



UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

**MARIANA DE OLIVEIRA E SILVA**

**TÉCNICA DE PULSO ULTRASSÔNICO PARA  
AVALIAÇÃO DE DANOS MECÂNICOS EM  
GRÃOS DE CAFÉ BENEFICIADOS**

**LAVRAS-MG**  
2014

**MARIANA DE OLIVEIRA E SILVA**

**TÉCNICA DE PULSO ULTRASSÔNICO PARA AVALIAÇÃO DE  
DANOS MECÂNICOS EM GRÃOS DE CAFÉ BENEFICIADOS**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras  
como parte das exigências do  
Programa de Pós- Graduação  
em Engenharia Agrícola, área  
de concentração em  
Construções, Ambiente e  
Tratamento de Resíduos, para a  
obtenção do título de Mestre.

**Orientador**

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes

**Coorientadores**

Dra. Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa

Pesquisador Dr. Marcelo Ribeiro Malta

**LAVRAS – MG**

**2014**

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

Silva, Mariana de Oliveira e.

Técnica de pulso ultrassônico para avaliação de danos mecânicos  
em grãos de café beneficiados / Mariana de Oliveira e Silva. –  
Lavras : UFLA, 2014.

65 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Francisco Carlos Gomes.

Bibliografia.

1. Stress wave timer. 2. Café. 3. Módulo de elasticidade. I.  
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 681.7631

**MARIANA DE OLIVEIRA E SILVA**

**TÉCNICA DE PULSO ULTRASSÔNICO PARA AVALIAÇÃO DE  
DANOS MECÂNICOS EM GRÃOS DE CAFÉ BENEFICIADOS**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras  
como parte das exigências do  
Programa de Pós- Graduação  
em Engenharia Agrícola, área  
de concentração em  
Construções, Ambiente e  
Tratamento de Resíduos, para a  
obtenção do título de Mestre.

**APROVADA em 31/07/2014**

Dra. Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa

Empraba

Pesquisador Dr. Marcelo Ribeiro Malta

Epamig

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes – UFLA

(Orientador)

**LAVRAS – MG**

**2014**

*Para Deus e as pessoas que Ele enviou para cuidar de mim*

*DEDICO*

## AGRADECIMENTOS

Há tanto pelo que agradecer neste momento. Mas primeiramente agradeço a Deus, que me deu o dom da vida e colocou em meu caminho tantas pessoas especiais, que de uma forma ou de outra me apoiaram para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade concedida para a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu orientador, professor Francisco Carlos Gomes, que acreditou em meu potencial e depositou sua confiança em mim desde antes do início deste projeto. Orientando-me com maestria e paciência, trazendo grandes ensinamentos e possibilitando que este momento chegasse.

À professora Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa, que me coorientou com grande sabedoria e disponibilidade. Abrindo portas e caminhos que trouxeram grandes contribuições na realização deste trabalho.

Às secretárias do programa, Greice da Costa Oliveira, Helem Cristina Carmo e Fernanda Botelho e todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, que contribuíram tanto para a minha formação profissional.

Ao pesquisador Marcelo Ribeiro Malta do Laboratório de Qualidade do Café Dr. Alcides Carvalho, da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, que sempre esteve a disposição para me auxiliar e dar continuidade ao trabalho.

Aos professores Flávio Meira Borém e José Tarcísio Lima, que carinhosamente disponibilizaram recursos para meu projeto.

Ao Laboratório Central de Sementes (LCSEM), com isto incluo funcionários e alunos, que me receberam com cordialidade e contribuíram ricamente para este trabalho.

À Giselle Figueiredo Abreu, que se disponibilizou de coração e trouxe grande contribuição a este trabalho.

Aos meninos do Laboratório de Mecânica e Resistência dos Materiais, pela convivência e auxílio quando precisei.

Aos membros do Laboratório de Conforto Animal, do Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas e do CEDIA, pela amizade, pelo compartilhamento de informações e pelo incentivo.

Aos meus amados pais, Maria Inês e Juarez, minha eterna gratidão pela vida, apoio e confiança depositada em meus estudos.

À minha irmã, Ana Consuelo, pela convivência e cumplicidade em todos os momentos da minha vida.

Ao meu namorado Guilherme, pelo carinho, amor, atenção e a paciência a mim devotada – em momentos de dúvida sempre pude contar com você ao meu lado.

Aos tios e tias, primos e primas, que sempre estavam preocupados e na torcida para o meu crescimento profissional. Assim como minha querida avó Alice e meu avô Pedro.

## RESUMO

O café possui grande importância econômica para o Brasil, mas ainda faltam importantes estudos para o seu armazenamento, de forma que a qualidade do grão mantenha-se durante este período. O conhecimento das características físicas do grão de café permite a transição do modelo de armazenamento convencional em sacarias para o armazenamento em silos e como medida indireta da melhoria e conservação da qualidade do grão armazenado. O módulo de elasticidade permite comparações de resistência do material. As variações deste ocorrem devido sua composição química, microestruturas e defeitos do material, podendo ser utilizado como indicador da integridade física do grão. Nesse contexto, este trabalho foi realizado com o intuito de se determinar o módulo de elasticidade de uma massa de grãos de café pelo método de ensaio não destrutivo. A técnica de pulso ultrassônico é proposta como alternativa para obtenção do módulo de elasticidade de forma simples. Para tanto um silo modelo foi construído, reproduzindo as condições de armazenamento, e os valores do módulo de elasticidade foram determinados. Os valores obtidos pelo *Stress Wave Timer* se encontram entre 2,54 a 4,23 MPa, com carga máxima exercida de 8,32 kN e pressão vertical calculada foi de 1,526 kPa. Para avaliar o impacto das condições de armazenamento testes laboratoriais, geralmente aplicados em sementes, foram realizados. O teste de tetrazólio aplicado ao endosperma para apurar danos externos foi capaz de detectar um aumento devido às cargas aplicadas, entretanto, os outros testes, condutividade elétrica e raios-X, não detectaram aumento de danos internos aos grãos após as cargas, o que indica que este valor de pressão vertical pode ser utilizado seguramente em armazenamento de café.



Palavras-chave: Módulo de Elasticidade. Café. Stress Wave Timer.

### **ABSTRACT**

The coffee has big economic importance for Brazil, but there aren't yet researches for storage so the grain's quality will be kept during this period. The knowledge of physics characteristic to grain coffee would allow the transition of the conventional storage model to grain store and as an indirect measure of improving and preserving the quality of stored grain. The elasticity modulus allow to make comparison of strength material and the variations of this occurred by reason of your chemical composition, microstructure and material defects will can be used as indicator of physical integrity of grain. In this context, this work was realized with the intention of know the elasticity modulus of bulk grains of coffee, by the method of non-destructive testing. The ultrasonic pulse technique is a simple alternative for obtaining the modulus. Thus a silo model was built to reproducing the conditions of storage, and the values of the elastic modulus measured. The values obtained with the Stress Wave Timer are among 2,54 to 4,23 MPa, and maximum load applied was 8.32 kN and vertical pressure was calculated in 1,526 kPa. To assess the impact of storage conditions, laboratory tests generally applied to seeds, were performed. The tetrazolium test applied in endosperm to investigate external damage was able to find a increase because of the loads applied, however, the others tests, electrical conductivity and X- rays, didn't identify increase in external damage in grains after the loads, this indicates that the value of the vertical pressure may be used safely for storing coffee.

Keywords: Elasticity Modulus. Coffee. Stress Wave Timer

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	15
2.1 Importância econômica.....	15
2.2 Propriedades reológicas e módulo de elasticidade .....	16
2.3 Danos mecânicos.....	20
2.4 A detecção e avaliação de danos mecânicos .....	21
2.4.1 Ensaio não destrutivo.....	22
2.4.1.1 Teste pela Técnica de Pulso Ultra Sônico.....	23
2.4.2 Teste de Compressão Uniaxial.....	26
2.4.3 Testes laboratoriais.....	28
2.4.3.1 Teste de Tetrazólio .....	28
2.4.3.2 Teste de Verde Rápido.....	30
2.4.3.3 Teste de Hipoclorito de Sódio .....	30
2.4.3.4 Teste de Condutividade Elétrica.....	31
2.4.3.5 Teste de Raios-X .....	33
2.4.3.6 SAS – Sistema de Análise de Sementes .....	35
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	36
3.1 Caracterização do experimento.....	36
3.2 Teste de Compressão Uniaxial.....	38
3.2 Técnica de Pulso Ultrassônico .....	40
3.4 Teste de Tetrazólio .....	43
3.5 Teste de Condutividade Elétrica .....	44
3.6 Teste de Raios – X .....	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	46
4.1 Teste de Compressão Uniaxial.....	46
4.2 Stress Wave Timer .....	49
4.3 Teste de Tetrazólio .....	53
4.4 Teste de Condutividade Elétrica .....	54
4.5 Teste de Raios-X.....	55
5. Conclusão .....	56
REFERÊNCIAS.....	57

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Configuração experimental para o ensaio de compressão. ....	38
Figura 2. Configuração experimental com a Máquina de Ensaio Universal e com o silo modelo preparado para o teste. UFLA, Lavras, MG, Brasil, 2014. ....	39
Figura 3. Stress Wave Timer. Modelo 239A, utilizado para o teste de pulso ultrassônico .....	40
Figura 4. Diagrama das alturas da aplicação do equipamento Stress Wave Timer. ....	42
Figura 5. Atribuição de notas aos danos evidenciados pelo teste de tetrazólio. Nota 1, grãos com área afetada menor que 25 %; Nota 2; grãos com área afetada entre 25 e 75%; Nota 3, grãos com área afetada maior que 75%.....	44

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1. Valores médios do Módulo de Elasticidade obtidos com o ensaio de compressão.....	46
Gráfico 2. Gráfico tensão-deformação fornecidos pela Máquina de Ensaio Universal equivalentes a repetição 3 de cada tratamento. a) Tratamento 1; b) Tratamento 2; c) Tratamento 3 .....	48
Gráfico 3. Valores médios do Módulo de Elasticidade obtidos com o aparelho Stress Wave Timer. ....	50
Gráfico 4. Variação do Módulo de Elasticidade em função da Densidade. a) Leitura a 100 mm. b) Leitura a 200 mm. c) Leitura a 300 mm. ....	52
Quadro 1. Módulo de Deformação em frutos de café .....	20
Quadro 2. Delineamento do movimento da mesa durante o ensaio de compressão.....	40
Tabela 1. Módulo de Elasticidade de grãos agrícolas. ....	19
Tabela 2. Índice de Severidade dos Danos (%) dos grãos, UFLA, Lavras, MG, Brasil, 2014. ....	53
Tabela 3. Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ de amostra) dos grãos, UFLA, Lavras, MG, Brasil, 2014.....	54
Tabela 4. Danos internos (%) nos grãos de café avaliados por imagens de raios-x, UFLA, Lavras, MG, Brasil, 2014.....	55

## 1 INTRODUÇÃO

O maior produtor e exportador mundial de café é o Brasil. Este produto possui um grande peso na economia do país que possui o PIB sustentado pelo agronegócio. Essa participação na economia justifica a busca de inovações tecnológicas visando à melhoria do índice de produtividade e da qualidade do café, com redução do custo de produção e agregando valores.

Com o surgimento da globalização ocorreu uma maior pressão às indústrias para reduzirem os custos de produção e o aprimoramento da qualidade de seus produtos. Nas agroindústrias, incluindo aquelas que envolvem o armazenamento de café, a situação não é diferente. O conhecimento do comportamento do grão serve como embasamento para soluções de redução de custo e aumento da qualidade.

A grande produção exige uma pós-colheita bem feita e um armazenamento de qualidade. O beneficiamento numa unidade moderna deve ser realizado por máquinas projetadas com base nas características dos contaminantes a serem retirados e nas propriedades físicas e mecânicas do café. O uso inadequado dos equipamentos ou equipamentos inadequados para o beneficiamento e a movimentação do produto dentro de uma unidade pode provocar danos mecânicos e acarretar em perda do produto. O armazenamento tem como objetivo básico manter a qualidade do produto. Cafés são tradicionalmente armazenados em sacarias dentro de armazéns, entretanto, devido ao aumento da produção novas tecnologias de armazenagem têm sido pesquisadas. A granelização torna-se uma opção logisticamente viável, dependendo apenas de estudos para a construção de estruturas armazenadoras.

Para a comercialização dos produtos agrícolas existem legislações reguladoras, sendo que para o café existe a Instrução Normativa nº 8, de 11 de julho de 2003 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA

(BRASIL, 2003) que define padrões oficiais de classificação de origem vegetal, considerando os requisitos de identidade, qualidade, amostragem, modo de apresentação e marcação ou rotulagem. Para o caso de sementes, a sua produção é regulada de acordo com o documento Regras para Análise de Sementes – RAS do MAPA (BRASIL, 2009), que é o órgão responsável pela Rede Nacional de Laboratórios Agropecuários do Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária e possui dentre suas atribuições estabelecer, uniformizar e oficializar métodos para a realização de análises.

De acordo com da Instrução Normativa tomamos o conhecimento que a classificação do grão para armazenamento é feita com base numa avaliação visual, seguida por separação em peneiras e pela prova da xícara. Já a qualidade da semente é atestada por testes laboratoriais que demandam um custo elevado, implicando em um grande período de tempo para fornecer resultados. Ambos os testes são destrutivos e realizados em parcelas amostrais. O teste de qualidade é dependente da capacidade da semente em germinar, a semente de café é considerada recalcitrante, ou seja, alta suscetibilidade à perda de água, dificultando assim a sua viabilidade depois de longos períodos de armazenamento, impossibilitando este tipo de teste em grãos de café armazenados. Podemos considerar que o mundo do agronegócio não possui as respostas necessárias para grãos de café armazenados e ele necessita destas de uma forma ampla e no menor tempo possível, com um custo reduzido.

O dano mecânico é uma falha, um colapso na estrutura que ocorre em qualquer material devido a uma deformação originada pela atuação de forças. Em grãos de café o dano mecânico externo pode permitir que as bactérias, fungos e insetos entrem e destruam o interior acarretando em prejuízo, devido à perda de peso, e o dano interno pode inviabilizar a semente.

O grau de deformação de um material, como resposta a uma força de compressão, é considerado como uma das propriedades físicas mais importantes

em alimentos e é utilizado como uma medida de qualidade, característica para armazenagem e controle do processo de fabricação e avaliação do produto acabado. Por isso o estudo do comportamento mecânico de um material é importante, pois possibilita a especificação de cargas que o material pode receber de maneira segura, ou de cargas que máquinas de processamento poderão exercer sobre o material, para um determinado resultado.

Para as simulações e cálculos para a predição do comportamento de um material quando submetido a diferentes tipos de carregamento é necessário o conhecimento das propriedades mecânicas. O módulo de elasticidade do material destaca-se dentro dessas propriedades, visto que o seu conhecimento permite que sejam feitas comparações de resistência relativa de vários materiais. O conhecimento das características físicas de grãos de café permite melhorias para minimizar danos mecânicos que possam ocorrer na colheita, no processamento e no armazenamento.

Neste contexto é fundamental o desenvolvimento de uma metodologia não-destrutiva que realize a avaliação da qualidade de grãos de café armazenados, aplicada em grandes volumes. Para o desenvolvimento desta metodologia o conhecimento do módulo de elasticidade para grãos de café armazenados a granel surge como uma escolha economicamente viável, devido ao fato deste ser um indicativo de falha do material, servindo então como medida indireta da qualidade. Uma opção não destrutiva para determinar o módulo de elasticidade é a técnica de pulso ultrassônico, que possui um conceito simples, de fácil aplicação e que tem sido amplamente empregado na determinação do módulo de elasticidade em madeiras. Desta forma, objetivou-se neste trabalho a avaliação de uma técnica de avaliação não destrutiva, denominada pulso ultrassônico, e a determinação do módulo de elasticidade dos grãos de café armazenados a granel como medida indireta de qualidade.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Importância econômica**

Desde meados do séc. XVIII o café possui grande importância econômica, possuindo legislação específica e diversos estudos buscando a promoção da sustentabilidade da atividade. O café é fonte de receita de diversos municípios e o principal gerador de postos de trabalho no agronegócio nacional.

A Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2014) realiza levantamentos de campo para, depois de tratamento estatístico, sinalizar a tendência da produção de café, permitindo assim planejamentos para a safra. A segunda estimativa para o ano de 2014, referente ao período pré-colheita, estima para a produção cafeeira (espécie arábica e robusta) uma colheita de 44,57 milhões de sacas de 60 quilos de café beneficiado. A produtividade média do estado de Minas Gerais deverá atingir 22,97 sc/ha, sendo que no ano de 2013 a produtividade média foi de 23,8 sacas/ha. A redução observada da produção cafeeira foi de 16,9% . Este recuo deve-se principalmente a fatores climáticos, pois a redução de área plantada foi inferior a 4%.

Durante o ano de 2013 a Associação Brasileira da Indústria de Café - ABIC (2013) registrou uma pequena retração de - 1,23% do consumo interno de café no Brasil. Este valor indica uma estabilidade do consumo e mantém o número de sacas consumidas acima dos 20 milhões. Entretanto, antes do ano de 2014 a cafeicultura brasileira apresentou alta produção de sacas de café beneficiados, gerando estoques elevados. Podemos considerar então que a redução da produtividade deste ano ainda não apresenta um impacto no mercado do café.

Independentemente da quebra da safra, ocasionada por fatores climáticos, é fato que produzir café está mais caro. Conforme a CONAB (2013),



por meio de dados, isto se deve principalmente ao custo da mão de obra. Em algumas localidades a mão de obra pode representar 60 % do custo da produção. Devido a este cenário o investimento em tecnologias e mecanização abre a possibilidade de maior lucro ao produtor, reduzindo os custos.

## **2.2 Propriedades reológicas e módulo de elasticidade**

Reologia pode ser definida como a ciência devotada ao estudo do modo como os materiais se deformam quando sofrem a ação de uma tensão (MOHSEIN, 1970). As propriedades reológicas de um material são as suas propriedades mecânicas, o seu comportamento mecânico considerando o efeito do tempo durante o carregamento do corpo, sendo expresso em função da força, da deformação e do tempo, podendo ser aplicado a diversos materiais biológicos e não biológicos.

Um dos estudos dessa ciência é o conhecimento do comportamento viscoelástico do material. Com base nas observações de alguns pesquisadores (COUTO et al., 2002; FINNEY; HALL; MASE, 1964; MOHSEIN, 1970), pode-se afirmar que o comportamento mecânico de grãos agrícolas deve ser considerado como o de materiais viscoelásticos. Conhecendo a estrutura do material, por meio da avaliação das suas propriedades reológicas, é possível o fornecimento de dados para o projeto de equipamentos no processamento do material e no controle de qualidade do produto.

Materiais biológicos, como os grãos e sementes, mesmo quando armazenados continuam sendo seres vivos, que respiram mesmo após a colheita e sofrem processos bioquímicos em seu interior, resultando em mudanças na forma, no tamanho e outros aspectos. Em geral o grão sofre ações de variáveis físicas, químicas, de biológicas de fonte interna e de biológicas de fonte externa, como umidade e temperatura. Devido a essas mudanças a elasticidade em

sólidos biológicos varia em função da idade e das condições fisiológicas (MOHSENIN, 1970).

Como observado, os materiais biológicos formam um quadro complexo para o estudo de propriedades reológicas. Os estudos das propriedades mecânicas servem de base para o estudo das propriedades reológicas. Podemos enumerar como propriedades mecânicas: tensão, deformação, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

O quanto um material pode se deformar e voltar ao seu estado inicial sem comprometimento da sua estrutura é conhecido como elasticidade. O grau dessa deformação é função da tensão imposta a esse material e o seu módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young. Este é uma propriedade intrínseca do material e varia de acordo com a sua composição química, microestruturas e defeitos do material.

De acordo com Segerlind (1984) para as simulações e cálculos da predição do comportamento de um material quando submetido a diferentes tipos de carregamento é necessário o conhecimento das propriedades mecânicas. O módulo de elasticidade do material destaca-se dentro dessas propriedades, visto que o conhecimento deste módulo permite que sejam feitas comparações de resistência relativa de vários materiais. A forma mais simples e comumente utilizada para a obtenção da resposta mecânica de um material é o teste de compressão (ou tração) uniaxial.

O módulo de elasticidade pode, então, ser calculado com base na lei de Hooke, quando ao material é aplicada uma carga uniaxial. A norma ASTM E111 - 04 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 2004) determina como teste padrão para a obtenção do módulo de elasticidade para grãos, o teste que aplica carga uniaxial na amostra podendo utilizar-se de aparelhos como a Máquina de Ensaio Universal, os Extensômetros e outros. Na norma é exigida a devida atenção para alguns parâmetros do teste, isto inclui as

características do grão, as condições e regulagens do teste e a interpretação dos dados.

Há muito tempo é comum o emprego de procedimentos e testes utilizados em materiais não biológicos por pesquisadores em busca do conhecimento do comportamento mecânico de produtos agrícolas. Mohsenin (1970) montou corpos de provas cilíndricos retirados de materiais biológicos para o teste de compressão uniaxial entre placas paralelas para a determinação do módulo de elasticidade da maçã sendo que Finney, Hall e Mase (1964) fez o mesmo para a batata. Shelef e Mohsenin (1966) e Zoerb e Hall (1960) determinaram o módulo de elasticidade de grãos agrícolas usando espécimes preparados ao se cortar as extremidades do produto.

Existem algumas informações sobre os módulos de elasticidade para grãos agrícolas. Alguns dados são pra um único grão, não considerando o produto a granel, tão utilizado atualmente. Molenda e Stasiak (2002) obtiveram valores do módulo de elasticidade por meio do teste de compressão uniaxial em grãos a granel de cevada, a aveia, o trigo, o centeio e a colza. Ribeiro et al. (2007) trabalhou com a soja também pelo teste de compressão uniaxial, mas trabalhou com um único grão por vez, que recebeu a compressão por meio de duas placas paralelas, aplicada em suas três dimensões principais: espessura (P1), largura (P2) e comprimento (P3). Para o grão de milho temos diversos trabalhos, Jindal e Mohsenin (1978) utilizaram-se do teste de impacto, realizado com o auxílio de um pêndulo para encontrar os valores do módulo, variando apenas a umidade do grão; Ruffato, Couto e Queiroz (2001) utilizaram-se de valores da literatura para otimizar os valores de módulo de elasticidade por meio da técnica computacional de elementos finitos, considerando o módulo diferente para três diferentes regiões do grão: região superior (R1), região intermediária (R2) e região inferior (R3). Estas informações foram apresentadas na Tabela 1 para melhor conhecimento dos dados.

Tabela 1. Módulo de Elasticidade de grãos agrícolas.

<b>Grão</b>	<b>Forma de medição</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>E (MPa)</b>
<b>Cevada<sup>1</sup></b>	Granel	10	14,2
		12,5	14
<b>Aveia<sup>1</sup></b>	Granel	10	17,8
		12,5	16
<b>Colza<sup>1</sup></b>	Granel	12	7,1
		15	6,6
<b>Trigo<sup>1</sup></b>	Granel	10	22,4
		12,5	22,2
<b>Soja<sup>2</sup></b>	P1		23,1-106,9
	P2		16,8-54,2
	P3		10,2-54,3
<b>Milho<sup>3</sup></b>	R1	13,4	92,3
	R2	13,4	290,1
	R3	13,4	119,7
<b>Milho<sup>4</sup></b>	Inteiro	12,6	49,08
		24,4	11,59

Fonte: Adaptado de <sup>1</sup> Molenda e Stasiak (2002), <sup>2</sup> Ribeiro et al. (2007), <sup>3</sup>Ruffato, Couto e Queiroz (2001) e <sup>4</sup> Jindal e Mohsenin (1978).

Couto et al. (2002) determinou o módulo de deformação para cafés, sendo este a deformação total a soma entre a deformação elástica e a deformação plástica para os diferentes estádios de maturação, sendo indicados pela coloração dos frutos em “verde” e “cereja”. Em seu estudo os valores do módulo de deformação variavam de acordo com a velocidade de compressão e pela presença ou não do pedúnculo no fruto, Quadro 1. Há certa dificuldade de comparação pelo pequeno volume de dados fornecidos, sendo possível apenas observar que independentemente da velocidade aplicada, o café verde possui um maior módulo de deformação do que o café cereja com ou sem pedúnculo.

Quadro 1. Módulo de Deformação em frutos de café

Velocidade de Compressão (mm/min)	Módulo de Deformação (N/m <sup>2</sup> )		
	Cereja com Pedúnculo	Cereja sem Pedúnculo	Fruto Verde
0,5	1,3 ± 0,3		
2,5			5 ± 1
5	2,1 ± 0,5		
7,0		1,7 ± 0,6	
10,0		1,0 ± 0,3	8 ± 2

Fonte: Adaptado de Couto et al. (2002).

Todavia não há informações para o café descascado e despulpado, sendo que a indústria tem trabalhado bastante com os grãos de café e a semente neste estado. E os dados são para grãos, não para o produto a granel que é o objetivo do nosso estudo.

### 2.3 Danos mecânicos

Dano mecânico é uma falha, um colapso na estrutura que ocorre em algum material devido a uma deformação originada pela atuação de forças. Em produtos agrícolas o dano mecânico pode ter origem pela ação de forças internas, resultantes de variações físicas, como variação de temperatura e umidade ou mudanças químicas e biológicas, ou pela ação de forças externas como impacto, pressão de carregamento e diversas ações durante a manipulação do produto.

Os danos causados por forças externas podem causar o fracionamento completo do produto ou pequenas fissuras invisíveis ao olho nu. Em sementes e grãos essas pequenas rachaduras podem permitir que as bactérias, fungos e insetos entrem e destruam o interior. Este ataque leva a uma perda da viabilidade e do vigor da semente, atrapalhando o desenvolvimento das mudas. Caldwell e

Davis (1957 apud MOHSENIN, 1970) estudaram o desenvolvimento de fungos patogênicos em grãos de cereais e descobriram que os fungos não conseguem penetrar através da camada de aleurona de trigo intacto, mas se houver uma quebra no tegumento da camada de aleurona, esta quebra proporciona um ponto de entrada. Os autores salientam que tal ruptura não precisaria, necessariamente, ser visível externamente.

Produtos agrícolas são materiais complexos, que não apresentam critérios para surgimento das falhas, dificultando assim o estudo de danos. Couto et al. (2002) salientam que há poucas informações acerca das propriedades mecânicas, dos parâmetros que afetam estas propriedades e a resistência a danos mecânicos em grãos de café.

Devido à importância dos produtos agrícolas na economia e a necessidade do aumento de produção, foi necessário um processo de mecanização da agricultura e o armazenamento. Nestes processos grãos e sementes são sujeitos a pressões excessivas que podem causar danos nos tegumentos com rachaduras e outra ocorrência. Estes danos afetam a qualidade dos grãos para a produção de bebida, bem como de sementes para a propagação de plantas.

#### **2.4 A detecção e avaliação de danos mecânicos**

A detecção e avaliação de danos mecânicos, principalmente se o dano é invisível, pode tornar-se um problema que requer técnicas especiais e instrumentação. Os danos afetam a qualidade da semente, que tradicionalmente é atestada por testes laboratoriais, segundo a indicação do MAPA, entretanto estes testes demandam um custo elevado e um grande período de tempo para fornecer resultados. Para a classificação de grãos de café, também segundo o MAPA, o processo é realizado por meio da avaliação visual, seguido por separação em

peneiras e pela prova da xícara, ficando restrita a sensibilidade humana. Essa demanda é um fator negativo no mundo do agronegócio, que necessita de respostas rápidas e com o menor custo possível. Outro ponto negativo é o seu caráter destrutivo, podendo ser aplicado apenas numa amostra do lote.

Nesse contexto é de suma importância estudos com o objetivo de coletar os dados para a avaliação sem que haja contato físico do instrumento medido e o objeto de estudo, buscando rapidez e eficiência. Algumas pesquisas utilizando-se de técnicas ópticas têm sido relatadas, como Santos et al. (2009) que investigou a aplicação da técnica de raios - X na avaliação da qualidade de sementes de mamão e Saath et al. (2010) que realizou um estudo utilizando-se da microscopia eletrônica de varredura para avaliar as alterações na membrana plasmática da célula do endosperma dos grãos de cafés em função do teor de água e tempo de secagem.

#### **2.4.1 Ensaios não destrutivos**

Em linhas gerais definem-se como ensaios não destrutivos (END) aqueles que não alteram de forma permanente as propriedades físicas, mecânicas e químicas. O emprego deste tipo de teste tem grande importância econômica para qualquer modalidade de indústria, principalmente as com base em engenharia mecânica, engenharia elétrica, engenharia civil, sistemas de engenharia e na medicina.

Os ensaios destrutivos (ED) provocam perdas econômicas devido à destruição de parte dos materiais testados, somando-se ao problema do poder de representatividade da amostra em relação ao lote como um todo (CUNHA JÚNIOR et al., 2012). A vantagem do emprego de END está em preencher a lacuna provocada pelos ED, sendo possível ser aplicados em todo o lote, sem destruí-lo, e permitir a sua posterior comercialização. Outras vantagens são a

falta de exigência de grandes preparações para o teste, pois existem muitos equipamentos disponíveis, sendo que alguns são portáteis e o seu custo é reduzido quando comparado aos ensaios destrutivos.

Os END utilizam um grupo de técnicas que avaliam as propriedades do material com base em fenômenos físicos, por meio de ondas eletromagnéticas, acústicas, elasticidade, emissão de partículas subatômicas, capilaridade e absorção, tomando-se sempre o cuidado para que não haja um dano considerável à amostra examinada. Há a inspeção do movimento da matéria, da transmissão de energia ou uma simbiose destes dois conceitos. Por meio de vibração mecânica ou aplicação de energia eletromagnética, em função do material a ser analisado, é possível determinar as propriedades dos materiais, como o seu módulo de elasticidade. Desta forma é possível detectar a presença de discontinuidades, como falhas e rupturas (SILVA; MARQUES, 2006).

A avaliação não destrutiva é definida como sendo a ciência da identificação das propriedades físicas e mecânicas de uma peça de determinado material, sem alterar sua capacidade de uso final (ROSS; BRASHAW; PELLERIN, 1998). Ainda de acordo com Silva e Marques (2006) as duas modalidades de ensaio podem ser consideradas complementares, sendo que os ensaios destrutivos podem ser utilizados para estabelecer a correlação entre as propriedades de interesse e a propriedade medida em ensaios não destrutivos.

Como limitação, os END possuem a característica de envolver apenas medidas indiretas das propriedades, mas sendo eficientes em revelar danos ou falhas existentes.

#### **2.4.1.1 Teste pela Técnica de Pulso Ultra Sônico**

A caracterização viscoelástica, incluindo o módulo de elasticidade, de um determinado material pode ser feito por meio de ensaios dinâmicos. Estes



ensaios têm como princípio que o espécime é deformado por uma tensão que varia senoidalmente com o tempo. Estes ensaios podem ser destrutivos ou não destrutivos. Dentre os ensaios dinâmicos não destrutivos encontramos a técnica de pulso ultrassônico.

As descrições iniciais da técnica de pulso ultrassônico foram dadas por Firestone e Frederick (1946) e Pellam e Galt (1946). As técnicas de ultrassom para ensaios não destrutivos tiveram início em metais e foi possível graças à evolução da eletrônica de radares na Segunda Guerra Mundial. Segundo Povey e McClements (1988) é possível o uso da técnica em alimentos como fonte de informações das propriedades interessantes do material.

A técnica consiste na geração de ondas elásticas através de um sólido. A velocidade com que a onda se propaga pelo material está relacionada com o módulo de elasticidade e com a densidade de massa. De acordo com Mohsenin (1970) podemos calcular o módulo de elasticidade por meio da Equação 1:

$$E = \rho \times V^2 \quad (1)$$

Onde,

E - Módulo de elasticidade

$\rho$  - Densidade do material

V - Velocidade da onda através do material

O conceito de detecção de defeitos por meio da técnica de pulso ultrassônico é que a propagação das ondas é sensível ao seu módulo de elasticidade, que varia de acordo com defeitos presentes em seu material. Em termos gerais, uma onda passa com uma determinada velocidade em um corpo intacto e com outra velocidade em um corpo com falhas.

Diversos autores avaliaram a presença de deterioração em materiais biológicos ou não biológicos, por meio dessa técnica. Abreu (2010) utilizou a técnica para avaliar deterioração de elementos estruturais de madeira em construções históricas. O United States Department of Agriculture - USDA

(2000) fornece um guia de uso e interpretação para auxiliar os inspetores no uso de instrumentos que funcionem com ondas de tensão na avaliação de deterioração em estruturas de madeira. Neste guia há uma detalhada descrição de como deve ser aplicada a metodologia em campo, salientando que esta técnica não está confinada ao laboratório. Buscando a obtenção das propriedades elásticas em peças estruturais de madeira de reflorestamento. Segundinho et al. (2012) avaliou a técnica de vibração natural (técnica de pulso ultrassônico) como eficaz para o proposto.

Esta técnica embora seja muito simples, apresenta algumas dificuldades, principalmente quando aplicado a materiais biológicos. Deve-se sempre fazer o contato do meio gerado de onda através de uma superfície lisa, e a mais fina camada de ar pode impedir a penetração das ondas na amostra.

Hernández et al. (2002) afirma que por meio da técnica há métodos padronizados para estimar as propriedades mecânicas de materiais homogêneos, entretanto há uma preocupação da aplicabilidade da técnica em meio heterogêneo. Neste é estudado o impacto da porosidade da argamassa nas propriedades mecânicas e obteve sucesso em estimar as características da argamassa pela técnica de pulso ultrassônico.

O emprego de ondas ultrassônicas no estudo do comportamento mecânico de diversos materiais encontra-se difundido, sendo possível encontrar equipamentos comerciais para a aquisição de dados. Estes equipamentos podem ser portáteis ou instalados em laboratórios. Tingley e Johnson (2003) patentearam um dispositivo que por meio de ondas de tensão realiza o diagnóstico de lesões no dente, como cáries e rachaduras, mesmo se o dente já possua coroas de metal, que é um caso onde não é possível a utilização de raios-X devido a presença do metal. É mostrado na patente que o uso de raios-X também está limitado à percepção visual humana. Diversas outras patentes também relatam o uso de ondas de tensão para diagnóstico de doenças dentárias.

A técnica também tem sido aplicada a solos. É importante lembrar que muitos testes desenvolvidos para obter propriedades mecânicas de solos foram adaptados para produtos agrícolas, principalmente aqueles armazenados à granel. Christ, Kim e Park (2009) e Wang et al. (2006) utilizaram a técnica de ultrassom como ferramenta para determinar as propriedades mecânicas de solos congelados, provando que a técnica é eficiente em determinar estes parâmetros, incluindo o módulo de elasticidade.

Seu campo de utilização é bem vasto, como na área de marcenaria, na área de ortodontia e na de solos. Entretanto não há referência na literatura da sua utilização em materiais agrícolas, nem em um único grão ou no produto a granel.

#### **2.4.2 Teste de Compressão Uniaxial**

A forma mais simples e comum de se obter a resposta mecânica de um material é através do teste de compressão (ou tração) uniaxial. Assim como no passado, a adaptação de testes mecânicos desenvolvidos para solos é utilizada para descrever o comportamento mecânico de produtos agrícolas.

O teste pode ser descrito como sendo a aplicação de uma carga de compressão, estática ou cíclica, em corpos de prova e durante o ensaio são medidos os dados de força-deformação e se obtém uma curva de deformação em função do tempo. Couto et al. (2002, p. 286) descreveu o comportamento e os dados obtidos de acordo com o material:

Os valores de força e deformação dependem do tamanho do espécime, pois quanto maior o seu tamanho, maior a força para produzir a mesma deformação. Na caracterização da resposta do material, os dados de força-deformação são expressos em termos de quantidades que independem do tamanho do espécime, a força é dividida pela área da seção transversal, resultando em valores de tensão axial, e a deformação é dividida pelo comprimento inicial do

espécime, para se obter a deformação específica axial. A curva de “força-deformação” para um material transforma-se, então, em uma de “tensão-deformação específica”. Para um grande número de materiais, o comportamento inicial da curva de “tensão-deformação específica” é linear. A constante de proporcionalidade, ou inclinação da reta, é denominada módulo de elasticidade, único para cada material e mede sua dureza.

Zoerb e Hall (1960) utilizaram o teste de compressão uniaxial entre duas placas rígidas e paralelas para avaliar o módulo de elasticidade em carne, frutas e vegetais. A dificuldade da aplicação do teste em materiais biológicos se deve ao fato da falta de uniformidade do corpo de prova, pois dessa forma o dispositivo de carregamento é comprimido contra um corpo convexo, sendo que a carga não é distribuída de forma uniforme, resultando numa distribuição de tensão complexa. Esta incapacidade de expressar os dados de forma correta forçou os pesquisadores a relatarem os dados em termos da força de deformação observada e que não são facilmente utilizadas em equações como a lei de Hook.

O teste de compressão uniaxial é realizado por meio de um aparelho conhecido como Máquina de Ensaio Universal. O aparelho é capaz de fornecer dados de força, deformação e ainda gráficos variados do comportamento da amostra. Com os dados de força-deformação obtidos pelo aparelho é possível medir o valor do módulo de elasticidade através da Lei de Hooke, que segue:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (2)$$

Onde,

E - Módulo de elasticidade

$\sigma$  - Tensão exercida

$\varepsilon$  - Deformação sofrida pela amostra

As tensões são determinadas pela relação entre a força e a área onde a força é aplicada. A deformação é a variação da dimensão da amostra. Explicados nas seguintes equações:

$$\sigma = \frac{F_i}{A} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_i}{l} \quad (4)$$

### 2.4.3 Testes laboratoriais

#### 2.4.3.1 Teste de Tetrazólio

O teste de tetrazólio é um teste bioquímico que pode ser usado quando as sementes necessitam ser semeadas logo após a colheita; quando apresentam dormência ou para resolver problemas encontrados no teste de germinação, como por exemplo, presença de um grande número de plântulas anormais. Também pode ser usado para avaliar o vigor, determinar a viabilidade das sementes após tratamentos pré-germinativos, danos por secagem, por insetos e por umidade bem como, para detectar danos mecânicos de colheita e/ou beneficiamento.

Tem como objetivo determinar rapidamente a viabilidade de sementes, particularmente, daquelas que apresentam dormência, das espécies recalcitrantes e as que germinam lentamente em testes de rotina; determinar a viabilidade das sementes em amostras ou individualmente, quando no final do teste de germinação ocorrer uma alta porcentagem de sementes não germinadas.

Atualmente a RAS (BRASIL, 2009) recomenda a aplicação do teste para avaliação do potencial de germinação de lotes de semente de café e descreve a sua metodologia. Durante o teste de tetrazólio, há a embebição das sementes em uma solução incolor de 2,3, 5 trifênil cloreto ou brometo de tetrazólio, a solução é um revelador do processo de redução que acontece dentro das células vivas. O que ocorre é que os íons de  $H^+$ , liberados durante a respiração dos tecidos vivos,

são transferidos por um grupo de enzimas, a desidrogenase do ácido málico, e interagem com o brometo de tetrazólio, o qual é reduzido a um composto vermelho, estável e não difusível chamado de trifênil formazan. Devido ao fato da reação se processar no interior das células vivas não há difusão do composto, possibilitando uma nítida separação dos tecidos vivos e coloridos, que respiram, daqueles mortos, que não sofrem reação e que não colorem (DELOUCHE et al., 1976). Utiliza-se como reagente uma solução aquosa de 0,05% a 1,0% de concentração do sal 2, 3, 5 trifênil cloreto ou brometo de tetrazólio. A concentração da solução varia para sementes de diferentes espécies. O número de amostras a serem testadas pode variar, mas há um consenso de se fazer quatro repetições (BRASIL, 2009). As sementes devem ser preparadas antes da coloração, passando por um processo de pré-umedecimento, e posteriormente há a etapa de exposição dos tecidos a coloração. Após a coloração é feita a avaliação visual, com base no desenvolvimento de coloração, local e extensão do dano (VIEIRA, 1998). Torna-se então possível separar diferentes categorias de sementes.

Segundo Marcos Filho, Cicero e Silva (1987) para a utilização do teste de tetrazólio na avaliação da viabilidade de sementes é necessário o treinamento do analista, além de metodologia específica para cada espécie. Em café há uma maior dificuldade, devido o embrião estar envolvido pelos tecidos do endosperma. Entretanto autores divergem dos procedimentos adotados, sugerindo posturas diferentes para a aplicação do teste. Dias e Silva (1986) recomendam um período de pré-embebição das sementes em água de 18 a 24 horas a 30°C, já Vieira (1998) recomenda que o período de condicionamento das sementes deva variar em função da idade das mesmas, indicando o período de 18 a 24 horas apenas para sementes recém-colhidas e um período de 72 horas de embebição para sementes de safras anteriores.

Esse teste é muito utilizado em pesquisas como base de comparação a outros testes devido a sua confiabilidade nos resultados, independente das divergências dos autores quando aos procedimentos adotados.

#### **2.4.3.2 Teste de Verde Rápido**

Para a identificação de danos mecânicos pode-se fazer uso do teste de verde rápido. O teste é realizado tradicionalmente em sementes de milho para detectar danos no pericarpo e também para determinar a extensão do dano. Ele também pode ser aplicado em sementes de sorgo, trigo, cevada e outros cereais.

A metodologia do teste consiste no contato da semente com uma solução de verde rápido (verde malaquita), os danos então são identificáveis através da coloração assumida pela região afetada. De acordo com Marcos Filho, Cicero e Silva (1987) o período de contato entre a solução e as sementes avaliadas é de apenas 2 minutos, em seguida é retirado o excesso de solução e as amostras são lavadas em água corrente e estendidas em papel-toalha para secagem e posterior interpretação.

O teste é capaz de detectar apenas danos externos, não computando danos internos.

#### **2.4.3.3 Teste de Hipoclorito de Sódio**

É um teste para detecção de danos mecânicos aplicável em sementes de soja, feijão e há pesquisas envolvendo o uso do teste em diversas cultivares de café (REIS et al., 2010).

A metodologia do teste é simples, as amostras são colocadas em uma placa de Petri e cobertas com hipoclorito de sódio a 5 % durante um período de 10 a 15 minutos. Após esse período elimina-se o excesso de solução e

distribuem-se as sementes em papel toalha. Procede-se então a análise visual com a contagem de sementes intumescidas.

#### **2.4.3.4 Teste de Condutividade Elétrica**

O uso do teste de condutividade elétrica foi pensado devido à busca por um método de avaliação comercial da qualidade dos grãos de café que não seja baseado em parâmetros tidos como subjetivos. Este método, que se utiliza das características físico-químicas dos grãos, é considerado como um bom indicador da integridade do sistema de membranas celulares, sendo considerado como um dos mais rápidos e eficientes para avaliação da qualidade de sementes (ANDRADE et al., 1995). A aplicabilidade do teste deve-se ao fato de a operação ser simples e rápida.

De acordo com Amorim (1978) ataques de insetos e microrganismos, alterações fisiológicas e danos mecânicos alteram a estrutura da membrana, provocando assim uma rápida deterioração dos grãos de café. Em produtos agrícolas a formação de um dano mecânico pode ter origem pela ação de uma força interna, como mudanças químicas, podendo estas mudanças serem originárias da desestruturação da membrana celular. Há um consenso de que a degeneração da membrana celular e subsequentemente a perda do controle da permeabilidade são os primeiros indícios da deterioração. Portanto, é possível se utilizar dos valores do teste de condutividade elétrica como um parâmetro para avaliar a integridade do grão. Diversas metodologias foram propostas e todas se utilizam da condição de que os grãos ao sofrerem um processo de embebição irão lixiviar solutos citoplasmáticos no meio líquido. Estes solutos possuem cargas elétricas que podem ser medidas com um condutivímetro, geralmente expressos em  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  de amostra. Sementes com alto grau de deterioração



liberam uma grande quantidade de eletrólitos na água, resultando em alto valor de condutividade elétrica (BEDFORD, 1974; WOODSTOCK, 1973).

Vieira e Carvalho (1994) destaca que a quantidade de exsudatos na água de embebição pode ser influenciada por diversos fatores, dentre eles pelo grau de deterioração, pelo genótipo, pela incidência de dano causado pela velocidade, temperatura e o tempo de embebição, ou seja, pela metodologia utilizada para o teste. Mas há diversos fatores intrínsecos do grão que interferem no resultado, tais como, características do grão e o teor de água inicial.

Ao longo do tempo várias metodologias foram propostas com pequenas variações por diversos autores (ASSOCIATION OF OFFICIAL SEED ANALYSTS - AOSA, 1983; KRZYZANOWSKI; FRANÇA NETO; HENNING, 1991; LOEFFLER; TEKRONY; EGLI, 1988; MARCOS FILHO; CICERO; SILVA, 1987; MATTHEWS; POWELL, 1981; PRETE, 1992). Vieira e Carvalho (1994) aponta para a possibilidade da aplicação do teste em dois sistemas, o individual ou o de massa. No Teste de Condutividade Individual é avaliada a qualidade do lote ao analisar cada grão em particular e no Teste de Condutividade de Massa, também conhecido como sistema de copo ou pela nomenclatura em inglês "*bulk conductivity*", onde é analisada uma amostra por vez e fornecido como resultado uma média de condutividade da solução em que estão os lixiviados dos grãos que compõem a amostra.

Para o Teste de Condutividade de Massa a metodologia proposta é o uso de duas ou quatro repetições de 50 ou 25 grãos. A amostra é então pesada com precisão e conseqüentemente colocada para embeber em água deionizada ( $\leq 2 \mu\text{mhos/cm}$  de condutividade). A amostra é posta para repousar em uma câmara com temperatura controlada. A temperatura e o tempo de repouso são variados, de acordo com as diversas metodologias propostas. A leitura é realizada com condutímetro adequados, aparelhos facilmente adquiridos em empresas especializadas possuindo várias opções no mercado. A condutividade elétrica é

expressa com base no peso da amostra e para isto, basta dividir o valor obtido no aparelho pelo peso da amostra.

Uma desvantagem deste teste é a interpretação dos resultados, visto que raramente há parâmetros de comparação. No caso particular do café, tanto para grãos como sementes, podemos encontrar um grande volume de informação sendo produzido, entretanto os dados só permitem comparações do potencial fisiológico dos lotes avaliados, assim como o observado por Vieira e Carvalho (1994) para sementes de leguminosas graúdas e sementes de milho.

#### **2.4.3.5 Teste de Raios-X**

O teste de raios-X apresenta-se como uma poderosa ferramenta de análise de imagens para a determinação de danos mecânicos, causados por insetos ou decorrentes do processamento de pré e pós colheita, com a importância de ser um método de grande precisão e não destrutivo. Os grãos podem ser examinados de forma individual em imagens ampliadas, que tem a capacidade de indicar em detalhes qualquer dano, com precisão da localização, extensão e a área afetada. Permitindo então a avaliação da qualidade de sementes e grãos após a colheita ou após o armazenamento.

De acordo com a Regras de Análise de Sementes (BRASIL, 2009) por definição raios-X são ondas eletromagnéticas que se propagam na velocidade da luz, mas com comprimento de ondas variáveis (1/10.000 a 1/100.000 em relação ao da luz). Quando um objeto é colocado entre uma fonte de raios-X e um papel fotossensível, neste é formado uma imagem. Esta imagem possui sombras claras e escuras em função do nível de absorção dos raios-X pelas sementes, determinado pelos fatores composição, espessura e densidade dos tecidos e comprimento de onda da radiação ionizante. A avaliação é feita de acordo com a anatomia interna revelada pela radiografia.

Historicamente este teste tem sido utilizado em sementes desde a década de 1950, quando estudos sobre a qualidade de sementes de *Pinus sylvestris L.* por Simak e Gustafsson (1953) foram realizados. Em estudos recentes foi comprovada a viabilidade da técnica que se utiliza de raios-X para avaliar a morfologia interna de diversas sementes e grãos, tais como a mamona (KOBORI; CICERO; MEDINA, 2012), a espécie florestal *Eugenia pleurantha* (MASETTO et al., 2007), abóbora (CARVALHO et al., 2009) e identificar danos por umidade em sementes de soja, por percevejo em sementes de soja e de feijão (FLOR et al., 2004; KOBORI; CICERO; MEDINA, 2012). Como teste de rotina para avaliação de olerícolas (BURG et al., 1994; LIU et al., 1997). Além de danos mecânicos em sementes de milho (CARVALHO et al., 2009; CÍCERO et al., 1998; KOBORI; CICERO; MEDINA, 2012).

O teste de raios-X foi padronizado pela International Rules for Seed Testing - ISTA (1999) e no Brasil está prescrito na Regras de Análise de Sementes (BRASIL, 2009). Pela metodologia proposta pela RAS para a obtenção de imagens devem ser realizadas quatro repetições de 100 sementes, tomadas ao acaso distribuídas de forma uniforme sobre o filme ou papel e expor as sementes à radiação. A regulagem da máquina depende da espécie da semente, portanto, uma série de combinações de tempo-voltagem deve ser testada sempre que uma nova espécie for avaliada ou uma máquina diferente for usada. Depois é feita a revelação para posterior análise da imagem. Com o avanço da tecnologia, atualmente é possível a realização de raios-X digital, onde as imagens são diretamente armazenadas em softwares adequados.

A RAS (BRASIL, 2009) também determina os parâmetros para a avaliação, com uma classificação em função da anatomia interna. A semente é então classificada em: semente cheia (contém todos os tecidos essenciais para a germinação), semente vazia (há menos que 50% dos tecidos), semente danificada por inseto (há a presença de inseto, larva de inseto, orifício ou são

mostradas outras evidências de danos causados por insetos), semente danificada fisicamente (semente cheia com o revestimento - tegumento, pericarpo, etc - rachado ou quebrado). Alguns pesquisadores atribuem notas de acordo com critérios específicos com relação aos danos mecânicos para realizar uma classificação dos níveis dos danos presentes nas sementes. Cícero et al. (1998) realizou esta classificação para sementes de milho e Flor et al. (2004) adaptou esta classificação para sementes de soja. Não há dados na literatura sobre a utilização de raios-X em grãos ou sementes de café para avaliação do dano mecânico.

Uma possível desvantagem do método é que os raios-X são potencialmente prejudiciais, podendo causar mutações em sementes, entretanto não existem relatos sobre o efeito latente da radiação em sementes após o período de armazenamento e estudos como o de Carvalho e Oliveira (2006) comprovaram que devido a pequena dosagem de radiação utilizada para o teste não afeta a maioria das sementes.

#### **2.4.3.6 SAS – Sistema de Análise de Sementes**

O Sistema de Análise de Sementes – SAS, desenvolvido pela empresa TBIT no ano de 2011, realiza a avaliação de sementes de forma semi-automatizada por meio de imagens. Estas imagens possuem alta resolução e são manipuladas com o auxílio de um software que trabalha com inteligência artificial, mas com uma interface intuitiva e de fácil trabalhabilidade. O sistema permite diversas avaliações, em sementes ou grãos, como: o vigor em sementes de milho, soja e tabaco; a identificação de grão gessado no arroz; o cálculo da área foliar; a medição tamanho de frutos, como o tomate para comparação de lotes; a presença de impurezas em sementes de braquiária; a capacidade de filtrar

e separar por cor lotes de soja. O Software gera relatórios específicos, com número de grãos, coloração e tamanho, para cada caso dos exemplos citados.

Uma vantagem do sistema é a possibilidade de armazenar os dados de forma digital e com alta qualidade, até mesmo ampliando o tamanho de visualização. Sendo então, um auxílio poderoso para avaliação visual em grãos e sementes.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Caracterização do experimento**

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica e Resistência dos Materiais no Departamento de Engenharia Agrícola, Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas, ambos no Departamento de Engenharia, no Laboratório Central de Análise de Sementes, no Departamento de Agricultura, todos localizados na Universidade Federal de Lavras (UFLA) e no Laboratório de Qualidade do Café Dr. Alcides Carvalho, da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG). Os grãos de café foram submetidos a dois tipos de ensaios mecânicos e três testes laboratoriais. O ensaio mecânico de compressão uniaxial e o ensaio de pulso ultrassônico ocorreram de forma simultânea. Os testes laboratoriais, para avaliação do efeito e a diferenciação entre os tratamentos, foram compostos do teste de tetrazólio (apenas no endosperma, sendo utilizado de forma semelhante a metodologia proposta pelo teste de verde rápido), teste de condutividade elétrica e do teste de raios-X. Em ensaios preliminares verificou-se a impossibilidade de diferenciação de uma análise visual no teste de hipoclorito de sódio, provavelmente pelas características próprias dos grãos (beneficiamento em máquinas e o armazenamento).

Para o experimento foram utilizadas amostras de café (*Coffea arabica* L.), coletadas em lavouras comerciais de propriedades localizadas no município de Carmo de Minas, Minas Gerais, Brasil.

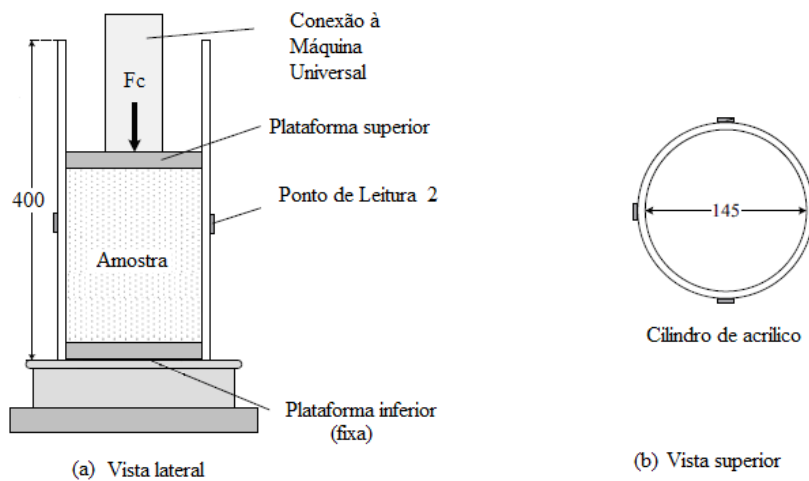
O beneficiamento ocorreu em duas etapas. A primeira consistiu na separação hidráulica, por diferença de densidade, para a obtenção de apenas frutos maduros. Houve o descascamento mecânico e a remoção mecânica da mucilagem remanescente. Os grãos foram secos em telas disposta ao sol, e quando necessário, as amostras foram encaminhadas para secadores em camadas fixas. Os grãos foram beneficiados de forma semelhante as que são utilizadas na agroindústria.

Deu-se então início a segunda etapa do beneficiamento, separando-se os grãos quanto à forma e o tamanho. Apenas os grãos chatos das peneiras 16 a 18/64 foram aproveitados. Após esta etapa, todos os defeitos foram retirados, sendo que os grãos foram selecionados manualmente, descartando os grãos quebrados, grãos do tipo concha, com trincas visíveis, atacados para insetos e cascas. Grãos do tipo moça, que não apresentavam danos visuais, também foram aproveitados. Buscando garantir a uniformidade da amostra e a minimização de interferências.

Para a realização dos testes, assim como para as avaliações, foi realizada a homogeneização do lote com o auxílio do Separador Mecânico, da marca PBN e modelo DeLeo, este processo foi realizado no Laboratório Central de Análise de Sementes. Para a obtenção e divisão em amostras idênticas de 5 kg, perfazendo doze amostras, ou 60 kg no total. O silo modelo foi carregado com as amostras de 5 kg para os testes mecânicos, sendo que antes dos testes foram coletados 0,1 kg na altura média do silo modelos para a obtenção da testemunha e após os testes foram coletados 0,1 kg na altura média do silo modelo para a realização dos testes laboratoriais.

### 3.2 Teste de Compressão Uniaxial

Para a realização dos ensaios mecânicos foi construído um modelo semelhante ao aparelho de ensaio utilizado por Chung e Ooi (2006) e Johnstone (2010) que realizou experimentos de compressão confinada em contos de vidro e grãos de milho. O modelo foi construído com base no que é proposto pelas normas Européias para medição da relação de pressão lateral para projetos de silo (EUROCODE, 2006). A configuração experimental é apresentada na Figura 1.



(Todas as dimensões em mm)

Figura 1. Configuração experimental para o ensaio de compressão.

A configuração experimental é formada pelo cilindro de acrílico, cujas medidas são 145 mm de diâmetro e 380 mm de altura, reproduzindo o modelo de um silo que possui a capacidade de armazenar aproximadamente 5 kg de grãos de café. A máquina de ensaio universal, visualizada na Figura 2, também faz parte do aparelho de ensaio, sendo responsável pela aplicação da força de compressão.



Figura 2. Configuração experimental com a Máquina de Ensaio Universal e com o silo modelo preparado para o teste. UFLA, Lavras, MG, Brasil, 2014.

O ensaio foi conduzido no Laboratório de Mecânica e Resistência de Materiais, no Departamento de Engenharia, utilizando-se da máquina de ensaios *WDW Computer Control Electronic Universal Testing Machine*. O cilindro foi carregado com os grãos de café e deu-se início ao teste de compressão. Neste tipo de teste a máquina realiza um movimento de descida da mesa, realizando a compressão. Metodologia esta, proposta por Chung e Ooi (2006) e Johnstone (2010). Durante o deslocamento da mesa foram realizadas leituras pela técnica de pulso ultrassônico em três alturas pré-determinadas. Após os testes, as amostras de grãos de café foram retiradas e submetidas aos testes laboratoriais, para avaliação dos efeitos da compressão nos grãos. Foram realizados três ensaios com carregamentos diferentes, cada um com três repetições, a partir do deslocamento da mesa, Quadro 2. Os dados obtidos foram calculados pelo software Microsoft Excel obtendo-se o Módulo de Elasticidade.



Quadro 2. Delineamento do movimento da mesa durante o ensaio de compressão.

Ensaio	Repetições	Deslocamento da mesa
T0		0
T1	R1	0-10 mm
	R2	0-10 mm
	R3	0-10 mm
T2	R1	0-20 mm
	R2	0-20 mm
	R3	0-20 mm
T3	R1	0-30 mm
	R2	0-25 mm
	R3	0-25 mm

### 3.2 Técnica de Pulso Ultrassônico

O ensaio pela técnica de pulso ultrassônico foi realizado por meio do equipamento *Stress Wave Timer*, modelo 239A, da fabricante Metriguard, apresentado na Figura 3.



Figura 3. Stress Wave Timer. Modelo 239A. Fonte: Metriguard (2014), utilizado para o teste de pulso ultrassônico

Este equipamento gera uma onda elástica num material sólido e consegue medir o tempo de propagação desta onda por uma distância conhecida, permitindo o cálculo da velocidade, conforme Equação 5. Por meio da Equação 6 podemos estimar o valor do módulo de elasticidade.

$$v_0 = \frac{L}{t} \quad (5)$$

$$E_d = \frac{v_0^2 \times D}{g} \times 10^{-6} \quad (6)$$

Na Equação 5 temos que  $v_0$  é a velocidade de propagação da onda,  $L$  a distância percorrida pela onda em metros (m),  $t$  o tempo de trânsito da onda medido pelo aparelho em milissegundos (ms). Na Equação 6 temos  $E_d$  que é o módulo de elasticidade em MPa,  $g$  a aceleração da gravidade e  $D$  a densidade da massa de grãos em kg/m<sup>3</sup>. Visto que a densidade varia de acordo com o volume da amostra, em cada pausa pré-determinada será calculada a densidade referente.

As medições foram realizadas na lateral do protótipo, em três cotas diferentes a partir de três cotas do modelo do silo, considerando a parte inferior na cota de 100mm, a parte central 200mm e a parte superior 300mm, seguindo uma única direção. Assim, foram realizadas as leituras de tempo de trânsito da onda medido pelo aparelho em milissegundos (ms). Na Figura 4 podemos observar as direções e as alturas em que foram realizadas as leituras do aparelho *Stress Wave Timer* no silo modelo.

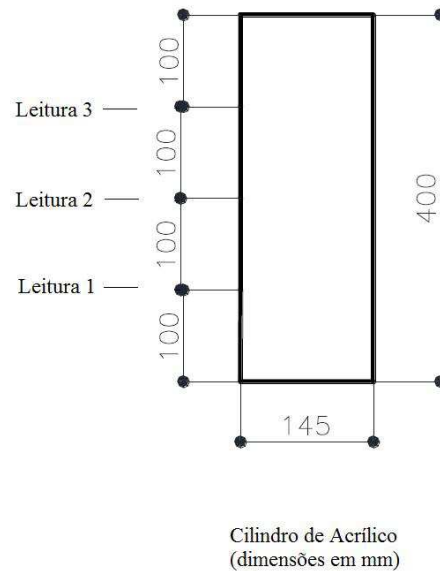


Figura 4. Diagrama das alturas da aplicação do equipamento Stress Wave Timer.

Para cada pausa pré-determinada foram realizadas três leituras em três alturas de medições. Foram realizados três ensaios, com três repetições cada. No primeiro ensaio, as alturas de descida pré-determinadas da mesa da máquina de ensaio foram de 5 mm e de 10 mm. No segundo ensaio, as alturas de descida pré-determinadas da mesa da máquina de ensaio foram de 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm. No terceiro ensaio, as alturas de descida pré-determinadas da mesa da máquina de ensaio foram de 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm e de 30 mm. Em todos os ensaios foram realizadas as leituras antes do ensaio de compressão, ou seja, em 0 mm. Em testes preliminares observou-se a ruptura do acrílico do modelo do silo quando a carga de compressão atingiu valores de 12 kN para a densidade da amostra de  $750 \text{ kg/m}^3$ , portanto no terceiro ensaio, por medida de segurança, em duas repetições foram realizadas as leituras até a altura de 25 mm. Considerou-se  $T_0$  como sendo a testemunha, ou seja, quando nenhuma carga foi aplicada a amostra. Como pôde ser visto no Quadro 2.

### 3.4 Teste de Tetrazólio

O teste de tetrazólio foi realizado no Laboratório Central de Análise de Sementes e Sementes e no Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas. O teste tetrazólio foi conduzido com base no proposto pela RAS (BRASIL, 2009) com quatro repetições de 25 grãos selecionados ao acaso de cada ensaio, descartando apenas os grãos tipo moca, garantindo uma maior padronização da forma dos grãos amostrados. O teste foi realizado apenas no endosperma, para verificação de danos externos (VIEIRA, 1998). Foi realizada a embebição dos grãos por 48 horas, à temperatura de 30°C, em água destilada. Em seguida ocorreu a lavagem em água destilada e a embebição na solução de tetrazólio 1% em frascos escuros, mantidos a temperatura de 30°C por um período de 24 horas, período este em que ocorreu a coloração. Logo após, foi realizada outra lavagem e posterior secagem. Os grãos foram, então, digitalizados por meio do Sistema de Análise de Sementes (SAS), onde houve uma ampliação das imagens para uma melhor visualização dos defeitos que foram coloridos pelo tetrazólio. Por meio da avaliação visual, foi possível classificar os danos externos dos grãos de acordo com a localização e a extensão.

Seguindo uma metodologia semelhante à que foi aplicada por Freitas (2013), com objetivo de avaliar a qualidade do café, foi realizada a análise visual de danos que foram coloridos, atribuindo-se notas de 1 a 3. A análise foi realizada por apenas um avaliador, objetivando uniformização de resposta e a minimização de possíveis erros. A classificação da coloração dos danos foi realizada de acordo com a Figura 5:



Figura 5. Atribuição de notas aos danos evidenciados pelo teste de tetrazólio. Nota 1, grãos com área afetada menor que 25 %; Nota 2; grãos com área afetada entre 25 e 75%; Nota 3, grãos com área afetada maior que 75%.

Utilizando-se desta escala de notas foi contabilizada a porcentagem de grãos de café que correspondiam a cada nota em cada repetição. Buscando obter um valor integrado para cada repetição dos tratamentos, ou seja, um valor que tenha variância de 0 (nenhum dano) a 100% (máximo dano), empregou-se a Equação 7, que é uma adaptação do índice de McKinney (1923), um dos mais utilizados quando se tem dados complexos. Com esta equação e conceito foi determinado o Índice de Severidade de Danos (ISD) com a capacidade de caracterizar o grau dos danos dos grãos de café.

$$ISD = \frac{\sum (\text{grau da escala} \times \text{frequência})}{(\text{n}^\circ \text{ total de unidades} \times \text{grau máximo da escala})} \times 100 \quad (7)$$

### 3.5 Teste de Condutividade Elétrica

O teste de condutividade elétrica foi realizado no Laboratório de Qualidade do Café Dr. Alcides Carvalho, da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG). O teste seguiu o proposto por Malta, Pereira e Chagas (2005) utilizando-se de duas repetições com 50 grãos, tomados ao acaso, para cada amostra correspondente do Teste de Compressão Uniaxial e sua respectiva testemunha. Parte da metodologia é uma adaptação do proposto por

Loeffler, Tekrony e Egli (1988) onde os grãos foram pesados com uma precisão de 0,001g e então imersos em 75 mL de água deionizada em copos plásticos de 200 mL. Os recipientes foram mantidos à uma temperatura de 25°C por 5 horas em uma estufa ventilada. Após este período foi realizada a leitura da condutividade elétrica da solução no aparelho Condutivímetro C -701. A condutividade elétrica é obtida com a leitura dos dados, com o resultado sendo expresso em  $\text{mScm}^{-1}\text{g}^{-1}$  de amostra.

### **3.6 Teste de Raios – X**

O teste de raios-x foi realizado no Laboratório Central de Análise de Sementes, no Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras (UFLA). O teste foi conduzido com quatro repetições de 25 grãos café de cada tratamento, selecionados ao acaso, retirando apenas os grãos tipo moça, para que houvesse uma padronização da forma, para a realização do teste de raios-X. O aparelho utilizado foi o Faxitron X-ray, que realiza calibragem automática da intensidade e do tempo de exposição dos grãos, para cada teste.

Os grãos foram colocados numa lâmina transparente, a qual foi posicionada a uma altura de 50 cm do feixe para a captura da imagem pelo aparelho. No software do aparelho é possível calibrar a sombra e a intensidade da imagem obtida e então salva-las em .jpeg. A calibração automática do aparelho marcou o tempo de exposição de 1,3 segundos e uma intensidade de 18 kV.

Para avaliação foi utilizada uma adaptação do proposto pela RAS (BRASIL, 2009) e isto ocorreu devido ao fato da prévia separação dos grãos, portanto não havia sementes vazias ou danos por insetos. Assim sendo a semente foi classificada como inteira ou com danos físicos (rachaduras). Os dados foram expressos em porcentagem.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Teste de Compressão Uniaxial

A máquina de ensaios *WDW Computer Control Electronic Universal Testing Machine* forneceu os diagramas de tensão-deformação. Também foram fornecidos os valores de carga em kN para cada movimento da mesa.

Durante os ensaios preliminares foi constatado que a carga máxima admissível neste tipo de teste foi de 12 kN, para a densidade da amostra de 750 kg/m<sup>3</sup>. Quando o ensaio alcançou este valor houve a ruptura do cilindro de acrílico, logo, por medida de segurança durante os ensaios T3R2 e T3R3 a máquina de ensaios foi interrompida antes do ajustado, com valores máximos de carga em 6,7 kN e a densidade de 728 kg/m<sup>3</sup> e 8,3 kN e 738 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

No Gráfico 1 podemos verificar os valores médios dos módulos de elasticidade (Ed) obtidos para cada tratamento, sendo estes valores as médias entre todas as repetições.

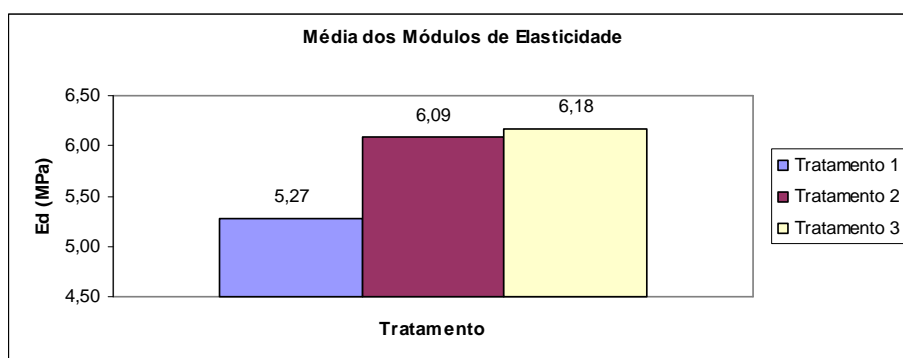


Gráfico 1. Valores médios do Módulo de Elasticidade obtidos com o ensaio de compressão.

Observa-se um aumento gradual do valor do módulo de elasticidade com o aumento da carga. Isto se deve ao fato do valor do módulo ser dependente da densidade da amostra, que aumentou em cada tratamento devido à maior compactação desta. Foi realizada a análise de variância dos valores médios de cada tratamento, estes não diferiram estatisticamente entre si, pelo teste Scott-Knott a 5%. Da mesma forma, os gráficos da tensão-deformação, obtidos pelo software da Máquina de Ensaio Universal para cada repetição de cada tratamento, apresentam uma maior inclinação com o aumento da carga e com a mudança dos tratamentos. Como é observado no Gráfico 2.



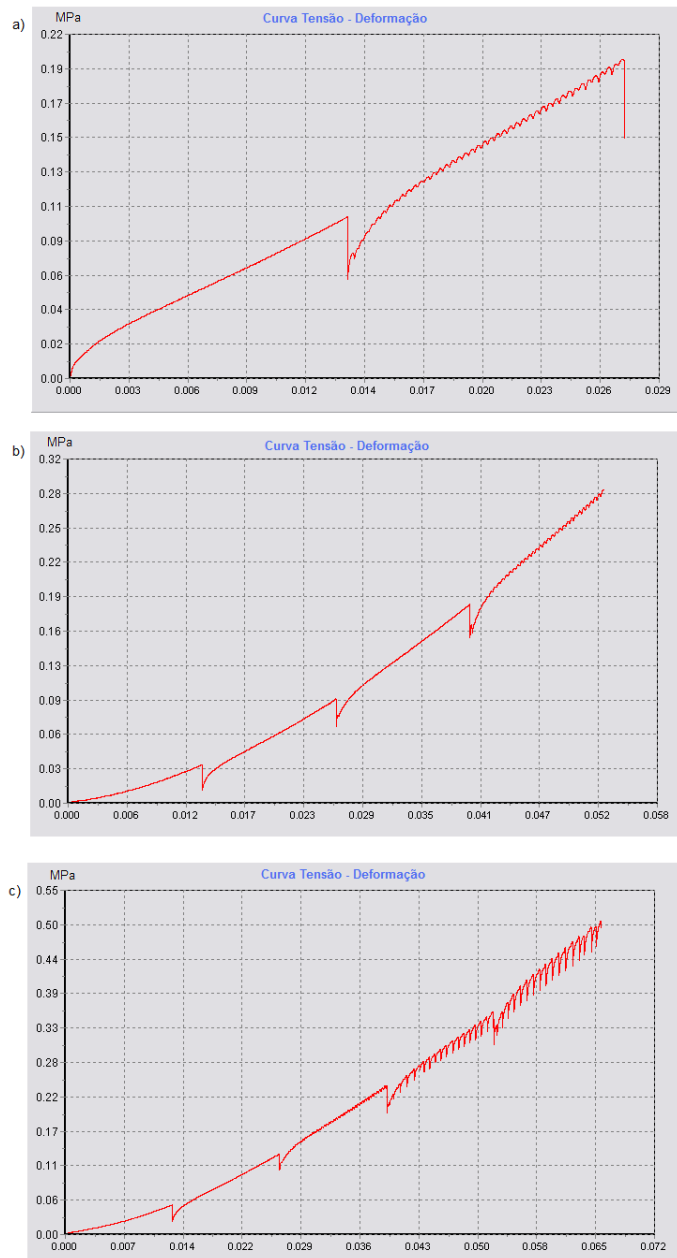


Gráfico 2. Gráfico tensão-deformação fornecidos pela Máquina de Ensaio Universal equivalentes a repetição 3 de cada tratamento. a) Tratamento 1; b) Tratamento 2; c) Tratamento 3

Nos gráficos observa-se o momento em que foram feitas as pausas para a leitura do aparelho *Stress Wave Timer*. Há uma queda da carga aplicada, ou seja, a pausa da força de compressão proporciona uma pausa na tensão aplicada à amostra e como efeito dinâmico ocorre uma diminuição do valor de tensão, mas devido à compactação do material granular a tensão não é zerada. Em todos os tratamentos é possível observar que no último trecho há variações da carga aplicada. A massa de grãos ao receber a carga de compressão tenta se ajustar no volume existente, e em alguns momentos descobre espaços vazios. Estes podem ser provenientes da acomodação do grão nos espaços vazios, devido a forma semicircular dos grãos de café ou de uma possível ruptura dos grãos, que pode ocorrer devido à carga aplicada, gerando mais espaços vazios.

A carga máxima aplicada ao café ocorreu durante o T3R3, com o valor de 8,32 kN. Com esta carga a pressão vertical calculada foi de 1,526 kPa, este valor encontra-se dentro dos padrões para silos verticais, como era o esperado pois o silo modelo foi construído de acordo com a norma europeia EN 1991-4 199 (EUROCODE, 2006).

#### **4.2 Stress Wave Timer**

No Gráfico 3 pode-se verificar os valores médios dos módulos de elasticidade ( $E_d$ ) obtidos para cada tratamento. Para o cálculo da média os valores obtidos quando não havia carga aplicada foram descartados pelo fato de existir uma variação muito grande, não havendo co-relação entre os dados obtidos. Acredita-se que esta falta de relação se deve a uma pequena particularidade da operação do ensaio. A obtenção dos dados é feita com o auxílio de dois acelerômetros: o primeiro acelerômetro, de onde é liberada a onda de tensão, possui o formato de um martelo, e o segundo acelerômetro, que recebe a onda, possui um formato cilíndrico. Ao se aplicar o primeiro

acelerômetro, deve-se tomar o cuidado de que o impacto formador da onda aconteça perpendicularmente ao modelo do silo. E o segundo acelerômetro deve estar alinhado com o ponto de impacto, seguindo a linha de diâmetro do modelo do silo, não sendo admitido qualquer movimento extra do corpo por onde a onda é transmitida. Nas leituras em que havia uma carga aplicada ao silo este movimento não era observado e as leituras sucessivas mostravam um padrão de resultados.

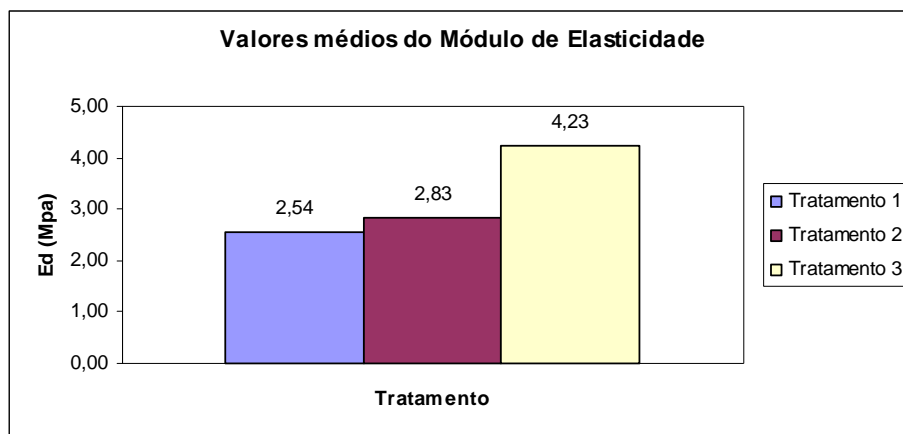


Gráfico 3. Valores médios do Módulo de Elasticidade obtidos com o aparelho Stress Wave Timer.

Para o cálculo do módulo de elasticidade utilizamos da Equação 1. Que prevê que com um aumento da densidade e/ou da velocidade haverá um aumento do módulo da elasticidade, criando uma curva linear. Durante as leituras não se observou esse comportamento, havendo picos ou quedas do valor do módulo de elasticidade em alguns pontos. Essas variações indicam que há mudanças na estrutura interna dos grãos, acomodação dos grãos ou o surgimento de danos internos nos grãos. As variações podem ser observadas no Gráfico 4 que representa o valor do módulo de elasticidade em função da densidade para cada altura de leitura realizada em cada tratamento. Para a confecção deste gráfico os

valores de densidade de todos os tratamentos foram adicionados de forma crescente e separados apenas com relação à altura de leitura do aparelho *Stress Wave Timer*. Para cada valor de densidade há um valor correspondente de módulo de elasticidade obtido por meio da Equação 1. Observa-se uma maior linearidade no gráfico correspondente a leitura realizada na altura de 200mm (b), ou seja, no ponto médio do silo modelo. Indicando que as leituras realizadas neste ponto tendem a ser mais homogêneas, portanto é o ponto ideal para a captação de dados.

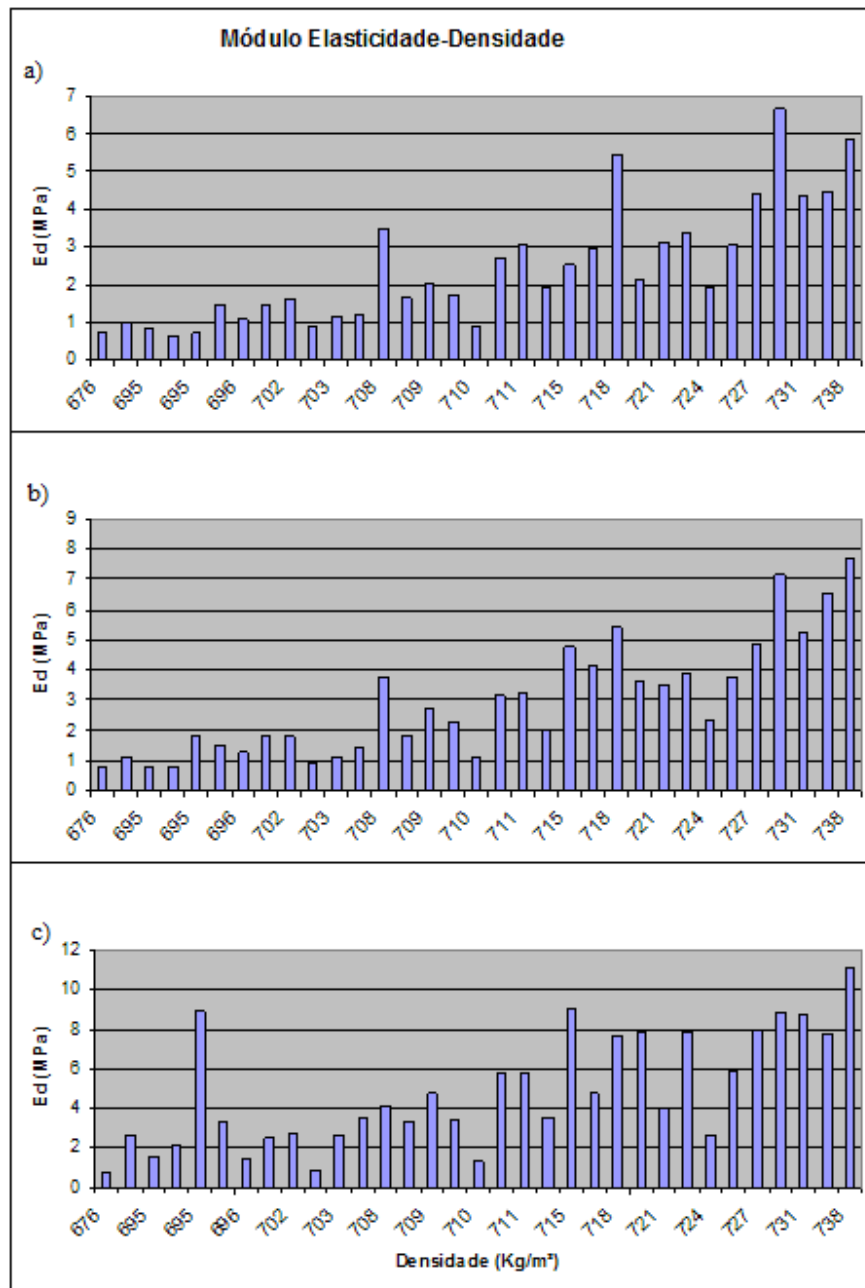


Gráfico 4. Variação do Módulo de Elasticidade em função da Densidade. a) Leitura a 100 mm. b) Leitura a 200 mm. c) Leitura a 300 mm.

### 4.3 Teste de Tetrazólio

Com base na classificação descritiva, podemos observar o Índice de Severidade dos Danos em função dos tratamentos na Tabela 2.

Tabela 2. Índice de Severidade dos Danos (%) dos grãos, UFLA, Lavras, MG, Brasil, 2014.

<b>Tratamentos</b>	<b>Índice Severidade Danos (%)</b>
0	86,37 a1
1	88,55 a1
2	90,66 a1
3	94,66 a2

\* Médias seguidas por uma mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott (5% de significância).

Estes resultados classificam os grãos como danificados, mesmo a testemunha (tratamento 0), não podendo ser possível determinar uma grande variação entre os tratamentos. O teste de Scott-Knot indica o tratamento 3 como o mais severo e é possível observar um significativo aumento do índice, sinalizando uma maior quantidade de danos externos, pois a testemunha (tratamento 0) obteve o menor ISD, com valor de 86,37 % e o tratamento 3 obteve o maior, com valor de 94,66 %.

O teste de tetrazólio evidenciou os danos externos, que provavelmente são oriundos do beneficiamento mecânico. Como as notas utilizadas para o cálculo do índice foram atribuídas de acordo com um parâmetro próprio das amostras de grãos de café utilizados neste experimento não há dados na literatura que sirvam como referência.

#### 4.4 Teste de Condutividade Elétrica

Os resultados referentes à condutividade elétrica, em função dos tratamentos, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  de amostra) dos grãos, UFLA, Lavras, MG, Brasil, 2014.

<b>Tratamentos</b>	<b>Condutividade Elétrica</b>
0	188,603333 a1
1	191,226667 a1
2	179,483333 a1
3	182,933333 a1

\* Médias seguidas por uma mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott (5% de significância).

Pode-se aferir pelo teste de condutividade elétrica que estatisticamente não houve diferença significativa entre os tratamentos. Malta, Pereira e Chagas (2005) atribui as diferenças entre os valores de condutividade elétrica à presença de grãos com defeitos. Pode-se atribuir a pequena variabilidade entre os valores pelo fato da criteriosa seleção dos grãos e pelo fato das cargas aplicadas em cada tratamento não terem sido suficientes para danificar a membrana interna dos grãos, não alterando a Condutividade Elétrica. A ausência de diferenciação entre a testemunha (tratamento 0) e os tratamentos provavelmente ocorreu pelo armazenamento ser superior a um ano e pelo tipo de beneficiamento. Os grãos já sofreram danos na membrana antes mesmo dos tratamentos.

Os dados encontrados para a condutividade elétrica estão de acordo com aqueles obtidos por Malta, Pereira e Chagas (2005) cujos dados grãos de café previamente separados quanto ao tamanho e sem defeitos, para os grãos de peneira 16, 17 e 18 foram 221,77; 216,66; 210,53  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  de amostra respectivamente. Os grãos aqui analisados eram pertencentes entre as peneiras

16 e 18. Entretanto estes valores estão distante dos obtidos por Santos et al. (2009) que apresentou resultados da condutividade elétrica como parâmetro para seu estudo sobre a influência do processamento por via úmida e o tipo de secagem, encontrando para o café descascado mecanicamente com secagem em terreiro o valor de  $121,56 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  de amostra. E dos valores que foram obtidos por Borém (2008) onde o grão de café de pior qualidade obteve para condutividade elétrica  $85,08 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ .

#### 4.5 Teste de Raios-X

Os resultados da classificação dos grãos de café pela avaliação visual dos raios-x podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4. Danos internos (%) nos grãos de café avaliados por imagens de raios-x, UFLA, Lavras, MG, Brasil, 2014.

<b>Tratamentos</b>	<b>Danos (%)</b>
0	23,66 a1
1	27,33 a1
2	35,33 a1
3	30,00 a1

\* Médias seguidas por uma mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott (5% de significância).

Pode-se aferir que estatisticamente não houve diferença significativa entre os tratamentos e entre os tratamentos e a testemunha (tratamento 0). As imagens obtidas com raios-x detalham internamente o grão, sendo que o parâmetro utilizado para fornecer a porcentagem de danos foi a presença de trincas. A impossibilidade de separar os tratamentos pode ser um indício que as cargas aplicadas em cada tratamento não foram suficientes para danificar internamente o grão.



O tratamento 0 (testemunha) obteve um valor médio de danos internos de 23,66 %. Na literatura o uso do teste de raios-X é comumente empregado conjuntamente com o teste de germinação, quando os valores deste são comparados e procura-se a correspondência entre os resultados. Considerando-se que com o valor obtido de danos internos pelo teste de raios-X seria o mesmo de sementes que não iriam germinar, este valor pode ser considerado alto, levando em conta que sem a aplicação de cargas há uma perda de material superior a 20 %, e merece estudos para revelar se esta média é oriunda do beneficiamento em máquinas ou da forma de secagem, para evitar desperdícios.

## **5 Conclusão**

O ensaio de compressão e o aparelho *Stress Wave Timer* forneceram valores de módulo de elasticidade. Embora estes valores sejam diferentes entre si, apresentam o mesmo comportamento, ou seja, o seu valor médio aumenta com o aumento da carga aplicada e da densidade da amostra.

O teste de tetrazólio, aplicado ao endosperma e por meio do índice de severidade de danos, foi capaz de diferenciar estatisticamente as cargas aplicadas.

O método do *Stress Wave Timer* indicou um módulo de elasticidade de 4,23 MPa denotando a partir deste valor danos mecânicos constatados pelo teste tetrazólio.

Os demais testes laboratoriais não foram capazes de diferenciar estatisticamente os danos internos para as diferentes cargas aplicadas em grãos beneficiados mecanicamente e armazenados demonstrando que não há danos internos para a carga máxima de 8,32 kN.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, L. B. **Ensaio não destrutivo para avaliação da integridade de elementos estruturais de madeiras em construções históricas**. 2010. 134 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- AMORIM, H. V. **Aspectos bioquímicos e histoquímicos do grão de café verde relacionados com a deterioração da qualidade**. 1978. 85 f. Tese (Livre Docência em Bioquímica) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1978.
- ANDRADE, R. N. B. et al. Correlação entre testes de vigor em sementes de cenoura armazenadas por diferentes períodos. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 1, n. 2, p. 153-162, 1995.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E111-04**: standard test method for Young's modulus, tangent modulus, and chord modulus. Philadelphia, 2004. 7 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. **Indicadores da indústria de café no Brasil 2012**. Disponível em: <<http://www.abic.com.br>>. Acesso em: 13 jul. 2013.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL SEED ANALYSTS. **Seed vigor test handbook**. Ithaca, 1983. 93 p.
- BEDFORD, L. V. Conductivity tests in commercial and hand harvested seed of pea cultivars and their relation to field establishment. **Seed Science and Technology**, Zurich, v. 2, n. 3, p. 323-335, 1974.
- BORÉM, F. M. **Pós-colheita do café**. Lavras: UFLA, 2008. v. 1, 631 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 8**, de 11 de junho de 2003. Regulamento Técnico de Identidade e

de Qualidade para a Classificação do Café Beneficiado Grão Cru. Brasília, 2003. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 12 jul. 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 2009. 395 p.

BURG, W. J. van der et al. Predicting tomato seedling morphology by X-ray analysis of seeds. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 119, n. 2, p. 258-263, 1994.

CARVALHO, M. L. M. et al. Teste de raios x na avaliação da qualidade de sementes de abóbora. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 31, n. 2, p. 221-227, 2009.

CARVALHO, M. L. M.; OLIVEIRA, L. M. Raios X na avaliação da qualidade de sementes. **Informativo ABRATES**, Brasília, v. 16, n. 1/3, p. 93-99, 2006.

CHRIST, M.; KIM, Y.; PARK, J. The influence of temperature and cycles on acoustic and mechanical properties of frozen soils. **KSCE Journal of Civil Engineering**, Berlin, v. 13, n. 3, p. 153-159, 2009.

CHUNG, Y. C.; OOI, J. Y. Confined compression and rod penetration of a dense granular medium: discrete element modelling and validation. **Modern Trends in Geomechanics**, Berlin, n. 106, p. 223-239, 2006.

CICERO, S. M. et al. Evaluation of mechanical damage in seeds of maize (*Zea mays* L.) by X-ray and digital imaging. **Seed Science and Technology**, Zurich, v. 26, p. 603-612, 1998.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café: safra 2013, segunda estimativa, maio/2013**. Brasília, 2013. 20 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café: safra 2014, segunda estimativa, maio/2014.** Brasília, 2014. 66 p.

COUTO, S. M. et al. Comportamento mecânico de frutos de café: módulo de deformidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 285-294, 2002.

CUNHA JÚNIOR, L. C. et al. Perspectivas de uso de métodos não destrutivos para a determinação da qualidade pós-colheita de frutas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 22., 2012, Bento Gonçalves. **Anais...** São Carlos: APTOR, 2012. v. 1, p. 1-13.

DELOUCHE, J. C. et al. **O teste de tetrazólio para viabilidade da semente.** Brasília: AGIPLAN, 1976. 103 p.

DIAS, M. C. L. L.; SILVA, W. R. Determinação da viabilidade de sementes de café através do teste de tetrazólio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 21, n. 11, p. 1139-1145, nov. 1986.

EUROCODE. **EN 1991-4: basis of design and actions on structures, actions in silos and tanks.** Brussels, 2006. 122 p.

FINNEY, E. E.; HALL, C. W.; MASE, G. E. Theory of linear viscoelasticity applied to potato. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 9, n. 4, p. 307-312, 1964.

FIRESTONE, F. A.; FREDERICK, J. R. Refinements in supersonic reflectoscopy: polarized sound. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 18, n. 1, p. 200-211, 1946.

FLOR, E. P. O. et al. Avaliação de danos mecânicos em sementes de soja por meio da análise de imagens. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 26, n. 1, p. 68-76, 2004.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Stress wave timing nondestructive evaluation tools for inspecting historic structures: a guide for use and interpretation.** Madison: USDA, 2000. 15 p.

FREITAS, M. N. **Métodos fisiológicos, bioquímicos e análise de imagem para avaliar a qualidade do café.** 2013. 165 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

HERNÁNDEZ, M. G. et al. Application of micromechanics to the characterization of mortar by ultrasound. **Ultrasonics**, Surrey, v. 40, n. 1, p. 217-221, 2002.

INTERNATIONAL RULES FOR SEED TESTING. **Seed science and technology.** Zurich, 1999. 333 p.

JINDAL, V. K.; MOHSENIN, N. N. Dynamic hardness determination of corn kernels from impact tests. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 23, p. 77-84, 1978.

JOHNSTONE, M. W. **Calibration of DEM models for granular material using bulk physical tests.** 2010. 310 p. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Edinburgh, Edinburgh, 2010.

KOBORI, N. N.; CICERO, S. M.; MEDINA, P. F. Teste de raios X na avaliação da qualidade de sementes de mamona. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 34, n. 1, p. 125-133, 2012.

KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA NETO, J. B.; HENNING, A. A. Relato dos testes de vigor disponíveis para grandes culturas. **Informativo ABRATES**, Brasília, v. 1, n. 2, p. 15-50, 1991.

LIU, Y. et al. X-ray studies on changes in embryo and endosperm morphology during priming and imbibition of tomato seeds. **Seed Science Research**, Wallingford, v. 3, n. 3, p. 171-178, Sept. 1997.

LOEFFLER, T. M.; TEKRONY, D. M.; EGLI, D. B. The bulk conductivity test as an indicator of soybean quality. **Journal of Seed Technology**, Lansing, v. 12, n. 1, p. 37-53, 1988.

MALTA, M. R.; PEREIRA, R. G. F. A.; CHAGAS, S. D. R. Condutividade elétrica e lixiviação de potássio do exsudato de grãos de café: alguns fatores que podem influenciar essas avaliações. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 5, p. 1015-1020, set./out. 2005.

MARCOS FILHO, J.; CICERO, S. M.; SILVA, W. R. da. **Avaliação da qualidade das sementes**. Piracicaba: FEALQ, 1987. 230 p.

MASETTO, T. E. et al. Avaliação da qualidade de sementes de *Eugenia pleurantha* (Myrtaceae) pelo teste de raios X. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 29, n. 3, p. 170-174, 2007.

MATTHEWS, S.; POWELL, A. A. Electrical conductivity test. In: PERRY, D. A. (Ed.). **Handbook of vigour test methods**. Zurich: ISTA, 1981. p. 37-42.

MCKINNEY, R. H. Influence of soil temperature and moisture on infection of wheat seedlings by *Helminthosporium sativum*. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 6, p. 195-218, 1923.

METRIGUARD. Disponível em: <<http://www.metriguard.com/metprod.htm>>. Acesso em: 10 maio 2014.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Science, 1970. 742 p.

MOLENDÁ, M.; STASIAK, M. Determination of the elastic constants of cereal grains in a uniaxial compression test. **Institute of Agrophysics**, Lublin, v. 16, n. 1, p. 61-65, Mar. 2002.

PELLAM, J. R.; GALT, J. K. Ultrasonic propagation in liquids: I, application of pulse technique to velocity and absorption measurements at 15 megacycles. **Journal of Chemical Physics**, New York, v. 14, p. 608-614, 1946.

POVEY, M. J. W.; MCCLEMENTS, D. J. Ultrasonics in food engineering: part I, introduction and experimental methods. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 2, p. 17-45, 1988.

PRETE, C. E. C. **Condutividade elétrica do exsudato de grãos de café (*Coffea arabica* L.) e sua relação com a qualidade da bebida**. 1992. 125 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1992.

REIS, L. S. et al. Lercafé: novo teste para estimar o potencial germinativo de sementes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 32, n. 1, p. 1-6, 2010.

RIBEIRO, D. M. et al. Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 493-500, 2007.

ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**, Madison, v. 48, n. 1, p. 14-19, Jan. 1998.

RUFFATO, S.; COUTO, S. M.; QUEIROZ, D. M. de. Módulo de elasticidade de grãos de milho submetidos a impactos mecânicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 101-106, 2001.

SAATH, R. et al. Microscopia eletrônica de varredura do endosperma de café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 1, p. 196-203, jan./fev. 2010.

SANTOS, S. A. et al. X-ray technique application in evaluating the quality of papaya seeds. **Seed Science and Technology**, Zurich, v. 37, n. 3, p. 776-780, Oct. 2009.

SEGERLIND, L. J. **Applied finite element analysis**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: J. Wiley, 1984. 427 p.

SEGUNDINHO, P. G. A. et al. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1155-1161, nov./dez. 2012.

SHELEF, L.; MOHSENIN, N. N. Moisture relations in germendosperm and whole corn kernel. **Cereal Chemistry**, Saint Paul, v. 43, n. 3, p. 347-353, 1966.

SILVA JÚNIOR, S. F.; MARQUES, P. V. **Ensaaios não destrutivos**. Belo Horizonte: UFMG, 2006. Apostila.

SIMAK, M.; GUSTAFSSON, A. X-ray photography and sensitivity in forest tree species. **Hereditas**, Lund, v. 39, p. 458-468, 1953.

TINGLEY, D. A.; JOHNSON, K. **Inspection of teeth using stress wave time non-destructive methods**. U.S. Patent n. 6.589.054, 8 jul. 2003.

VIEIRA, M. G. G. C. **Testes rápidos para a determinação da viabilidade e da incidência de danos mecânicos em sementes de cafeeiro**. Lavras: UFLA, 1998. 34 p. (Boletim Agropecuário, 26).

VIEIRA, R. D.; CARVALHO, N. M. **Testes de vigor em sementes**. Jaboticabal: FUNEP, 1994. 164 p.

WANG, D. et al. Application of ultrasonic technology for physical-mechanical properties of frozen soils. **Cold Regions Science and Technology**, New York, v. 44, n. 1, p. 12-19, Jan. 2006.

WOODSTOCK, L. W. Physiological and biochemical tests for seed vigor. **Seed Science and Technology**, Zurich, v. 1, n. 1, p. 127-157, 1973.



ZOERB, G. C.; HALL, C. W. Some mechanical and rheological properties of grains. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 5, n. 1, p. 83-92, 1960.