

CLÁUDIA DA SILVA BATISTA

**EFEITOS DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM, DO TEOR DE
UMIDADE E DO ESTÁDIO DE MATURAÇÃO NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE FRUTOS DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.)**

**Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola,
para obtenção do título de “Magister
Scientiae”.**

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2002**

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela acolhida e oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

À Professora Sandra Maria Couto, pela orientação, pelo estímulo e pela amizade.

Aos Conselheiros Adílio Fluzino de Lacerda Filho e Paulo Roberto Cecon, pelas valiosas sugestões e pela colaboração.

À minha mãe, pela vida, pelo apoio, pelos ensinamentos e pela dedicação em todos os momentos.

Aos meus filhos Caio e Iago, pela alegria de fazer parte de suas vidas.

Ao Claudionor, pelo companheirismo e pelo carinho.

Aos irmãos , pelo carinho e respeito, pelo incentivo e apoio

À amiga Solenir, especialmente, pela ajuda e pela certeza de amizade sincera.

Aos amigos Edivan , Cristina e Cristiane, pela amizade e pela ajuda.

Aos amigos Ivano, Ednilton, Wederson, Salomão e Reginaldo, pelo companheirismo e pela amizade, pelas idéias e pelo incentivo.

Aos funcionários Silas, Gallinari, Edna, José Estáquio, pela ajuda e colaboração.

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola, pela colaboração no desenvolvimento e na conclusão deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, deram sua parcela de contribuição para a realização deste trabalho.

BI OGRAFI A

Cláudia da Silva Batista, filha de Inaldo Batista da Silva e Maria Cícera Nogueira da Silva, nasceu em Campina Grande, Estado da Paraíba, no dia 18 de abril de 1972.

Em abril de 1990, iniciou o curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal da Paraíba - UFPB, em Campina Grande, diplomando-se em março de 1999.

Em março de 2001, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa - UFV, em Viçosa, concentrando estudos na área de Armazenamento e Processamento de Produtos Vegetais. Defendeu tese em fevereiro de 2002.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Propriedades mecânicas - Forças e Deformações.....	4
2.2. Módulo de elasticidade.....	8
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
3.1. Separação dos frutos pela cor.....	12
3.2. Determinação do teor de umidade.....	13
3.3. Secagem do produto e obtenção de amostras em diferentes teores de umidade.....	13
3.4. Testes de compressão.....	14
3.5. Forças e deformações para colapso do produto.....	15
3.6. Módulo de deformidade.....	15
3.7. Análise estatística.....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
4.1. Força para o colapso.....	18
4.2. Deformação específica para o colapso.....	24
4.3. Módulo proporcional de deformidade.....	29
5. CONCLUSÕES.....	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
APÊNDICE.....	39

RESUMO

BATISTA, Cláudia da Silva, M.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2002. **Efeitos da temperatura do ar de secagem, do teor de umidade e do estágio de maturação no comportamento mecânico de frutos de café (*Coffea arabica* L.)**. Orientador: Sandra Maria Couto. Conselheiros: Adílio Flauzino de Lacerda Filho e Paulo Roberto Cecon.

Neste trabalho, apresentam-se as grandezas solicitações de forças e deformações para o colapso de frutos de café (*Coffea arabica* L.), submetidos a compressões, e valores de módulos de deformidade do produto, em que foram investigados os efeitos do estágio inicial de maturação dos frutos, do teor de umidade do produto e da temperatura do ar de secagem. Os frutos da variedade Catuaí Vermelho, colhidos manualmente, foram submetidos aos seguintes procedimentos: classificação por cor ("verde", "verdoengo" e "cereja"), secagem (camada fina nas temperaturas de 40, 50 e 60°C), e testes de compressão (máquina de ensaios "EMIC"). Intensidades de forças e deformações para colapso dos frutos foram obtidos diretamente das curvas de compressão, e os módulos de deformidade foram determinados a partir de dados experimentais (curvas de força *versus* deformação) e da teoria de corpos convexos sob compressão. A análise e interpretação dos resultados obtidos neste trabalho permitiram concluir que: (a) as forças e deformações necessárias para o colapso de frutos no estágio de maturação "verde" foram maiores que as essenciais para os frutos nos estágios de maturação "verdoengo" e "cereja" que, na maioria dos casos, não diferiram entre si; (b) os

módulos proporcionais de deformidade dos frutos nos três estádios de maturação diferiram entre si. Em todas temperaturas de secagem, os frutos, a 50% b.u., nos estádios de maturação "verde" e "cereja", tiveram, respectivamente, os maiores e os menores módulos de deformidade. Os módulos proporcionais de deformidade de frutos no estádio de maturação "verde" foram os maiores em todos os teores de umidade, quando o produto foi submetido a secagens na temperatura de 60°C; (c) à medida que o teor de umidade do fruto aumentou, as intensidades das forças para a ruptura sempre aumentara (frutos "verde"); sempre diminuíram (frutos "verdoengo"); e, no fruto no estádio de maturação "cereja", diminuíram até um valor mínimo (produto a 43,7% b.u.) e, em seguida, tendera a aumentar; (d) à medida que o teor de umidade dos frutos, nos diferentes estádios de maturação, aumentou, as deformações específicas dos frutos cresceram até um valor máximo (produto com teor de umidade entre 27 e 38% b.u.) e, então, decrescera; os módulos de deformidade dos frutos decrescera até um valor mínimo (produto com teor de umidade entre 30 e 45% b.u.) e, em seguida cresceram; (e) à medida que a temperatura do ar de secagem aumentou, as forças para o colapso de frutos no estádio de maturação "cereja" diminuíram; os valores de deformação de frutos no estádio de maturação "verdoengo" aumentaram; e os valores do módulo de deformidade de frutos no estádio de maturação "verde" aumentaram. Esta tendência não foi percebida nos frutos nos outros dois estádios de maturação.

ABSTRACT

BATISTA, Cláudia da Silva, M.S., Universidade Federal de Viçosa, February of 2002. **Effects of the temperature of the drying air, of the moisture and of the maturation stadium in the mechanical behavior of fruits of coffee.** Advisor: Sandra Maria Couto. Committee Members: Adílio Flauzino de Lacerda Filho and Paulo Roberto Cecon.

Force and strain requirements for the collapse of coffee fruits (*Coffea arabica* L.) submitted to compressions and elasticity modulus values for the product are presented in this work. The effects of the fruit maturation, moisture content and drying temperature were investigated. The fruits of the variety Catuaí Vermelho were submitted to the following procedures: color classification ("green", "verdoengo" and "cherry"); drying process (thin layer at temperatures of 40, 50 and 60°C) and compression tests (testing machine "EMIC"). Force and strain values for fruit collapse were obtained directly from the compression curves and the elasticity modulus was obtained from experimental data (force *versus* deformation curves) and from the theory of convex bodies under compression. The analysis of the results obtained in this work allowed the following conclusions: (a) the force and strain requirements for the collapse of fruits "green" were larger than those needed for the product "verdoengo" and "cherry" that, in most of the cases, did not differ; (b) the elasticity modulus of the fruits in the three maturation levels differ. The fruits "green" at 50% w.b., for all drying temperatures, presented the largest modulus while the "cherry" fruits, the smallest ones. The modulus values of

fruits "green" at all moisture content were the largest when the product was submitted to a drying temperature of 60°C; (c) as the moisture content of the fruit increases, the rupture force presented the following behaviors: it always increase ("green" fruits); it always decrease (fruit "verdoengo") and, for "cherry" fruit, it decreases until a minimum value (product at 43,7% w.b.) and then it increases; (d) as the fruit moisture content increases: - the fruit strain increases to a maximum value (product with moisture content between 27 and 38% w.b.) and then it decreases and - the fruit elasticity modulus decreases to a minimum value (product with moisture content between 30 and 45% w.b.) and then it increases; (e) as the drying temperature increases: - the collapse forces for the "cherry" fruits decrease; - the strain values for "verdoengo" fruits increase and - the elasticity modulus values of "green" fruits increase. These trends were not noticed for the fruits in the other two maturation levels.

1 - INTRODUÇÃO

A cultura do café teve grande influência na colonização e no desenvolvimento do Brasil e, atualmente, assume um importante papel econômico e social. Segundo Mendes, citado por SILVA et al. (1997), o Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café. No País, aproximadamente dez milhões de pessoas encontram-se, direta ou indiretamente, envolvidas com a cultura, desde a produção até a comercialização e industrialização.

Os produtos agrícolas têm seus preços baseados em parâmetros qualitativos e, dentre eles, destaca-se o café, cujo valor pode diminuir significativamente quando há perda de sua qualidade, que é, também, um fator limitante para a sua exportação. Segundo Wiesel, citado por CARVALHO et al. (1997), para a sobrevivência da cafeicultura, o Brasil tem que seguir o caminho da qualidade. Assim sendo, o amplo conhecimento de técnicas que possibilitem a produção de café com alta qualidade é indispensável para a cafeicultura moderna.

Dentre os parâmetros mais importantes que influenciam a qualidade do café, destacam-se as características da espécie e variedade, condições ambientais durante o seu desenvolvimento, época e procedimentos de colheita, métodos de secagem e práticas de armazenagem (SILVA e BERBERT, 1999).

Nas diversas regiões brasileiras produtoras de café, cultivam-se variedades que diferem em tamanho, velocidade de amadurecimento dos frutos, resistência física, a perda de teor de umidade etc. Estas diferenças são responsáveis, na maioria das vezes, pela ineficiência das máquinas e dos

procedimentos utilizados durante as operações de pré-processamento, que contribuem para a redução de qualidade do produto. Apesar da significativa importância que a cafeicultura desempenha no País, pouco se conhece sobre o comportamento mecânico dos frutos durante os processos de colheita, pré-processamento e armazenamento. Essas informações são necessárias nos projetos de construção e otimização de máquinas e equipamentos e no desenvolvimento de metodologias adequadas, que garantam a obtenção de um produto final com alta qualidade. As características mecânicas de um produto são essenciais para a determinação de forças que os mecanismos de colheita precisam fornecer para que o fruto de café se desprenda da planta e da especificação de cargas que o material poderá suportar sem sofrer danos.

Baseado no exposto e como uma primeira aproximação, este trabalho teve por objetivo geral a determinação de características mecânicas necessárias aos projetos e ao desenvolvimento de equipamentos e metodologias relacionadas aos vários processos aos quais o café fica submetido, desde a colheita até o consumo final. Especificamente, foram investigados os efeitos das seguintes variáveis: (a) estágio de maturação inicial dos frutos; (b) teor de umidade; e (c) temperatura do ar de secagem, nos seguintes parâmetros: solicitações de forças e deformações para o colapso do material submetido a compressões e módulos proporcionais de deformidade do produto.

2 - REVISÃO DE LITERATURA

De acordo com a história do Brasil, a cultura do café teve grande influência na colonização e no desenvolvimento do País, assumindo, hoje, um importante papel econômico e social. Atualmente, o Brasil ocupa a posição de maior produtor e exportador de café no mercado internacional (IAPAR, 1999).

O café movimenta anualmente mais de US\$40 bilhões no mercado mundial, sendo uma importante atividade para a geração de emprego e renda em muitos países. Estima-se que mais de 20 milhões de pessoas, no mundo, dependem diretamente desta atividade para a sua sobrevivência econômica (MORICOCCHI et al., 1997).

A realidade atual da cafeicultura brasileira indica que a agroindústria nacional tem capacidade para abastecer os mercados interno e externo com um produto de qualidade, que depende de um estímulo em torno da revitalização da cultura em busca da produtividade com qualidade (TÔRRES, 1997).

A qualidade do café não é determinada somente por características físicas e químicas do grão, mas também por fatores de pré-colheita que interferem nessa qualidade (VILELA, 1997).

SILVA et al. (1995) afirmaram que é possível produzir café de tipo superior mesmo em regiões consideradas produtoras de café de baixa qualidade, se forem observadas as técnicas de colheita, preparo e secagem, além das técnicas agronômicas.

Segundo MOREIRA (1999), a mão-de-obra envolvida na colheita manual representa 33% do custo de produção de café. Com máquinas colhedoras, reduz-se esse índice para 17%.

Para SILVA et al. (1997), a hora de colher a safra não é apenas uma das etapas mais importantes, mas aquela que mais influi no custo de produção do café. O gerenciamento da colheita e o conhecimento das principais propriedades físicas do fruto de café determinam, muitas vezes, a rentabilidade do processo produtivo.

2.1 – Propriedades Mecânicas – Forças e Deformações

Corpos se deformam de maneira diferenciada quando submetidos ao mesmo carregamento. O que distingue um corpo do outro é a relação entre força e deformação, denominada equação constitutiva do material. A mais simples equação constitutiva é aquela em que a deformação é diretamente proporcional à força. O experimento mais simples e comum para medir a resposta mecânica de um material é o teste de compressão (ou tração) uniaxial, como esquematizado na Figura 1. Neste tipo de teste, uma força, gradualmente crescente, é aplicada (pela placa compressor) no material e os resultados de força-deformação, durante a compressão, são registrados. Se o material é não-biológico, geralmente um espécime de forma geométrica regular, retirado do material, é submetido aos testes. Os valores de força e deformação dependem do tamanho do espécime; quanto maior o tamanho do espécime, maior é a força para produzir a mesma deformação. Na caracterização da resposta do material, os resultados 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" de um material transforma-se, então, em uma de "tensão-deformação específica"(COUTO et al., 2001b).

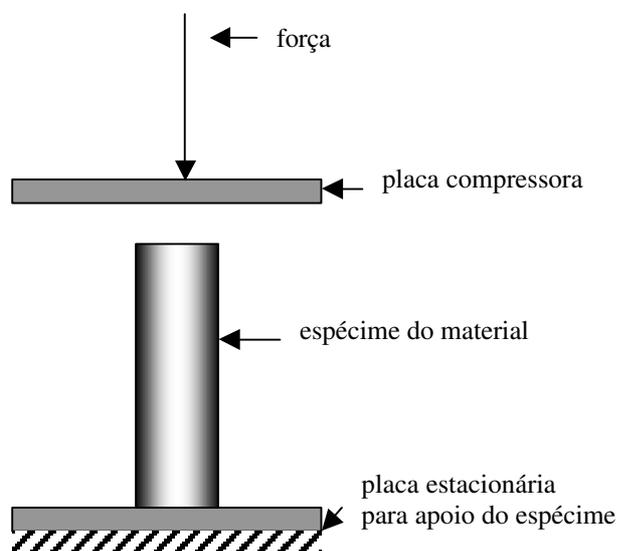


Figura 1 – Esquema do teste de compressão uniaxial em um espécime de um material.

O conhecimento das características físicas do grão e de suas propriedades mecânicas é essencial no projeto, na construção e na operação dos equipamentos de limpeza, secagem e armazenagem dos produtos agrícolas.

BARGALE-PRAVEEN et al. (1995) afirmaram que grãos e frutos são alvos de uma série de pressões estáticas e dinâmicas durante a colheita, o manuseio, o transporte e o armazenamento. Essas pressões incluem as de impacto de alta velocidade e as estáticas de várias magnitudes. Estas pressões causam danos significativos, tais como escoriações, esmagamento, rachaduras, decréscimo de qualidade e aumento da suscetibilidade à deterioração durante o armazenamento. Os autores ainda comentam que a natureza e a extensão do dano dependem de várias características reológicas e mecânicas, juntamente com as condições de força ou tensão às quais o grão é submetido. Diante disso, os autores afirmam que é importante o estudo do comportamento mecânico e viscoelástico desses produtos para que os processos e os equipamentos possam

ser desenvolvidos para atingir a máxima eficiência e maior qualidade do produto final.

As propriedades mecânicas dos grãos agrícolas são afetadas, principalmente, pelos seguintes parâmetros: variedade, teor de umidade, tipo de força ao qual o produto é submetido, região do grão onde são aplicadas estas forças, e temperatura usada durante secagem do material (MOHSENIN, 1978; PRUSSIA e CAMPBELL, 1985; LI et al., 1989; ZHANG et al., 1989). É clássico, também, o conhecimento de que, quando submetidos a forças de intensidades moderadas, os grãos com baixos teores de umidade exibem características de sólidos elásticos, enquanto aqueles com teores de umidade altos comportam-se como materiais viscoelásticos, ou seja, suas propriedades são dependentes do tempo ou da taxa de aplicação de forças.

Vários pesquisadores têm observado que a temperatura do ar de secagem é um dos fatores que mais afetam as propriedades mecânicas de grãos agrícolas (GUSTAFSON e HALL, 1972; WHITE et al., 1982).

A secagem de produtos agrícolas com alto teor de umidade inicial, como os frutos do café, apresenta significativa redução de volume, pois o produto sofre alterações em suas dimensões e forma originais, o que ocorre simultaneamente com a difusão de umidade, podendo afetar a taxa de desidratação do produto. A remoção de água diminui a tensão exercida pelo líquido nas paredes celulares do produto, provocando uma contração volumétrica do material (FORTES e OKOS, 1980). Alguns autores relatam que a desconsideração do fenômeno de redução volumétrica durante o processo de desidratação é uma das principais fontes de erros no desenvolvimento de modelos matemáticos para simular o processo de secagem de materiais biológicos (BROOKER et al., 1992).

A secagem é uma das etapas mais importantes durante o processamento e, se for conduzida indevidamente, poderá acarretar prejuízos ao cafeicultor. Basta dizer que se um lote de café for seco em excesso, terá sua massa final afetada, com aparecimento de grãos quebrados, pois grãos supersecos quebram-se durante o beneficiamento (PINTO FILHO, 1994).

De acordo com VILELA (1997), a secagem do café é um processo mais lento e complexo que a de outros produtos agrícolas devido às seguintes características:

- a) teor de umidade elevado (60 a 70% b.u.) na colheita;
- b) mistura heterogênea: grãos com diferentes teores de umidade e estádios de maturação, cujas proporções variam durante a colheita;
- c) estrutura complexa do fruto: camadas de diferentes tecidos e teores de umidade, com polpa e mucilagem muito úmidas (cerca de 85% b.u), e, logo após, um tecido celulósico duro (pergaminho), que encobre as sementes com cerca de 50% b.u de teor de umidade;
- d) redução do volume durante a secagem (30-40%); e
- e) tamanho desuniforme dos frutos.

LIU et al. (1990) verificaram, através de testes de compressão em soja, efeitos significativos do teor de umidade e da temperatura do ar de secagem no comportamento mecânico do produto. À medida que a temperatura do ar de secagem diminui, as forças para ruptura do grão aumentam, e quando se aumenta a teor de umidade do produto, estas forças diminuem.

GUPTA e DAS (2000) verificaram que a força para a ruptura de sementes de girassol diminuía à medida que o teor de umidade do produto aumentava de 3,8 para 16,6% b.u. e que a deformação aumentava à medida que se elevava o teor de umidade do produto.

A determinação das forças que os mecanismos de colheita precisam exercer sobre os frutos, em diferentes estádios de maturação, para que se desprendam da planta, das cargas que o material poderá suportar sem sofrer danos, e das resistências relativas dos frutos de café, são necessárias para o desenvolvimento de máquinas e metodologias visando à minimização da perda de qualidade do café (COUTO et al., 2001a).

CRISOSTO e NAGAO (1991) afirmaram que há diferença significativa na força de remoção de frutos "verde" e "cereja" em diferentes variedades de café. Observaram que a força para a remoção dos frutos "verde" foi semelhante em cinco variedades testadas, mas foi, aproximadamente, o dobro daquela requerida para a remoção dos frutos maduros.

INAMASU e ANDRADE (1997) realizaram testes com uma máquina acionada por um motor de dois tempos, acoplado diretamente a uma haste para derrigar café. Concluíram que o desempenho da máquina foi influenciado por dois fatores predominantes: carga de frutos e estágio de maturação.

SAMPAIO (2000) determinou que, de maneira geral, não há diferença na força de desprendimento de frutos em diferentes posições na planta de café e que essa força é maior no estágio de maturação "verde" que no estágio "verdoengo", e este, por sua vez, é maior que no estágio de maturação "cereja".

COUTO et al. (2001a) investigaram o efeito do estágio de maturação, velocidade de aplicação de forças e da orientação do produto no colapso de frutos de café submetidos à compressão. Observaram que: (a) as intensidades das deformações específicas no colapso dos frutos "verde" e "cereja", em cada velocidade de compressão, não diferem; (b) as solicitações de forças e energias pelos frutos "verde" foram maiores do que aquelas dos frutos "cereja"; (c) as intensidades das forças e energias requeridas para o colapso de frutos "cereja" e "verdoengo" não foram influenciadas pela posição de compressão do produto; (d) as forças e energias requeridas para o colapso de frutos "verde", independente da posição de compressão, foram maiores do que aquelas exigidas pelos frutos "verdoengo", que, por sua vez, foram superiores às necessárias ao produto "cereja". Para obterem resultados confiáveis nas determinações das forças de colapso em frutos de café, os autores recomendam o uso de amostras compostas de 50 frutos e uma velocidade de compressão de $0,83 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$.

2.2. Módulo de elasticidade

Segundo SEGERLIND (1984), o conhecimento das propriedades mecânicas básicas é um requerimento para simulações e cálculos da previsão do comportamento de um material quando submetido a diferentes tipos de carregamento. Dentre estas propriedades, evidencia-se o módulo de

elasticidade do material, que permite que sejam feitas comparações de resistências relativas de vários materiais.

Para um corpo convexo comprimido entre duas placas paralelas, os dados de "força - deformação", provenientes dos testes de compressão do material, podem ser usados com o método de HERTZ, para determinar um módulo de elasticidade aparente por meio da equação (1) (AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK OF STANDARDS, 1994):

$$E = \frac{0,531F(1-\mu^2)}{D^{3/2}} \left[\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} + \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{R_2} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (1)$$

em que E – módulo de elasticidade aparente (Pa);

F - força (N);

D - deformação elástica do corpo em ambos os pontos e contato (com a placa superior e com a inferior) (m);

μ - razão de Poisson;

r_1 , R_1 , r_2 e R_2 – raios de curvatura do corpo convexo nos pontos de contato (m).

Para se determinar o módulo de elasticidade pela equação (1), é necessária a separação da deformação total do produto em suas partes: elástica e plástica. Isso requer a obtenção da curva de "força versus deformação" durante o carregamento e descarregamento do produto.

Um módulo de deformidade do produto pode ser obtido, também, pela equação (1), só que, neste caso, D representa a deformação total (soma da elástica e plástica) e requer, apenas, a curva de "força versus deformação" durante o carregamento do produto. Em termos de comportamento mecânico de um material, o módulo de deformidade é tido como mais significativo do que o de elasticidade, pois, quando um produto é comprimido, a deformação total é que tem aplicação prática.

KANG et al. (1995) determinaram o módulo de deformidade de grãos de trigo usando espécimes de superfícies planas e paralelas, extraídos do produto. O módulo foi determinado como sendo a inclinação da curva "tensão-deformação específica", provenientes de testes de compressão. Foram investigados os efeitos da taxa de compressão e do teor de umidade do

produto nos valores dos módulos de deformidade. O módulo aumentou com incrementos na taxa de compressão, até esta atingir $0,0017 \text{ m s}^{-1}$, e depois o módulo diminuiu. Para a variedade de trigo macio, o módulo diminuiu rapidamente quando o teor de umidade foi aumentado de 0,14 para 0,18 b.s., enquanto, para a variedade dura, o módulo diminuiu lentamente. Os valores dos módulos variaram de 150 a 370 MPa.

Segundo DIENER et al. (1969), no projeto dos sistemas de colheita com remoção de massa e com garras vibratórias, os engenheiros necessitam de conhecer as propriedades mecânicas e as de crescimento das árvores frutíferas. Agricultores também necessitam dessa informação para determinar a maneira de se fazer a poda, visando a colheita mecânica. As forças atuantes nos ramos são governadas pelas mudanças na elasticidade e no amortecimento do ramo durante o ano. Por sua vez, essas variações são causadas por duas condições: a) mudanças fisiológicas normais no ramo em função do tempo e b) mudanças viscoelásticas não lineares devido ao carregamento externo aplicado aos ramos. Concluiu-se que o amortecimento e a elasticidade nos ramos mais longos de macieira variam em cerca de 30% durante o período de um ano.

HOKI e TOMITA (1976) determinaram o módulo de elasticidade de soja em função do seu teor de umidade. Os resultados mostraram que o valor desta grandeza diminui à medida que o teor de umidade aumenta.

BARGALE-PRAVEEN et al. (1995) observaram que o módulo de elasticidade e a tensão máxima de compressão em um único grão de trigo e de canola decresceram linearmente com o aumento do teor de umidade.

HENRY-ZACHARY et al. (2000) estudaram o efeito da variedade, da velocidade de compressão, da orientação do produto e do teor de umidade sobre o comportamento mecânico de grãos de soja. Dados de força *versus* deformação durante a compressão foram avaliados através de parâmetros elásticos identificados por um modelo cúbico generalizado. Observaram que o aumento do teor de umidade resultou na diminuição da força e da resistência ao colapso.

COUTO et al. (2001b) determinaram o módulo de deformidade de fruto de café nos estádios de maturação "verde", "verdoengo" e "cereja" com teores de umidade de 73,0; 75,0 e 69,5% b.u., respectivamente. Concluíram que: o

módulo proporcional de deformidade é dependente do valor da deformação do fruto; quanto maior a deformação, menor o valor do módulo; os módulos proporcionais de deformidade para frutos "cereja", "verde" e "verdoengo" variaram de $(9 \pm 1) \times 10^6$ até $(1,5 \pm 0,2) \times 10^7$ Pa, de $(5,10 \pm 0,09) \times 10^7$ até $(6,8 \pm 0,2) \times 10^7$ Pa, e de $(2,6 \pm 0,4) \times 10^7$ até $(4,0 \pm 0,4) \times 10^7$ Pa, respectivamente.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Setor de Armazenamento e Processamento de Produtos Vegetais, no Laboratório de Propriedades Físicas do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa -MG.

Foram utilizados frutos de café (*Coffea arabica* L.) da variedade Catuaí Vermelho, colhidos (junho a agosto de 2001) em regiões próximas a Viçosa: Fazenda da Mundial (município de Araponga) e sítio Boa Vista (cidade de Coimbra). Os frutos de café foram colhidos manualmente, e aqueles com danos na casca devido à perda do pedúnculo foram descartados. Os frutos foram submetidos aos seguintes procedimentos: separação pela cor; secagem; testes de compressão e determinação das características mecânicas.

3.1 - *Separação dos frutos pela cor*

Frutos de café, após colheita manual, foram classificados pela cor. Aqueles em que mais predominou a cor "cereja"; o "verdoengo" e o "verde" (detecção visual) foram selecionados para os experimentos.

3.2 - Determinação do teor de umidade

Devido à ausência de uma metodologia - padrão para a determinação do teor de umidade de frutos de café, os teores de umidade do produto usado neste trabalho foram determinados por meio do método - padrão de estufa, com circulação natural de ar (105 ± 3 °C, durante 24 horas), em três repetições (BRASIL, 1992).

3.3 – Secagem do produto e obtenção de amostras em diferentes teores de umidade

Dos lotes de café contendo frutos em cada estágio de maturação, foram retiradas amostras que foram submetidas à secagem em camada fina. A altura da camada de frutos durante o processo foi de 0,01 m. As secagens do produto foram realizadas em um secador cuja fonte de aquecimento era composta por um conjunto de resistências elétricas. Esquemas da vista lateral e da planta baixa do secador são apresentados, respectivamente, nas Figuras 2 e 3. No processo de secagem dos frutos de café foram usadas uma vazão de ar de $0,0012 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e três temperaturas (40, 50, 60°C) do ar de secagem. A secagem das amostras de café, a diferentes temperaturas, proporcionou a obtenção das subamostras, em diferentes teores de umidade (12, 20, 30, 50 e 60% b.u.), que foram usadas nos testes de caracterização física e mecânica. A umidade relativa e temperaturas médias do ar ambiente, durante o período de secagem, foram de 65% e 20° C, respectivamente.

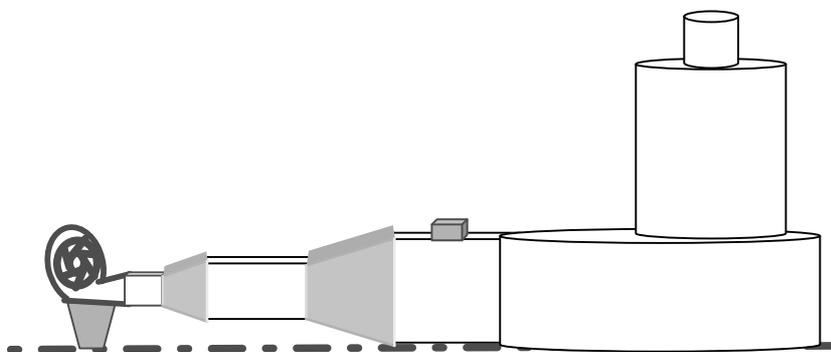


Figura 2 - Vista lateral do secador de leito fixo.

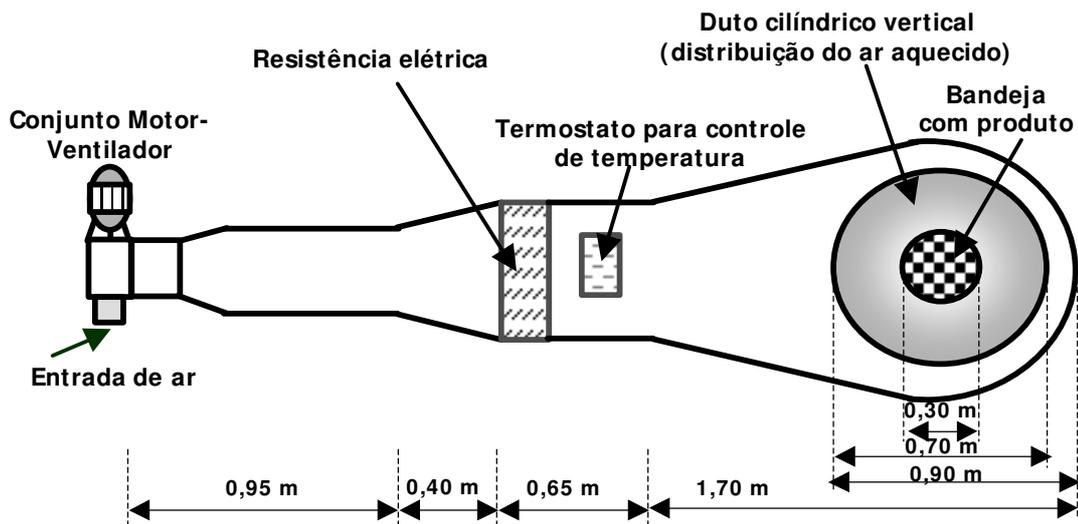


Figura 3 - Planta baixa do secador de leito fixo.

3.4 - Testes de compressão

Cinquenta frutos de cada combinação “estádio de maturação - teor de umidade - temperatura de secagem” foram submetidos a testes de compressão uniaxial para a determinação das forças e deformações requeridas para o colapso do produto e, também, para estimar os módulos de deformidade.

Os ensaios de compressão uniaxiais nos frutos, testados individualmente, foram realizados em uma máquina de ensaios universal (EMIC), utilizando-se uma célula de carga de 100 N. A compressão do produto foi efetuada pelas duas placas paralelas da máquina, acionadas a uma velocidade de aproximação de $0,83 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$, na faixa recomendada pela AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK OF STANDARDS (1994) para frutos e vegetais macios. A finalização de cada ensaio de compressão ocorreu por uma das seguintes maneiras: (a) colapso do produto - quando a força atuante no fruto atingiu um valor 5% menor que a intensidade da força máxima percebida pelo fruto, (b) quando a força máxima se igualou a 50 N; e (c) quando uma distância mínima entre as duas placas foi atingida (prevenção de danos na célula de carga).

O produto foi comprimido segundo a posição P1, como esquematizado na Figura 4, na qual o fruto encontra-se em repouso, na sua posição mais estável, sobre uma superfície rígida.

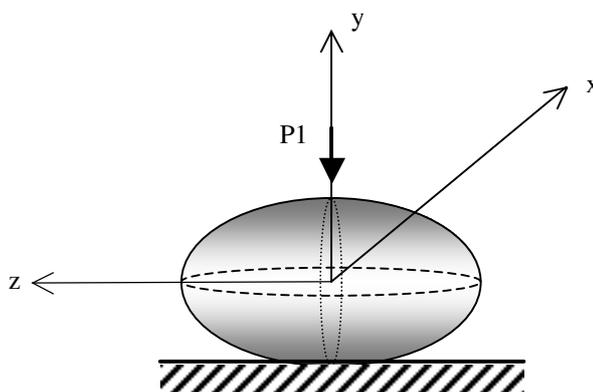


Figura 4 - Orientação do produto durante os ensaios de compressão.

3.5 - Forças e deformações para colapso do produto

Diretamente das curvas de compressão do produto (força versus deformação, provenientes da máquina de ensaios), foram obtidas as seguintes informações: valores da força máxima sustentada pelo fruto antes do colapso e os valores da deformação do produto neste ponto.

3.6 - Módulo de deformidade

Módulos de deformidade do produto foram obtidos pela Equação (1), considerando-se "D", nesta equação, igual à deformação total (soma da elástica e plástica). Nas determinações, os raios de curvatura do produto em contato com a placa superior (Figura 1) foram considerados iguais àqueles do material em contato com a placa inferior. Portanto, a Equação (1) ficou simplificada e pode ser expressa como:

$$E = \frac{0,531F(1-\mu^2)}{D^{3/2}} \left[2 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (2)$$

O módulo de deformidade depende da razão de Poisson, que pode ser considerado uma constante para cada material, cujo valor é desconhecido para

frutos de café. Assim, resolveu-se criar uma nova variável, E' , proporcional ao módulo de deformidade, mencionada no texto como “módulo proporcional de deformidade”, definida como:

$$E' = \frac{E}{(1-\mu^2)} = \frac{0,531F}{D^{3/2}} \left[2 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (3)$$

Os valores dos raios de curvatura (r_1 e R_1) do corpo nos pontos de contato foram obtidos através de ajustes de circunferências às curvaturas do corpo segundo os planos coordenados, como mostrado na Figura 5. O fruto de café foi considerado um elipsóide com dimensões principais iguais aos valores médios das dimensões, determinadas com a utilização de micrômetro digital com três casas decimais:

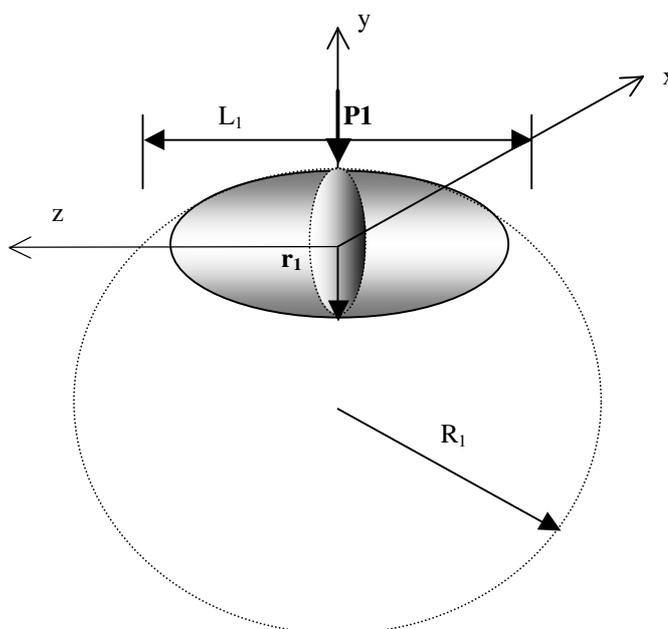


Figura 5 - Raios de curvatura do fruto na região de contato “produto-placa compressora”, usados na determinação dos módulos de deformidade.

3.7 - Análise estatística

Os tratamentos foram dispostos em um esquema de parcelas subdivididas, tendo nas parcelas as temperaturas e nas subparcelas um esquema fatorial 3x4 (três estádios de maturação e quatro níveis de teores de umidade) no delineamento inteiramente casualizado, com trinta e quatro

repetições. Os dados foram interpretados estatisticamente por meio de análise de variância e de regressão.

Para os fatores quantitativos, utilizou-se a técnica da metodologia da superfície de resposta, adotando-se a seguinte equação geral: $\hat{Y} = a + bx + cy + dx^2 + ey^2$. Os modelos foram escolhidos baseados na significância dos coeficientes de regressão e no coeficiente de determinação.

Para o fator qualitativo, as médias foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Força para o colapso

Para cada combinação “estádio de maturação – teor de umidade – temperatura do ar de secagem”, cinquenta grãos foram submetidos a testes de compressão, entretanto nem todos sofreram colapso, condição em que a força atuante no fruto deve atingir um valor 5% menor que a intensidade da força máxima percebida pelo produto. Curvas de “força *versus* deformação” durante a compressão dos frutos podem ser visualizadas na Figura 6, para o caso em que ocorreu o colapso do fruto, e na Figura 7 para o caso em que não ocorreu o colapso; e o teste de compressão foi interrompido quando a força máxima atuante no produto se igualou a 50 N.

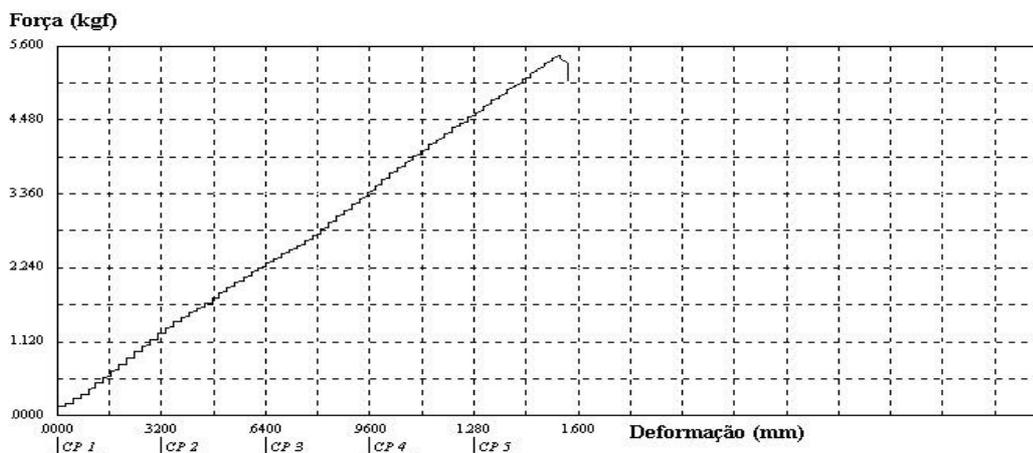


Figura 6 - Curva de “força *versus* deformação” durante a compressão de um fruto para o caso de colapso do produto.

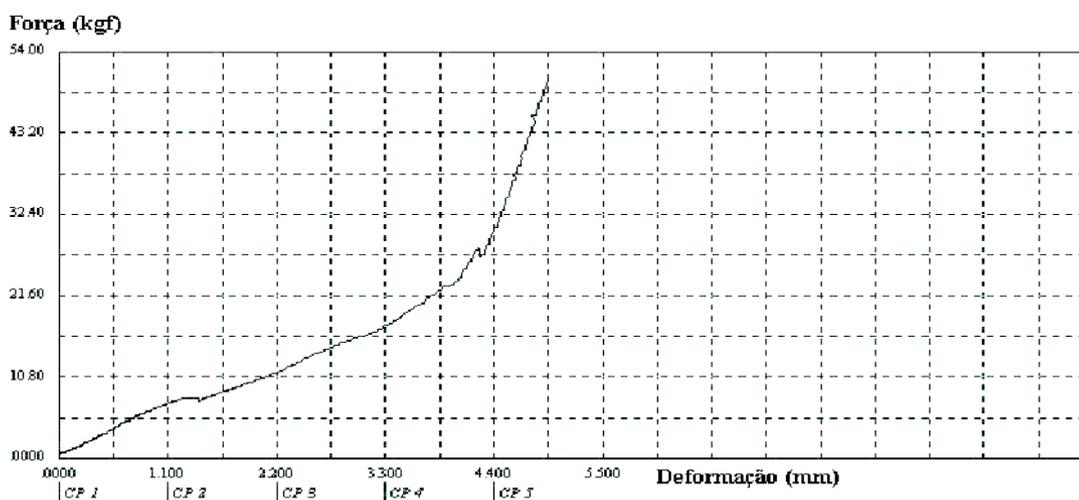


Figura 7 - Curva de "força versus deformação" durante a compressão de um fruto sem o colapso – Interrupção do ensaio: força máxima no produto igual a 50 N.

O número de frutos (de um total de 50) que apresentou colapso, em cada combinação investigada, é apresentado na Tabela 1. Nas análises estatísticas foram considerados apenas 34 frutos, número correspondente ao de frutos que apresentaram colapso, comum a todas as combinações: "teor de umidade (12, 20, 30 e 50% b.u.), temperatura de secagem (40, 50 e 60°C) e estágio de maturação ("cereja", "verdoengo" e "verde)". As forças médias determinadas, considerando o maior número de frutos que sofreu colapso em cada combinação investigada são muito próximas daquelas calculadas usando-se os 34 frutos.

Os dados relativos aos frutos com 60% b.u. foram analisados separadamente, pois apenas seis frutos no estágio de maturação "cereja", secos a 60°C, apresentaram colapso.

Tabela 1. Número de frutos, dos cinquenta de cada combinação "estádio de maturação - teor de umidade (U) - temperatura", que apresentaram colapso durante os testes de compressão

U (% b.u.)	Temperatura do ar de secagem (°C)								
	"verdoengo"			"cereja"			"verde"		
	40	50	60	40	50	60	40	50	60
60	48	50	47	48	48	6	47	47	42
50	47	49	48	50	47	48	46	40	40
30	48	49	47	50	50	48	38	34	35
20	49	46	50	50	50	49	41	41	46
12	47	50	48	48	50	46	45	42	46

Os valores médios das forças necessárias para o colapso de frutos de café, a diferentes estádios de maturação e teores de umidade, durante a secagem em três temperaturas do ar, são apresentados na Tabela 2. Os coeficientes de variação envolvidos nos valores das forças variaram de 15,4 a 68,8%. Ensaios de compressão de produtos agrícolas envolvem, geralmente, grandes variações, porém menores do que as encontradas em frutos de café. Muitos fatores podem ter contribuído para a maior variação nos valores das forças para o colapso dos frutos de café. Dentre esses, citam-se alterações no tamanho e nas propriedades físicas dos frutos no mesmo estágio de maturação, devido à escassez de chuvas durante a época de floração do café (para a safra de 2001) e porque os frutos utilizados nos ensaios foram colhidos em diferentes localidades, ou seja, ficaram submetidos a diferentes tratos culturais e condições climáticas.

Tabela 2. Valores médios da força (N) para ruptura dos frutos em diferentes estádios de maturação e teores de umidade (U), após secagem em três temperaturas

U (% b.u.)	Temperatura de secagem (°C)								
	40			50			60		
	VDG	"cereja"	"verde"	VDG	"cereja"	"verde"	VDG	"cereja"	"verde"
12	92,5A*	82,5A	106,0A	164,8A	76,8B	148,9A	91,4AB	75,5B	119,2A
20	133,8A	74,4B	121,1A	96,4B	64,4C	192,2A	66,1B	67,9B	112,1A
30	87,5B	79,0B	134,0A	105,4B	57,0C	198,7A	80,9B	59,1B	157,6A
50	68,3B	70,3B	154,8A	89,4B	62,2B	212,3A	62,8B	51,5B	200,2A

VDG: "verdoengo"

*médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na linha, em cada combinação "teor de umidade - temperatura", não diferem entre si.

As médias, na Tabela 2, seguidas de pelo menos uma mesma letra na linha, em cada combinação "teor de umidade - temperatura", não diferem entre si. Observa-se que, em todas as temperaturas de secagem e para o produto com teor de umidade de 50% b.u., as forças para o colapso de frutos nos estádios de maturação "cereja" e "verdoengo" não diferem estatisticamente entre si; e que as forças necessárias para o colapso de frutos no estágio de maturação "verde" são superiores àquelas para o colapso dos frutos nos outros dois estádios de maturação. Essas tendências podem ser notadas, também, no produto nos diferentes teores de umidades, secos a 60°C. Exceção se faz ao

produto a 12% b.u., pois nesse teor, as forças são iguais para frutos nos três estádios de maturação.

Na temperatura de 50°C e na maioria dos teores de umidade do produto, nota-se, na Tabela 2, que a força requerida pelos frutos “verde” são as maiores e que, neste caso, existe uma tendência de as forças para o colapso de frutos “verdoengo” serem maiores que aquelas para o colapso dos “cereja”. Na temperatura de secagem de 40°C e em todos os teores de umidade, exceto a 20% b.u., os valores das forças para o colapso de frutos “verdoengo” e “cereja” são, estatisticamente, iguais. As forças para ruptura do produto a 12% b.u., nos três estádios de maturação, são iguais e quando o produto contém teores de umidade de 30 e 50% b.u., a intensidade de força para colapso de frutos “verde” é maior que aquela para o produto “verdoengo” e “cereja”.

Para cada estágio de maturação do produto, foram ajustadas equações aos dados experimentais para expressar o comportamento da força para o colapso (F, N), em função do teor de umidade dos frutos (U, % b.u.) e da temperatura do ar de secagem (T, °C) usada na secagem do material. As equações ajustadas, com os respectivos coeficientes de determinação, são apresentadas a seguir:

Frutos “verde”:

$$\hat{F} = - 1169,15 + 50,82^{**}T - 0,4990^{**}T^2 + 3,029^{**}U - 0,02126^{*0}U^2 \quad (R^2= 0,905) \quad (4)$$

Frutos “verdoengo”:

$$\hat{F} = - 507,23 + 27,60^{**}T - 0,2860^{**}T^2 - 2,165^{***}U + 0,01752^{*0}U^2 \quad (R^2= 0,615) \quad (5)$$

Frutos “cereja”:

$$\hat{F} = 125,49 - 0,6574^{*}T - 1,447^{****}U + 0,01654^{*0}U^2 \quad (R^2= 0,784) \quad (6)$$

Nível de significância (teste "t"): * = 5%; ** = 1%; *** = 10%; **** = 20% e *0 = 25%.

As curvas das equações ajustadas, juntamente com os pontos experimentais, em cada temperatura de secagem, podem ser visualizadas na Figura 8. Observa-se, nesta figura, que, em cada temperatura de secagem, o comportamento das forças para o colapso de frutos em função do teor de umidade do produto difere de acordo com o estágio de maturação inicial dos frutos.

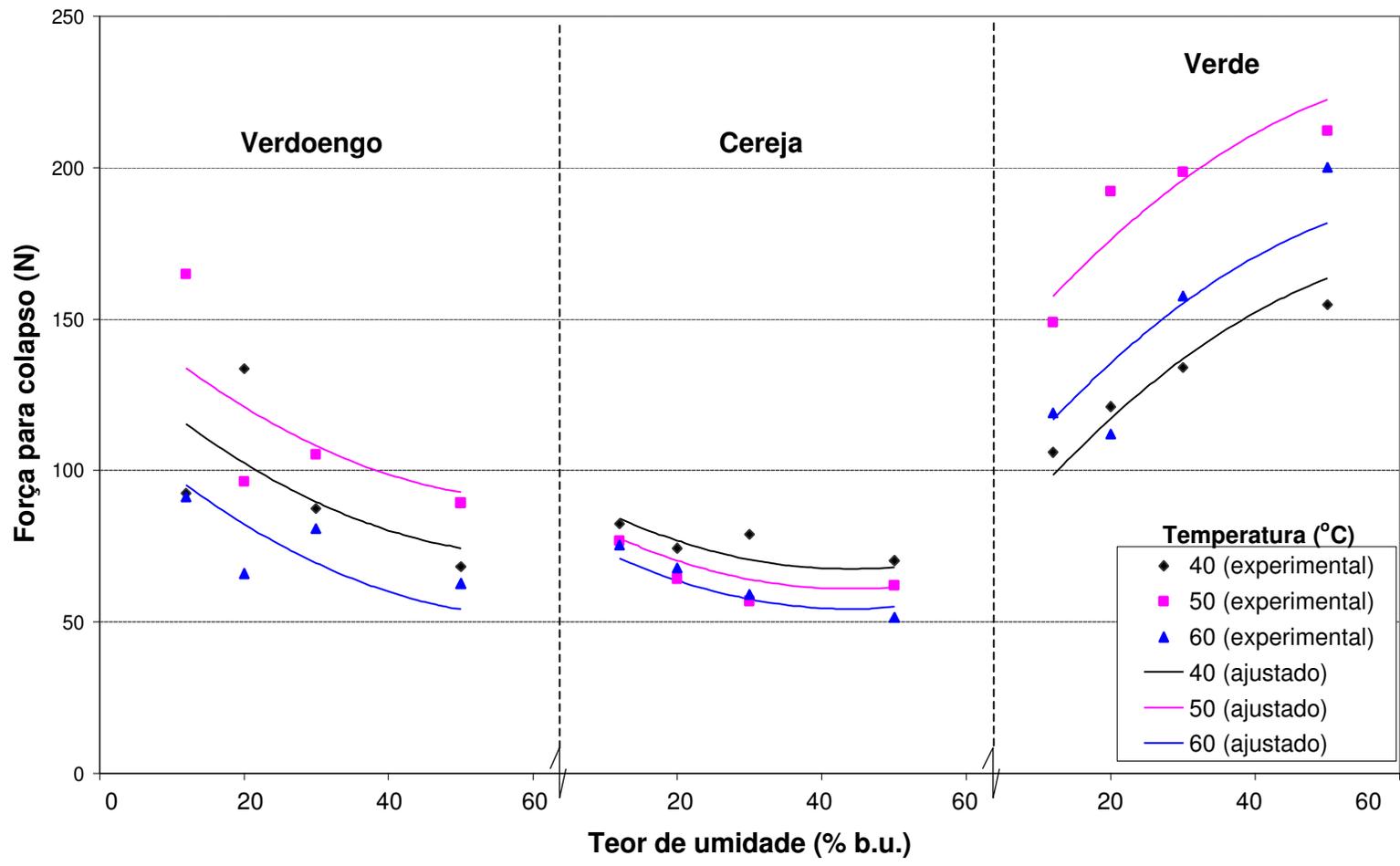


Figura 8. Estimativa da força para o colapso dos frutos, em função do teor de umidade dos respectivos estádios de maturação e da temperatura de secagem.

Observa-se, na Figura 8, que, para o produto no estágio “verdoengo”, as forças sempre diminuem à medida que o teor de umidade do fruto aumenta. Entretanto, as forças para o colapso de frutos “verde” sempre aumentam com um aumento de teor de umidade do produto.

O comportamento da força no colapso de frutos “verdoengo” é similar àquele que ocorre nos outros grãos agrícolas. No caso de frutos “cereja”, esse comportamento pode ser visualizado até que o produto atinja um teor de umidade de 43,7% b.u. A partir deste ponto, acréscimos no teor de umidade do fruto implicam aumento de forças, apesar de os frutos neste estágio de maturação apresentarem-se mais macios. À medida que estes frutos foram comprimidos, provavelmente, ocorreu o contato das placas compressoras com a semente devido às grandes deformações do produto durante os testes.

É interessante notar que o comportamento das forças para o colapso de frutos “verde” é o oposto daquele apresentado pelos outros grãos. O produto neste estágio de maturação apresenta-se muito rígido e com uma elasticidade menor, principalmente porque à sua maturação fisiológica ainda não está completa.

Pode-se observar, também, na Equação (5), que os valores de força para o colapso de frutos no estágio de maturação “cereja” diminuem com um aumento da temperatura do ar usado na secagem. Isso concorda com os dados de outros grãos agrícolas encontrados na literatura. Tendência similar não pode ser observada para as forças solicitadas pelos frutos nos estágios de maturação “verdoengo” e “verde”. Nesses casos, nota-se, apenas, que as forças para colapso de frutos secos a 50°C são maiores que aquelas para o produto submetido a uma secagem com ar a 40°C.

As intensidades das forças para o colapso de frutos a um teor de umidade de 60% b.u., nos três estágios de maturação e submetidos às diferentes temperaturas do ar de secagem, podem ser observadas na Figura 9. As maiores solicitações de forças para o colapso foram registradas para os frutos “verde”. Observa-se que as solicitações das forças para colapso de frutos nos estágios de maturação “verde” e “verdoengo” foram maiores quando o produto foi seco a 50°C. Frutos “verde” submetidos à secagem a 60°C necessitam, para o seu colapso, de forças maiores do que aqueles secos a 40°C. Entretanto, as forças

necessárias para o colapso de frutos “verdoengo” foram semelhantes para o produto seco nessas duas temperaturas. O comportamento das intensidades das forças para o colapso de frutos “cereja” é similar ao apresentado pelos outros tipos de grãos; as intensidades das forças para colapso diminuem com o aumento da temperatura do ar de secagem.

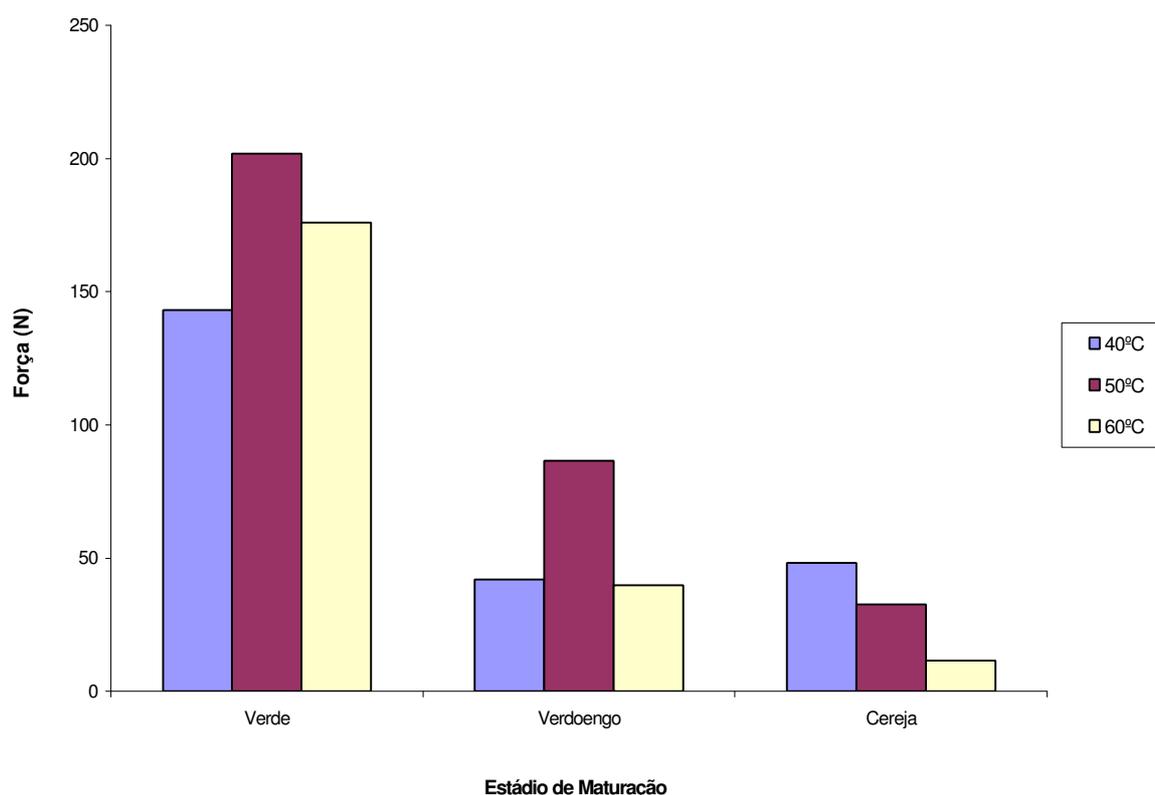


Figura 9 – Valores de força para o colapso de frutos de café a 60% b.u., nos diferentes estádios de maturação e nas diferentes temperaturas do ar de secagem.

4.2. Deformação específica para o colapso

Os valores médios das deformações específicas (%), vivenciadas pelos frutos de café no momento do colapso, são apresentados, em cada combinação “estádio de maturação - teor de umidade- temperatura do ar de secagem”, na Tabela 3.

Pode-se observar, na Tabela 3, que, em todas as temperaturas de secagem e nos teores de umidade do produto, as deformações específicas para o colapso de frutos nos estádios de maturação "cereja" e "verdoengo" não diferem estatisticamente entre si. Na maioria dos casos, as deformações observadas no colapso de frutos no estágio de maturação "verde" são superiores àquelas dos frutos nos outros dois estádios de maturação. Exceção se faz às deformações requeridas para o colapso de frutos com teor de umidade de 12% b.u., secos de 60 e 40°C. Não se observaram diferenças significativas entre os três estádios de maturação e entre os estádios "verde" e "cereja".

Tabela 3. Valores médios das deformações específicas (%) para ruptura de frutos de café em diferentes estádios de maturação e teores de umidade (U), submetidos a secagens em três temperaturas do ar

U (% b.u.)	Temperatura do ar de secagem (°C)								
	40			50			60		
	VDG	cereja	verde	VDG	cereja	verde	VDG	cereja	verde
12	22,89B	25,2AB	30,89A	23,36B	18,70B	42,06A	28,99A	22,73A	24,28A
20	30,05B	28,55B	50,28A	21,36B	22,08B	57,08A	26,55B	27,45B	41,26A
30	25,84B	33,16B	43,47A	29,55B	23,54B	50,08A	28,20B	24,79B	50,59A
50	19,89B	25,58B	41,99A	22,74B	22,46B	37,79A	20,90B	22,29B	50,96A

VDG: "verdoengo"

*médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na linha, em cada combinação "teor de umidade - temperatura", não diferem entre si.

Aos dados experimentais, correspondentes a cada estágio de maturação do produto, foram ajustadas equações para expressar o comportamento da deformação (D, %) em função do teor de umidade dos frutos (U, % b.u.) e da temperatura do ar (T, °C) usados na secagem dos frutos de café. As equações ajustadas, com os respectivos coeficientes de determinação, são apresentadas a seguir:

Frutos "verde":

$$\hat{D} = - 82,81 + 4,548**T - 0,05217**T^2 + 1,211**U - 0,03538** U^2 + 0,02411**TU \quad (R^2 = 0,614) \quad (7)$$

Frutos “verdoengo”:

$$\hat{D} = 15,03 + 0,07484^{*0}T + 0,6374*U - 0,01175^{**}U^2$$
$$(R^2 = 0,503) \quad (8)$$

Frutos “cereja”:

$$\hat{D} = 134,27 - 4,721^{**}T + 0,04530^{**}T^2 + 0,8104^{**}U - 0,01264^{**}U^2$$
$$(R^2 = 0,842) \quad (9)$$

Nível de significância (teste "t"): * = 5%; ** = 1% e *^o = 25%.

A representação gráfica das equações ajustadas, em cada temperatura de secagem, pode ser visualizada na Figura 10, juntamente com os pontos experimentais. Nota-se um comportamento quadrático da deformação específica dos frutos em função de seu teor de umidade e a existência de máximos na faixa de teor de umidade investigada.

Nos frutos “verde”, secos nas temperaturas de 40, 50 e 60°C, as deformações são máximas nos teores de umidade de 30,7; 34,2 e 37,6% b.u., respectivamente. Nos frutos “cereja” e “verdoengo”, as deformações são máximas com teores de umidade de 27,1 e 32,1% b.u., respectivamente. Em outros tipos de grãos, pesquisadores relatam um aumento de deformação com incrementos no teor de umidade do produto, ou seja, os frutos de café, nos três estádios de maturação, quando contêm teores de umidade iguais ou inferiores a 27% b.u., comportam-se como os outros grãos agrícolas.

Observa-se, nas Equações (7), (8) e (9), que, no produto no estágio “verdoengo”, há a tendência de maior deformação à medida que a temperatura do ar de secagem aumenta. Entretanto, esta tendência não é percebida nas deformações dos frutos nos estádios de maturação “cereja” e “verde”.

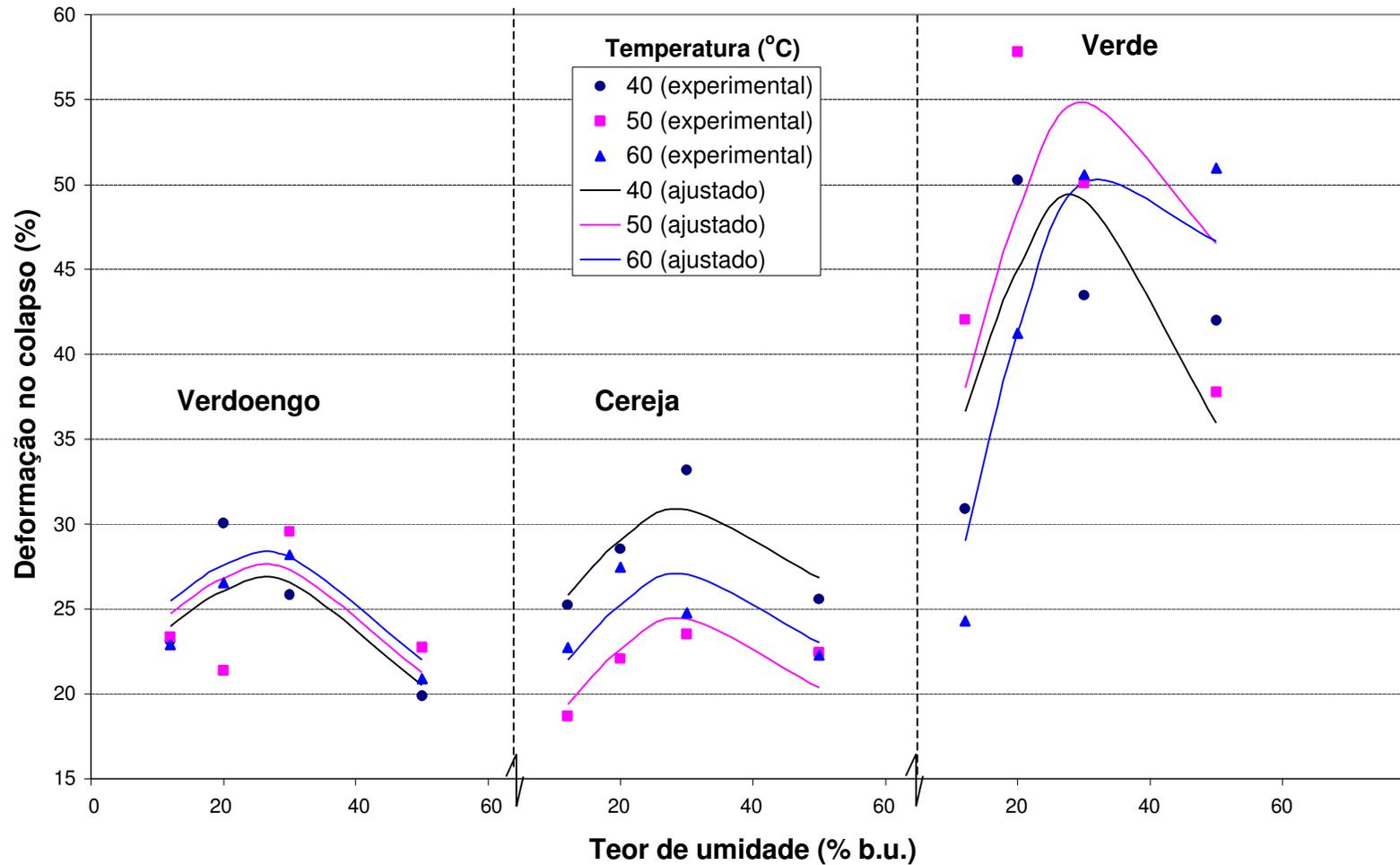


Figura 10. Estimativa da deformação específica requerida para o colapso de frutos de café, em função do teor de umidade nos respectivos estádios de maturação e nas temperaturas de secagem.

O comportamento das deformações envolvidas no colapso do produto a 60% b.u., nas diferentes combinações "temperatura do ar de secagem e estágio de maturação", pode ser visualizado na Figura 11. Os frutos nos estádios de maturação "verde" e "cereja" apresentaram as maiores e menores deformações quando secos a 40° C e a 50°C, respectivamente. Um comportamento inverso foi observado nos frutos "verdoengo", nos quais as maiores e menores deformações foram registradas nas temperaturas de 50°C e de 40°C, respectivamente. As maiores deformações específicas foram detectadas nos frutos "verde", entretanto, as intensidades das deformações para o colapso de frutos "verdoengo" e "cereja" foram bem próximas.

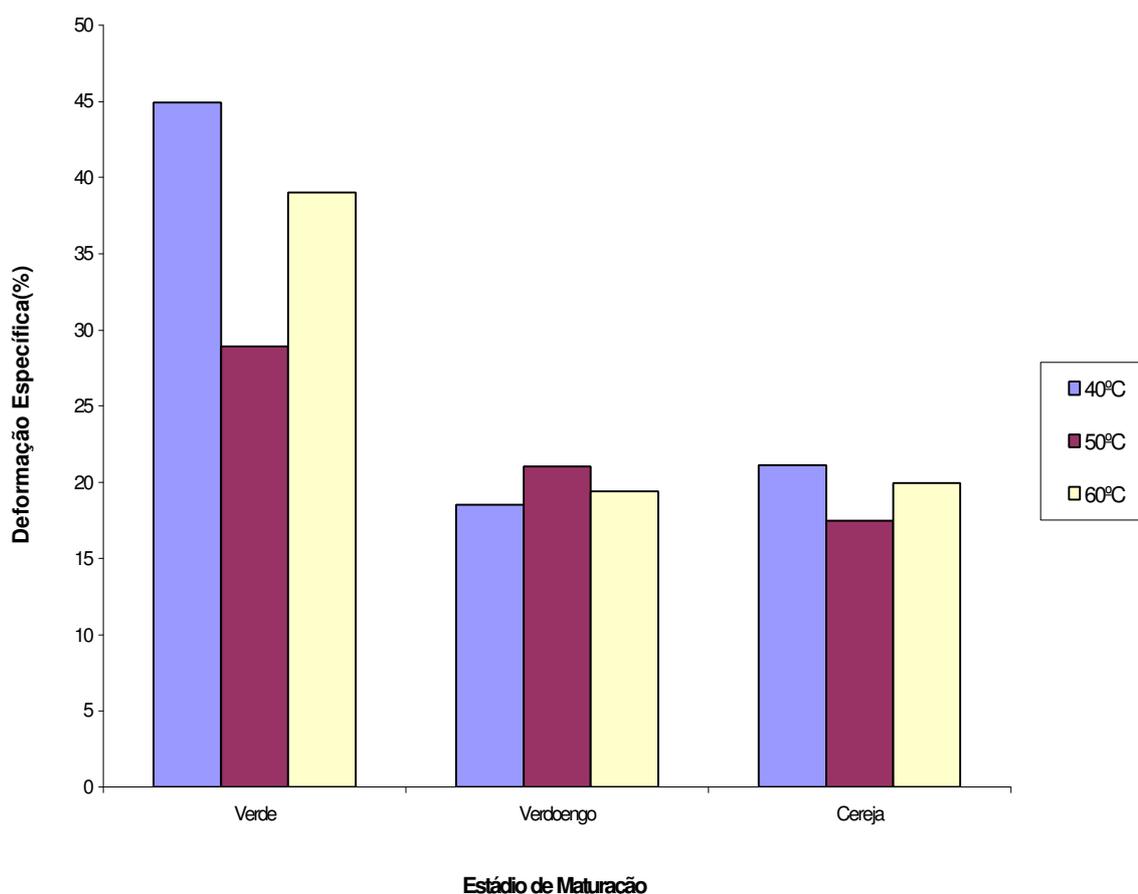


Figura 11 - Deformação específica de frutos de café a 60% b.u. nos diferentes estádios de maturação e nas temperaturas do ar de secagem.

4.3. Módulo Proporcional de Deformidade

Os valores médios dos módulos proporcionais de deformidade, determinados nos frutos de café em diferentes teores de umidade e estádios de maturação, submetidos à secagem em três temperaturas, são apresentados na Tabela 4.

Observa-se, na Tabela 4, que, na maioria dos casos, os módulos proporcionais de deformidade dos frutos nos três estádios de maturação diferem entre si estatisticamente. Exceção se faz aos módulos dos frutos nos estádios "verde" e "cereja", com teor de umidade de 12% b.u. e secos a 40°C, que, estatisticamente, são iguais. Em todas as temperaturas de secagem a 50% b.u., nota-se que os frutos "verde" e "cereja" possuem os maiores e menores módulos, respectivamente. Os módulos dos frutos "verde", em todos os teores de umidade, são os maiores quando o produto é submetido a secagens a 60°C. Entretanto, os maiores módulos aconteceram para frutos "verdoengo" a 12 e 20% b.u. quando submetidos às temperaturas de secagem de 40 e 50°C.

Tabela 4. Valores médios dos módulos proporcionais de deformidade ($\times 10^7$ Pa) de frutos de café em diferentes estádios de maturação e teores de umidade (U), submetidos a secagem em três temperaturas

U (% b.u.)	Temperatura do ar de secagem (°C)								
	40			50			60		
	VDG	cereja	verde	VDG	cereja	verde	VDG	cereja	verde
12	4,34 A	3,39 B	4,08B	5,78 A	4,39 B	3,78C	2,80 C	3,63 B	6,10A
20	3,22 A	2,36 B	2,05C	6,84 A	2,61 C	3,24B	2,21 C	2,28 B	3,29A
30	2,87 A	1,75 C	2,32B	2,65 B	2,18 C	2,67A	2,37 B	2,19 C	2,48A
50	2,79 B	1,60 C	3,66A	2,86 B	2,29 C	5,01A	2,32 B	1,70 C	4,17A

VDG: "verdoengo"

*médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na linha, em cada combinação "teor de umidade - temperatura", não diferem entre si.

Para cada estádio de maturação do produto, foram ajustadas equações aos dados experimentais para expressar o comportamento do módulo proporcional de deformidade (E' , Pa), em função do teor de umidade dos frutos (U, % b.u.) e da temperatura do ar (T, °C) usados na secagem dos frutos. As equações ajustadas, com os respectivos coeficientes de determinação, são apresentadas a seguir:

Frutos “verde”:

$$\hat{E}' = 3,007 \times 10^7 + 1,023 \times 10^{6**} T - 2,727 \times 10^{6**} U + 5,831 \times 10^{4**} U^2 + 1,904 \times 10^{4***} TU \quad (R^2 = 0,81) \quad (10)$$

Frutos “verdoengo”:

$$\hat{E}' = -3,216 \times 10^8 + 1,624 \times 10^{7**} T - 1,668 \times 10^{5**} T^2 - 1,666 \times 10^{6**} U + 1,885 \times 10^{4*} U^2 \quad (R^2 = 0,64) \quad (11)$$

Frutos “cereja”:

$$\hat{E}' = -6,860 \times 10^7 + 5,142 \times 10^{6***} T - 5,056 \times 10^{4***} T^2 - 2,139 \times 10^{6**} U + 2,686 \times 10^{4**} U^2 \quad (R^2 = 0,93) \quad (12)$$

Nível de significância (teste "t"): * = 5%; ** = 1%; *** = 10%; **** = 20%.

As curvas das equações ajustadas (juntamente com os pontos experimentais), em cada temperatura de secagem, são representadas na Figura 8. Observa-se um comportamento quadrático do módulo proporcional de deformidade dos frutos, em função de seu teor de umidade, e verifica-se, nos três estádios de maturação, a existência de mínimos na faixa dos teores de umidade investigada; nos frutos “verdoengo” e “cereja”, nos teores de umidade de 44,2 e 39,8% b.u., respectivamente; e nos frutos “verde”, secos a 40, 50 e 60°C, nos teores de umidade de 29,9, 31,5 e 33,2% b.u., respectivamente. Esta tendência de diminuição do módulo com o aumento do teor de umidade dos frutos, percebida no produto com teores de umidade mais baixos, encontra-se de acordo com os resultados obtidos, por diversos pesquisadores, em outros grãos agrícolas.

Os valores do módulo proporcional de deformidade de frutos “verde” tornam-se maiores com aumento da temperatura do ar de secagem (Figura 12). Entretanto, não se observa esta tendência nos módulos dos frutos nos outros dois estádios de maturação.

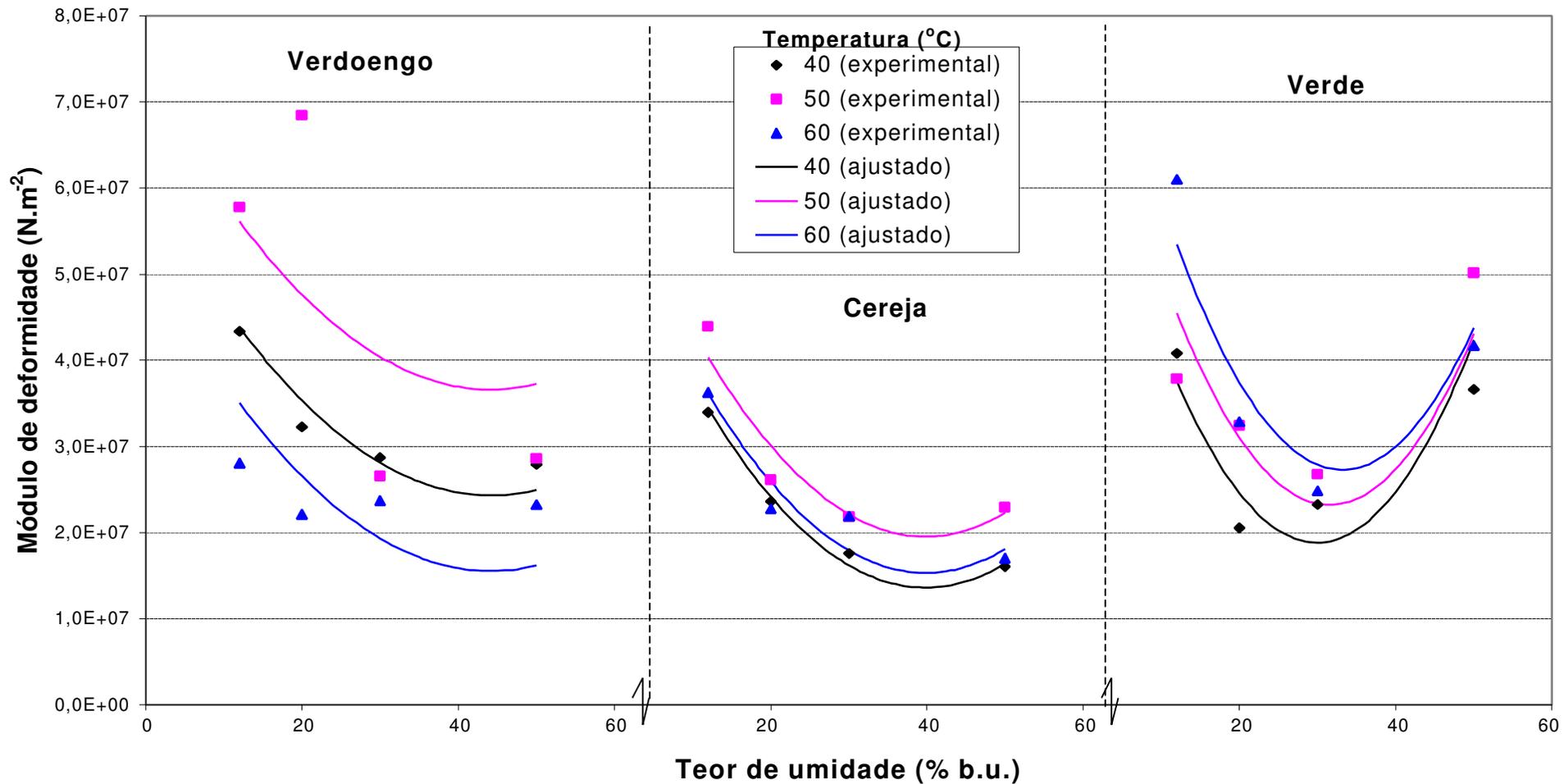


Figura 12. Estimativa do módulo de deformidade de frutos de café, em função do teor de umidade nos respectivos estádios de maturação e nas temperaturas de secagem.

Nos frutos “cereja” e “verdoengo”, os maiores módulos, em todos os teores de umidade, aconteceram quando foram secos a 50°C.

O comportamento dos módulos proporcionais de deformidade do produto a 60% b.u., nas diferentes combinações de temperatura do ar de secagem e estágio de maturação, pode ser observado na Figura 13. Os frutos nos estádios de maturação “verde” e “verdoengo” apresentaram os maiores módulos quando secos a 50°C, entretanto os valores dos módulos proporcionais de deformidade foram próximos nos frutos submetidos às outras temperaturas. Os frutos “cereja” apresentaram os maiores módulos proporcionais de deformidade quando secos a 40 e 50°C, e os menores quando submetidos a 60°C. Os maiores módulos proporcionais de deformidade foram observados para frutos “verde”, indicando, assim, a maior resistência do produto, nesse estágio de maturação, à deformação quando submetido a determinada força. Pode-se observar, também, uma tendência de os módulos proporcionais de deformidade serem maiores nos frutos secos a 50°C.

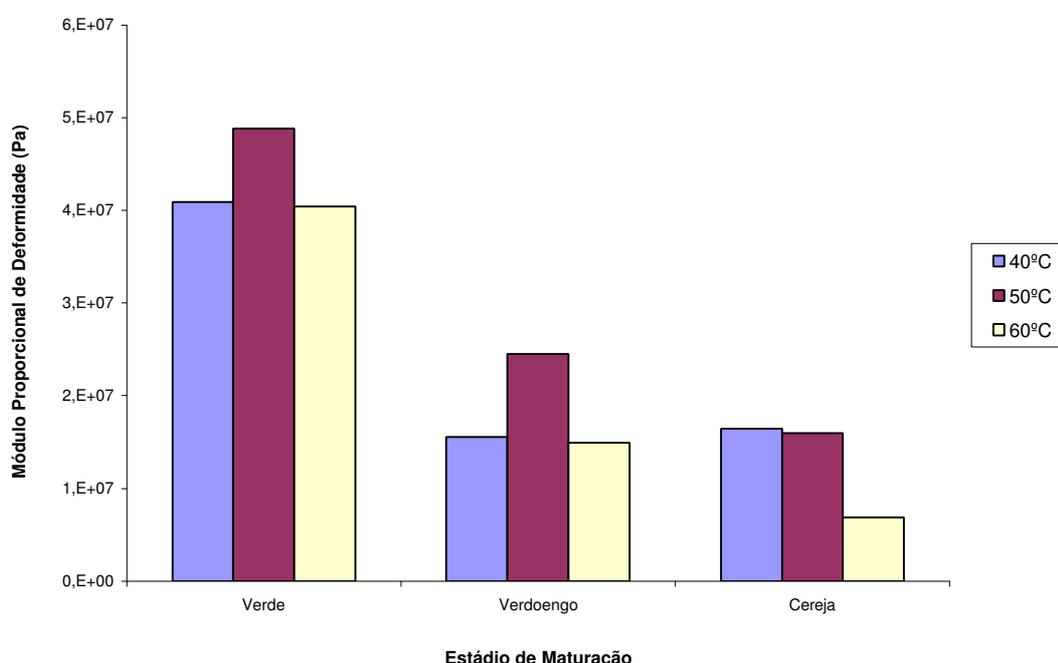


Figura 13 - Módulos proporcionais de deformidade dos frutos de café, a 60% b.u., nos diferentes estádios de maturação e nas temperaturas do ar de secagem.

5. CONCLUSÕES

A análise e a interpretação dos resultados experimentais da investigação dos efeitos do teor de umidade, do estágio de maturação e da temperatura do ar de secagem no colapso de frutos de café e no seu módulo de deformidade, nas condições específicas do presente trabalho, permitiram concluir que:

- **Forças para o Colapso**
 - **Efeito do estágio de maturação**
 - as forças necessárias para o colapso de frutos “verde” sempre foram superiores àquelas solicitadas pelos frutos “cereja” e “verdoengo”; as forças para colapso de frutos “verdoengo” e “cereja” não diferiram entre si.
 - **Efeito do teor de umidade**
 - as forças para o colapso de frutos “verde” foram maiores para o produto em teores de umidade mais elevados; comportamento oposto foi observado para os frutos “verdoengo”;
 - o comportamento dos valores de força para o colapso de frutos “cereja” apresentaram duas fases distintas: até 43,7% b.u., diminuiram com o aumento do teor de umidade dos frutos e, a seguir, aumentaram com o teor de umidade do produto;

- **Efeito da temperatura**
 - as forças para o colapso de frutos “cereja” diminuíram com o aumento da temperatura do ar de secagem;
 - para frutos “verdoengo” e “verde”, as forças para o colapso do produto submetido à secagem a 50°C foram maiores que aquelas solicitadas por frutos submetidos à secagem a 40°C.

- **Deformação específica**
 - **Efeito do estágio de maturação**
 - as deformações específicas necessárias para o colapso de frutos “verde”, na maioria dos casos, sempre foram superiores às aquelas requeridas pelos frutos “cereja” e “verdoengo”;
 - não houve diferença significativa entre as deformações específicas dos frutos “verdoengo” e “cereja”.

 - **Efeito do teor de umidade**
 - em cada temperatura de secagem, as deformações específicas dos frutos são funções quadráticas do teor de umidade do produto e, na faixa de teor de umidade investigada, apresentara máximos entre 27 e 38% b.u.;
 - para frutos “cereja” e “verdoengo”, as deformações foram máximas para o produto a 27 e 32% b.u., respectivamente;
 - para frutos “verde” submetidos às temperaturas do ar de secagem de 40, 50 e 60°C, as deformações foram máximas para o produto nos teores de umidade de 31, 34 e 38% b.u., respectivamente;
 - o aumento nos valores da deformação específica com o teor de umidade, até atingir um máximo, foi similar aos dos outros grãos agrícolas.

- **Efeito da temperatura**
 - os valores de deformação de frutos “verdoengo” aumentara com a temperatura do ar de secagem. Esta tendência não foi percebida nas deformações dos frutos nos outros estádios de maturação.

- **Módulo proporcional de deformidade**
 - **Efeito do estágio de maturação**
 - os módulos proporcionais de deformidade dos frutos nos três estádios de maturação diferiram entre si estatisticamente. Em todas as temperaturas de secagem, os frutos “verde”, a 50% b.u., tiveram os maiores módulos e os “cereja”, os menores. Os módulos de frutos “verde” foram os maiores, em todos os teores de umidade, quando o produto foi submetido a uma temperatura do ar de secagem de 60°C.

 - **Efeito do teor de umidade**
 - os módulos proporcionais de deformidade dos frutos, nos três estádios de maturação, são funções quadráticas do teor de umidade do produto e apresentara mínimos na faixa de 30 a 45% b.u.;
 - a tendência de diminuição do módulo, à medida que o teor de umidade dos frutos aumentou, foi similar à apresentada por outros grãos agrícolas.

 - **Efeito da temperatura**
 - os valores do módulo proporcional de deformidade de frutos “verde” aumentara com a temperatura do ar de secagem. Esta tendência não foi percebida nos módulos dos frutos nos outros dois estádios de maturação;
 - nos frutos “cereja” e “verdoengo”, em todos os teores de umidade, os maiores módulos aconteceram quando o produto foi seco a 50°C.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK OF STANDARDS. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, 1994.

BARGALE-PRAVEEN, C.; IRUDAYARAJ, J.; MARQUIST, B. Studies on rheological behaviour of canola and wheat. **Journal Agricultural of Engineering Research**, n.61, p.267-274, 1995.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para a análise de sementes**. Brasília, DF: MARA, 365p., 1992.

BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F.W., HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI Book, 450p., 1992.

CARVALHO, V.D. , CHAGAS, S.J. de R., SOUZA, S.M.C. Fatores que afetam a qualidade do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.18, n.187, p.5-20, 1997.

CRISOSTO, C.H; NAGAO, M.A. Evaluation of fruit removal force of coffee cultivars. **HORTI-SCIENCE**,v.26, n.2, p.210-230, 1991.

COUTO, S.M., BATISTA, C.S., DEVILLA, I.A, PAIN, V.T. Colapso de frutos de café sob compressão. (**Dados não Publicados**), Viçosa, MG, 16p., 2001a.

COUTO, S.M., BATISTA, C.S., DEVILLA, I.A, PEIXOTO, A.B. Comportamento mecânico de frutos de café – módulo de deformidade. (**Dados não Publicados**), Viçosa, MG, 26p., 2001b.

DIENER, R.G., LEVIN, J.H., BRADLEY, W.A. Seasonal changes in creep, relaxation, elasticity and damping of leave apple-tree limbs (Properties affecting mechanical harvesting). **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.12, n.1, p.137-140, 1969.

FORTES, M.; OKOS, M.R. Changes in physical properties of corn during drying. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.23, n.4, p.1004-1008, 1980.

GUPTA, R.K.; DAS, S.K. Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive loading. **Journal of Food Engineering**, n.46, p.1-8, 2000.

GUSTAFSON, R.J., HALL, G.E. Density and porosity changes of shelled corn during drying. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.15, n.1, p.523-525, 1972.

HENRY-ZACHARY, A.; SU, B.; ZHANG, H. Resistance of soya beans to compression. **Journal Agricultural of Engineering Research**, n.76, p.175-181, 2000.

HOKI, M.; TOMITA, K. Moisture effects on mechanical strength of soybeans. **The Bulletin of the Faculty of Agriculture**, Mie University, Tsu, Japan, n.51, p.103-110, 1976.

INAMASU, R.Y., ANDRADE, J.G. Teste da nova máquina para derriçar o café. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 1997, Manhuaçu. **Anais...** Manhuaçu, MG, p.12-14, 1997.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. O café no Brasil. Paraná – PR. 45p., 1999.

KANG, Y.S.; SPILLMAN, C.K.; STEELE, J.L.; CHUNG, D.S. Mechanical properties of wheat. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.38, n.2, p.573-578, 1995.

LI, Y.; ZHANG, Q.; PURI, V. M.; MANBECK, H. B. Physical properties effect on stress-strain behavior of wheat en masse – Part I. Load response dependence on initial bulk density and moisture content. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.32, n.1, p.194-202, 1989.

LIU, M.; HAGHIGHI, K.; STROSHINE, R.L.; TING, E.C. Mechanical properties of the soybean cotyledon and failure strength of soybean kernels. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.33, n.2, p. 559-566, 1990.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 2ª edição, 1978. 742p.

MOREIRA, A.C. O tesouro redescoberto. **Panorama Rural**, Rio de Janeiro, v.2, n.1, p.16-41, 1999.

MORICOCCHI, L.; MARTIN, N.B.; VEGRO, C.L.R. Produção de café nos países concorrentes do Brasil e tendências do consumo mundial. **Informações Econômicas**, SP, v.27, n.5, p.7-24, 1997.

PINTO FILHO, G.L. **Desenvolvimento de um secador de fluxos cruzados com reversão do fluxo de ar de resfriamento, para a secagem de café (*Coffea arabica* L.)**. Viçosa, MG: UFV, 1994. 80p. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa.

PRUSSIA, S. E.; CAMPBELL, D. T. Apparent modulus elasticity of maturing pecans. **Transactions of the ASAE**. v.28, n.4, p.1290-1296, 1985.

SAMPAIO, C.P. **Determinação da força requerida para o desprendimento de frutos de café em diferentes estádios de maturação**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 37p. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa.

SEGERLIND, L.J. **Applied Finite Element Analysis**, 2ª edição. New York, John Wiley & Sons. 1984.

SILVA, J.S.; AFONSO, A.D.L.; LACERDA FILHO, A.F. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. In: SILVA, J.S., **Pré-processamento de produtos agrícolas**, Juiz de Fora-MG, Instituto Maria, p.395-461, 1995.

SILVA, F. M., CARVALHO, G.R., SALVADOR, N. Mecanização da Colheita de Café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.18, n.187, p.43-54, 1997.

SILVA, J. S.; BERBERT, P. A. **Colheita, secagem e armazenagem de café**. Viçosa: Aprenda Fácil Editora, 1999. 146p.

TÔRRES, G. Qualidade: fator determinante para cafeicultura moderna. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v.18, n.187, p. 3, 1997.

VILELA, E.R. Secagem e qualidade do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v.18, n.187, p. 55-67, 1997.

WHITE, G.M., ROSS, I.J., PONELEIT, C.G. Stress crack development in popcorn as influenced by drying and rehydration processes. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.25, n.3, p.768-772, 1982.

ZHANG, Q., LI, Y; PURI, V. M.; MANBECK, H. B. Physical properties effect on stress-strain behavior of wheat en masse – Part II. Constitutive elastoplastic parameter dependence on initial bulk density and moisture content. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.32, n.1, p.203-209, 1989.

APÊNDICE

QUADRO 1 - Valores médios de raios de curvatura (R e r), em mm, dos frutos de café em diferentes estágios de maturação, temperaturas do ar de secagem e teores de umidade

Estádio de maturação	Teor de umidade (%)	Temperatura do ar de secagem (°C)					
		40		50		60	
		R	r	R	r	R	r
“verdoengo”	12	7,40	5,50	8,00	5,50	8,35	5,75
	20	7,60	5,60	8,20	5,80	6,60	5,95
	30	7,90	5,70	8,10	5,70	6,90	6,10
	50	8,00	6,25	8,40	6,40	7,85	6,25
	60	8,25	6,95	8,30	6,50	7,90	6,60
“cereja”	12	8,40	5,65	8,00	5,40	7,60	5,50
	20	8,50	5,80	8,20	5,60	7,80	5,60
	30	8,40	6,25	8,35	5,50	7,90	5,75
	50	8,75	6,50	8,00	6,00	7,65	6,30
	60	9,00	6,95	8,15	6,25	7,95	6,40
“verde”	12	7,75	5,30	7,90	5,00	8,20	5,80
	20	7,60	5,30	7,80	5,20	8,32	5,20
	30	7,90	5,30	8,10	5,45	8,00	5,10
	50	8,00	5,60	8,40	5,50	7,90	5,00
	60	8,575	5,475	8,50	5,50	7,75	4,85

QUADRO 2 - Análise de variância da força para colapso, deformação específica e módulo de deformidade dos frutos de café em diferentes estágios de maturação, temperaturas do ar de secagem e teores de umidade

FV	GL	QM		
		Força	Deformação específica	Módulo de deformidade
TEMP	2	84286,98**	58,46292 ^{ns}	0,8301920E+16**
ERRO(A)	99	2407,079	172,5031	0,8197377E+15
MAT	2	798238,8**	46971,44**	0,1288365E+17**
TU	3	1292,302 ^{ns}	4284,146**	0,1881045E+17**
TU*MAT	6	57538,49**	1638,151**	0,4368015E+16**
TEMP*MAT	4	48965,08**	1369,290**	0,5783109E+16**
TU*TEMP	6	8023,960**	340,5346*	0,1377799E+16 ^{ns}
TU*TEMP*MAT	12	10698,27**	1065,682**	0,2441422E+16**
RESÍDUO	1089	2847,704	173,8307	0,8197860E+15
CV(%) parcela		46,27	42,27	90,17
CV(%) subparcela		50,32	42,43	90,18

* Significativo a 5% ** Significativo a 1% ns Não significativo pelo teste f.