



**MARCOS ANTONIO ZAMBILLO PALMA**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE  
PONTEIRAS UTILIZADAS EM HASTES  
SULCADORAS DE SEMEADORAS PARA  
PLANTIO DIRETO**

**LAVRAS - MG**

**2013**

**MARCOS ANTONIO ZAMBILLO PALMA**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PONTEIRAS UTILIZADAS  
EM HASTES SULCADORAS DE SEMEADORAS PARA PLANTIO  
DIRETO**

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. Carlos Eduardo Silva Volpato

**LAVRAS - MG**

**2013**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e  
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Palma, Marcos Antonio Zambillo.

Desenvolvimento e avaliação de ponteiras utilizadas em hastes  
sulcadoras de semeadoras para plantio direto / Marcos Antonio  
Zambillo Palma. – Lavras : UFLA, 2013.

112 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Carlos Eduardo Silva Volpato.

Bibliografia.

1. Projeto de máquinas. 2. Ponteiras de hastes sulcadoras. 3.  
Semeadura direta. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.53

**MARCOS ANTONIO ZAMBILLO PALMA**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PONTEIRAS UTILIZADAS  
EM HASTES SULCADORAS DE SEMEADORAS PARA PLANTIO  
DIRETO**

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 15 de agosto de 2013

Dr. Flávio Castro da Silva	UFF
Dr. Jackson Antônio Barbosa	UFLA
Dr. Nilson Salvador	UFLA
Dr. Antônio Donizette de Oliveira	UFLA

Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato  
Orientador

**LAVRAS - MG**

**2013**

Aos meus pais Jose Eloi Palma e Lourdes Zambillo Palma e à minha irmã  
Luciana Zambillo Palma.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pelas oportunidades e por sua eterna proteção.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Engenharia e aos Professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pelos valiosos ensinamentos e acolhida para realizar o curso.

À CAPES, pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato pelo profissionalismo com que me orientou, confiança e incentivo.

Ao Prof. Dr. Jackson Antônio Barbosa pela valiosa co-orientação na realização dos trabalhos.

Ao Prof. Me. Tomás de Aquino Ferreira, pelas constantes orientações, ensinamentos e apoio na realização do trabalho.

Ao grande amigo Prof. Dr. Flávio Castro da Silva pelo incentivo e apoio na realização do trabalho.

Aos amigos e companheiros de trabalho Murilo Machado de Barros, João Paulo Barreto Cunha, Vanderson Rabelo, Jacqueline Cardoso Ferreira e Felipe Gabriel Lorenzoni Martins.

À minha família que, mesmo distante, esteve sempre presente, dando-me força espiritual, confiança, compreensão e paciência.

À minha namorada, Clarice Steffens pelo companheirismo, paciência e incentivo.

A todos que, de diferentes formas, contribuíram para este trabalho, meu singelo agradecimento.

## RESUMO

Em um cenário mundial, caracterizado pela crescente demanda por alimentos, bem como a preocupação com os impactos ambientais associados aos diversos processos produtivos, a viabilidade econômica e a própria sustentabilidade dos sistemas de cultivo ficam na dependência de diversos fatores, entre eles a utilização mais eficiente das máquinas agrícolas. Portanto, são fundamentais os estudos na otimização da tecnologia utilizada atualmente, principalmente, em elementos fundamentais, como as ponteiras das hastas sulcadoras, que interferem diretamente na demanda de força de tração da semeadora adubadora e na produtividade das culturas, em virtude da qualidade física do solo no sulco de semeadura. O trabalho foi realizado com o objetivo do desenvolvimento de três protótipos de ponteiras e avaliação, comparando um modelo comercial, em duas profundidades. Na avaliação, considerou-se a demanda de tração da haste sulcadora, a demanda de potência, a profundidade de atuação, a área mobilizada de solo, a força específica, a potência específica e a porosidade das laterais do sulco de semeadura. Utilizou-se delineamento experimental de blocos ao acaso com 8 tratamentos (4x2) e três repetições. Com a realização do trabalho concluiu-se que a geometria de ataque da ponteira tem influência na demanda de tração, na demanda de potência, na profundidade de atuação e na área de solo mobilizada. A porosidade do solo, nas laterais do sulco de semeadura, não foi alterada pela utilização de diferentes geometrias de ponteiras. Dentre os modelos desenvolvidos o B apresentou resultados favoráveis em relação à demanda de tração, de potência e a área de solo mobilizada.

Palavras-chave: Projeto de máquinas. Ponteiras de hastas sulcadoras. Semeadura direta.

## **ABSTRACT**

In a global scenario, characterized by the increasing demand for food, as well as the concern with environmental impacts associated with the various productive processes, economic viability and the sustainability of the cultivating systems are dependent of many factors, including the more efficient use of agricultural machinery. Therefore, studies in optimizing the technology used today are essential, especially in key elements such as the tips of the furrow-openers, which directly affect the demand for traction power of the seeder and fertilizer, and in crop productivity due to the physical quality of the soil in the planting furrow. This study aimed at developing three tip prototypes and evaluating, comparing a commercial model, at two depths. In the evaluation, we considered the traction demand of the furrow-opener, the power demand, the depth of operation, the area of mobilized soil, specific strength and the porosity of the lateral sowing furrows. We used a randomized block design with eight treatments (4x2) and three replicates. With the completion of this work, we concluded that the tip's geometry of attack influences the traction demand, the power demand, the depth of operation and the area of mobilized soil. The soil porosity at the sides of the furrow was not altered by using different pointer geometries. Among the developed models, model B presented favorable results regarding traction and power demands and the mobilized soil area.

**Keywords:** Machine design. Furrow-opener rod tips. No-tillage.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Envoltória de cisalhamento.....	25
Figura 2	Geometria básica das ponteiras de hastes sulcadoras.....	28
Figura 3	Representação da haste sulcadora atuando em maior profundidade.....	29
Figura 4	Representação teórica do plano de ruptura e da zona de adensamento inferior .....	29
Figura 5	Efeito do aumento de profundidade em dois modelos de hastes sulcadoras .....	30
Figura 6	Fendas criadas abaixo da profundidade crítica.....	31
Figura 7	(A) Haste e ponteira A; (B) Detalhe da ponteira A .....	37
Figura 8	Detalhes das dimensões da ponteira A.....	37
Figura 9	(A) Haste e ponteira B; (B) Detalhe da ponteira B.....	38
Figura 10	Detalhes das dimensões da ponteira B .....	38
Figura 11	(A) Haste e ponteira C; (B) Detalhe da ponteira C.....	39
Figura 12	Detalhes das dimensões da ponteira C .....	39
Figura 13	(A) Haste e ponteira D; (B) Detalhe da ponteira D .....	40
Figura 14	Detalhes das dimensões da ponteira D .....	40
Figura 15	Delineamento experimental (cotas em m).....	41
Figura 16	Haste padrão utilizada na simulação com detalhes de fixação e de aplicação de cargas .....	42
Figura 17	(A) Detalhe de fixação e (B) detalhes da aplicação de forças.....	43
Figura 18	Malha gerada na haste para simulação .....	43
Figura 19	Superfície preparada para colagem dos extensômetros.....	44
Figura 20	Marcação para colagem dos extensômetros .....	45
Figura 21	Detalhes dos extensômetros colados .....	45
Figura 22	Detalhe da instrumentação da haste sulcadora.....	46

Figura 23	Sistema de condicionamento e armazenamento de sinais .....	46
Figura 24	Calibração da célula de carga.....	47
Figura 25	Detalhes da montagem do sistema de aquisição de dados .....	48
Figura 26	Nobreak utilizado para ajustar a tensão.....	48
Figura 27	Inclinômetro digital utilizado para conferir o ângulo de ataque .....	50
Figura 28	Coletas de amostras de solo indeformadas com trado Uhland.....	52
Figura 29	Amostras de solo para determinação da umidade.....	53
Figura 30	Mensuração da resistência do solo à penetração.....	54
Figura 31	A e B Coletas das amostras indeformadas para ensaio de cisalhamento .....	55
Figura 32	Prensa de cisalhamento direto.....	56
Figura 33	Representação esquemática do ensaio de cisalhamento direto .....	56
Figura 34	Amostra deformada pelo ensaio de cisalhamento direto.....	57
Figura 35	(A) Coleta da amostra indeformada; (B) amostra coletada e condicionada.....	58
Figura 36	Consolidômetro da marca Boart Longyear® .....	58
Figura 37	Perfilômetro desenvolvido .....	59
Figura 38	Preparo da amostra indeformada da parede lateral do sulco .....	60
Figura 39	Fotografia das amostras indeformadas .....	61
Figura 40	A e B Indicação das linhas analisadas pela transformada de Walvelet.....	62
Figura 41	Trator utilizado no experimento.....	63
Figura 42	Semeadura adubadora utilizada no ensaio.....	64
Figura 43	A Fixação da haste sulcadora e B: Regulagem de pressão da mola .....	65
Figura 44	Resultado de tensão na peça obtido pela simulação .....	68

Figura 45	Representação da área mobilizada de solo em função da utilização das ponteiros com diferentes geometrias em duas profundidades.....	72
Figura 46	Limites de consistência do solo .....	77
Figura 47	Envoltórias de resistência ao cisalhamento para as áreas P1 e P2. ....	78
Figura 48	Envoltória de resistência ao cisalhamento para as profundidades P1 e P2 .....	79
Figura 49	Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B) .....	81
Figura 50	Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B).....	82
Figura 51	Níveis de cinza das análises horizontais.....	82
Figura 52	Níveis de cinza analisados na linha vertical.....	83
Figura 53	Espectro de Wavelets da linha vertical.....	83
Figura 54	Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B) .....	84
Figura 55	Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B).....	84
Figura 56	Níveis de cinza das análises horizontais.....	85
Figura 57	Níveis de cinza analisados na linha vertical.....	86
Figura 58	Espectro de Wavelets da linha vertical.....	86
Figura 59	Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B) .....	87
Figura 60	Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B).....	87
Figura 61	Níveis de cinza das análises horizontais.....	88
Figura 62	Níveis de cinza analisados na linha vertical.....	89

Figura 63	Espectro de Wavelets da linha vertical.....	89
Figura 64	Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B) .....	90
Figura 65	Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B).....	90
Figura 66	Níveis de cinza das análises horizontais.....	91
Figura 67	Níveis de cinza analisados na linha vertical.....	92
Figura 68	Espectro de Wavelets da linha vertical.....	92
Figura 69	Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B) .....	93
Figura 70	Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B).....	93
Figura 71	Níveis de cinza das análises horizontais.....	94
Figura 72	Níveis de cinza analisados na linha vertical.....	95
Figura 73	Espectro de Wavelets da linha vertical.....	95
Figura 74	Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B) .....	96
Figura 75	Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B).....	96
Figura 76	Níveis de cinza das análises horizontais.....	97
Figura 77	Níveis de cinza analisados na linha vertical.....	98
Figura 78	Espectro de Wavelets da linha vertical.....	98
Figura 79	Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B) .....	99
Figura 80	Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B).....	99
Figura 81	Níveis de cinza das análises horizontais.....	100
Figura 82	Níveis de cinza analisados na linha vertical.....	101

Figura 83	Espectro de Wavelets da linha vertical.....	101
Figura 84	Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B) .....	102
Figura 85	Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B).....	102
Figura 86	Níveis de cinza das análises horizontais.....	103
Figura 87	Níveis de cinza analisados na linha vertical.....	104
Figura 88	Espectro de Wavelets da linha vertical.....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Demanda de Força (kN) para tração da haste sulcadora equipada com diferentes ponteiros nas profundidades 1 e 2 .....	66
Tabela 2	Potência requerida na haste sulcadora .....	69
Tabela 3	Profundidade (mm) de trabalho das ponteiros das hastes sulcadoras nas profundidades 1 e 2.....	70
Tabela 4	Área mobilizada (mm <sup>2</sup> ) pelas ponteiros das hastes sulcadoras nas profundidades 1 e 2 .....	71
Tabela 5	Força específica (N mm <sup>-2</sup> ) da haste equipada com diferentes ponteiros em duas profundidades.....	73
Tabela 6	Demanda de potência por unidade de área mobilizada de solo (W mm <sup>-2</sup> ) .....	74
Tabela 7	Textura e densidade do solo .....	75
Tabela 8	Umidade, Densidade de Partículas e Resistência do Solo à Penetração .....	76
Tabela 9	Teste de significância entre as envoltórias de resistência ao cisalhamento das áreas P1 e P2.....	79
Tabela 10	Ângulo de atrito interno e coesão aparente .....	80
Tabela 11	Valores de Umidade (Umid.), Capacidade de suporte de carga (PPC), Índice de compressão (m), Densidade Inicial (Dsi), Altura dos Sólidos (Hs) e Índice de Vazios (ei) do solo da área experimental .....	80

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	19
<b>2.1</b>	<b>Sistema de semeadura direta</b> .....	19
<b>2.2</b>	<b>Parâmetros físicos do solo</b> .....	21
<b>2.2.1</b>	<b>Compactação do solo</b> .....	21
<b>2.2.2</b>	<b>Resistência do solo à penetração</b> .....	23
<b>2.3</b>	<b>Parâmetros mecânicos do solo</b> .....	24
<b>2.3.1</b>	<b>Cisalhamento do solo</b> .....	24
<b>2.3.2</b>	<b>Consistência do solo</b> .....	26
<b>2.4</b>	<b>Mecanismos de abertura de sulco tipo haste sulcadora</b> .....	28
<b>2.4.1</b>	<b>Sulco de Semeadura</b> .....	31
<b>2.4.2</b>	<b>Demanda de tração das hastes sulcadoras</b> .....	33
<b>2.4.2.1</b>	<b>Extensometria</b> .....	33
<b>2.4.2.2</b>	<b>Instrumentação de hastes sulcadoras</b> .....	34
<b>2.4.3</b>	<b>Área de solo mobilizada</b> .....	35
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	36
<b>3.1</b>	<b>Área experimental</b> .....	36
<b>3.2</b>	<b>Delineamento experimental</b> .....	36
<b>3.3</b>	<b>Mensuração da demanda de tração na haste sulcadora</b> .....	41
<b>3.3.1</b>	<b>Extensômetros</b> .....	42
<b>3.3.2</b>	<b>Simulação Matemática</b> .....	42
<b>3.3.3</b>	<b>Instrumentação da haste sulcadora</b> .....	44
<b>3.3.4</b>	<b>Condicionamento e armazenamento dos sinais</b> .....	46
<b>3.3.5</b>	<b>Calibração do sistema de mensuração de força na haste</b> .....	47
<b>3.3.6</b>	<b>Instalação do sistema de leitura de dados no conjunto trator semeadora</b> .....	47
<b>3.3.7</b>	<b>Força específica de tração na haste sulcadora</b> .....	49
<b>3.4</b>	<b>Demanda de potência pela haste sulcadora equipada com diferentes ponteiros</b> .....	49
<b>3.4.1</b>	<b>Demanda de potência por unidade de área de solo mobilizada</b> .....	49
<b>3.5</b>	<b>Aferição do ângulo de ataque das ponteiros</b> .....	50
<b>3.6</b>	<b>Caracterização do solo da área experimental</b> .....	50
<b>3.6.1</b>	<b>Textura do solo</b> .....	51
<b>3.6.2</b>	<b>Densidade de partículas</b> .....	51

<b>3.6.3</b>	<b>Densidade do solo</b> .....	51
<b>3.6.4</b>	<b>Umidade Gravimétrica</b> .....	52
<b>3.6.5</b>	<b>Limites de Consistência do solo</b> .....	53
<b>3.6.6</b>	<b>Resistência do solo a penetração</b> .....	54
<b>3.6.7</b>	<b>Parâmetros mecânicos do solo</b> .....	54
<b>3.6.7.1</b>	<b>Cisalhamento do solo</b> .....	55
<b>3.6.7.2</b>	<b>Compressão uniaxial</b> .....	57
<b>3.7</b>	<b>Área de solo mobilizada</b> .....	59
<b>3.8</b>	<b>Porosidade nas laterais do sulco de semeadura</b> .....	60
<b>3.8.1</b>	<b>Transformada de Wavelet</b> .....	62
<b>3.9</b>	<b>Máquinas utilizadas no ensaio</b> .....	63
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	66
<b>4.1</b>	<b>Demanda de força para tração da haste</b> .....	66
<b>4.1.1</b>	<b>Simulação matemática da aplicação de força na haste</b> .....	68
<b>4.2</b>	<b>Demanda de potência pela haste sulcadora equipada com diferentes ponteiros</b> .....	69
<b>4.3</b>	<b>Profundidade de atuação das ponteiros</b> .....	70
<b>4.4</b>	<b>Área mobilizada de solo</b> .....	71
<b>4.5</b>	<b>Força Específica</b> .....	72
<b>4.6</b>	<b>Demanda de potência por unidade de área de solo mobilizada</b> .....	73
<b>4.7</b>	<b>Caracterização do solo da área experimental</b> .....	74
<b>4.7.1</b>	<b>Textura e densidade do solo</b> .....	74
<b>4.7.2</b>	<b>Umidade, densidade de partículas e resistência do solo à penetração</b> .....	75
<b>4.7.3</b>	<b>Limites de consistência</b> .....	77
<b>4.7.4</b>	<b>Cisalhamento do solo</b> .....	77
<b>4.7.5</b>	<b>Compressão uniaxial</b> .....	80
<b>4.8</b>	<b>Porosidade das laterais do sulco de semeadura</b> .....	81
<b>4.8.1</b>	<b>Modelo A</b> .....	81
<b>4.8.1.1</b>	<b>Menor Profundidade (P1)</b> .....	81
<b>4.8.1.2</b>	<b>Maior Profundidade (P2)</b> .....	84
<b>4.8.2</b>	<b>Modelo B</b> .....	86
<b>4.8.2.1</b>	<b>Menor profundidade (P1)</b> .....	87
<b>4.8.2.2</b>	<b>Maior profundidade (P2)</b> .....	89
<b>4.8.3</b>	<b>Modelo C</b> .....	92
<b>4.8.3.1</b>	<b>Menor profundidade (P1)</b> .....	93
<b>4.8.3.2</b>	<b>Maior profundidade (P2)</b> .....	95



<b>4.8.4</b>	<b>Modelo D</b> .....	98
<b>4.8.4.1</b>	<b>Menor profundidade (P1)</b> .....	99
<b>4.8.4.2</b>	<b>Maior profundidade (P2)</b> .....	101
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	105
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	106

## 1 INTRODUÇÃO

Em um cenário mundial, caracterizado pela crescente demanda por alimentos, bem como a preocupação com os impactos ambientais associados aos diversos processos produtivos, a viabilidade econômica e a própria sustentabilidade dos sistemas de cultivo ficam na dependência de diversos fatores, entre eles a utilização mais eficiente das máquinas agrícolas. Portanto, são fundamentais os estudos na otimização da tecnologia utilizada atualmente, principalmente, em elementos fundamentais, como as ponteiras das hastes sulcadoras, que interferem diretamente na demanda de força de tração da semeadora adubadora e na produtividade das culturas.

A qualidade de semeadura depende de fatores como a qualidade dos insumos agrícolas utilizados, as dosagens, a época de semeadura e, dentre outros, o desempenho das máquinas utilizadas nesta operação. Sem prejudicar a qualidade, busca-se sempre a otimização do desempenho operacional das semeadoras-adubadoras, de forma a proporcionar maior área trabalhada por unidade de tempo e menor demanda energética.

A compactação do solo vem sendo apontada como um dos maiores problemas da semeadura direta, principalmente, em áreas onde é realizada a integração lavoura e pecuária, somando-se ao tráfego intensivo de máquinas. Deste modo, as semeadoras adubadoras necessitam, além de incorporar as sementes e os fertilizantes, proporcionar condições físicas do solo mais favoráveis ao desenvolvimento do sistema radicular das culturas.

Nos solos mais compactados, recomenda-se a utilização das hastes sulcadoras para realizar a adubação, porém a grande maioria delas apresenta as ponteiras em forma de cunha, resultando na menor demanda de força de tração. Porém ocasiona o aumento da resistência do solo à penetração das raízes nas laterais do sulco de semeadura, fenômeno este, também, conhecido como

espelhamento do solo. Minimizar a demanda de força para tração da haste, no projeto, não é a questão principal, visto que a qualidade do sulco é mais significativa, pois tem influência direta no rendimento da cultura.

Dessa forma, há grande necessidade de estudar e desenvolver ponteiros destinadas às hastes sulcadoras, levando em consideração a demanda de força de tração e a qualidade física do solo no sulco de semeadura.

O trabalho foi realizado com o objetivo do desenvolvimento de três protótipos de ponteiros e avaliação, comparando com um modelo comercial, em duas profundidades. Na avaliação, considerou-se a demanda de tração da haste sulcadora, a demanda de potência, a profundidade de atuação, a área mobilizada de solo, a força específica, a potência específica e a porosidade das laterais do sulco de semeadura.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Sistema de semeadura direta**

A Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2013) estima que o Brasil destinou, no ano agrícola 2011/2012, 50,86 milhões de hectares à implantação de culturas, sendo a semeadura direta o sistema mais empregado, principalmente, nas grandes áreas. Já, o plantio convencional é usado na abertura de novas áreas e em outras que estavam estabelecidas com pastagens. Entre os pequenos produtores, ainda se utiliza o sistema convencional, embora seja crescente a adoção da semeadura direta.

O sistema de semeadura direta é a melhor alternativa para reverter a situação de degradação gerada pelo cultivo convencional. Desde que seja adotado de modo correto, apresenta vantagens sobre os sistemas que revolvem o solo. Como vantagens, o sistema diminui a erosão, melhora os níveis de fertilidade do solo, principalmente de fósforo, mantém ou aumenta a matéria orgânica, proporciona redução dos custos de produção em virtude do menor desgaste de tratores e maior economia de combustível. Em razão da ausência das operações de preparo, permite a melhor racionalização no uso de máquinas, implementos e equipamentos, possibilitando que as diferentes culturas sejam implantadas nas épocas indicadas e, finalmente, proporciona estabilidade na produção e melhoria de vida do produtor rural e da sociedade (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA 2013).

De acordo com Six et al. (2002), a semeadura direta tem sido amplamente aprovada no Brasil e nos EUA, por causa da redução da erosão e da maior retenção de umidade, garantindo a melhor qualidade de solo. Também, há fatores ambientais contribuindo para a difusão, ainda maior, dessa técnica de cultivo. Segundo Amado et al. (2001), a utilização do sistema de semeadura

direta é uma eficiente alternativa ao sistema de cultivo convencional para acumular matéria orgânica no solo e contribuir para o sequestro do CO<sub>2</sub> atmosférico em solos agrícolas e, portanto, para a melhoria da qualidade ambiental.

De acordo com Mazurana et al. (2011), a introdução e intensificação no uso do sistema de semeadura direta no Brasil nas últimas décadas desenharam um novo cenário na agricultura brasileira, aumentando a preocupação com as características físicas dos solos. Dentre as principais, Klein et al. (2010) afirmam que a estrutura é um dos mais importantes fatores já que exerce influência direta na retenção de água no solo.

O sistema de semeadura direta, com uso de plantas de cobertura do solo, mostrou-se eficiente em manter atributos físicos em condições favoráveis ao desenvolvimento vegetal, após longo período de utilização, ao mesmo tempo em que melhorou atributos como a taxa de infiltração de água (LANZANOVA et al., 2010). Porém, a taxa de infiltração de água no solo, tanto inicial quanto final, é maior no preparo convencional, quando comparado ao sistema de semeadura direta (BERTOL et al., 2001).

No sistema de semeadura direta, a manutenção da cobertura vegetal é fundamental para manter as características físicas do solo favoráveis. Já, o solo mantido permanentemente descoberto, apresenta degradação física, expressa pelo aumento da densidade e resistência à penetração, redução da macroporosidade e da taxa de infiltração de água no solo (LANZANOVA et al., 2010).

A compactação tornou-se uma das principais causas de degradação do solo em áreas agrícolas, estando diretamente relacionada ao sistema de manejo do solo adotado e, muitas vezes, demandando práticas de descompactação para mitigar esse problema (DRESCHER et al., 2011).

Após cerca de 40 anos, desde o início da adoção da semeadura direta na região de clima subtropical úmido do Brasil, ainda se observam frustrações de safra motivadas por déficit hídrico em ocorrência de pequenos períodos sem chuva, até mesmo inferiores a 10 dias (DENARDIN et al., 2008). Esse problema está associado à acentuada estratificação do solo na camada de 0 a 20 cm (ARAUJO; TORMENA; SILVA, 2004; CAVALCANTE et al., 2007), o que limita o crescimento de raízes na camada superficial do solo e diminui a infiltração e o armazenamento de água.

## **2.2 Parâmetros físicos do solo**

Nos estudos que envolvem as relações entre máquinas e o solo existe a necessidade de adoção de critérios que possam avaliar, de forma correta, as condições a fim de caracterizá-lo.

### **2.2.1 Compactação do solo**

A compactação do solo, ocasionada pelo tráfego de máquinas e/ou a integração lavoura pecuária, pode diminuir a produção. Esse parâmetro físico do solo interfere na infiltração e armazenamento de água, no crescimento do sistema radicular das culturas e, também, na demanda de força de tração das ferramentas que realizam preparo do solo.

A porosidade e densidade do solo, por se constituírem em propriedades estreitamente relacionadas à compactação do solo e por serem sensíveis ao efeito de sistemas de manejo sobre a estrutura do solo, de fácil determinação e pouco influenciadas pelo teor de água no processo de coleta das amostras de solo, são

frequentemente empregadas como indicadores satisfatórios desse tipo de degradação do solo (DRESCHER et al., 2011).

Normalmente, a rotação de culturas é a melhor forma de prevenir ou diminuir a compactação do solo. Sistemas de rotação de culturas, envolvendo espécies com sistema radicular profundo vigoroso, como o do nabo forrageiro, do guandu, do tremoço, das crotalárias, da aveia preta, e do milheto, auxilia na descompactação do solo. Caso a rotação de culturas não resolva o problema, sugerem-se duas alternativas, desde que haja estrutura na propriedade. A primeira é a utilização de semeadoras que possuem sulcadores logo atrás dos discos de corte de palha, os quais ajudarão a romper a camada compactada na linha de semeadura. A segunda é a utilização de escarificadores, subsoladores ou arados, porém essas operações apresentam maiores custos ao agricultor (EMBRAPA 2013).

Nicoloso et al. (2008) observaram que o efeito da escarificação em um Latossolo de textura muito argilosa, em época de elevada precipitação, foi temporário, não constando melhoria nas condições físicas, nove meses após a operação, nem incremento na produtividade. Os maiores rendimentos de grãos de soja foram observados, quando realizada a implantação de nabo forrageiro e aveia preta consorciados, associada ao uso do escarificador.

De acordo com Freddi et al. (2007), que avaliaram seis níveis de compactação, proporcionados pelo tráfego controlado de tratores, verificou-se que valores de resistência à penetração, variando entre 1,03 e 5,69 MPa, provocaram alterações na morfologia do sistema radicular do milho, reduzindo a produtividade da cultura em 2,581 Mg ha<sup>-1</sup>, mas não foram impeditivos ao enraizamento.

### **2.2.2 Resistência do solo à penetração**

A resistência do solo à penetração é considerada a propriedade mais prática para expressar o grau de compactação do solo e, conseqüentemente, a facilidade que este oferece à penetração das raízes. Por isso, sua quantificação representa um importante indicativo da dinâmica de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas (SILVEIRA et al., 2010).

A umidade do solo apresenta maior influência sobre a resistência do solo à penetração, principalmente, nos solos com estrutura degradada, sendo uma das estratégias manter o solo úmido para proporcionar a manutenção da resistência do solo à penetração abaixo do limite restritivo ao crescimento e desenvolvimento das plantas (BLAINSKI et al., 2008).

Os maiores valores de resistência do solo à penetração proporcionam maior demanda de tração nas hastes sulcadoras da semeadora adubadora (CONTE et al., 2007), principalmente, quando as ponteiros atuam na camada de solo mais compactada (PALMA et al., 2010).

A resistência do solo à penetração tem sido utilizada, ao longo de muitos anos, com inúmeras aplicações em diversas áreas da pesquisa agrônômica, sendo várias já consolidadas, tais como: detecção de camadas compactadas, em estudo da ação de ferramentas de máquinas no solo, prevenção de impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, predição da força de tração necessária para execução de trabalhos e para conhecimento de processos de umedecimento e de ressecamento (CUNHA; VIEIRA; MAGALHÃES, 2002).



## 2.3 Parâmetros mecânicos do solo

A dinâmica da máquina e o solo envolve conhecimentos mecânicos, vinculados à máquina agrícola, e conhecimentos de comportamento do solo. Esses conhecimentos devem ser analisados conjuntamente, visto que possuem grande interação.

### 2.3.1 Cisalhamento do solo

De acordo com Reichert et al. (2010), a resistência de um solo ao cisalhamento é a resistência interna por área, que o solo pode oferecer, para resistir a rupturas e a deslizamentos ao longo de um plano. O Autor, também, destaca que se uma tensão cisalhante em um corpo de solo excede determinado valor crítico de resistência, o solo se rompe. Dependendo das condições de suporte do solo e da carga, essa falha pode causar um deslizamento, o colapso de uma parede ou afundamento de uma base.

A resistência ao cisalhamento de um solo é a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura ocorre (ROCHA, 2003). Pode ser expressa pela equação de Coulomb (Equação 1).

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg}\varphi \quad (1)$$

em que:

$\tau$  é a máxima pressão cisalhante suportada pelo solo;

$\sigma_n$  é a tensão normal a que a superfície de ruptura está submetida;

$c$  é o intercepto de coesão ou coesão aparente do solo e,

$\phi$  é o ângulo de atrito interno do solo, definido como sendo o ângulo que a força normal faz com a resultante das forças que o maciço terroso está submetido.

Essa equação define a envoltória de resistência, que é a linha limite de resistência dos solos, ou seja, qualquer pressão cisalhante que esteja acima dessa linha promoverá a ruptura do solo (ROCHA, 2003) conforme Figura 1.

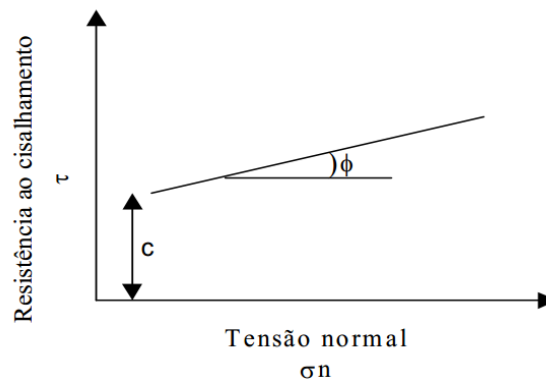


Figura 1 Envoltória de cisalhamento

Fonte: Pires (2012)

A tensão de cisalhamento do solo foi eficiente, para avaliar as alterações da estrutura do solo em campos cultivados com cana de açúcar, no Estado de São Paulo, evidenciando que essas propriedades dinâmicas do solo podem ser utilizados como indicadores de impactos (compactação) sobre a estrutura do solo (SILVA et al., 2009).

### 2.3.2 Consistência do solo

Atterberg foi quem introduziu os conceitos de limite de plasticidade, limite de liquidez e índice de plasticidade (VASCONCELOS et al., 2010). É relacionada com a força de atração entre partículas individuais ou entre agregados dessas partículas, sendo mais fácil perceber a consistência do que descrevê-la quantitativamente. A consistência varia com o conteúdo de água, textura, matéria orgânica, quantidade e natureza do material coloidal e o tipo de cátion adsorvido.

De acordo com Reichert et al. (2010), a consistência do solo refere-se às manifestações das forças físicas de coesão, entre partículas do solo e de adesão, entre as partículas e outros materiais, conforme variação do conteúdo de água.

Ainda, Reichert et al. (2010) destacam que, por ser resultado da atração molecular e da tensão superficial, a consistência apresenta dois pontos de máxima e dois pontos de mínima, em função do conteúdo de água, sendo elevada no extremo no solo seco, em decorrência da coesão, e, novamente em solo úmido, por causa da adesão. A consistência é mínima em solo muito molhado e saturado. Essas relações são significativas apenas para solos com teor de argila suficiente para permitir que a atração molecular seja efetiva. A atração molecular de areia e silte é pouco significativa.

Para Caputo (2000), uma pequena porcentagem de matéria orgânica pode aumentar o limite de plasticidade, sem, necessariamente, elevar simultaneamente o limite de liquidez.

Um solo argiloso com baixa umidade apresenta-se duro e muito coeso, em razão de um efeito cimentante entre as partículas secas. Nessas condições, caso venha a ser mobilizado mecanicamente, haverá a formação de blocos grandes de solo, deixando-o numa condição desfavorável para o preparo periódico secundário e, provavelmente, exigindo maior número de operações de

gradagens. No caso de o solo encontrar-se muito úmido, sua massa apresentará característica de plasticidade, isto é, a capacidade de não recuperar sua forma original ao cessar a ação da força externa deformante e, também, uma forte característica de pegajosidade. A zona de consistência friável representa a faixa ótima para a mobilização mecânica, e a friabilidade será avaliada pela facilidade de esboroamento da massa de solo quando submetido a pressões provocadas pelos órgãos ativos dos implementos agrícolas (CORRÊA, 1982).

As atividades agrícolas devem ser realizadas com o solo no estado de friabilidade, que corresponde à faixa de umidade entre os limites de contração e plasticidade. Neste estado, o solo está úmido, demonstrando as condições ideais de preparo do solo sendo a faixa de friabilidade definida como a faixa de trabalhabilidade do solo (HILLEL, 1980).

A matéria orgânica presente no solo aumenta a faixa de friabilidade, isto é, a faixa que compreende o limite de contração e plasticidade, que corresponde à umidade ideal para o preparo do solo (SILVA; CABEDA; CARVALHO, 2006). Alterações nos limites de consistência do solo, em razão das modificações nos teores de carbono orgânico, também, foram observadas por outros autores (OLIVEIRA et al., 2010; VASCONCELOS et al., 2010), ao constatarem que o aumento da matéria orgânica tende a aumentar a área superficial específica do solo, o que proporciona maior retenção de água, levando-o a ter maiores valores para os limites de plasticidade do solo. Assim, os solos cultivados podem ter sua faixa de friabilidade reduzida, em decorrência da baixa na concentração de matéria orgânica, contribuindo para o aumento da compactação (TAVARES et al., 2012).

## 2.4 Mecanismos de abertura de sulco tipo haste sulcadora

De acordo com Godwin (2007), existem duas variáveis mais importantes na concepção e seleção da geometria das ponteiros, tanto para subsoladores e escarificadores como para própria semeadora adubadora. Essas variáveis, representadas na Figura 2, são denominadas ângulo de inclinação, também conhecidas como ângulo de ataque, e a relação profundidade de trabalho e largura da ponteira.

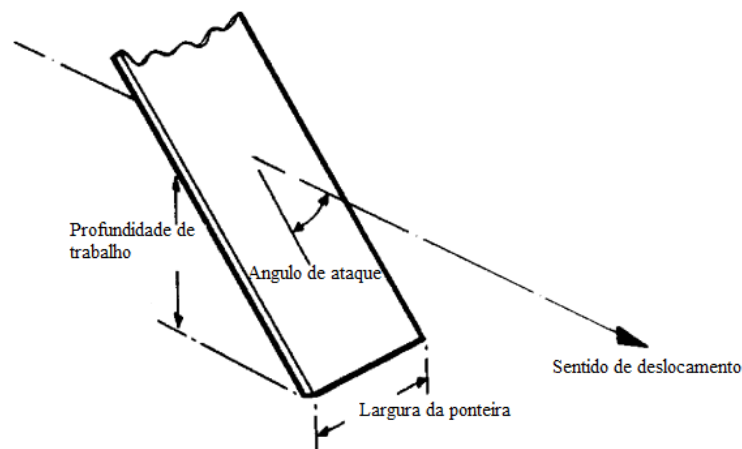


Figura 2 Geometria básica das ponteiros de hastes sulcadoras.

Fonte: Adaptado de Godwin (2007)

Destaca-se que, ao trabalhar em profundidades maiores, ocorre a ruptura do solo apenas na camada mais superficial, caracterizando a profundidade crítica de atuação das hastes sulcadoras. Para profundidades superiores a crítica ocorre apenas o adensamento nas laterais do sulco, conforme as Figuras 3 e 4.

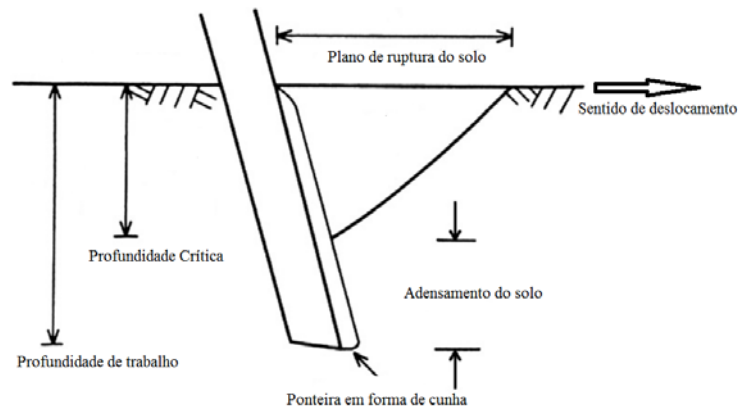


Figura 3 Representação da haste sulcadora atuando em maior profundidade

Fonte: Adaptado de Godwin e Spoor (1977)

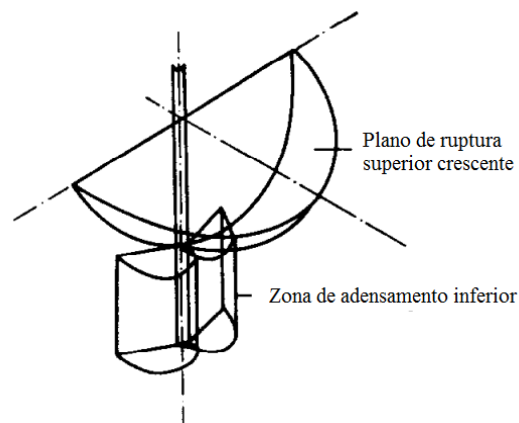


Figura 4 Representação teórica do plano de ruptura e da zona de adensamento inferior

Fonte: Adaptado de Godwin e Spoor (1977)

Observações em todos os experimentos de campo feitos por Spoor e Godwin (1978) demonstram que a profundidade crítica das hastes, com largura de ponteira de 65 mm, varia de 300 a 400 mm, equivalendo a uma relação entre a profundidade/largura da ponteira de 5 a 7. Conforme os autores, a

profundidade crítica diminui, quando o solo se encontra mais plástico ou quando a superfície é excepcionalmente seca e coesa, e, em profundidade, o solo é mais úmido.

Em profundidades menores que a crítica (Figura 5), o solo é movimentado para frente, para os lados e para cima (ruptura crescente), rompendo-se ao longo de planos de ruptura bem definidos, originando-se do centro da ponteira em direção a superfície em ângulos de aproximadamente  $45^\circ$  com a horizontal (SPOOR; GODWIN, 1978).

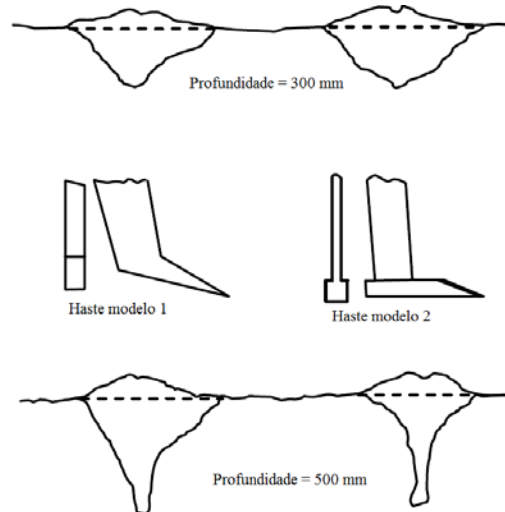


Figura 5 Efeito do aumento de profundidade em dois modelos de hastes sulcadoras

Fonte: Adaptado de Spoor e Godwin (1978)

Quando a haste sulcadora trabalha em profundidade além da crítica, ocorre o rompimento apenas das camadas mais superficiais resultando no adensamento lateral do sulco (Figura 4). Além disso, ocorre, também, a criação de fendas nas laterais do sulco (Figura 6) que favorecem a infiltração da água segundo Godwin, Spoor e Leeds-Harrison (1981). Os autores, também,

destacam que esse fator é mais bem observado em hastes que trabalham com ângulo de 90° em relação ao deslocamento.

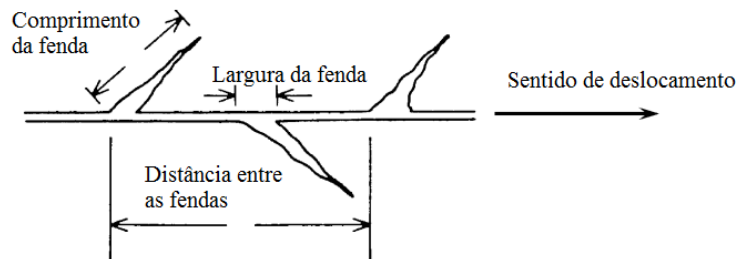


Figura 6 Fendas criadas abaixo da profundidade crítica

Segundo Godwin (2007), minimizar a força de tração da haste no projeto não é a questão principal, pois a qualidade do sulco é mais significativa visto que tem influência direta na produtividade da cultura.

Embora existam informações a respeito do ângulo de ataque, da profundidade de atuação e da largura das ponteiras das hastes, há uma carência de informações a respeito da geometria de ataque da ferramenta no solo.

#### 2.4.1 Sulco de Semeadura

No sistema de semeadura direta, as semeadoras são equipadas com hastes e/ou discos. Porém, podem ser equipadas apenas com discos uma vez que a haste é mais indicada para solos mais compactados. Nos projetos atuais a haste é utilizada para a incorporação do fertilizante e a semente, incorporada por discos duplos.

No mercado existem diversos mecanismos responsáveis pela abertura de sulcos. Yao et al. (2009) analisaram três desses mecanismos em lavouras de trigo em sucessão à cultura do milho no norte da China. No estudo concluíram



que o disco simples apresentou 6 a 9% menos emergência de plantas, o que pode estar relacionado à maior resistência do solo à penetração e a maiores níveis de cobertura vegetal. Os autores, também, destacaram que o mecanismo de abertura do sulco tem influência direta no rendimento da cultura, principalmente, em regiões onde se implanta uma cultura de inverno e outra de verão, na mesma área, típico da região sul e sudeste do Brasil e em áreas irrigadas.

No sistema de cultivo com semeadura direta, o sulco de semeadura desempenha um papel importante na germinação. Muitos autores têm apontado que existem fatores mais importantes que regulam a germinação tais como o potencial matricial do solo, a temperatura (LINDSTROM; PAPENDICK; KOEHLER, 1976; SCHNEIDER; GUPTA, 1985) e a profundidade de semeadura (ALESSI; POWER, 1971). Esses fatores são afetados diretamente pelo mecanismo de interação ferramenta-solo (TESSIER et al., 1991a).

A haste promove uma interessante descompactação da camada superficial de solo no sulco de semeadura, promovendo um deslocamento de agregados do fundo do sulco para a superfície (DARMORA; PANDEY, 1995). Mas, a utilização da haste sulcadora pode ser negativa, quando ocorre um período sem chuva, pois a perda da umidade se torna acelerada, em decorrência da maior movimentação e exposição do solo (CHAUDHURI, 2001). O sulcador tipo disco duplo apresenta uma perda de água mais acentuada na camada de solo sobre a semente do que o abridor tipo haste, porém em virtude da menor movimentação de solo a perda de água se torna menor (TESSIER et al., 1991b).

Klein e Boller (1995), avaliando a resposta da cultura do milho em diferentes manejos (semeadura direta, preparo do solo com arado de discos + grade de discos, ou com escarificação + grade de discos e escarificador), verificaram que, no tratamento semeadura direta, a produtividade de grãos da cultura do milho foi afetada, positivamente, pela utilização do sulcador facão na camada superficial do solo (0 – 50 mm). Os maiores valores de densidade do

solo foram determinados na camada superficial, o que demonstra maior compactação.

## **2.4.2 Demanda de tração das hastes sulcadoras**

O esforço de tração obtido nas hastes sulcadoras correlaciona-se de forma positiva com a resistência do solo à penetração (CONTE et al., 2007).

Com o aumento da velocidade ocorre a maior demanda de tração das hastes sulcadoras e o aumento do consumo de combustível do trator (SILVEIRA et al., 2011). Ainda, com o acréscimo da profundidade de trabalho ocorre maior patinação dos rodados do trator, aumento do consumo de combustível e diminuição da capacidade operacional do conjunto trator semeadora (PALMA et al., 2010).

### **2.4.2.1 Extensometria**

A mensuração de força mecânica por extensometria de resistência elétrica baseia-se na aplicação de um elemento transdutor, chamado extensômetro (strain gauge), que é sensível à deformação produzida sobre um corpo elástico em função da força a ser medida. Um extensômetro é um transdutor resistivo, mecanicamente deformável, cuja resistência elétrica varia proporcional ao seu grau de deformação. A medida da variação da resistência elétrica do extensômetro, utilizando um circuito elétrico, permite estimar o seu grau de deformação e a força aplicada sobre ele, por meio de uma calibração, em que se aplicam cargas e se realiza a leitura da tensão elétrica (ALBÓNIGA-GIL et al., 2011; GUADAGNINI; ROCHA; BARLETTE, 2011; SANTO et al., 2010).

#### **2.4.2.2 Instrumentação de hastes sulcadoras**

A análise dos trabalhos dos pesquisadores que utilizaram anéis octogonais estendidos mostra que, embora os resultados obtidos sejam plenamente satisfatórios, o projeto e a construção desses equipamentos são complexos, exigindo conhecimentos de resistência dos materiais, extensometria e eletrônica, além de capacidade construtiva. Outra possibilidade para a medição de esforços em hastes é a utilização de transdutores de força extensométricos comercialmente disponíveis, arranjos de forma a medir, independentemente, as forças horizontais e verticais observadas. Acredita-se que essa iniciativa não tenha surgido, anteriormente, pelo fato de os transdutores de força serem equipamentos caros até algum tempo atrás. Na atualidade, dada a maior oferta, esses sensores tornaram-se mais acessíveis e a um custo menor (SANTO et al., 2010).

De acordo com Machado (2001), na previsão do esforço de tração em ferramentas estreitas em solos do Rio Grande do Sul, partindo da instalação de extensômetros resistivos colados à haste de um escarificador, é possível obter os resultados referentes aos esforços de tração por meio de sistema coletor e processador de sinais com transferência para microcomputador.

De acordo com Albóniga-Gil et al. (2011), a simulação matemática com base em elementos finitos é uma ótima ferramenta para verificar a área de maior tensão, onde devem ser colados os extensômetros. Os autores realizaram um estudo e concluíram que essa técnica é confiável e dispensa a aquisição de células de carga com alto valor econômico ou a aquisição ou fabricação anéis octogonais que demandam tempo, estrutura e materiais.

### **2.4.3 Área de solo mobilizada**

A área de mobilização do solo, avaliada por Cepik et al. (2010), sofreu alterações em função da palhada da cultura de inverno sobre o solo (0, 2, 3, 4, 5 e 6 Mg ha<sup>-1</sup>) e, também, pela profundidade de atuação das hastes sulcadoras na semeadura direta da cultura de verão num Argissolo Vermelho distrófico típico. Além disso, Silveira et al. (2011) afirmam que o incremento na velocidade de deslocamento da haste resulta na diminuição da área de solo mobilizada.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Área experimental**

A avaliação dos protótipos foi realizada na fazenda Palmital, em Ijaci-MG, pertencente à Universidade Federal de Lavras. O clima da região é classificado como “Cwa” (Köppen 1970), caracterizado por temperatura média anual de 19,4 °C e precipitação total anual média de 1530 mm concentrada, principalmente, no período de outubro a março.

A área experimental localiza-se entre as coordenadas 21°9'39" latitude sul e 44°55'24" longitude oeste a uma altitude média de 843 metros.

As coletas das informações foram realizadas em outubro de 2012, na época indicada para realizar semeadura do milho, do ano agrícola 2012/2013.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo – LVAd (EMBRAPA, 2006).

#### **3.2 Delineamento experimental**

O ensaio constitui-se na avaliação de 4 modelos de ponteiros descritos abaixo:

Modelo A: Figuras 7 A e B – Dimensões Figura 8

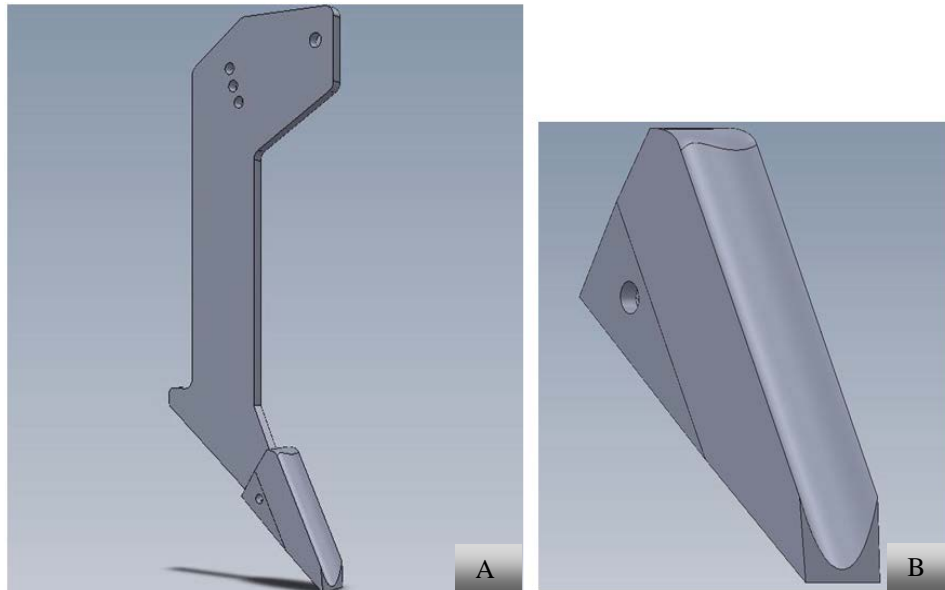


Figura 7 (A)Haste e ponteira A; (B) Detalhe da ponteira A

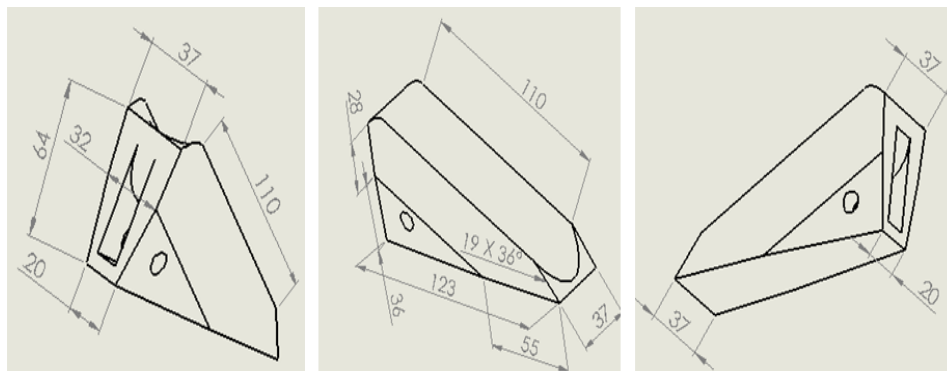


Figura 8 Detalhes das dimensões da ponteira A

Modelo B - Figuras 9 A e B - Dimensões Figura: 10;

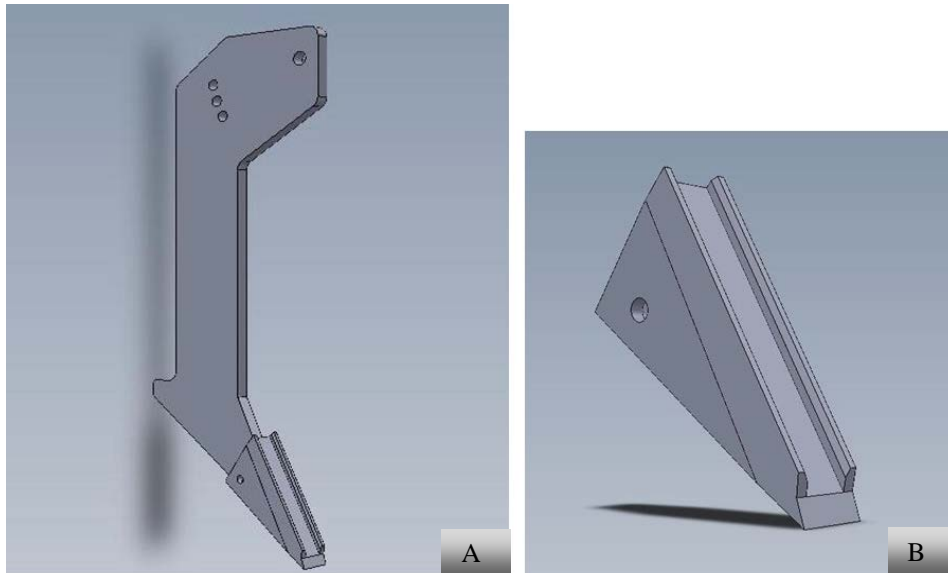


Figura 9 (A) Haste e ponteira B; (B) Detalhe da ponteira B

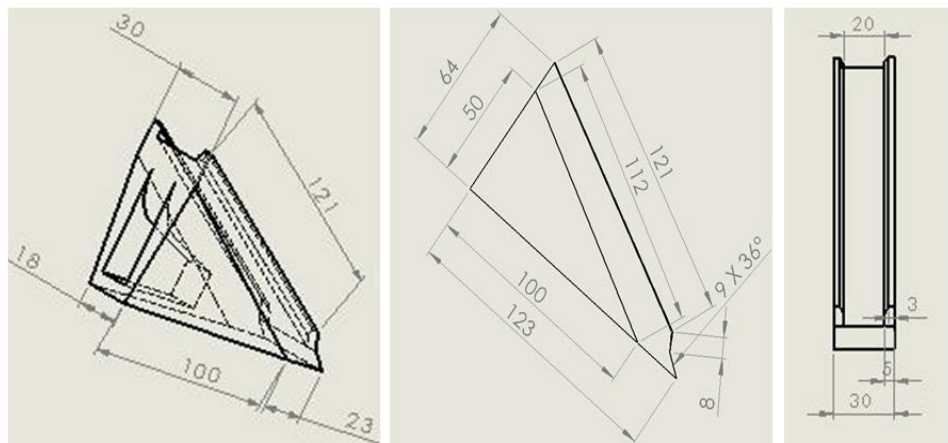


Figura 10 Detalhes das dimensões da ponteira B

Modelo C - Figuras 11 A e B - Dimensões Figuras: 12;

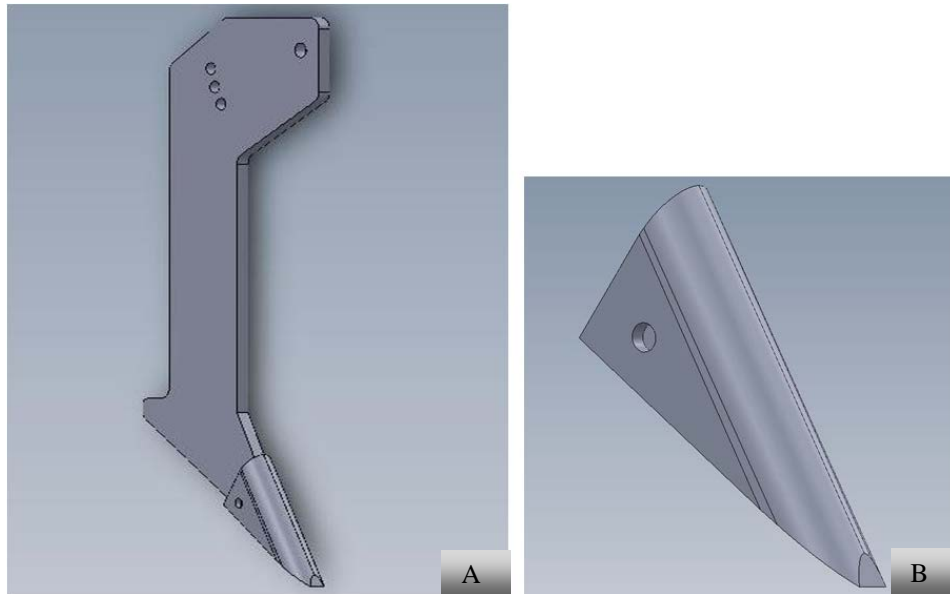


Figura 11 (A) Haste e ponteira C; (B) Detalhe da ponteira C

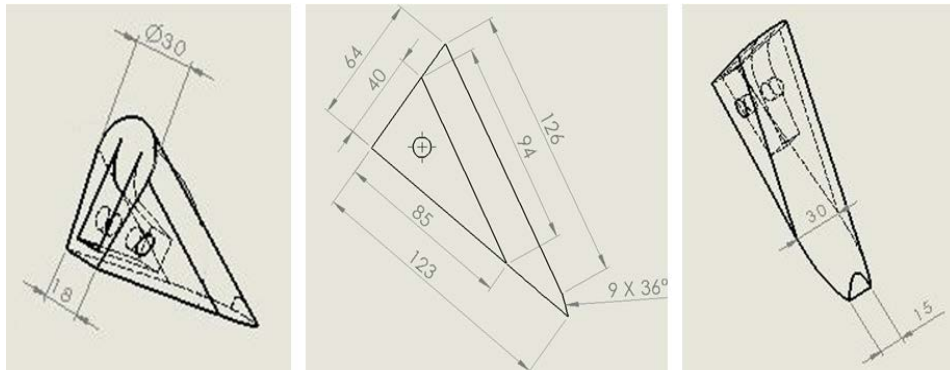


Figura 12 Detalhes das dimensões da ponteira C



Modelo D (John Deere) – Figuras 13 A e B - Dimensões Figuras: 14.

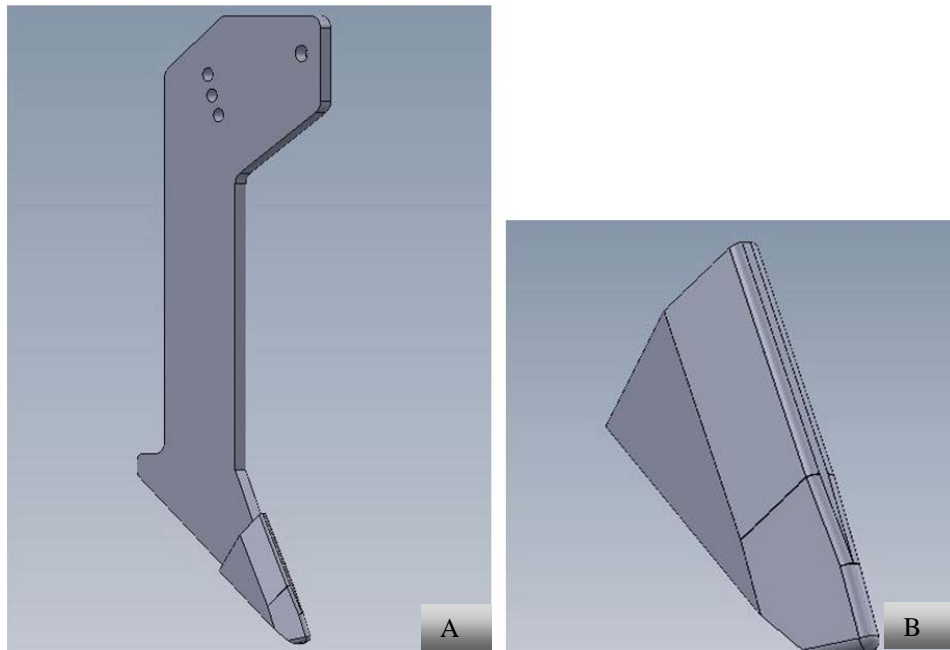


Figura 13 (A) Haste e ponteira D; (B) Detalhe da ponteira D

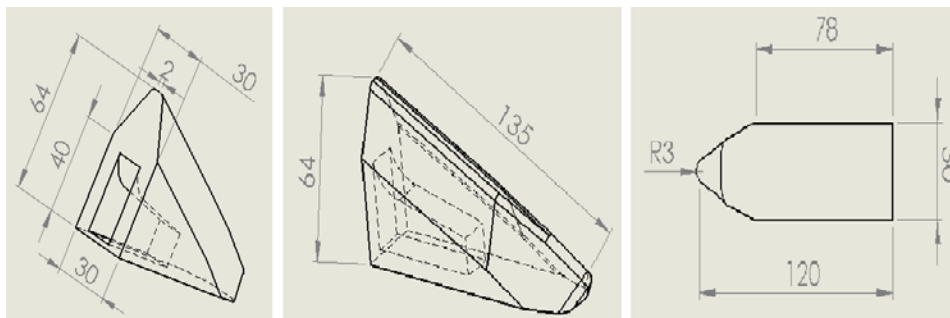


Figura 14 Detalhes das dimensões da ponteira D

Os modelos A, B e C foram desenvolvidos no presente trabalho e o modelo D equipa as hastes sulcadoras da semeadora RT907 VacuMeter, desenvolvida pela John Deere.

Os modelos de ponteiras foram ensaiados em duas profundidades (P1 = 126 mm e P2 = 161mm) com três repetições. Dessa forma, utilizou-se 24 unidades experimentais divididas em 3 blocos (delineamento de blocos casualizados - DBC), conforme Figura 15.

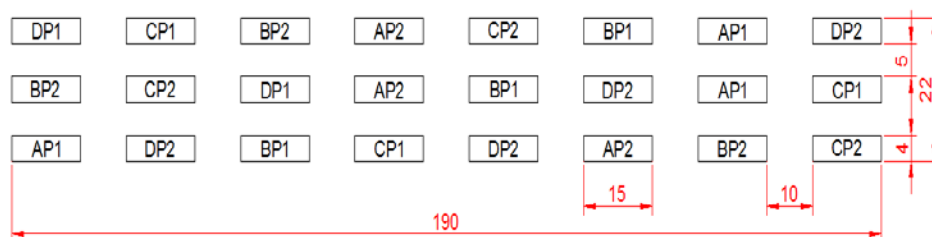


Figura 15 Delineamento experimental (cotas em m)

Para todas as análises estatísticas foi utilizado o software Assistat, versão 7.6, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

### 3.3 Mensuração da demanda de tração na haste sulcadora

Montou-se a instrumentação para mensurar a demanda de força de tração pela haste sulcadora da semeadora adubadora. Com isso, foi possível comparar a demanda em função dos modelos de ponteiras desenvolvidos.

### 3.3.1 Extensômetros

A mensuração da força de tração demandada pela haste sulcadora foi obtida, por meio da colagem de extensômetros de resistência elétrica ("strain gages"), em meia ponte de Wheatstone.

Para posicioná-los na região da peça onde ocorre a maior tensão foi realizada uma simulação matemática, com base em elementos finitos, de acordo com metodologia proposta por Albóniga-Gil et al. (2011).

### 3.3.2 Simulação Matemática

Para simulação da matemática da haste sulcadora, utilizou-se a peça padrão, desenvolvida pela Jhon Deere®, observada na Figura 16.

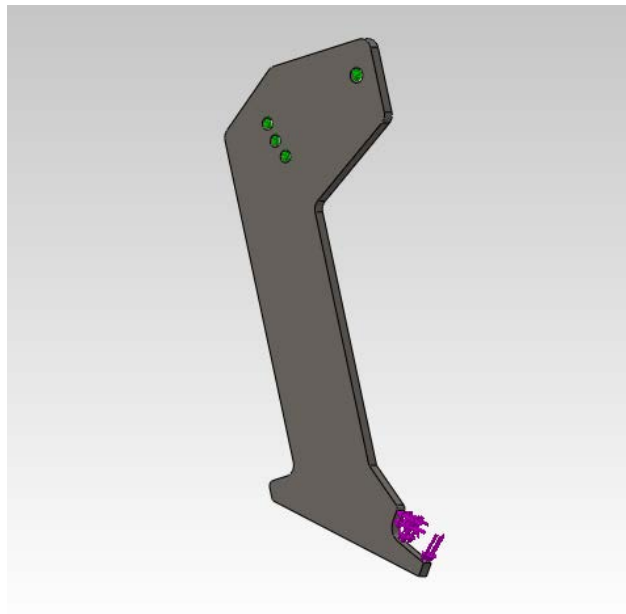


Figura 16 Haste padrão utilizada na simulação com detalhes de fixação e de aplicação de cargas

Os acessórios de fixação da peça são observados nos detalhes em verde e azul da Figura 17 A. Para realizar a simulação, foi aplicada uma força normal de 690 N, no encaixe da haste com a ponteira, em sua extremidade inferior, conforme indicação das setas da Figura 17 B e no detalhe da Figura 34.

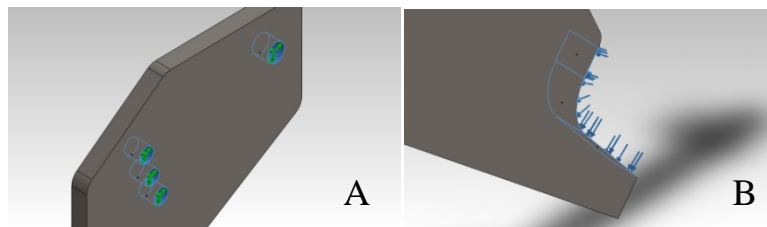


Figura 17 (A) Detalhe de fixação e (B) detalhes da aplicação de forças

Com o auxílio do programa SolidWorks Simulation®, gerou-se a malha sólida com base em curvatura com 15.500 nós (Figura 18).

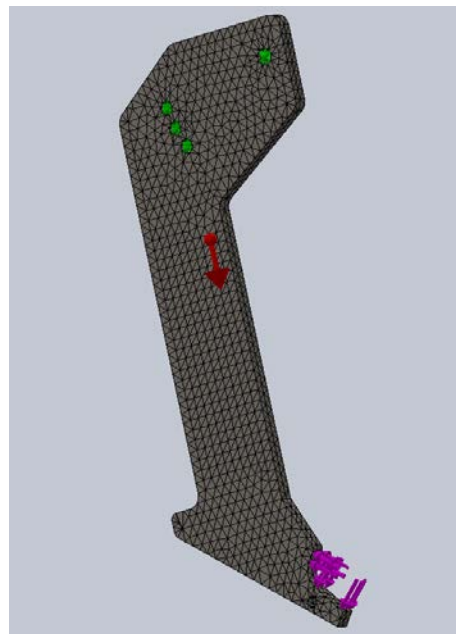


Figura 18 Malha gerada na haste para simulação

### 3.3.3 Instrumentação da haste sulcadora

Posteriormente à simulação matemática, realizou-se o preparo da superfície onde se verificou a região de maior tensão na peça. Na preparação removeu-se toda tinta e irregularidade da área da peça destinada à colagem dos extensômetros, deixando a superfície uniforme, mas não, necessariamente, polida conforme Figura 19.



Figura 19 Superfície preparada para colagem dos extensômetros

Foram utilizados extensômetros elétricos do tipo KFG-5-120-C1-11 fabricado pela Kyowa Electronic Instruments.

Os extensômetros elétricos foram instalados na superfície externa frontal da haste, no sentido longitudinal (Figura 20), a fim de determinar as deformações decorrentes apenas do esforço horizontal. Para colagem centralizada e alinhada foi realizada uma marcação na haste condizente com as indicações de colagem dos extensômetros recomendadas pelo fabricante.



Figura 20 Marcação para colagem dos extensômetros

A colagem foi feita com adesivo de cianoacrilato Loctite® 496 de média viscosidade e cura rápida (Figura 21).

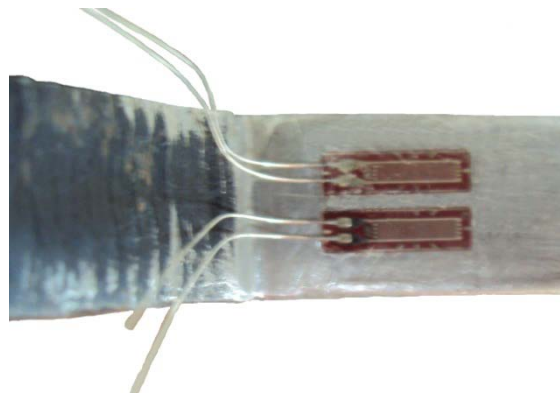


Figura 21 Detalhes dos extensômetros colados

A fiação foi soldada aos extensômetros, conforme a indicação para meia ponte de Wheatstone, seguindo as instruções do manual do equipamento de condicionamento de sinais. Posteriormente, aplicou-se silicone sobre os fios para protegê-los e evitar tração nas conexões com os extensômetros. Sobre a placa dos extensômetros colou-se fita isolante de auto fusão para protegê-los conforme Figura 22.

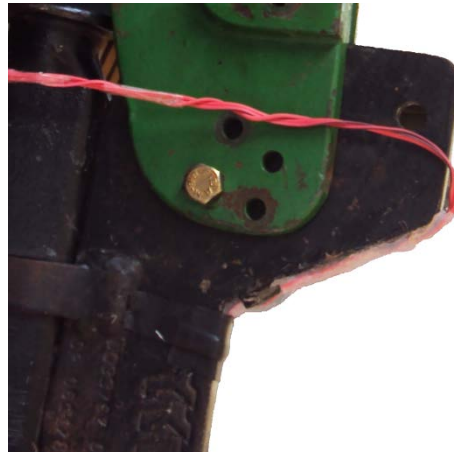


Figura 22 Detalhe da instrumentação da haste sulcadora

### 3.3.4 Condicionamento e armazenamento dos sinais

Para mensuração da demanda de força de tração da haste sulcadora, foram utilizados extensômetros elétricos, conectados a um sistema de aquisição de dados denominado Spider 8<sup>®</sup> (HBM), sendo os dados analisados por meio do software Catman 3.0 com o auxílio de um microcomputador portátil (Figura 23).



Figura 23 Sistema de condicionamento e armazenamento de sinais

### 3.3.5 Calibração do sistema de mensuração de força na haste

Dessa forma, foi possível realizar a calibração do sistema de mensuração de força na haste, de acordo com a Figura 24, em que foram aplicadas as cargas na ponta da haste (F) e realizado a leitura (L), em mV.

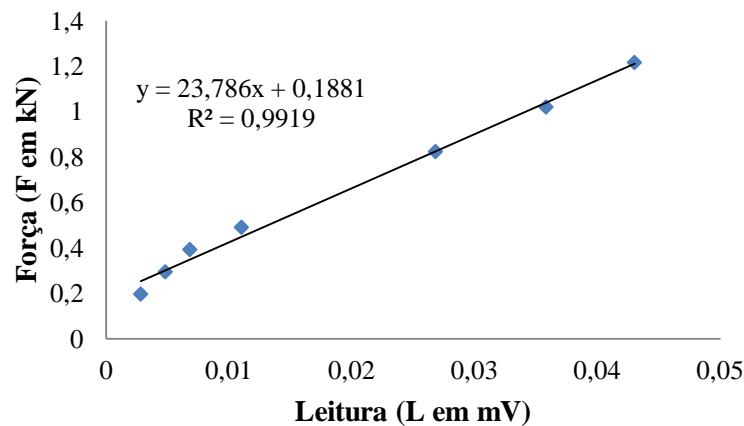


Figura 24 Calibração da célula de carga

### 3.3.6 Instalação do sistema de leitura de dados no conjunto trator semeadora

O sistema de aquisição de dados, contendo Spider 8 e o microcomputador portátil, foi montado sobre a plataforma da semeadora adubadora. Com isso diminuíram-se os problemas de ruídos no sinal em virtude dos componentes eletroeletrônicos presentes no trator. Dessa forma, o sistema de coleta de dados foi instalado no conjunto trator semeadora conforme a Figura 25.





Figura 25 Detalhes da montagem do sistema de aquisição de dados

Como fonte de alimentação utilizou-se a bateria do trator, a qual foi interligada à bateria de um nobreak (Figura 26). Esse equipamento ajustou a tensão e, dessa forma, foi possível alimentar de forma segura o microcomputador portátil e o condicionador de sinais, ambos com tensão de 110 volts.



Figura 26 Nobreak utilizado para ajustar a tensão

### 3.3.7 Força específica de tração na haste sulcadora

Dividindo-se os dados de força de tração na haste sulcadora pelos dados de área de solo mobilizado para cada ensaio realizado, obteve-se a relação entre os dois resultados (força específica) com valores expressos em  $\text{N mm}^{-2}$ .

### 3.4 Demanda de potência pela haste sulcadora equipada com diferentes ponteiros

A partir da força média de tração, calculou-se a potência em quilowatts (kW) na haste sulcadora pela Equação 2.

$$P_b = F_m v \quad (2)$$

em que,

$P_b$  - potência na haste sulcadora em kW;

$F_m$  - força média de tração em kN, e

$v$  - velocidade média de semeadura,  $\text{m s}^{-1}$ .

#### 3.4.1 Demanda de potência por unidade de área de solo mobilizada

Dividindo-se os dados de potência demandada pela haste sulcadora pelos dados de área de solo mobilizado para cada ensaio realizado, obteve-se a relação entre os dois resultados (potência específica) com valores expressos em  $\text{W mm}^{-2}$ .

### 3.5 Aferição do ângulo de ataque das ponteiras

As ponteiras foram desenvolvidas com o mesmo ângulo de ataque e, a campo, foram aferidas com um inclinômetro digital conforme Figura 27. A mensuração do ângulo foi realizada com o conjunto trator semeadora, localizados numa região plana da área experimental, uma vez que a leitura realizada pelo inclinômetro é em relação ao nível. O procedimento foi realizado em todos os tratamentos e com a ponteira da haste sulcadora na profundidade de trabalho.



Figura 27 Inclinômetro digital utilizado para conferir o ângulo de ataque

### 3.6 Caracterização do solo da área experimental

Para caracterização do solo, determinaram-se os seguintes parâmetros: umidade gravimétrica; densidade do solo; densidade de partículas e os limites de consistência.

Os dados relativos ao solo foram realizados com o objetivo de caracterizar a área experimental, visto que interferiam na relação ferramenta solo.

### **3.6.1 Textura do solo**

Para determinar a textura do solo foram coletadas 3 amostras de solo da camada 0-100 mm e 3 amostras da camada 100 a 200 mm distribuídas na área experimental. As amostras foram enviadas ao Laboratório de Solos da Universidade Federal de Lavras onde se determinaram os valores dos parâmetros: argila, silte e areia.

### **3.6.2 Densidade de partículas**

Para avaliar a densidade de partículas coletaram-se três amostras de solo da camada 0-100 mm e 3 amostras da camada 100 a 200 mm distribuídas na área experimental.

Foi utilizado o método do balão volumétrico que, por sua vez, utiliza álcool, dispensando o uso da câmara de vácuo e fervura da suspensão, em função da maior facilidade de penetração do álcool pelas interfaces dos constituintes da amostra, por apresentar baixa tensão superficial quando comparado à água conforme metodologia proposta pela EMBRAPA (1997).

### **3.6.3 Densidade do solo**

A avaliação da densidade do solo consistiu na coleta de 8 amostras de solo e 4 foram distribuídas na área experimental na camada média de 20 mm a 102 mm e 4 amostras na profundidade média de 110 mm a 192 mm. Em ambas

as situações foram coletadas amostras indeformadas a fim de caracterizar o solo e verificar se o parâmetro apresentava diferenças entre as duas camadas de solo onde as ponteiros das hastes sulcadoras atuaram. Para coleta utilizou-se um trado Uhland (Figura 28), equipado com anéis com dimensões de 82 mm de altura e diâmetro interno de 69 mm.



Figura 28 Coletas de amostras de solo indeformadas com trado Uhland

#### **3.6.4 Umidade Gravimétrica**

Para determinar a umidade gravimétrica do solo foram coletadas amostras em três pontos aleatórios dentro da área experimental. Em cada ponto foi extraída uma amostra em cada camada de 50 mm até a profundidade de 250 mm (5 amostras). Posteriormente, foram transportadas, em embalagens impermeáveis e vedadas, ao laboratório de mecânica do solo do Departamento

de Engenharia - UFLA (Figura 29), onde se determinou a umidade segundo metodologia proposta pela EMBRAPA (1997).



Figura 29 Amostras de solo para determinação da umidade

### 3.6.5 Limites de Consistência do solo

Os limites de consistência do solo foram determinados de acordo com Bowles (1986) e Sowers (1965).

A constituição da amostra, para realizar a avaliação dos limites de consistência, foi oriunda da homogeneização de uma coleta por unidade experimental na camada de 80 a 100 mm de profundidade.

O índice de plasticidade (IP) foi calculado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, constituindo uma indicação da plasticidade do solo. Em mecânica do solo, o índice de plasticidade não apresenta unidade, embora esteja relacionado com o conteúdo de água no solo. Portanto, indica uma faixa de conteúdo de água na qual um solo é coesivo, apresenta as propriedades de um material plástico (REICHERT et al., 2010).

### 3.6.6 Resistência do solo a penetração

Para caracterização da resistência do solo à penetração, foi realizada uma mensuração em cada unidade experimental, com o de um penetrômetro eletrônico digital (PenetroLOG®) até a profundidade de 250 mm conforme Figura 30. O equipamento foi configurado para registrar uma leitura a cada 10 mm de profundidade.

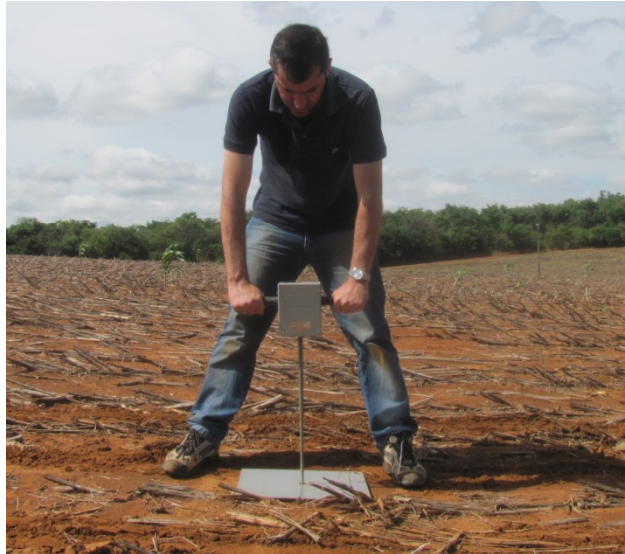


Figura 30 Mensuração da resistência do solo à penetração

### 3.6.7 Parâmetros mecânicos do solo

Para caracterização mecânica do solo da área experimental realizou-se a avaliação do cisalhamento do solo e da compressão uniaxial.

### 3.6.7.1 Cisalhamento do solo

Foram coletadas quatro amostras, em cada unidade experimental, na camada de solo com profundidade média entre 80 mm e 105mm. Com o objetivo de verificar a ocorrência da variabilidade desse parâmetro entre as parcelas separaram-se as amostras das parcelas onde as ponteiros trabalharam na menor profundidade (P1) e na maior profundidade (P2).

Para coleta das amostras indeformadas utilizaram-se amostradores quadrados, com 59 mm de largura e 22 mm de altura conforme as Figuras 31A e 31B.

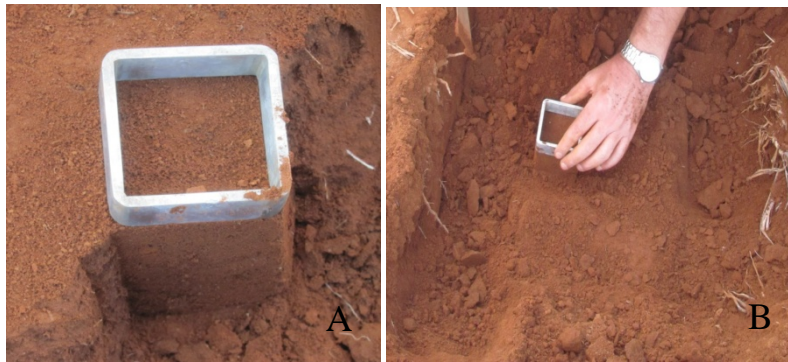


Figura 31 A e B Coletas das amostras indeformadas para ensaio de cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados, nas amostras indeformadas com umidade natural do solo, usando uma prensa de cisalhamento da marca Ele International® (Figura 32), pertencente ao Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Lavras.





Figura 32 Prensa de cisalhamento direto

As tensões normais ( $\sigma_n$ ) aplicadas foram: 55,40; 110,81; 166,21 e 221,61 kPa e, simultaneamente, aplicou-se com uma força horizontal cisalhante. Esta última força provocou o deslocamento, com velocidade constante de  $2 \text{ mm.min}^{-1}$ , da metade do corpo de prova, cuja resistência oferecida pela outra metade foi registrada por leitura feita pelo relógio comparador do anel dinamométrico de acordo com Figura 33, desenvolvida por Silva et al. (2004).

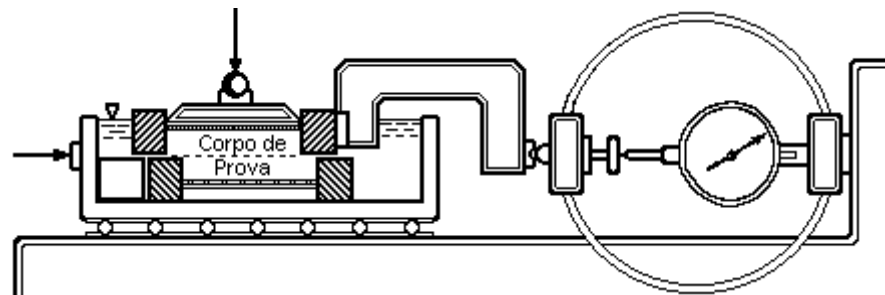


Figura 33 Representação esquemática do ensaio de cisalhamento direto

Fonte: Silva et al. (2004)

A coleta de dados ocorreu a cada 30 s e, após cada ensaio, a curva tensão deformação do solo foi obtida, plotando-se a deformação horizontal da amostra no eixo das abscissas, versus tensão cisalhante no eixo das ordenadas.

Posteriormente ao ensaio, as amostras de solo apresentaram-se de acordo com a Figura 34.



Figura 34 Amostra deformada pelo ensaio de cisalhamento direto

### 3.6.7.2 Compressão uniaxial

Para mensuração da capacidade de suporte de carga, coletaram-se amostras indeformadas em anéis com dimensões de 25,5 mm de altura e 63,6 mm de diâmetro com auxílio de um amostrador do tipo Uhland conforme Figura 35A. Foram coletadas quatro amostras nas unidades experimentais onde se trabalhou com a menor profundidade da ponteira (P1) e quatro onde foi trabalhado na maior profundidade (P2). A coleta se deu na profundidade de 50 a 120 mm. Em seguida, as amostras foram envolvidas com papel filme (Figura 35B) e condicionadas em caixas de isopor, com o objetivo de manter a umidade natural e preservar a estrutura.



Figura 35 (A) Coleta da amostra indeformada; (B) amostra coletada e condicionada

As amostras indeformadas foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial (BOWLEES, 1986), modificado por Dias Junior e Pierce (1995) com umidade natural. Utilizou-se, para este ensaio, um consolidômetro da marca Boart Longyear, conforme Figura 36, pertencente ao Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Lavras.

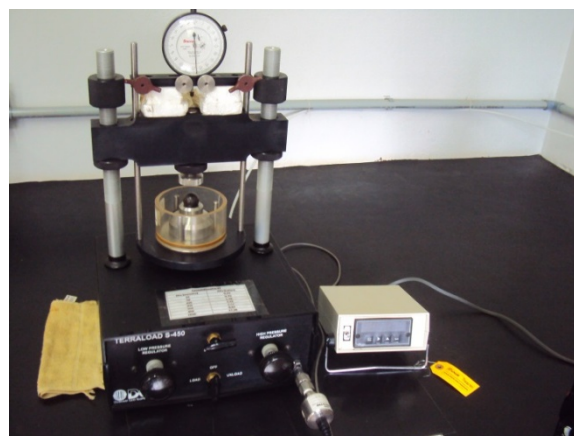


Figura 36 Consolidômetro da marca Boart Longyear®

As pressões aplicadas a cada amostra obedeceram à seguinte ordem: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa. Cada pressão foi aplicada até que 90% de deformação máxima fosse alcançada (HOLTZ; KOVACS, 1981) e, após essa condição ser alcançada, foi aplicada nova pressão. Após a liberação da pressão, as amostras foram secas em estufa a 105-110°C, por 48 horas, e determinada a massa seca do solo. A densidade do solo foi obtida de acordo com Blake e Hartge (1986). Com a umidade gravimétrica e a densidade do solo, as pressões de pré-consolidação foram obtidas de acordo com Dias Junior e Pierce (1995) a partir da curva de compressão do solo.

### 3.7 Área de solo mobilizada

Para determinação da área de solo mobilizado, pelas hastes sulcadoras, foi desenvolvido um perfilômetro com resolução de 10 mm (Figura 37). Após a passagem da semeadora, retirou-se o solo mobilizado do sulco e realizou-se uma leitura, em cada unidade experimental, a qual foi fotografada.

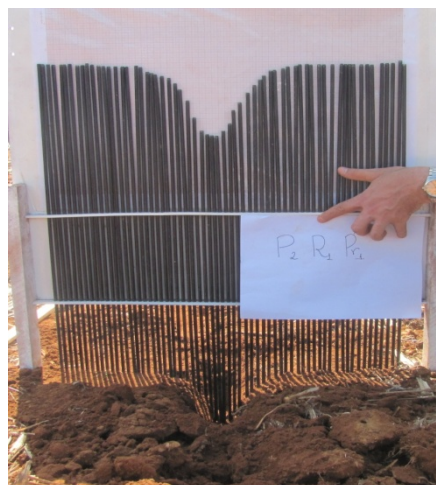


Figura 37 Perfilômetro desenvolvido

A leitura da área mobilizada se deu com o auxílio do programa AutoCad® onde as fotografias foram ajustadas, de acordo com a escala representada no papel milimetrado, colado no perfilômetro, atrás das varetas.

### 3.8 Porosidade nas laterais do sulco de semeadura

Para determinar a porosidade das paredes laterais do sulco, amostras indeformadas de solo foram coletadas e condicionadas em recipientes plásticos conforme metodologia proposta por Reis et al. (2002). A Figura 38 ilustra uma amostra indeformada da parede lateral do sulco utilizada no trabalho.



Figura 38 Preparo da amostra indeformada da parede lateral do sulco

Em laboratório, as amostras passaram por um processo de secagem, em que ficaram expostas à temperatura ambiente, durante 48 horas e em seguida

foram acondicionadas em estufa à temperatura de 65 °C até atingirem massa constante.

Uma vez seca, as amostras foram envolvidas com uma mistura impregnadora, previamente, preparada composta por 66% de resina de poliéster e 34% de estireno, na qual foram adicionados 10 mL de catalisador da resina e 6,0 g.L<sup>-1</sup> do pigmento Uvitex (Ciba-Geigy ®). Todo o processo de embeber a amostra com a mistura impregnadora foi realizada em ambiente sombreado e aberto à ventilação.

Posteriormente, realizou-se o corte transversal, com serra diamantada, nas amostras indeformadas. A face onde se efetuou o corte foi polida e lavada para obtenção de uma maior nitidez a fim de serem fotografadas conforme a Figura 39.



Figura 39 Fotografia das amostras indeformadas

### 3.8.1 Transformada de Wavelet

Para análise da porosidade, nas laterais do sulco, utilizou-se a transformada de Wavelet nas linhas representadas pelas cores vermelha, verde e azul conforme observado na Figura 40.



Figura 40 A e B Indicação das linhas analisadas pela transformada de Walvelet

A Figura 40A apresenta duas linhas ao longo da amostra de solo, em que ambas se encontram paralelas ao sulco de semeadura. A primeira linha (verde) está a 10 mm da passagem da ponteira e a vermelha a 30 mm. Já, a linha azul, ilustrada na Figura 40B, encontra-se formando um ângulo de 90° com a parede do sulco, o que nos permite uma análise do comportamento da porosidade ao longo do perfil do solo. A análise da linha azul ocorreu da extremidade mais afastada do sulco em direção à parede do sulco.

As linhas selecionadas foram analisadas no domínio da frequência, por meio da transformada de wavelet, em que o estudo da porosidade do solo foi realizado por meio do comportamento do espectro de frequência.

Os sinais foram representados pelos níveis de cinzas da imagem digital e o número de escalas, utilizado nos cálculos, seguiu a metodologia proposta por Torrence e Compo (1998).

A wavelet mãe utilizada foi a Morlet, um complexo de amortecimento exponencial que preserva uma relação aproximada entre a escala da wavelet e a frequência na análise de Fourier, tal como descrito por Polansky et al. (2010).

Os cálculos foram realizados por meio do software livre Scilab, onde, também, se plotaram os espectros de frequência.

Esta metodologia, para avaliação da porosidade do solo a partir da transformada de wavelet, consiste numa nova proposta de mensuração da porosidade do solo.

### **3.9 Máquinas utilizadas no ensaio**

Para realização dos ensaios a campo foi utilizado um trator marca Valtra, modelo A750, com tração dianteira auxiliar (TDA) conforme Figura 41.



Figura 41 Trator utilizado no experimento



Para realizar a semeadura, utilizou-se uma semeadora adubadora de precisão, marca John Deere, modelo RT907 VacuMeter equipada com 4 módulos de semeadura conforme Figura 42.



Figura 42 Semeadura adubadora utilizada no ensaio

A velocidade de deslocamento do conjunto trator semeadora foi de 5,0 km h<sup>-1</sup> e a instrumentação foi instalada apenas numa haste onde se alteraram apenas as ponteiras, de acordo com os tratamentos.

Os módulos de semeadura estavam equipados com disco de corte de palha com borda lisa, o qual atuou a uma profundidade média de 80 mm. Posteriormente, a haste sulcadora, a qual incorporou o fertilizante e, por final, o disco duplo para abertura do sulco para semente.

As alterações nas profundidades de operação da haste sulcadora foram possíveis, em razão da regulagem de furos existente para fixação da haste no chassi da semeadora (Figura 43A) e a alterações na pressão da mola (Figura 43B).

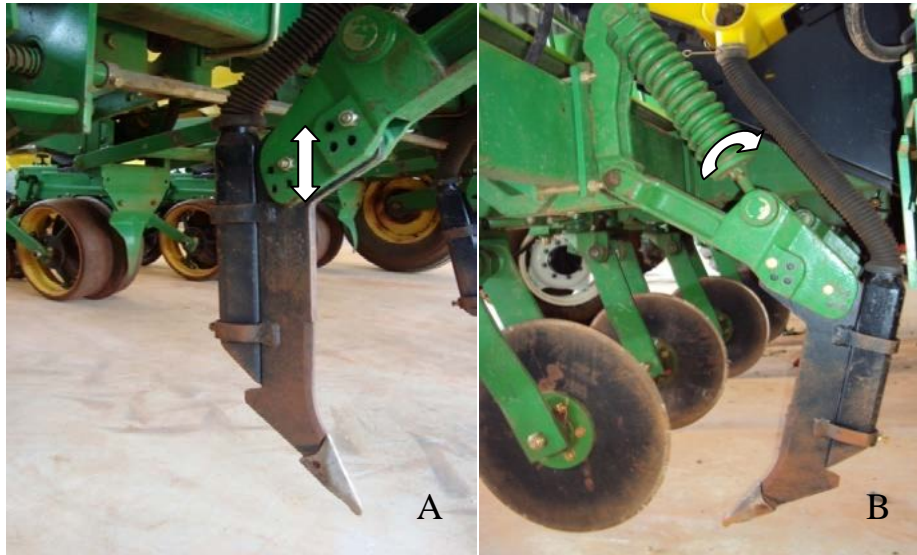


Figura 43 A Fixação da haste sulcadora e B: Regulagem de pressão da mola

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Demanda de força para tração da haste

Na primeira profundidade de trabalho das ponteiros avaliadas, a maior demanda de força de tração ocorreu no modelo C. As ponteiros A e B apresentaram valores semelhantes e inferiores a C. Dentre os modelos estudados, a ponteiro D apresentou a menor demanda de força de tração para condição de menor profundidade, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 Demanda de Força (kN) para tração da haste sulcadora equipada com diferentes ponteiros nas profundidades 1 e 2

Ponteiros	Profundidades (P)	
	1	2
A	0,42 bB	0,69 aA
B	0,41 bB	0,59 cA
C	0,44 aB	0,64 bA
D	0,30 cB	0,41 cA
C.V. (%)	2,94	

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha e minúscula na coluna, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Na segunda profundidade, observaram-se maiores valores na demanda de tração da ponteiro A, possivelmente, em função da sua maior largura em relação às demais. A ponteiro C apresentou valores intermediários e superior às ponteiros B e D as quais mantiveram demandas semelhantes

Independente do modelo da ponteiro, na segunda profundidade, apresentou maiores demandas de força para tração. Isso demonstra que as geometrias de ataque estudadas apresentam um comportamento semelhante ao

aumentar a profundidade, demandando, também, o incremento na força para tração.

De acordo com Palma et al. (2010), ao trabalhar com a ponteira da haste ligeiramente abaixo da camada de solo mais compactada, ocorre diminuição da demanda de tração ao comparar com a condição em que a ponteira atua no limite inferior da camada de solo mais compactada. Observa-se que a camada de solo mais compactada, na área experimental, situa-se na profundidade de 50 a 150 mm (Tabela 8). Dessa forma, as ponteiras A e D, que atuaram nessas profundidades, (Tabela 3), podem ter sofrido o acréscimo na força de tração (Tabela 1), visto que a ponteira B e D apresentaram a mesma demanda de força, porém a profundidade e a área de solo mobilizada da B foi superior.

Ao trabalhar em um Latossolo Vermelho distroférico (60% argila), Bordignon (2005), utilizando a mesma semeadora, obteve na haste sulcadora da marca John Deere®, o esforço horizontal de 0,485 kN ao atuar na profundidade média de 80mm. Valor superior ao encontrado no presente trabalho com a mesma ponteira.

Os autores Mion et al. (2009) encontraram valores de força horizontal, para tração da haste, de 0,26 kN ao atuar na profundidade de 46,8 mm em um Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 1997). Esse solo apresentava densidade, na camada de 0 – 150 mm, de 1,42 Mg m<sup>-3</sup>, umidade de 0,26 kg kg<sup>-1</sup> e resistência à penetração, na camada de 0- 150 mm, de 1,730 MPa. Observa-se que os valores encontrados são inferiores aos modelos desenvolvidos neste trabalho, porém a profundidade de trabalho, a densidade e a resistência do solo a penetração foram inferiores.

#### 4.1.1 Simulação matemática da aplicação de força na haste

A Figura 44 apresenta os resultados de tensão na peça, obtidos por meio da simulação matemática, aplicando a força de 690N.

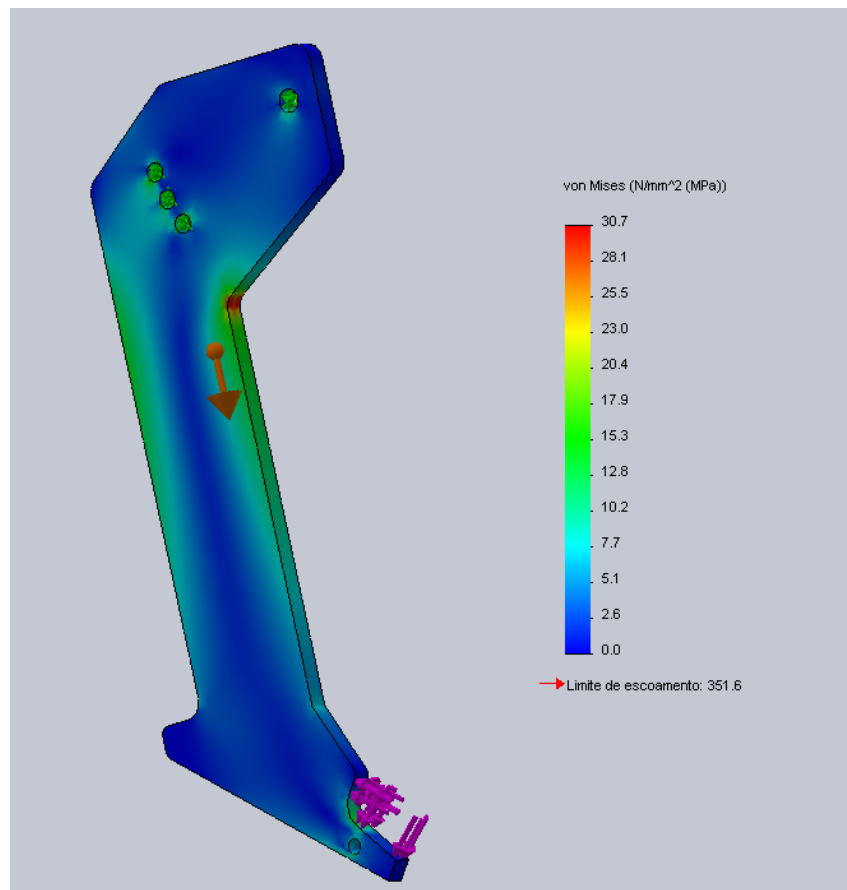


Figura 44 Resultado de tensão na peça obtido pela simulação

O limite de tensão na peça foi de  $30,7 \text{ N.mm}^{-2}$ , representado pela cor vermelha na simulação. Destaca-se que o limite de escoamento observado na simulação foi de  $351,6 \text{ N.mm}^{-2}$ .

A haste sulcadora necessita de um maior coeficiente de segurança, pois ao trabalhar em solos pedregosos e, mesmo em maiores profundidades, pode ocorrer picos de força. Dessa forma, se a peça não apresentar maior resistência poderá romper-se.

#### 4.2 Demanda de potência pela haste sulcadora equipada com diferentes ponteiras

A demanda de potência foi maior na maior profundidade para todos os modelos de ponteiras ensaiados conforme a Tabela 2.

Tabela 2 Potência requerida na haste sulcadora

Ponteiras	Potência requerida (kW)	
	Prof. 1	Prof. 2
A	0,5825 bB	0,9573 aA
B	0,5757 bB	0,8175 cA
C	0,6181 aB	0,8952 bA
D	0,4171 cB	0,5732 dA
C.V.	2,64	

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha e minúscula na coluna, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Para menor profundidade a ponteira C apresentou maior potência requerida. A ponteira A e B resultaram em comportamentos semelhantes, porém inferiores a C e superiores a D. Ao avaliar as quatro ponteiras na mesma profundidade destaca-se que a D apresentou menor potência requerida e a C maior.

Para profundidade 2, a maior potência requerida foi para ponteira A, seguida pela C. Observa-se que a ponteira que demandou menor potência, nessa condição de trabalho, foi a D. Tal fator explica-se pela diferença em relação às demais na profundidade de atuação e área mobilizada de solo.

Destaca-se o comportamento da ponteira B a qual, na profundidade 2, apresentou demanda de força de tração semelhante à D e inferiores às demais. Além disso, a área mobilizada de solo foi semelhante ao modelo C e inferior ao A, porém esse modelo apresenta maior largura. Ao analisar a potência requerida, o modelo B foi inferior ao A e C, mas superior ao D que apresentou menor área do solo mobilizada, menor profundidade e demanda de força de tração semelhante.

### 4.3 Profundidade de atuação das ponteiras

Na primeira condição de trabalho (menor profundidade), todas as ponteiras trabalharam em profundidades semelhantes de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 Profundidade (mm) de trabalho das ponteiras das hastes sulcadoras nas profundidades 1 e 2

Ponteiras	Profundidades (mm)	
	1	2
A	125,29 aB	135,33 cB
B	135,34 aB	184,88 aA
C	124,93 aB	168,85 aA
D	121,06 aB	155,77 bA
C.V. (%)	6,51	

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha e minúscula na coluna, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Na segunda condição de trabalho (maior profundidade), as ponteiros B e C alcançaram maiores valores. A ponteira D resultou em profundidade intermediária e a menor profundidade atingida foi da ponteira A. Isso pode estar relacionando à maior largura dessa ponteira, o que aumenta a demanda de forças verticais atuantes para aumentar a profundidade de atuação.

#### 4.4 Área mobilizada de solo

Na primeira condição de trabalho apenas a ponteira D mobilizou menor área de solo que as demais de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 Área mobilizada (mm<sup>2</sup>) pelas ponteiros das hastes sulcadoras nas profundidades 1 e 2

Ponteiros	Profundidades	
	1	2
A	13226,85 aB	29766,24 aA
B	13052,36 aB	25156,07 bA
C	12310,61 aB	21494,94 bA
D	7792,41 bB	16373,18 cA
C.V. (%)	13,16	

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha e minúscula na coluna, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Na segunda condição de trabalho a ponteira A, embora tenha trabalhado na menor profundidade (Tabela 3), apresentou a maior área de solo mobilizado. Tal fator explica-se, pois a largura dessa ponteira é maior do que as demais. A ponteira C, como na primeira condição de trabalho, apresentou a menor área de solo mobilizado. As ponteiros B e C resultaram em valores semelhantes menores que a ponteira A, porém superior a ponteira D.



A Figura 45 apresenta uma demonstração gráfica, proporcional entre as ponteiros, da área de solo mobilizada em ambas as profundidades.

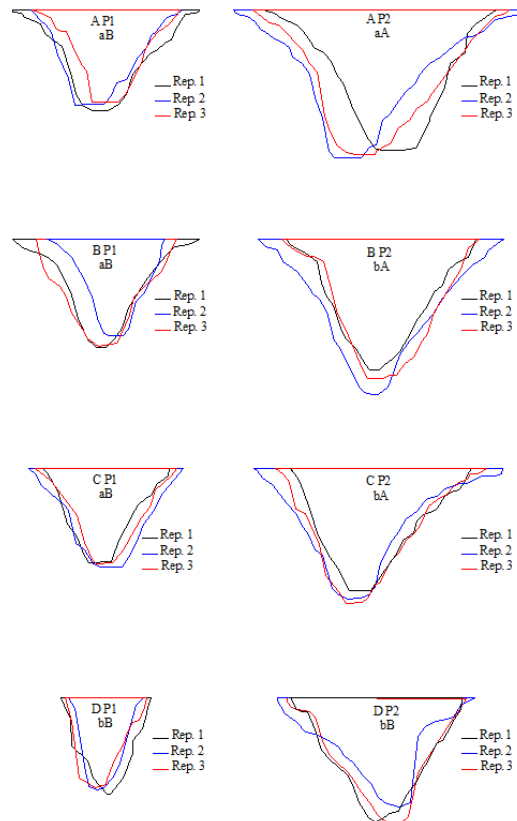


Figura 45 Representação da área mobilizada de solo em função da utilização das ponteiros com diferentes geometrias em duas profundidades

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

#### 4.5 Força Específica

A força específica, para as diferentes ponteiros, manteve-se semelhante na mesma profundidade conforme a Tabela 5.

Tabela 5 Força específica ( $\text{N mm}^{-2}$ ) da haste equipada com diferentes ponteiros em duas profundidades

Ponteiros	Força Específica ( $\text{N mm}^{-2}$ )	
	Prof. 1	Prof. 2
A	0,032aA	0,023aB
B	0,033aA	0,024aB
C	0,036aA	0,029aB
D	0,039aA	0,022aB
C.V.	15,12	

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha e minúscula na coluna, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Ao comparar a menor com a maior profundidade observou-se que a força específica diminuiu em virtude da maior área de solo mobilizada na condição onde as ponteiros atuaram em maior profundidade.

#### 4.6 Demanda de potência por unidade de área de solo mobilizada

A demanda específica de potência manteve-se semelhante entre as ponteiros analisadas conforme a Tabela 6.

Tabela 6 Demanda de potência por unidade de área mobilizada de solo ( $\text{W mm}^{-2}$ )

Ponteiras	Potência Específica ( $\text{W mm}^{-2}$ )	
	Prof. 1	Prof. 2
A	0,045 aA	0,032 aB
B	0,046 aA	0,033 aB
C	0,051 aA	0,040 aB
D	0,054 aA	0,031 aB
C.V.	15,12	

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha e minúscula na coluna, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Observa-se que a potência específica foi maior na menor profundidade em virtude da menor área de solo mobilizada.

#### 4.7 Caracterização do solo da área experimental

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo – LVAd (EMBRAPA, 2006).

##### 4.7.1 Textura e densidade do solo

A Tabela 7 apresenta os valores de textura e da densidade do solo das duas camadas avaliadas na área experimental.

Tabela 7 Textura e densidade do solo

Camadas mm	Argila* Kg kg <sup>-1</sup>	Areia* Kg kg <sup>-1</sup>	Silte* Kg kg <sup>-1</sup>	D S** Mg m <sup>-3</sup>
0-100	0,53 a	0,37 a	0,10 a	1,83 a
100 - 200	0,59 a	0,33 a	0,08 a	1,80 a
Média Geral	0,56	0,35	0,09	1,82
C.V. (%)	5,27	11,84	21,91	3,36

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

\*Média de três repetições.

\*\*Média de quatro repetições.

Os parâmetros textura e densidade do solo não apresentaram diferenças entre as duas profundidades estudadas conforme observado na Tabela 7.

Segundo Bonini et al. (2011), a densidade do solo é uma das propriedades físicas que podem caracterizar o estado de compactação. Os valores encontrados (Tabela 7) se apresentam na faixa de 1,82 Mg m<sup>-3</sup> para a camadas de 0 a 200 mm. Os valores podem ser considerados altos, visto que Klein (2006) constatou que a partir de 1,33 Mg m<sup>-3</sup> são limitantes ao crescimento radicular, porém Siqueira, Vieira e Ceddia (2008) apontam que não há um consenso quanto ao valor crítico da densidade do solo.

#### 4.7.2 Umidade, densidade de partículas e resistência do solo à penetração

Para o parâmetro umidade, os valores mantiveram-se semelhantes em todo o perfil analisado conforme se observa na Tabela 8.

Tabela 8 Umidade, Densidade de Partículas e Resistência do Solo à Penetração

Camadas mm	Umidade kg kg <sup>-1</sup>	D P Mg m <sup>-3</sup>	RSP*
0-50	0,23 a	2,51 a	1,45 d
50-100	0,24 a	2,39 a	3,20 a
100-150	0,25 a	2,46 a	2,94 a
150-200	0,25 a	2,55 a	2,46 b
200-250	0,25 a	2,36 a	2,13 c
Média Geral	0,24	2,46	2,44
C.V. (%)	3,16	5,80	19,22

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

\*Não foi aplicado o teste de comparação de média porque o F de interação não foi significativo.

Destaca-se que o valor da umidade ficou dentro da faixa de friabilidade (Figura 46) que é a indicada para determinação da resistência do solo à penetração (TORRES; SARAIVA, 1999). Nessa condição de umidade, também, são indicadas as intervenções mecânicas no solo entre elas a semeadura direta (JULIÃO et al., 2011; SEVERIANO et al., 2010; SILVA et al., 2004).

A densidade de partículas não se diferenciou no perfil de solo estudado. Já, a resistência do solo à penetração, apresentou-se maior na camada de 5 a 15 cm. Na camada de 0 – 5 cm apresentou-se menor em relação às demais camadas. Tal fator, também, foi observado por Palma et al. (2010) e Pereira et al. (2002) em que a camada inicial de solo apresentou menores valores de resistência do solo à penetração. Isso pode estar atrelado à atividade radicular das plantas e ao revolvimento do solo ocasionado pelos mecanismos rompedores atuantes nesta camada para realizar a semeadura direta.

### 4.7.3 Limites de consistência

Os limites de consistência do solo, no momento da realização do ensaio, apresentaram-se de acordo com a Figura 46.

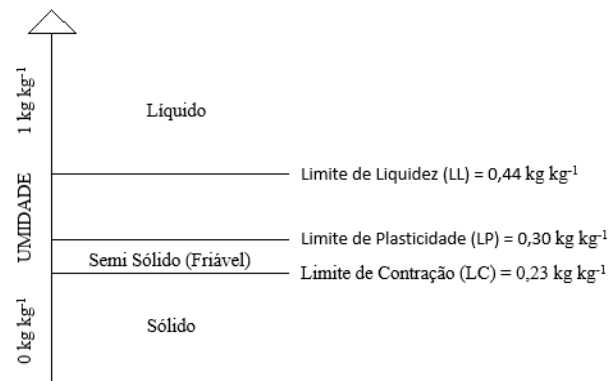


Figura 46 Limites de consistência do solo

Destaca-se que a umidade média do solo, avaliada na camada de 0 a 250 mm, foi de  $0,24 \text{ kg kg}^{-1}$ , ou seja, próximo ao limite de contração.

O índice de plasticidade resultou em 18,84, que, dentro dos índices definidos por Atteberg, caracteriza um solo com alta plasticidade, argiloso e coesivo.

### 4.7.4 Cisalhamento do solo

As envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo, com umidade natural, estão apresentadas na Figura 47 para as áreas P1 e P2.

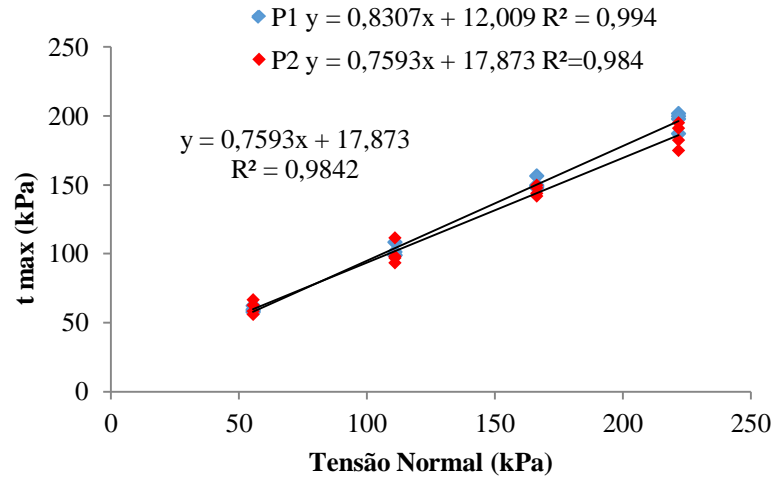


Figura 47 Envoltórias de resistência ao cisalhamento para as áreas P1 e P2.

Na Tabela 9, observam-se os dados do teste de significância, de acordo com Snedecor e Cochran (1989), entre as envoltórias de resistência ao cisalhamento das áreas P1 e P2.

Tabela 9 Teste de significância entre as envoltórias de resistência ao cisalhamento das áreas P1 e P2

Manejo	F	F	
		Coeficiente angular, b	Coeficiente linear, a
P1 Vs P2	H	ns	ns

F: testa a homogeneidade dos dados; b: coeficiente angular da regressão linearizada; a: intercepto da regressão linearizada; H: homogêneo; NH: não homogêneo; ns: não significativo; \* e \*\* significativos a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente.

Destaca-se que as duas áreas não apresentaram diferenças em relação à resistência ao cisalhamento do solo.

A Figura 48 apresenta as envoltórias de resistência ao cisalhamento para as áreas P1 e P2, após a análise estatística, resultando num  $R^2$  de 0,98.

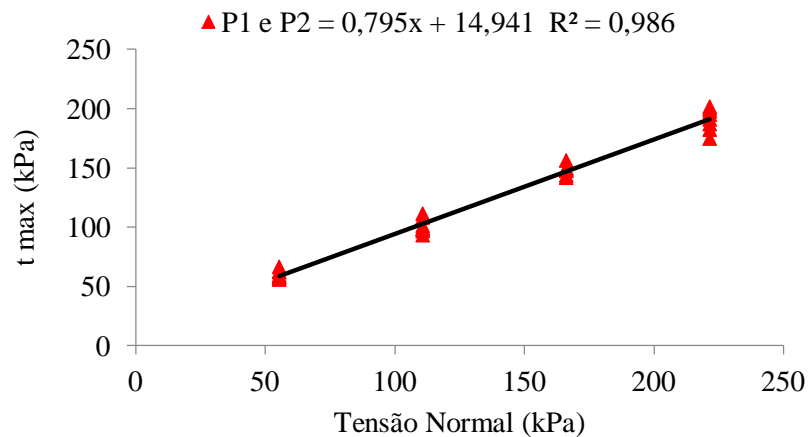


Figura 48 Envoltória de resistência ao cisalhamento para as profundidades P1 e P2

Dessa forma, a tensão máxima de cisalhamento teve um comportamento proporcional ao aumento de tensão normal aplicada.



A Tabela 10 apresenta os valores de ângulo de atrito interno e coesão aparente do solo.

Tabela 10 Ângulo de atrito interno e coesão aparente

Manejos	Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	Coesão aparente (c) (kPa)
Profundidades 1 e 2	38,66	12,67

#### 4.7.5 Compressão uniaxial

Os resultados de umidade, capacidade de suporte de carga, índice de compressão, densidade inicial, altura dos sólidos e índices de vazios não apresentaram diferenças estatísticas significativas, conforme Tabela 11. P1 representa as parcelas onde se trabalhou com a ponteira na menor profundidade e P2 onde se trabalhou na maior profundidade.

Tabela 11 Valores de Umidade (Umid.), Capacidade de suporte de carga (PPC), Índice de compressão (m), Densidade Inicial (Dsi), Altura dos Sólidos (Hs) e Índice de Vazios (ei) do solo da área experimental

Áreas	Umid.* kg kg <sup>-1</sup>	PPC kPa*	m %*	Dsi* kg m <sup>-3</sup>	Hs* mm	ei*
P1	0,27a	276,55 a	26 a	1,15 a	11,3 a	1,27a
P2	0,26a	241,57 a	28 a	1,12 a	10,8 a	1,31a
C.V.(%)	5,59	30,08	10,61	8,48	7,62	14,30

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

\*Média de três amostras

## 4.8 Porosidade das laterais do sulco de semeadura

Os resultados da porosidade obtidos, por meio dos níveis de cinza da imagem e da transformada de Walvelet, estão apresentados a seguir para cada modelo de ponteira, avaliado em duas profundidades.

### 4.8.1 Modelo A

Os resultados da porosidade, obtidos por meio da transformada de wavelet, estão apresentados a seguir em duas profundidades para o modelo A.

#### 4.8.1.1 Menor Profundidade (P1)

A Figura 49 apresenta o resultado da amplitude dos níveis de cinza das linhas horizontais superior e inferior, respectivamente, para ponteira A.

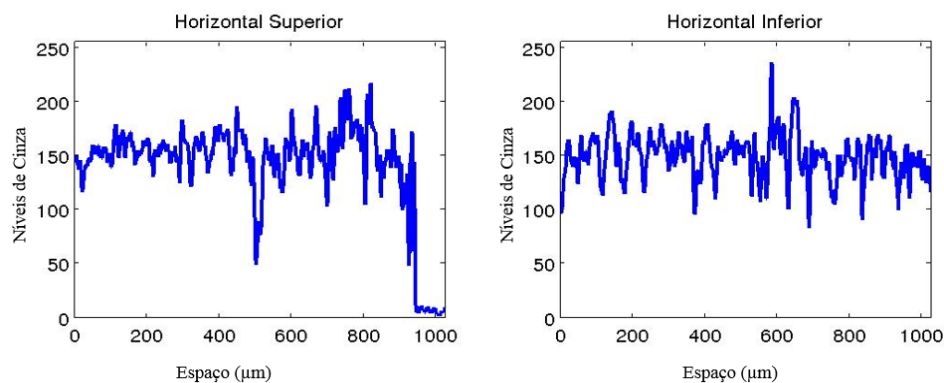


Figura 49 Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B)

Os sinais em níveis de cinza, das imagens das amostras indeformadas de solo, nem sempre são suficientes. Por isso, plotaram-se os espectros de Wavelets dos sinais (linhas) superior e inferior conforme Figura 50.

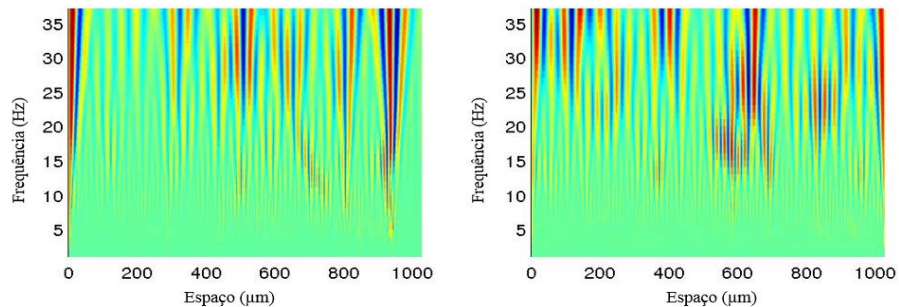


Figura 50 Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B)

A sobreposição das linhas indicadoras nos níveis de cinza apresenta-se na Figura 51, em que se observam semelhanças entre as duas linhas analisadas, exceto ao final da linha superior que apresentou variação. Possivelmente ocorreu em decorrência de um espaço poroso maior ou um fragmento sólido de mesma coloração.

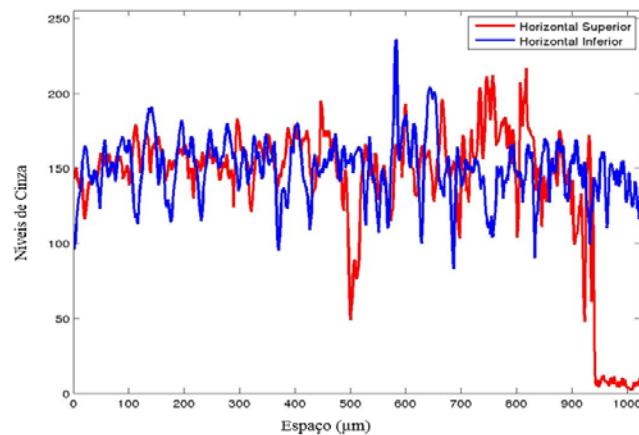


Figura 51 Níveis de cinza das análises horizontais

Para linha vertical, destaca-se que não foi possível verificar alteração nos níveis de cinza (Figura 52), nem no espectro de Wavelet (Figura 53), que caracterizasse diferença de porosidade ao longo da linha analisada.

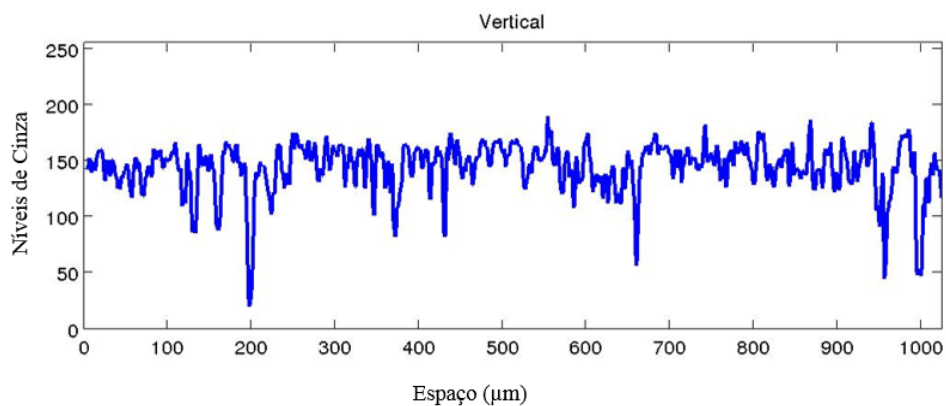


Figura 52 Níveis de cinza analisados na linha vertical

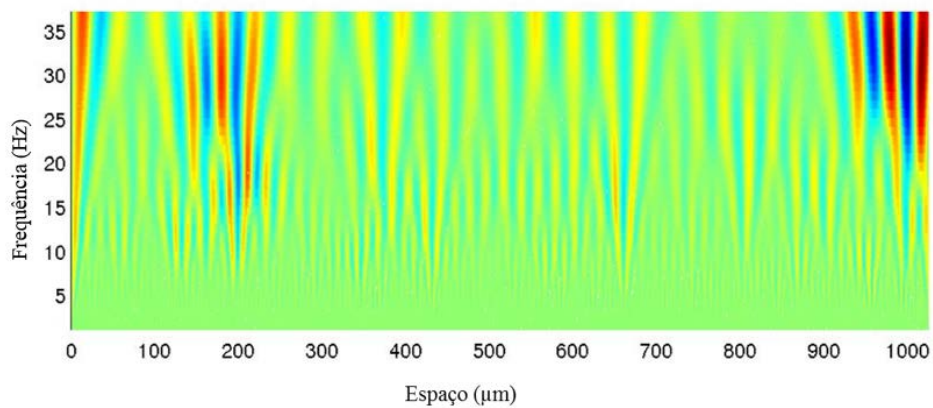


Figura 53 Espectro de Wavelets da linha vertical

#### 4.8.1.2 Maior Profundidade (P2)

A Figura 54 apresenta o resultado da amplitude dos níveis de cinza das linhas horizontais superior e inferior, respectivamente, para ponteira A na segunda condição de profundidade de atuação.

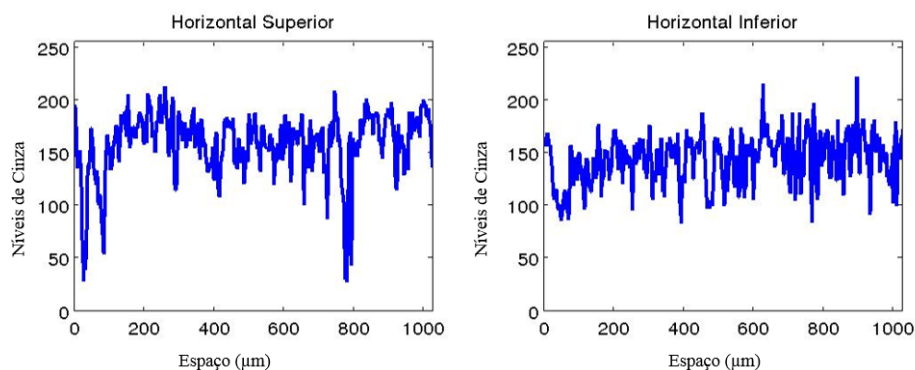


Figura 54 Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B)

Plotaram-se os espectros de Wavelets dos sinais (linhas) superior e inferior conforme a Figura 55.

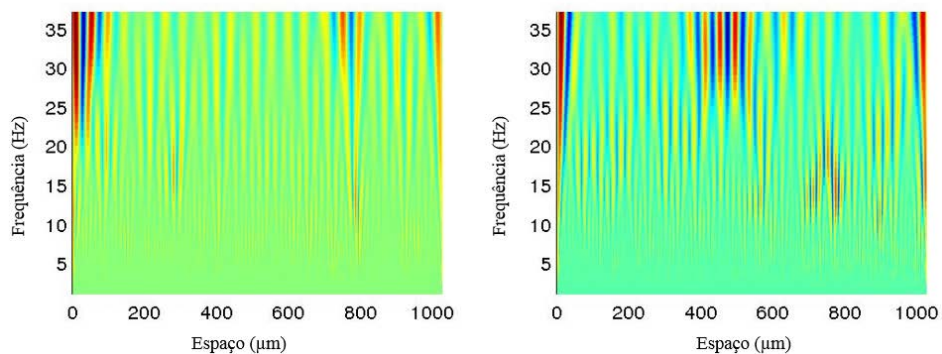


Figura 55 Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B)

A sobreposição das linhas de frequência apresenta-se, na Figura 56, em que se observam semelhanças entre as duas linhas analisadas. Dessa forma, não foi possível identificar alteração da porosidade na lateral do sulco.

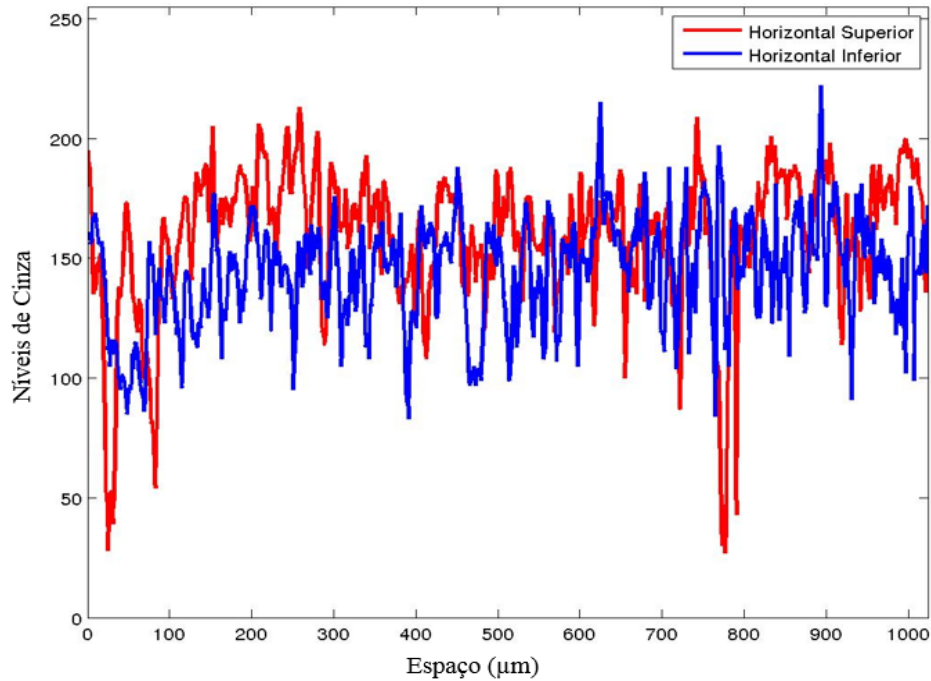


Figura 56 Níveis de cinza das análises horizontais

Ao analisar os níveis de cinzas e os espectros de Wavelets, observa-se que há indícios de menor porosidade no sinal mais próximo da passagem da ponteira, em consequência da menor variação dos níveis de cinza e a menor amplitude da frequência nos espectros de cores da transformada de Wavelets.

Para linha vertical, destaca-se que não foi possível verificar alteração nos níveis de cinza (Figura 57) nem no espectro de Walvelet (Figura 58) que caracterizasse diferença de porosidade ao longo da linha analisada.

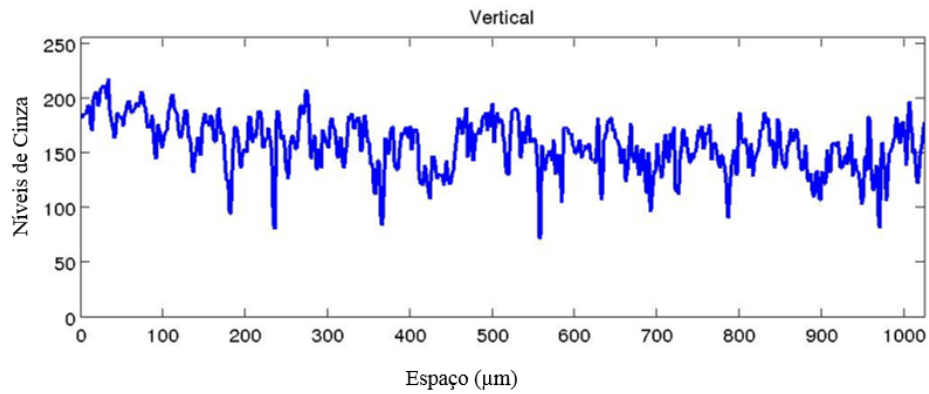


Figura 57 Níveis de cinza analisados na linha vertical

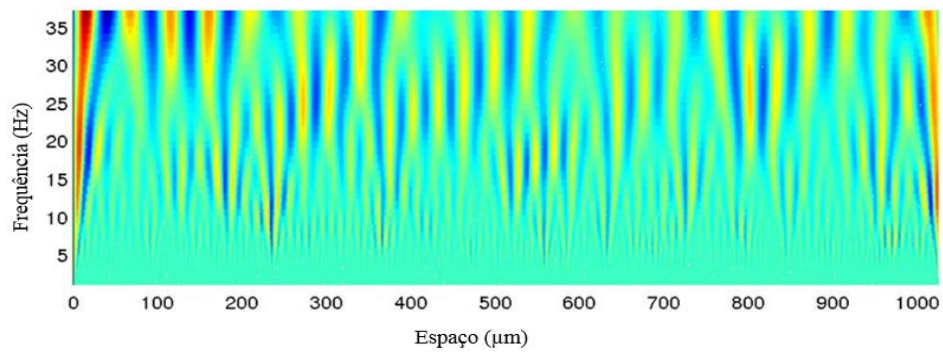


Figura 58 Espectro de Wavelets da linha vertical

#### 4.8.2 Modelo B

Os resultados da porosidade, obtidos por meio da transformada de wavelet, estão apresentados a seguir em duas profundidades para o modelo B.

#### 4.8.2.1 Menor profundidade (P1)

A Figura 59 apresenta o resultado da amplitude dos níveis de cinza das linhas horizontais superior e inferior, respectivamente, para ponteira B.

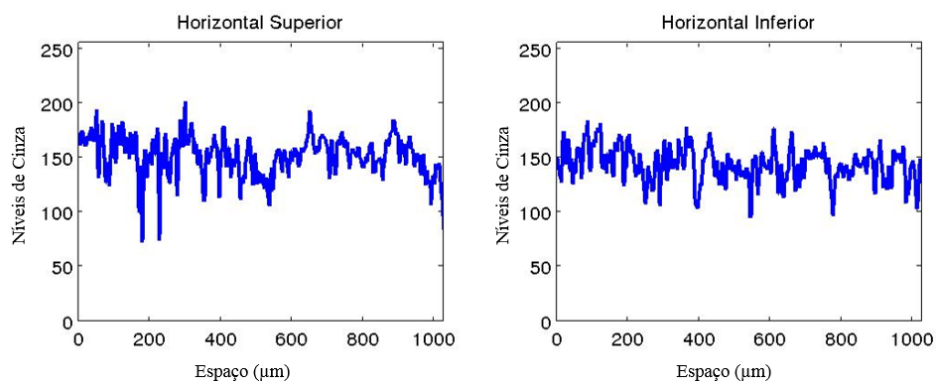


Figura 59 Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B)

Plotaram-se os espectros de Wavelets dos sinais (linhas) superior e inferior conforme a Figura 60.

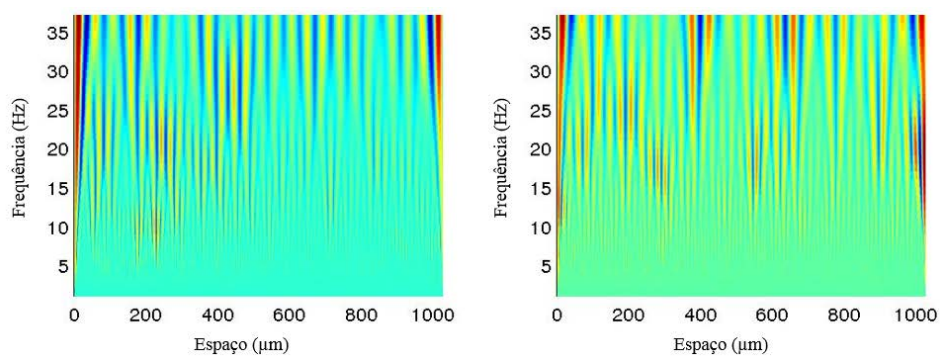


Figura 60 Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B)



A sobreposição dos níveis de cinza apresentam-se, na Figura 61, em que se observam semelhanças entre as duas linhas analisadas. Dessa forma, não foi possível identificar alteração da porosidade na lateral do sulco.

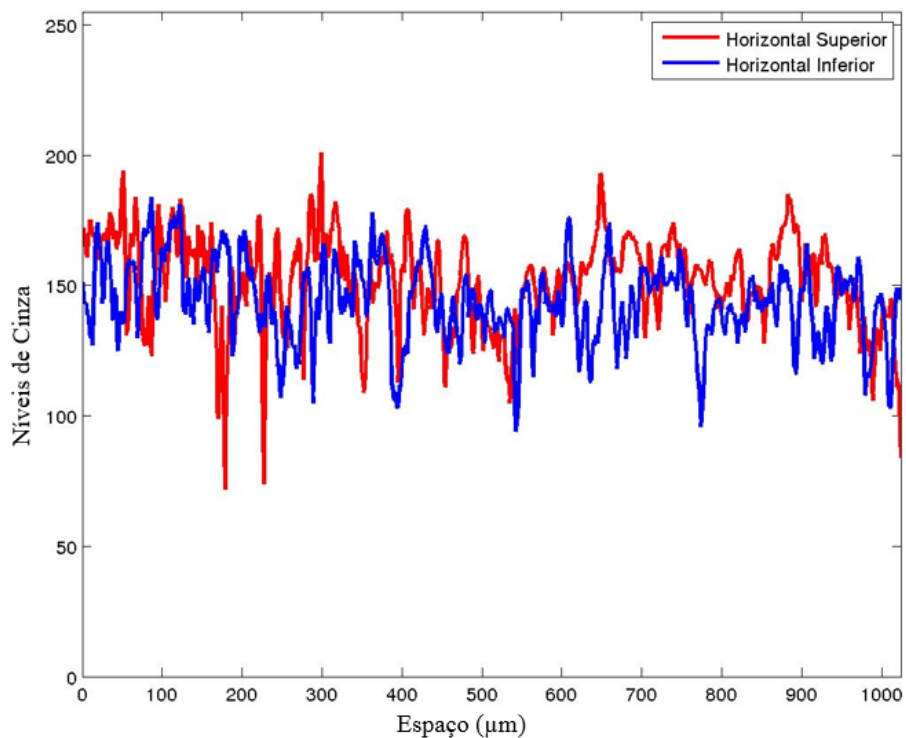


Figura 61 Níveis de cinza das análises horizontais

Ao analisar os níveis de cinzas e os espectros de Wavelets observa-se que não houve indícios de alteração da porosidade.

Para linha vertical, destaca-se que não foi possível verificar alteração nos níveis de cinza (Figura 62), nem no espectro de Walvelet (Figura 63), que caracterizasse diferença de porosidade ao longo da linha analisada.

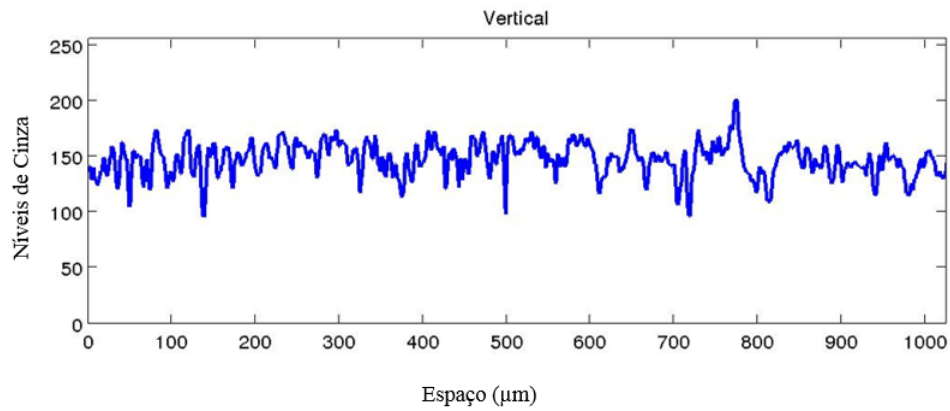


Figura 62 Níveis de cinza analisados na linha vertical

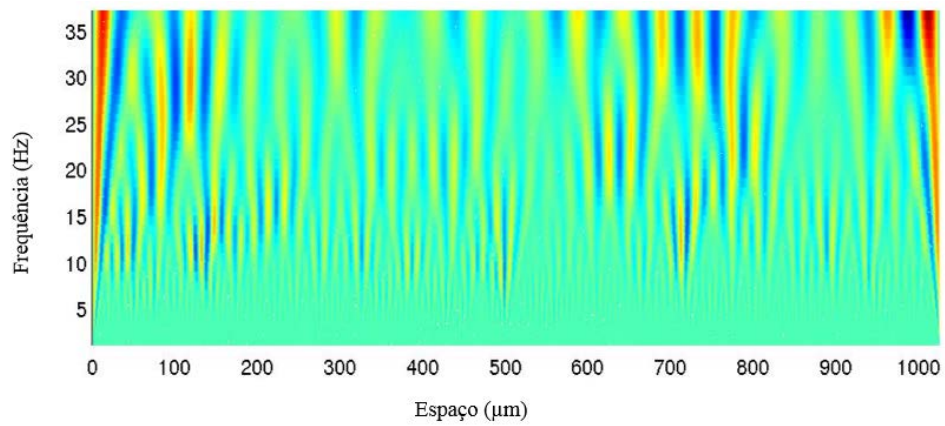


Figura 63 Espectro de Wavelets da linha vertical

#### 4.8.2.2 Maior profundidade (P2)

A Figura 64 apresenta o resultado da amplitude dos níveis de cinza das linhas horizontais superior e inferior, respectivamente, para ponteira B.

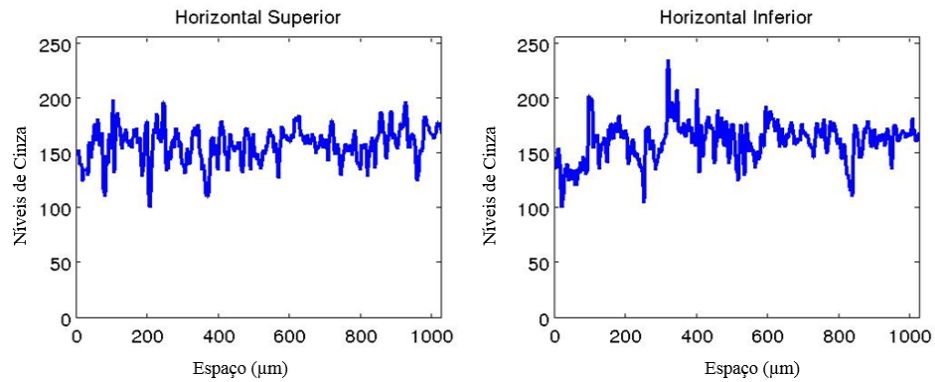


Figura 64 Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B)

Plotaram-se os espectros de Wavelets dos sinais (linhas) superior e inferior conforme a Figura 65.

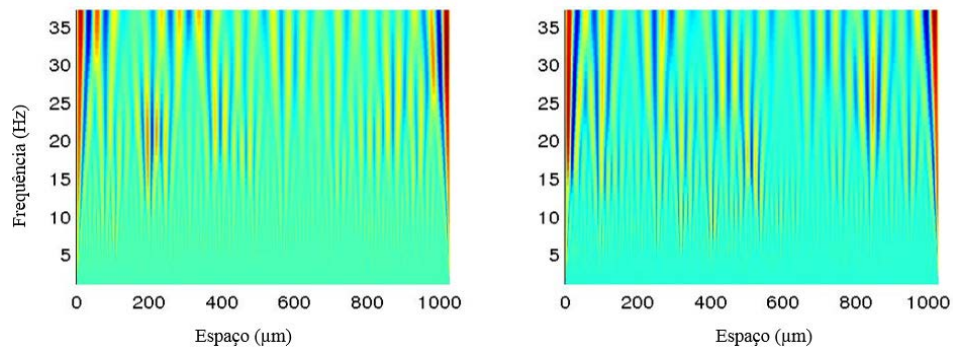


Figura 65 Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B)

A sobreposição dos níveis de cinza apresentam-se, na Figura 66, em que se observam semelhanças entre as duas linhas analisadas. Dessa forma, não foi possível identificar alteração da porosidade na lateral do sulco.

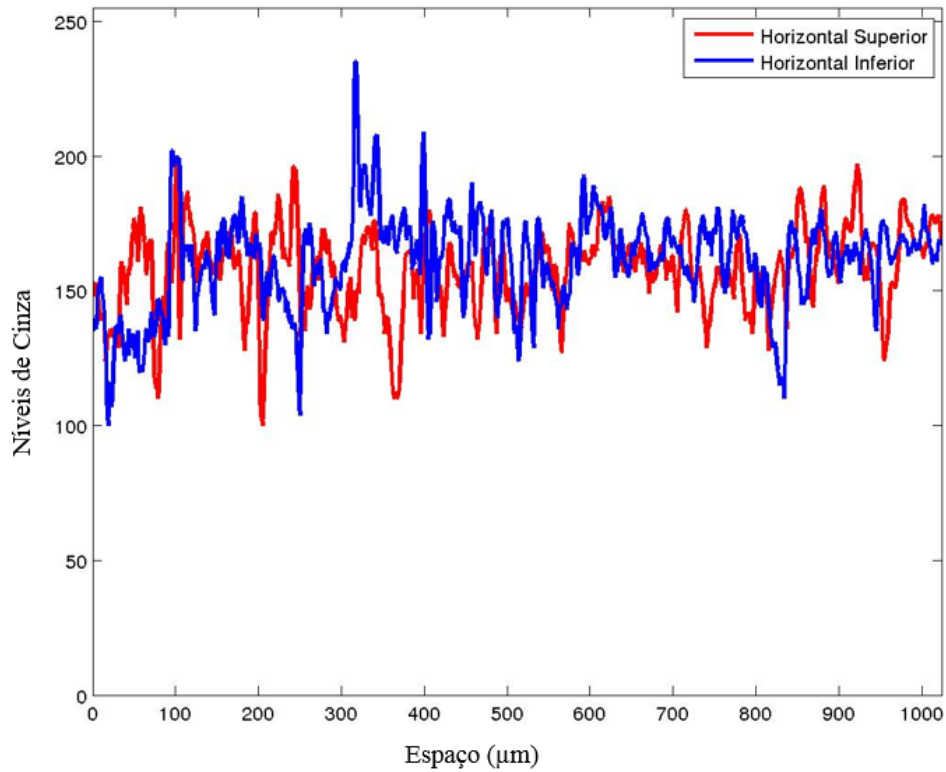


Figura 66 Níveis de cinza das análises horizontais

Para linha vertical, destaca-se que não foi possível verificar alteração nos níveis de cinza (Figura 67), nem no espectro de Walvelet (Figura 68), que caracterizasse diferença de porosidade ao longo da linha analisada.

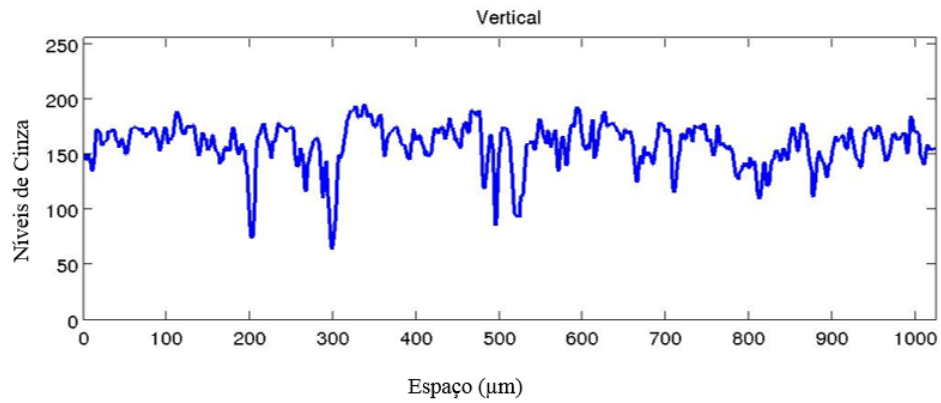


Figura 67 Níveis de cinza analisados na linha vertical

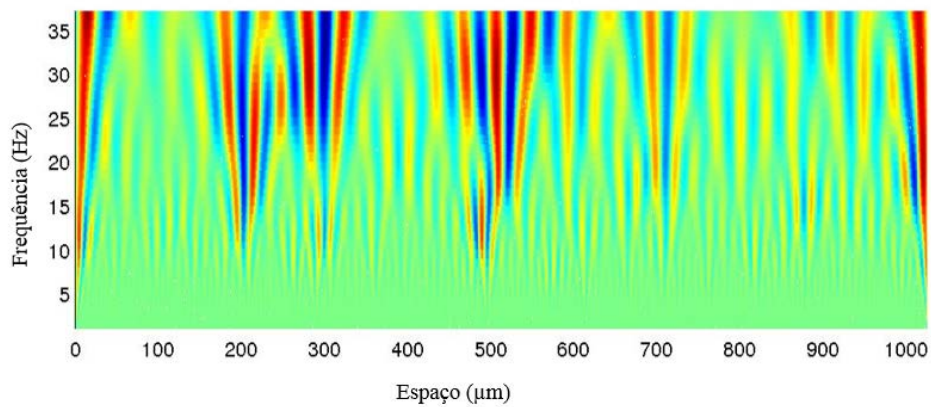


Figura 68 Espectro de Wavelets da linha vertical

### 4.8.3 Modelo C

Os resultados da porosidade, obtidos por meio da transformada de Wavelet, estão apresentados a seguir em duas profundidades para o modelo C.

#### 4.8.3.1 Menor profundidade (P1)

A Figura 69 apresenta o resultado da amplitude dos níveis de cinza das linhas horizontais superior e inferior, respectivamente, para ponteira C.

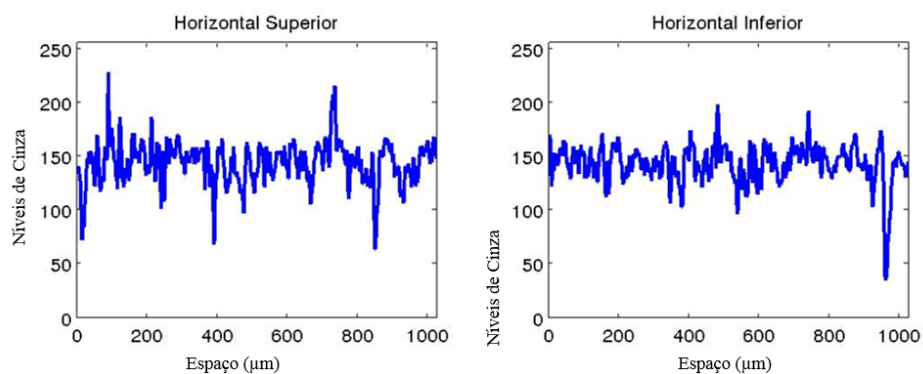


Figura 69 Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B)

Plotaram-se os espectros de Wavelets dos sinais (linhas) superior e inferior conforme a Figura 70.

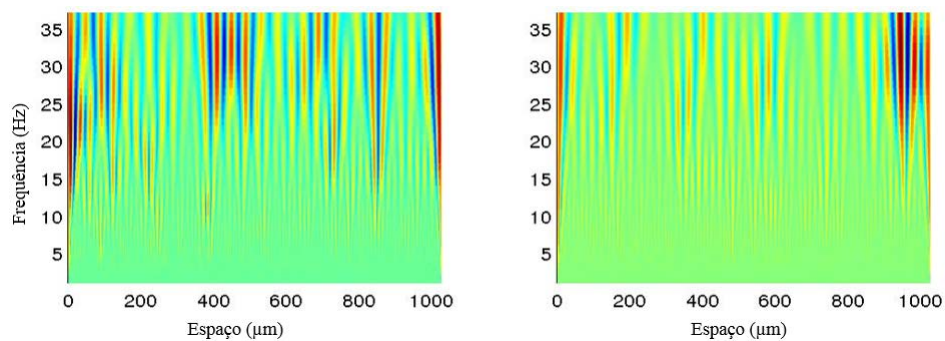


Figura 70 Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B)

A sobreposição dos níveis de cinza apresentam-se, na Figura 71, em que se observam semelhanças entre as duas linhas analisadas. Dessa forma, não foi possível identificar alteração da porosidade na lateral do sulco.

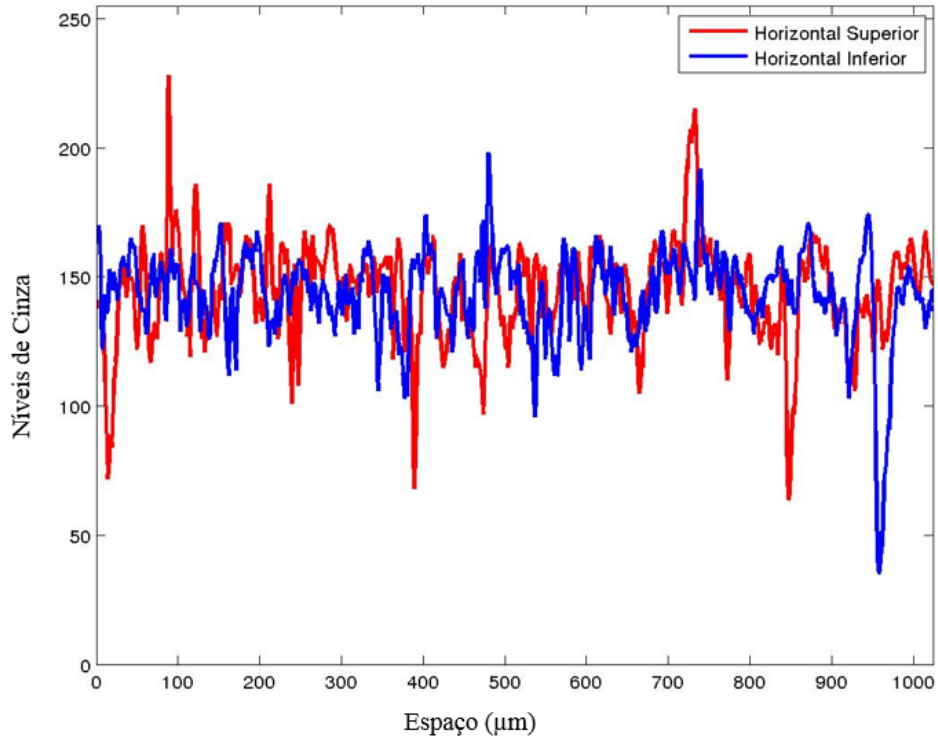


Figura 71 Níveis de cinza das análises horizontais

Para linha vertical, destaca-se que não foi possível verificar alteração nos níveis de cinza (Figura 72), nem no espectro de Walvelet (Figura 73), que caracterizasse diferença de porosidade ao longo da linha analisada.

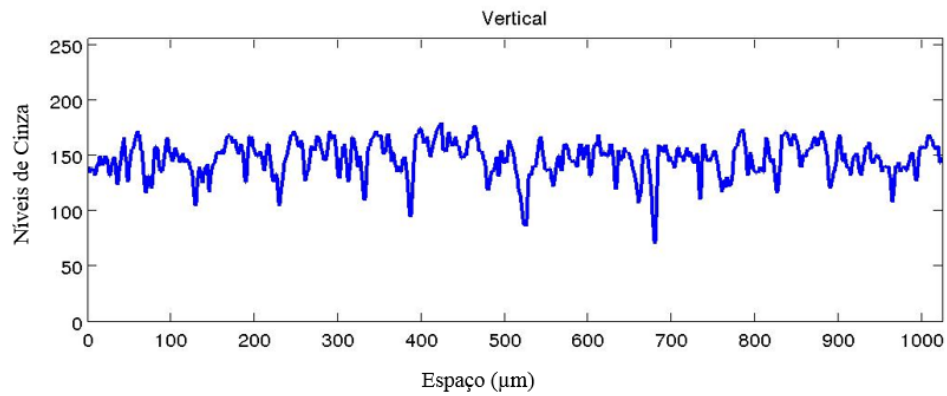


Figura 72 Níveis de cinza analisados na linha vertical

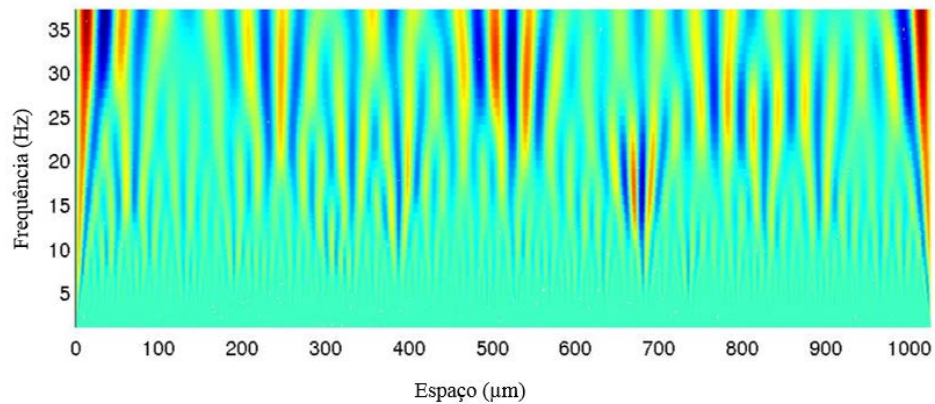


Figura 73 Espectro de Wavelets da linha vertical

#### 4.8.3.2 Maior profundidade (P2)

A Figura 74 apresenta o resultado da amplitude dos níveis de cinza das linhas horizontais superior e inferior, respectivamente, para ponteira C.



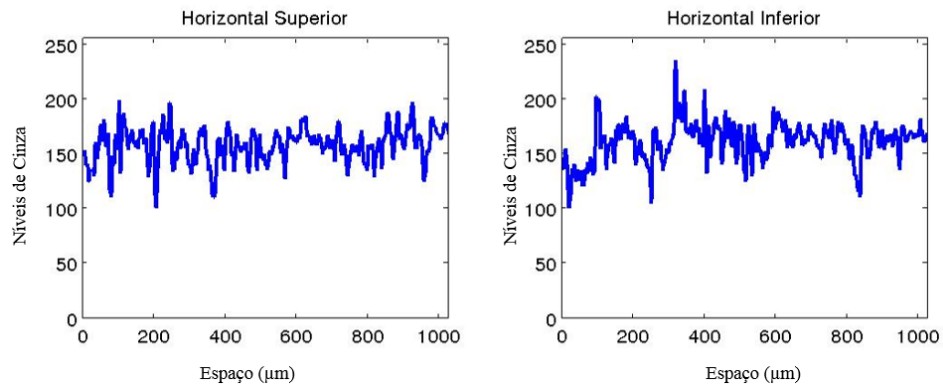


Figura 74 Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B)

Plotaram-se os espectros de Wavelets dos sinais (linhas) superior e inferior conforme a Figura 75.

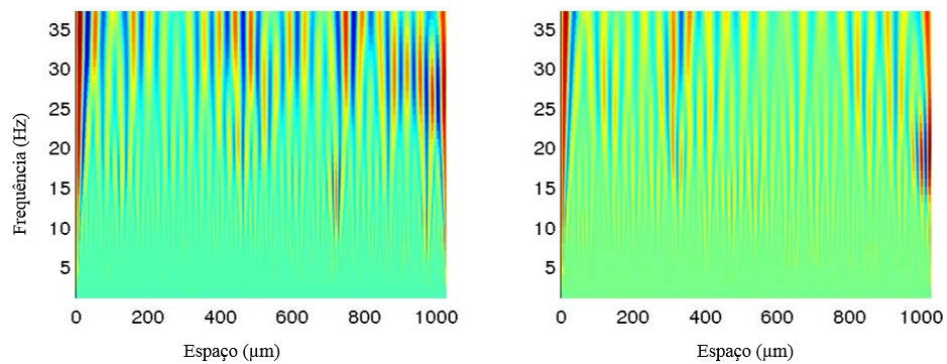


Figura 75 Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B)

A sobreposição dos níveis de cinza apresentam-se, na Figura 76, em que se observam semelhanças entre as duas linhas analisadas. Dessa forma, não foi possível identificar alteração da porosidade na lateral do sulco.

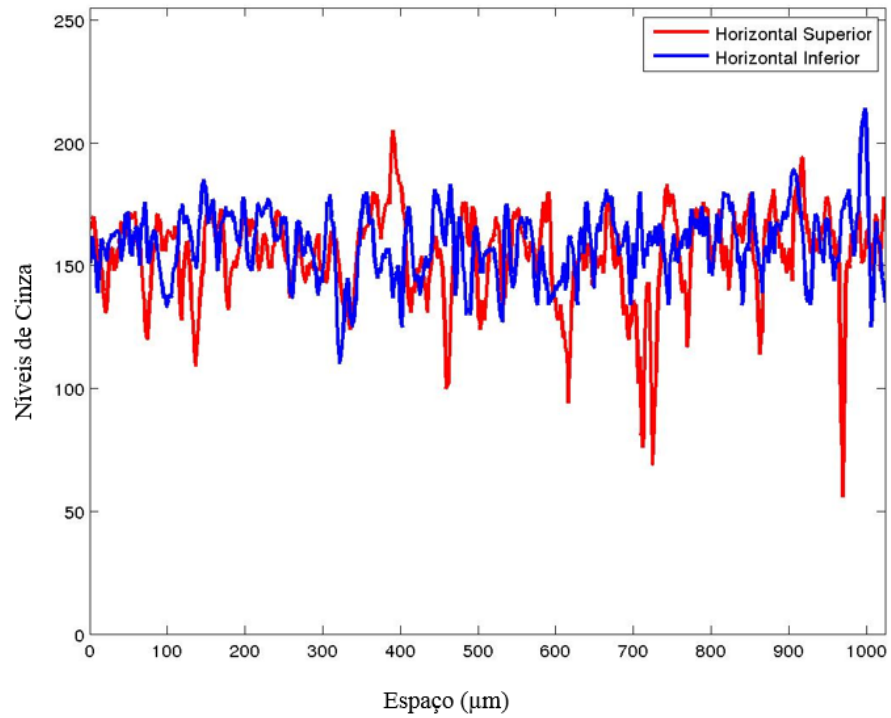


Figura 76 Níveis de cinza das análises horizontais

Para linha vertical, destaca-se que não foi possível verificar alteração nos níveis de cinza (Figura 77), nem no espectro de Walvelet (Figura 78), que caracterizasse diferença de porosidade ao longo da linha analisada.

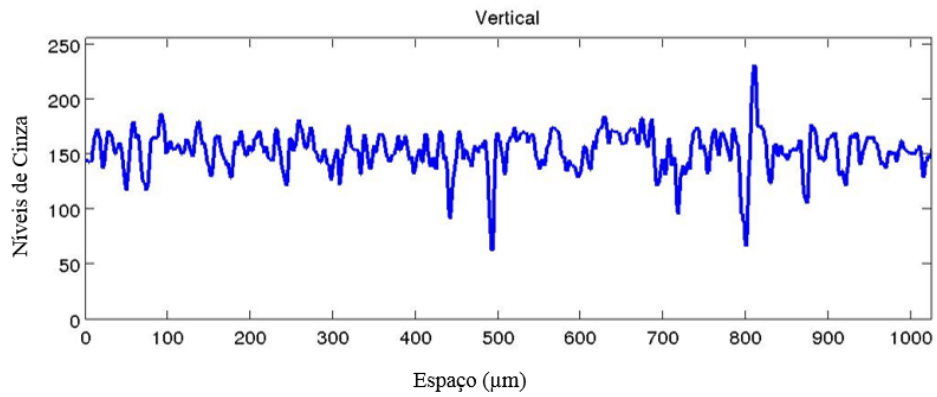


Figura 77 Níveis de cinza analisados na linha vertical

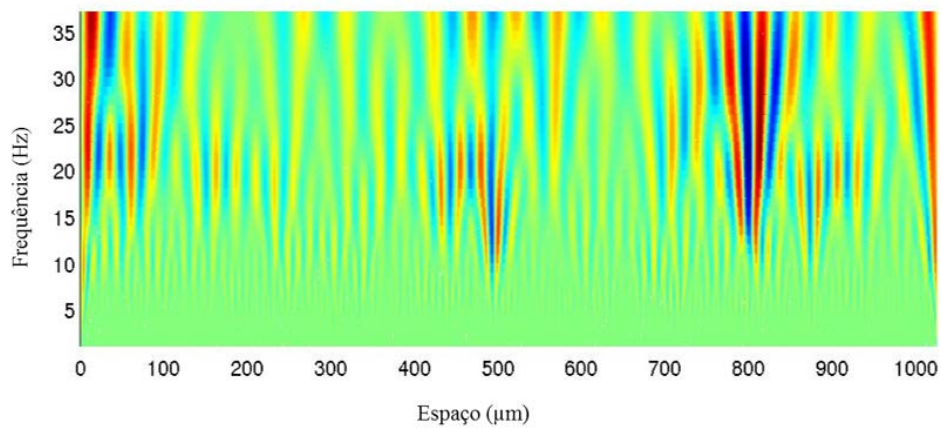


Figura 78 Espectro de Wavelets da linha vertical

#### 4.8.4 Modelo D

Os resultados da porosidade, obtidos por meio da transformada de wavelet, estão apresentados a seguir em duas profundidades para o modelo D.

#### 4.8.4.1 Menor profundidade (P1)

A Figura 79 apresenta o resultado da amplitude dos níveis de cinza das linhas horizontais superior e inferior, respectivamente, para ponteira D.

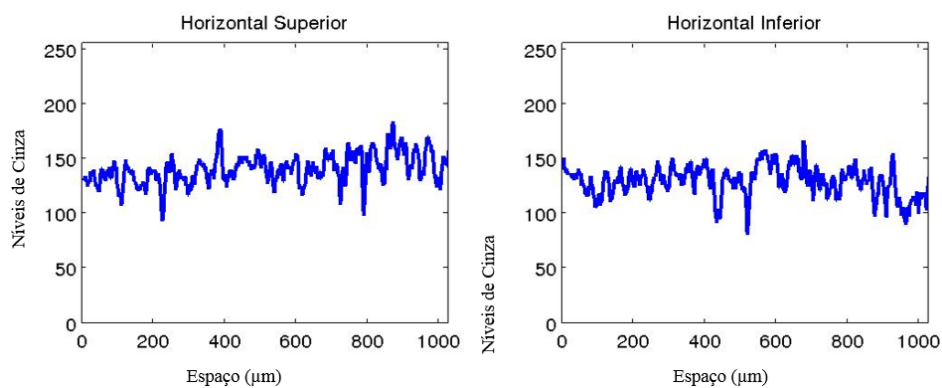


Figura 79 Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B)

Plotaram-se os espectros de Wavelets dos sinais (linhas) superior e inferior conforme a Figura 80.

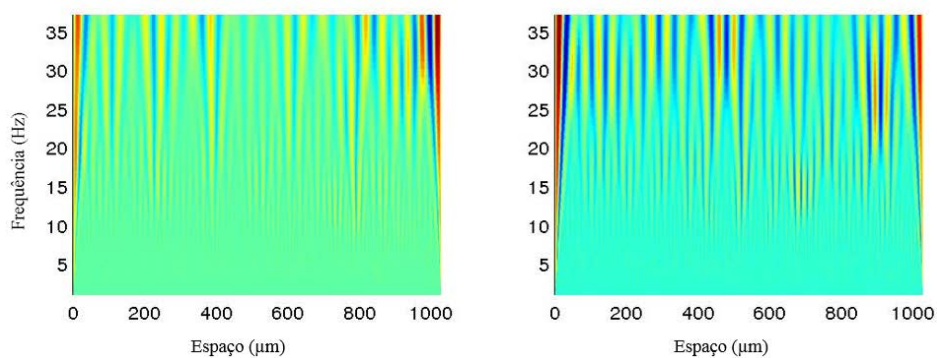


Figura 80 Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B)

A sobreposição dos níveis de cinza apresentam-se, na Figura 81, em que se observam semelhanças entre as duas linhas analisadas. Dessa forma, não foi possível identificar alteração da porosidade na lateral do sulco.

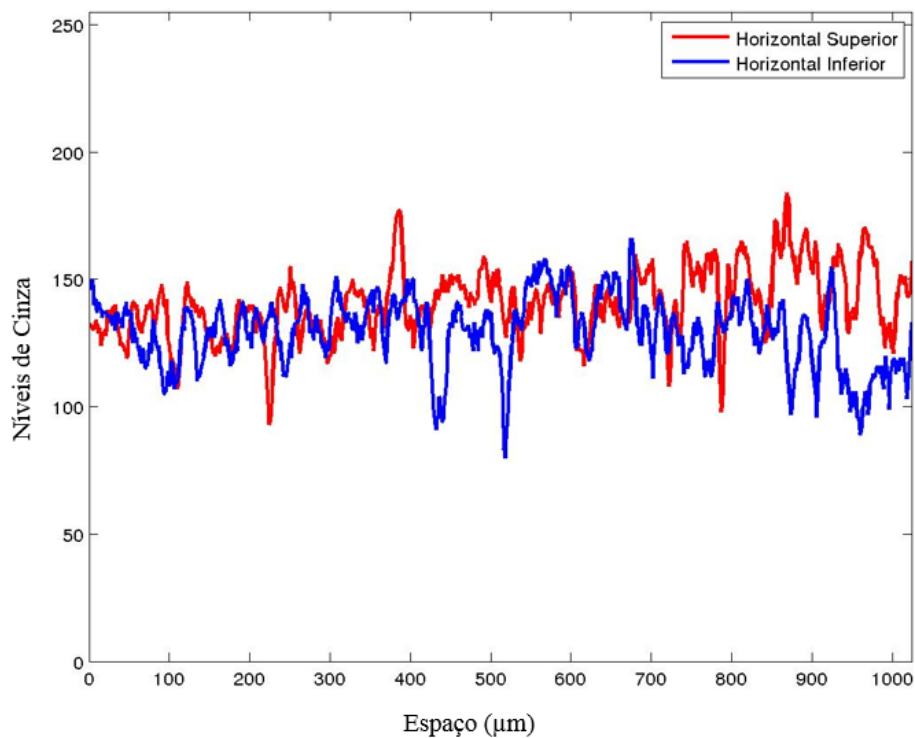


Figura 81 Níveis de cinza das análises horizontais

Para linha vertical, destaca-se que não foi possível verificar alteração nos níveis de cinza (Figura 82), nem no espectro de Walvelet (Figura 83), que caracterizasse diferença de porosidade ao longo da linha analisada.

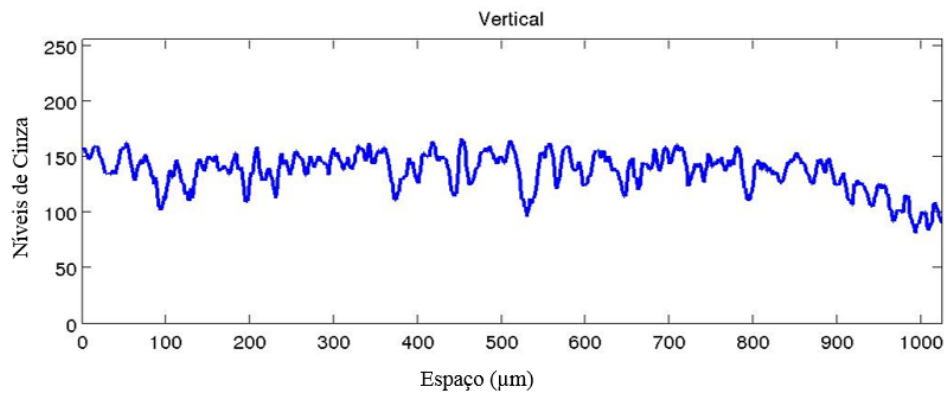


Figura 82 Níveis de cinza analisados na linha vertical

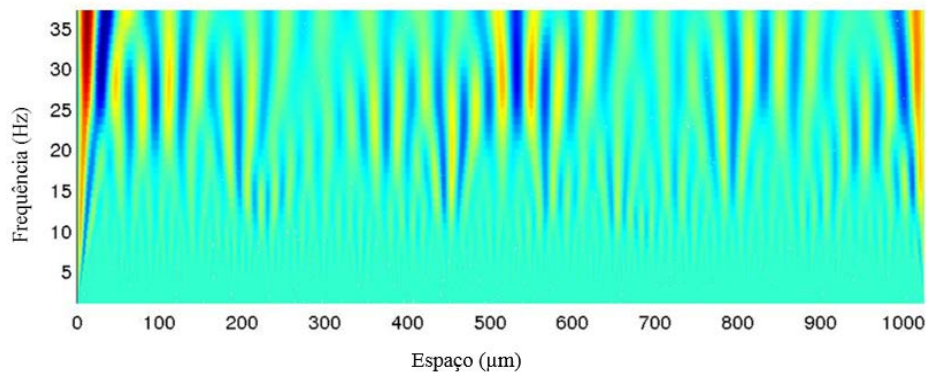


Figura 83 Espectro de Wavelets da linha vertical

#### 4.8.4.2 Maior profundidade (P2)

A Figura 84 apresenta o resultado da amplitude dos níveis de cinza das linhas horizontais superior e inferior, respectivamente, para ponteira D.

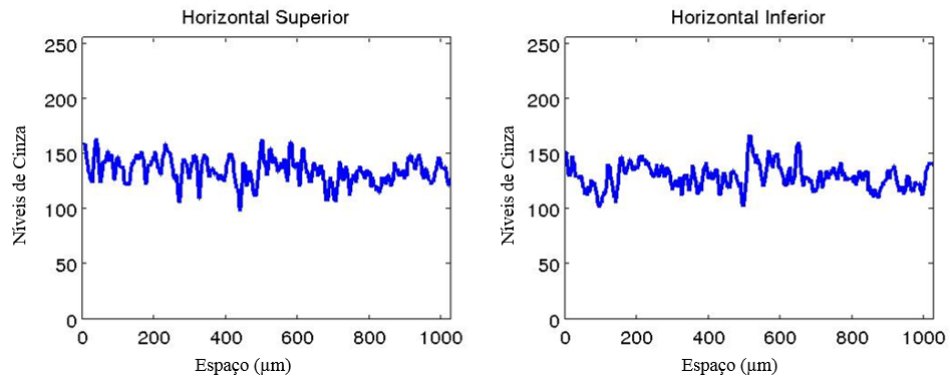


Figura 84 Linha de amplitude da escala de cinza dos sinais horizontal superior (A) e horizontal inferior (B)

Plotaram-se os espectros de Wavelets dos sinais (linhas) superior e inferior conforme a Figura 85.

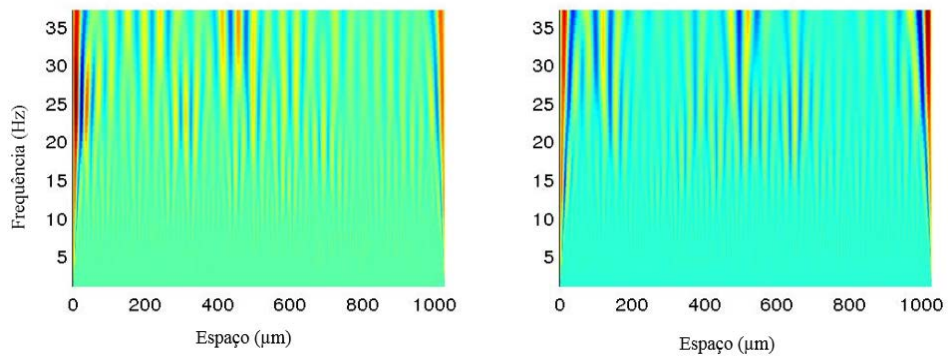


Figura 85 Espectro de Wavelets das linhas horizontais superior (A) e inferior (B)

A sobreposição dos níveis de cinza apresentam-se, na Figura 86, em que se observam semelhanças entre as duas linhas analisadas. Dessa forma, não foi possível identificar alteração da porosidade na lateral do sulco.

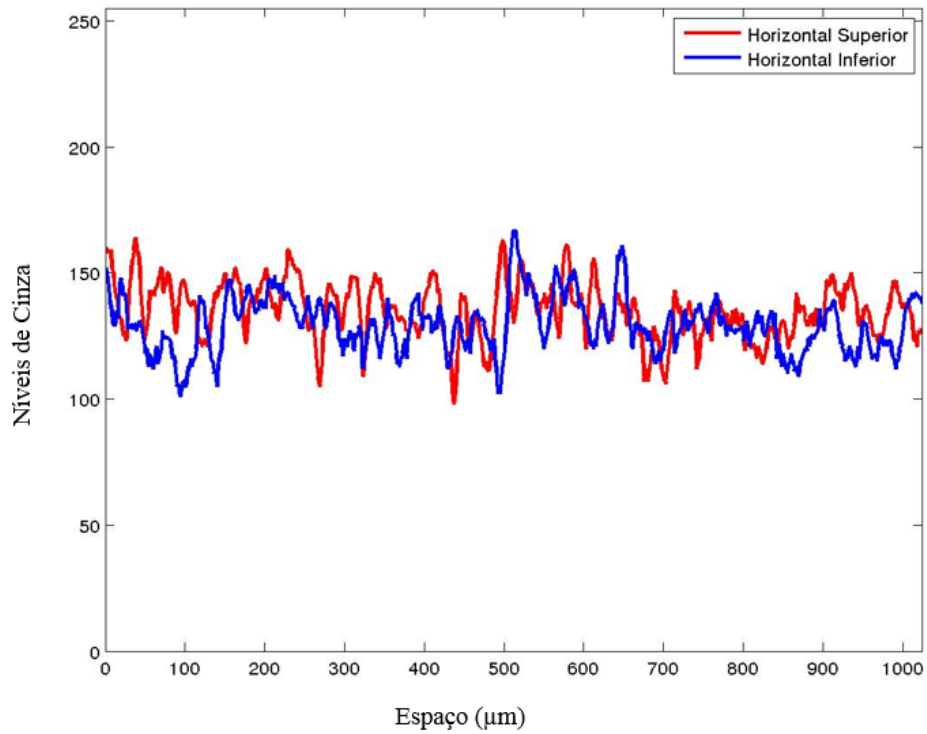


Figura 86 Níveis de cinza das análises horizontais

Para linha vertical, destaca-se que não foi possível verificar alteração nos níveis de cinza (Figura 87), nem no espectro de Walvelet (Figura 88), que caracterizasse diferença de porosidade ao longo da linha analisada.



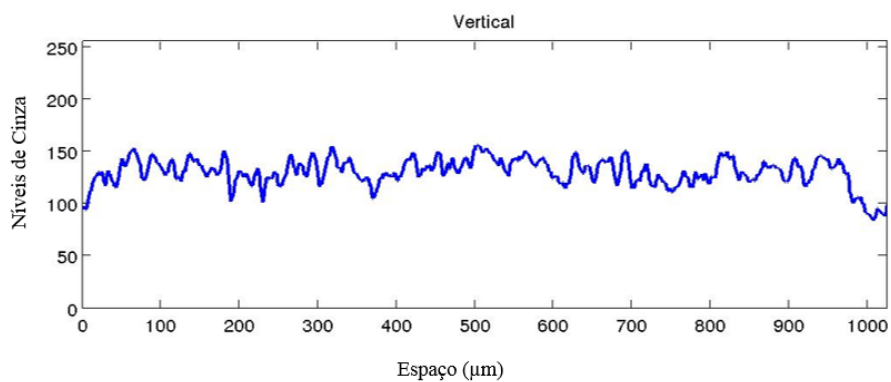


Figura 87 Níveis de cinza analisados na linha vertical

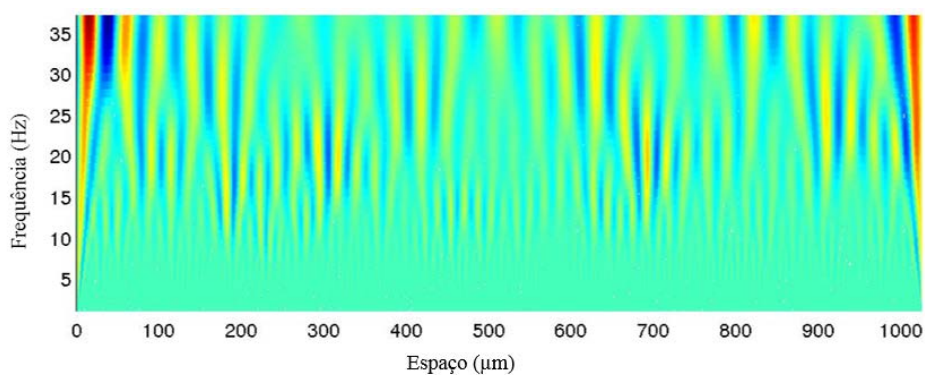


Figura 88 Espectro de Wavelets da linha vertical

Por meio da análise das imagens, com auxílio da transformada de Wavelet, não foi possível identificar alteração na porosidade do solo nas laterais do sulco de semeadura pela passagem dos diferentes modelos de ponteiros da haste sulcadora. Tal fator pode estar associado à condição ideal de trabalho (solo friável) no momento em que foi realizada a operação.

## 5 CONCLUSÕES

A demanda de tração das hastes sulcadoras aumentou com o incremento da profundidade, mesmo equipada com ponteiros de diferentes geometrias de ataque no solo.

A área de solo mobilizada aumenta com a maior profundidade de trabalho da haste sulcadora para todos os modelos de ponteiros avaliados.

A geometria de ataque da ponteira tem influência na área de solo mobilizada.

O modelo A, embora apresente maior largura, demandou maior demanda de tração, apresentou maior área de solo mobilizada, porém atuou na menor profundidade na segunda condição de trabalho.

Os modelos B e C aprofundaram-se mais, nas mesmas condições de trabalho da semeadora, em relação ao modelo D comercial.

O modelo B apresentou maior área de solo mobilizada, maior profundidade de atuação e demanda de tração semelhante ao modelo D comercial.

A porosidade do solo, nas laterais do sulco, a 10 mm da passagem da ponteira não sofreu alterações.

## REFERÊNCIAS

- ALBÓNIGA-GIL, R. A. et al. Diseño de brazos de subsolador dinamométricos para la ejecución de ensayos en canal de suelos. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, La Habana, v. 20, n. 3, p. 49-52, jul./set. 2011.
- ALESSI, J.; POWER, J. F. Corn emergence in relation to soil temperature and seeding depth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 63, p. 717-719, 1971.
- AMADO, T. J. C. et al. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Quality & Quantity**, Amsterdam, v. 1, n. 1, p. 189-197, Jan./Mar. 2001.
- ARAÚJO, A. M.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, n. 2, p. 337-345, mar./abr. 2004.
- BERTOL, I. et al. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 555-560, jul./set. 2001.
- BLAINSKI, É. et al. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, n. 3, p. 975-983, maio/jun. 2008.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2<sup>nd</sup> ed. Madison: ASA/SSSA, 1986. p. 363-375.
- BONINI, A. K. et al. Atributos físico-hídricos e produtividade de trigo em um Latossolo sob estados de compactação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 9, p. 1543-1548, set. 2011.
- BORDIGNON, J. **Projeto, construção e desenvolvimento de transdutores para medição de esforços em semeadoras-adubadoras**. 2005. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- BOWLES, J. A. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1986. 218 p.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. v. 1, 234 p.

CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 7, p. 394-400, mar./abr. 2007.

CEPIK, C. T. C. et al. Força de tração e mobilização do solo por hastes sulcadoras de semadoras-adubadoras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 5, p. 561-566, maio 2010.

CHAUDHURI, D. Performance evaluation of various types of furrow openers on seed drills: a review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 79, n. 2, p. 125-137, June 2001.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira, 2012**. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12\\_09\\_06\\_09\\_18\\_33\\_boletim\\_graos\\_-\\_setembro\\_2012.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_09_06_09_18_33_boletim_graos_-_setembro_2012.pdf)>. Acesso em: 27 jun. 2013.

CONTE, O. et al. Demanda de tração em haste sulcadora na integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo e sua relação com o estado de compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 220-228, jan./abr. 2007.

CORRÊA, J. C. Limites de consistência de solos da Amazônia Central e sua importância agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, p. 917-921, 1982.

CUNHA, J. P. A. R. da; VIEIRA, L. B.; MAGALHÃES, A. C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 10, n. 1/4, p. 1-7, 2002.

DARMORA, D. P.; PANDEY, K. P. Evaluation of performance of furrow openers of combined seed and fertiliser drills. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 34, n. 2, p. 127-139, 1995.

DENARDIN, J. E. et al. Sistema plantio direto: fator de potencialidade da agricultura tropical brasileira. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. (Ed.). **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2008. v. 1, p. 1251-1273.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from Soil compression curves. **Soil Technology**, Lansing, v. 8, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.

DRESCHER, M. S. et al. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 35, n. 5, p. 1713-1722, set./out. 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Tecnologias de produção de soja**: Paraná 2004. Disponível em: <<http://www.cnpsa.embrapa.br/producaosojaPR/manejo.htm>>. Acesso em: 5 abr. 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

\_\_\_\_\_. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

FREDDI, O. D. S. et al. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, n. 4, p. 627-636, jul./ago. 2007.

GODWIN, R. J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 97, n. 2, p. 331-340, 2007.

GODWIN, R. J.; SPOOR, G. Soil failure with narrow tines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 22, n. 3, p. 213-228, Sept. 1977.

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

GUADAGNINI, P. H.; ROCHA, F. S. da; BARLETTE, E. V. Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força. **Latin-American Journal of Physics Education**, Mexico, v. 5, n. 4, p. 753-762, dez. 2011.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic, 1980. 413 p.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981. 733 p.

JULIÃO, L. G. F. et al. Atributos mecânicos e erosão por salpicamento em amostras de latossolo vermelho-amarelo sob efeito de vinhaça. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 1, p. 19-27, jan./fev. 2011.

KLEIN, V. A. Densidade relativa: um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 5, n. 1, p. 26-32, dez. 2006.

KLEIN, V. A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em área sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 395-398, maio/jun. 1995.

KLEIN, V. A. et al. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 7, p. 1550-1556, jul. 2010.

LANZANOVA, M. E. et al. Atributos físicos de um argissolo em sistemas de culturas de longa duração sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, n. 4, p. 1333-1342, jul./ago. 2010.

LINDSTROM, M. J.; PAPENDICK, R. I.; KOEHLER, F. E. A model to predict winterwheat emergence as affected by soil temperature, water potential and depth planting. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 137-141, 1976.

MACHADO, A. L. T. **Previsão do esforço de tração para ferramentas estreitas em solos do Rio Grande do Sul**. 2001. 172 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MAZURANA, M. et al. Sistemas de preparo de solo: alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 35, n. 4, p. 1197-1206, jul./ago. 2011.

MION, R. L. et al. Análise tridimensional de esforços em elementos rompedores de semeadoras de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 5, p. 1414-1419, ago. 2009.

NICOLOSO, R. D. S. et al. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, n. 4, p. 1723-1734, jul./ago. 2008.

OLIVEIRA, V. S. et al. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 5, p. 914-920, set. 2010.

PALMA, M. A. Z. et al. Efeito da profundidade de trabalho das hastes sulcadoras de uma semeadora-adubadora na patinação, na força de tração e no consumo de combustível de um trator agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 5, p. 1320-1326, set./out. 2010.

PEREIRA, J. O. et al. Resistência do solo à penetração em função do sistema de cultivo e teor de água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 171-174, jan./abr. 2002.

PIRES, B. S. **Capacidade de suporte de carga e resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob pastagens ao longo do tempo**. 2012. 113 p. Tese (Doutorado em Recursos Ambientais e Uso da Terra) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

POLANSKY, L. et al. From moonlight to movement and synchronized randomness: fourier and wavelet analyses of animal location time series data. **Ecology**, Durham, v. 5, p. 1506-1518, May 2010.

REICHERT, J. M. et al. Mecânica do solo. In: LIER, Q. J. van (Ed.). **Física do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 241-281.

REIS, E. F. et al. Avaliação do contato solo-semente em um solo argiloso sob plantio direto, com diferentes teores de água do solo. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 10, n. 1/4, p. 31-39, 2002.

ROCHA, W. W. **Resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de voçorocas em solos da região de Lavras, MG**. 2003. 101 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

SANTO, A. C. E. et al. Desenvolvimento de um dispositivo para medição de esforços em hastes de semeadoras de plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 288-298, mar./abr. 2010.

SCHNEIDER, E. C.; GUPTA, S. C. Corn emergence as influenced by soil temperature, matric potential and aggregate size distribution. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 49, n. 2, p. 415-422, 1985.

SEVERIANO, E. D. C. et al. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II., quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 414-423, jun. 2010.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 579-585, jul./set. 2006.

SILVA, R. B. et al. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of Sao Paulo State, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 265-270, 2009.

\_\_\_\_\_. Resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, n. 1, p. 165-173, jan./fev. 2004.

SILVEIRA, D. D. C. et al. Relação umidade versus resistência à penetração para um argissolo amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, n. 3, p. 659-667, maio/jun. 2010.

SILVEIRA, J. C. M. et al. Profundidade de sulco, área de solo mobilizada e força de tração de uma semeadora-adubadora em razão da velocidade de deslocamento. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 58, n. 3, p. 293-298, maio/jun. 2011.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 203-211, 2008.

SIX, J. S. et al. Review article soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effects of no-tillage. **Sciences**, New York, v. 22, p. 755-775, Oct. 2002.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8<sup>th</sup> ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503 p.



SOWERS, G. F. Consistency. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 391-399.

SPOOR, G.; GODWIN, R. J. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 23, n. 3, p. 243-258, Sept. 1978.

TAVARES, U. E. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, p. 1206-1214, 2012.

TESSIER, S. et al. No-till seeders effects on seed zone properties and wheat emergence. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 34, n. 3, p. 733-739, 1991a.

\_\_\_\_\_. Zero-tillage furrow opener effects on seed environment and wheat emergence. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 21, n. 3/4, p. 347-360, 1991b.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 79, n. 1, p. 61-78, Jan. 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: EMBRAPA, 1999. 58 p. (Circular Técnica, 23).

VASCONCELOS, R. F. B. D. et al. Limites de consistência e propriedades químicas de um latossolo amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, n. 3, p. 639-648, maio/jun. 2010.

YAO, Z. et al. Crop performance as affected by three opening configurations for no-till seeder in annual double cropping regions of northern China. **Soil Research**, Rome, v. 47, n. 8, p. 839-847, Aug. 2009.