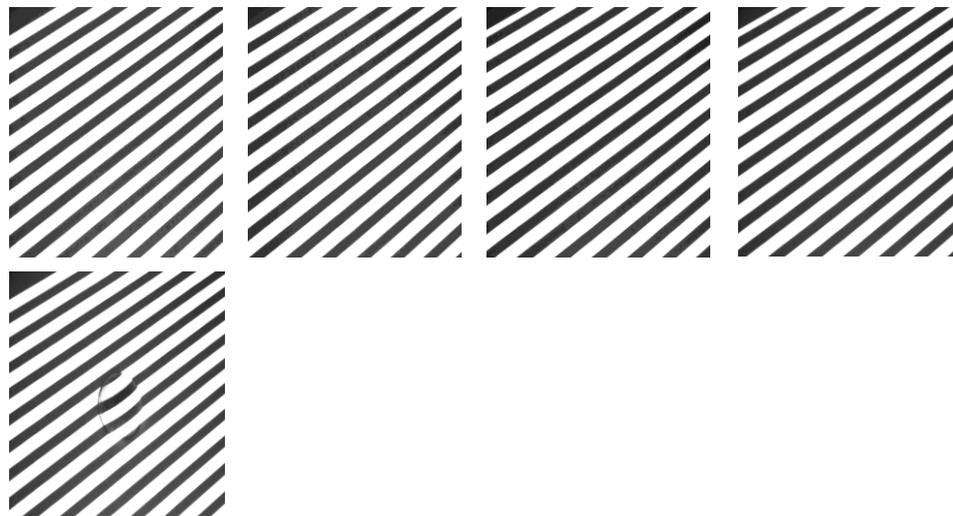


Figura 12 Imagens das grades após o pré-processamento
Fonte: Do autor (2016).

4.1.1.2 Processamento utilizando a técnica óptica de Moiré de projeção

Esta etapa foi desenvolvida por meio do software gratuito Scilab 4.0, com os programas que complementam sua interface gráfica, Image Magic e Siptoolbox Versão 4.0 como biblioteca, também gratuitos, com o objetivo de gerar o objeto recuperado, imagem que possibilita a visualização do modelo digital de elevação.

Com as definições de ângulos e distâncias, relacionadas à câmera, projetor e objeto (semiesfera de isopor), aplicou-se o defasamento e capturaram-se as quatro grades de referências e, assim, a quinta imagem relacionada ao objeto, conforme descrito por Coelho (2013). Posteriormente, utilizou-se o programa ImageJ associado ao *plugin* Fiji Is Just (Landmark Correspondence)

versão 2015, para a correção da distorção das imagens, assim como para a geração do objeto corrigido. Após esse processo, encontrou-se o posicionamento coincidente com o primeiro deslocamento na posição de 18cm e, assim, retiraram-se todas as cotas para plotar o perfil da semiesfera na planilha eletrônica Microsoft Excel®, conforme observado na Figura 13.

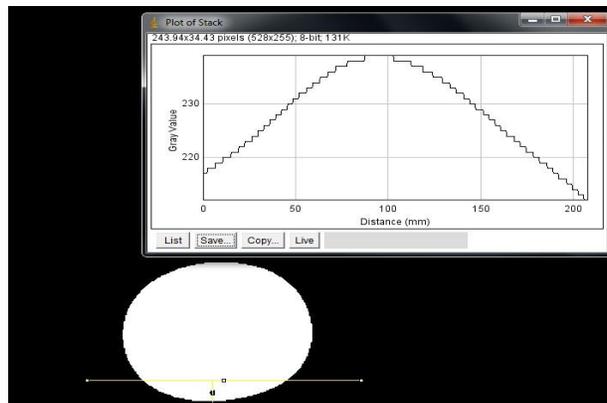


Figura 13 Perfil do objeto na posição de 18 centímetros
Fonte: Do autor (2016).

4.1.2 Análise da técnica do rugosímetro de varetas

Nessa etapa foi utilizado o rugosímetro de varetas, também conhecido como perfilômetro. Esse equipamento, composto por 36 varetas espaçadas por 30 mm, foi proposto por Correa et al. (2012), tendo o objetivo de realizar a leitura das alturas ao longo da superfície da semiesfera.

A base do rugosímetro de varetas é composta por um trilho com furos espaçados de 30 mm, de forma que o equipamento possa realizar a leitura de cada perfil ao longo de seu deslocamento.

Por meio de uma superfície lisa, posicionou-se a semiesfera de isopor no centro e, assim, realizaram-se quatro deslocamentos de 30 mm, sucessivos, de

forma que, a cada deslocamento, a câmera posicionada frontalmente capturasse os valores das elevações correspondentes em cada deslocamento e em cada vareta, varrendo totalmente o objeto, conforme a ilustração representada na Figura 14.



Figura 14 Rugosímetro de varetas validando as elevações do perfil da calota de isopor
Fonte: Do autor (2016).

4.1.2.1 Processamento das imagens relacionadas à técnica do rugosímetro de varetas

Captadas as imagens dos quatro perfis, utilizou-se o software gratuito ImageJ para levantamento de cotas de diversos pontos. Como referência, desenhou-se um retângulo de 20 mm de altura que foi adotado como objeto de referência no programa ImageJ para calibração e, assim, realizaram-se as leituras das elevações dos perfis de todos os pontos. Após todas as leituras, os dados foram lançados na planilha eletrônica para possíveis comparações.

4.1.3 Análise da técnica do gesso

Nessa etapa, criou-se um protótipo da superfície em questão (semiesfera) para aprimoramento da técnica. Após a criação do perfil, ele foi digitalizado utilizando-se a técnica do rugosímetro de varetas, como mostrado na Figura 15.



Figura 15 Setup utilizando a técnica do gesso combinada ao rugosímetro de varetas

Fonte: Do autor (2016)

Inicialmente, colocaram-se, aproximadamente, 5 litros de água dentro de um recipiente plástico e acrescentou-se o sulfato de cálcio (CaSO_4) em pó, aos poucos e, assim, iniciou-se a mistura utilizando-se uma espátula. O processo foi realizado até a massa ficar maleável e moldável.

Posteriormente, colocou-se o objeto sobre uma superfície de vidro banhada com óleo diesel e esparramou-se a mistura (sulfato de cálcio + água) até encobrir totalmente a calota de isopor.

Feito isso, esperou-se cerca de 5 minutos, foi tirado o bloco de gesso e observou-se a formação do objeto, porém, invertido. Com a técnica do rugosímetro de varetas, realizou-se a leitura do aprofundamento do perfil dos quatro deslocamentos espaçados de 30 mm. Foi levantado o perfil ao longo de quatro posições sobre o molde de gesso (18 cm, 48 cm, 78 cm e 108 cm), com distância entre varetas de 30 mm, conforme apresentado na Figura 16.



Figura 16 Validação do levantamento do perfil do protótipo da semiesfera de isopor, por meio do rugosímetro de varetas
Fonte: Do autor (2016).

4.1.3.1 Processamento das imagens relacionadas à técnica do gesso

De posse das imagens obtidas nos quatro deslocamentos, nas posições 18 cm, 48 cm, 78 cm e 108 cm, utilizou-se o software gratuito ImageJ, para levantamento das cotas correspondentes a todas as varetas nos seus respectivos deslocamentos para plotar os dados na planilha eletrônica, realizando-se as comparações.

4.2 Análise comparativa entre a técnica óptica de Moiré de projeção, a técnica do rugosímetro de varetas e a técnica do gesso, no campo de trabalho

Esta fase aconteceu na área de campo experimental do Departamento de Engenharia da UFLA, situada abaixo do hospital veterinário, em um Latossolo Vermelho, recém-arado, com umidade de 28,8%, estrutura granular e textura argilosa.

Os materiais utilizados no trabalho foram:

- a) trator Valtra, modelo A950, utilizando pneus Goodyear Dina Torque II 14.9-24 na dianteira e Firestone Super All Traction 23 18.4-34 na traseira;
- b) câmera digital fotográfica Canon EOS 400D;
- c) projetor Epson Power Lite S8+/W8+;
- d) computador ACER (ASPIRE 5536), com os softwares Gerador de Grades, Scilab, ImageJ;
- e) semiesfera com 12,5 cm de diâmetro e 3,9 cm de espessura;
- f) tripé para os equipamentos;
- g) rugosímetro de varetas;
- h) água;
- i) 100 kg de sulfato de cálcio.

Utilizaram-se, novamente, as três técnicas praticadas anteriormente, técnica óptica de Moiré, técnica do rugosímetro de varetas e técnica do gesso. Todas as metodologias foram as mesmas utilizadas no ambiente laboratorial.

Inicialmente, foi utilizada a técnica óptica de Moiré para a digitalização da superfície do solo ao ser submetido ao tráfego de um trator agrícola em cinco parcelas definidas aleatoriamente, de forma a comparar três posições em cada parcela. O *setup* utilizado foi o mesmo que o utilizado no item 4.1.1 e, assim,

realizaram-se o pré-processamento e o processamento para a geração da elevação do perfil do solo.

No segundo momento, utilizou-se o rugosímetro de varetas para a validação das leituras das elevações do perfil do solo nas mesmas parcelas, realizando-se 20 deslocamentos espaçados de 30 mm com varetas espaçadas de 15 mm, conforme explicado no item 4.1.2 e, assim, gerou-se, nos softwares ImageJ e Microsoft Excel®, o perfil de elevação da superfície em questão.

Posteriormente, foi utilizada a técnica do gesso. Primeiramente, foi colocada a forma de madeira (gabarito) na posição de cada parcela e, assim, adicionou-se o gesso para a construção do molde do perfil do solo. O processo foi realizado nas cinco parcelas. Após um período de 12 horas, formou-se uma placa em cada parcela e as mesmas foram retiradas para posteriores digitalizações no ambiente laboratorial, utilizando a técnica do rugosímetro de varetas, com a aplicação de deslocamentos coincidentes com os mesmos pontos para as diversas técnicas.

Para a etapa de campo, foi construída uma forma em madeira (gabarito), com as mesmas dimensões do trilho do rugosímetro de varetas, e também com a marcação por estacas, garantindo dimensões e posicionamentos iguais para as diversas técnicas.

Após todos os processos, digitalizaram-se as superfícies e realizaram-se comparações entre as técnicas em três posições coincidentes em cada parcela.

4.2.1 Aplicação da técnica óptica de Moiré de projeção no campo

Após a passagem do trator Valtra A950 no solo, foram definidas cinco parcelas aleatórias para a aplicação da técnica óptica de Moiré. Essa etapa teve como fundamento a etapa laboratorial, praticando o mesmo arranjo experimental, bem como os mesmos procedimentos, porém, na área de campo

situada abaixo do hospital veterinário da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

O arranjo experimental utilizado foi o mesmo proposto por Coelho (2013), sendo a câmera posicionada a 1,40 m do solo e o projetor, a 1,30 m do solo, com distância relativa entre eles de 40 cm e 35 cm, como se observa no esquema da Figura 17 (A) e (B). Projetaram-se as grades no solo com o auxílio do software Gerador de Grids (BRAGA JÚNIOR, 2009), como observado na Figura 17 (C). Todas as representações estão expostas na Figura 17.

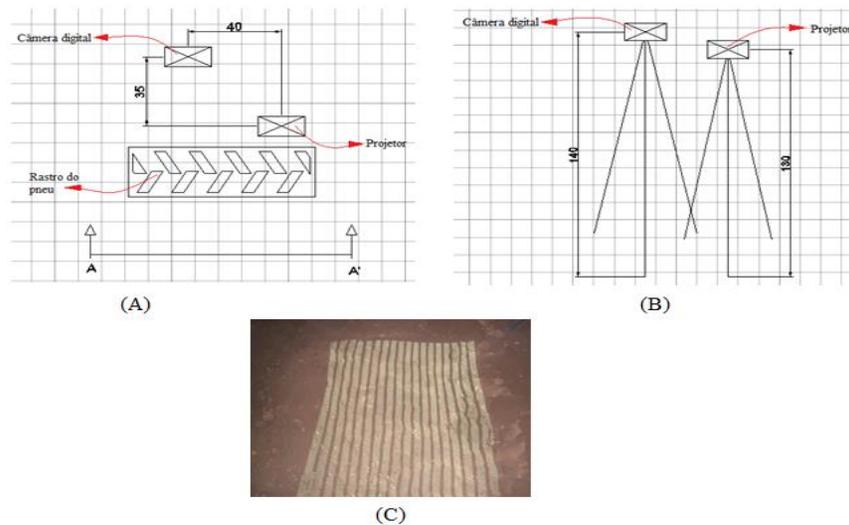


Figura 17 (A) Planta mostrando a posição relativa entre a câmera digital e o projetor, em cm; (B) visão AA', mostrando a altura em relação ao solo da câmera digital e do projetor, em cm; (C) projeção das grades ou grids no solo

Fonte: Coelho (2013).

O software Gerador de *Grids* foi calibrado da seguinte maneira: Passo = 32 pixels, espessura = 10 pixels e as 4 fases, de acordo com a Figura 18.

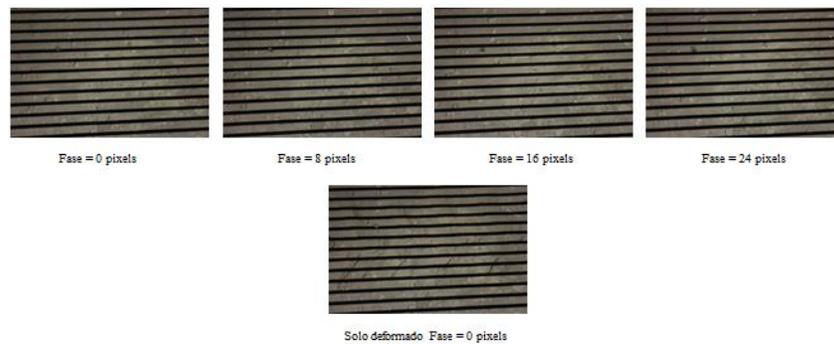


Figura 18 Imagens das grades antes do pré-processamento
Fonte: Coelho (2013).

4.2.1.1 Pré-processamento das imagens de campo, para utilização da técnica de Moiré de projeção

Coletadas as fotos, ocorre o pré-processamento das imagens, no programa ImageJ, da seguinte forma: transforma-se a imagem em 8-bits; logo, a imagem é composta de 256 diferentes graduações de cinza. Diminui-se o tamanho da imagem de 1.936 x 1.288 pixels para 800 x 532 pixels. As imagens foram salvas no formato TIFF.

4.2.1.2 Processamento das imagens de campo, com a utilização da técnica de Moiré de projeção

Esta etapa foi desenvolvida por meio do *software* gratuito Scilab 4.0, com o auxílio do algoritmo descrito no anexo III, cujo objetivo foi comparar quatro imagens defasadas (*phase shift*) com a quinta imagem relacionada ao objeto. Por meio do objeto recuperado foi possível visualizar o modelo digital de

elevação da superfície em questão. A aplicação da técnica de Moiré de projeção está representada na Figura 19.



Figura 19 Imagens ilustrativas referentes à aplicação da técnica óptica de Moiré de projeção

Fonte: Do autor (2016).

Após gerar o objeto recuperado, utilizou-se o programa ImageJ associado ao *plugin* Fiji Is Just (Landmark Correspondence) versão 2015, para a correção da distorção das imagens, assim como para a geração do objeto corrigido. Após esse processo, encontrou-se o posicionamento coincidente com o primeiro deslocamento na posição de 18 cm e, assim, retiraram-se todas as cotas para plotar o perfil do solo no *software* Microsoft Excel®.

4.2.2 Técnica do rugosímetro de varetas na etapa de campo

Nesta etapa foi utilizado o equipamento rugosímetro de varetas, também conhecido como perfilômetro. Esse equipamento é composto por 41 varetas espaçadas por 15 mm, tendo sido proposto por Correa et al. (2012), com o objetivo de realizar a leitura das alturas ao longo da superfície do solo.

A base do rugosímetro de varetas é composta por um gabarito com furos espaçados de 30 mm, para a realização da leitura de cada perfil ao longo de seu deslocamento.

O trabalho foi realizado em cinco parcelas com 20 deslocamentos por parcela, realizando-se uma varredura de pontos associados a cada perfil. Na medida em que o rugosímetro de varetas foi deslocado, uma imagem foi capturada para o posterior processamento, percorrendo a superfície do solo demarcada por um gabarito de madeira, conforme se observa nas Figuras 20 e 21.



Figura 20 Imagens ilustrativas referentes à aplicação da técnica do rugosímetro de varetas
Fonte: Do autor (2016).

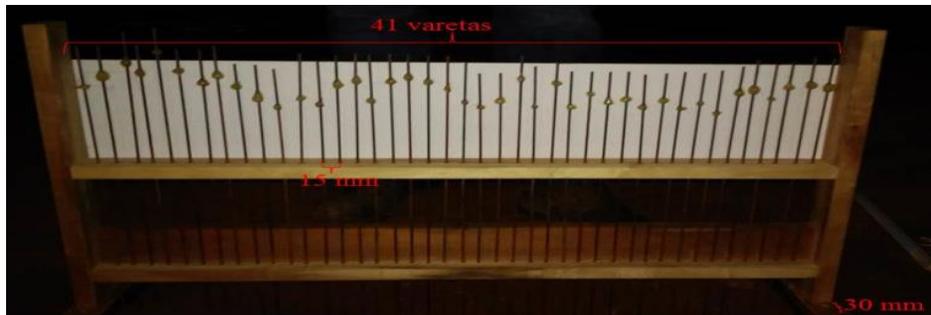


Figura 21 Imagem ilustrativa referente ao perfilômetro, com o respectivo número de varetas, espaçamento entre varetas e deslocamento do equipamento, ao longo do gabarito de madeira
Fonte: Do autor (2016).

Após os processamentos dos perfis nas posições especificadas, compararam-se as três técnicas, nas cinco parcelas, em posições coincidentes para posteriores análises.

4.2.3 Aplicação da técnica do gesso na etapa de campo

Na terceira parte do experimento em campo, criou-se um protótipo em gesso da superfície do solo em cada parcela, para posterior validação das alturas para a caracterização de cada perfil. Após a criação do perfil em gesso, ele foi digitalizado utilizando-se a técnica do rugosímetro de varetas, no ambiente laboratorial.

Inicialmente, colocou-se o gabarito de madeira na posição em que se encontravam as quatro estacas, para demarcação da posição. Em seguida, colocou-se um saco plástico sobre a superfície do solo, de forma que a placa de gesso fosse retirada com facilidade. Na sequência, colocou-se uma quantidade de água e, em seguida, adicionou-se o sulfato de cálcio até que a massa (água + sulfato de cálcio) chegasse ao nível do gabarito de madeira, conforme Figura 22.



Figura 22 Imagens ilustrativas referentes à aplicação da técnica do gesso
Fonte: Do autor (2016).

Após um período de 12 horas, formaram-se as placas de gesso e, assim, foram retiradas para posteriores digitalizações no ambiente laboratorial utilizando-se a técnica do rugosímetro de vareta, para a validação das elevações ao longo do perfil, conforme se observa na Figura 23.

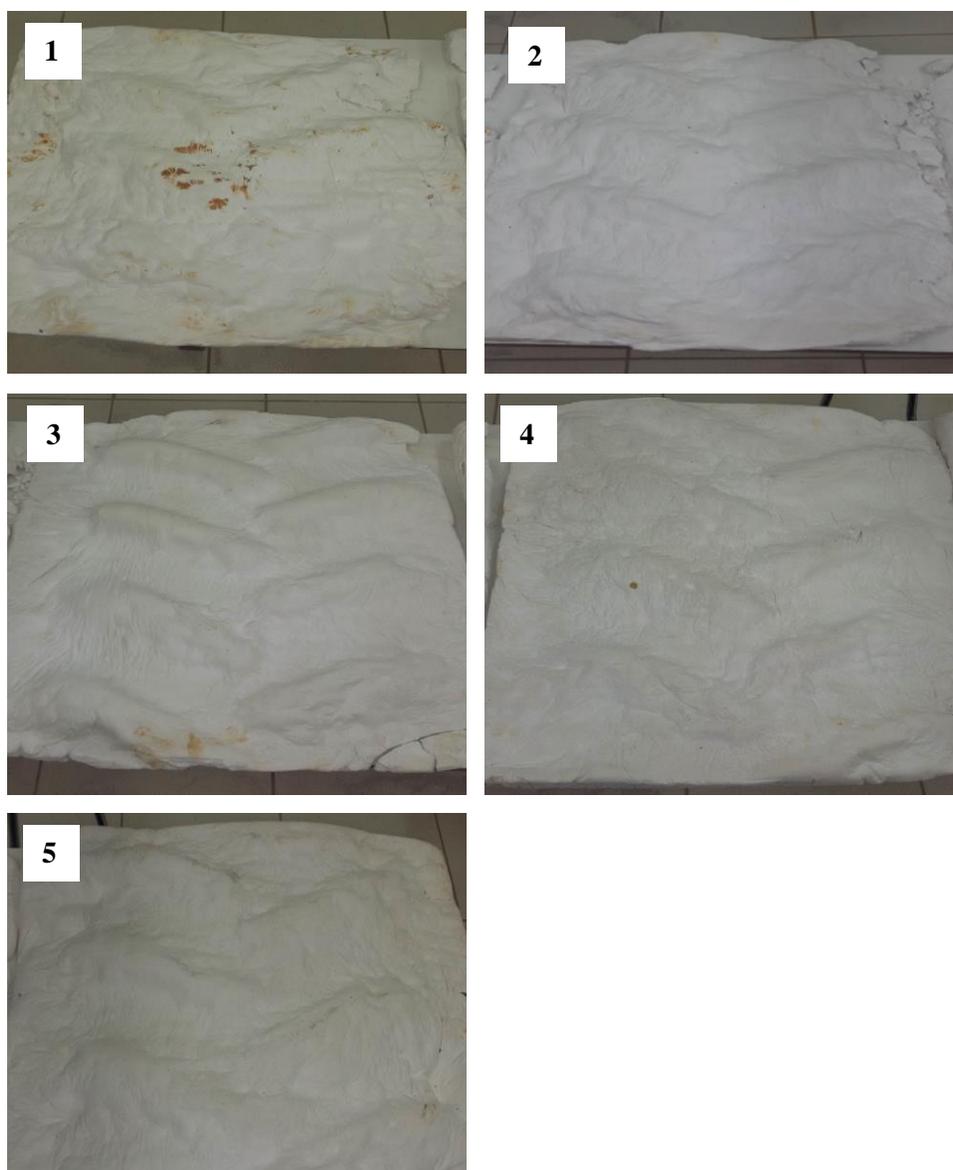


Figura 23 Imagens dos protótipos referentes a cada parcela utilizando a técnica do gesso
Fonte: Do autor (2016).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise comparativa entre a técnica óptica de Moiré de projeção, a técnica do rugosímetro de vareta e a técnica do gesso, no ambiente laboratorial

Inicialmente, foi digitalizado o perfil da semiesfera de isopor e, por meio do *software* ImageJ, encontraram-se as quatro posições dispostas e utilizadas em todos os métodos: 18 cm, 48 cm, 78 cm e 108 cm. Os dados das coordenadas das posições foram lançados no *software* Microsoft Excel®, para a geração do perfil.

Observando-se a Figura 24 é possível verificar que a técnica óptica de Moiré tem alta capacidade de realizar o contorno da superfície em questão, nas diversas posições.

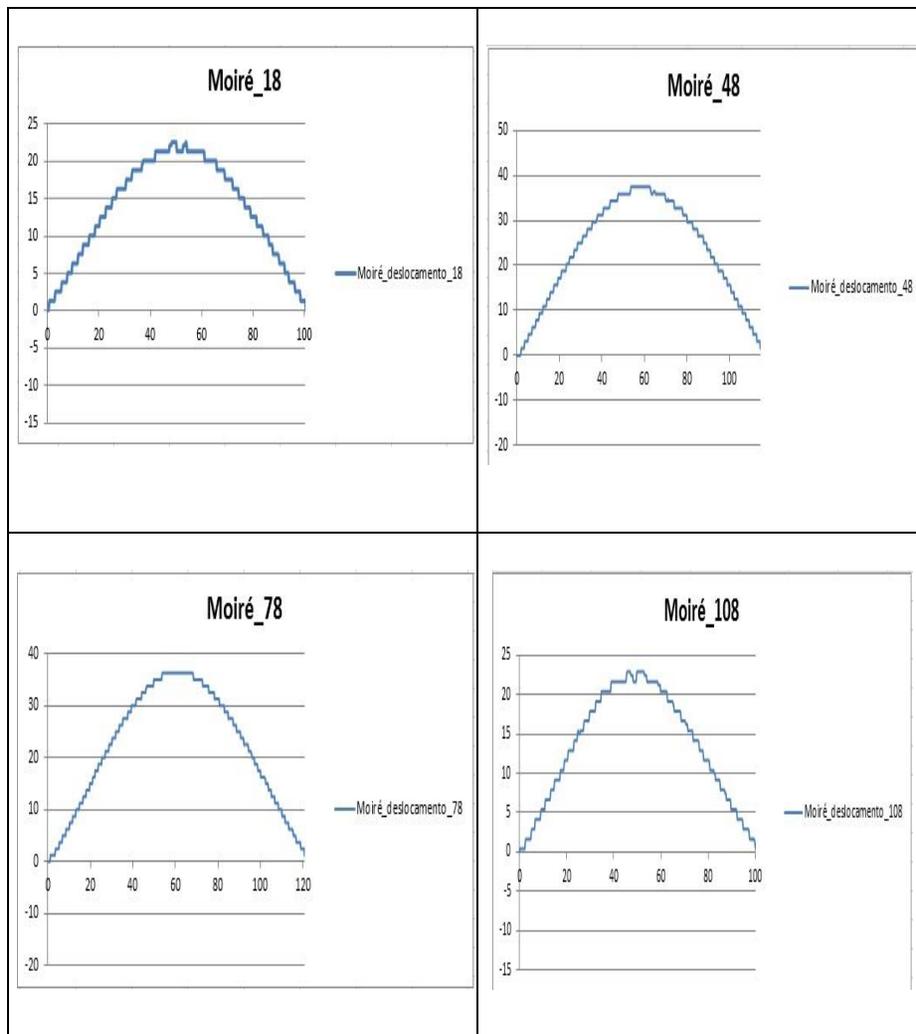


Figura 24 Imagem da formação do perfil nas posições (18, 48, 78, 108 cm), utilizando-se a técnica de Moiré. O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros
 Fonte: Do autor (2016).

Posteriormente, foi utilizado o rugosímetro de varetas nas mesmas posições dispostas: 18 cm, 48 cm, 78 cm e 108 cm. O equipamento tem 20 varetas com capacidade de realizar as leituras das alturas em cada ponto, formando-se, assim, um perfil com 20 pontos. Com os dados das alturas referentes a cada perfil, foi possível lançá-los na planilha eletrônica, para a geração do perfil.

A técnica apresentada mostrou ter boa capacidade de realizar a leitura do perfil do objeto, principalmente na profundidade (coordenada Z). Observou-se também que o espaçamento entre varetas no rugosímetro de 30 mm prejudicou o detalhamento da superfície em questão, sugerindo uma redução do espaço entre varetas para 15 mm, para a etapa de campo, quando o solo estiver deformado.

Na Figura 25 está ilustrado o perfil da semiesfera de isopor caracterizado pelo rugosímetro de varetas nas posições de 18 cm, 48 cm, 78 cm e 108 cm, com a extração da profundidade ao longo do perfil.

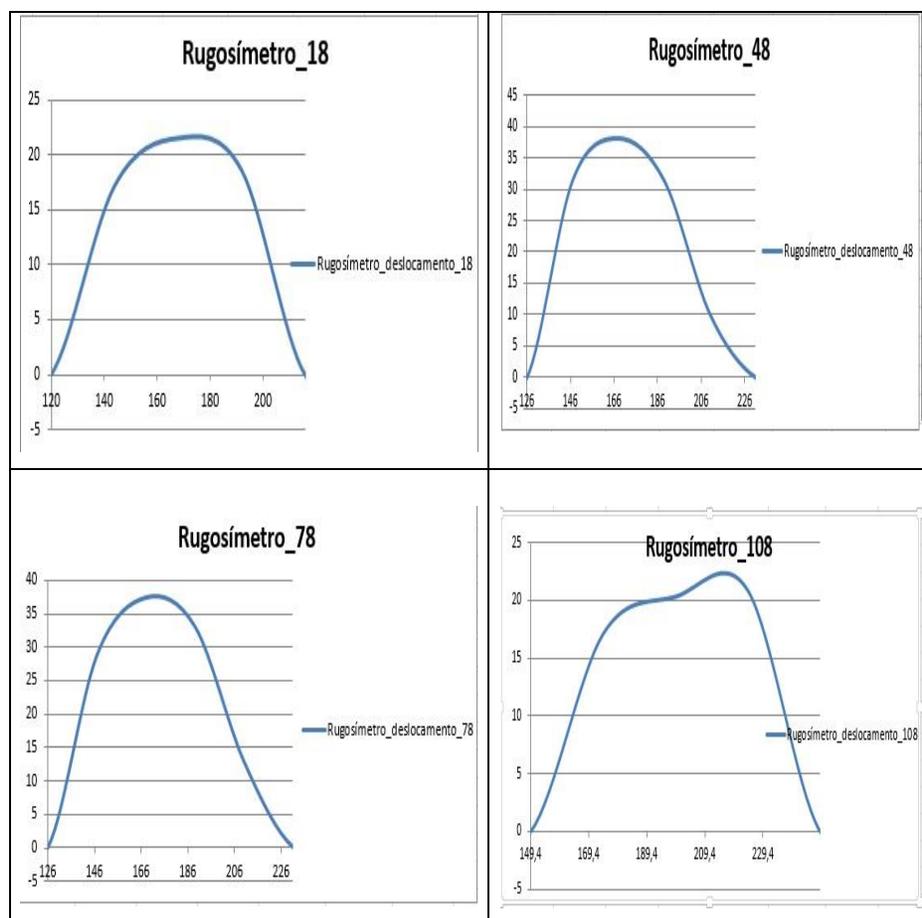


Figura 25 Imagem da caracterização do perfil pelo rugosímetro de varetas nas posições 18, 48, 78, 108 cm. O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros
Fonte: Do autor (2016).

Na terceira parte foi construído um molde do objeto em questão, para a posterior digitalização com o auxílio do rugosímetro de varetas. O equipamento foi alocado juntamente ao protótipo, de forma que ele se deslocasse nas mesmas posições dispostas: 18 cm, 48 cm, 78 cm e 108 cm. O equipamento tem 20

varetas com capacidade de realizar as leituras das alturas em cada ponto, formando-se, assim, um perfil com 20 pontos. Os dados das alturas referentes a cada perfil foram lançados no *software* Microsoft Excel®, para a geração do perfil.

A técnica apresentada mostrou ter boa capacidade de criar um protótipo da superfície em questão, para a posterior leitura do perfil. Notou-se que a superfície do protótipo é rígida e lisa, favorecendo o deslocamento das varetas em diferentes sentidos. Observou-se também que o espaçamento entre varetas no rugosímetro era de 30 mm, fato que prejudicou o detalhamento da superfície em questão, sugerindo uma redução do espaço entre varetas para 15 mm para a etapa de campo, quando o solo estiver deformado. O perfil caracterizado pelo rugosímetro de varetas, nas quatro posições citadas, está ilustrado na Figura 26.

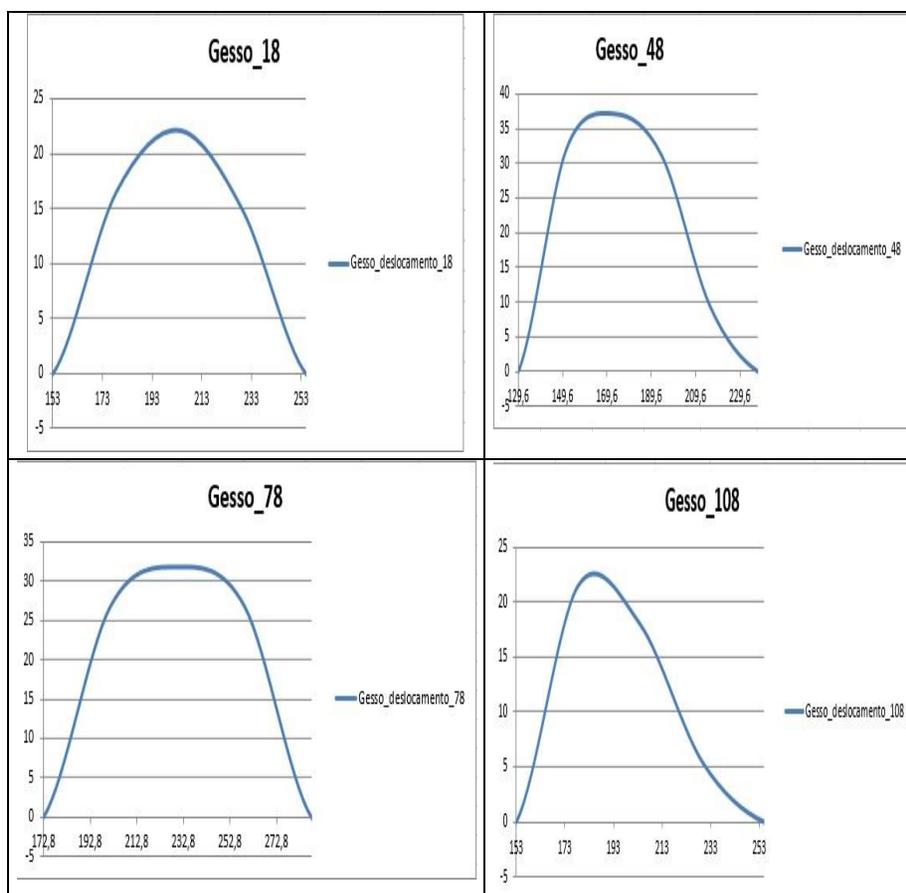


Figura 26 Imagens dos protótipos nas posições 18, 48, 78, 108 cm, utilizando-se a técnica do gesso. O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros
Fonte: Do autor (2016).

Comparações das três técnicas citadas anteriormente, nas posições de 18 cm, 48 cm, 78 cm e 108 cm, são mostradas a seguir. Na Figura 27 observa-se a posição de 18 cm.

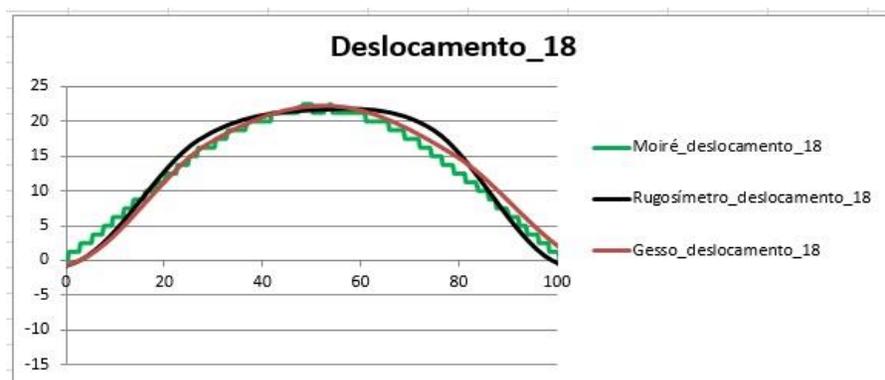


Figura 27 Imagem comparando as diversas técnicas para a posição de 18 cm. O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros

Fonte: Do autor (2016).

Por meio da Figura 27 é possível verificar a capacidade de cada técnica, na primeira posição de 18 cm da semiesfera de isopor. Percebe-se que os três métodos mostraram ser proporcionais, tendo boa facilidade de realizar o objetivo proposto.

Na Figura 28 observa-se a capacidade de cada técnica em caracterizar o perfil da semiesfera de isopor na posição de 48 cm. Percebe-se que a técnica de Moiré apresentou um desenho de perfil mais regular, comparado ao objeto em seu formato original. O rugosímetro encontrou dificuldades em detalhar o perfil devido ao espaçamento de suas varetas (30 mm), caracterizado como ampliado. Da mesma forma, ao utilizar o rugosímetro no protótipo de gesso, também teve

dificuldades em caracterizar o perfil, apresentando algumas desuniformidades, devido ao espaçamento das varetas do rugosímetro.

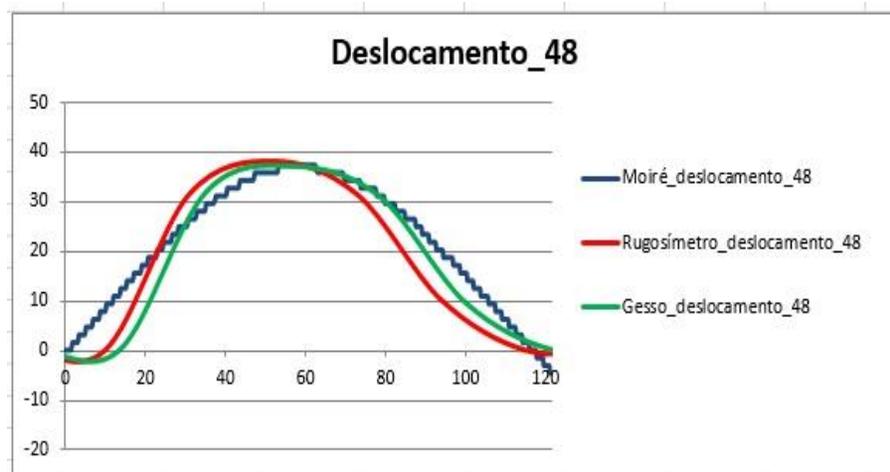


Figura 28 Imagem comparando as diversas técnicas para a posição de 48 cm. O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros

Fonte: Do autor (2016).

A capacidade de cada técnica de caracterizar o perfil da semiesfera de isopor na posição de 78 cm pode ser observada na Figura 29.

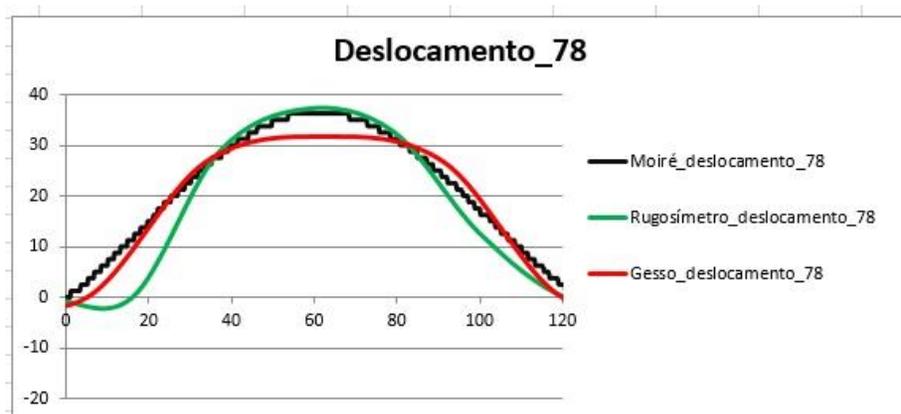


Figura 29 Imagem comparando as diversas técnicas para a posição de 78 cm. O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros
Fonte: Do autor (2016).

Novamente, a técnica de Moiré apresentou um desenho de perfil mais regular, comparado ao objeto em seu formato original. O rugosímetro encontrou dificuldades em detalhar o perfil do protótipo em gesso, visto que as varetas tendem a se deslocar na superfície e, assim, tendem a perder a sua posição ideal, devido ao fato de a superfície ser rígida e rugosa.

A Figura 30 ilustra a capacidade de cada técnica de caracterizar o perfil da semiesfera de isopor na posição de 108 cm. A técnica de Moiré apresentou um desenho de perfil mais regular, comparado ao objeto em seu formato original. O rugosímetro encontrou dificuldades em detalhar o perfil da semiesfera de isopor, visto que as varetas podem perfurar a superfície do objeto e também se deslocar na superfície do mesmo, perdendo a sua posição ideal, devido ao fato de a superfície ser escorregadia e oca, conforme se observa na Figura 30.

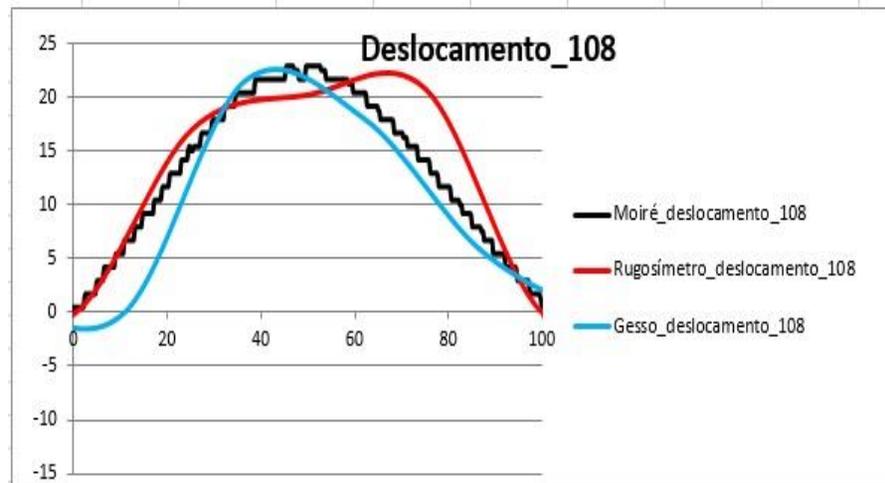


Figura 30 Imagem comparando as diversas técnicas para a posição de 108 cm. O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros
Fonte: Do autor (2016)

Com informações referentes às três técnicas, foi possível avaliar que a técnica de Moiré atendeu às expectativas, mostrando que ela é versátil, ágil, de fácil coleta e manipulação de dados, não destrutiva, dentre outros fatores que fundamentaram a parte experimental de campo.

5.2 Análise comparativa entre a técnica óptica de Moiré de projeção, a técnica do rugosímetro de varetas e a técnica do gesso, no campo de trabalho

Na etapa de campo foram utilizadas as três técnicas em cinco parcelas, de forma a realizar comparações entre as técnicas, dentro de cada porção de terra representada, por 63 cm de comprimento e 70 cm de largura. De forma a ilustrar, abordaram-se as parcelas 03 e 04, devido à qualidade dos resultados.

Inicialmente foi utilizada a técnica de Moiré para a digitalização da superfície do solo. Na avaliação das imagens, percebeu-se que a técnica tem alta capacidade de realizar a leitura de detalhes na superfície do solo ao longo de seu perfil, bem como diagnosticar que a parte destacada em negrito representa a profundidade que o pneu do trator ocasionou ao solo, devido ao seu peso e às condições físicas do substrato. Em face das características observadas na etapa laboratorial, o procedimento ganha destaque devido à qualidade, agilidade, precisão e seu baixo custo, conforme se observa na Figura 31.

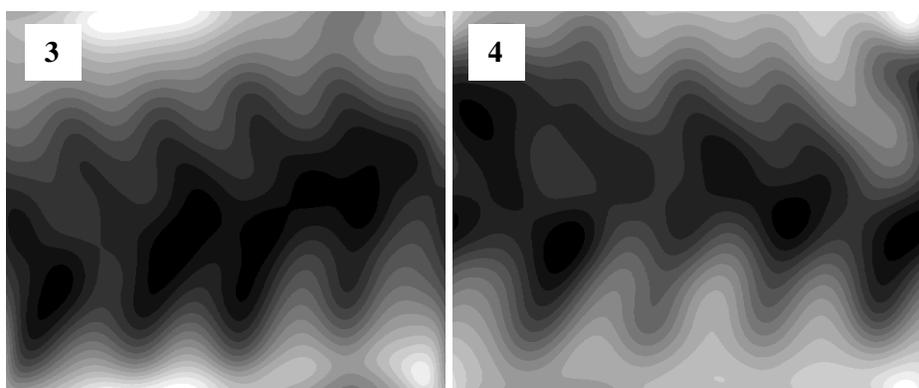


Figura 31 Imagens do solo digitalizado correspondente às parcelas 03 e 04, com comprimento (cm), largura (cm) e profundidade em tons de cinza
Fonte: Do autor (2016)

Posteriormente, utilizou-se a técnica do rugosímetro de varetas para realizar a leitura de pontos ao longo do perfil do solo relacionado a cada parcela. De posse do *software* Microsoft Excel foi possível gerar o perfil do solo em três dimensões, formando 21 superfícies ao longo do deslocamento. De forma a ilustrar, observaram-se os perfis referentes à terceira parcela, conforme a ilustração da Figura 32.

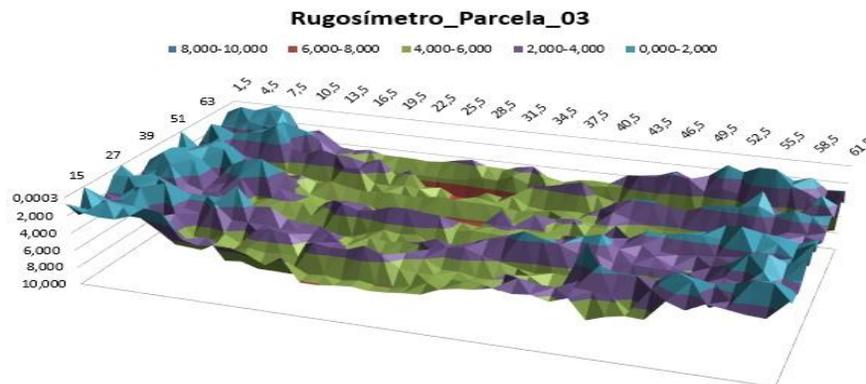


Figura 32 Imagem do perfil do solo referente à terceira parcela, utilizando o rugosímetro de varetas, com o espaçamento entre varetas, deslocamento do perfilômetro e profundidade, em centímetros
Fonte: Do autor (2016).

Na Figura 33, novamente, apresenta-se a representação das superfícies captadas pelo rugosímetro de varetas no campo.

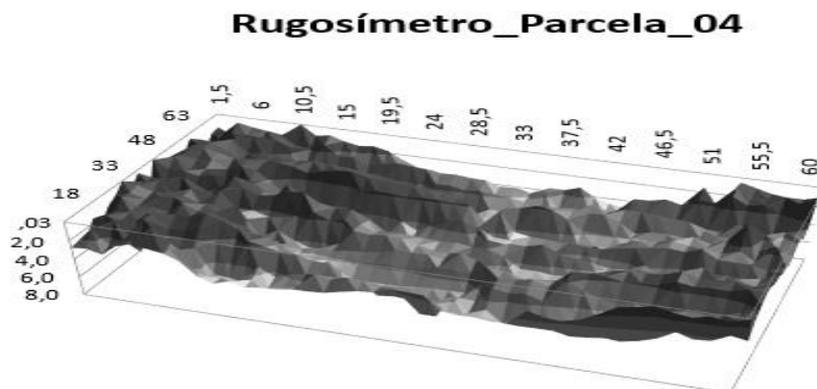


Figura 33 Imagem do perfil do solo referente à quarta parcela, utilizando o rugosímetro de varetas, com o espaçamento entre varetas, deslocamento do perfilômetro e profundidade, em centímetros
Fonte: Do autor (2016).

Por fim, utilizou-se a técnica do gesso comparada à técnica do rugosímetro de varetas, para avaliar a correlação de Pearson em cada parcela, nas posições 20 cm, 35 cm e 50 cm, com início a partir do extremo esquerdo em direção ao extremo direito, ao longo da posição demarcada pelo gabarito de madeira fixado no campo.

Na Figura 34 compara-se a técnica do rugosímetro de varetas com a técnica do gesso na terceira parcela, nas respectivas posições mencionadas. Os dados mostraram que ambas as técnicas têm alta correlação de Pearson, com maior destaque para a posição de 20 cm e 35 cm, apresentando valores de 0,8218 e 0,8024, respectivamente, conforme a Figura 34.

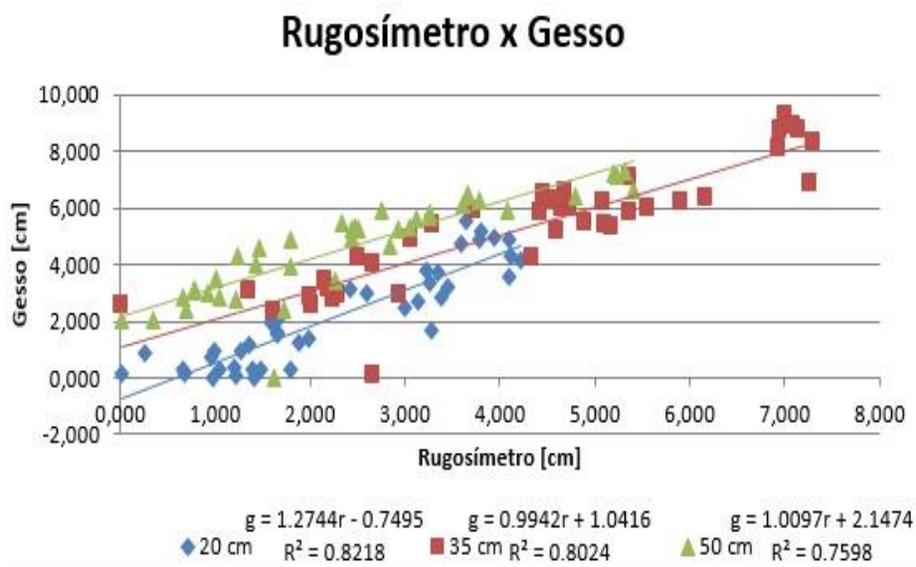


Figura 34 Correlação entre a técnica do rugosímetro de varetas e a técnica do gesso nas diversas posições, em que “g” e “r” representam os valores retornados pelas técnicas do gesso e do rugosímetro de varetas, e R^2 , a correlação de Pearson

Fonte: Do autor (2016).

Na Figura 35 ilustra-se a correlação entre o rugosímetro de varetas versus Moiré e gesso x Moiré, na posição de 20 cm, em que “m” e “r” representam os valores retornados pelas técnicas de Moiré e do rugosímetro de varetas, e R^2 , a correlação de Pearson.

Na respectiva posição, o gesso apresentou valor considerável de correlação (0,7083), comparado à técnica de Moiré, assim como o rugosímetro também apresentou um valor considerável de correlação (0,6413), comparado à técnica de Moiré, conforme Figura 35.

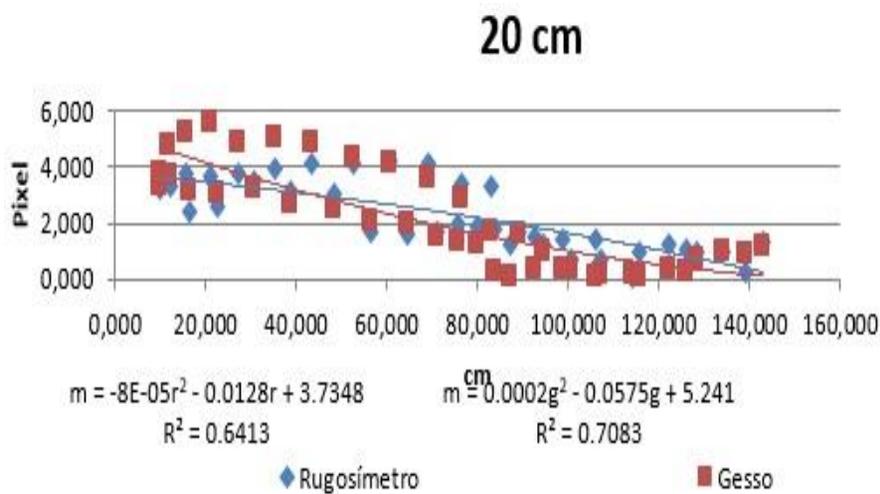


Figura 35 Correlação entre a técnica do rugosímetro de varetas e a técnica do gesso na posição de 20 cm
Fonte: Do autor (2016).

A correlação entre a rugosímetro de varetas *versus* Moiré e gesso x Moiré na posição de 35 cm está ilustrada na Figura 36. Na respectiva posição, o gesso apresentou maior valor de correlação de Pearson, comparado à técnica do

rugosímetro de varetas (0,7526). O rugosímetro também apresentou um valor considerável de correlação de Pearson (0,6132), comparado à técnica de Moiré. As siglas “m” e “r” representam os valores retornados pelas técnicas de Moiré e do rugosímetro de varetas, e R^2 , a correlação de Pearson, ao comparar duas técnicas, conforme se verifica na Figura 36.

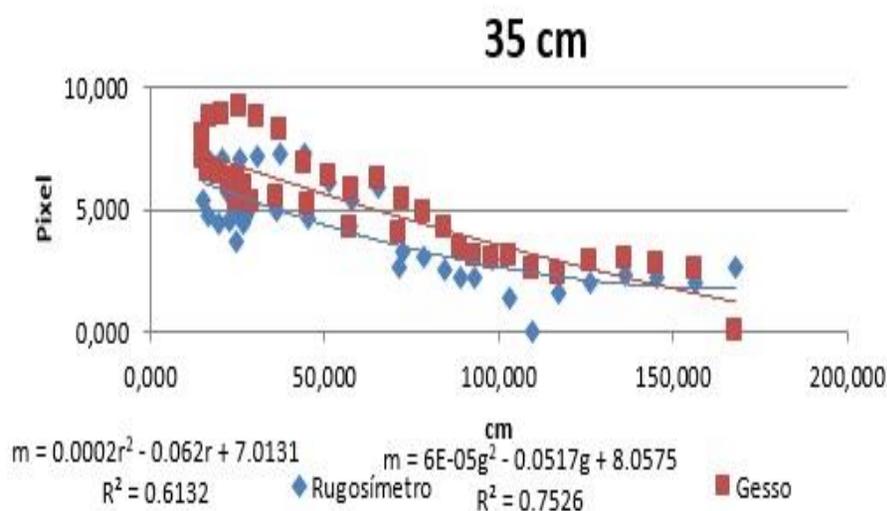


Figura 36 Correlação entre as diversas técnicas na posição de 35 cm
 Fonte: Do autor (2016)

Na Figura 37 está ilustrada a correlação entre a rugosímetro de varetas *versus* Moiré e gesso x Moiré, na posição de 50 cm. Na respectiva posição, o gesso apresentou um maior valor de correlação de Pearson, comparado à técnica do rugosímetro de varetas (0,842). O rugosímetro apresentou valor inferior de correlação (0,5465), comparado à técnica de Moiré e, também, comparado aos deslocamentos anteriores. As siglas “m” e “r” representam os valores retornados pelas técnicas de Moiré e do rugosímetro de varetas, e R^2 , a correlação de Pearson.

Vale destacar que, para realizar comparações, utilizaram-se duas técnicas nas respectivas posições citadas.

O gesso obteve grande destaque, em face da sua facilidade de realizar moldes de superfícies e devido à rigidez de suas placas, mostrando boa adaptação à superfície do solo. Em contrapartida, o rugosímetro de varetas não mostrou boa adaptação, devido ao fato de a técnica ser destrutível, realizando piques ao longo do perfil do solo. Esses fatos podem ser verificados na Figura 37.

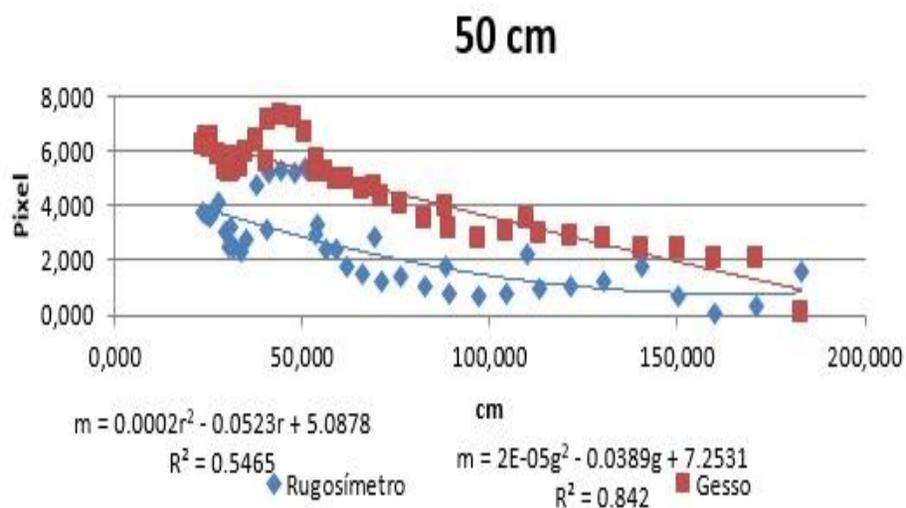


Figura 37 Correlação entre as diversas técnicas na posição de 50 cm
 Fonte: Do autor (2016).

Na Figura 38 estão exemplificadas as comparações realizadas nas três posições (20 cm, 35 cm e 50 cm) referentes à quarta parcela, com o auxílio do software Octave.

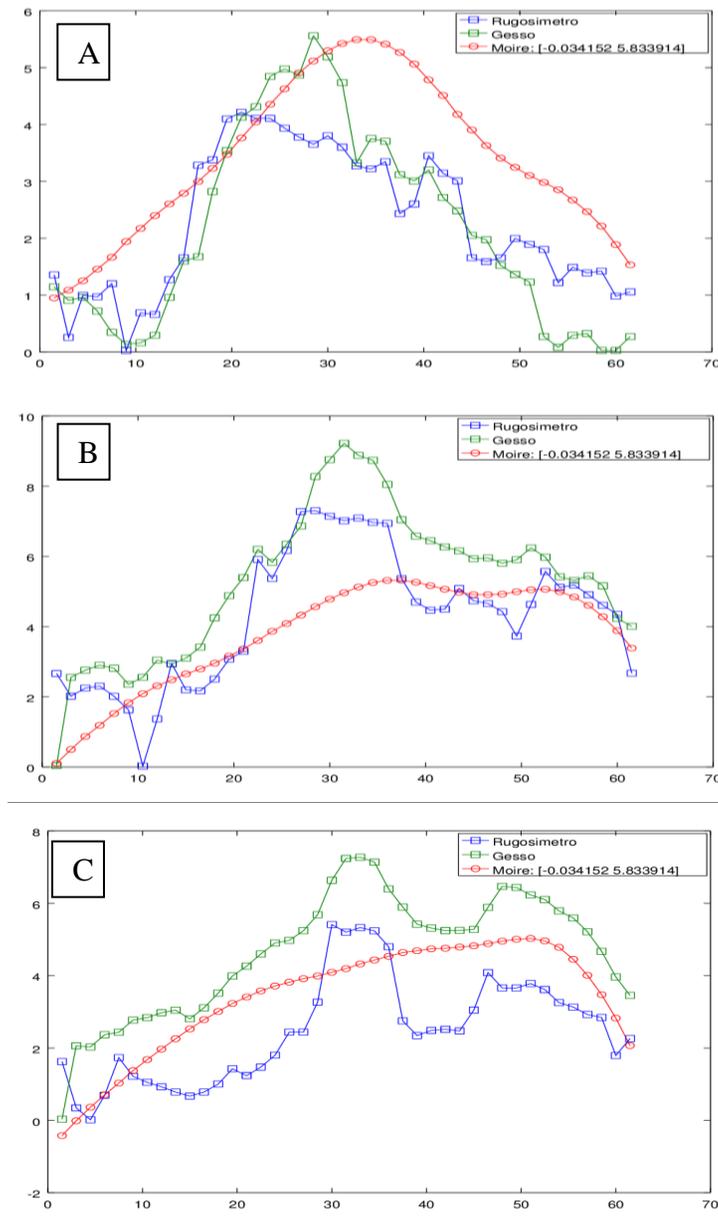


Figura 38 Imagens do perfil do solo referente à quarta parcela nas posições de 20 cm (A), 35 cm (B) e 50 cm (C). O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros
Fonte: Do autor (2016).

Avaliando também a primeira parcela, constatou-se que as técnicas apresentaram total desconfiguração, evidenciando que a análise em visão monocular tem suas particularidades, pois pode introduzir erros de perspectiva, sendo esses casos ocorrentes em poucas frequências, como pode se ver nas figuras anteriores.

As Figuras 39(A), 39(B) e 39(C) correspondem às análises da primeira parcela nas posições 20, 35 e 50 cm, sendo o valor de Moiré em pixels convertido a cm, utilizando a técnica do erro quadrático mínimo e, como referência, o valor médio entre o resultado do gesso e o do rugosímetro. Avaliando-se a Figura 39(A) é possível ver que existe um erro de predição de profundidade (ilusão óptica), pois o rugosímetro observou profundidades acentuadas que os outros métodos não observaram.

Por outro lado, os resultados mostraram, conforme as Figuras 39(B) e 39(C), que não existem esses erros de predição de profundidade.

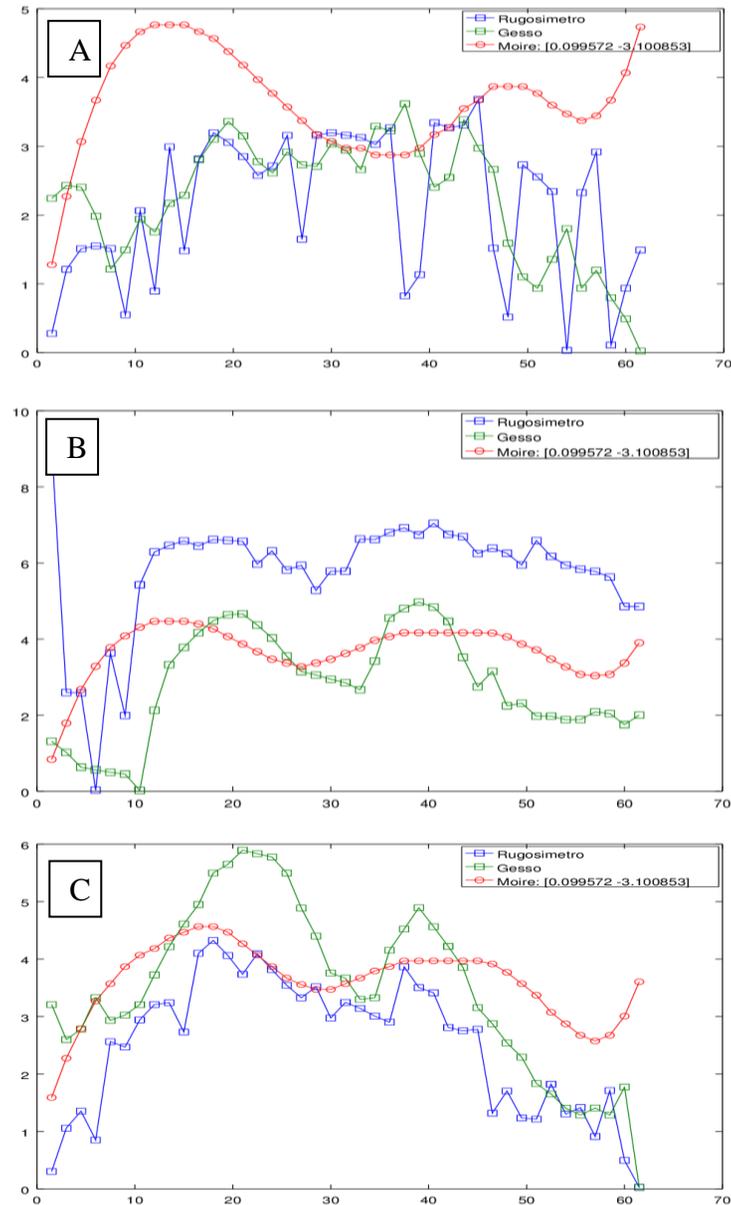


Figura 39 Imagens do perfil do solo referente à primeira parcela, nas posições de 20 cm (A), 35 cm (B) e 50 cm (C). O eixo x representa o deslocamento das posições, em centímetros e o eixo y representa as profundidades, também em centímetros
Fonte: Do autor (2016).

6 CONCLUSÃO

O potencial do uso da técnica de Moiré aplicada ao solo mostrou-se amplo e promissor, ao analisar as etapas propostas pelo experimento, tendo sido o objetivo central do trabalho realizar uma avaliação quantitativa referente à correlação entre as técnicas, principalmente na etapa de campo. Comparando-se as técnicas tradicionais, a técnica de Moiré mostrou-se ágil na coleta e na manipulação de dados, favorecendo o traçado do perfil do solo em três dimensões.

A etapa laboratorial foi de grande valia para a etapa de campo, em face dos ajustes de equipamentos, da readaptação, da logística, do controle e do monitoramento do sistema.

Vale ressaltar que as técnicas tradicionais também mostraram boa capacidade de realizar o objetivo proposto, mas, comparadas à técnica óptica, apresentaram limitações, por serem destrutivas, invasivas, exigir contato manual com a superfície proposta, dentre outros.

Os mapas e os gráficos das superfícies mostraram o comportamento físico do solo ao ser submetido por um trator agrícola, evidenciando também os possíveis pontos de maior suporte de carga pelo solo.

Avaliou-se que uma grande vantagem da técnica de Moiré, comparada às outras técnicas, é a obtenção da deformação da superfície, enquanto o rugosímetro e o gesso possibilitaram apenas a medição do perfil.

REFERÊNCIAS

- ALLMARAS, R. R. et al. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. **USDA Conservation Research Report**, Washington, v. 7, p. 1-22, 1966.
- ARNAL ATARES, P. V.; LAGUNA BLANCA, A. **Tractores y motores agrícolas**. Madrid: Ministerio de Agricultura, 1980. 429 p.
- ASSUNDI, A.; YUNG, K. H. Logical moiré and its application. **Experimental Mechanics**, London, v. 31, n. 3, p. 236-242, Sept. 1991.
- BARBOSA, J. A. et al. Desempenho operacional de um trator agrícola equipado alternadamente com pneus radiais e diagonais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 474-480, 2005.
- BOTTA, G. F.; TOLON BECERRA, A.; BELLORA TOURN, F. Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 381-386, 2009.
- BRAGA JÚNIOR, R. A. **Metodologia para aplicação da técnica de moiré: software gerador de grades**. 2009. Disponível em: <http://deg.ufla.br/site/_adm/upload/file/Roberto/TutorialMOIRE.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2016.
- CLOUD, G. **Optical methods of engineering analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 520 p.
- COELHO, D. E. C. **Desenvolvimento de uma técnica ótica para digitalização do solo após o contato rodado-solo**. 2013. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- CORREA, I. M. Com peso certo. **Cultivar**, Pelotas, v. 5, p. 10-11, ago. 2003.
- CORREA, I. M. C. et al. Rugosidade da superfície de um cambissolo húmico relacionada com o preparo e compactação do solo sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, p. 567-576, 2012.
- COSTA, A. G. et al. Measurement of volume of macaw palm fruit using traditional and the digital Moiré techniques. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 2, p. 152-157, 2016.

COSTA, R. M. **Proposta de um processo de captura e análise de imagens para determinação de forma e superfície de materiais biológicos pela técnica de moiré.** 2006. 35 p. Monografia (Graduação em Ciência da Computação)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

COSTA, R. M. et al. Sensitivity of the moiré technique for measuring biological surfaces. **Biosystems Engineering**, London, v. 100, p. 321-328, July 2008.

CURRENCE, H. D.; LOVELY, W. G. The analysis of soil surface roughness. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 13, p. 710-714, 1970.

DEXTER, A. R.; HEIN, D.; HEWITT, J. S. Macro-structure of the surface layer of a self-mulching clay in relation to cereal stubble management. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 2, p. 251-264, Sept. 1982.

DIRKX, J. J. J.; DECRAEMER, W. F. Automatic calibration method for phase shift shadow moiré interferometry. **Applied Optics**, Washington, v. 29, n. 10, p. 1474-76, Apr. 1990.

DIRKX, J. J. J.; DECRAEMER, W. F.; DIELIS, G. Phase shift method based on object translation for full field automatic 3-D surface reconstruction from moiré topograms. **Applied Optics**, Washington, v. 27, n. 6, p. 1164-1169, Mar. 1988.

FERNANDES, L. F. R. M. et al. Utilização da técnica de Moiré para detectar alterações posturais. **Revista Fisioterapia e Pesquisa**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 16-23, 2003.

GARCIA MORENO, R. Shadow analysis: a method for measuring soil surface roughness. **Geoderma**, Amsterdam, v. 146, p. 201-208, 2008.

GOMES, T. S. **Interferometria Speckle e Moiré geométrico aplicados à perfilometria de protótipos mecânicos.** 2005. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

GOMES, T. S. et al. Calibração da técnica de moiré aplicada a perfilometria de protótipos mecânicos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 2, p. 574-579, mar./abr. 2009.

HERTZ, H. et al. Construção de um protótipo para análise postural através da técnica de Moiré de sombra. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE BIOMECÂNICA, 11., 2005, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Ed. UFPB, 2005. p. 4.

INNS, F. M. **Agricultural tyres**. London: Dumlop, 1978. 69 p.

KELLER, T. A model for the prediction of the contact área and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyres parameters. **Byosystems Engineering**, London, v. 92, n. 1, p. 85-96, 2005.

LINO, A. C. L. **Técnica óptica de Moiré visando a aplicação no estudo de superfícies irregulares**. 2002. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

LINO, A. C. L.; DAL FABBRO, I. M. Determinação da topografia de uma fruta pela técnica de Moiré de sombra com multiplicação de franjas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 1, p. 119-125, jan./fev. 2004.

LINO, A. C. L. et al. Uso do software scilab para avaliar a mobilização do contato pneu-solo através de modelos digitais topográficos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 8., 2011, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: Ed. UFSC, 2011. Disponível em:<<http://www.gse.ufsc.br/sbiagro/>>. Acesso em: 26 mar. 2013.

MAZZETI FILHO, V. **Utilização da interferometria de Moiré no estudo de tensões dinâmicas em discos flexíveis**. 2004. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

MCKENZIE, B. et al. Moiré as a novel approach to quantify soil compaction. **NJF Report**, Helsinki, v. 8, n. 1, p. 109-112, Mar. 2012.

MCKENZIE, B. M. et al. Moiré as a low-cost, robust, optical-technique to quantify soil surface condition. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 158, p. 147-155, 2015.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo: EPU, 1980. v. 1, 289 p.

ONUMA, K.; NAKAMURA, T.; KUWASHIMA, S. Development of a new real-time phase shift interferometry for the investigation of crystal growth kinetics. **Journal of Crystal Growth**, Washington, v. 167, p. 387-390, 1996.

ORTIZ-CANAVATE, J.; HERNANZ, J. L. **Técnica de la mecanización agraria**. 3. ed. Madrid: Mundi, 1989. 641 p.

SCIAMMARELLA, C. A. The Moiré method: a review. **Experimental Mechanics**, Brookfield, v. 44, n. 8, p. 418-433, 1982.

SILVA, E. **Desenvolvimento e validação de um modelo matemático para o cálculo da área superficial de frangos de corte**. 2007. 59 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

SILVA, G. C. A. et al. Recuperação da topografia de ovos por meio da técnica de moiré e calibração independente. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 2, p. 211-218, abr. 2011.

SILVA, R. B. et al. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p. 973-983, nov./dez. 2003.

SOANE, B. D. et al. Compaction by agricultural vehicles: a review II: compaction under tyres and other running gear. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 1, p. 373-400, 1981.

SOILLE, P. Morphological phase unwrapping. **Optical and Lasers in Engineering**, London, v. 32, p. 339-352, Jan. 2000.

STEPHAN, S. **Landmark correspondences**. 2008. Disponível em: <http://imagej.net/Landmark_Correspondences>. Acesso em: 26 out. 2016.

SU, X.; CHEN, W. Fourier transform profilometry: a review. **Optical and Lasers in Engineering**, London, v. 35, p. 263-284, 2001.

VIAN, C.; ANDRADE JÚNIOR, A. **Evolução histórica da indústria de máquinas agrícolas no mundo: origens e tendências**. Campo Grande: Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 2010. 19 p.

WANG, Y. **Shadow Moiré sensitivity increase by fringe shifting: phase-stepping**. 2001. Disponível em: <<http://www.warpfinder.com/phase.html>>. Acesso em: 14 nov. 2016.

ANEXOS

Anexo 1- Resultados dos experimentos – Etapa de campo

A – Comparativo entre as técnicas – Parcela 01

Na Figura 1A está representada a correlação entre as três técnicas na primeira parcela.

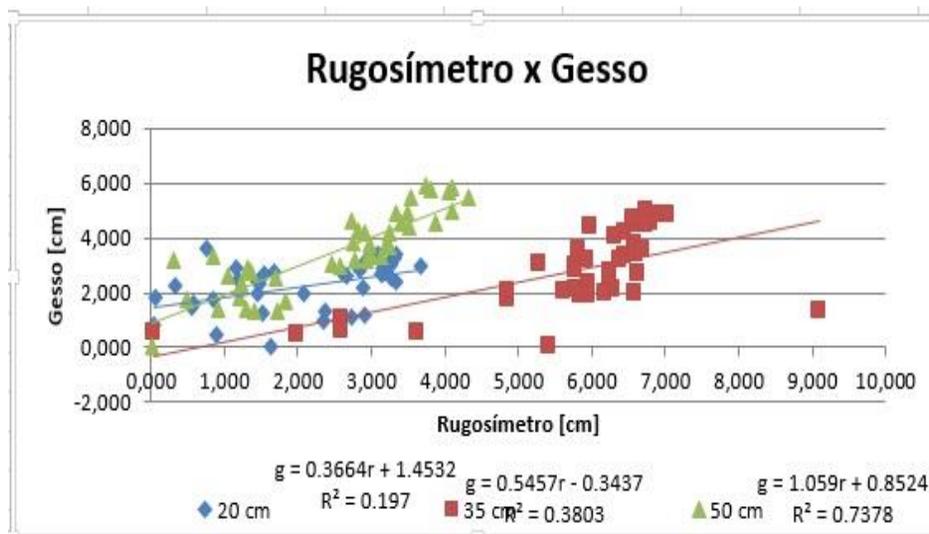


Figura 1A Correlação entre as técnicas na primeira parcela em que as siglas “g” e “r” representam os valores retornados pelas técnicas do gesso e do rugosímetro de varetas, e R^2 , a correlação de Pearson
Fonte: Do autor (2016).

Percebe-se que, na posição de 50 cm, a correlação apresentou o maior valor, de 0,7378 e, nas posições de 20 cm e 35 cm, valores de 0,197 e 0,3808, apontando, assim, instabilidade nas diferentes posições ao longo da parcela.

B – Comparativo entre as técnicas – Parcela 02

Na Figura 1B apresenta-se a correlação entre as três técnicas na segunda parcela.

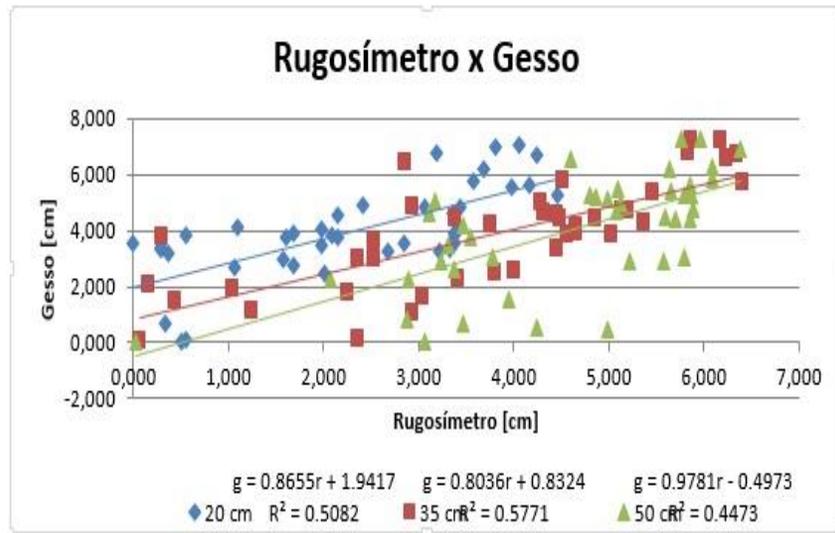


Figura 1B Correlação entre as técnicas na segunda parcela, em que as siglas “g” e “r” representam os valores retornados pelas técnicas do gesso e do rugosímetro de varetas, e R^2 , a correlação de Pearson
Fonte: Do autor (2016).

Observa-se que, na posição de 50 cm, a correlação apresentou o menor valor, de 0,4473 e, nas posições de 20 cm e 35 cm, valores de 0,5082 e 0,5771, apontando, assim, novamente, instabilidade nas diferentes posições ao longo da parcela.

C– Comparativo entre as técnicas – Parcela 04

Na Figura 1C apresenta-se a correlação entre as três técnicas na quarta parcela.

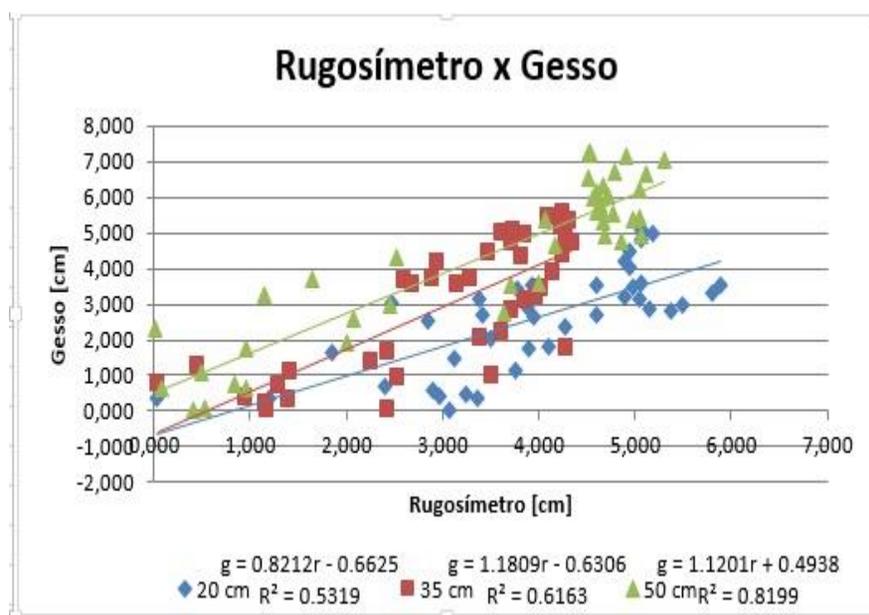


Figura 1C Correlação entre as técnicas na quarta parcela, em que as siglas “g” e “r” representam os valores retornados pelas técnicas do gesso e do rugosímetro de varetas, e R^2 , a correlação de Pearson
Fonte: Do autor (2016).

Avaliou-se que, na posição de 50 cm, a correlação apresentou o maior valor, de 0,8199 e, nas posições de 20 cm e 35 cm, valores de 0,5319 e 0,6163, apontando, assim, novamente, instabilidade nas diferentes posições ao longo da parcela. Os resultados para essa parcela foram satisfatórios.

D – Comparativo entre as técnicas – Parcela 04

Na Figura 1D apresenta-se a correlação entre as três técnicas na quinta parcela.

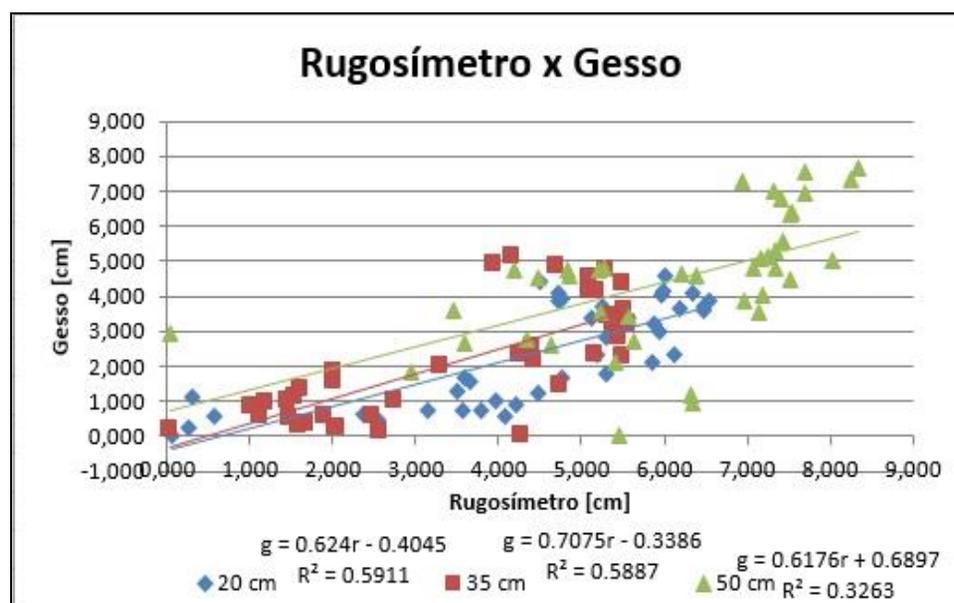


Figura 1D Correlação entre as técnicas na quinta parcela, em que as siglas “g” e “r” representam os valores retornados pelas técnicas do gesso e do rugosímetro de varetas, e R^2 , a correlação de Pearson
Fonte: Do autor (2016).

Analisou-se que, na posição de 50 cm, a correlação apresentou o menor valor, de 0,3263 e, nas posições de 20 cm e 35 cm, valores de 0,5911 e 0,5887, apontando, assim, novamente, instabilidade nas diferentes posições ao longo da parcela. Os resultados para essa parcela não foram satisfatórios.

Anexo II– Calibração da semiesfera de isopor

Procedimentos:

- a. deve-se retirar informações das dimensões, em pixels, do gráfico gerado no ImageJ;
- b. por meio de uma simples regra de três, encontrou-se a nova dimensão da imagem agora ajustada em (mm);
- c. a imagem será redimensionada com as medidas ajustadas;
- d. introduz-se no Matlab a imagem, de forma a corrigir a posição no eixo x, com o seguinte comando:

```
a=imread('C:\Users\diego\Desktop\Novapasta\o22.tif');  
>> b = (46/255)*a;  
>> b=double(b);  
>>mesh(b)
```

- Agora, tem-se a imagem, gerada em milímetros, em 3D.

Dimensões da calota:

Diâmetro= 125 mm = 280 pixels

Espessura= 39 mm = 255 pixels

Anexo III - Algoritmo com a utilização do *phase shift*

```

stacksize(4e7);
chdir('C:\Moiré');

//*****Ler imagens das grades*****

Grade1 = gray_imread('ImagemFase0.tif');
Grade2 = gray_imread('ImagemFase8.tif');
Grade3 = gray_imread('ImagemFase16.tif');
Grade4 = gray_imread('ImagemFase24.tif');

//*****
*****
*****

Objeto11 = gray_imread('ImagemSoloDeformado.tif'); // imagem com
grades

//Subtrair imagem do objeto das imagens das grades
s1 = abs(Objeto11-Grade1);
s2 = abs(Objeto11-Grade2);
s3 = abs(Objeto11-Grade3);
s4 = abs(Objeto11-Grade4);

//Remover grades : Filtro Gaussiano
Moire1 = gsm2d(s1,42);
Moire2 = gsm2d(s2,42);
Moire3 = gsm2d(s3,42);
Moire4 = gsm2d(s4,42);

```

Face1

```

//Criar uma imagem para cada filtro gaussiano
imwrite(Moire1,'Moire1.jpg');
imwrite(Moire2,'Moire2.jpg');
imwrite(Moire3,'Moire3.jpg');
imwrite(Moire4,'Moire4.jpg');
//Gerar 3D de uma face
a = imphase('bucket4a',0,Moire1,Moire2,Moire3,Moire4);
Empacotada = normal(a); //Phase shifting
Topo = unwrapl(Empacotada);
Topo_normal = 255*normal(Topo); //tava normalizada mas multiplicou
por 255 tons de cinza
//Topo_normal = Topo;
Topo_normal = gsm2d(Topo_normal,20); //Suavização Gaussiana
- remover ruídos
filtro = mkfilter('circular-mean',15); //Remove ruídos
//Topo_normal = imconv(Topo_normal, filtro);
//Topo_normal = Corte1.*Topo_normal;
//X=57.2*Topo_normal(1,:);
//Y=39.796*Topo_normal(2,:);
//Z=77.428*Topo_normal(3,:);
imwrite(normal(Topo_normal),'objeto_recuperado.bmp');
//Invertendo a imagem
Topo_normal=Topo_normal - (min(Topo_normal));
Topo_normal= (Topo_normal / max(Topo_normal))*255;
//savematfile ('Z.txt', '-ascii', 'Topo_normal(:,:)');
xset("window",2);
xbase();xselect();plot3d1(1:3:size(Topo_normal,'r'),1:3:size(Topo_normal,'c'),To
po_normal(1:3:$,1:3:$));

```

Anexo IV – Algoritmo para ajuste das constantes (K) no software Octave

```
data=load('rep4.txt');
d20=data(:,1);
m20=data(:,2);
r20=data(:,3);
g20=data(:,4);
d35=data(:,5);
m35=data(:,6);
r35=data(:,7);
g35=data(:,8);
d50=data(:,9);
m50=data(:,10);
r50=data(:,11);
g50=data(:,12);
%% 20 - 35-50
M=[[m20;m35;m50],[ones(size(m20));ones(size(m35));ones(size(m50))]];
G=[g20;g35;g50];
R=[r20;r35;r50];
%% 35-50
% M=[[m35;m50],[ones(size(m35));ones(size(m50))]];
% G=[g35;g50];
```

```
% R=[r35;r50];  
  
K=inv(M'*M)*M'*(G+R)/2  
  
str=sprintf('Moire: [%f %f]',K(1),K(2));  
  
figure(1);  
  
plot(d20,r20,'-s',d20,g20,'-s',d20,m20*K(1)+K(2),'-o');  
  
legend('Rugosimetro','Gesso',str)  
  
print('rep4col20.png','-dpng')  
  
figure(2);  
  
plot(d35,r35,'-s',d35,g35,'-s',d35,m35*K(1)+K(2),'-o');  
  
legend('Rugosimetro','Gesso',str)  
  
print('rep4col35.png','-dpng')  
  
figure(3);  
  
plot(d50,r50,'-s',d50,g50,'-s',d50,m50*K(1)+K(2),'-o');  
  
legend('Rugosimetro','Gesso',str)  
  
print('rep4col50.png','-dpng')
```

Anexo V – Artigos

A – Artigo Publicado

Soil & Tillage Research 158 (2016) 147–155



Contents lists available at ScienceDirect

Soil & Tillage Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/still



Moiré as a low-cost, robust, optical-technique to quantify soil surface condition



Blair M. McKenzie^{a, *}, Roberto A. Braga^b, Diego E.C. Coelho^b, Magdalena Krol^a,
Graham W. Horgan^c

^aThe James Hutton Institute, Invergowrie, Dundee DD2 5DA, UK

^bUniversity Federal Lavras, Department of Engineering, Lavras, MG Brazil

^cBiomathematics & Statistics Scotland, BiosS office, Rowett Institute of Nutrition and Health at the University of Aberdeen, Bucksburn, Aberdeen AB21 3SR, UK

B - Artigo Submetido

**DIGITALIZAÇÃO DE DEFORMAÇÕES FÍSICAS DO SOLO POR
MEIO DE UMA CÂMERA DIGITAL**

Diego Eduardo Costa Coelho¹, Roberto Alves Braga Jr¹

Revista: Ciência e Agrotecnologia - UFLA

