

CRISTIANO MÁRCIO ALVES DE SOUZA

**AVALIAÇÃO E SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE UMA COLHEDORA DE  
FLUXO AXIAL PARA FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* 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

2001

CRISTIANO MÁRCIO ALVES DE SOUZA

**AVALIAÇÃO E SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE UMA COLHEDORA DE  
FLUXO AXIAL PARA FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* 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*.

APROVADA: 26 de março de 2001.

---

Profª . Lêda Rita D'Antonino Faroni

---

Prof. Paulo Roberto Cecon

---

Dr. Evandro Chartuni Mantovani  
(Conselheiro)

---

Prof. Francisco de Assis de Carvalho Pinto  
(Conselheiro)

---

Prof. Daniel Marçal de Queiroz  
(Orientador)

A Deus.

Aos meus pais e minha irmã.

À minha família.

Aos meus amigos.

Às pessoas que me amam e  
sempre me incentivaram nos momentos  
difíceis.

## AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e às Indústrias Reunidas Colombo, pelo suporte financeiro.

À EMBRAPA Milho e Sorgo, pelo suporte financeiro e de recursos humanos.

Ao Prof. Daniel Marçal de Queiroz, pela amizade e confiança, pelos ensinamentos e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos conselheiros Prof. Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Prof. Gutemberg Pereira Dias e Dr. Evandro Chartuni Mantovani, pelas contribuições e sugestões.

Ao Prof. Paulo Roberto Cecon, pela valiosa orientação nas análises estatísticas.

Ao Engenheiro Rodrigo Ruffini Barbosa e ao técnico Paulinho das Indústrias Reunidas Colombo, pelo auxílio industrial na realização dos testes de campo.

À Leidy Zulys pelas oportunas sugestões e acompanhamento durante o trabalho.

Aos funcionários da EMBRAPA Milho e Sorgo, em especial a João Batista e Mário Ângelo, pela amizade e cooperação durante a realização do trabalho.

Aos colegas de curso Roberto Carlos e Ricardo Garcia, pela ajuda no experimento de campo, e aos demais colegas, pelas contribuições e pelo bom convívio.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola e a todos, que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta tese.

## **BIOGRAFIA**

CRISTIANO MÁRCIO ALVES DE SOUZA, filho de José Raimundo Alves de Souza e Irene Alves das Graças Souza, nasceu em Viçosa, Estado de Minas Gerais, em 4 de março de 1974.

Em 1994, iniciou o curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, graduando-se em março de 1999.

Em abril de 1999, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, concentrando seus estudos na área de Mecanização Agrícola, submetendo-se à defesa da tese em março de 2001.

## ÍNDICE

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUÇÃO.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	4
<b>POTÊNCIA NECESSÁRIA PARA ACIONAMENTO DE UMA COLHEDORA DE FLUXO AXIAL PARA FEIJÃO.....</b>	<b>6</b>
RESUMO.....	6
REQUIRED POWER FOR DRIVING AN AXIAL FLOW BEAN HARVESTER.....	6
ABSTRACT.....	6
INTRODUÇÃO.....	7
MATERIAL E MÉTODOS.....	8
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
CONCLUSÕES.....	25
AGRADECIMENTOS.....	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26
<b>AVALIAÇÃO DE PERDAS EM UMA COLHEDORA DE FLUXO AXIAL PARA FEIJÃO.....</b>	<b>28</b>
RESUMO.....	28
EVALUATION OF THE QUANTITATIVE LOSSES OF A HARVESTER OF BEAN OF AXIAL FLOW.....	28
ABSTRACT.....	28
INTRODUÇÃO.....	29
MATERIAL E MÉTODOS.....	31
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
CONCLUSÕES.....	51
AGRADECIMENTOS.....	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
<b>EFEITO DA COLHEITA MECANIZADA SOBRE A QUALIDADE DE SEMENTES DE FEIJÃO (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....</b>	<b>54</b>

RESUMO.....	54
EFFECT OF THE MECHANICAL HARVESTING IN THE QUALITY OF BEAN KERNELS ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.) .....	54
ABSTRACT .....	54
INTRODUÇÃO .....	54
MATERIAL E MÉTODOS .....	56
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
CONCLUSÕES.....	72
AGRADECIMENTOS.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
<b>AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE RUÍDO EMITIDO POR UM SISTEMA DE COLHEITA PARA FEIJÃO .....</b>	<b>75</b>
RESUMO.....	75
EVALUATION OF THE NOISE LEVEL EMITTED BY A BEAN HARVESTING SYSTEM.....	75
ABSTRACT .....	75
INTRODUÇÃO .....	76
MATERIAL E MÉTODOS .....	78
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
CONCLUSÕES.....	89
AGRADECIMENTOS.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
<b>MODELO DE SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE TRILHA E SEPARAÇÃO MECÂNICA EM UMA COLHEDORA DE FLUXO AXIAL PARA FEIJÃO .....</b>	<b>91</b>
RESUMO.....	91
SIMULATION MODEL OF THE THRESHING AND SEPARATING PROCESS IN BEAN AXIAL FLOW HARVESTER.....	91
ABSTRACT .....	91
INTRODUÇÃO .....	92
MATERIAL E MÉTODOS .....	93
Implementação do modelo de simulação .....	94
Procedimentos experimentais.....	97
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	99
Simulação da eficiência de trilha e separação mecânica do feijão.....	102
CONCLUSÕES.....	107
AGRADECIMENTOS.....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
RESUMO E CONCLUSÕES.....	109
APÊNDICE.....	113

## RESUMO

SOUZA, Cristiano Márcio Alves de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, março de 2001. **Avaliação e simulação do desempenho de uma colhedora de fluxo axial para feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Conselheiros: Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Gutemberg Pereira Dias e Evandro Chartuni Mantovani.

Na avaliação de desempenho da máquina colhedora de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) foram estudadas as exigências energéticas, a capacidade de processamento, as perdas ocasionadas no processo de colheita, a qualidade do produto colhido e o nível de ruído emitido pelo conjunto trator-máquina. Para analisar o processo de separação mecânica do produto, por meio do desenvolvimento de modelos de simulação, considerou-se que a probabilidade de separação dos grãos da vagem é proporcional à energia despendida na debulha e à transmissibilidade desta energia através da densidade da camada de palha. O trabalho foi conduzido no Laboratório de Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, nas empresas MIAC, COTRAME e AEMCO, pertencentes às Indústrias Reunidas Colombo Ltda., e no Campo Experimental e Laboratório de Automação Agropecuária da EMBRAPA Milho e Sorgo. Os ensaios foram realizados com a cultura do feijão, cultivar Carioca, utilizando uma colhedora de arrasto modelo “Double Master” com sistema de trilha em fluxo axial. As variáveis investigadas foram: número de linhas de feijão na leira (4, 7 e 10 linhas), velocidade de trabalho da máquina (4, 7 e 10 km/h), rotação do cilindro trilhador (420 e 540 rpm) e o teor de umidade de colheita do produto ( $10,65 \pm 0,25$  e  $14,10 \pm 0,81\%$ ). Foram determinados, nos testes, o torque e a rotação na TDP do trator, a força necessária para arrastar a máquina, a quantidade de produto colhido e o tempo necessário para colhê-lo, o nível de ruído emitido pelo conjunto

trator-máquina e a massa de grãos perdida durante a colheita. Retiraram-se amostras no tanque graneleiro da máquina para analisar a qualidade do produto, sendo determinados a pureza, o índice de danos mecânicos, o vigor e a germinação das sementes. Por meio das análises de metodologia de superfície de resposta dos dados e interpretações dos resultados obtidos, pode-se concluir que, nas condições que o trabalho foi realizado a potência exigida no motor do trator para tracionar a colhedora, com carregamento máximo do tanque graneleiro, foi 7,90 kW e o acionamento dos órgãos internos demandou 45,28 kW. A capacidade de colheita aumentou, linearmente, com o aumento da taxa de alimentação, com maior valor de 6,56 t/h. O consumo específico de energia apresentou comportamento quadrático em função da taxa de alimentação, o menor consumo específico de energia obtido foi de 2,46 kWh/t. A perda na plataforma de recolhimento foi a maior dentre os demais componentes da colhedora, representando 49,19% da perda total da colhedora. As perdas no sistema de trilha e na separação e de limpeza foi de 44,62 e 6,19%, respectivamente. O melhor resultado de eficiência de colheita da máquina foi 96,98%. A germinação, o vigor e a pureza aumentaram com o aumento da taxa de alimentação da colhedora. Os valores desses parâmetros de qualidade foram maiores para a rotação de 420 rpm do que para a de 540 rpm na TDP. O índice de danos mecânicos decresceu com o aumento da taxa de alimentação, e aumentou com o aumento da rotação do cilindro trilhador. O conjunto trator-máquina emitiu níveis de ruído acima do limite de 85 dBA, que é considerado crítico pela NR-15 para oito horas de exposição diária, independentemente das rotações do motor utilizadas. O nível de ruído diminuiu com o aumento da taxa de alimentação, mas aumentou com o aumento da rotação do motor do trator. O nível de ruído foi menor quanto maior era o raio de afastamento lateral, sendo que o lado traseiro foi o que apresentou maiores valores. O modelo de simulação implementado foi validado, apresentando erro relativo médio na determinação da eficiência de trilha e separação do côncavo de 1,78%. Por meio da análise do modelo, verificou-se que a diferença de teor de umidade nos grãos, nas faixas estudadas, não influenciou a eficiência de trilha e separação do côncavo.

## ABSTRACT

SOUZA, Cristiano Márcio Alves de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, march of 2001. **Evaluation and simulation of the performance of an axial flow bean harvester (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Adviser: Daniel Marçal de Queiroz. Committee Members: Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Gutemberg Pereira Dias e Evandro Chartuni Mantovani.

In the evaluation of the bean axial flow harvester it was studied the energy consumption, the processing capacity, and the losses in the harvesting process, the quality of harvested product and the noise generated by the tractor-harvester system. The mechanical separation process analysis was done by using a mathematical model, the probability of separating grains from the supporting parts of the plant was assumed proportional to the energy necessary for threshing and for transmitting this energy through the material other than grain layer. The work was done in the Agricultural Mechanization Laboratory of the Department of Agricultural Engineering, Universidade Federal de Vicoso and in the MIAC, COTRAME e AEMCO companies and also in the Experimental Field and Agricultural Automation Laboratory of Embrapa Milho e Sorgo. The tests were performed for beans of “Carioca” cultivar and using a pull type bean harvester, “Double Master” model. This harvester has an axial flow threshing system. During the tests the following variables were analyzed: a) number of bean rows in each harvesting line (4, 7 e 10 rows); b) the harvester speed (4, 7 e 10 km/h); c) the rotation of the threshing cylinder (420 e 540 rpm) and d) the product moisture content ( $10,65 \pm 0,25$  e  $14,10 \pm 0,81\%$  wet basis). In the tests the torque and speed of PTO, the force necessary to pull the machine, the harvesting capacity, the noise generated by the tractor-harvester and the grain losses of the harvester were measured. Grain samples of

the harvester tank were taken for measuring the purity, the mechanical damage index, the germination and vigor of the kernels.

The tests were performed using 3x3x2 factorial type, where three different number of bean rows in each harvesting line, three different harvester speeds and two different speed of the threshing cylinder were used according to an entirely randomized design, with two replications.

Experimental data were analyzed by using the response surface method. Based on this analysis the following conclusions were taken. The power to pull with the tank full of grains was 7.90 kW. The PTO power needed in the machine operation was 45.28 kW. The harvesting capacity increased linearly with the increase of the feeding rate, the higher value obtained was 6.56 t/h. The specific energy consumption obtained was 2.46 kWh/t. The header loss was higher than in any other part of the harvester and represented 49.2% of the total loss. The threshing and separating was 44.6% and the cleaning loss was 6.2% of the total loss. The lowest value of harvesting loss was 3.02%. The germination, vigor and purity of the seeds increased with the increase of the feeding rate. The value of these quality parameters was higher at the 420 rpm than at the 540 rpm PTO speed. The grain damage decreased with the increase of the feeding rate and with the reduction of the threshing cylinder speed. The noise level produced by the tractor-harvester system was higher than 85 dBA that is considered the highest value established by the NR-15 standards for 8 hours of continuous exposition to a worker. The noise level decreased with the increase of the feeding rate and increased with the engine speed. The noise level decreased as the distance from the tractor-harvester increased. The rear part of the system was the one that was subject to the highest noise level. The implemented model for simulating the threshing and separating process was validated, the average difference between the experimental and the simulated values was 1.78%. The grain moisture content had no effect on the threshing and separating efficiency of the harvester.

## INTRODUÇÃO

A agricultura moderna exige qualidade e produtividade nas operações que a compõem, em que a competitividade tem levado as empresas a reduzir custos e colocar produtos de alta qualidade no mercado consumidor. Esta realidade representa desafios, uma vez que além de ser uma atividade complexa, a agricultura muitas vezes fica dependente de aspectos climáticos.

Atualmente, com uma produção de 2915 mil toneladas na safra 1999 e um consumo per capita de 18,3 kg/ano (BRASIL, 2000), o Brasil é o maior produtor e maior consumidor mundial de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.).

O feijão é um dos constituintes mais importantes na dieta da população brasileira, por ser uma excelente fonte protéica, ter bom conteúdo de carboidratos e ser uma fonte razoável de ferro e vitamina B<sub>1</sub>. Além de seu valor nutricional, o feijão é um dos produtos de maior importância sócio-econômica, uma vez que abrange grandes áreas de cultivo e grande quantidade de mão-de-obra (BORÉM e CARNEIRO, 1998). De acordo com SANTOS e BRAGA (1998), desde a última década, o feijão deixou de ser uma cultura de subsistência, tornando-se uma cultura tecnificada com maior produtividade e produto final de melhor qualidade.

Com a utilização de grandes áreas de cultivo, além da escassez de trabalhadores no meio rural e a demanda de mão-de-obra flutuante durante os processos agrícolas, a cultura do feijão tem gerado uma crescente necessidade de mecanização em todas as etapas da produção.

A colheita do feijão envolve as etapas de arranquio ou corte, recolhimento e alimentação, trilha, separação e limpeza do produto. A trilha, quando mal conduzida, pode ser responsável por significativa perda de produto (SOUZA et al., 1998) e, segundo CARVALHO e NAKAGAWA (1988), trata-se de uma das mais importantes

fontes de danificações dos grãos. Assim, a qualidade do produto colhido é um fator a mais a ser considerado pelos agentes envolvidos no processo de colheita.

Os danos mecânicos nos produtos agrícolas são devidos às forças externas, sob condições estáticas e, ou dinâmicas, ou às forças internas resultantes de variações na temperatura e no teor de umidade do produto, bem como às mudanças biológicas e químicas (MOHSEIN, 1970). Os danos mecânicos ocasionados durante a colheita dependem, principalmente, do teor de umidade dos grãos e da velocidade periférica do cilindro trilhador, conforme mostrado por PICKETT (1973) e NEWBERY et al. (1980).

Para se propor melhorias nas máquinas, é importante realizar estudos no sentido de um melhor conhecimento sobre o desempenho dos sistemas que englobam a colheita. Com o conhecimento adquirido, mudanças podem ser feitas não só para diminuição de danos como, também, de perdas ocasionadas no processo de colheita.

SMITH (1986), estudando as perdas ocorridas em cada etapa do processo de colheita mecânica do feijão, mostrou que essas variaram de 1 a 13%, com média de 3,7%, sendo que 20% ocorreram no corte (arranquio) feito com ceifador, 20% no enleiramento e 60% nas etapas de recolhimento, trilha e separação. MESQUITA et al. (1998), estudando as perdas ocorridas num período de 20 anos, durante o processo de colheita de soja, mostrou que é possível diminuí-las significativamente, pois, houve redução de 69% no Paraná e de 37% nos demais estados produtores. As perdas evitadas corresponderam a 3,6 milhões de toneladas de grãos, no Paraná, e 6,2 milhões de toneladas nos demais estados.

A utilização de máquinas e equipamentos agrícolas, quando feita de maneira adequada, apresenta vantagens como: melhorar o rendimento operacional, facilitar o trabalho do homem do campo, possibilitar a expansão do cultivo e atender o cronograma de atividades no tempo disponível (DELAFOSSÉ, 1986). Um problema encontrado hoje é que, antes do uso pleno e intensivo do equipamento, mudanças são feitas pelos fabricantes sem mesmo identificar os sistemas que demandam por melhorias. Por exemplo, MANTOVANI et al. (1992) concluíram que as potências requeridas para acionamento de semeadoras eram menores do que as recomendadas nos catálogos promocionais. A experiência tem mostrado que o mesmo acontece com outros equipamentos, e pode estar acontecendo também com as colhedoras de feijão. Um parâmetro muito importante, no estudo do desempenho das máquinas destinadas à colheita, consiste no reconhecimento das taxas de alimentação que proporcionam melhor aproveitamento da energia exigida e melhor qualidade do produto colhido, além da diminuição na perda de grãos.

Além da cultura e do desempenho da máquina, deve-se também estudar os fatores que prejudicam o trabalhador e, segundo VITÓRIA (2000), o ruído pode ser considerado um dos principais fatores, pois, pode causar danos auditivos, assim como outras conseqüências. LIMA et al. (1998) concluíram que quanto maior a potência do motor do trator maior foi o nível de ruído emitido, mostrando, assim, a importância de se conhecer a potência realmente exigida pelas máquinas e implementos. Assim, é de fundamental importância conhecer o nível de ruído produzido por tratores, conjugados ou não com implementos ou máquinas, buscando melhorar as condições de trabalho do profissional envolvido na colheita mecânica.

A simulação de processos através do desenvolvimento de modelos matemáticos e programas computacionais tem-se mostrado uma ferramenta de grande utilidade no auxílio ao projeto de novas máquinas ou no aprimoramento daquelas já existentes, permitindo a diminuição de custos e tempo (SOUZA et al., 1998), além de minimizar problemas com segurança. A simulação consiste na técnica de se reproduzir, o mais fielmente possível, um processo físico de modo a prever o fenômeno real.

HUYNH et al (1982) desenvolveram um modelo matemático para simular a trilha de trigo em um sistema convencional de cilindro de barras e côncavo, em que a debulha foi considerada um processo randômico, podendo este modelo ser adaptado para outros produtos ou outros tipos de sistema de trilha.

Devido a importância da cultura do feijão para o País e a necessidade de se conhecer o desempenho das máquinas destinadas à colheita deste produto, este trabalho tem como objetivos avaliar a demanda de potência de uma colhedora de arrasto, com sistema de trilha em fluxo axial, assim como avaliar as perdas quantitativas ocasionadas na colheita, analisar a qualidade do produto colhido, avaliar o nível de ruído emitido pelo conjunto trator-máquina e implementar um modelo matemático de simulação da trilha e separação mecânica da colhedora, validando-o por meio de comparação de resultados simulados com resultados obtidos experimentalmente.

A introdução e o resumo desta pesquisa seguem as normas prescritas para feitura de tese, na Universidade Federal de Viçosa, sendo os artigos escritos de acordo com as normas da Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, por recomendação do comitê de orientação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, E. T. de **Efeito imediato e latente de danos mecânicos sobre a qualidade de sementes de feijão submetidas a diferentes velocidades de impacto**. Viçosa, MG: UFV, 1997. 49p. (Tese de Mestrado)
- BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Companhia Nacional de Abastecimento. **Agricultura brasileira em números**. <http://www.agricultura.gov.br/html/Estatisticas/estatistica.htm>. 11 de Jul. de 2000.
- BORÉM, A.; CARNEIRO, J. E. S. A Cultura. In: VIEIRA, C.; DE PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão – Aspectos gerais e cultura no estado de minas gerais**, Editora UFV, p.13-17, 1998.
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Injúria mecânica. Sementes, Ciência, Tecnologia e Produção**. 3ª ed. Campinas, SP: Fundação Cargil, 1988. 424p.
- DELAFOSSÉ, R. M. **Máquinas sembradoras de grano grueso**. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile. 1986. 48p.
- HUYNH, V. M.; POWELL, T; SIDDALL, J. N. Threshing and separating process - A mathematical model **Transactions of the ASAE**, v.25, n.1, p.65-73. 1982.
- LIMA, J. S. S.; FERNADES, H. C.; VITÓRIA, E L. da Determinação do nível de ruído e identificação da fonte em tratores florestais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.2, p.55-61, 1998.
- MANTOVANI, E. C.; BERTAUX, S.; ROCHA, F. E. de C. Avaliação da eficiência operacional de diferentes semeadoras-adubadoras de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. EMBRAPA, v.27, n.12, p.1579-1586, 1992.
- MESQUITA, C. M.; COSTA, N. P.; MAURINA, A. C.; ANDRADE, J. G. M.; PEREIRA, J. E. Colheita mecânica da soja: Redução de perdas em vinte anos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.2, p.71-80, dez. 1998.
- MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plants and animal materials**. Gordon and Breach Science Publishers. New York. 1970. 731p.

- NEWBERY, R. S., PAULSEN, M. R., NAVE, W. R. Soybean quality with rotary and conventional threshing. **Transactions of the ASAE**, v.23, n.2, p.303-308, 1980.
- PICKETT, L. K. Mechanical damage and processing loss during navy bean harvesting. **Transactions of the ASAE**, v.16, n.6, p.1047-1050, 1973.
- SANTOS, M. L.; BRAGA, M. J. Aspectos econômicos. In: VIEIRA, C.; DE PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão – Aspectos gerais e cultura no estado de minas gerais**. Viçosa, MG: Editora UFV, 1998, p.19-53.
- SMITH, J. A. Dry Edible bean field harvesting losses. **Transactions of the ASAE**. v.29, n.6, p.1540-1543, 1986.
- SOUZA, C. M. A. de; PINTO, F. A. C.; MANTOVANI, E. C.; QUEIROZ, D. M. Simulação e análise do processo de trilha mecânica do milho-pipoca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB. v.2, n.2, p.212-218, 1998.
- VITÓRIA, E. L. da **Avaliação do nível de ruído emitido por tratores em diferentes operações agrícolas**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 76p. (Tese de Mestrado)

# POTÊNCIA NECESSÁRIA PARA ACIONAMENTO DE UMA COLHEDORA DE FLUXO AXIAL PARA FEIJÃO

## RESUMO

Na avaliação de desempenho de máquinas destinadas a colheita é importante estudar as exigências energéticas, como uma função da capacidade de processamento, na busca por condições ótimas de funcionamento. Este trabalho objetivou determinar a potência necessária para acionamento de uma colhedora de fluxo axial para feijão. Testes experimentais foram conduzidos, sendo determinados o torque e a rotação na TDP, a força necessária para arrastar a máquina, a velocidade de trabalho, a quantidade de produto colhido e o tempo necessário para colhê-lo. Para estudar o comportamento das variáveis investigadas, foram realizadas análises de metodologia de superfície de resposta. A potência exigida no motor do trator para tracionar a colhedora, com carregamento máximo do tanque graneleiro, foi equivalente a 7,90 kW. O acionamento dos órgãos internos demandou 45,28 kW. A potência total exigida pela máquina foi 53,18 kW. A maior capacidade de colheita foi 6,56 t/h. O consumo específico de energia evidenciou comportamento quadrático decrescente, em função da taxa de alimentação, com valor mínimo de 2,46 kWh/t.

**Palavras-chave:** feijão, colheita, consumo de energia

## REQUIRED POWER FOR DRIVING AN AXIAL FLOW BEAN HARVESTER

### ABSTRACT

The performance evaluation of a harvesting machine is important and it should include the determination of the energy necessary in the operation as a function of the processing capacity of the machine. The objective of this work was to find the necessary power for operating an axial flow bean harvester. Experimental tests were performed, the torque and angular velocity in the PTO were measured, also it was measured the drawbar force, the machine speed and harvesting capacity. To analyze the effect of the variables on the power needed regression analysis were done. The drawbar power for the maximum grain bin capacity was 7.90 kW. The maximum PTO power to operate the machine was found to be 45.28 kW. The maximum harvesting capacity was 6560 kg/h. The minimum specific energy consumption was 2.46 kWh/t.

**Key words:** bean, harvesting, energy consumption

## INTRODUÇÃO

A agricultura moderna exige qualidade e produtividade nas operações que a compõem, em que a competitividade tem levado as empresas a reduzir custos e colocar produtos de alta qualidade no mercado consumidor. Esta realidade representa desafios, uma vez que além de ser uma atividade complexa, a agricultura muitas vezes fica dependente de aspectos climáticos.

Com a utilização de grandes áreas de cultivo, além da escassez de trabalhadores no meio rural e demanda de mão-de-obra flutuante durante os processos agrícolas, a cultura do feijão tem gerado uma crescente necessidade da mecanização de todas as etapas da produção. Dentre as etapas do ciclo operacional de uma cultura, a colheita normalmente destaca-se em virtude das dificuldades e dos altos custos envolvidos, seja ela realizada de forma manual ou mecanizada.

Na cultura do feijão, a colheita pode ser feita manualmente, mecanicamente ou por uma combinação de ambas (SILVA e QUEIROZ, 1998). A colheita utilizando a combinação manual e mecânica é realizada com pelo menos três operações de campo, em um período de 2 a 12 dias, pois, consiste em arrancar as plantas inteiras, quando estas encontram-se quase despidas de folhas e os grãos com baixo teor de umidade. Com as plantas arrancadas, formam-se leiras que permanecem na lavoura para completar o processo de secagem e homogeneização natural (CONTO et al., 1980) e, por fim, uma máquina colhedora de grãos, convencional ou específica para feijão, recolhe o produto e separa os grãos do resto da planta (SMITH, 1986).

A utilização adequada de máquinas e equipamentos agrícolas tem várias vantagens, tais como melhorar o rendimento operacional, facilitar o trabalho do homem do campo, possibilitar a expansão do cultivo e atender o cronograma de atividades no tempo disponível (DELAFOSSÉ, 1986). Um problema atualmente encontrado é que, antes do uso pleno e intensivo do equipamento, são feitas mudanças sem mesmo identificar os sistemas que demandam por melhorias.

KIM e GREGORY (1989) citam a carência de trabalhos publicados abordando funções matemáticas, que descrevam o comportamento do consumo de energia demandado por máquina de colheita. ROTZ e MUHTAR (1992) reforçam essa afirmativa, relatando que as informações sobre a exigência de potência são muito limitadas, sendo que a maioria das informações encontradas na literatura refere-se à perda de matéria e à qualidade do produto colhido. Entretanto, desde a última década, o feijão deixou de ser uma cultura de subsistência, tornando-se uma cultura tecnificada (SANTOS e BRAGA, 1998), surgindo, assim, a necessidade de novos trabalhos,

principalmente explorando os efeitos da taxa de alimentação, da velocidade periférica do cilindro trilhador e do estado das condições da cultura na exigência de energia de colhedoras.

Segundo MANTILLA e RAMOS (1998), os principais parâmetros afetam o consumo de energia, durante o processo de colheita mecânica, são a velocidade periférica, o diâmetro e o momento de inércia do cilindro trilhador, a abertura entre cilindro e côncavo, o tipo e as dimensões do côncavo, além das características físico-mecânicas da cultura. A taxa de alimentação é um outro parâmetro que influencia, significativamente, o consumo de energia de máquinas de colheita (ARNOLD e LAKE, 1964; DODDS, 1968; BJORK, 1988; KIM e GREGORY, 1989).

Devido a necessidade de se conhecer o desempenho das máquinas destinadas à colheita do feijão e de se obter dados relativos à necessidade de potência das máquinas agrícolas para realização da seleção do trator adequado para sua operação, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a demanda de potência e energia requerida por uma colhedora em campo.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho de preparação da máquina colhedora para realização dos testes experimentais foi conduzido no Laboratório de Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa e nas empresas MIAC, COTRAME e AEMCO das Indústrias Reunidas Colombo Ltda.. Os testes experimentais foram realizados no Campo Experimental e no Laboratório de Automação Agropecuária da EMBRAPA Milho e Sorgo.

O produto utilizado nos ensaios foi o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar Carioca, sendo a máquina avaliada uma colhedora de arrasto modelo “Double Master” (Figura 1), com sistema de trilha em fluxo axial. A colhedora apresentava 2,45 m de largura total, 2,12 m de bitola, 3,25 m de altura, 6,30 m de comprimento, 3406 kg de massa total, 0,543 m de diâmetro e 1,90 m de largura do cilindro trilhador, 2,70 m de comprimento do côncavo e, segundo o fabricante, 2400 kg de capacidade do tanque graneleiro, 1250 kg/h de capacidade de colheita, sendo exigido 88,0 kW para seu acionamento. A máquina foi tracionada e acionada por um trator Massey-Ferguson, Modelo MF 620 Hydrotronic, com potência nominal de 82 kW e 6000 kg de massa total. A colhedora foi equipada com um pneu R1 12,4 – 24, e o trator com um pneu dianteiro R1 14,9 – 24 e um traseiro R1 18,4 – 34.

As variáveis investigadas nos ensaios foram a taxa de alimentação da máquina, obtida pela variação do número de linhas de feijão na leira e pela velocidade de trabalho da máquina, e a rotação do cilindro trilhador, trabalhando-se com 420 e 540 rpm. Essas rotações foram obtidas, variando-se a rotação do motor do trator. A abertura entre cilindro e côncavo foi de 20 mm. Foi montado um experimento em esquema fatorial 3x3x2, com três constituições de leira, três velocidades de deslocamento e duas rotações do cilindro trilhador, instalado segundo o delineamento inteiramente casualizado, com duas repetições. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e à metodologia de superfície de resposta. Os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste t a 10% e o coeficiente de determinação. Os dados obtidos foram analisados, estatisticamente, utilizando-se o programa computacional SAEG, versão 8.



Figura 1. Colhedora modelo “Double Master”

Foram determinados o torque e a rotação na tomada de potência (TDP), a força na barra de tração do trator, a velocidade de deslocamento da máquina, a massa de grãos colhidos e o tempo necessário para colhê-la.

Nas avaliações, foram consideradas duas faixas de teor de umidade de colheita, uma de  $10,65 \pm 0,25$  e outra de  $14,10 \pm 0,81\%$ . Os testes foram realizados em dois pivôs centrais com 6 anos de sistema de cultivo em plantio direto. O experimento com teor de umidade de 10,65% foi conduzido em um pivô, e o experimento com teor de umidade de 14,10% em um outro pivô, buscando-se minimizar o desvio dos dados de teor de umidade de colheita.

O torque na TDP do trator foi monitorado, utilizando-se um torquímetro marca Omega, com capacidade máxima de 120 Nm, e que utiliza “strain gages” como princípio de funcionamento. O torquímetro foi instalado entre a árvore do cilindro

trilhador e seu eixo cardan secundário de acionamento (Figura 2), que recebe o movimento da TDP. Juntamente com o torque, a rotação na TDP foi determinada, utilizando-se um sensor de pulso colocado a aproximadamente 4 mm de distância do ponto de excitação (Figura 3). A excitação do sensor foi realizada por um dispositivo metálico colocado no eixo cardan, que é acionado pela TDP. A potência para acionamento dos órgãos internos da colhedora foi determinada, utilizando-se o torque e a velocidade angular na TDP do trator. As leituras do torque foram feitas em um mostrador digital da marca Omega, e as da rotação em um multímetro digital marca Tektronix, modelo “TEK DMM252”.



Figura 2. Local de instalação do torquímetro na colhedora



Figura 3. Localização do sensor de pulso na colhedora

Para determinar a potência na barra de tração do trator, foram mensurados a força na barra e a velocidade de deslocamento da máquina. Para obtenção da força na barra de tração, usou-se uma célula de carga da marca Omega, em forma de “S”, com capacidade máxima de 50 kN, conectada a um mostrador digital também da marca Omega. Essa célula de carga deveria trabalhar sem sofrer flexão, e por isso construiu-se

um anteparo que substituiu a barra de tração do trator (Figura 4), onde a mesma ficou fixa sujeita apenas à força de tração. A Figura 5 apresenta o detalhe do projeto do anteparo de colocação da célula de carga.

Para vencer a resistência ao rolamento imposta pelo solo, toma-se necessária uma força adicional, que deve ser incluída no cálculo da potência requerida para tração da máquina. Esta força pode ser determinada por meio do coeficiente de resistência ao rolamento, obtido da relação entre a resistência ao rolamento, que foi considerada igual a força de tração, e a carga dinâmica sobre o rodado (ASAE Standard D497, 1990), conforme se segue.

$$C_r = \frac{R_r}{W_d} = \left[ \frac{1,2}{C_n} + 0,04 \right] \quad (1)$$

em que,

$C_r$  - coeficiente de resistência ao rolamento;

$R_r$  - resistência ao rolamento, kN;

$W_d$  - carga dinâmica sobre o rodado, kN;

$C_n$  - coeficiente de mobilidade, adm.

De acordo com a ASAE Standard D497 (1990), a potência exigida pelos órgãos rotativos de uma colhedora de grãos, com teor de umidade de colheita de 20%, pode ser estimada pela seguinte expressão:

$$P = 7,5 + 7,5 \cdot q \quad (2)$$

em que,

$q$  - taxa de alimentação da máquina, kg/s.

A velocidade de trabalho da máquina foi determinada, tomando-se por base o tempo gasto para a mesma percorrer, em operação, uma distância de 100 m.



Figura 4. Anteparo e célula de carga colocados entre trator e máquina



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os efeitos da variação da taxa de alimentação representada pelo número de linhas de feijão na leira e da velocidade de deslocamento da máquina, da rotação do cilindro trilhador e do teor de umidade de colheita dos grãos sobre a demanda de potência e desempenho da colhedora serão apresentados a seguir.

Na Figura 6 (A) são apresentados os resultados médios das forças e potências necessárias para tração, observadas em função do carregamento de grãos no tanque graneleiro da colhedora. Os dados de força e potência de tração apresentaram comportamento quadrático de seus valores. Esse comportamento foi devido à interação rodado-solo, pois, quanto maior a carga sobre o pneu, mais este e o solo se deformam, uma vez que a pressão de insuflagem do pneu, recomendada pelo fabricante, foi mantida constante.

Analisando a curva de força de tração, Figura 6 (A), verifica-se que o maior valor ocorreu no ponto de máxima capacidade de enchimento do tanque graneleiro da colhedora, que foi 2420 kg e exigiu uma força na barra de tração de 3,09 kN para arrastá-la totalmente carregada, ou seja, para vencer a resistência ao rolamento. Trabalhando com uma velocidade de  $5,40 \pm 0,49$  km/h, a colhedora demandou uma potência na barra de tração de 4,29 kW. A força de tração estimada pela expressão proposta por ASAE Standard D497 (1990), adotando  $C_n$  igual a 70,84 (solo firme), foi de 3,25 kN. Trabalhando na mesma velocidade, a potência necessária para tracionar a máquina estimada seria 4,88 kW, superestimando em 14% o valor real.

A potência de tração equivalente no motor do trator foi determinada, utilizando-se uma eficiência tratoria de 65%, uma relação entre a potência no eixo motriz e a potência na TDP de 0,96 e uma eficiência de transmissão do motor para a TDP de 87%, conforme ASAE Standard EP496.2 (2000). Assim, a potência exigida no motor do trator para tracionar a colhedora, com carregamento máximo do tanque graneleiro, foi 7,90 kW.

Os pontos de interseção das curvas com o eixo das ordenadas, Figura 6 (A), representam a força e potência necessária para arrastar a máquina com o tanque graneleiro vazio, ou seja, tendo influência apenas do peso da colhedora, que é 33,4 kN.

Na Figura 6 (B) observa-se que os dados do coeficiente de resistência ao rolamento, em função da carga dinâmica, apresentaram comportamento quadrático, mostrando que o aumento da massa sobre o eixo da máquina exige uma força adicional para vencer a resistência imposta pelo solo ao rolamento do rodado. Comparando os dados do coeficiente de resistência ao rolamento, obtidos experimentalmente, com

aqueles obtidos pela Equação (1) proposta pela ASAE Standard D497 (1990), verificou-se que esta equação superestimou em 18,18% o valor da força de tração requerida pela colhedora. Os valores foram calculados usando um Cn médio igual a 70,84.

Para estudar o comportamento da potência na TDP do trator em função do número de linhas de feijão na leira, da velocidade de deslocamento e rotação do cilindro trilhador da máquina, foram feitos cortes nos modelos de superfície de resposta ajustados, como apresentado nas Figuras 7 e 8.

A potência na TDP aumentou, linearmente, com o incremento da velocidade e do número de linhas na leira. A demanda de potência na rotação do cilindro trilhador de 540 rpm foi superior à demanda na rotação de 420 rpm. Esses comportamentos foram observados nos dois experimentos. Resultado semelhante foi obtido por DODDS (1968), que demonstrou que a demanda de potência foi função linear da taxa de alimentação da colhedora.

O experimento realizado com teor de umidade de 14,10% apresentou maiores valores de potência na TDP do que o experimento realizado com teor de umidade de 10,65%. Isso foi provocado pela diferença entre as produtividades e teores de umidade dos experimentos. A produtividade média no experimento com teor de umidade de 10,65% foi 2238,2 kg/ha, enquanto no experimento com teor de umidade de 14,10% foi 2532,35 kg/ha. A produtividade tem influência direta na taxa de alimentação da máquina, e o teor de umidade aumenta a necessidade de energia para ocorrência da trilha.

As maiores potências observadas para acionamento dos órgãos internos da máquina foram determinadas nas condições próximas ao limite de processamento da mesma, que foi de aproximadamente 5,00 kg/s. A maior potência na TDP exigida foi 31,20 kW e 39,39 kW, no experimento com teor de umidade de 10,65 e 14,10%, respectivamente. As potências máximas equivalentes no motor do trator, assumindo-se uma eficiência de transmissão do motor para a TDP de 87% (ASAE Standard EP496.2, 2000), foram 35,86 kW e 45,28 kW no experimento com teor de umidade de 10,65 e 14,10%, respectivamente. Uma colhedora combinada para soja, com sistema de trilha convencional, trabalhando a uma mesma taxa de alimentação, demandaria em torno de 39,83 kW de potência na TDP (Equação 2).

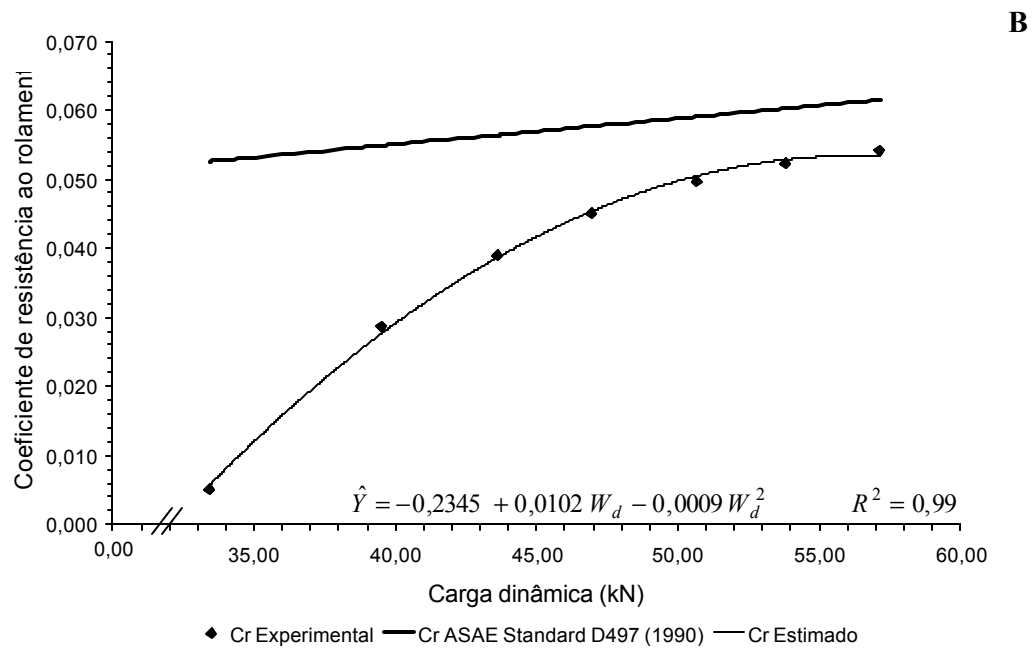
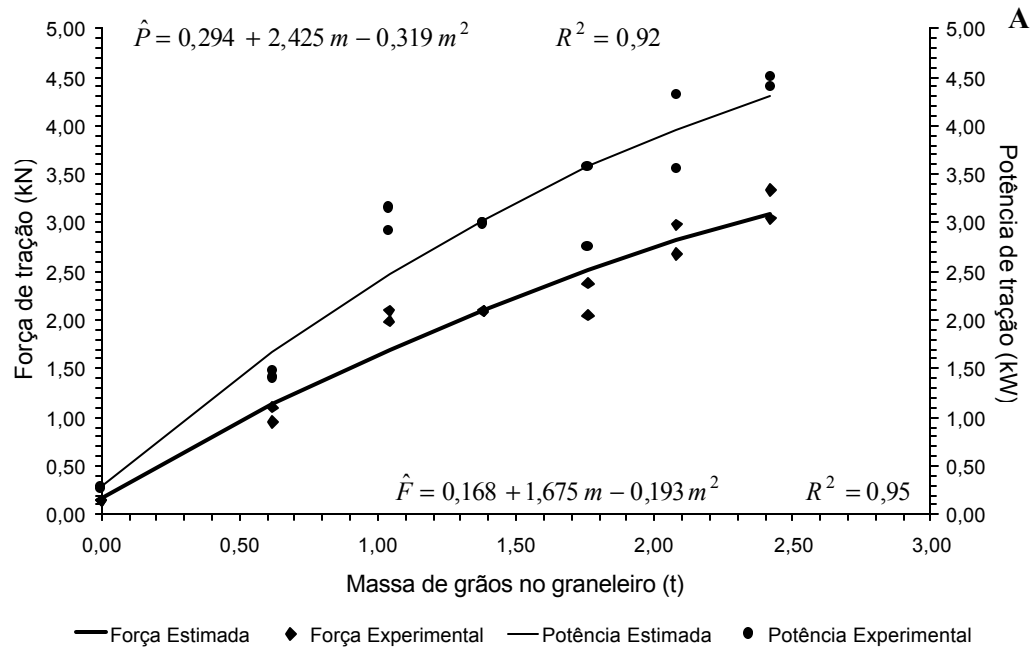


Figura 6. Força e potência de tração em função da massa de grãos contida no tanque graneleiro da máquina (A) e coeficiente de resistência ao rolamento (Cr) em função da carga dinâmica (B)

A potência total equivalente no motor do trator para se trabalhar com a máquina alimentada com 4,31 kg/s de matéria bruta - obtida da combinação da leira de 10 linhas e velocidade de 10 km/h - usando a rotação de 540 rpm na TDP, teor de umidade médio do produto de 14,10% e com carregamento máximo de enchimento do tanque graneleiro, foi 53,18 kW.

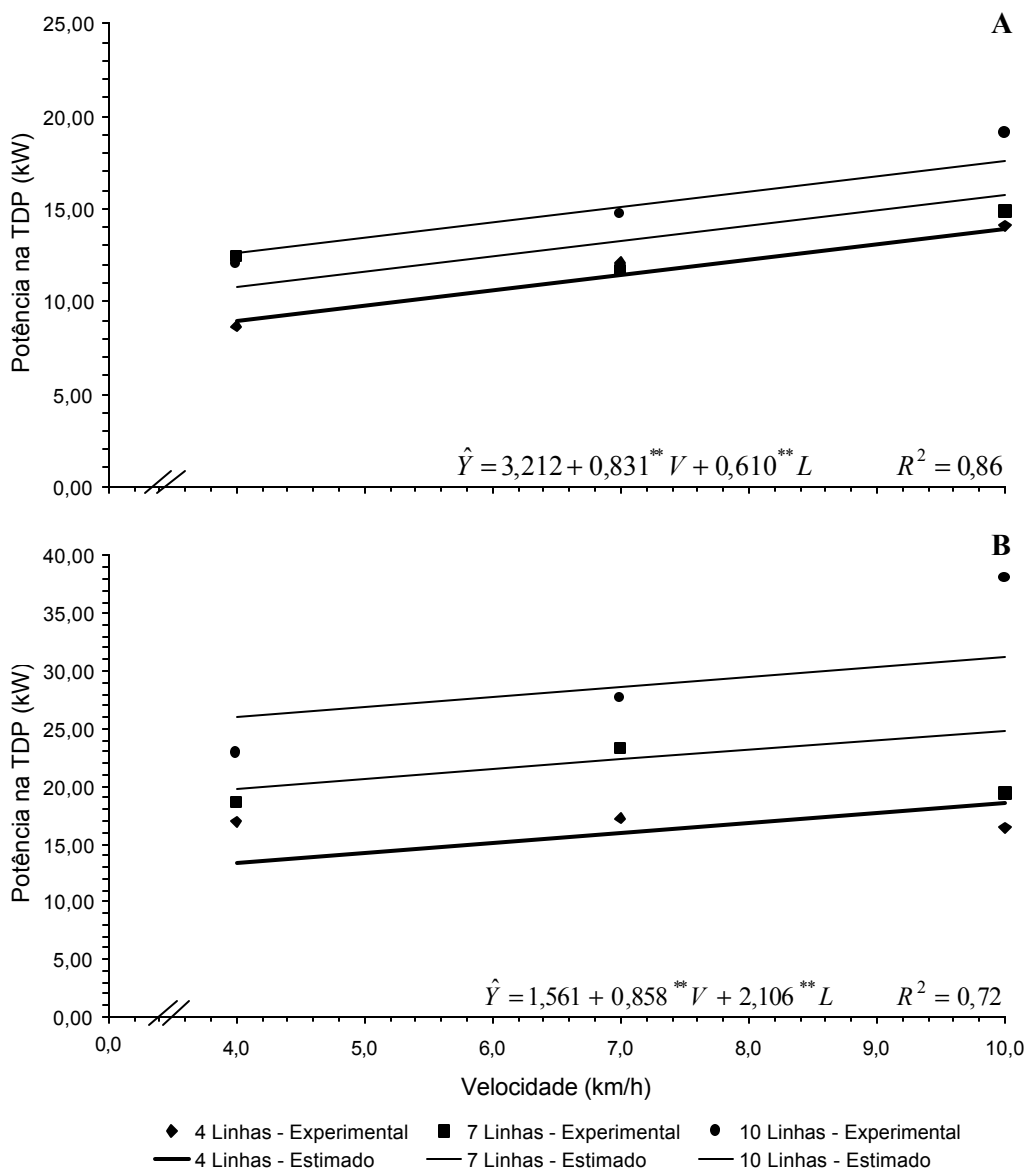
Analisando a relação entre a potência de acionamento dos órgãos internos e a potência total da colhedora, verifica-se que 14,86% da potência exigida pela máquina é usada na tração. BURROUGH (1954), ARNOLD E LAKE (1964) e KEPNER (1982) revelaram, por meio de dados experimentais, que até 80% da energia requerida por colhedoras é consumida no sistema de trilha.

Na Figura 9, são apresentados os dados de potência na TDP do trator em função da taxa de alimentação de palhada da colhedora. Os dados de potência na TDP apresentaram comportamento linear crescente, em função da taxa de alimentação da colhedora. Comparando os valores de potência na TDP, obtidos experimentalmente, com aqueles estimados por meio da Equação 2, verificou-se um erro relativo médio de 33,73 e 23,83% para o teor de umidade de colheita de 10,65 e 14,10%, respectivamente. Esta diferença pode ser atribuída, em parte, à diferença no teor de umidade, pois, a Equação 2 foi proposta para produtos com teor de umidade médio de 20%. Os valores de potência na TDP, para acionamento da máquina trabalhando vazia, foram 8,21 e 13,09 kW, para as rotações do cilindro trilhador de 420 e 540 rpm, respectivamente. A potência na TDP média, obtida no limite de embuchamento da colhedora, atingiu um valor de 57,46 kW para uma taxa de alimentação de palhada de 1,955 kg/s.

Para estudar o comportamento da capacidade de colheita em função do número de linhas de feijão na leira, da velocidade de deslocamento e rotação do cilindro trilhador da máquina foram feitos cortes nos modelos de superfície de resposta ajustados, conforme apresentado nas Figuras 10 e 11.

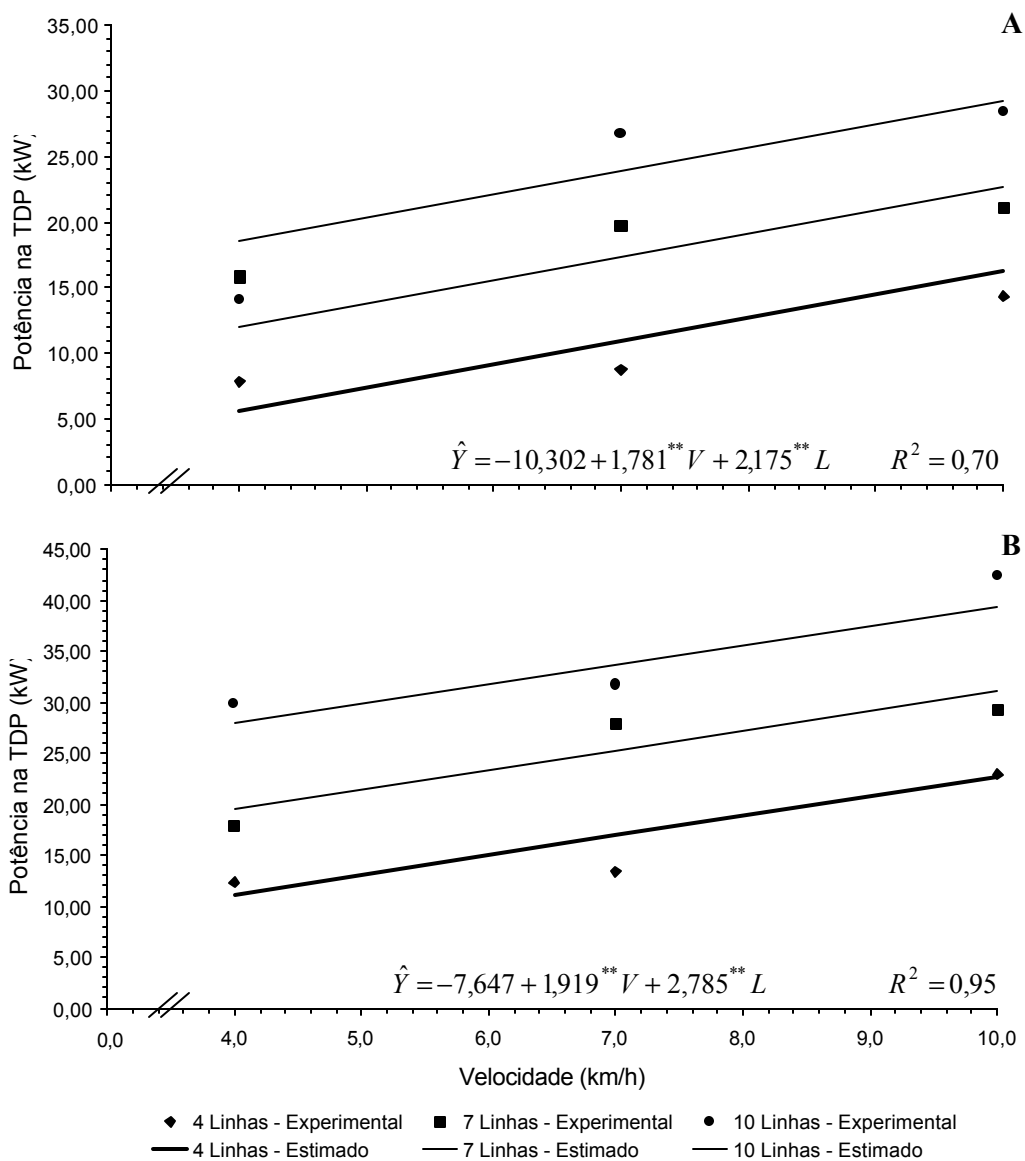
Os dados de capacidade de colheita em função da velocidade de deslocamento da máquina, do número de linhas na leira e da rotação do cilindro trilhador evidenciaram aumento linear de seus valores.

As leiras constituídas de 10 linhas apresentaram maiores valores de capacidade de colheita que as demais, acontecendo o mesmo para a velocidade de 10,0 km/h e rotação do cilindro trilhador de 540 rpm. Os melhores resultados da capacidade de colheita foram observados no experimento com teor de umidade de 14,10%, com maior valor de 6,56 t/h, enquanto no experimento com teor de umidade de 10,65%



\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t

Figura 7. Estimativa da potência na TDP em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas constituições de leiras, com rotações do cilindro trilhador de 420 (A) e 540 rpm (B) e teor de umidade médio de 10,65%



\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t

Figura 8. Estimativa da potência na TDP em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas constituições de leiras, com rotações do cilindro trilhador de 420 (A) e 540 rpm (B) e teor de umidade médio de 14,10%

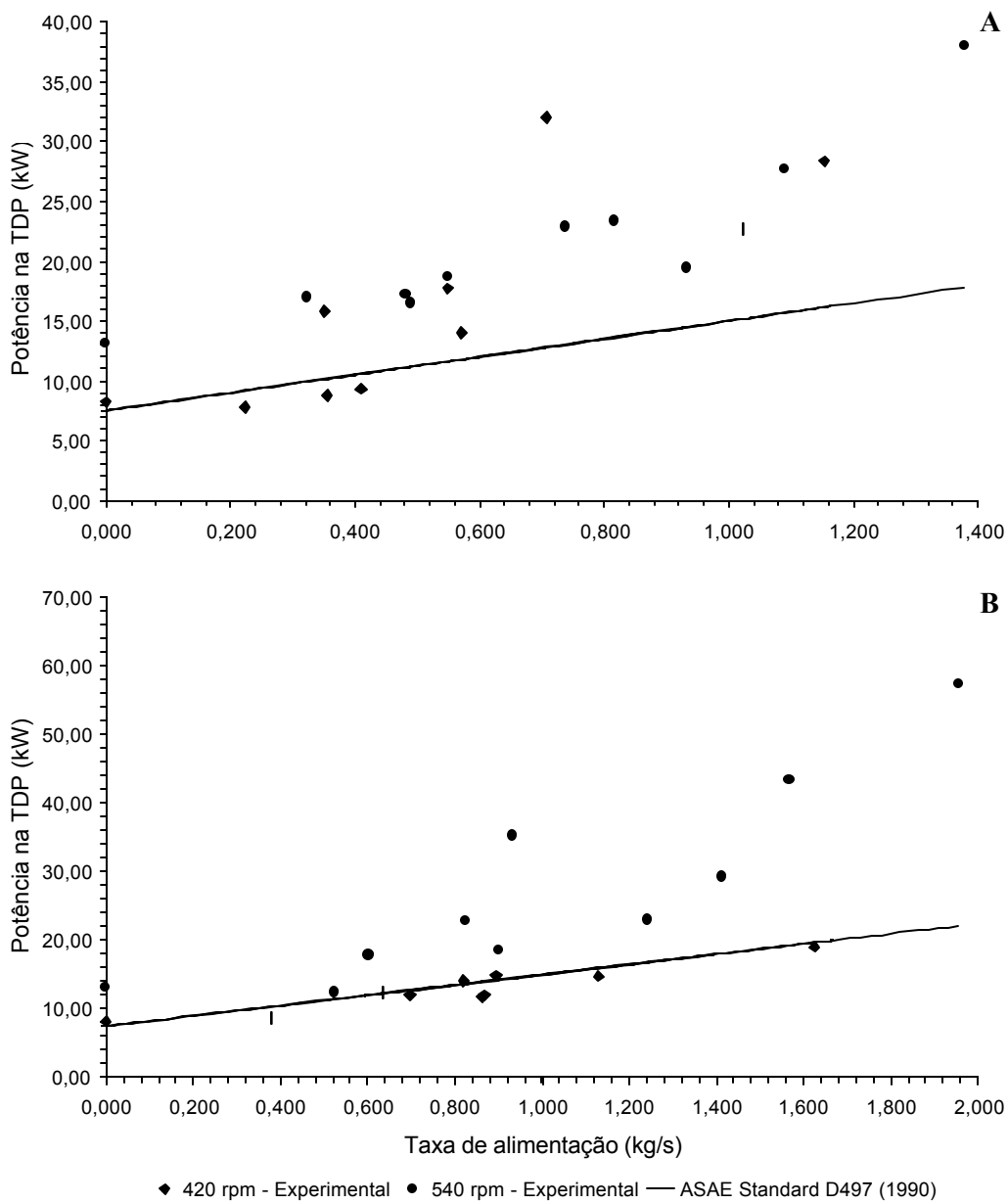


Figura 9. Estimativa da potência na TDP em função da taxa de alimentação da máquina, para as respectivas rotações do cilindro trilhador, com teor de umidade de colheita de 10,65 (A) e 14,10% (B)

observou-se maior valor de 6,02 t/h. A diferença entre estes valores está associada à variação de produtividade entre os experimentos com teor de umidade de 10,65 e 14,10% (Figuras 10 e 11).

A rotação do cilindro trilhador da máquina influenciou o aumento da capacidade de colheita, porque esta foi incrementada variando-se a rotação do motor do trator. Observou-se que, em campo e quando trabalhando em baixa rotação na TDP, ao aumentar a taxa de alimentação da máquina ocorria um ligeiro decréscimo na velocidade de deslocamento para compensar a maior exigência de torque do cilindro trilhador.

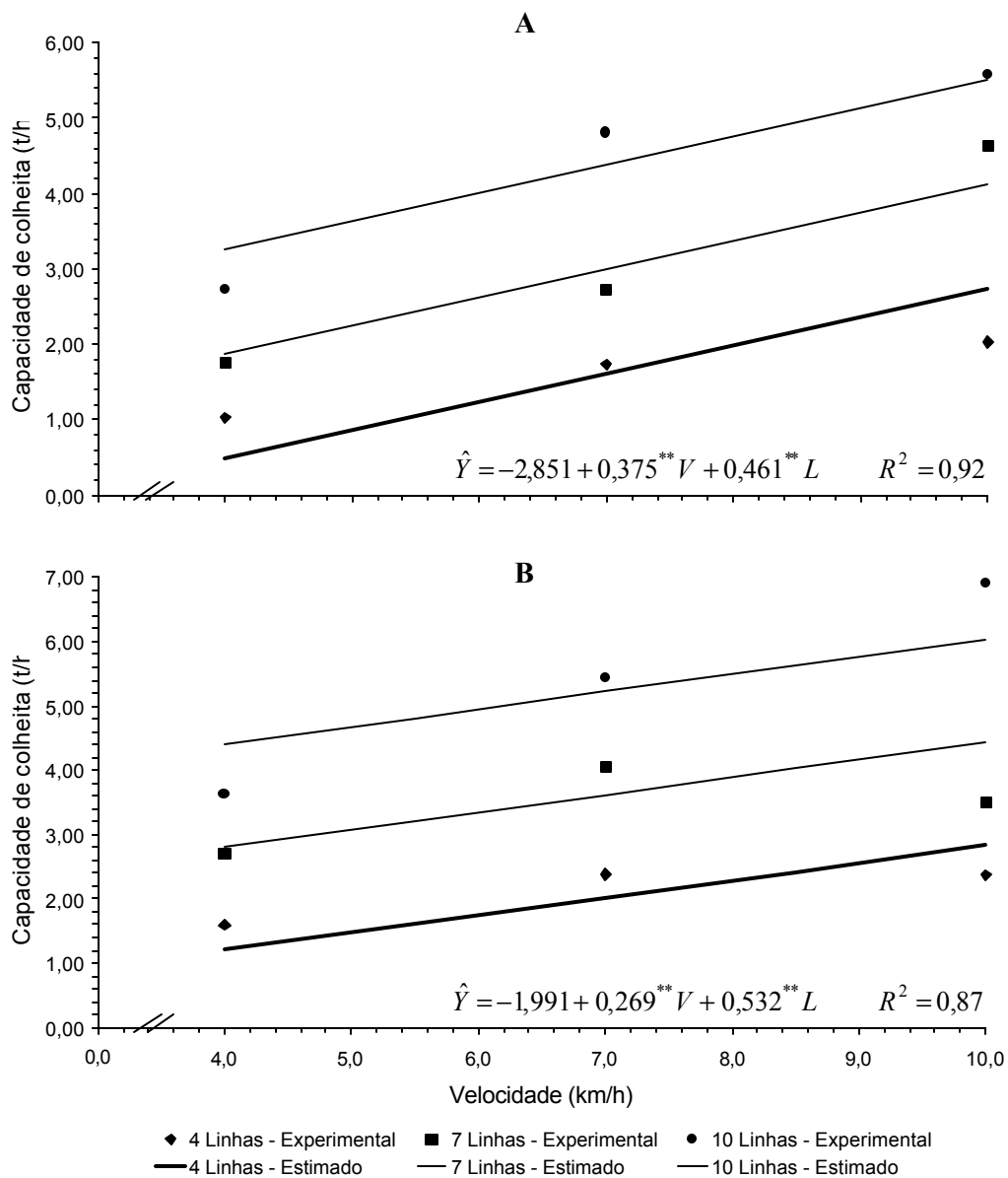
Segundo SKROMME (1977), as colhedoras com sistema de trilha em fluxo axial apresentam maior capacidade de colheita e reduzem os índices de danos mecânicos, em relação às colhedoras com sistema de trilha com fluxo radial.

Por meio dos dados de potência demandada na TDP e de capacidade de colheita, foi possível determinar o consumo específico de energia da máquina em operação.

Para estudar o comportamento do consumo específico de energia em função do número de linhas de feijão na leira, da velocidade de deslocamento e rotação do cilindro trilhador da máquina foram feitos cortes nos modelos de superfície de resposta ajustados, conforme apresentado nas Figuras 12 e 13.

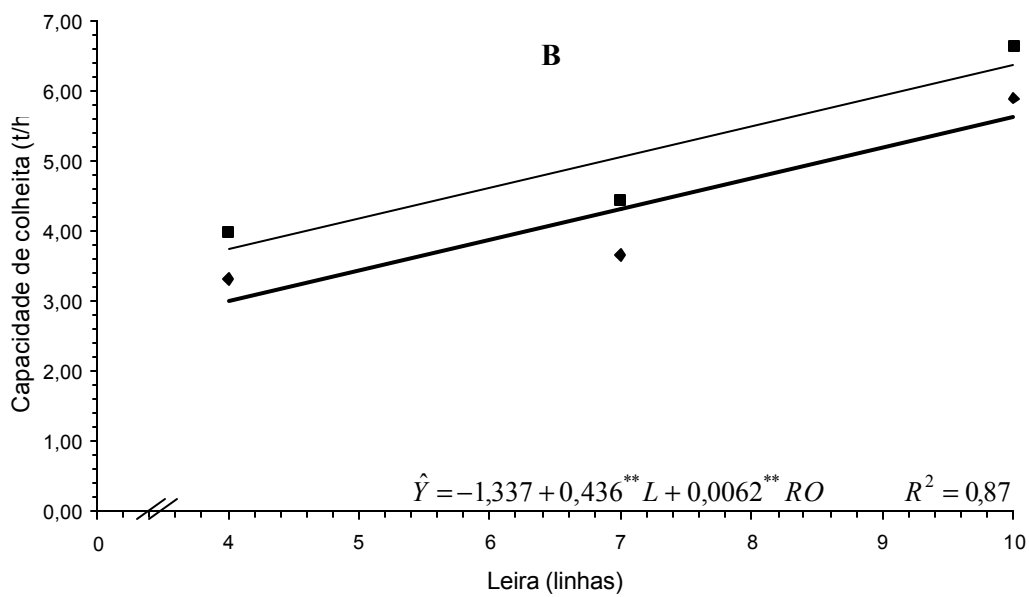
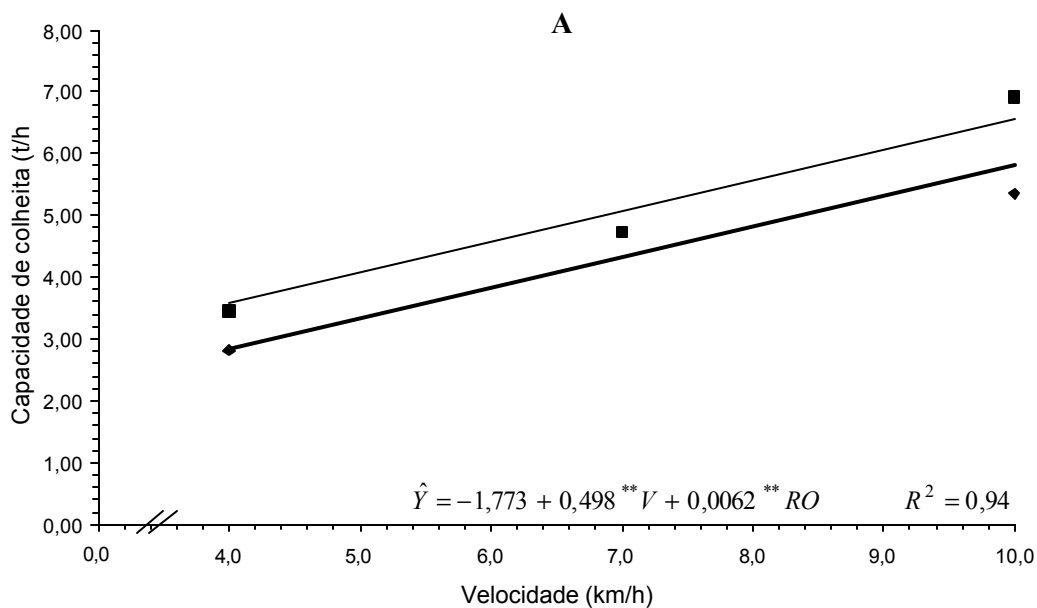
Analisando o comportamento do consumo específico de energia em função da velocidade de deslocamento da máquina e fixando o número de linhas na leira, pode-se verificar que os dados apresentaram resposta quadrática de seus valores, exceto para a rotação de 540 rpm e teor de umidade de 14,10%, que apresentou tendência linear com a velocidade de deslocamento da máquina. Os dados referentes às rotações evidenciaram comportamento crescente dos valores do consumo específico de energia. Resultados semelhantes foram observados por ARNOLD e LAKE (1964), que verificaram que o consumo de energia varia com o quadrado da taxa de alimentação.

Os menores valores de consumo específico de energia foram observados para o teor de umidade de 14,10%, com valores de 2,46 e 3,98 kWh/t para as rotações do cilindro trilhador de 420 e 540 rpm e velocidades de 7,9 e 10,0 km/h, respectivamente. No entanto, para o teor de umidade de 10,65% foram determinados, nas mesmas rotações, valores de 4,18 e 4,67 kWh/t para velocidades de 8,4 e 7,4 km/h, respectivamente.



\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t

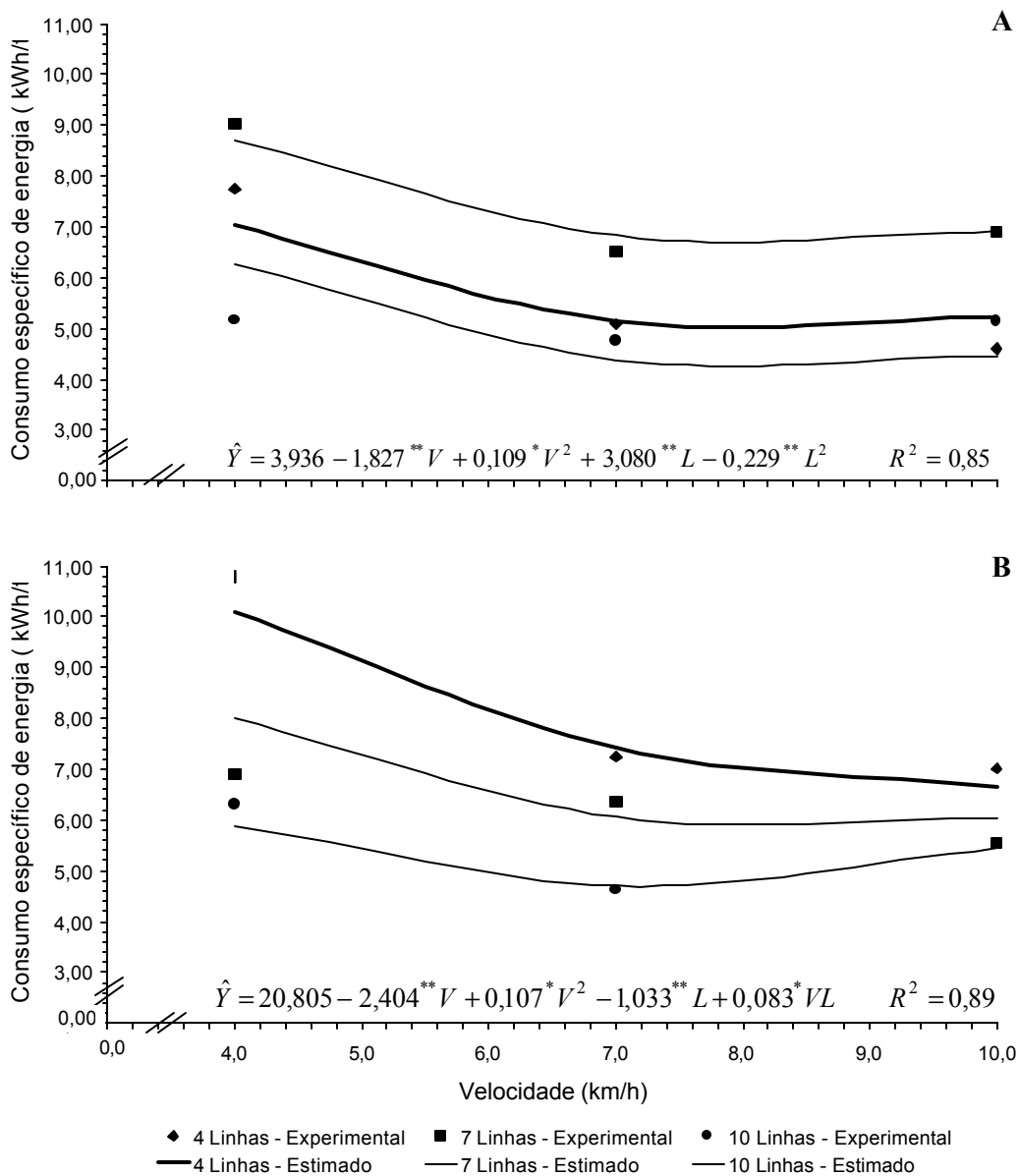
Figura 10. Estimativa da capacidade de colheita em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas constituições de leiras, com rotações do cilindro trilhador de 420 (A) e 540 rpm (B) e teor de umidade médio de 10,65%



◆ 420rpm - Experimental ■ 540rpm - Experimental — 420rpm - Estimado — 540rpm - Estimado

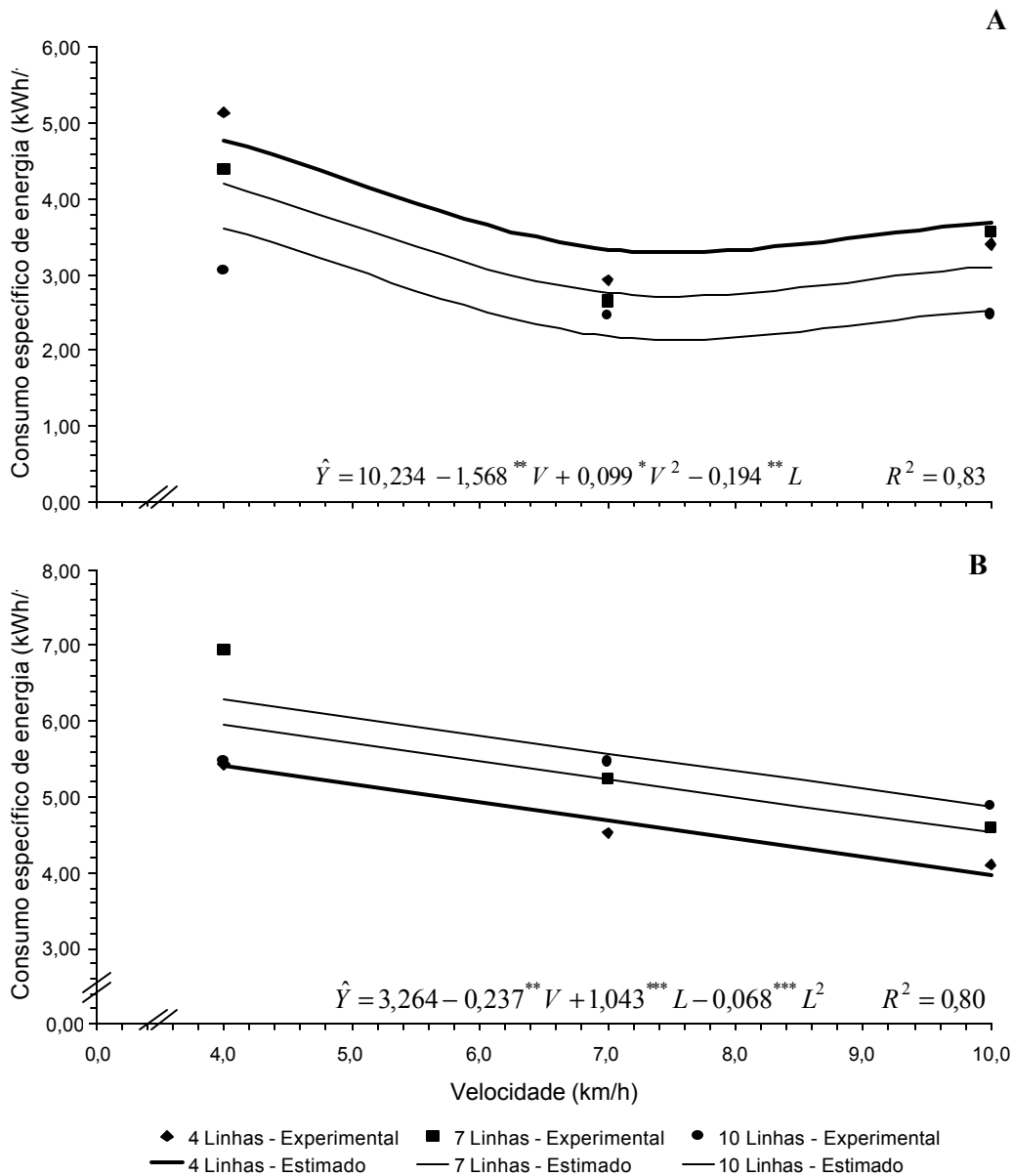
\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t

Figura 11. Estimativa da capacidade de colheita em função da velocidade de deslocamento da máquina (A) e constituição de leira (B), para as respectivas rotações do cilindro trilhador, com teor de umidade médio de 14,10%



\*\* e \* Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t

Figura 12. Estimativa do consumo específico de energia em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas constituições de leiras, com rotações do cilindro trilhador de 420 (A) e 540 rpm (B) e teor de umidade médio de 10,65%



\*\* , \* e \*\*\* Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t

Figura 13. Estimativa do consumo específico de energia em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas constituições de leiras, com rotações do cilindro trilhador de 420 (A) e 540 rpm (B) e teor de umidade médio de 14,10%

A rotação de 540 rpm apresentou maiores valores de consumo específico de energia, o que pode ser explicado pelo fato das perdas de potência são maiores quanto maior for a rotação do cilindro trilhador.

## **CONCLUSÕES**

1. A potência necessária para tracionar a máquina apresentou comportamento quadrático, em função do carregamento de grãos no tanque graneleiro da colhedora e do coeficiente de resistência ao rolamento. A maior potência exigida no motor do trator foi 7,90 kW, e ocorreu para a máquina totalmente carregada.

2. A potência de acionamento dos órgãos internos da colhedora apresentou aumento linear de seus valores, em função da taxa de alimentação. A rotação do cilindro trilhador evidenciou acréscimo na potência. O maior valor de potência exigida no motor do trator foi 45,28 kW.

3. A potência total exigida no motor do trator para trabalhar com a máquina alimentada com 4,31 kg/s de matéria bruta, rotação de 540 rpm no cilindro trilhador, teor de umidade médio do produto de 14,10% e com o tanque graneleiro totalmente cheio, foi 53,18 kW.

4. A capacidade de colheita aumentou, linearmente, com a taxa de alimentação e a rotação do cilindro trilhador. O maior valor de capacidade de colheita foi 6,56 t/h.

5. Em geral, o consumo específico de energia apresentou comportamento quadrático em função da taxa de alimentação. Com o aumento da rotação do cilindro trilhador, verificou-se um aumento no consumo específico de energia. Os menores valores de consumo específico de energia foram observados no teor de umidade de 14,10%, com valores de 2,46 e 3,98 kWh/t para as rotações do cilindro trilhador de 420 e 540 rpm, respectivamente. A velocidade média que proporcionou mínimo consumo específico de energia, em todo o trabalho, foi 8,43 km/h.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e às Indústrias Reunidas Colombo Ltda., pelo auxílio à pesquisa e suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE Standards EP496.2**. St. Joseph, Michigan, p.344-349, 2000.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE Standards D497**. St. Joseph, Michigan. p.285-291, 1990.
- ARNOLD, R. E.; LAKE, J. R. Experiments with rasp bar threshing drums. III Power requirement. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v.9, p.348-355. 1964.
- BJORK, A. **Power requirement for threshing and separation in a rotary combine**. St. Joseph, Michigan. ASAE, 1988. 14p. (Paper n. PNR 88-204)
- BURROUGH, D. E. Power requirements of combine drives. **Agricultural Engineering**. v.35, n.1, p.15-18, 1954.
- CONTO, A. J. de; VIEIRA, E. H. N.; OLIVEIRA, E. T. de; CASTRO, T. de A. P. e **Aspecto técnico e econômico da colheita mecânica e manual do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. EMBRAPA-CNPAP. Goiânia, GO. 1980. 18p. (Circular Técnica 02).
- DELAFOSSÉ, R. M. **Máquinas sembradoras de grano grueso**. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile. 1986. 48p.
- DODDS, M. E. Power requirements of a self-propelled combine. **Canadian Agricultural Engineering**. v.10, n.2, p.74-76, 90, 1968.
- KEPNER, R. A.; BAINER, R.; BARGER, E. L. **Principles of farm machinery**. Third Edition. Westport, Connecticut, AVI Publishing Company. p.392-431, 1982.
- KIM, S. H.; GREGORY, J. M. **Power requirement model for combine cylinders**. St. Joseph, Michigan. ASAE, 1989. 10p. (Paper n. 89-1592)
- MANTILLA, E. N.; RAMOS, J. N. Metodología de cálculo de órganos trilladores del tipo cilindro cóncavo. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**. La Habana, Cuba. v.7, n.2., p.75-79. 1998.
- RIPOLI, T. C. C. Ensaio e certificação de máquinas para colheita de cana-de-açúcar. In: MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas: ensaios e certificações**. Piracicaba, SP: FEALQ, p.636-674, 1996.
- ROTZ, C. A.; MUHTAR, H. A. Rotary power requirements for harvesting and handling equipment. **Applied Engineering in Agriculture**. v.8, n.6, p.751-757. Nov. 1992.
- SANTOS, M. L.; BRAGA, M. J. Aspectos econômicos. In: VIEIRA, C.; DE PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão – Aspectos gerais e cultura no estado de Minas Gerais**. Viçosa, MG: Editora UFV, 1998, p.19-53.

SILVA, J. S.; QUEIROZ, D. M. Colheita, trilha, secagem e armazenagem. In: VIEIRA, C.; DE PAULA JÚNIOR, T. J.; BOREM, A. **Feijão – Aspectos gerais e cultura no estado de Minas Gerais**, Editora UFV, p.559-585, 1998.

SKROMME, L. H. Progress report on twin rotor combine concept of rotary threshing and separation. In: INTERNATIONAL GRAIN AND FORAGE HARVESTING CONFERENCE, 1, 1977, St. Joseph. **Proceeding...** St. Joseph: ASAE, 1977. p.188-191 e 195.

SMITH, J. A. Dry Edible bean field harvesting losses. **Transactions of the ASAE**, v.29, n.6, Nov-Dec. p.1540-1543, 1986.

# **AVALIAÇÃO DE PERDAS EM UMA COLHEDORA DE FLUXO AXIAL PARA FEIJÃO**

## **RESUMO**

A mecanização do processo de colheita do feijão é complexa, uma vez que geralmente a cultura é arrancada manualmente, sendo deixada no campo para posterior recolhimento, trilha e separação dos grãos da palhada. Na avaliação de máquinas de colheita, é importante a determinação da capacidade de processamento e das perdas ocorridas no processo. Diante disso, este trabalho teve por objetivo avaliar as perdas e a capacidade de colheita de uma colhedora de arrasto de fluxo axial na colheita de feijão. Testes de campo foram realizados sob diferentes condições de trabalho. A partir dos dados obtidos, pode-se concluir que a maior perda ocorreu na plataforma de recolhimento, representando 49,30% da perda total da colhedora, enquanto as perdas no sistema de trilha e separação e de limpeza foram 43,61 e 7,09%, respectivamente. A capacidade de colheita máxima atingida pela máquina foi 6,56 t/h.

**Palavras-chave:** feijão, colheita, perdas

## **EVALUATION OF THE QUANTITATIVE LOSSES OF A HARVESTER OF BEAN OF AXIAL FLOW**

### **ABSTRACT**

The bean harvesting mechanization is difficult to be done. Generally, the plants are dug by hand, kept in the field for drying and then the harvester picks and threshes the plants then separates and cleans the grains. The performance evaluation of a harvester should include the energy needed for its operation, the harvesting capacity and the quantitative loss in the process. The objective of this work was to evaluate the performance of a bean harvester. Field tests were done in different operational conditions. Based on the collected data it was concluded that the harvester header causes the greatest quantitative loss, it contributes for 49.30% of the total loss. In the separation and cleaning systems the losses were 43.61 and 7.09%, respectively. The maximum harvesting capacity of the machine was 6.56 t/h of grains.

**Key words:** bean, harvesting, losses

## INTRODUÇÃO

Atualmente, com uma produção de 2915 mil toneladas na safra 1999 e um consumo per capita de 18,3 kg/ano (BRASIL, 2000), o Brasil é o maior produtor e o maior consumidor mundial de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.).

Além de seu valor nutricional, o feijão é um dos produtos de maior importância sócio-econômica, uma vez que abrange grandes áreas de cultivo e grande quantidade de mão-de-obra (BORÉM e CARNEIRO, 1998). De acordo com SANTOS e BRAGA (1998), desde a última década, o feijão deixou de ser uma cultura de subsistência para tornar-se uma cultura tecnificada, resultando em maior produtividade e produto final de melhor qualidade.

Assim, a cultura do feijão tem gerado uma crescente necessidade de mecanização de todo seu processo produtivo. Dentre as etapas do ciclo operacional de uma cultura, a colheita normalmente destaca-se em razão das dificuldades e altos custos envolvidos, seja ela realizada de forma manual ou mecanizada. Na cultura do feijão, essas dificuldades são ainda maiores, pois, devido suas características botânicas, há mais facilidade de deiscência das vagens, ocasionada pelo estado e condições da cultura e na manipulação realizada pela máquina, além de ser uma cultura com tendência a acamar, dificultando sua colheita por máquinas convencionais para colheita de grãos.

A colheita do feijão pode ser feita manualmente, mecanicamente ou por uma combinação de ambas (SILVA e QUEIROZ, 1998). A colheita, utilizando a combinação manual e mecânica, é realizada com pelo menos três operações de campo, em um período de 2 a 12 dias, pois, consiste em arrancar as plantas inteiras, quando estas encontram-se quase despidas de folhas e os grãos com baixo teor de umidade. Com as plantas arrancadas, são formadas leiras que permanecem na lavoura para completar o processo de secagem e homogeneização natural (CONTO et al., 1980), e, por fim, uma operação na qual uma máquina colhedora de grãos, convencional ou específica para feijão, recolhe o produto e separa os grãos do resto da planta (SMITH, 1986).

As vantagens apresentadas pela colheita mecânica são bem claras, isto é, redução do tempo de execução da colheita e conforto ao indivíduo envolvido. Entretanto, algumas peculiaridades relacionadas às interações máquina-planta durante este processo, têm provocado elevada perda de produto.

Com o intuito de se mecanizar todas as etapas da colheita de feijão, MOREIRA (1999) desenvolveu um protótipo de uma máquina para arranquio e enleiramento do feijão, adaptável às condições irregulares dos solos, tendo como ferramenta de corte dois discos recortados. O protótipo proporcionou 1,64% de plantas não-

cortadas/arrancadas. SILVA et al. (1994), nos anos de 1989 a 1991, realizaram testes durante a colheita mecânica do feijão, em diferentes regiões brasileiras, utilizando a colhedora autopropelida com plataforma segadora flexível, e concluíram que a perda de grãos ocorrida na plataforma segadora variou de 3,93 a 61,19%. NAVE et al. (1972) e DUNN et al. (1973), em estudos de campo, observaram as perdas ocasionadas pela plataforma segadora, concluindo que a barra de corte foi responsável por 80% das perdas. Portanto, foi ressaltada a necessidade de continuar o estudo, visando reduzir as perdas por meio de melhoria do sistema de recolhimento.

SMITH (1986) estudou as perdas ocorridas em cada etapa do processo de colheita mecânica do feijão, mostrando que elas variaram de 1 a 13%, com média de 3,7%, sendo que 20% das perdas ocorreram no corte (arranquio) feito com ceifador, 20% no enleiramento e 60% nas etapas de recolhimento, trilha e separação. MESQUITA et al. (1998) estudando as perdas durante o processo de colheita de soja, num período de 20 anos, mostraram que é possível diminuí-las significativamente, pois, ocorreram reduções de 69% no Paraná e 37% nos demais estados produtores. As perdas evitadas corresponderam a 3,6 milhões de toneladas de grãos, no Paraná, e 6,2 milhões de toneladas nos demais estados.

Há possibilidade de colheita mecanizada do feijão com perdas abaixo de 10%, desde que sejam associadas algumas condições como: cultivares e colhedoras com acessórios apropriados; solos bem nivelados; sistemas de manejo que proporcionem bom desenvolvimento das plantas sem acamá-las, e uso de máquinas com levantadores, quando as plantas estão muito deitadas (SILVA et al., 1994).

Verifica-se, portanto, que no nível tecnológico atual existe ainda um bom potencial de ganho com a utilização de mecanismos dimensionados adequadamente com melhores recursos de síntese, análise e otimização. Este potencial deve ser concentrado na área de colheita de grãos com maiores perdas, como soja e feijão (CONTRERAS, 1997). PORTELLA (1997) sugere, como meios para reduzir as perdas, o desenvolvimento de metodologias para regulação de colhedoras, assim como o uso de novos mecanismos que potencializem o desempenho da máquina.

Em virtude da importância da cultura do feijão para o País e a necessidade de se conhecer o desempenho das máquinas destinadas à colheita deste produto, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar os efeitos da taxa de alimentação, da rotação do cilindro trilhador e do teor de umidade sobre as perdas em diferentes sistemas de uma colhedora de arrasto e de fluxo axial.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no Campo Experimental e no Laboratório de Automação Agropecuária da EMBRAPA Milho e Sorgo e no Laboratório de Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, com a colaboração das empresas MIAC, COTRAME e AEMCO das Indústrias Reunidas Colombo Ltda.

Nos ensaios, foi utilizado o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar Carioca, sendo a máquina avaliada uma colhedora de arrasto modelo “Double Master” (Figura 1), com sistema de trilha em fluxo axial. A máquina foi tracionada e acionada por um trator Massey-Ferguson, Modelo MF 620, com potência nominal de 82 kW.

As variáveis investigadas nos ensaios foram a taxa de alimentação da máquina, obtida pela variação do número de linhas de feijão na leira e da velocidade de trabalho da máquina, e a rotação do cilindro trilhador, trabalhando-se com 420 e 540 rpm. A abertura entre cilindro e côncavo foi 20 mm. Foi montado um experimento em esquema fatorial 3x3x2, com três constituições de leira, três velocidades de deslocamento e duas rotações do cilindro trilhador, instalado segundo o delineamento inteiramente casualizado, com duas repetições. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e de metodologia de superfície de resposta. Os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste t a 10% e o coeficiente de determinação. A análise estatística dos dados foi realizada, utilizando-se o programa computacional SAEG, versão 8.



Figura 1. Colhedora modelo “Double Master”

Em cada teste, foram determinadas a velocidade de deslocamento da máquina, a massa de grãos colhidos e o tempo necessário para colhê-la, o teor de umidade dos grãos e a massa de grãos perdida.

Nas avaliações, foram consideradas duas faixas de teores de umidade de colheita, sendo uma de  $10,65 \pm 0,25$  e a outra de  $14,10 \pm 0,81\%$  base úmida, denominadas Experimento 1 e Experimento 2, respectivamente. Os testes foram realizados em dois pivôs centrais com 6 anos de sistema de cultivo em plantio direto. O Experimento 1 foi conduzido em um pivô e o Experimento 2 em um outro pivô, buscando-se minimizar o desvio dos dados de teor de umidade de colheita.

Antes de iniciar a colheita com a máquina, foram realizadas medições em diferentes locais da área a fim de determinar a perda natural, totalizando-se 10 amostras por leira. Uma armação de  $2,0 \text{ m}^2$  foi colocada no sentido transversal ao plantio das linhas, conforme metodologia da EMBRAPA Arroz e Feijão. Os grãos soltos e aqueles contidos nas vagens encontradas no chão dentro da armação foram pesados. A perda natural foi obtida do quociente da massa de grãos perdidos pela área da armação, como se segue.

$$P_n = 10 \cdot \frac{m_n}{A} \quad (1)$$

em que,

$P_n$  - perda natural, kg/ha;

$m_n$  - massa de grãos perdidos naturalmente, na área da armação, g;

$A$  - área da armação,  $\text{m}^2$ .

As plantas foram arrancadas, quando suas folhas iam ficando amareladas e as vagens mais velhas começavam a secar, conforme SILVA e BEVITORI (1994). Depois, foram determinadas as perdas devidas ao arranquio e enleiramento do feijão. As medições foram feitas em diferentes locais da área, totalizando 10 amostras por leira. A armação de  $2,0 \text{ m}^2$  foi colocada no sentido transversal ao plantio das linhas. Os grãos soltos e os encontrados nas vagens dentro da armação foram pesados. O valor da perda no arranquio e enleiramento foi obtido da mesma forma que para a perda natural, descontando-se os valores desta, conforme apresentado a seguir.

$$P_a = 10 \cdot \frac{m_a}{A} - P_n \quad (2)$$

em que,

$P_a$  - perda no arranquio e enleiramento, kg/ha;

$m_a$  - massa de grãos perdidos após o arranquio e enleiramento, na área da armação, g.

Ao final de cada teste com a colhedora, foram determinadas as perdas na plataforma de recolhimento, no sistema de trilha e separação e de limpeza da máquina.

Após a colheita do equivalente a 100 metros linear de leira, a operação da máquina foi interrompida e as perdas na plataforma de recolhimento foram avaliadas. Deu-se marcha-a-ré na colhedora, a uma distância igual à metade de seu comprimento. A armação de 2,0 m<sup>2</sup> foi disposta na parte colhida em frente à colhedora, sendo coletados todos os grãos ali presentes, soltos ou nas vagens. A perda na plataforma de recolhimento foi obtida, subtraindo-se do total a perda natural e no arranquio e enleiramento, como mostra a seguinte expressão:

$$P_r = 10 \cdot \frac{m_r}{A} - P_n - P_a \quad (3)$$

em que,

$P_r$  - perda na plataforma de recolhimento, kg/ha;

$m_r$  - massa de grãos perdidos em baixo da plataforma de recolhimento, na área da armação, g.

Na determinação da perda no sistema de separação, a armação de 2,0 m<sup>2</sup> foi colocada lateralmente à colhedora, uma vez que a descarga de material desse sistema é feita no lado esquerdo da máquina. As perdas no sistema de separação foram calculadas, subtraindo-se destas a perda natural e a perda no arranquio e enleiramento.

$$P_s = 10 \cdot \frac{m_s}{A} - P_n - P_a \quad (4)$$

em que,

$P_s$  - perda no sistema de separação, kg/ha;

$m_s$  - massa de grãos perdidos na lateral da máquina colhedora, na área da armação, g.

Para determinar os grãos perdidos no sistema de limpeza, a armação foi disposta atrás da colhedora. As perdas ocorridas neste sistema foram calculadas, subtraindo-se destas a perda natural, no arranquio e enleiramento e no recolhimento.

$$P_l = 10 \cdot \frac{m_l}{A} - P_n - P_a - P_r \quad (5)$$

em que,

$P_l$  - perda no sistema de limpeza, kg/ha;

$m_l$  - massa de grãos perdidos após a passagem da máquina colhedora, na área da armação, g.

Finalmente, foi determinada a perda total da colhedora. Esta foi obtida, somando-se as perdas na plataforma de recolhimento com as perdas do sistema de separação e as perdas do sistema de limpeza, como apresentado na Equação 6.

$$P_t = P_r + P_s + P_l \quad (6)$$

em que,

$P_t$  - perda total da colhedora, kg/ha.

Em todos os testes de campo, o teor de umidade dos grãos perdidos pela máquina foi considerado igual ao teor de umidade dos grãos contidos no tanque graneleiro da colhedora.

Para determinar a capacidade de colheita, a máquina foi colocada para colher numa distância conhecida, sendo cronometrado o tempo gasto pela máquina nesse percurso e em seguida pesou-se o produto colhido. A capacidade de colheita foi obtida da relação entre a massa de grãos colhidos e o tempo gasto no percurso, conforme observado na Equação 7. Para garantir que um teste não influenciasse o próximo, a máquina foi totalmente limpa de grãos e palhada ao final de cada teste.

$$C_c = 3,6 \cdot \frac{m_g}{t} \quad (7)$$

em que,

$C_c$  - capacidade de colheita, t/h;

$m_g$  - massa de grãos colhidos, kg;

$t$  - tempo gasto para colher  $m_g$ , s.

Todo valor de massa de grãos colhida ou perdida foi corrigido para o teor de umidade final do feijão de 11%.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em trabalho de colheita de culturas com tendência a fácil deiscência das vagens, como é o caso do feijão, tem-se observado grande perda de produto no ato do corte e do recolhimento das plantas no campo.

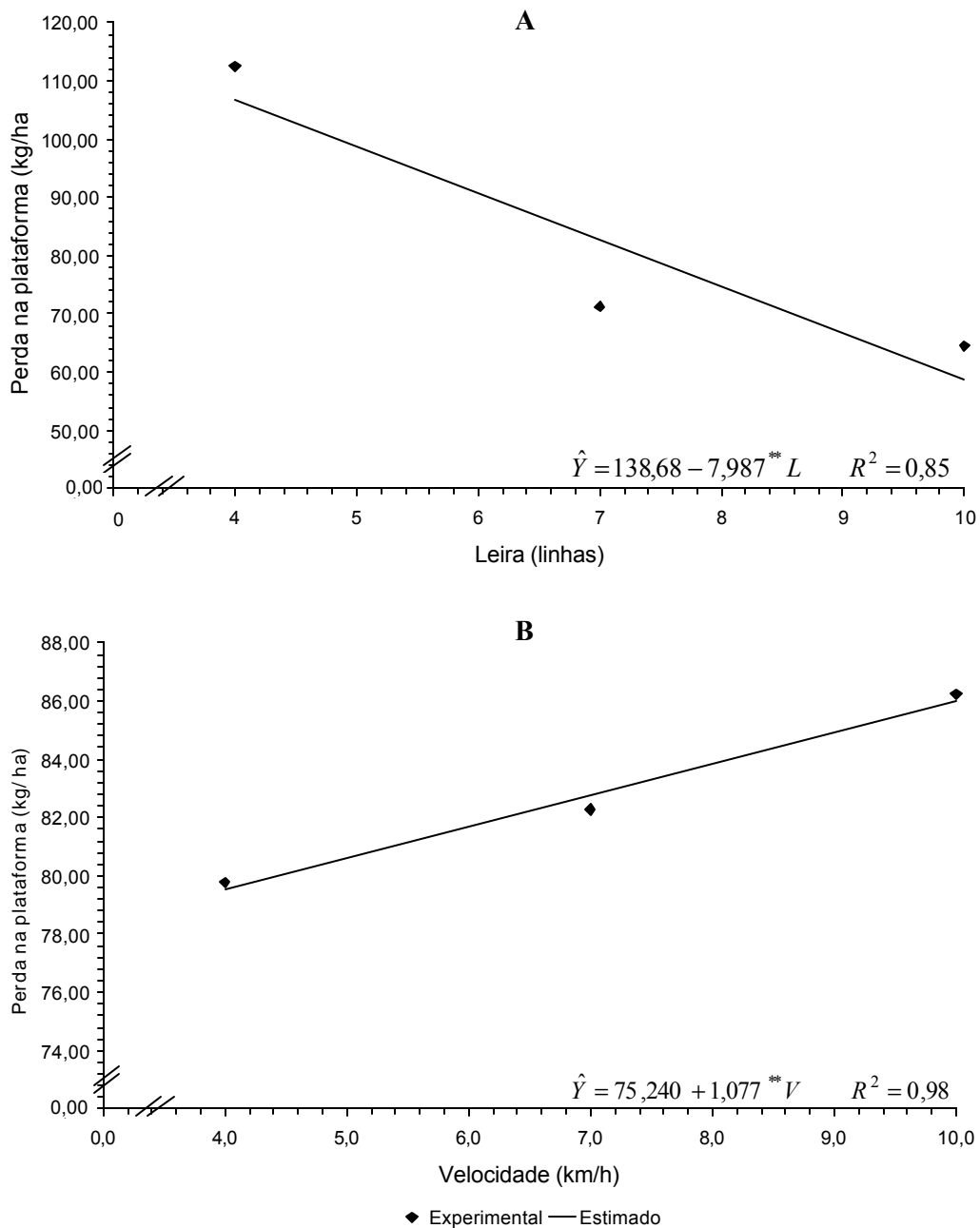
A perda natural e aquelas ocorrendo no arranquio e enleiramento manual somadas não foram significativas, pois, não ultrapassaram 0,1%, razão pela qual elas foram desprezadas.

Para estudar o comportamento da perda na plataforma de recolhimento da colhedora em função do número de linhas de feijão na leira, da velocidade de deslocamento e rotação do cilindro trilhador da máquina, foram feitos cortes nos modelos de superfície de resposta ajustados, conforme apresentado nas Figuras 2, 3 e 4.

Analisando os dados obtidos, verifica-se que a perda na plataforma decresce com o aumento do número de linhas na leira, mas cresce na medida em que há um aumento na velocidade de deslocamento e na rotação do cilindro trilhador da máquina. No experimento com teor de umidade de 10,65%, apesar da rotação não ser significativa, observou-se o mesmo comportamento de perda na plataforma que no experimento com 14,10% de teor de umidade. O mesmo aconteceu para o número de linhas na leira, para o teor de umidade de 14,10%. As leiras constituídas de 10 linhas e a velocidade de deslocamento de 4,0 km/h constituem as condições de trabalho que levaram aos menores valores de perda na plataforma.

O acréscimo de perda na plataforma, resultante do incremento na velocidade de deslocamento da máquina, pode ser explicado pelo fato da rotação do recolhedor ser função direta da rotação do cilindro trilhador, e não função do deslocamento da máquina. Isso fez com que o recolhedor empurrasse a leira para a frente, formando um amontoado que, quando recolhido o material, era pressionado pela esteira elevadora contra a base da plataforma, provocando, então, a deiscência das vagens mais secas. As leiras com maior número de linhas pressionadas pelo elevador da plataforma produziram uma massa mais densa de material, comportando-se como verdadeiras “vassouras”, carreando partes dos grãos debulhados no recolhedor ao sistema de trilha e dificultando a passagem dos mesmos através da palhada.

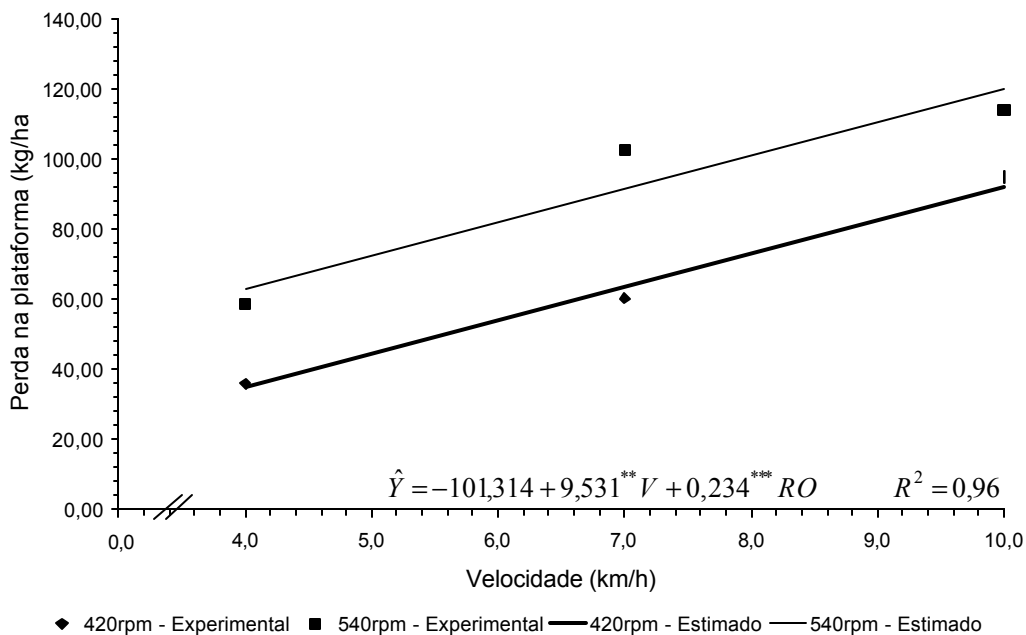
Os menores valores de perdas na plataforma de recolhimento foram observados no experimento com teor de umidade de 14,10%, pois, quanto maior é o teor de umidade, menor é a facilidade de deiscência das vagens. O menor valor de perda foi 35,09 kg/ha, obtido para a velocidade de 4 km/h e rotação do cilindro trilhador de 420 rpm. A produtividade é outro fator que contribuiu para a diferença entre os experimentos, pois, ela tem influência direta na taxa de alimentação da máquina. No experimento com teor de umidade de 10,65%, observou-se uma produtividade média de 2238,20 kg/ha, enquanto no experimento com teor de umidade de 14,10% a produtividade foi 2532,35 kg/ha.



\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t

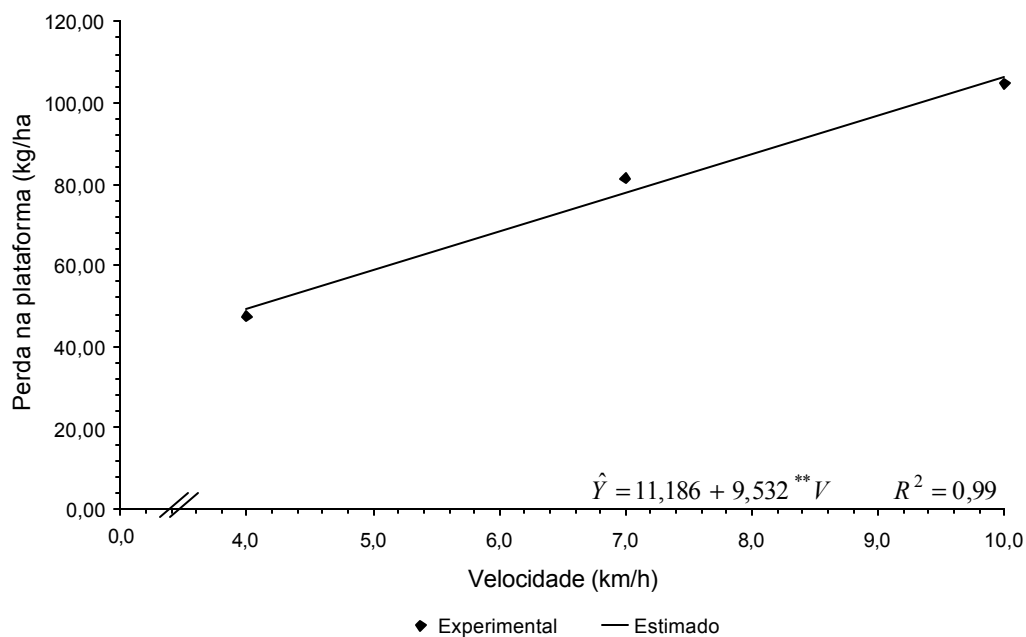
Figura 2. Estimativa da perda na plataforma de recolhimento em função do número de linhas de feijão na leira (A), para a rotação do cilindro trilhador de 420 rpm, e da

velocidade de deslocamento da máquina (B), para a rotação do cilindro trilhador de 540 rpm, com teor de umidade de 10,65%



\*\* e \*\*\* Significativo a 1 e 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t

Figura 3. Estimativa da perda na plataforma de recolhimento em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas rotações do cilindro trilhador, com teor de umidade de 14,10%



\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t

Figura 4. Estimativa da perda na plataforma de recolhimento em função da velocidade de deslocamento da máquina, com teor de umidade de 14,10%

O sistema de trilha e separação, comum nas máquinas com alimentação em fluxo axial, é o responsável por grande parte das perdas ocasionadas durante a colheita mecânica, em virtude de ser muito influenciado pela taxa de alimentação do sistema, pelo teor de umidade de colheita, pela abertura entre cilindro e côncavo e pela energia transmitida pelo cilindro trilhador.

Para estudar o desempenho do sistema de trilha e separação da colhedora, em função do número de linhas de feijão na leira, da velocidade de deslocamento e rotação do cilindro trilhador da máquina, foram feitos cortes nos modelos de superfície de resposta ajustados, conforme apresentado nas Figuras 5 e 6.

Analisando os resultados de perda no sistema de separação, obtidos no experimento com teor de umidade de 10,65%, verifica-se que a perda decresce com o aumento na velocidade de deslocamento da máquina para um mesmo número de linhas na leira. Para o experimento com teor de umidade 14,10%, a perda cresceu com o aumento na velocidade. Para os testes executados com rotação de 540 rpm e teor de umidade de 14,10% verifica-se que a perda decresce com o aumento do número de linhas na leira (Figuras 5 e 6). Os menores resultados de perda no sistema de separação foram observados no experimento com teor de umidade de 10,65%, obtendo-se valores de 2,48 e 17,74 kg/ha para as rotações de 420 e 540 rpm, respectivamente.

De acordo com os resultados, observa-se que, em geral, o experimento com teor de umidade de 10,65% apresentou menores valores de perda do que aquele com teor de umidade de 14,10%, uma vez que, quanto menor o teor de umidade de colheita maior é facilidade de debulha das vagens. Resultados semelhantes foram obtidos por SINGH e SINGH (1981) e BOLLER et al. (1998). Outro ponto que pode ter influenciado os valores de perda no sistema de trilha e separação é a diferença de produtividade entre os experimentos.

Analisando os dados médios de perda no sistema de trilha e separação, verifica-se que a rotação de 540 rpm apresentou menores valores de perda do que a de 420 rpm, o que é atribuído à maior energia transmitida pela rotação de 540 rpm às vagens, promovendo, assim, melhor separação dos grãos das mesmas.

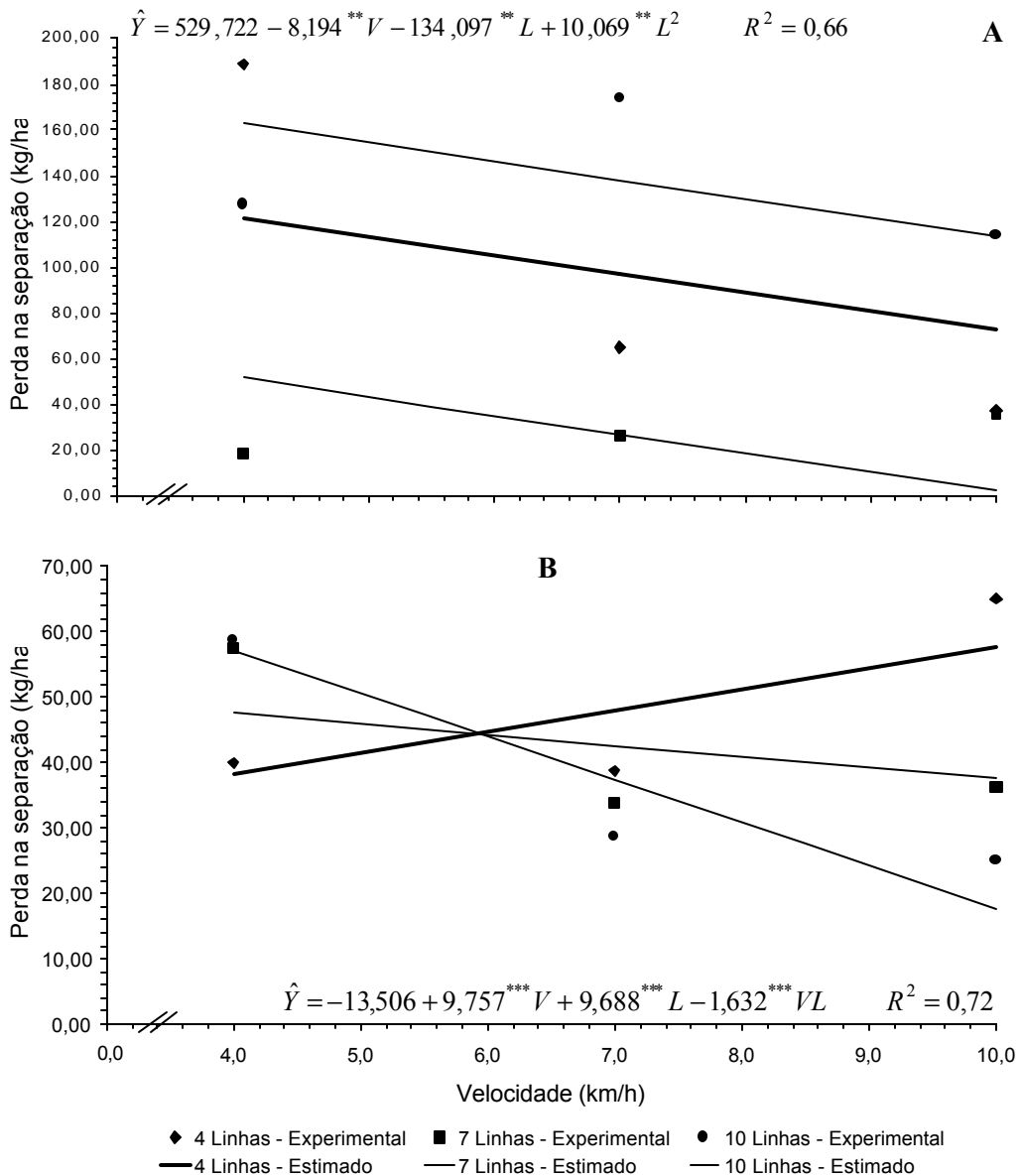
Para estudar o desempenho do sistema de limpeza da colhedora, em função do número de linhas de feijão na leira, da velocidade de deslocamento e rotação do cilindro trilhador da máquina foram feitos cortes nos modelos de superfície de resposta ajustados, conforme apresenta do nas Figuras 7 e 8.

Os dados de perda no sistema de limpeza, em função da velocidade de deslocamento da máquina e do número de linhas de feijão na leira, apresentaram

comportamento quadrático de seus valores (Figura 7 e 8). O experimento com teor de umidade de 10,65%, com rotação do cilindro trilhador de 420 rpm, apresentou menor valor de perda no sistema de limpeza para a leira de 10 linhas, isto é, 7,65 kg/ha. Para a rotação de 540 rpm, a leira de 8 linhas apresentou a menor perda, com valor de 6,43 kg/ha, não havendo influência da velocidade da máquina nesse experimento. No experimento com teor de umidade de 14,10%, na rotação de 420 rpm, a velocidade de 10 km/h forneceu a menor perda, isto é, 6,46 kg/ha, sendo este considerado o melhor resultado porque, nesta velocidade, os valores de capacidade de colheita foram consideravelmente maiores; na rotação de 540 rpm, a velocidade de 8,36 km/h e a leira de 4 linhas apresentaram menor valor de perda, isto é, 4,87 kg/ha.

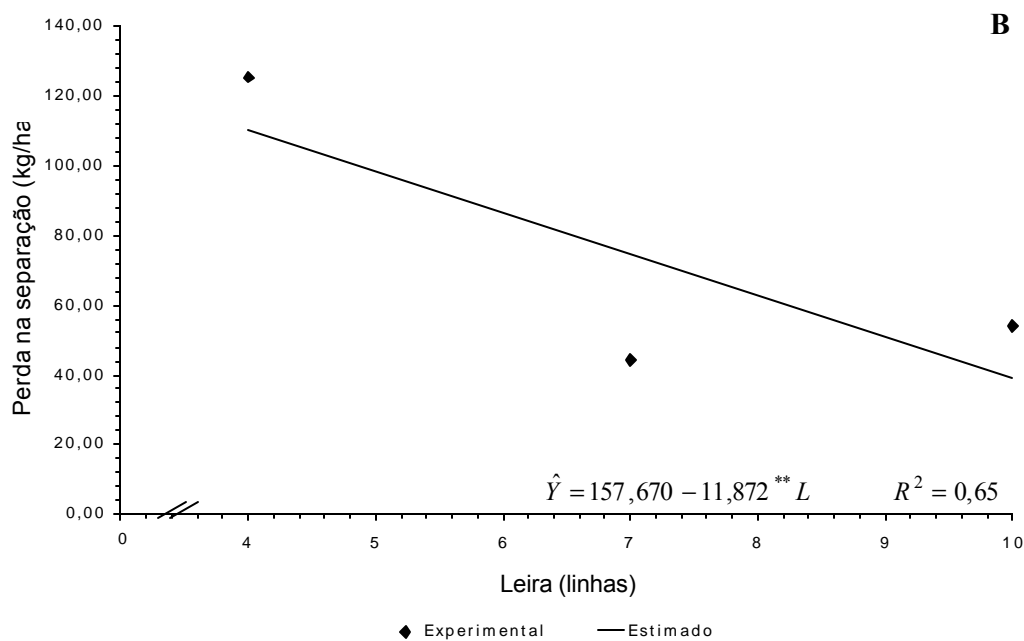
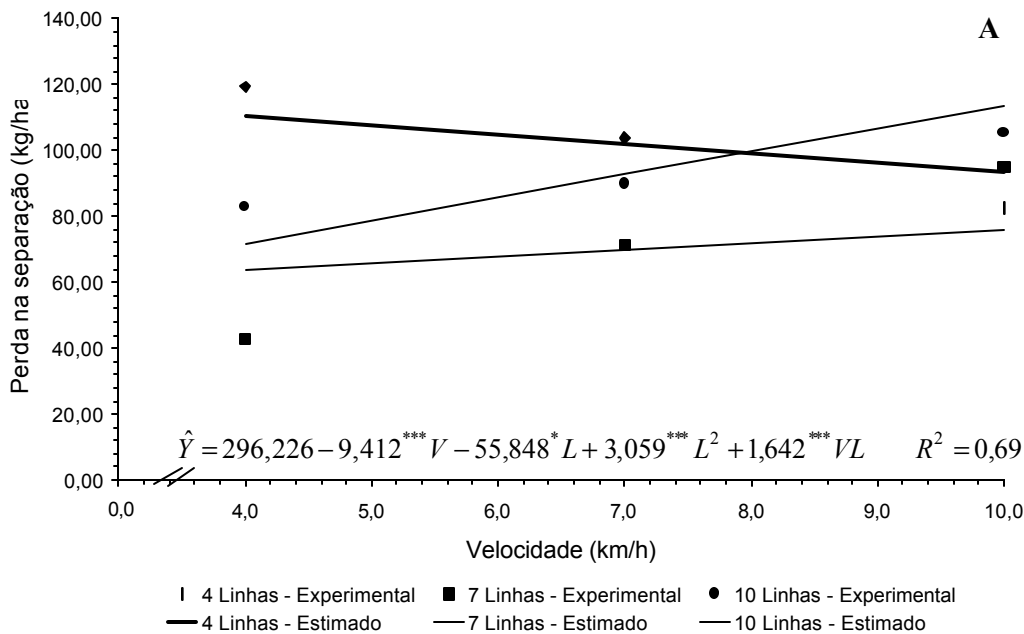
A rotação de 420 rpm apresentou, em geral, menores valores de perda no sistema de limpeza que a rotação de 540 rpm. Da mesma forma, verificou-se diferença de 0,44 kg/ha (4,31%) entre as perdas ocorridas nos dois experimentos, não havendo efeito do teor de umidade sobre a perda no sistema de limpeza. Resultados semelhantes foram obtidos por BOLLER et al. (1998).

O comportamento da perda na limpeza pode ser explicado pelo fato da rotação do ventilador ser função direta da rotação do cilindro trilhador da colhedora, e não função da quantidade de material processado pela máquina. No processo de limpeza, a perda é muito influenciada pelo fluxo de ar do ventilador, pois, uma menor quantidade de material passando pelo sistema de limpeza faz com que o ventilador forneça maior vazão de ar visto que a resistência à passagem do ar torna-se menor. Por outro lado, quanto maior for a taxa de alimentação da máquina maior deve ser o fluxo de ar, sem que este ultrapasse a velocidade terminal dos grãos.



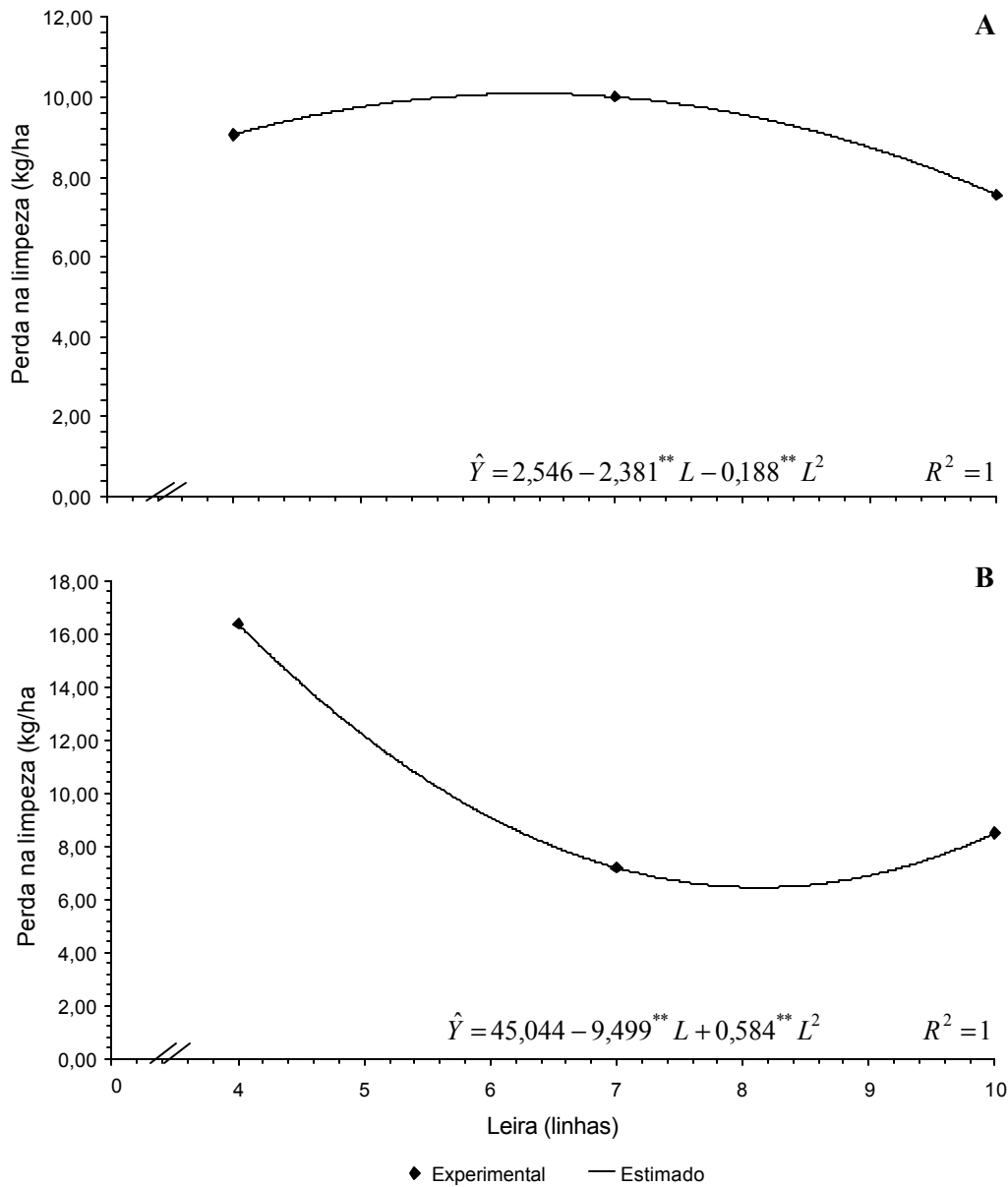
\*\* e \*\*\* Significativo a 1 e 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t

Figura 5. Estimativa da perda no sistema de trilha e separação em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas constituições de leiras, com rotações do cilindro trilhador de 420 (A) e 540 rpm (B) e teor de umidade médio de 10,65%



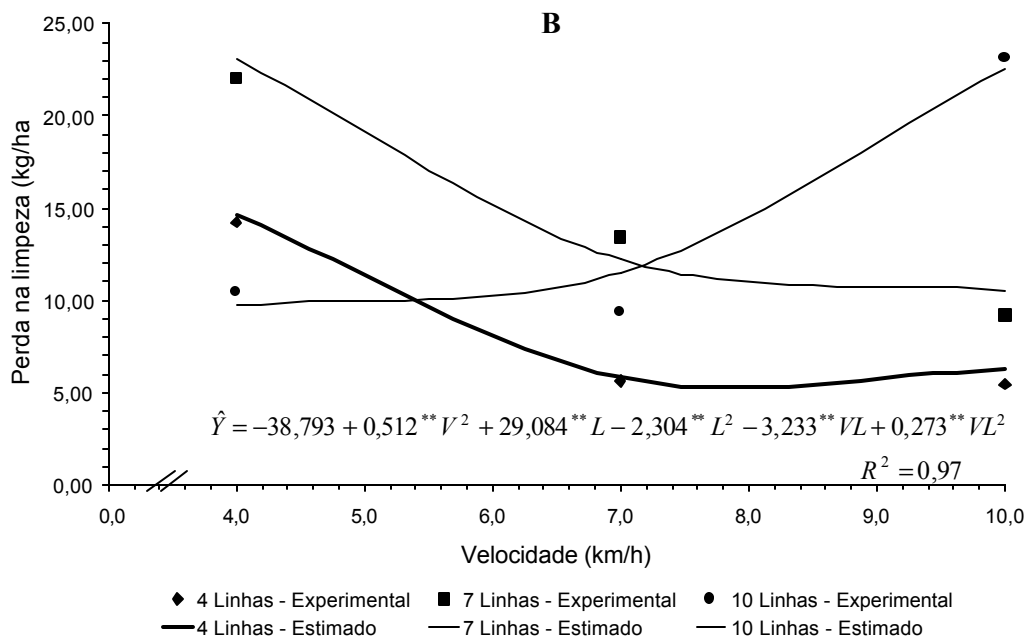
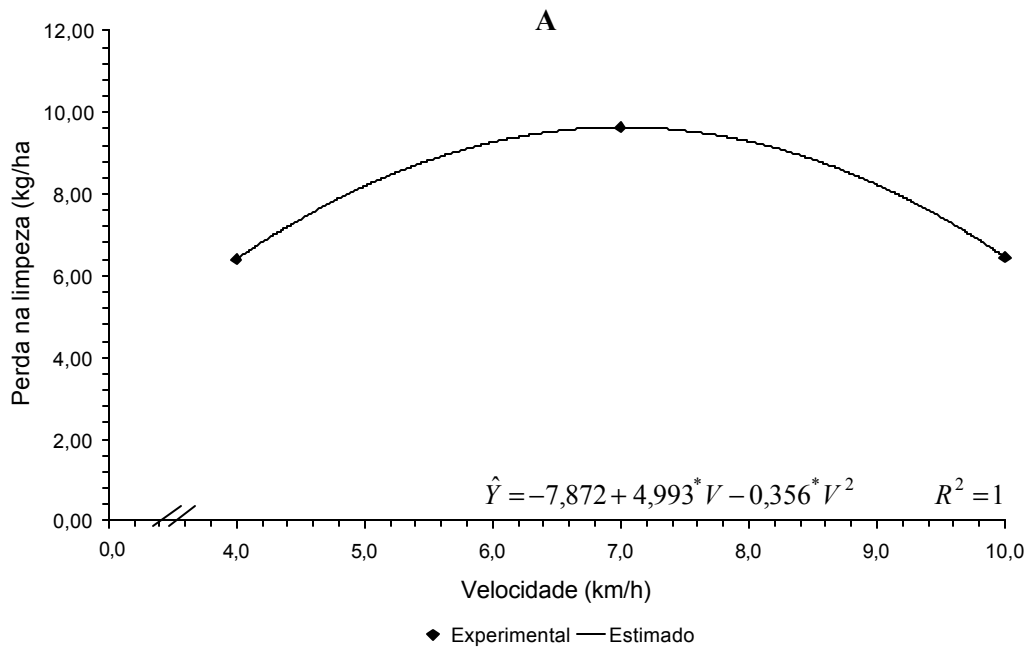
\*\* , \* e \*\*\* Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t

Figura 6. Estimativa da perda no sistema de trilha e separação em função da velocidade de deslocamento da máquina (A), para a rotação do cilindro trilhador de 420 rpm, e do número de linhas na leira (B), para a rotação do cilindro trilhador de 540 rpm, com teor de umidade médio de 14,10%



\*\* e \*\*\* Significativo a 1 e 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t

Figura 7. Estimativa da perda no sistema de limpeza em função do número de linhas na leira, para a rotação de 420 (A) e 540 rpm (B), com teor de umidade médio de 10,65%



\*\* e \* Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t

Figura 8. Estimativa da perda no sistema de limpeza em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as rotações do cilindro trilhador de 420 (A) e 540 rpm (B), com teor de umidade médio de 14,10%

Para estudar a perda total de grãos da colhedora em função do número de linhas de feijão na leira, da velocidade de deslocamento e rotação do cilindro trilhador da máquina, foram feitos cortes nos modelos de superfície de resposta ajustados, conforme apresentado nas Figuras 9 e 10.

Analizando os resultados de perda total da colhedora, obtidos no experimento com teor de umidade de 10,65%, para um mesmo número de leiras, verifica-se que aumentando a velocidade de deslocamento da máquina as perdas diminuíram. Nos testes efetuados com rotação do cilindro trilhador de 420 rpm, a menor perda foi apresentada na leira de 7 linhas e velocidade de deslocamento da máquina de 10 km/h, isto é, 67,69 kg/ha. Por outro lado, na rotação de 540 rpm a menor perda ocorreu na leira de 10 linhas e velocidade da máquina de 10 km/h, ou seja, 100,07 kg/ha.

Nos testes com teor de umidade de 14,10% e rotação de 420 rpm, a perda total da colhedora aumentou linearmente com o aumento da velocidade de deslocamento da máquina. A perda decresceu com o aumento do número de linhas nos testes, à rotação de 540 rpm. Nos testes com rotação de 420 rpm, a velocidade de 4 km/h apresentou menor valor de perda, atingindo 123,99 kg/ha, enquanto para a rotação de 540 rpm a leira de 10 linhas foi a que proporcionou menor perda, atingindo 145,03 kg/ha.

No experimento com teor de umidade de 10,64%, a rotação do cilindro trilhador proporcionou decréscimo nos valores de perda total da colhedora, enquanto no experimento com teor de umidade de 14,10% a tendência foi contrária.

Analizando em geral os dados de perda dos experimentos, verifica-se que os testes com teor de umidade de 10,65% apresentaram menores valores de perda total da colhedora do que os testes com teor de umidade de 14,10%. Resultados semelhantes foram obtidos por SINGH e SINGH (1981) e BOLLER (1998).

Os menores valores de perda total da colhedora, para os testes com teor de umidade de 10,65% e rotação de 420 e 540 rpm, foram 3,02 e 4,47% do total de produto, respectivamente. Nos testes com teor de umidade de 14,10%, os menores valores de perda para as rotações de 420 e 540 rpm foram 4,89 e 5,72%. De acordo com GRIFFIN (1991), esses resultados foram satisfatórios, pois, o nível aceitável de perda na colheita mecânica encontra-se no intervalo de 3 a 5%.

No experimento com teor de umidade de 10,65%, observou-se que, em média, a perda na plataforma de recolhimento foi maior que aquela nos outros mecanismos da colhedora, seguida pelas perdas no sistema de trilha e separação e no sistema de limpeza, com valores de 52,44, 41,21 e 6,35%, respectivamente. Já no experimento com teor de umidade de 14,10% houve uma inversão entre as perdas ocorridas na trilha e

separação e na plataforma de recolhimento, cujos valores foram 45,94 e 48,03%, respectivamente, sendo que a perda na limpeza foi de 6,03%.

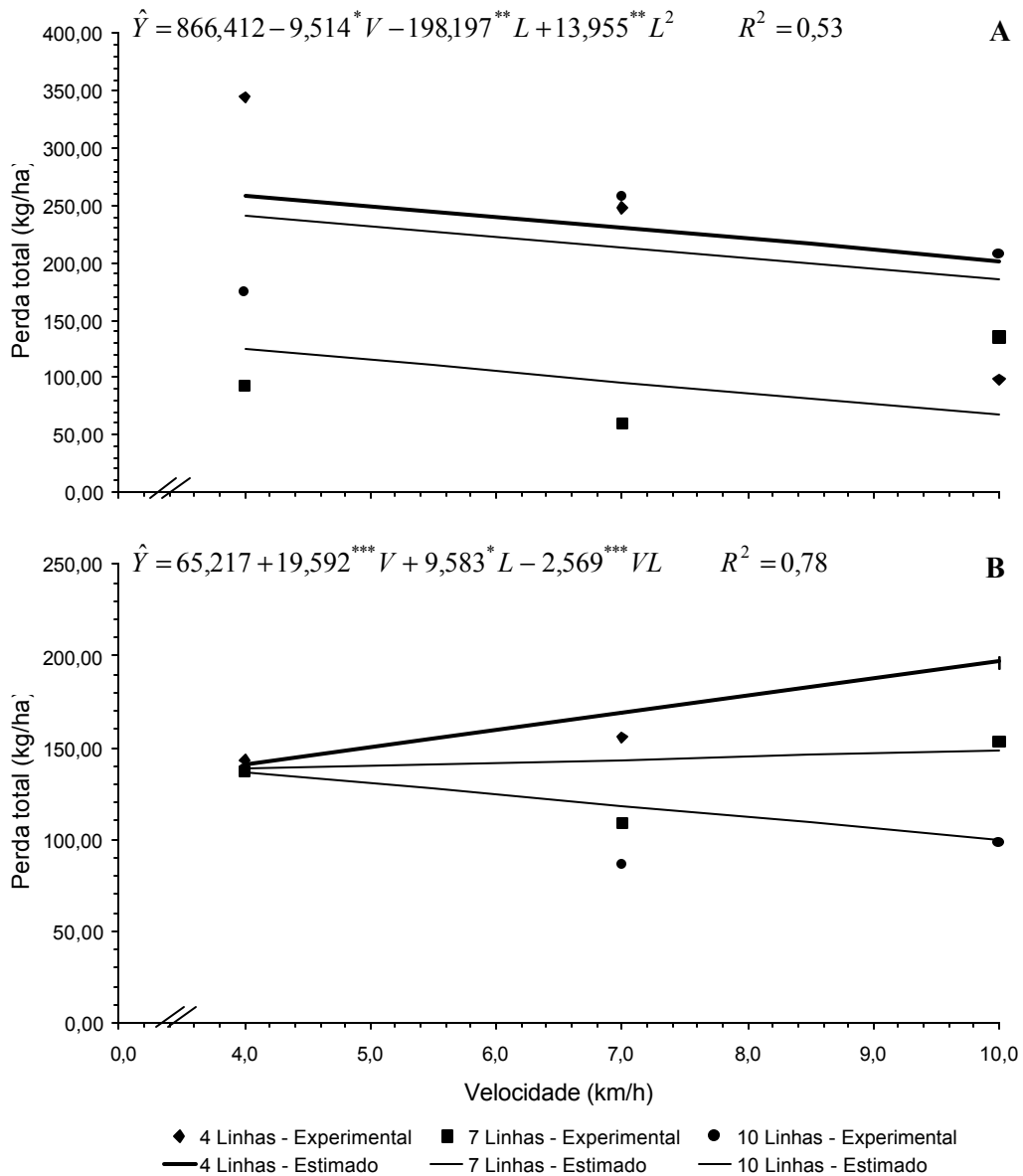
Para estudar o comportamento da capacidade de colheita, em função do número de linhas de feijão na leira, da velocidade de deslocamento e rotação do cilindro trilhador da máquina, foram feitos cortes nos modelos de superfície de resposta ajustados, conforme apresentado nas Figuras 11 e 12.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que a capacidade de colheita é diretamente proporcional à velocidade de deslocamento, ao número de linhas na leira e à rotação do cilindro trilhador.

Os testes realizados com leiras constituídas de 10 linhas apresentaram os maiores valores de capacidade de colheita, acontecendo o mesmo para a velocidade de 10,0 km/h e rotação do cilindro trilhador de 540 rpm. Os melhores resultados da capacidade de colheita foram observados no experimento com teor de umidade de 14,10%, atingindo 6,56 t/h, enquanto no experimento com teor de umidade de 10,65% a maior capacidade de colheita foi 6,02 t/h. A diferença entre esses valores está associada à diferença de produtividade entre os dois experimentos, pois, a produtividade tem influência direta na taxa de alimentação da máquina.

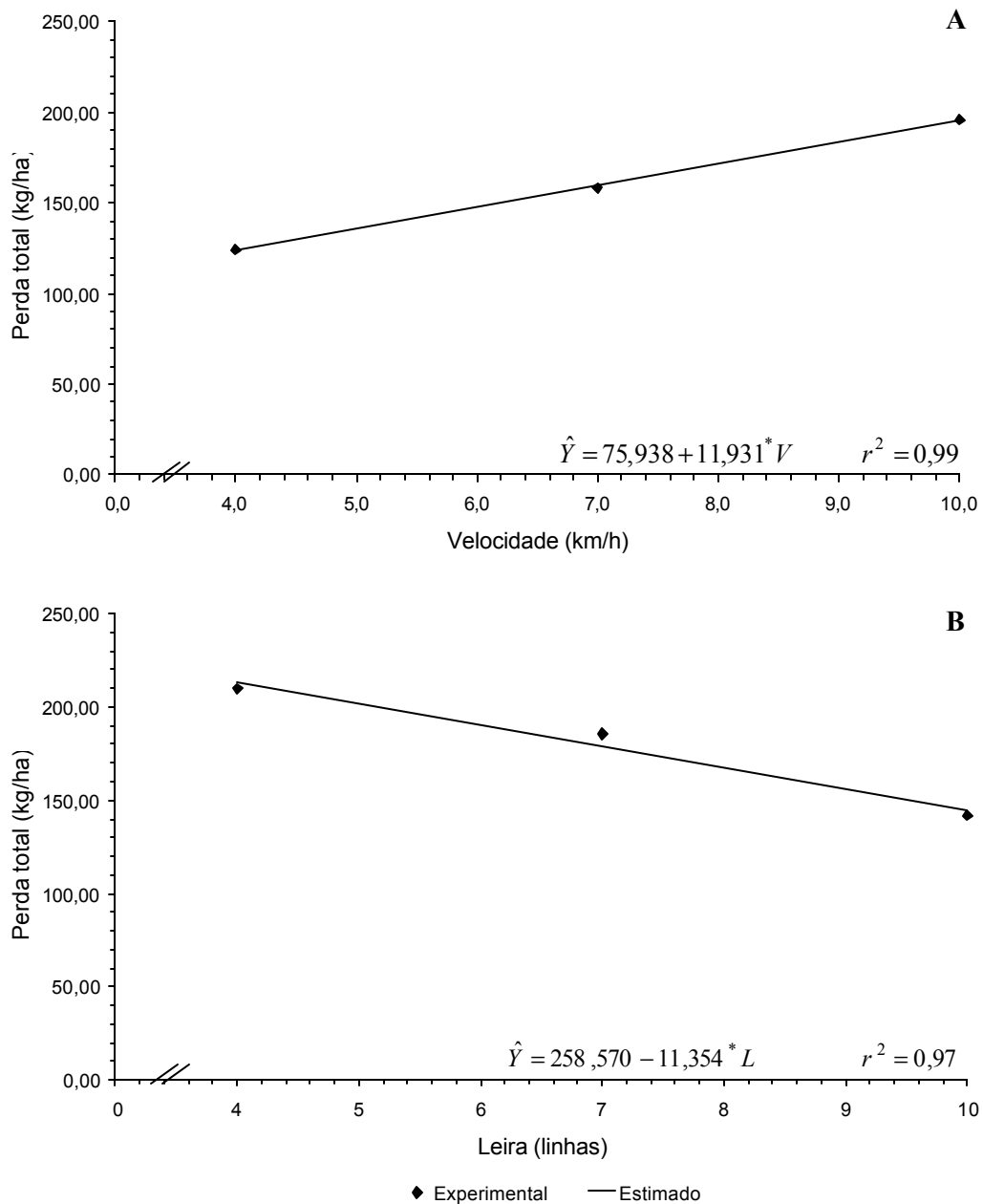
A rotação do cilindro trilhador da máquina influenciou o aumento do resultado da capacidade de colheita porque esta foi incrementada, variando-se a rotação do motor do trator. Observou-se em campo que, quando trabalhando em baixa rotação na TDP, e a taxa de alimentação da máquina era aumentada ocorria ligeiro decréscimo na velocidade de deslocamento para compensar a maior exigência de torque do cilindro trilhador.

Segundo SKROMME (1977), as colhedoras com sistema de trilha em fluxo axial apresentam maior capacidade de colheita e reduzem os índices de danos mecânicos, em relação às colhedoras com o sistema de trilha com fluxo radial.



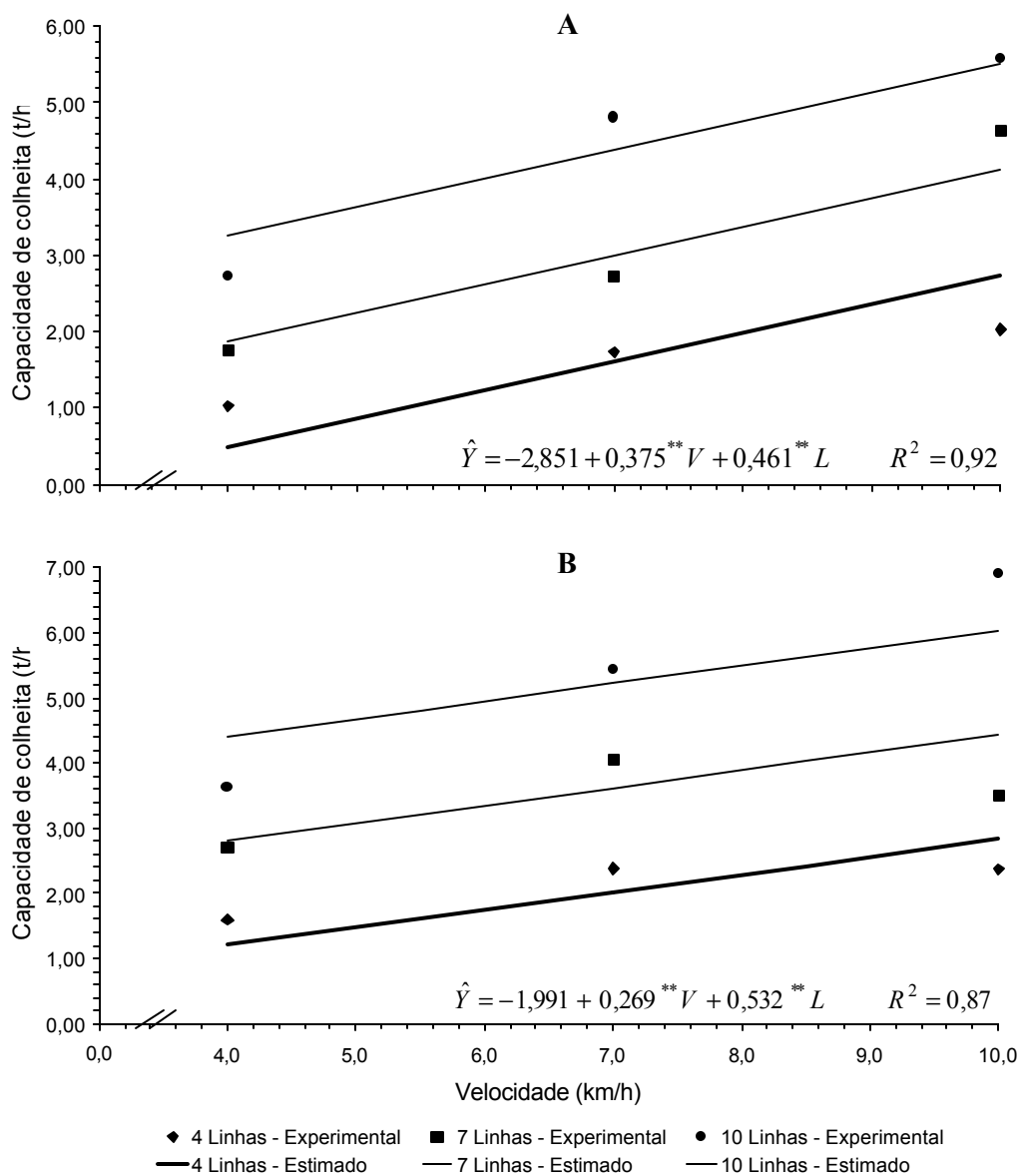
\*\*, \* e \*\*\* Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t

Figura 9. Estimativa da perda total da colhedora em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas constituições de leiras, com rotações do cilindro trilhador de 420 (A) e 540rpm (B) e teor de umidade médio de 10,65%



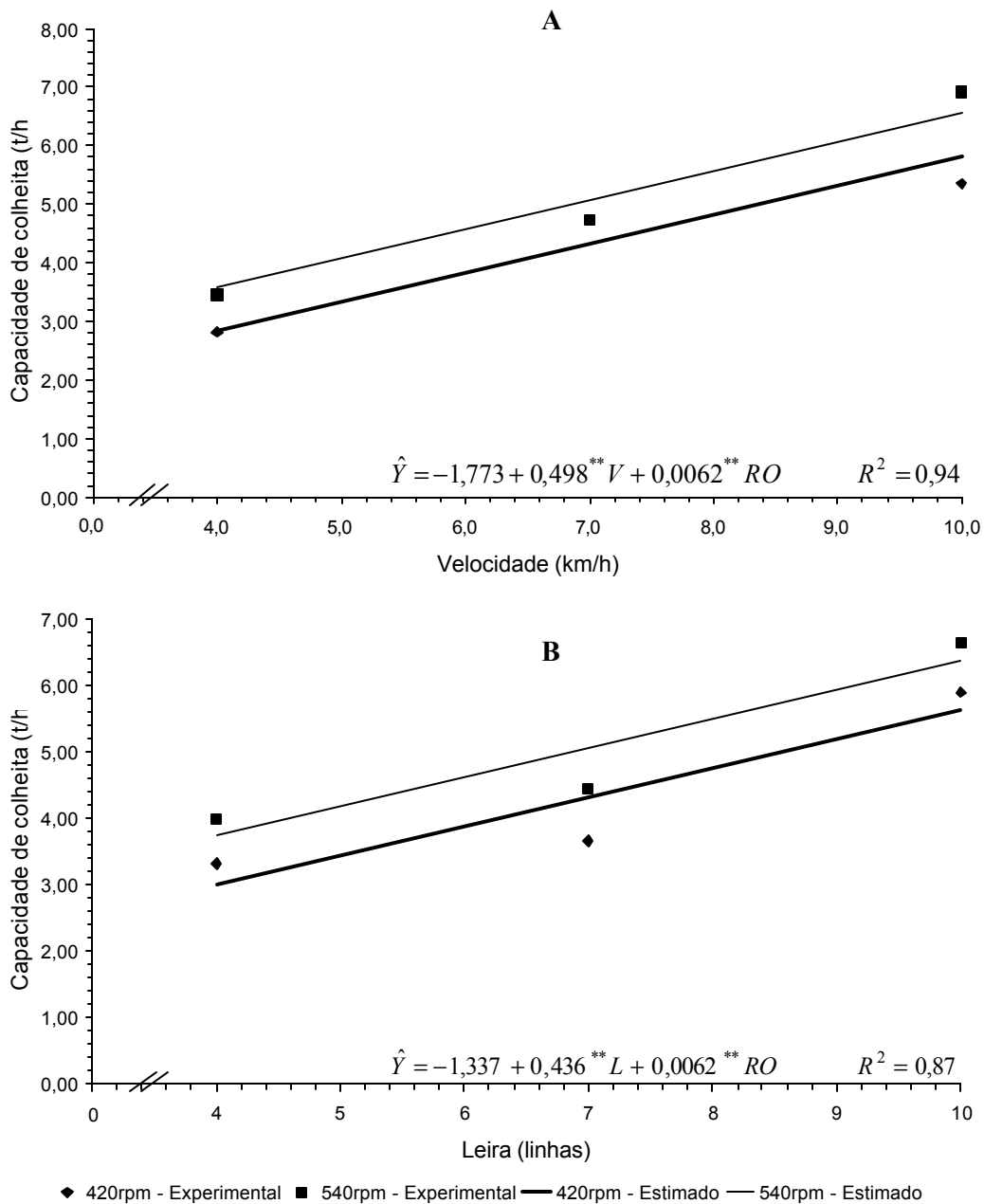
\* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste t

Figura 10. Estimativa da perda total da colhedora em função da velocidade de deslocamento da máquina (A), para a rotação do cilindro trilhador de 420 rpm, e do número de linhas na leira (B), para a rotação do cilindro trilhador de 540 rpm, com teor de umidade médio de 14,10%



\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t

Figura 9. Estimativa da capacidade de colheita em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas constituições de leiras, com rotações do cilindro trilhador de 420 (A) e 540 rpm (B) e teor de umidade médio de 10,65%



\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t

Figura 10. Estimativa da capacidade de colheita em função da velocidade de deslocamento da máquina (A) e do número de linhas na leira (B), para as respectivas rotações do cilindro trilhador, com teor de umidade médio de 14,10%

## CONCLUSÕES

1. O arranquio e enleiramento manual das plantas de feijão, quando realizados de maneira adequada, reduzem significativamente a possibilidade de perdas, as quais podem ser inferiores a 0,1%.

2. As leiras constituídas de 10 linhas apresentaram menores valores de perda na plataforma do que as demais, o mesmo acontecendo para a velocidade da colhedora de 4,0 km/h e rotação do cilindro trilhador de 420 rpm. As menores perdas na plataforma de recolhimento foram observadas no experimento com teor de umidade de 14,10%.

3. O experimento com teor de umidade de 10,65%, para a rotação de 540 rpm, apresentou menores valores de perda no sistema de trilha e separação. O aumento da taxa de alimentação proporcionou diminuição na perda, ocorrida para a leira de 7 linhas e velocidade da máquina de 10 km/h.

4. A perda no sistema de limpeza da colhedora evidenciou comportamento quadrático de seus valores, em função da taxa de alimentação. A rotação de 420 rpm, em geral, apresentou menores valores de perda, não havendo influência do teor de umidade de colheita. A menor perda foi obtida na velocidade de 8,36 km/h e na leira de 4 linhas, excepcionalmente na rotação de 540 rpm.

5. A taxa de alimentação evidenciou decréscimo nos valores de perda total da colhedora, apresentando menor valor na leira com 7 linhas e velocidade de 10 km/h, para a rotação de 420 rpm, enquanto na rotação de 540 rpm foi a leira de 10 linhas que apresentou o menor valor. O experimento com teor de umidade de 10,65% apresentou os menores valores de perda total da colhedora. A rotação do cilindro trilhador apresentou decréscimo nos valores de perda total da colhedora no experimento com teor de umidade de 10,64%, enquanto no experimento com teor de umidade de 14,10% houve tendência de acréscimo.

6. Em média, a perda na plataforma de recolhimento atingiu os maiores valores, representando 49,19% do total de produto, seguida pela perda no sistema de trilha e separação e no sistema de limpeza, cujos valores foram 44,62 e 6,19%, respectivamente.

7. A capacidade de colheita aumentou, linearmente, com a taxa de alimentação e a rotação do cilindro trilhador, apresentando maior valor de 6,56 t/h.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e às Indústrias Reunidas Colombo Ltda. pelo auxílio à pesquisa e suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOLLER, W.; KLEIN, V. A.; PANISSON, E. Perdas na colheita mecanizada de soja em função de diferentes níveis de umidade dos grãos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, Poços de Caldas, MG, Brasil, **Resumos...**, p.310-312. 1998.
- BORÉM, A.; CARNEIRO, J. E. S. A Cultura. In: VIEIRA, C.; DE PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão – Aspectos gerais e cultura no estado de minas gerais**, Editora UFV, p.13-17, 1998.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Companhia Nacional de Abastecimento. **Agricultura brasileira em números**. <http://www.agricultura.gov.br/html/Estatisticas/estatistica.htm>. 11 Jul. 2000.
- CONTO, A. J. de; VIEIRA, E. H. N.; OLIVEIRA, E. T. de; CASTRO, T. de A. P. e **Aspecto técnico e econômico da colheita mecânica e manual do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. EMBRAPA-CNPAP. Goiânia, GO. 1980. 18p. (Circular Técnica 02).
- CONTRERAS, G. A. M. **Otimização de um mecanismo articulado para o levantamento de plantas e seguimento do perfil do solo em processos de colheita**. Campinas, SP: UNICAMP. Dez., 1997. 90p. (Tese de Doutorado)
- DUNN, W. E.; NAVE, W. R.; BUTLER B. J. Combine Header Component Losses in Soybeans. **Transactions of the ASAE**, v. 16, n. 6, p. 1032-1035, 1973.
- GRIFFIN, G. A. **Combine harvesting: Operating maintaining and improving efficiency of combines**. Fourth Edition. Fundamentals of Machine Operation. John Deere & Company/Malone. Illinois, EUA. 1991. 207p.
- MESQUITA, C. M.; COSTA, N. P.; MAURINA, A. C.; ANDRADE, J. G. M.; PEREIRA, J. E. Colheita mecânica da soja: Redução de perdas em vinte anos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.2, p.71-80, dez. 1998.
- MOREIRA, R. F.; FERNANDES, H. C.; DIAS, G. P. Desenvolvimento e avaliação do desempenho de um protótipo cortador/enleirador na colheita de feijão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.3, p.22-33, 1999.
- NAVE, W. R.; TATE, D.; BUTLER B. Combine Headers for Soybeans. **Transactions of The ASAE**, v. 15, n. 4, p. 632-635, 1972.

- PORTELLA, J. A. Perdas de Trigo, de Soja e de Milho x Umidade do Grão Durante a Colheita Mecanizada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26, Campina grande, PB, Brasil, **Resumos...**, 1997. CD Rom.
- SANTOS, M. L.; BRAGA, M. J. Aspectos econômicos. In: VIEIRA, C.; DE PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão – Aspectos gerais e cultura no estado de minas gerais**. Viçosa, MG: Editora UFV, 1998, p.19-53.
- SILVA, C. C. da; OLIVEIRA, E. T. de; CARNEIRO, J. E.; AIDAR, H.; FAGUNDES, A.; DALSENTER, W.; VANDERLEI, C.; BASSIN, R. A.; FONSECA, J. R. **Colheita Mecanizada do feijão**. Goiânia, GO. 1994, 27p. EMBRAPA, Boletim de Pesquisa N° 8.
- SILVA, C. C.; BEVITORI, R. Colheita e beneficiamento de feijão. **Informe Agropecuário: Feijão no inverno**. v.17, n.178, p.63-65, 1994.
- SILVA, J. S.; QUEIROZ, D. M. Colheita, trilha, secagem e armazenagem. In: VIEIRA, C.; DE PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão – Aspectos gerais e cultura no estado de minas gerais**, Editora UFV, p.559-585, 1998.
- SINGH, K. N.; SINGH, B. Effect of crop and machine parameters on threshing effectiveness and seed quality of soybean. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.26, p. 349-355, 1981.
- SKROMME, L. H. Progress report on twin rotor combine concept of rotary threshing and separation. In: INTERNATIONAL GRAIN AND FORAGE HARVESTING CONFERENCE, 1, 1977, St. Joseph. **Proceeding...** St. Joseph: ASAE, 1977. p.188-191 e 195.
- SMITH, J. A. Dry Edible bean field harvesting losses. **Transactions of the ASAE**, v.29, n.6, Nov-Dec. p.1540-1543, 1986.

## **EFEITO DA COLHEITA MECANIZADA SOBRE A QUALIDADE DE SEMENTES DE FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.)**

### **RESUMO**

Estudou-se os efeitos da taxa de alimentação, da rotação do cilindro trilhador, da umidade de colheita e período de armazenamento sobre a qualidade de feijão. Para avaliar a qualidade do produto colhido, foram realizados os testes de pureza, dano mecânico, germinação e vigor de sementes. A partir dos dados obtidos, pode-se concluir que o produto com melhor qualidade foi obtido quando se trabalhou com maior taxa de alimentação da colhedora, menor rotação do cilindro trilhador e maior teor de umidade de colheita. As sementes apresentaram decréscimo da germinação, durante o período de armazenamento. O produto considerado de melhor qualidade foi classificado como do tipo 1.

**Palavras-chave:** feijão, colheita, qualidade

## **EFFECT OF THE MECHANICAL HARVESTING IN THE QUALITY OF BEAN KERNELS (*Phaseolus vulgaris* L.)**

### **ABSTRACT**

It was studied the effect of the feed rate, cylinder angular velocity, grain moisture content and time of storage on the bean kernels quality. To evaluate the quality of the product was done the test of purity, of mechanical damage, of germination and of kernels vigor. Based on the collected data it was concluded that the product with better quality was obtained when higher feed rate, lower cylinder angular velocity and higher grain moisture content were used. The germination percentage decreased slightly with the storage time. The product considered of better quality was classified as of the type 1.

**Key words:** bean, harvesting, quality

### **INTRODUÇÃO**

Além do seu valor nutricional, o feijão é um dos produtos de maior importância sócio-econômica, uma vez que abrange grandes áreas de cultivo e grande quantidade de mão-de-obra (BORÉM e CARNEIRO, 1998). De acordo com SANTOS e BRAGA (1998), desde a última década o feijão deixou de ser uma cultura de subsistência,

tornando-se uma cultura tecnificada, com maior produtividade e produto final de melhor qualidade.

Dentre as etapas do ciclo operacional de uma cultura, a colheita normalmente destaca-se em razão das dificuldades e altos custos envolvidos, seja ela realizada de forma manual ou mecanizada.

A colheita do feijão pode ser feita manualmente, mecanicamente ou por uma combinação de ambas (SILVA e QUEIROZ, 1998). A colheita utilizando processos manuais e mecânicos é realizada com, pelo menos, três operações de campo em um período de 2 a 12 dias, pois, consiste em arrancar as plantas inteiras, quando estas encontram-se quase despidas de folhas e os grãos com baixo teor de umidade. Com as plantas arrancadas, são formadas as leiras, que permanecem na lavoura para completar o processo de secagem e homogeneização natural (CONTO et al., 1980) e, por fim, uma operação na qual uma máquina colhedora de grãos, convencional ou específica para feijão, recolhe o produto e separa os grãos do resto da planta (SMITH, 1986). A trilha, quando mal conduzida, pode ser responsável por significativa perda de produto (SOUZA et al., 1998) e, segundo CARVALHO e NAKAGAWA (1988), ela constitui uma das mais importantes fontes de danificações dos grãos e um dos mais sérios problemas da produção de sementes.

Na colhedora, a injúria mecânica às sementes ocorre principalmente durante a debulha, ou seja, no momento em que forças consideráveis são aplicadas sobre as sementes a fim de separá-las da estrutura que as contém (ANDRADE, 1997). Os danos mecânicos nos produtos agrícolas são devidos às forças externas, sob condições estáticas e, ou dinâmicas ou às forças internas resultantes de variações na temperatura e no teor de umidade do produto, bem como às mudanças biológicas e químicas (MOHSENIN, 1970). Durante a colheita, os danos mecânicos dependem principalmente da umidade dos grãos e da velocidade periférica do cilindro trilhador, conforme mostrado por PICKETT (1973), NEWBERY et al. (1980) e FERNANDES et al. (1993).

Quando os danos mecânicos são visíveis, com sementes partidas e com rupturas no tegumento, os grãos e sementes podem ser separados por máquinas de limpeza. Os danos não visíveis, com rupturas de pequena proporção no tegumento, são difíceis de serem detectados logo após a colheita, e tornam as sementes susceptíveis a fungos e insetos, cuja posterior propagação diminuirá a qualidade fisiológica das sementes (CHAVES et al., 1992). Os danos não visíveis, também conhecidos por danos latentes que, segundo COSTA et al. (1979), correspondem àqueles que irão manifestar-se

durante o armazenamento, com queda da qualidade fisiológica da semente, são representados por trincas microscópicas e abrasões.

Além da pureza genética, umas das formas muito usadas no estudo da qualidade das sementes é realizar o teste de germinação, de vigor e de pureza. Segundo ABRAHÃO (1971), os danos mecânicos, dentre outros fatores, influenciam consideravelmente o poder germinativo e o vigor de sementes.

Para se propor melhorias nas máquinas, é importante a realização de estudos voltados para o conhecimento do desempenho dos sistemas que englobam a colheita. Com o conhecimento adquirido, mudanças podem ser feitas visando à diminuição de danos ocasionados nas sementes, durante o processo de colheita mecânica.

Os objetivos deste trabalho foram avaliar os efeitos da taxa de alimentação, do teor de umidade de colheita e da rotação do cilindro trilhador de uma colhedora de arrasto, com sistema de trilha em fluxo axial, sobre a qualidade de sementes de feijão.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no Campo Experimental e no Laboratório de Análise de Sementes da EMBRAPA Milho e Sorgo, bem como no Laboratório de Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, com a colaboração das empresas MIAC, COTRAME e AEMCO das Indústrias Reunidas Colombo Ltda.

Nos ensaios, foi utilizado o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar Carioca, sendo a máquina uma colhedora de arrasto modelo “Double Master” (Figura 1), com sistema de trilha em fluxo axial. A máquina foi tracionada e acionada por um trator Massey-Ferguson, Modelo MF 620, com potência nominal de 82 kW.



Figura 1. Colhedora modelo “Double Master”

As variáveis investigadas nos ensaios foram a taxa de alimentação da máquina, obtida pela variação do número de linhas de feijão na leira e da velocidade de trabalho da máquina, e a rotação do cilindro trilhador, trabalhando-se com 420 (equivalente a uma velocidade periférica de 11,94 m/s) e 540 rpm (equivalente a uma velocidade periférica de 15,35 m/s). A abertura entre cilindro e côncavo foi de 20 mm. Foi montado um experimento em esquema fatorial 3x3x2, com três constituições de leira, três velocidades de deslocamento e duas rotações do cilindro trilhador da máquina, e instalado segundo o delineamento inteiramente casualizado, com duas repetições. Os dados obtidos foram submetidos às análises de variância e de metodologia de superfície de resposta. Os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste t a 10% e o coeficiente de determinação. A análise estatística dos dados foi realizada, utilizando-se o programa computacional SAEG, versão 8.

Nos ensaios, foram retiradas amostras no graneleiro da máquina para realização da análise de qualidade das sementes colhidas. As amostras simples foram retiradas em diferentes locais do tanque graneleiro, formando com estas uma amostra composta de aproximadamente 2,0 kg.

Nas avaliações, foram consideradas duas faixas de teores de umidade de colheita, sendo uma de  $10,65 \pm 0,25$  e outra de  $14,10 \pm 0,81\%$ , denominadas Experimento 1 e Experimento 2, respectivamente. O Experimento 1 foi conduzido em um pivô e o Experimento 2 em um outro pivô, buscando-se minimizar o desvio dos dados de teor de umidade de colheita.

Para avaliar a qualidade do produto colhido com a máquina, foram realizados os testes de pureza, de danos mecânicos, de vigor e de germinação.

Os testes para determinar a pureza de sementes foram realizados de acordo com as Regras para Análise de Sementes de feijão (BRASIL, 1992). Para o cálculo das impurezas pesaram-se todas as partículas oriundas do feijão, bem como os grãos defeituosos, fragmentos de grãos que passaram em uma peneira de crivos circulares de 5 mm de diâmetro, grãos ou sementes de outras espécies, detritos vegetais e corpos estranhos de qualquer natureza não oriundos do cultivar considerado. A porcentagem de pureza foi determinada pela relação entre o peso de sementes puras e o peso inicial da amostra, conforme apresentado a seguir.

$$P_z = 100 \cdot \left( 1 - \frac{m_i}{m_m} \right) \quad (1)$$

em que,

$P_z$  - pureza de sementes, %;

$m_i$  - massa de impureza e material estranho, g;

$m_m$  - massa inicial da amostra, g.

Para determinação dos danos mecânicos, foi retirada uma amostra composta de cada teste constituída de aproximadamente 200 g de grãos. Desta amostra, foram retirados e pesados os grãos com injúrias visíveis, evidenciadas pelo teste de tetrazólio (FRANÇA NETO, 1994), para determinação da porcentagem de grãos danificados. No teste de tetrazólio, as sementes foram pré-embebidas em papel toalha (papel germitest) e mantidas à temperatura de 25°C durante 16 horas, sendo em seguida, submersas em solução de tetrazólio (2, 3, 5 trifênil cloreto de tetrazólio) à concentração de 0,075%, e permaneceram em estufa à temperatura de aproximadamente 35°C durante 180 minutos. O índice de danos mecânicos foi determinado por meio da seguinte expressão:

$$D = 100 \cdot \frac{m_d}{m_m} \quad (2)$$

em que,

$D$  - índice de danos mecânicos, %;

$m_d$  - massa de grãos com danos mecânicos, g.

O teste de germinação foi realizado com base no teste padrão das Regras para Análise de Sementes de feijão (BRASIL, 1992), utilizando-se quatro repetições de 50 sementes. O papel toalha foi o substrato utilizado, sendo umedecido com água destilada, na proporção de 2,5 vezes o peso do papel. As sementes foram espaçadas, igualmente, entre as camadas de papel, e colocadas na vertical dentro de um germinador tipo “mangelsdorf”, à temperatura aproximada de 25°C. A contagem de plântulas normais foi feita sete dias a partir do início da montagem do teste padrão, sendo o resultado contabilizado do total de plântulas normais em relação ao total inicial e, expresso em porcentagem. Após um período de armazenamento de 180 dias, o teste de germinação foi realizado novamente para avaliação do efeito latente dos danos. A secagem das sementes com teor de umidade média de 14,10% foi realizada, em terreiro de concreto, até atingirem um teor de umidade médio de 11,0%. Após a secagem, as amostras foram acondicionadas em sacos de papel multifoliados e mantidas em ambiente sombreado e naturalmente ventiladas.

Para determinar o indicativo do vigor, as sementes foram avaliadas pelo teste de envelhecimento acelerado, de acordo com MARCOS FILHO (1994), sendo distribuídas em caixas plásticas adaptadas para o teste de envelhecimento, e depois

levadas para um germinador regulado à temperatura de 41°C e umidade relativa de aproximadamente 92%, onde foram mantidas durante 72 horas. Em seguida, realizou-se o teste padrão de germinação. O vigor foi contabilizado do total de plântulas normais em relação ao total inicial, e expresso em porcentagem.

Para determinação do teor de umidade dos grãos, utilizou-se o método padrão de estufa, a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  por 24 horas, com três repetições, conforme recomendações das Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 1992).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para conhecer a qualidade inicial das sementes, foram avaliados a germinação, o indicativo de vigor e o grau de pureza, sendo encontrados os valores de 96,0%, 91,0% e 99,7%, respectivamente. As sementes avaliadas foram debulhadas manualmente.

Segundo BROOKER et al. (1992), dentre os principais fatores que determinam a qualidade dos grãos e sementes, o alto percentual de pureza é um deles. Assim, as máquinas de colheita que proporcionam elevado percentual de pureza são preferidas, pois, diminuem a necessidade de processamento posterior para limpeza do produto.

Para estudar o comportamento do grau de pureza de sementes, em função do número de linhas de feijão na leira, da velocidade de deslocamento e rotação do cilindro trilhador da máquina foram feitos cortes nos modelos de superfície de resposta ajustados, conforme Figuras 2 e 3.

Analisando os dados de pureza de sementes, verificou-se que, fixando a rotação do cilindro trilhador, a pureza aumentou com o aumento da velocidade de deslocamento da colhedora. Os maiores valores de pureza de sementes foram obtidos com a máquina trabalhando à velocidade de 10 km/h e rotação do cilindro trilhador de 420 rpm (Figura 2).

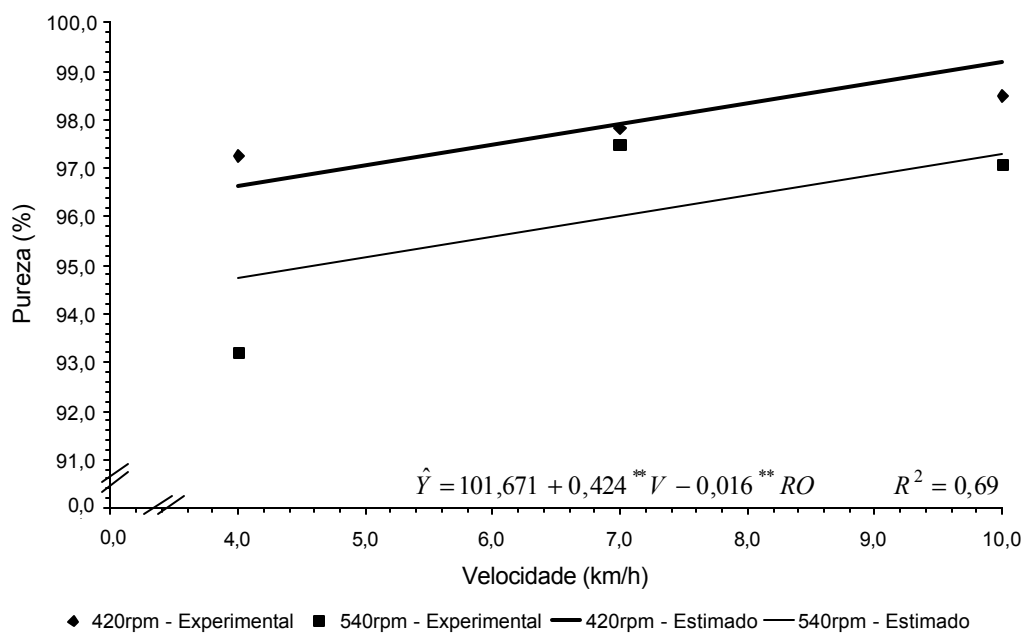
Observando os dados de pureza de sementes no experimento com teor de umidade de 14,10%, verificou-se que, para a rotação de 420 rpm, os testes realizados com 7 linhas de feijão apresentaram os maiores valores de pureza, enquanto para a rotação de 540 rpm os maiores valores de pureza ocorreram nos testes com 10 linhas por leira. O maior valor de pureza de sementes foi 99,8% (Figura 3).

Quanto maior a taxa de alimentação, maior era a densidade de material entre cilindro e côncavo, dificultando, assim, que a palha muito quebrada alcançasse a grade do côncavo, além de forçar o material a sair mais rapidamente da região de debulha.

Em geral, na rotação de 420 rpm os valores de pureza de sementes foram maiores do que na de 540 rpm. Esse comportamento pode ser atribuído à energia

transmitida pelo helicóide do cilindro trilhador à massa de produto presente na região de debulha, pois, quanto maior a rotação, mais quebrada ficou a palhada, facilitando sua passagem pela grade do côncavo.

O teor de umidade de 14,10%, em média, proporcionou os maiores valores de pureza que o de 10,65%. Observou-se, em campo, que quanto mais seco o produto se encontrava, mais quebrada ficava a palhada, resultando em maior quantidade de material diferente dos grãos no sistema de limpeza da máquina.

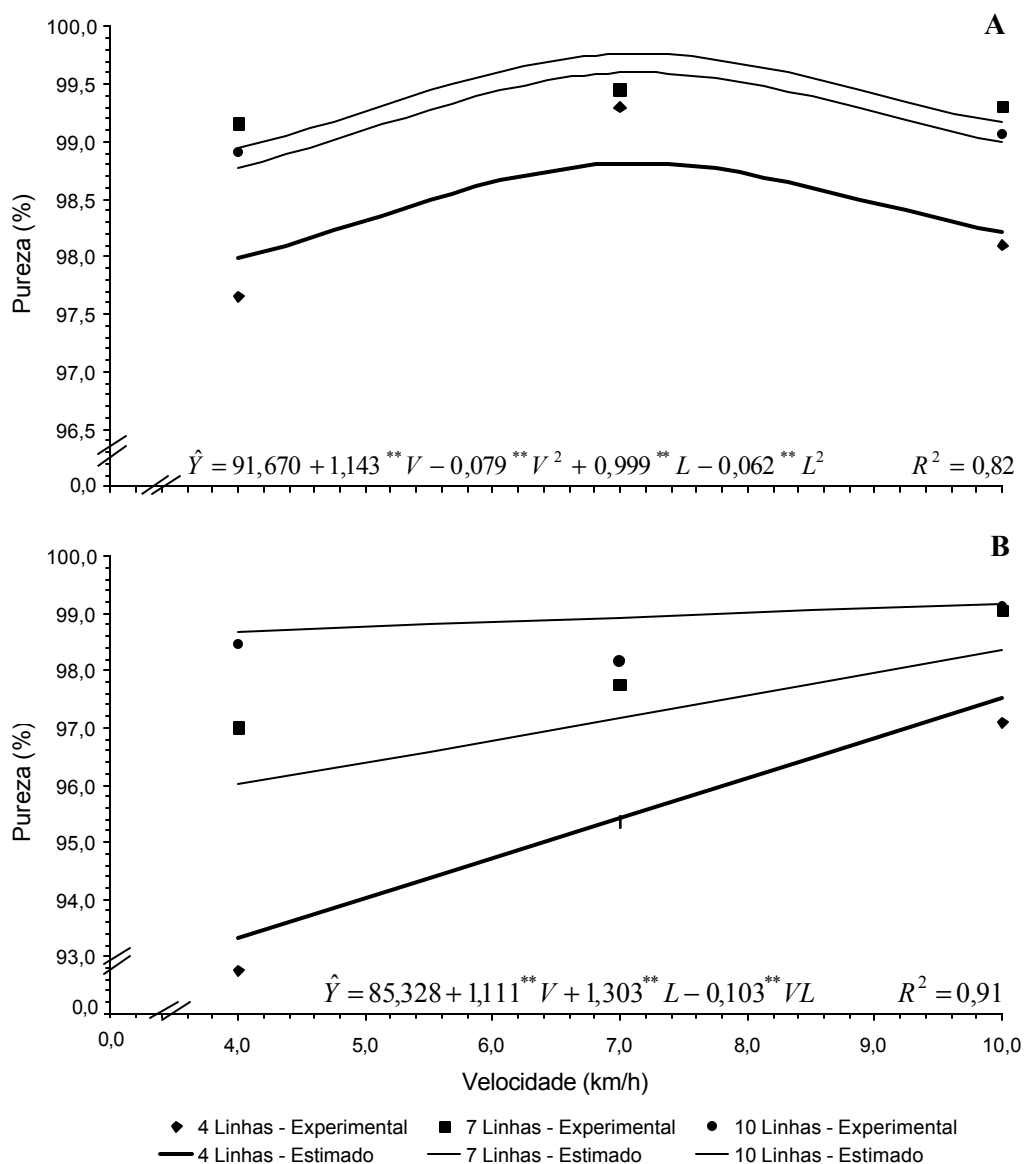


\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t

Figura 2. Estimativa de pureza de sementes em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas rotações do cilindro trilhador, com teor de umidade de 10,64%

A presença de grãos com danos mecânicos, em grãos colhidos mecanicamente, é inevitável. Isto, além de prejudicar a qualidade dos grãos destinados a semente, diminui consideravelmente o valor de mercado dos reservados para a mesa. Apesar das necessidades específicas de cada produtor, os danos mecânicos podem ser altamente maléficos ao produto final.

Para estudar o comportamento do índice de grãos com danos mecânicos, em função do número de linhas de feijão em cada leira, da velocidade de deslocamento e rotação do cilindro trilhador da máquina, foram feitos cortes nos modelos de superfície de resposta ajustados, conforme Figuras 4 e 5.



\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t

Figura 3. Estimativa da pureza de sementes em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas constituições de leiras, com rotações do cilindro trilhador de 420 (A) e 540 rpm (B) e teor de umidade de 14,10%

Analisando os dados obtidos de índice de danos mecânicos, verificou-se que esse índice decresceu com o aumento da velocidade de deslocamento da máquina e número de linhas na leira. Na velocidade de 10,0 km/h ocorreram menores valores de índice danos mecânicos que nas demais. Nas leiras com 10 linhas ocorreram os menores valores de índice de danos mecânicos, exceto no experimento com teor de umidade de 14,10%, e rotação de 420 rpm, em que a leira com 7 linhas apresentou os menores valores. O menor valor de índice de grãos com danos mecânicos foi 0,05%.

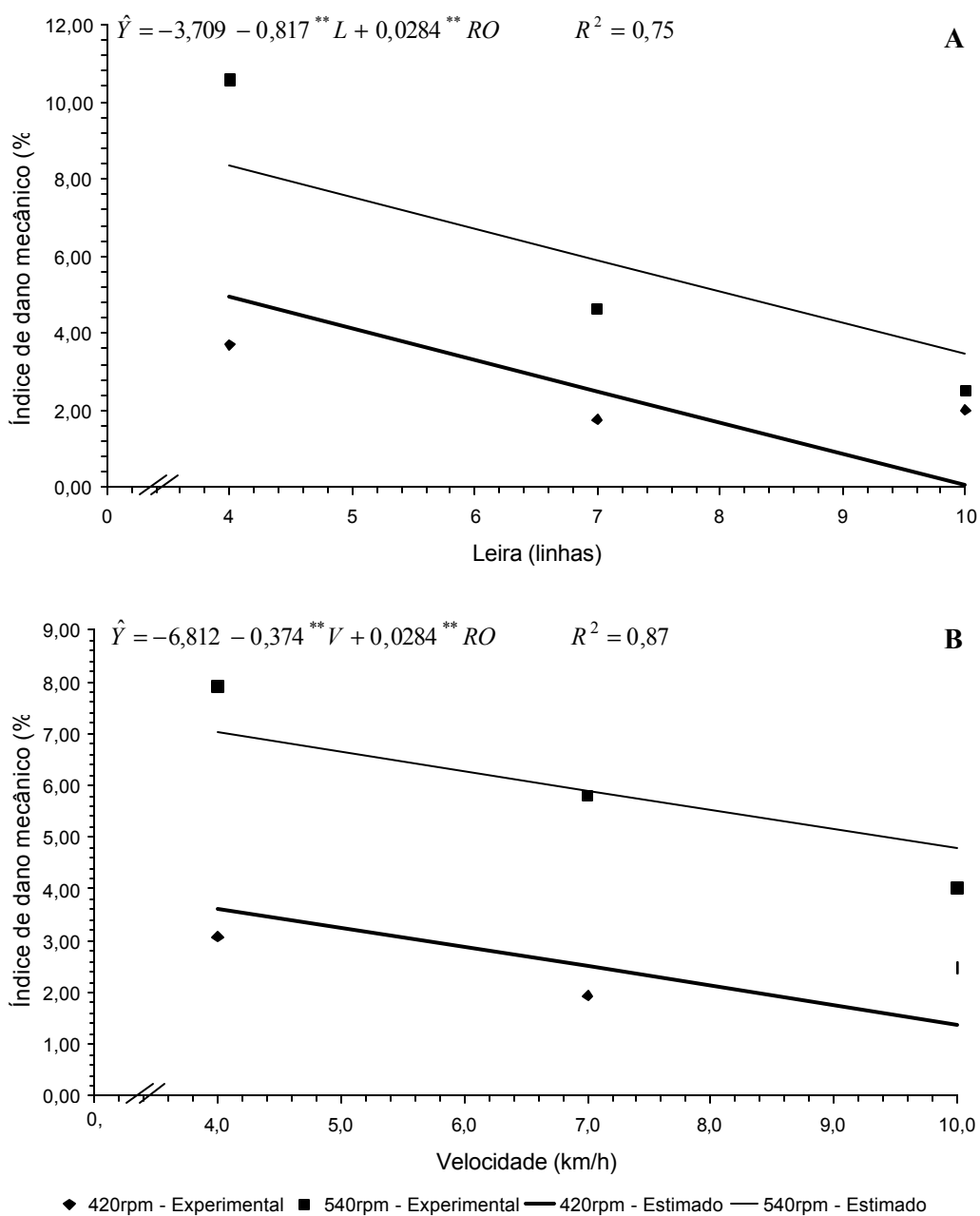
O aumento da taxa de alimentação da máquina, provavelmente, foi responsável pela redução no índice de danos mecânicos com o aumento da velocidade de deslocamento e aumento do número de linhas na leira, pois, quanto mais preenchido esteve o espaço entre o cilindro e o côncavo, menores devem ter sido os impactos provocados nas sementes durante a debulha.

Os menores valores de índice de danos mecânicos foram observados no experimento com teor de umidade de 14,10%, quando comparados com aqueles do experimento com teor de umidade de 10,65%. Sementes com umidade mais elevada possuem maior capacidade para absorver os impactos, resultando numa melhor manutenção de suas propriedades fisiológicas.

A rotação do cilindro trilhador de 420 rpm apresentou menores valores de índice de danos mecânicos que a de 540 rpm. Quanto menor a rotação do cilindro trilhador, menor foi a energia transmitida às sementes, diminuindo, assim, o efeito do impacto nas mesmas.

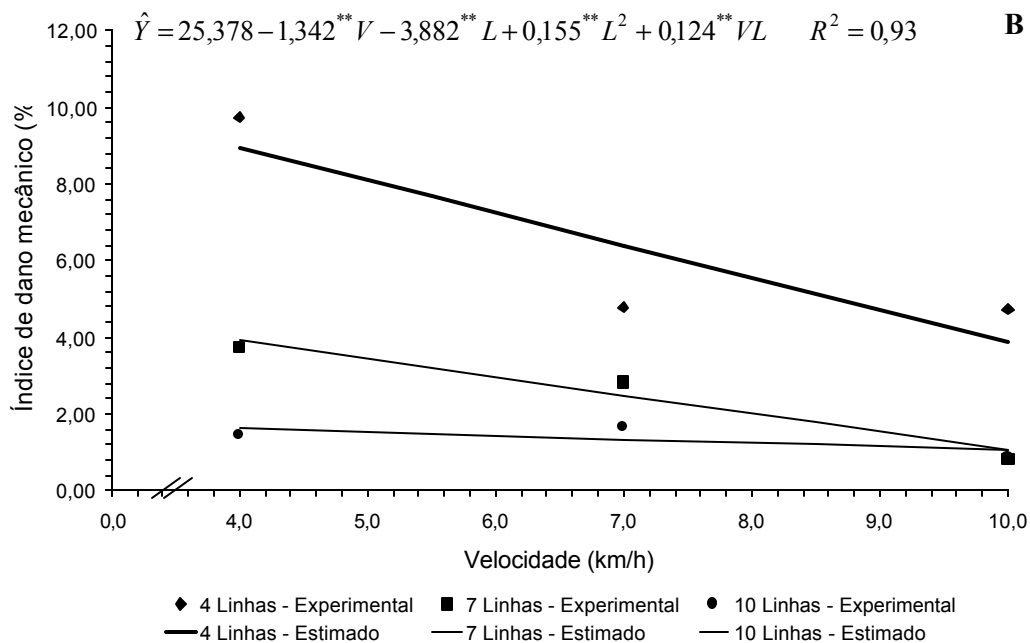
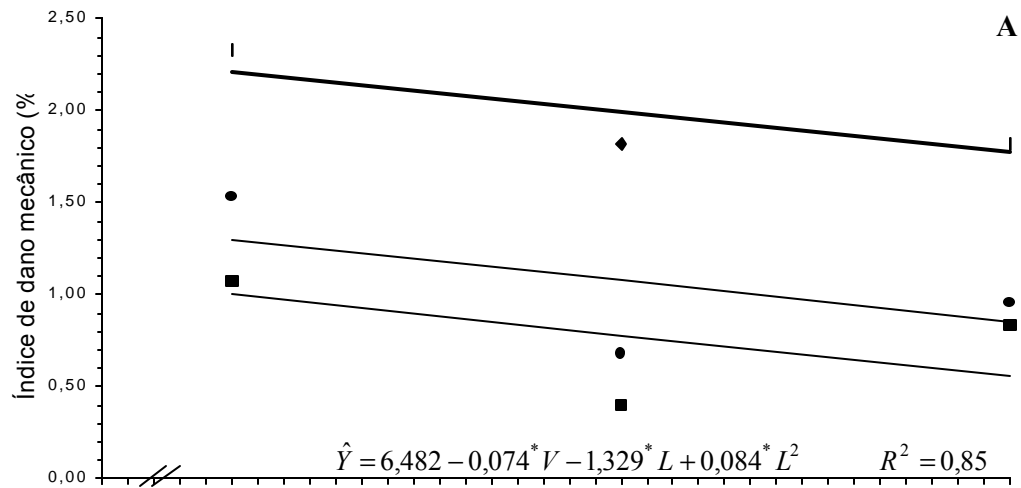
As menores taxas de alimentação e a maior rotação do cilindro trilhador apresentaram maior presença de “bandinhas” de feijão, sendo indesejáveis para o produto final destinado à mesa.

De acordo com a Portaria n.º 161, de 24 de julho de 1987, o feijão é classificado, segundo sua qualidade, em tipo 1, 2, 3, 4 e 5 para as tolerâncias máximas de 4, 8, 12, 16 e 20% de grãos avariados, respectivamente. Independentemente do tipo de feijão, o grau de pureza não deve exceder 2% (BRASIL, 1987). Observando os dados de índice de danos mecânicos (Figuras 4 e 5), verifica-se que o produto colhido na leira de 10 linhas, na velocidade da máquina de 10 km/h, independentemente da rotação do cilindro trilhador, pode ser classificado como tipo 1. Na leira de 7 linhas, rotação de 420 rpm, independentemente da velocidade da máquina, o produto colhido pode ser classificado como tipo 2. Todo produto colhido pode ser classificado como tipo 3,



\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t

Figura 4. Estimativa do índice de danos mecânicos em função do número de linhas de feijão na leira (A) e da velocidade de deslocamento da máquina (B), para as respectivas rotações do cilindro trilhador, com teor de umidade de 10,65%



\*\* e \* Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t

Figura 5. Estimativa do índice de danos mecânicos em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas constituições de leiras, para as rotações do cilindro trilhador de 420 (A) e 540 rpm (B), com teor de umidade de 14,10%

independentemente das condições de colheita estudadas. Em média, o experimento com teor de umidade de 14,10% satisfaz a exigência de pureza de sementes, sendo observados maiores valores nas leiras de 7 e 10 linhas (Figura 2 e 3).

O índice de danos mecânicos é apontado por vários autores como a principal fonte de problemas na produção de sementes. Sabe-se que a maioria dos pequenos e médios produtores de feijão reservam certa quantidade de sementes para a próxima semeadura. Assim, é necessário conhecer o efeito do índice de danos mecânicos sobre a qualidade das sementes de feijão colhidas por meio de máquinas.

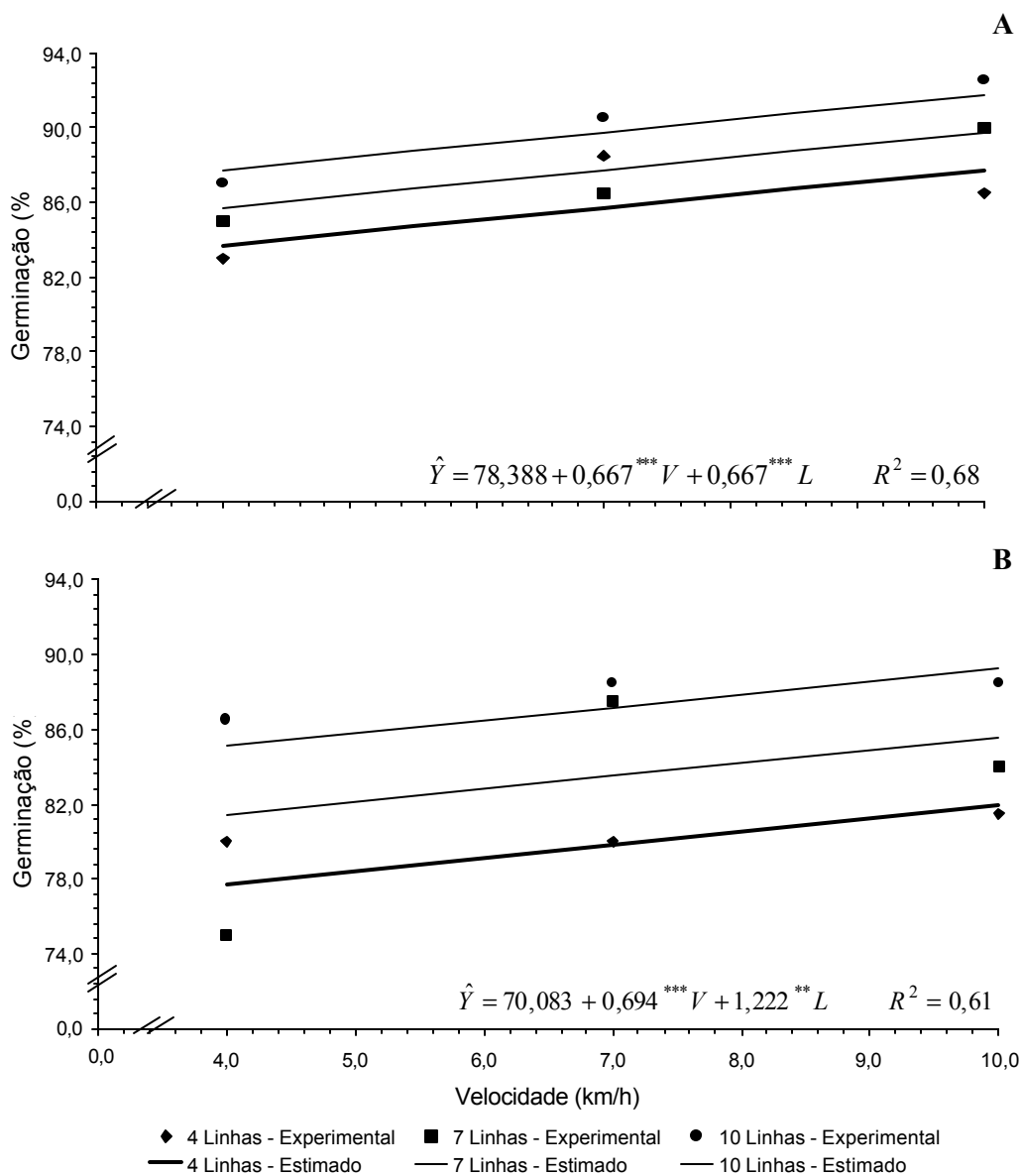
Para estudar o comportamento da germinação em função do número de linhas de feijão na leira, da velocidade de deslocamento e rotação do cilindro trilhador da máquina foram feitos cortes nos modelos de superfície de resposta ajustados, conforme Figuras 6 e 7.

Analisando os dados obtidos, verifica-se que a porcentagem de germinação, para um mesmo número de linhas na leira, aumentou com o aumento da velocidade de deslocamento da máquina. Os resultados obtidos com a velocidade da máquina de 10,0 km/h e a leira constituída de 10 linhas apresentaram maiores valores de germinação, exceto para a rotação do cilindro trilhador de 420 rpm do experimento com teor de umidade de 14,10%, em que leira de 7 linhas apresentou maiores valores. Os melhores resultados de germinação foram observados no experimento com teor de umidade de 14,10%, com valores de 93,5 e 93,6% para as rotações do cilindro trilhador de 420 e 540 rpm, respectivamente (Figura 6 e 7).

Verifica-se que o índice de danos mecânicos provocado nas sementes de feijão apresentou comportamento contrário ao da germinação, mostrando que quanto menor este menos comprometida fisiologicamente ficam as sementes.

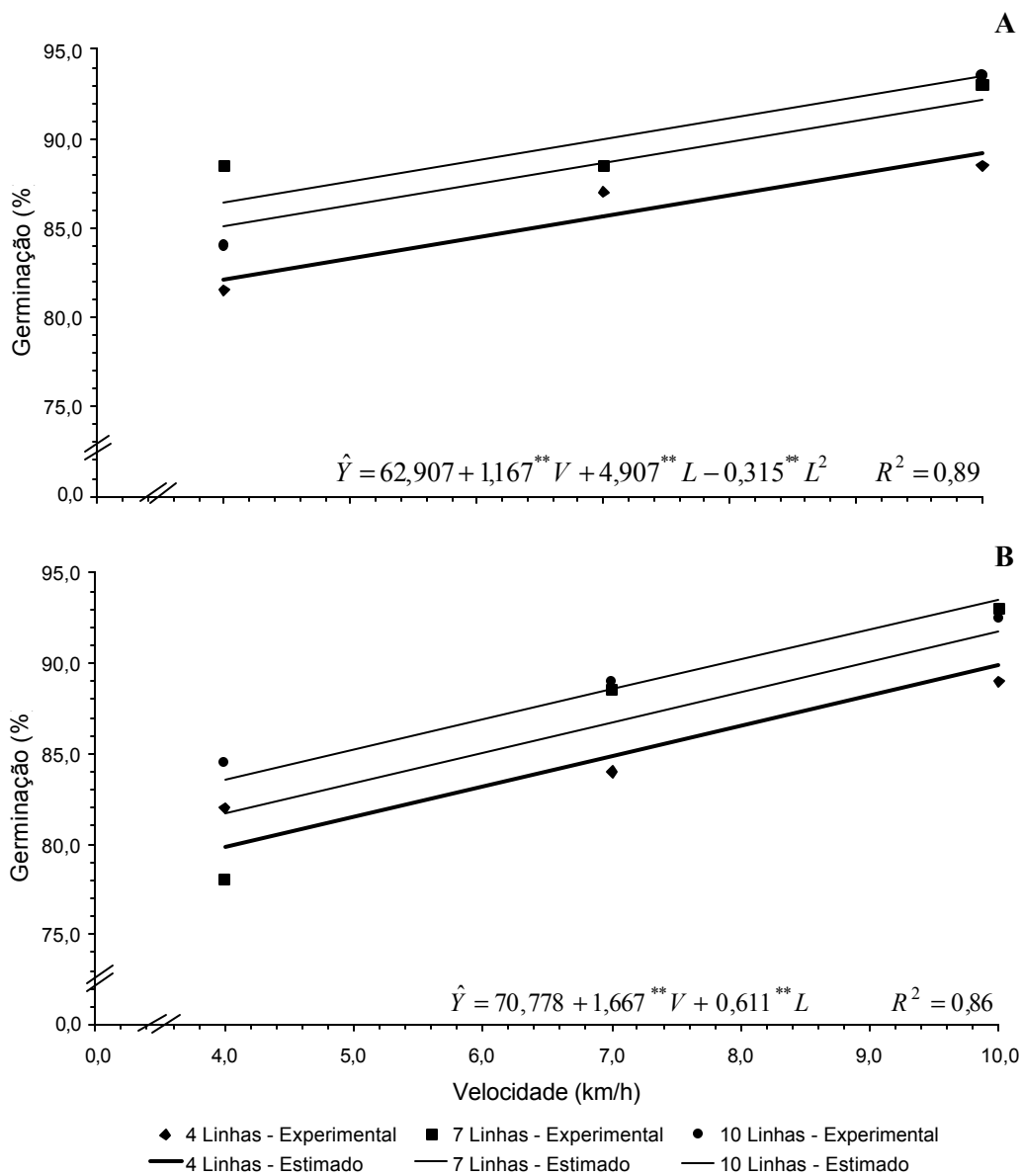
Em geral, observou-se que a rotação do cilindro trilhador de 420 rpm apresentou maiores valores de germinação que a de 540 rpm. Da mesma forma, o teor de umidade de 14,10% apresentou, em média, maiores valores de germinação que o de 10,65%. Resultados semelhantes foram obtidos por MORAES (1980) e ANDRADE (1997).

A germinação de sementes obtida nas leiras de 7 e 10 linhas apresentou valores superiores àqueles estabelecidos para comercialização de sementes de feijão no Estado de Minas Gerais, que considera 80% de germinação como valor mínimo.



\*\* e \*\*\* Significativo a 1 e 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t

Figura 6. Estimativa da germinação de sementes de feijão em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas constituições de leiras, com rotações do cilindro trilhador de 420 (A) e 540 rpm (B) e teor de umidade de 10,65%



\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t

Figura 7. Estimativa da germinação de sementes de feijão em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas constituições de leiras, com rotações do cilindro trilhador de 420 (A) e 540 rpm (B) e teor de umidade de 14,10%

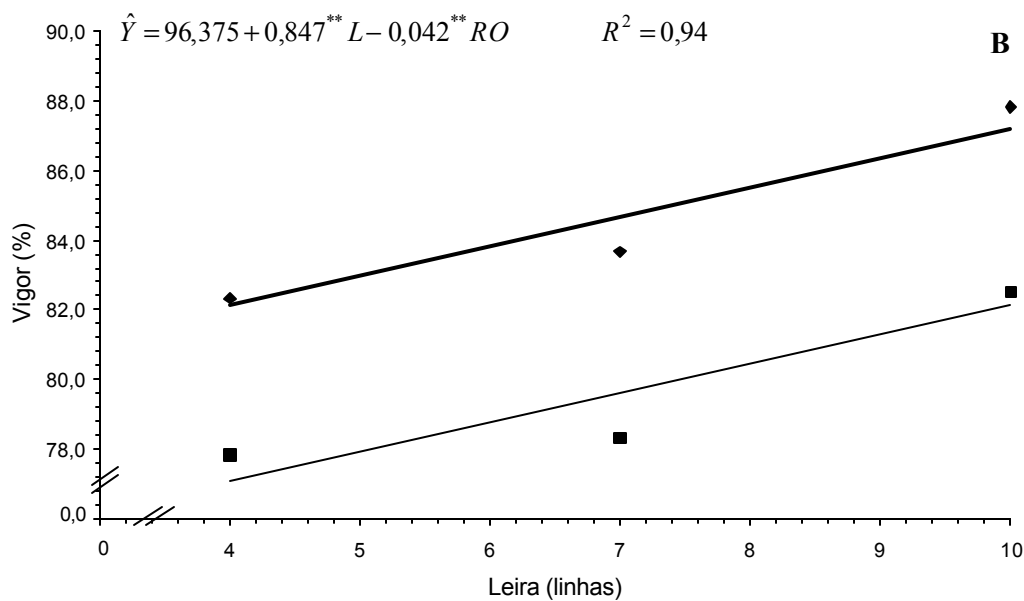
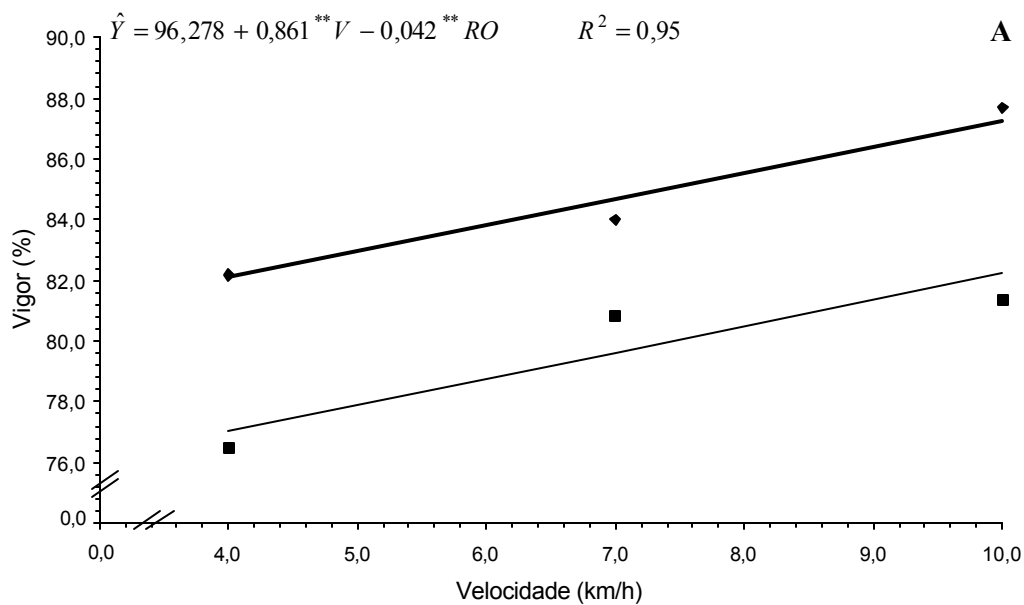
O estudo do indicativo de vigor de sementes é muito usado pelo fato de acompanhar a perda de qualidade das sementes a partir da maturação, pois, a perda de vigor antecede a perda da viabilidade (AFONSO JÚNIOR, 1997).

Para estudar o comportamento do indicativo de vigor em função do número de linhas de feijão na leira, da velocidade de deslocamento e rotação do cilindro trilhador da máquina, foram feitos cortes nos modelos de superfície de resposta ajustados, conforme Figuras 8 e 9.

Analisando os resultados do indicativo de vigor, verificou-se que este aumentou com o aumento da velocidade de deslocamento da máquina e número de linhas na leira. As leiras constituídas de 10 linhas e a velocidade da máquina de 10,0 km/h apresentaram maiores valores de vigor que as demais. Os melhores resultados de vigor foram observados no experimento com teor de umidade de 14,10%, com valores de 92,0 e 94,4% para as rotações do cilindro trilhador de 420 e 540 rpm, respectivamente (Figuras 8 e 9).

Em geral, a rotação de 420 rpm apresentou maiores valores de vigor que a de 540 rpm. Da mesma forma, o teor de umidade de 14,10% apresentou maiores valores de vigor que o de 10,64%. Resultados semelhantes foram obtidos por MORAES (1980), CHAVES et al. (1992) e ANDRADE (1997).

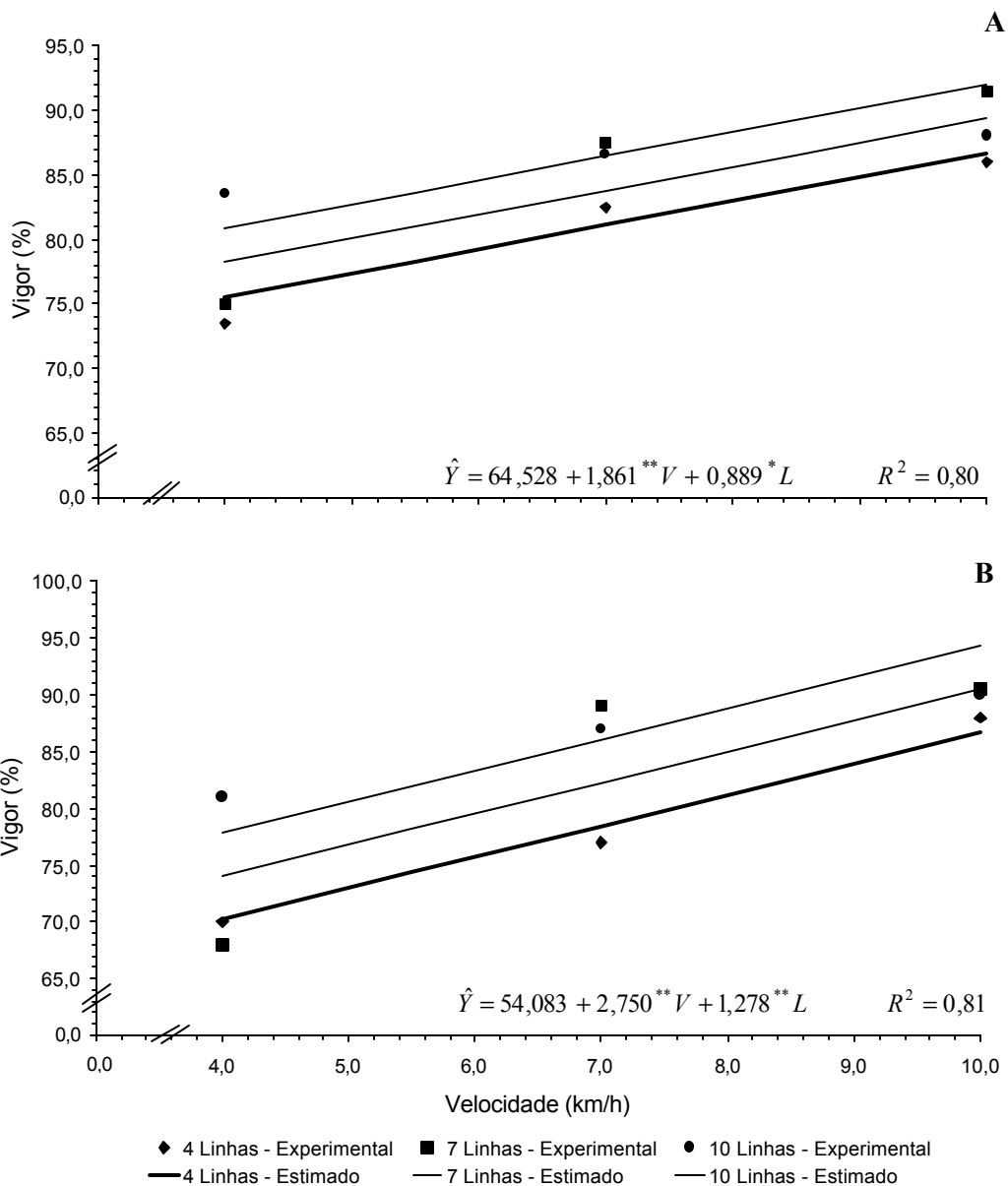
A germinação e o indicativo de vigor mostraram-se muito influenciados pela taxa de alimentação, pela rotação do cilindro trilhador e pelo teor de umidade de colheita dos grãos, estando estes fatores refletidos nos danos mecânicos provocados às sementes.



◆ 420rpm - Experimental ■ 540rpm - Experimental — 420rpm - Estimado — 540rpm - Estimado

\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t

Figura 8. Estimativa do indicativo de vigor de sementes de feijão em função da velocidade de deslocamento da máquina (A) e do número de linhas de feijão na leira (B), para as respectivas rotações do cilindro trilhador, com teor de umidade de 10,65%



\*\* e \* Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t

Figura 9. Estimativa do indicativo de vigor de sementes de feijão em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas constituições de leiras, com rotações do cilindro trilhador de 420 (A) e 540 rpm (B) e teor de umidade de 14,10%

Os efeitos do período de armazenamento, da velocidade de trabalho da colhedora, da rotação do cilindro trilhador, número de linhas na leira e teor de umidade de colheita sobre a germinação de sementes de feijão são apresentados na Tabela 1. Apesar do período de armazenamento não ter apresentado efeito significativo sobre a germinação, verificou-se uma ligeira queda na germinação à medida que as sementes eram mantidas armazenadas por maior período de tempo. Resultados semelhantes foram obtidos por SINGH e SINGH (1981), AFONSO JÚNIOR (1997) e ANDRADE (1997). A velocidade de trabalho da colhedora, a rotação do cilindro trilhador, o número de linhas na leira e o teor de umidade de colheita, após 180 dias de armazenamento, apresentaram o mesmo comportamento da germinação existente antes do armazenamento. O maior valor de germinação foi observado para a velocidade de 10 km/h, leira de 10 linhas, rotação do cilindro trilhador de 420 rpm e teor de umidade de 14,10%, representando 92,8%.

Tabela 1. Germinação de sementes de feijão em função do período de armazenamento, velocidade de trabalho da colhedora, rotação do cilindro trilhador, número de linhas na leira e teor de umidade de colheita

Tempo (dias)	V (km/h)	Teor de umidade de 10,65%					
		420 rpm			540 rpm		
		4	7	10	4	7	10
		----- linhas -----					
Zero	4	83,0	85,0	87,0	80,0	75,0	86,5
	7	88,5	86,5	90,5	80,0	87,5	88,5
	10	86,5	90,0	92,5	81,5	84,0	88,5
180	4	80,4	82,4	86,6	76,7	74,5	84,7
	7	85,8	83,8	89,8	82,6	85,7	86,7
	10	83,5	87,2	92,2	84,7	83,6	86,3
		Teor de umidade de 14,10%					
		420 rpm			540 rpm		
		4	7	10	4	7	10
		----- linhas -----					
Zero	4	81,5	88,5	84,0	82,0	78,0	84,5
	7	87,0	88,5	88,5	84,0	88,5	89,0
	10	88,5	93,0	93,5	89,0	93,0	92,5
	4	79,8	86,7	85,3	81,6	85,5	84,2

4	79,8	86,7	85,3	81,6	85,5	84,2
10	85,2	95,1	92,8	86,6	94,9	91,8

## CONCLUSÕES

1. A pureza de sementes foi maior quanto maior era a taxa de alimentação da máquina. Em geral, a rotação de 420 rpm apresentou os maiores valores de pureza de sementes que a de 540 rpm, e o teor de umidade de 14,10% proporcionou os maiores valores de pureza de sementes que o de 10,65%. O maior valor de pureza de sementes foi 99,8%.

2. O índice de danos mecânicos foi menor quanto maior era a taxa de alimentação. O menor valor de índice de danos mecânicos foi 0,05%. Os menores valores de dano mecânico foram observados no experimento com teor de umidade de 14,10% e rotação do cilindro trilhador de 420 rpm.

3. A germinação de sementes de feijão aumentou com o aumento da taxa de alimentação da colhedora. Os melhores resultados de germinação foram observados no experimento com teor de umidade de 14,10%, com maior valor de 93,6%. A rotação do cilindro trilhador de 420 rpm apresentou maiores valores de germinação.

4. O indicativo de vigor aumentou com o aumento da taxa de alimentação da colhedora. Os melhores resultados de vigor foram observados no experimento com teor de umidade de 14,10%, com maior valor de 94,4%. A rotação de 420 rpm apresentou maiores valores de vigor que a de 540 rpm.

5. A germinação reduziu-se à medida em que o período de armazenamento aumentou. Após 180 dias de armazenamento, o maior valor de germinação foi 92,8%, obtido para a velocidade de 10 km/h, leira de 10 linhas, rotação do cilindro trilhador de 420 rpm e teor de umidade de 14,10%.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e às Indústrias Reunidas Colombo Ltda., pelo auxílio à pesquisa e suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHÃO, J. T. M. **Contribuição do estudo de efeito de danificações mecânicas em sementes de feijão**. Piracicaba, SP: ESALQ, 1971. 112p. (Tese de Doutorado)
- AFONSO JÚNIOR, P. C. **Efeito imediato e latente das condições de secagem sobre a qualidade de sementes de feijão, variedade “Ouro Negro 1992”**. Viçosa, MG: UFV, 1997. 64p. (Tese de Mestrado)
- ANDRADE, E. T. de **Efeito imediato e latente de danos mecânicos sobre a qualidade de sementes de feijão submetidas a diferentes velocidades de impacto**. Viçosa, MG: UFV, 1997. 49p. (Tese de Mestrado)
- BORÉM, A.; CARNEIRO, J. E. S. A Cultura. In: VIEIRA, C.; DE PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão – Aspectos gerais e cultura no estado de minas gerais**, Editora UFV, p.13-17, 1998.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF, 1992. 365p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Secretaria Nacional de Abastecimento. Comissão Técnica de Normas e Padrões. **Norma de identificação, qualidade, apresentação e embalagem do feijão**. Portaria n.º 161, de 24 de julho de 1987. 12p.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. M. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York. Van Nostrand Reinhold. 1992. 450p.
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Injúria mecânica. Sementes, Ciência, Tecnologia e Produção**. 3ª ed. Campinas, SP: Fundação Cargil, 1988. 424p.
- CHAVES, M. A.; MOREIRA, S. M. C.; ALVARENGA, L. C. et al. Efeitos de múltiplos impactos na germinação de três cultivares de sementes de soja. **Revista Brasileira de Armazenamento**. v.17, n.1/2, p.2-9, 1992.
- CONTO, A. J. de; VIEIRA, E. H. N.; OLIVEIRA, E. T. de; CASTRO, T. de A. P. e **Aspecto técnico e econômico da colheita mecânica e manual do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. EMBRAPA-CNPAF. Goiânia, GO. 1980. 18p. (Circular Técnica 02).
- COSTA, N. P.; MESQUITA, C. M.; HENNING. A. A. Avaliação de perdas e dos efeitos da colheita mecânica sobre a qualidade fisiológica e a incidência de patógenos em sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**. v.1, n.3, p.59-70, 1979.
- FERNANDES, H. C.; ARAÚJO, E. F.; MARTYN, P. J. QUEIROZ, D. M. de Influência da máquina trilhadora UFV-H na qualidade das sementes de feijão. **Engenharia na Agricultura**. v.2, n.3, 1993. 7p.
- FRANÇA NETO, J. de B. O teste de tetrazólio em sementes de soja. In: VIEIRA, R. D.; CARVALHO, N. M. de **Testes de vigor em sementes**. Jaboticabal: Funep/Unesp, 1994. p.87-102.

- MARCOS FILHO, J. Teste de envelhecimento acelerado. In: VIEIRA, R. D.; CARVALHO, N. M. de **Testes de vigor em sementes**. Jaboticabal: Funep/Unesp, 1994. p.133-149.
- MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plants and animal materials**. Gordon and Breach Science Publishers. New York. 1970. 731p.
- MORAES, M. L. B. **Efeitos da velocidade e da posição do impacto na germinação e vigor de sementes de soja (cultivar UFV-2) com diferentes teores de umidade**. Viçosa, MG: UFV, 1980. 38p. (Tese de Mestrado)
- NEWBERY, R. S., PAULSEN, M. R., NAVE, W. R. Soybean quality with rotary and conventional threshing. **Transactions of the ASAE**, v.23, n.2, p.303-308, 1980.
- PICKETT, L. K. Mechanical damage and processing loss during navy bean harvesting. **Transactions of the ASAE**, v.16, n.6, p.1047-1050, 1973.
- SANTOS, M. L.; BRAGA, M. J. Aspectos econômicos. In: VIEIRA, C.; DE PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão – Aspectos gerais e cultura no estado de minas gerais**. Viçosa, MG: Editora UFV, 1998, p.19-53.
- SILVA, J. S.; QUEIROZ, D. M. Colheita, trilha, secagem e armazenagem. In: VIEIRA, C.; DE PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão – Aspectos gerais e cultura no estado de minas gerais**, Editora UFV, p.559-585, 1998.
- SINGH, K. N.; SINGH, B. Effect of crop and machine parameters on threshing effectiveness and seed quality of soybean. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.26, p.349-355, 1981.
- SMITH, J. A. Dry Edible bean field harvesting losses. **Transactions of the ASAE**, v.29, n.6, p.1540-1543, 1986.
- SOUZA, C. M. A. de; PINTO, F. A. C.; MANTOVANI, E. C.; QUEIROZ, D. M. Simulação e análise do processo de trilha mecânica do milho-pipoca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.2, n.2, p.212-218, 1998.

## **AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE RUÍDO EMITIDO POR UM SISTEMA DE COLHEITA PARA FEIJÃO**

### **RESUMO**

Em avaliação de desempenho de máquinas destinadas a colheita, além do estudo sobre as exigências energéticas, a capacidade de processamento, as perdas ocasionadas e qualidade do produto, também é importante o estudo sobre os fatores que prejudicam o profissional envolvido no processo. Diante disso, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar, na colheita de feijão, o nível de ruído emitido por um conjunto composto por trator e máquina colhedora em operação, em função de seus quatro lados e do raio de afastamento do conjunto. Ensaios de campo foram realizados em diferentes condições de trabalho. O conjunto trator-colhedora emitiu níveis de ruído acima do limite de 85 dBA para oito horas de exposição diária, estabelecidos pela Norma NR-15, independentemente da rotação do motor. O nível de ruído evidenciou comportamento decrescente em função da taxa de alimentação, enquanto em função da rotação do motor do trator a tendência foi contrária. As leiras de 10 linhas de feijão, independentemente da velocidade de deslocamento da máquina, apresentaram os menores valores de nível de ruído. O nível de ruído em função do raio de afastamento apresentou decréscimo de seus valores, sendo que o lado traseiro foi o que apresentou os maiores valores.

**Palavras-chave:** colheita, ergonomia, nível de ruído

## **EVALUATION OF THE NOISE LEVEL EMITTED BY A BEAN HARVESTING SYSTEM**

### **ABSTRACT**

The evaluation of a combine should include the determination noise level generated by the machine operation, beyond evaluate the required energy, the processing capacity, the losses and the product quality. The objective of this work was to evaluate the noise level produced by a bean harvester pulled by a tractor. Field tests were performed under different operational conditions. The noise produced by the system was higher than 85 dBA, which is considered the maximum level allowed for eight hours of work. The noise level decreased as the material feed rate was increased. The lowest noise level was obtained when the machine worked with 10 rows of plants,

independent of the speed and cylinder rotation of 420 rpm. The rear part of the system was the one that was subject to the highest noise level.

**Key words:** harvest, ergonomic, noise level

## INTRODUÇÃO

A agricultura moderna exige qualidade e produtividade nas operações que a compõem, em que a competitividade tem levado as empresas a reduzir custos e colocar produtos de alta qualidade no mercado consumidor. Além disso, tem-se tomado consciência de que os processos envolvidos na produção devem fornecer condições favoráveis aos trabalhadores que com eles se interagem.

Dentro desta ótica, ergonomia e segurança são aspectos de extrema importância. A palavra ergonomia é originária dos termos gregos *ergo* (trabalho) e *nomos* (regras), o que significa as regras para se organizar o trabalho. IIDA (1998) define ergonomia como sendo o estudo da adaptação do trabalho ao homem.

RIPOLI (1996) relata que a avaliação ergonômica num ensaio de máquinas envolveria, no mínimo, a execução das determinações do campo visual do operador, do nível de ruído e das dimensões do posto do operador. O ruído é considerado como principal fator, pode levar à surdez, quando o trabalhador é exposto a elevados níveis. Ressalta-se ainda que, nestas condições, ocorrem alterações nos batimentos cardíacos, aumento da pressão sanguínea, redução na sensibilidade auditiva e estreitamento dos vasos sanguíneos dos operadores, resultando, segundo HUANG e SUGGS (1968), na redução do desempenho e da produtividade dos mesmos. FIEDLER et al. (1995), verificando a opinião dos operadores de máquinas utilizadas na colheita de madeira, concluíram que eles consideraram o ruído excessivo e perturbador.

Em estudo de caracterização das fontes de ruído em tratores agrícolas, FERNANDES et al. (1991) classificaram as fontes em ordem crescente de níveis de ruído emitido, estando a exaustão dos gases em primeiro.

Quanto à posição com relação ao ouvido do operador, FERNANDES (1991) estudou o nível de ruído dos lados direito e esquerdo, não sendo encontrada diferença significativa nesse caso. Por meio de ensaios comparativos, ressaltou-se que o nível de ruído é maior para marchas mais longas, quando comparadas com as reduzidas, sendo o mesmo relativamente proporcional à rotação do motor. Nesse trabalho, concluiu-se ainda que os tratores apresentavam níveis de ruído muito acima dos limites de conforto estabelecidos pela Norma NBR 10152 (ABNT, 1987), que estabelece os níveis

máximos de ruído que proporcionam o mínimo de conforto aos ocupantes de um ambiente, sendo que o máximo estabelecido é de 75 dBA. Os níveis de ruído também estavam acima do limite de 85 dBA para 8 horas de exposição diária, estabelecido pela portaria nº 3214, de 8 de junho de 1978, publicada como Norma Regulamentadora NR-15 da Consolidação das Leis do Trabalho, conforme Tabela 1.

LIMA et al. (1998), trabalhando na determinação do nível de ruído e identificação das fontes em tratores florestais, concluíram que a fonte de maior ruído está diretamente ligada à localização do motor e à saída do coletor dos gases de exaustão, e que quanto maior a potência do motor do trator maior era o nível do ruído emitido. Nesse trabalho, determinou-se que, no posto do operador dos tratores “Feller-Buncher” e “Skidder” em condições de máxima rotação, o nível de ruído emitido foi de 80 dBA, o que, segundo os autores, foi baixo devido a presença da cabine, sendo que a um metro à frente do “Skidder” e atrás do “Feller-Buncher”, foi de 102 dBA e 96 dBA, respectivamente.

Com relação aos ruídos provocados por máquinas agrícolas, especialmente tratores, colhedoras, atomizadores, picadoras de forragem, trilhadoras e batedoras, dentre outros, ZANDER (1972) reconheceu que há possibilidade dos mesmos provocarem surdez permanente em trabalhadores sem proteção adequada. Analisando dados de níveis de ruído emitidos por tratores agrícolas com mais de 59 kW, SOUZA e LEVITICUS (1995) observaram que a presença da cabine de proteção, que até 1984 era considerada como acessório, contribui para minimizar o nível de ruído no ouvido dos operadores, mantendo-o em valores aceitáveis, e concluíram que a presença da cabine foi um fator relevante no isolamento acústico do posto de trabalho dos operadores.

A utilização adequada de máquinas e equipamentos agrícolas tem como as vantagens de melhorar o rendimento operacional e facilitar o trabalho do homem do campo (DELAFOSSÉ, 1986). Quando uma máquina proporciona conforto a seu operador, o desempenho deste aumenta sensivelmente. Segundo CAÑAVATE (1982), a falta de profissionais preparados para trabalhar na área de projeto e segurança, e de normas que estabeleçam limites, constituem os principais problemas da ergonomia em máquinas agrícolas.

Assim, é de fundamental importância conhecer o nível de ruído produzido por tratores, conjugados ou não com implementos ou máquinas, quando se pretende melhorar as condições de trabalho do profissional envolvido na colheita mecânica.

Considerando o avanço que o processo de colheita mecanizada vem tendo e a necessidade de estudos na área de ergonomia associada ao uso de máquinas agrícolas,

este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o nível de ruído emitido com o trator sem cabine em funcionamento, em função de seus quatro lados e do raio de afastamento do conjunto trator-colhedora em funcionamento e em operação, e no posto do operador.

Tabela 1. Limites de tolerância para ruídos segundo a Norma Regulamentadora NR 15, aprovada pela portaria nº 3214, de 8 de junho de 1978

Nível de ruído *	Máxima exposição diária permissível
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

\* Os níveis de ruído devem ser medidos em decibels (dB), com o medidor operando no circuito de equalização A.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram conduzidos no Campo Experimental da EMBRAPA Milho e Sorgo e no Laboratório de Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, localizados em Sete Lagoas, MG e Viçosa, MG, respectivamente.

O produto utilizado nos ensaios foi o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar Carioca e a máquina avaliada foi uma colhedora modelo “Double Master” (Figura 1), com sistema de trilha em fluxo axial. A colhedora apresentava 2,45 m de largura total, 2,12 m de bitola, 3,25 m de altura, 6,30 m de comprimento, 3406 kg de massa total,

0,543 m de diâmetro e 1,90 m de largura do cilindro trilhador, 2,70 m de comprimento do côncavo, 2400 kg de capacidade do tanque graneleiro, 6560 kg/h de capacidade de colheita, sendo exigido 53,18 kW para seu acionamento. Um trator Massey-Ferguson sem cabine, Modelo MF 620 fabricado em 1995, com potência nominal de 82 kW tracionou e acionou a colhedora.



Figura 1. Colhedora modelo “Double Master”

As variáveis investigadas nos ensaios foram a taxa de alimentação da máquina, obtida pela variação do número de linhas de feijão na leira e da velocidade de trabalho da máquina, e a rotação do cilindro trilhador, trabalhando com 420 e 540 rpm. Estas rotações foram obtidas, variando-se a rotação do motor do trator. Utilizaram-se as velocidades médias de 4,0 (2ª reduzida alta), 7,0 (3ª reduzida baixa) e 10,0 (1ª simples baixa) km/h.

Montou-se um experimento em esquema fatorial 3x3x2, com três constituições de leira, três velocidades de deslocamento e duas rotações do cilindro trilhador, instalado em delineamento inteiramente casualizado, com duas repetições. Os dados obtidos foram submetidos às análises de variância e de metodologia de superfície de resposta. Os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste t a 10% e o coeficiente de determinação. A análise estatística dos dados foi realizada, utilizando-se o programa computacional SAEG, versão 8.

Nas avaliações, foram consideradas duas faixas de teores de umidade de colheita, sendo uma de  $10,65 \pm 0,25$  e a outra de  $14,10 \pm 0,81\%$ . Os testes foram realizados em dois pivôs centrais com 6 anos de sistema de cultivo em plantio direto. O experimento com teor de umidade de 10,65% foi conduzido em um pivô, e o

experimento com teor de umidade de 14,10% em um outro pivô, buscando-se minimizar o desvio dos dados de teor de umidade de colheita.

O conjunto trator-colhedora foi avaliado em operação, nas condições em que se encontrava em campo. O nível de ruído foi determinado em um medidor de pressão sonora (decibelímetro) da marca MINIPA, modelo MSL-1350, no circuito de resposta lenta e de equalização "A", e a escala utilizada para medida do nível de ruído foi o decibel (dB).

Mediu-se o nível de ruído com o trator parado, em função de seus quatro lados e do raio de afastamento do conjunto trator-colhedora em funcionamento e em operação, e no posto do operador. Durante a realização dos testes, foi determinado o nível de ruído ambiente.

As determinações dos níveis de ruído basearam-se na NBR 9999 (ABNT, 1987). Esta é uma norma específica para a determinação de ruído em tratores e seus efeitos sobre o tratorista, sendo nela fixados todos os procedimentos de medidas. Conforme enunciado por esta norma, o microfone do medidor foi posicionado na altura do ouvido do operador durante a realização dos testes.

A medição dos níveis de ruído, com o trator parado, permitiu quantificar a contribuição do motor no ruído total do trator. Desta forma, foi possível determinar os níveis de ruído a que estão sujeitos os trabalhadores próximos ao trator, uma vez que a colhedora fornece a opção de ensaque.

Os níveis de ruído, medidos em função do lado e do raio de afastamento foram determinados separadamente, com o trator e com o conjunto trator-colhedora montado, sendo as leituras feitas em raios de afastamento, a partir da fonte do ruído, em cada um dos quatro lados até 20 m de distância, separadas em intervalos de cinco metros. Foram feitas cinco leituras, em cada parcela, e verificou-se que a dispersão entre os dados não ultrapassou 3 dBA.

As medições dos níveis de ruído com o conjunto trator-colhedora em operação foram realizadas com o medidor de pressão sonora posicionado próximo ao ouvido do operador, sendo efetuadas cinco leituras consecutivas para cada teste.

Os valores de umidade relativa, de temperatura do ar e de velocidade do vento foram fornecidos pela subestação meteorológica da EMBRAPA Milho e Sorgo. Embora tenham sido observadas condições climáticas favoráveis, durante a realização de todos os testes, foi utilizado o protetor de ventos no microfone do medidor de pressão sonora, com o intuito de uniformizar as condições de leitura e evitar a influência de rajadas de vento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo a norma NBR 9999 (ABNT, 1987), na posição e momento do ensaio de medição do nível de ruído, a temperatura ambiente deve estar entre -5 e 30°C e a velocidade do vento deve ser no máximo 5,0 m/s, sendo estas satisfeitas, pois, foram obtidos valores médios de 1,8 m/s de velocidade do vento, 44,5% de umidade relativa e 25°C de temperatura.

Outra exigência da norma NBR 9999 (ABNT, 1987) é que a diferença entre os valores de nível de ruído ambiente e aqueles obtidos nos testes deve ser superior a 10 dBA. Observou-se que a diferença entre o nível de ruído ambiente e os níveis medidos ficou acima do mínimo estabelecido pela norma. Os níveis de ruído ambiente observados durante os testes foram de 39,8 e 50,2 dBA, para o experimento com teor de umidade de colheita de 10,65 e de 14,10%, respectivamente. A medição do nível de ruído em função do raio de afastamento lateral do conjunto trator-colhedora foi realizada nas mesmas condições do experimento com teor de umidade de 10,65%.

Para estudar o comportamento do nível de ruído em função do número de linhas de feijão na leira, da velocidade de deslocamento e rotação do cilindro trilhador da colhedora, foram feitos cortes nos modelos de superfície de resposta ajustados, conforme apresentado na Figura 2.

Os dados de nível de ruído relativos à rotação do cilindro trilhador de 420 rpm em função da velocidade de deslocamento da máquina, fixando o número de linhas de feijão na leira, evidenciaram ligeiro aumento em seus valores. As leiras constituídas de 10 linhas apresentaram menores valores de nível de ruído que as demais, sendo que o mesmo aconteceu na velocidade de deslocamento da colhedora de 4,0 km/h, com valor de 92,4 dBA (Figura 2A).

O comportamento dos dados de nível de ruído relativo à rotação do cilindro trilhador de 540 rpm em função da velocidade de deslocamento da máquina, fixando o número de linhas de feijão na leira, foi diferente do evidenciado pela rotação de 420 rpm, pois, apresentou tendência à redução de seus valores. As leiras constituídas de 10 linhas e a velocidade de trabalho de 10,0 km/h apresentaram o menor nível de ruído, com valor de 93,7 dBA. Na velocidade de trabalho da colhedora de 8,20 km/h, todas as leiras apresentaram o mesmo nível de ruído, com valor de 94,2 dBA (Figura 2B).

Em geral, os dados de nível de ruído obtidos na rotação do cilindro trilhador de 540 rpm foram maiores que aqueles obtidos na rotação de 420 rpm (Figura 2). Comportamento semelhante foi obtido por FERNANDES (1991), LIMA et al. (1998) e VITÓRIA (2000).

A Figura 3 apresenta os cortes feitos no modelo de superfície de resposta, ajustado para o estudo do comportamento do nível de ruído em função do número de linhas de feijão na leira e da rotação do cilindro trilhador.

Os dados de nível de ruído em função do número de linhas de feijão na leira, fixando-se a rotação do cilindro trilhador, evidenciaram ligeiro decréscimo em seus valores. A leira de 10 linhas de feijão, na rotação do cilindro trilhador de 420 rpm, apresentou o menor nível de ruído, com valor de 93,8 dBA (Figura 3).

A rotação do cilindro trilhador de 420 rpm apresentou menores valores de nível de ruído que a de 540 rpm (Figura 3), apresentando comportamento semelhante ao obtido no experimento com teor de umidade de colheita de 10,65% (Figura 2).

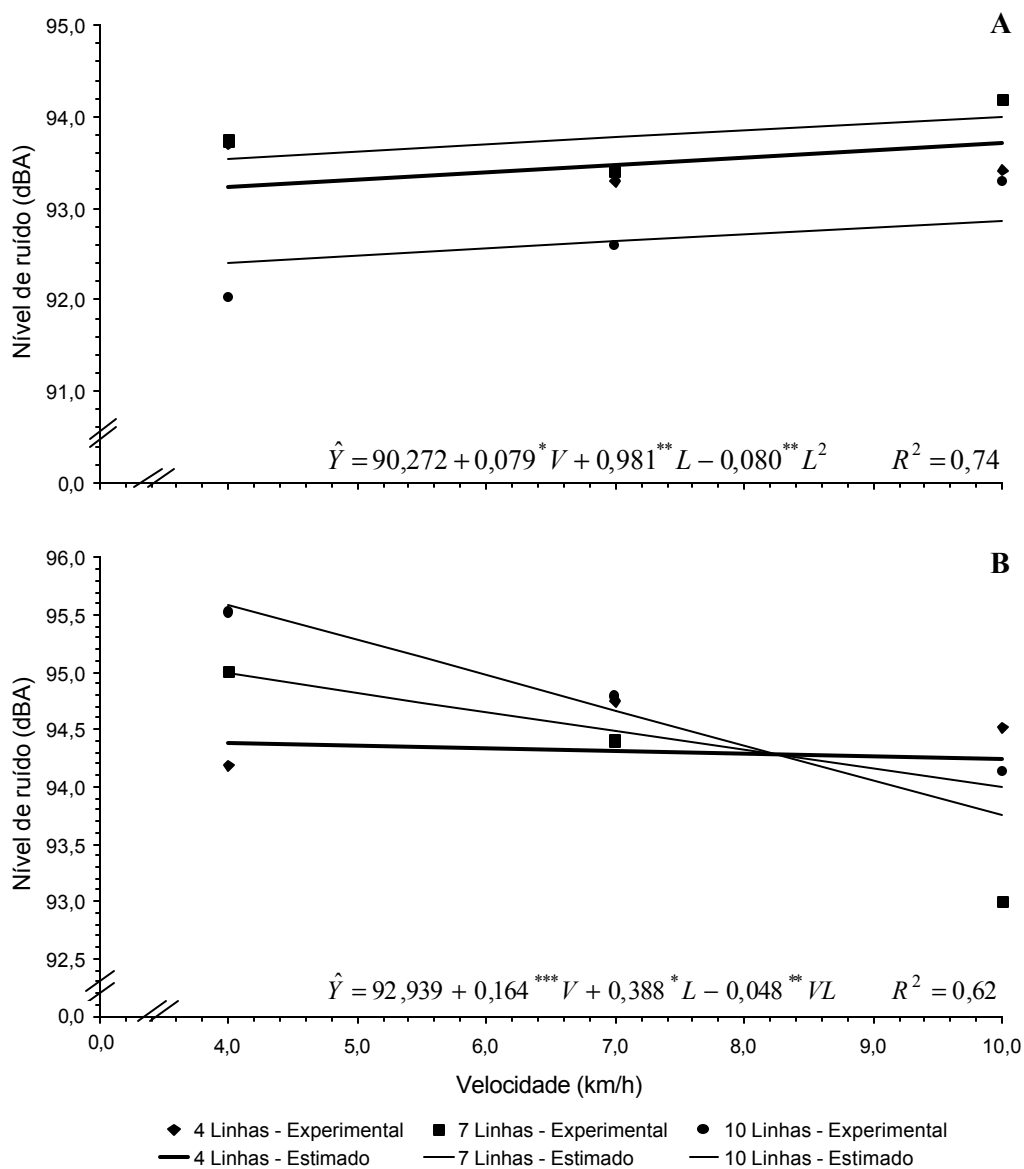
Verificou-se que o experimento com teor de umidade de colheita de 10,65% apresentou menores valores de nível de ruído que o de 14,10%. Isso ocorreu, provavelmente, porque quanto maior o teor de umidade do produto maior era o torque exigido no cilindro trilhador da colhedora para realizar a trilha, resultando, então, em sobrecarga no motor do trator.

Os níveis de ruído, observados nos experimentos com teor de umidade de 10,65 e 14,10%, estão acima do limite permitido pela norma NR 15 (Tabela 1), que limita o nível de ruído em 85 dBA para uma exposição máxima de 8 horas diárias.

Os níveis de ruído em função do lado, do raio de afastamento e da rotação no motor do trator são apresentados nas Figuras 4, 5, 6 e 7. Foram usadas as rotações do motor do trator de 1500 e 1700 rpm para atingir 420 e 540 rpm, respectivamente, na TDP do mesmo.

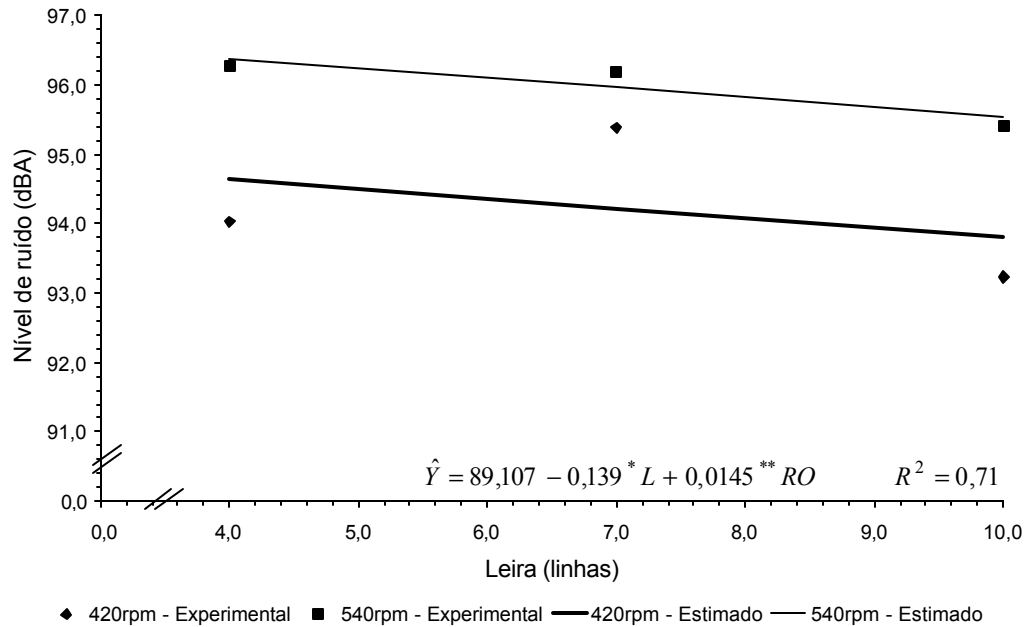
Com relação ao raio de afastamento, a fonte de descarga de gases do trator foi considerada o ponto inicial. A curva contínua representa os valores de nível de ruído, que se encontram acima dos aceitáveis pela norma NR 15 (Tabela 1).

Quando apenas o trator estava em funcionamento, os lados esquerdo e dianteiro apresentaram os maiores valores de nível de ruído, enquanto o lado traseiro apresentou os menores valores (Figura 4 e 6). Por outro lado, com o conjunto trator-colhedora em funcionamento, o lado traseiro é que apresentou maiores valores de nível de ruído, enquanto o lado dianteiro passou a apresentar os menores valores (Figura 5 e 7).



\*\* , \* e \*\*\* Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, pelo teste t

Figura 2. Estimativa do nível de ruído em função da velocidade de deslocamento da máquina, para as respectivas constituições de leira, com rotações do cilindro trilhador de 420 (A) e 540 rpm (B) e teor de umidade de colheita de 10,65%



\*\* e \* Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t

Figura 3. Estimativa do nível de ruído em função das constituições de leiras, para as respectivas rotações do cilindro trilhador, com teor de umidade de colheita de 14,10%

Observando as Figuras 5 e 7, verifica-se que, para o lado traseiro, os valores de nível de ruído somente encontram-se dentro do aceitável a uma distância superior a 14,6 e 18,0 m da fonte sonora, para as rotações do motor do trator de 1500 e 1700 rpm, respectivamente. O lado esquerdo, embora tenha deixado de ser o mais problemático, ainda apresenta elevado valor do nível de ruído com o afastamento lateral, sendo somente aceitável a 8,5 e 12,2 m da fonte sonora, para as rotações do motor do trator de 1500 e 1700 rpm, respectivamente. O lado dianteiro apresentou valores aceitáveis a partir de 3,2 e 4,8 m e, o direito a partir de 5,9 e 11,0 m, nas rotações do motor do trator de 1500 e 1700 rpm, respectivamente.

Como a colhedora fornece a possibilidade de ensaque, sendo necessário que um trabalhador fique em cima dela durante a operação de colheita para realizar a troca dos sacos, é importante ressaltar que este também deve usar o protetor auricular.

Observando as curvas obtidas do lado traseiro do conjunto, para as duas rotações do motor do trator, observa-se um ponto de maior nível de ruído coincidindo com a distância a qual o recolhedor se encontra da fonte de ruído, sendo ele o responsável pelo pico.

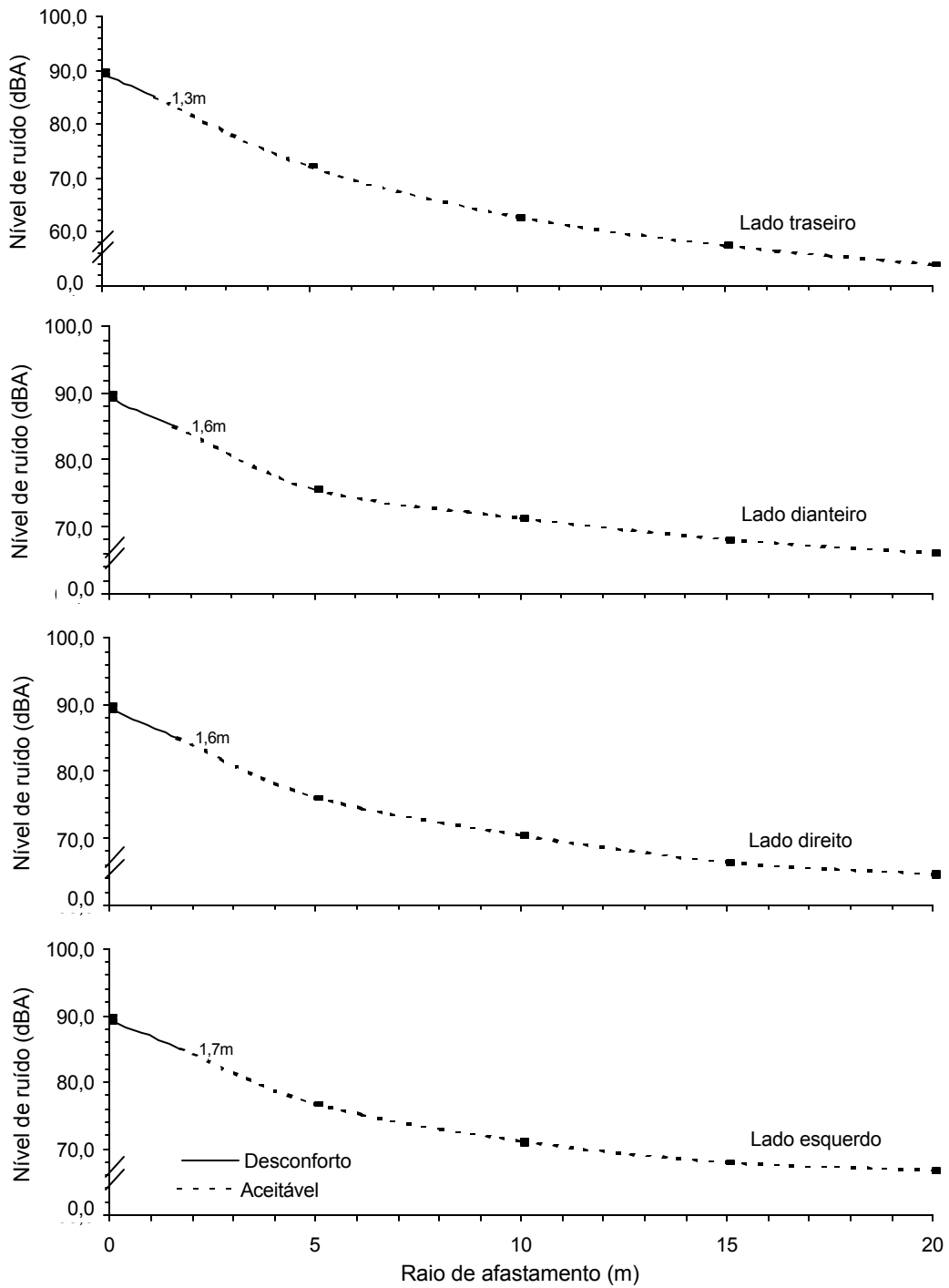


Figura 4. Níveis de ruído em função do raio de afastamento, para o trator em funcionamento, com rotação do motor do trator de 1500 rpm

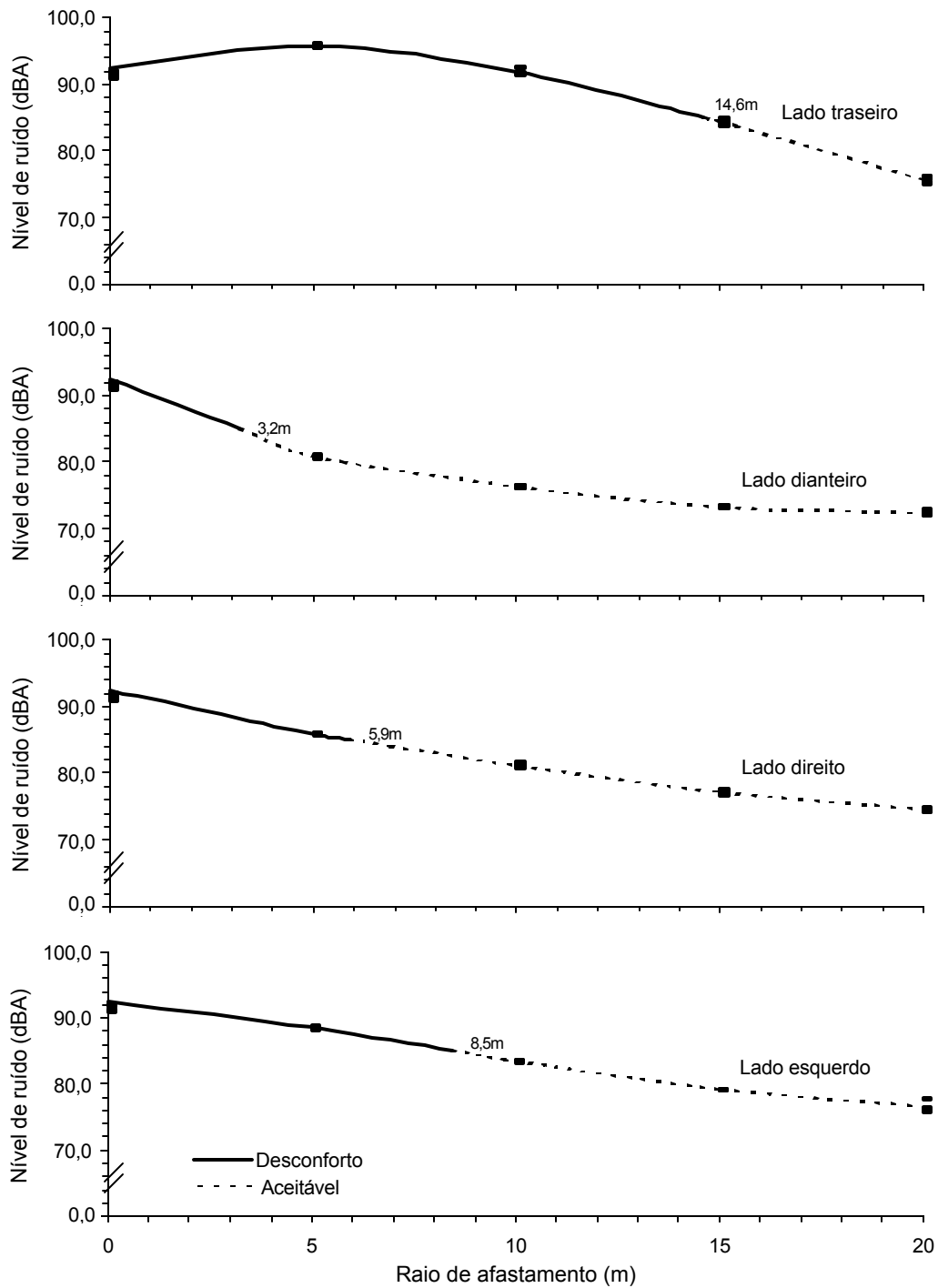


Figura 5. Níveis de ruído em função do raio de afastamento, para o conjunto trator-colhedora em funcionamento, com rotação no motor do trator de 1500 rpm

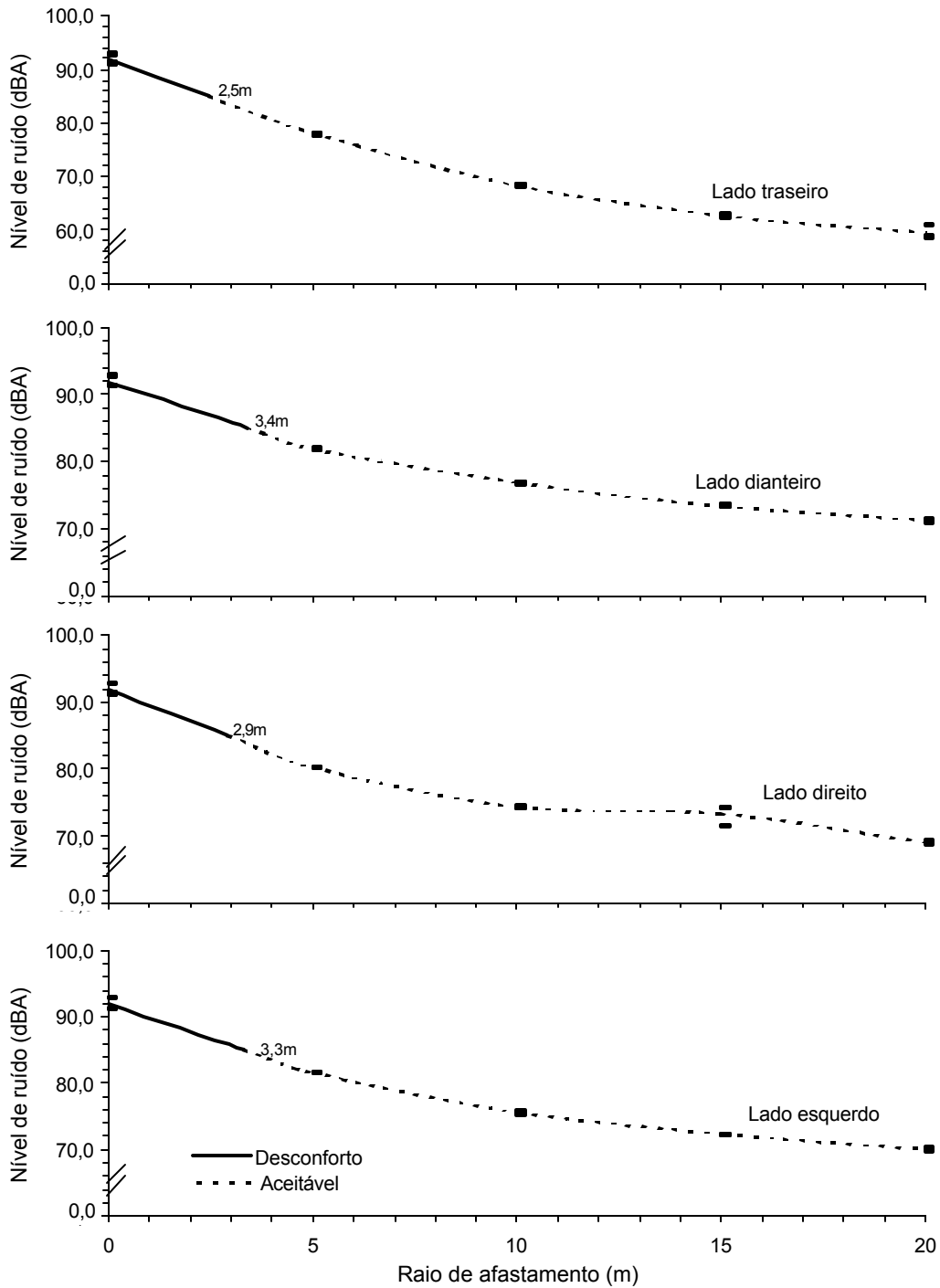


Figura 6. Níveis de ruído em função do raio de afastamento, para o trator em funcionamento, com rotação do motor do trator de 1700 rpm

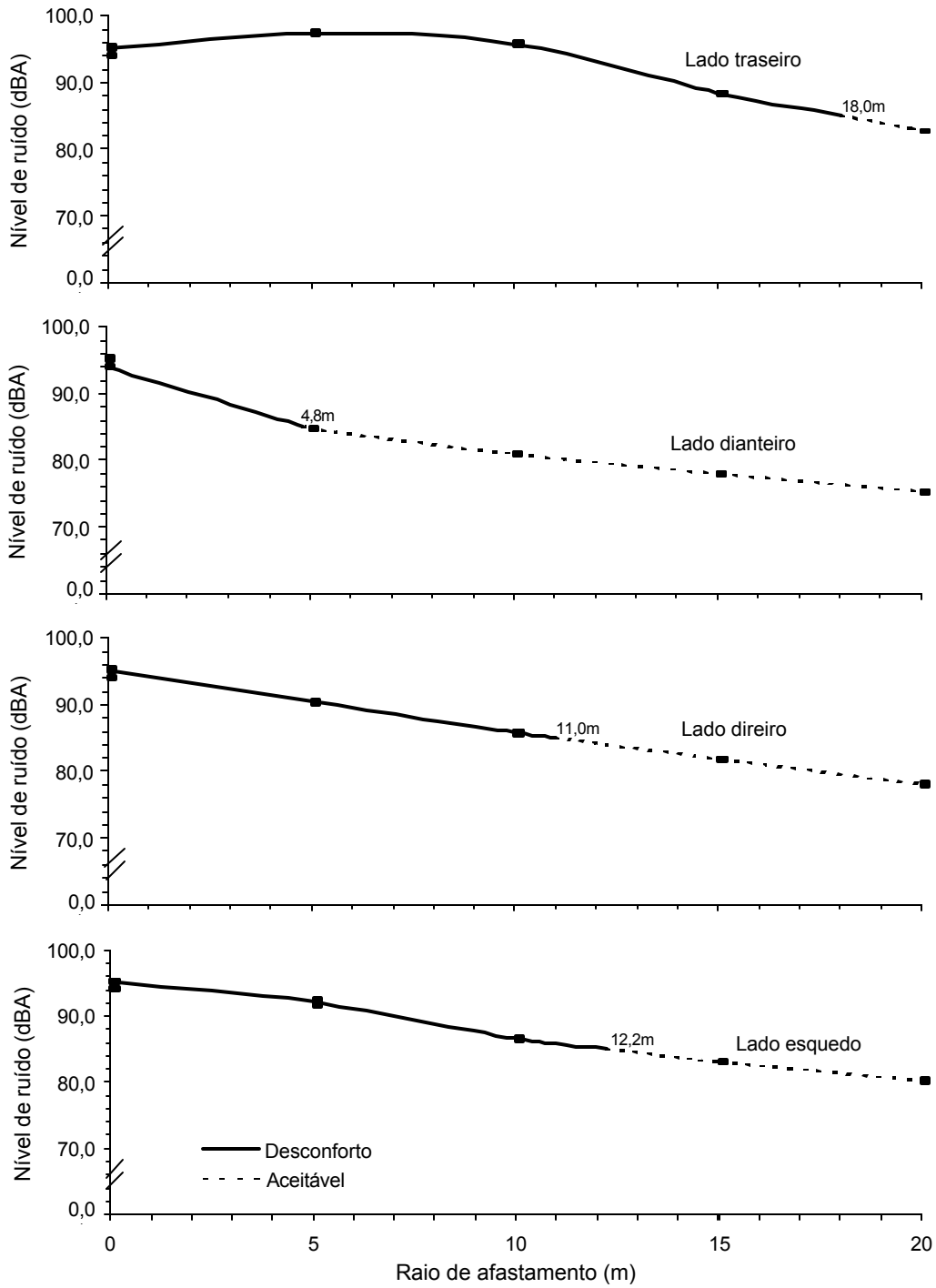


Figura 7. Níveis de ruído em função do raio de afastamento, para o conjunto trator-colhedora em funcionamento, com rotação do motor do trator de 1700 rpm

A rotação no motor do trator de 1700 rpm emitiu maiores valores de nível de ruído que a de 1500 rpm, em todas as situações. Resultados semelhantes foram obtidos por FERNANDES (1991), LIMA et al. (1998) e VITÓRIA (2000).

## CONCLUSÕES

1. O conjunto trator-colhedora emitiu níveis de ruído acima do limite de 85 dBA para oito horas de exposição diária, estabelecidos pela NR-15, como também acima dos limites estabelecidos pela NBR 10152, independentemente da condição testada.

2. Quando o conjunto colheu leiras constituídas de 10 linhas, apresentou menores valores de nível de ruído que nas demais, independentemente da velocidade de deslocamento do conjunto.

3. A rotação do cilindro trilhador de 420 rpm apresentou menores valores de nível de ruído.

4. O experimento em que a colheita foi realizada com teor de umidade de 10,65% apresentou menores valores de nível de ruído.

5. O nível de ruído diminuiu com o aumento do raio de afastamento, sendo que o lado traseiro foi o que apresentou os maiores valores.

6. Os valores de nível de ruído ficaram na faixa de 92,4 a 95,6 dBA e de 93,8 a 96,4 dBA para o experimento com teor de umidade de colheita de 10,65 e 14,10%, respectivamente.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e às Indústrias Reunidas Colombo Ltda., pelo auxílio à pesquisa e suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Norma NBR 10152 (NB 95)**: Níveis de ruído para conforto acústico. Rio de Janeiro. Dez., 1987. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Norma NBR 9999**: Medição do nível do ruído, no posto de operação, de tratores e máquinas agrícolas. Rio de Janeiro. 1987. 21p.

- CAÑAVATE, J. O. Ergonomía, higiene y seguridad en los tractores y máquinas agrícolas. **Máquinas y Tractores Agrícolas**, v.3, n.3. p.57-65, 1982.
- DELAFOSSÉ, R. M. **Máquinas sembradoras de grano grueso**. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile. 1986. 48p.
- FERNANDES, J. C. **Avaliação do nível de ruído em tratores agrícolas e seus efeitos sobre o operador**. Botucatu, SP: UNESP, 1991. 192p. (Tese de Doutorado)
- FERNANDES, J. C.; SANTOS, J. E. G.; ANDREATTA, J. A. As fontes de ruídos em tratores agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 20, Londrina, PR. **Anais...**, Londrina: SBEA, 1991. v.2, p.1305-1316.
- FIEDLER, N. C.; SOUZA, A. P. de; MINETTE, L. J.; MACHADO, C. C.; CERESOLI, V. C. Avaliação do ruído emitido por máquinas utilizadas na colheita de madeiras. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, SIF. Salvador, 1995, **Anais...** 1995. p.187-193.
- HUANG, B. K.; SUGGS, C. W. Tractor noise and operator performance. **Transactions of the ASAE**, v.11, n1, Jan-Feb. p.1-5, 1968.
- IIDA I. **Ergonomia: projeto e produção**. São Paulo: Edgard Blucher. 1998. 465p.
- LIMA, J. S. S.; FERNADES, H. C.; VITÓRIA, E L. da Determinação do nível de ruído e identificação da fonte em tratores florestais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.2, p.55-61, dez. 1998.
- RIPOLI, T. C. C. Ensaio e certificação de máquinas para colheita de cana-de-açúcar. In: MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas: ensaios e certificações**. Piracicaba, SP: FEALQ, p.636-674, 1996.
- SOUZA, E. G.; LEVITICUS, L. I. **Analysis of sound level from Nebraska tractor test data**. Lincon: Nebraska Power Laboratory. 1995. 21p.
- ZANDER, J. **Ergonomics in machine design: a case study of the self-propelled combine harvester**. Wageningen: Veenman e Zonen, 1972. 161p.
- VITÓRIA, E. L. da **Avaliação do nível de ruído emitido por tratores em diferentes operações agrícolas**. Viçosa, MG: UFV. Abr., 2000. 76p. (Tese de Mestrado)

# **MODELO DE SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE TRILHA E SEPARAÇÃO MECÂNICA EM UMA COLHEDORA DE FLUXO AXIAL PARA FEIJÃO**

## **RESUMO**

A análise dos sistemas de trilha e separação tem sido importante para a redução de perdas e o aumento da capacidade de processamento das máquinas de colheita. A simulação de processos tem se mostrado como uma ferramenta de grande utilidade no auxílio ao projeto de novas máquinas, ou no aprimoramento das já existentes. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de implementar um modelo de simulação da trilha e separação mecânica do feijão, para uma colhedora de arrasto com sistema de trilha em fluxo axial. Testes experimentais foram conduzidos, utilizando-se uma colhedora de feijão para validação do modelo implementado. Comparando os resultados de eficiência de trilha e separação simulados com aqueles obtidos experimentalmente, obteve-se um desvio médio de 1,78%, o que foi considerado satisfatório para aplicações em engenharia de colheita.

**Palavras-chave:** feijão, colheita, trilha e separação, simulação

## **SIMULATION MODEL OF THE THRESHING AND SEPARATING PROCESS IN BEAN AXIAL FLOW HARVESTER**

### **ABSTRACT**

The threshing and separating process analysis have become important for reducing grain losses and increasing the processing capacity of harvesting machines. The process simulation has shown to be an important tool for designing new machines or improving the existing ones. The objective of this work was to develop software for simulating the threshing and separation process in a bean axial flow harvester. Experimental tests were performed using a bean harvester for model validation. The comparison between the simulated and experimental values of grain separation efficiency showed that the error of the average simulation model was 1.78%, which was considered satisfactory for engineering applications.

**Key words:** beans, harvesting, threshing and separation, simulation

## INTRODUÇÃO

Com uma produção de 2915 mil toneladas, na safra 1999, e um consumo per capita de 18,3 kg/ano (BRASIL, 2000), o Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.). De acordo com SANTOS e BRAGA (1998), desde a última década, o feijão deixou de ser uma cultura de subsistência, tornando-se uma cultura tecnificada, com maior produtividade e produto final de melhor qualidade.

Com a utilização de grandes áreas de cultivo, bem como a escassez de trabalhadores no meio rural e a demanda de mão-de-obra flutuante durante os processos agrícolas, a cultura do feijão tem gerado uma crescente necessidade da mecanização em todas as etapas da produção.

A colheita do feijão envolve as etapas de arranquio ou corte, recolhimento e alimentação, trilha, separação e limpeza do produto. A trilha, quando mal conduzida, pode ser responsável por significativa perda de produto (SOUZA et al., 1998). SMITH (1986) estudou as perdas ocorridas em cada etapa do processo de colheita mecânica do feijão e mostrou que elas variaram de 1 a 13%, com média de 3,7%, sendo que 20% das perdas ocorreram no corte (arranquio) feito com ceifador, 20% no enleiramento e 60% nas etapas de recolhimento, trilha e separação.

Para propor melhorias nas máquinas, é importante realizar estudos no sentido de conhecer melhor o desempenho dos sistemas que englobam a colheita. Com o conhecimento adquirido, podem ser feitas mudanças para diminuição de perdas ocasionadas no processo de colheita.

A construção de abstrações de sistemas para facilitar a experimentação e a avaliação é tanto uma arte como uma ciência. Esta técnica é particularmente útil na resolução de problemas de sistemas complexos, em que soluções fáceis não se apresentam por si mesmas. Esta técnica tem se tornado uma importante ferramenta para os engenheiros, pois, oferece solução para todos esses problemas, conforme mostrado por LIANG et al. (1971), HUYNH et al. (1982), TROLLOPE (1982), PITT (1982), PELEG (1984), dentre outros.

Assim, para estudar os sistemas, são construídas abstrações, também denominadas modelos, que consistem numa descrição estruturada proporcionando um entendimento comum sobre a organização, o comportamento e nomenclatura dos sistemas. Na descrição do comportamento do sistema, em que se procura compreender o fenômeno em estudo, lança-se mão de formulações matemáticas e lógicas (LAW e KELTON, 1991).

O processo de colheita mecânica pode ser dividido em vários sistemas, como, por exemplo, um que abrange o mecanismo de corte e recolhimento, um para o mecanismo de trilha, outro para o mecanismo de separação, e, por fim, um para o mecanismo de limpeza, sendo que o de trilha é considerado por vários autores como o mais complexo. Um modelo para estudar o sistema de trilha convencional foi proposto por HUYNH et al. (1982), que considera a trilha como uma ocorrência probabilística, sendo determinada pelo modelo a eficiência de separação do côncavo, que segundo NORRIS e WALL (1986) é definida como a relação entre os grãos debulhados que passaram pela grade do côncavo e os grãos que entraram na máquina. Este modelo é de fácil utilização, podendo ser adaptado para outros produtos ou outros tipos de sistema de trilha.

A simulação de processos através do desenvolvimento de modelos matemáticos e programas computacionais, tem se mostrado como uma ferramenta de grande utilidade no auxílio ao projeto de novas máquinas, ou no aprimoramento das já existentes, permitindo a diminuição de custos e tempo (SOUZA et al., 1998), além de minimizar problemas com segurança.

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de implementar um modelo de simulação da trilha e separação mecânica, para uma máquina de arrasto com sistema de trilha em fluxo axial, e validá-lo por meio de resultados experimentais.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no Laboratório de Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa e no Campo Experimental da EMBRAPA Milho e Sorgo.

O produto utilizado nos ensaios foi o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar Carioca, sendo a máquina avaliada uma colhedora de arrasto modelo “Double Master” (Figura 1), com sistema de trilha em fluxo axial. A máquina foi tracionada e acionada por um trator Massey-Ferguson, Modelo MF 620, com potência nominal de 82 kW. A máquina estudada apresentava 2,45 m de largura total, 2,12 m de bitola, 3,25 m de altura, 6,30 m de comprimento, 3406 kg de massa total, 2420 kg de capacidade do tanque graneleiro, 6560 kg/h de capacidade de colheita, sendo exigido 53,18 kW para seu acionamento.



Figura 1. Colhedora modelo “Double Master”

### **Implementação do modelo de simulação**

O modelo de simulação foi implementado com base no proposto por HUYNH et al. (1982), assumindo-se as mesmas suposições feitas pelo autor, ou seja, divisão do processo de colheita em três eventos, e as três hipóteses usadas no desenvolvimento do modelo probabilístico. Para o produto ser separado na região de debulha, a seguinte seqüência de ocorrer:

Evento 1 – separação dos grãos da vagem pela ação da trilha;

Evento 2 – migração dos grãos através da camada de palha;

Evento 3 – passagem dos grãos através da grade do côncavo.

As principais hipóteses usadas no desenvolvimento do modelo probabilístico baseiam-se nas seguintes teorias:

- a) qualquer grão está igualmente apto a ser debulhado em qualquer tempo;
- b) qualquer grão está igualmente apto a alcançar a superfície da grade do côncavo em qualquer tempo;
- c) qualquer grão está igualmente apto a passar através da grade do côncavo em qualquer tempo.

De acordo com o modelo proposto por HUYNH et al. (1982), a eficiência de trilha e separação (Equação 1) pode ser calculada em função da probabilidade de ocorrer a trilha do produto, a migração dos grãos através da camada de palha e a passagem dos grãos através do côncavo.

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m \frac{\lambda_2^j \cdot \lambda_3 (\lambda_2^j - \lambda_3) \cdot e^{-\lambda_1 t_c} + \lambda_3 \cdot \lambda_1 \cdot (\lambda_3 - \lambda_1) \cdot e^{-\lambda_2^j t_c} + \lambda_1 \cdot \lambda_2^j \cdot (\lambda_1 - \lambda_2^j) \cdot e^{-\lambda_3 t_c}}{(\lambda_1 - \lambda_2^j) \cdot (\lambda_2^j - \lambda_3) \cdot (\lambda_1 - \lambda_3)} \quad (1)$$

em que,

$\eta_T$  - eficiência de separação do côncavo, dec.;

$m$  - número de camadas em que foi dividida a camada de palha-grão na região entre o cilindro e o côncavo, no sentido radial;

$\lambda_1$  - taxa média de ocorrência do processo de trilha, grãos por segundo;

$\lambda_2^j$  - taxa média de ocorrência da passagem dos grãos pela camada de palha, grãos por segundo;

$\lambda_3$  - taxa média de ocorrência da passagem dos grãos pelos furos do côncavo, grãos por segundo;

$t_c$  - tempo de permanência dos grãos na região de debulha, s.

Como a metade superior da circunferência do cilindro trilhador é fechada, considerou-se o comprimento do côncavo igual ao comprimento do helicóide do cilindro trilhador, uma vez que o produto pode ser debulhado tanto no côncavo quanto na face superior do cilindro trilhador. O tempo de permanência dos grãos na região de debulha foi determinado pela relação entre a velocidade do cilindro trilhador e o comprimento do côncavo, conforme a seguinte expressão:

$$t_c = \frac{L_f}{V_t} \quad (2)$$

em que,

$L_f$  - comprimento do côncavo, m;

$V_t$  - velocidade periférica do helicóide do cilindro trilhador, m/s.

Para simular o processo de debulha, considerou-se que a velocidade de separação dos grãos de suas ligaduras é proporcional à energia despendida para a colheita e à transmissibilidade desta energia, através da densidade da camada de palha. A energia despendida foi considerada proporcional à energia motriz do helicóide do cilindro trilhador, e a transmissibilidade da energia está relacionada ao inverso da abertura entre cilindro e côncavo. Portanto, foi utilizada a seguinte relação para o cálculo de  $\lambda_t$ :

$$\lambda_1 = k_t \cdot \frac{\rho \cdot V_t^2 \cdot L_c \cdot D_c}{Q \cdot C_a} \quad (3)$$

em que,

$k_t$  - constante de debulha, adm.;

$\rho$  - densidade livre da palhada, kg/m<sup>3</sup>;

$L_c$  - comprimento do cilindro, m;

$D_c$  - diâmetro do cilindro trilhador, m;

$Q$  - taxa de alimentação de palhada do sistema de trilha, kg/s;

$C_a$  - abertura entre cilindro e côncavo, m.

Para determinar a migração dos grãos separados através da camada de palha, assumiu-se que, durante o tempo de residência no côncavo, os grãos soltos estavam submetidos à força da gravidade e à aceleração centrífuga. A força deste movimento faz com que os grãos superem a resistência da palha e migrem para um raio maior. Para o cálculo da taxa de ocorrência desse evento, utilizou-se a Equação 4. O valor de  $\tau$  foi determinado, após uma mudança na expressão proposta por HUYNH et al. (1982), que, ao invés de usar a velocidade média de avanço da palhada pelo côncavo foi usada a velocidade periférica do cilindro (Equação 5). A velocidade periférica do cilindro foi usada, tomando-se como base que o sistema de trilha é alimentado em fluxo axial e o côncavo é consideravelmente grande.

$$\lambda_2^j = \frac{1}{\tau} \quad (4)$$

$$\tau = k_m \cdot \sqrt{\frac{\delta}{g + \frac{2 \cdot V_t^2}{D_c}}} \quad (5)$$

em que,

$\tau$  - tempo médio para o grão ultrapassar uma camada de palha-grão, de espessura  $\delta$ , até atingir o côncavo, s;

$k_m$  - constante de correção, adm.;

$g$  - aceleração da gravidade, m/s<sup>2</sup>;

$\delta$  - espessura da camada até a posição j, m.

A passagem dos grãos que atingem a grade do côncavo foi determinada, assumindo-se que para um grão que tenha passado através da camada de palha e esteja deslizando através da superfície do côncavo numa velocidade constante, presumivelmente, ele passará também através do côncavo, se sua projeção sobre a superfície do côncavo for compatível. A relação utilizada no modelo para determinar  $\lambda_3$  foi a seguinte:

$$\lambda_3 = \left( \frac{A_f - A_g}{A_f} \right) \cdot \frac{1}{t_e} \quad (6)$$

em que,

$A_f$  - área do furo da peneira do côncavo, m<sup>2</sup>;

$A_g$  - área equivalente do grão, m<sup>2</sup>;

$t_e$  - tempo de permanência do grão sobre o furo da peneira, s.

O tempo de permanência do grão sobre o furo da peneira foi determinado pela seguinte expressão:

$$t_e = \frac{D_f}{V_t} \quad (7)$$

em que,

$D_f$  - diâmetro do furo da peneira do côncavo, m.

Portanto, existe a probabilidade de ocorrer a trilha do produto, a migração dos grãos através da camada de palha e a passagem dos grãos através do côncavo. A relação entre estas probabilidades, que fornece a eficiência de separação do sistema, é apresentada na Equação 1.

### **Procedimentos experimentais**

Em cada teste, foram determinados a velocidade de deslocamento da máquina, a massa de grãos colhidos e o tempo necessário para colhê-la, o teor de umidade dos grãos e a massa de grãos perdida no sistema de trilha e separação.

Nas avaliações, foram consideradas duas faixas de teores de umidade de colheita, sendo uma de  $10,65 \pm 0,25$  e a outra de  $14,10 \pm 0,81\%$ . Os testes foram realizados em dois pivôs centrais com 6 anos de sistema de cultivo em plantio direto. O experimento com teor de umidade de colheita médio de 10,65% foi conduzido em um pivô, e o experimento com 14,10% de teor de umidade em um outro pivô, buscando-se minimizar o desvio dos dados de teor de umidade de colheita.

A lavoura de feijão foi conduzida com espaçamento de 0,45 metros e 12 sementes por metro linear, sendo que o stand final ficou com 9,7 plantas por metro linear.

Para determinar a produtividade da lavoura ensaiada, o produto colhido e perdido pela máquina foi quantificado em cada teste. A produtividade foi determinada pelo quociente da quantidade total de produto colhido em cada teste, determinada pela

soma das massas de grãos colhidos mais os perdidos, pela respectiva área, conforme apresentado na expressão a seguir:

$$P_r = 10 \cdot \left[ \frac{m_c}{A_c} + \frac{m_l + m_r + m_s + m_n + m_a}{A} \right] \quad (8)$$

em que,

- $P_r$  - produtividade da área, kg/ha;
- $m_c$  - massa de grãos coletada no granelheiro da máquina, g;
- $m_r$  - massa de grãos perdida no recolhedor, g;
- $m_l$  - massa de grãos perdida no sistema de limpeza, g;
- $m_s$  - massa de grãos perdida no sistema de trilha e separação, g;
- $m_n$  - massa de grãos perdida naturalmente no campo, g;
- $m_a$  - massa de grãos perdida no arranquio e enleiramento, g;
- $A$  - área em que a medição de perdas foi realizada, m<sup>2</sup>;
- $A_c$  - área em que os grãos foram colhidos pela máquina, m<sup>2</sup>.

Utilizando os grãos limpos, obteve-se a massa específica aparente dos grãos de feijão com o auxílio de uma balança de peso hectolítrico, marca Dallemole, com capacidade de ¼ de litro. As determinações da massa específica aparente foram realizadas em cinco repetições.

Além da massa específica aparente, também foi determinada a densidade da palhada e a razão em peso seco da relação palha-grãos da cultura. Estes parâmetros serviram para determinar a quantidade de massa processada pela máquina, nos testes. A densidade livre da palhada foi determinada com o auxílio de dois recipientes de volume conhecido, enquanto certa quantidade de massa de palha foi colocada dentro do recipiente, livremente, sem compactação. Usaram-se dois recipientes de volumes diferentes, buscando minimizar os erros envolvidos nessa medição. Finalmente, foi determinado o peso da massa de palha seca, sendo sua densidade expressa em quilogramas por metro cúbico de recipiente.

Após a realização de cada teste, foram retiradas amostras no tanque granelheiro da máquina para a determinação do teor de umidade do produto, usando-se o método padrão em estufa a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  por 24 h, com três repetições, de acordo com BRASIL (1992).

A taxa de alimentação utilizada no modelo de simulação foi obtida por meio da determinação da massa de grãos, que alimentou o sistema de trilha em cada teste, e da relação palha-grão da cultura. Por meio de multiplicação entre estes dois parâmetros, obteve-se a taxa de alimentação de palhada do sistema.

A eficiência de trilha e separação do côncavo real foi obtida por meio da relação entre a massa de grãos separados no côncavo e a massa inicial de alimentação do mesmo, conforme apresentado na Equação 9.

$$\eta_r = \frac{m_1 + m_2}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (9)$$

em que,

$m_1$  - massa de grãos transferida para o tanque graneleiro, kg;

$m_2$  - massa da perda no sistema de limpeza, kg;

$m_3$  - massa da perda no sistema de separação, kg.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros e características da máquina e cultivar, utilizados como constantes e dados de entrada do modelo de simulação desenvolvido, são apresentados na Tabela 1.

Por meio de dados observados e calculados, apresentados nas Tabelas 1, 5 e 6, foi possível desenvolver um programa computacional para simulação do processo de trilha e separação do côncavo, na cultura do feijão, em uma colhedora com sistema de trilha alimentado em fluxo axial, em campo.

Nas Figuras 2 e 3 são apresentadas as janelas do programa computacional, desenvolvido na linguagem de programação Visual Basic, versão 6. Os valores utilizados para o fator de debulha e a constante de correção foram obtidos por meio de método numérico de tentativa e erro, até se ter um erro mínimo na determinação da eficiência de trilha e separação.

Tabela 1. Características da máquina e do feijão utilizadas na realização dos testes e simulação

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
<b>Máquina</b>	
Diâmetro do cilindro trilhador (m)	0,543
Comprimento do côncavo (m)	2,700
Largura do cilindro (m)	1,900
Abertura entre o cilindro e o côncavo (m)	0,02
Diâmetro médio dos furos da peneira (m)	0,01842
<b>Feijão</b>	
Densidade da palhada (kg/m <sup>3</sup> )	15,419
Diâmetro equivalente dos grãos (m)	0,00621
Fator de debulha	0,000215
Fator de correção	8,915

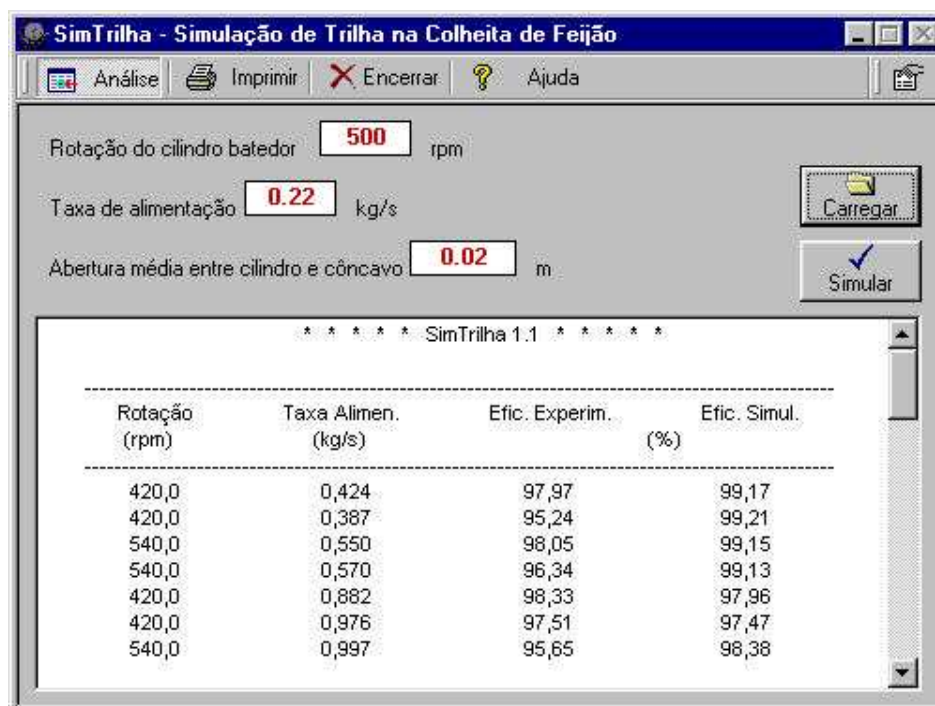


Figura 2. Janela principal do programa computacional desenvolvido, denominado SimTrilha

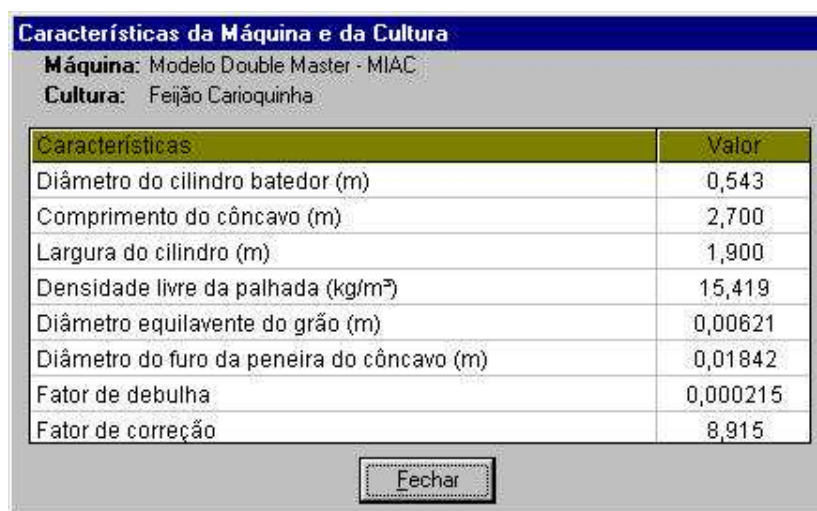


Figura 3. Janela de configuração das características da máquina e da cultura

Na Tabela 2, constam os valores de produtividade média determinados nos experimentos com teor de umidade de 10,65 e 14,10%. Observa-se que o experimento com teor de umidade de 14,10% apresentou maiores valores de produtividade, em todas as constituições de leiras. As lavouras foram formadas em épocas diferentes, sendo que o experimento com teor de umidade de 14,10% foi realizado um mês após o término do

experimento com teor de umidade de 10,65%, o qual foi realizado em agosto. A produtividade observada no experimento com teor de umidade de 14,10% foi 12% maior que aquele com 10,65%.

Na Tabela 3, são apresentados os dados de densidade livre da palhada medidos nos experimentos com teor de umidade de 10,65 e 14,10%. Os dados de densidade livre da palhada, no experimento com 14,10% de teor de umidade, evidenciaram ligeiro acréscimo de seus valores, quando comparados com os do experimento com 10,65% de teor de umidade.

Os dados de densidade aparente do feijão, determinados nos experimentos com teor de umidade de 10,65 e 14,10%, constam na Tabela 4. Observou-se que os valores médios de densidade aparente não apresentaram diferença significativa entre os teores de umidade.

Os dados de produtividade e de densidade aparente foram corrigidos, matematicamente, para o teor de umidade dos grãos de 11%.

Tabela 2. Produtividade média das lavouras para o experimento com teor de umidade de colheita de 10,65 e 14,10%

Leira (linhas)	Produtividade (kg/ha)	
	10,65%	14,10%
4	2226,78	2717,35
7	2145,06	2414,73
10	2342,76	2464,97
Média	2238,20	2532,35

Tabela 3. Densidade livre da palhada da cultura do feijão para o experimento com teor de umidade de colheita de 10,65 e 14,10%

Recipiente	Densidade livre (kg/m <sup>3</sup> )	
	10,65%	14,10%
Caixa pequena (0,27 m <sup>3</sup> )	16,81	17,06
Caixa grande (0,64 m <sup>3</sup> )	14,03	14,88
Média	15,42	15,97

Tabela 4. Densidade aparente do feijão produzido no experimento com teor de umidade de colheita de 10,65 e 14,10%

Teor de umidade (%)	Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )
10,65	865,07
14,10	865,90

### **Simulação da eficiência de trilha e separação mecânica do feijão**

Nas Tabelas 5 e 6 são apresentados os dados de taxa de alimentação do sistema de trilha, os dados observados e simulados de trilha e separação do côncavo e os erros relativos obtidos nos experimentos com teor de umidade de 10,65 e 14,10%, respectivamente.

O modelo de simulação implementado apresentou erro relativo médio na determinação da eficiência de separação do côncavo de 2,48 e 1,28%, para as rotações de 420 e 540 rpm do cilindro trilhador, respectivamente, no experimento com teor de umidade de 10,65%, com erro médio de 1,88%. No experimento com teor de umidade de 14,10%, obtiveram-se 1,50 e 1,84% de erro relativo, para as rotações de 420 e 540 rpm do cilindro trilhador, respectivamente, com erro médio de 1,67%. Assim, em geral, o modelo apresentou um erro relativo médio de 1,78%.

O modelo de simulação implementado foi validado, representando com satisfatória precisão os resultados experimentais, sendo, então, considerado satisfatório para aplicação em engenharia de colheita.

Em ambos os teores de umidade, os melhores valores de eficiência de trilha e separação foram observados nas menores taxas de alimentação, conforme apresentado na Figura 4, sendo que os melhores valores foram 99,34 e 99,30%, respectivamente para a rotação do cilindro trilhador de 420 e 540 rpm, obtidos do experimento com teor de umidade de 10,65%. No experimento com teor de umidade de 14,10%, os maiores valores foram 99,19 e 99,14%, respectivamente para a rotação do cilindro trilhador de 420 e 540 rpm.

Os comportamentos evidenciados nas curvas obtidas com os dados observados e os simulados, para ambos os experimentos, apresentaram semelhanças (Figura 4). A curva simulada para o experimento com teor de umidade de 10,65%, na rotação de 420 rpm, foi a que mais diferiu dos valores experimentais. Observando as curvas simuladas, pode-se concluir que quanto maior a taxa de alimentação menor foi a eficiência de trilha e separação. Isso foi devido ao aumento da taxa de alimentação, pois, no modelo

implementado, a probabilidade de ocorrer a trilha é estimada em função do tempo de permanência do produto na região de debulha, que é função do comprimento do helicóide e da velocidade periférica do cilindro trilhador. Para uma determinada máquina, o tempo de permanência será constante se a rotação do cilindro trilhador for mantida constante. Dessa forma, é necessário maior tempo para a debulha, quando a taxa de alimentação é incrementada.

Os dados experimentais apresentaram uma tendência ligeiramente constante, enquanto nos simulados a tendência foi decrescente, em função da taxa de alimentação da máquina. Essa diferença pode ser atribuída ao fato de que, no modelo de simulação desenvolvido, todo comprimento do côncavo é analisado como tendo a mesma probabilidade de ocorrer a trilha, enquanto foi observado, em campo, que a maioria dos grãos eram debulhados logo no início do côncavo.

Observando as curvas obtidas do modelo de simulação, apresentadas na Figura 4 (A e B), verifica-se que, em ambos os teores de umidade, a rotação de 540 rpm apresentou maiores valores de eficiência de separação que a rotação de 420 rpm. Isso aconteceu, provavelmente, porque a rotação de 540 rpm transmite maior energia para a debulha do que a de 420 rpm, sendo o modelo sensível a esta variação.

Os valores obtidos para a constante de debulha e constante de correção foram 0,000215 e 8,915, respectivamente. Esses valores foram estimados a partir dos dados coletados nos experimentos com teor de umidade de 10,64 e 14,10%, sendo estas constantes as mesmas em ambos os experimentos. As análises foram realizadas separadamente, pois, suponha-se que a diferença de umidade iria fornecer diferentes valores desses parâmetros, o que não aconteceu. Com isso, pode-se dizer que a diferença de teor de umidade dos grãos entre os experimentos não influenciou a perda do sistema de trilha e separação.

Tabela 5. Resultados das eficiências de separação do côncavo experimental e simulada, taxa de alimentação do sistema de trilha, erro relativo, velocidades de deslocamento da máquina, constituição de leira e rotação do cilindro trilhador obtidos no experimento com teor de umidade de 10,65%

Parâmetros	Rotação de 420 rpm								
	4 linhas			7 linhas			10 linhas		
	4	7	10	4	7	10	4	7	10
	----- km/h -----								
Taxa de alimentação (kg/s)	0,240	0,380	0,438	0,375	0,588	0,758	0,611	1,095	1,234
Eficiência de separação experimental (%)	90,88	96,74	98,23	99,00	98,59	98,33	94,30	93,14	95,50
Eficiência de separação simulada (%)	99,34	99,22	99,15	99,22	98,92	98,46	98,87	96,70	95,64
Erro relativo (%)	9,31	2,56	0,94	0,23	0,33	0,13	4,84	3,82	0,14
	Rotação de 540 rpm								
Taxa de alimentação (kg/s)	0,346	0,516	0,524	0,589	0,873	0,999	0,791	1,166	1,476
Eficiência de separação experimental (%)	98,25	98,17	96,57	97,56	98,40	98,33	97,36	98,51	98,89
Eficiência de separação simulada (%)	99,30	99,18	99,17	99,11	98,68	98,37	98,84	97,82	96,34
Erro relativo (%)	1,07	1,03	2,69	1,59	0,28	0,05	1,53	0,70	2,58

Tabela 6. Resultados das eficiências de separação do côncavo experimental e simulada, taxa de alimentação do sistema de trilha, erro relativo, velocidades de deslocamento da máquina, constituição de leira e rotação do cilindro trilhador obtidos no experimento com teor de umidade de 14,10%

Parâmetros	Rotação de 420 rpm								
	4 linhas			7 linhas			10 linhas		
	4	7	10	4	7	10	4	7	10
	----- km/h -----								
Taxa de alimentação (kg/s)	0,406	0,929	0,878	0,679	0,922	0,958	0,746	1,210	1,740
Eficiência de separação experimental (%)	96,61	97,92	98,06	98,74	97,55	96,55	96,73	96,59	97,13
Eficiência de separação simulada (%)	99,19	97,72	97,97	98,70	97,76	97,58	98,34	95,59	90,80
Erro relativo (%)	2,67	0,21	0,09	0,04	0,22	1,07	1,66	1,04	6,51
	Rotação de 540 rpm								
Taxa de alimentação (kg/s)	0,560	0,964	1,329	0,646	0,884	1,514	0,999	1,679	1,788
Eficiência de separação experimental (%)	97,20	96,04	97,75	98,75	97,67	98,40	97,80	97,59	98,75
Eficiência de separação simulada (%)	99,14	98,46	96,99	99,03	98,66	96,12	98,37	95,08	94,32
Erro relativo (%)	2,00	2,52	0,78	0,29	1,02	2,32	0,58	2,57	4,49

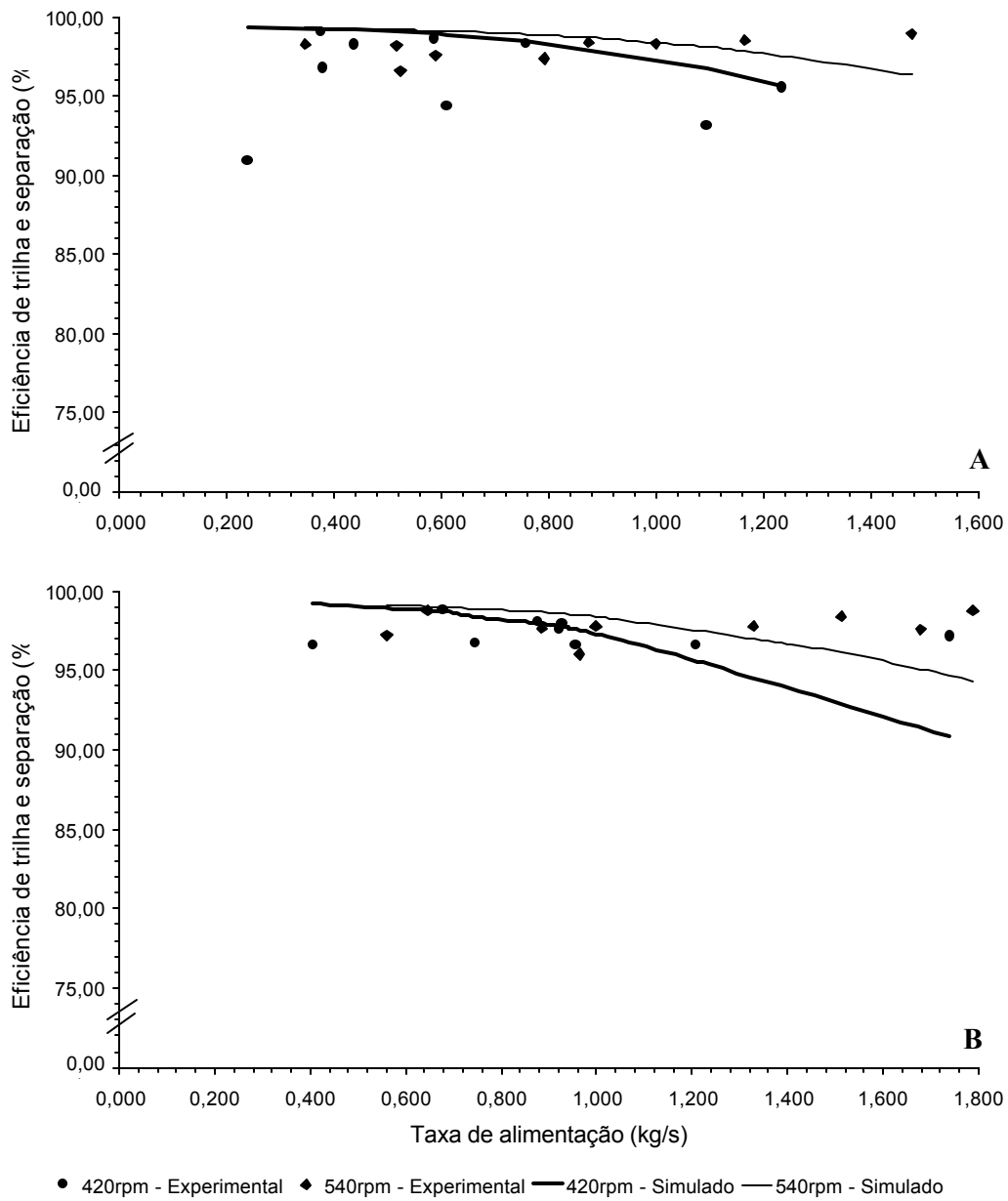


Figura 4. Eficiência de separação do côncavo em função da taxa de alimentação da máquina, para as respectivas rotações do cilindro trilhador, com teor de umidade de colheita de 10,65 (A) e de 14,10% (B)

## CONCLUSÕES

1. O modelo de simulação desenvolvido foi validado, apresentando erro relativo médio de 1,78% na determinação da eficiência de trilha e separação do côncavo.
2. A eficiência de trilha e separação simulada apresentou comportamento decrescente com o incremento na taxa de alimentação da colhedora.
3. A rotação do cilindro trilhador de 540 rpm apresentou maiores valores de eficiência de trilha e separação simulada do que a rotação de 420 rpm, independentemente do teor de umidade dos grãos.
4. A diferença de teor de umidade nos grãos, entre os experimentos, não influenciou a eficiência de trilha e separação do côncavo, na faixa de teor de umidade para o cultivar estudado.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e às Indústrias Reunidas Colombo Ltda., pelo auxílio à pesquisa e suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF, 1992. 365p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Companhia Nacional de Abastecimento. **Agricultura brasileira em números**. <http://www.agricultura.gov.br/html/Estatisticas/estatistica.htm>. 11 Jul. 2000.
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Injúria mecânica. Sementes, Ciência, Tecnologia e Produção**. 3<sup>a</sup> ed. Campinas, SP: Fundação Cargil, 1988. 424p.
- HUYNH, V. M.; POWELL, T; SIDDALL, J. N. Threshing and separating process - A mathematical model **Transactions of the ASAE**, v.25, n.1, p.65-73. 1982.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. 2.ed., New York: McGraw-Hill, 1991. 759p.
- LIANG, T.; LEWIS, D. K.; WANG, J.; MONROE, G. E. Random function modeling of macadamia nut removal by multiple frequency vibration. **Transactions of the ASAE**, v.14, n.6, p.1175-1179. 1971.

- NORRIS, E. R.; WALL, G. L. Effect of concave design factors on cylinder-concave performance in corn. **Canadian Agricultural Engineering**, v.28 n.2, p.97-99, 1986.
- PELEG, K. A mathematical model of produce damage mechanisms. **Transactions of the ASAE**, v.27, n.1, p.287-293. 1984.
- PITT, R. E. A probability model for forage harvesting systems. **Transactions of the ASAE**, v.25, n.3, p.549-555 e 562. 1982.
- SANTOS, M. L.; BRAGA, M. J. Aspectos econômicos. In: VIEIRA, C.; DE PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão – Aspectos gerais e cultura no estado de Minas Gerais**. Viçosa, MG: Editora UFV, 1998, p.19-53.
- SMITH, J. A. Dry Edible bean field harvesting losses. **Transactions of the ASAE**, v.29, n.6, Nov-Dec. p.1540-1543, 1986.
- SOUZA, C. M. A. de; PINTO, F. A. C.; MANTOVANI, E. C.; QUEIROZ, D. M. Simulação e análise do processo de trilha mecânica do milho-pipoca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.2, n.2, p.212-218, 1998.
- TROLLOPE, J. R. A mathematical model of the threshing process in a conventional combine-thresher. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v.27, p.119-130. 1982.

## RESUMO E CONCLUSÕES

O presente trabalho foi conduzido no Laboratório de Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, nas empresas MIAC, COTRAME e AEMCO das Indústrias Reunidas Colombo Ltda., e no Campo Experimental e no Laboratório de Automação Agropecuária da EMBRAPA Milho e Sorgo.

Os objetivos do trabalho foram: avaliar a demanda de potência de uma colhedora de arrasto para feijão com sistema de trilha em fluxo axial; avaliar as perdas quantitativas ocasionadas na colheita; analisar a qualidade do produto colhido; avaliar o nível de ruído emitido pelo conjunto trator-máquina; implementar um modelo de simulação da trilha e separação mecânica para a colhedora e validá-lo por meio de resultados experimentais.

Foram realizados ensaios de colheita mecanizada do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar Carioca, utilizando-se uma colhedora de arrasto modelo “Double Master”. As variáveis investigadas nos ensaios foram o número de linhas de feijão na leira (4, 7 e 10 linhas), a velocidade de trabalho da máquina (4, 7 e 10 km/h), a rotação do cilindro trilhador (420 e 540 rpm) e o teor de umidade do produto ( $10,65 \pm 0,25$  e  $14,10 \pm 0,81\%$ ). Em cada teste, foram determinados o torque e a rotação na TDP do trator, a força necessária para arrastar a máquina, a quantidade de produto colhido e tempo necessário para colhê-lo, o nível de ruído emitido pelo conjunto trator-máquina e a massa de grãos perdidos na colheita. Retiraram-se amostras no tanque graneleiro da colhedora para analisar a qualidade do produto, sendo determinados a pureza, o índice de danos mecânicos, o vigor e a germinação das sementes. Montou-se um experimento em esquema fatorial  $3 \times 3 \times 2$ , com três constituições de leira, três velocidades de

deslocamento da máquina e duas rotações do cilindro trilhador, instalado segundo delineamento inteiramente casualizado, com duas repetições. Para estudar o comportamento das variáveis investigadas, foram realizadas análises de metodologia de superfície de resposta.

Para simular o processo de separação mecânica, considerou-se que a probabilidade de separação dos grãos da vagem é proporcional à energia despendida para a debulha e à transmissibilidade desta energia através da densidade da camada de palha.

Por meio das análises dos dados e interpretações dos resultados obtidos, nas condições que o trabalho foi realizado, conclui-se que:

- A potência exigida para tracionar a colhedora, com carregamento máximo do tanque graneleiro, foi 7,90 kW. O acionamento dos órgãos internos demandou 45,28 kW. A potência máxima exigida pela máquina foi de 53,18 kW.

- A maior perda ocorreu na plataforma de recolhimento, representando 49,19% da perda total da colhedora. A perda no sistema de separação e de limpeza foi de 44,62 e 6,19%, respectivamente. O melhor resultado de eficiência de colheita da colhedora foi 96,98%.

- A maior capacidade de colheita foi 6,56 t/h. O consumo específico de energia evidenciou comportamento quadrático, em função da taxa de alimentação. O menor consumo específico obtido foi 2,46 kWh/t. A velocidade média que proporcionou mínimo consumo específico de energia foi 8,43 km/h.

- As porcentagens de germinação, vigor e pureza de sementes aumentaram com o aumento da taxa de alimentação da colhedora, e decresceram com o aumento da rotação do cilindro trilhador. O índice de danos mecânicos apresentou comportamento contrário aos de porcentagem de germinação e de vigor. As leiras de 10 linhas de feijão, a velocidade de deslocamento da máquina de 10 km/h e a rotação do cilindro trilhador de 420 rpm apresentaram os melhores resultados.

- O conjunto trator-máquina emitiu níveis de ruído acima do limite de 85 dBA para oito horas de exposição diária, estabelecidos pela NR-15, independentemente da rotação do motor. O nível de ruído diminuiu com o aumento na taxa de alimentação, enquanto, em função da rotação do motor do trator, a tendência foi contrária. As leiras de 10 linhas de feijão, a velocidade de deslocamento da máquina de 10 km/h e a rotação do cilindro trilhador de 420 rpm apresentaram os menores valores de nível de ruído. O nível de ruído em função do raio de afastamento apresentou decréscimo em seus valores, sendo que o lado traseiro apresentou os maiores valores.

- O modelo de simulação implementado foi validado, apresentando erro relativo médio de 1,78% na determinação da eficiência de separação do côncavo. Por meio da análise do modelo, verificou-se que a diferença de teor de umidade dos grãos não influenciou a eficiência de trilha e separação do côncavo.

## **APÊNDICE**

## APÊNDICE

Quadro 1A – Resumo da análise de variância dos dados de porcentagem de germinação (GER), vigor (VIG), pureza (PUR), perda na plataforma de corte (PLA), perda no sistema de separação (SEP), perda no sistema de limpeza (LIM), perda total da colhedora (TOT), capacidade de colheita (CAP), potência (POT), energia específica (ENE), nível de ruído (RUI), dano mecânico (DAM), velocidades de deslocamento da máquina, constituição de leira e rotação do cilindro trilhador obtidos no experimento com teor de umidade de colheita de 10,65%

Fontes de variação	GL	Quadrados médios					
		GER	VIG	PUR	PLA	SEP	LIM
Velocidade (V)	2	65,3611*	81,0833*	24,7086**	127,2569	2771,5280*	1,6465
Leira (L)	2	119,6944**	88,0833*	16,4636**	8084,0280**	8963,7150**	79,3810
L x V	4	12,9861	20,0417	6,8011	3169,4440	1829,6010*	9,9229
Rotação (RO)	1	160,4444**	230,0278**	33,8336**	25,0000	18112,6700**	29,9072
RO x V	2	2,5278	8,3611	10,9353*	1214,0620	1363,1940	3,2796
RO x L	2	9,0278	0,6944	6,7353	1731,2500	10177,2600**	79,1260
RO x L x V	4	11,9861	15,9028	3,8494	2787,5000	4391,0590**	10,3109
Resíduo	18	13,5000	15,6944	2,5186	1139,2360	592,8819	26,8311
		TOT	CAP	POT	ENE	RUI	DAM
Velocidade (V)	2	1892,8790	11,5789**	188,7508**	14,2373**	0,2203	16,1038**
Leira (L)	2	20791,5100**	26,7056**	510,6315**	10,4681**	0,2364	81,0414**
L x V	4	5766,5200*	1,1890**	51,5497**	2,5451*	0,2033	2,1578
Rotação (RO)	1	17986,7200**	3,4482**	217,2037**	3,0664*	12,5434**	104,5046**
RO x V	2	4974,1560*	0,4376*	27,8041**	0,0345	1,9595**	8,6031*
RO x L	2	16170,7700**	0,2598	88,9860**	11,6945**	2,5778**	31,1646**
RO x L x V	4	11378,3200**	0,7337**	37,9763**	0,4337	0,9108**	3,8689
Resíduo	18	1384,7300	0,0832	2,3803	0,5699	0,0934	2,0047

\*\* e \* Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 2A – Resumo da análise de variância dos dados de porcentagem de germinação (GER), vigor (VIG), pureza (PUR), perda na plataforma de corte (PLA), perda no sistema de separação (SEP), perda no sistema de limpeza (LIM), perda total da recolhadora (TOT), capacidade de colheita (CAP), potência (POT), energia específica (ENE), nível de ruído (RUI), dano mecânico (DAM), velocidades de deslocamento da máquina, constituição de leira e rotação do cilindro trilhador obtidos no experimento com teor de umidade de colheita de 14,10%

11

Fontes de variação	GL	Quadrados médios					
		GER	VIG	PUR	PLA	SEP	LIM
Velocidade (V)	2	217,0000**	606,1944**	5,3725**	9924,8600*	694,0952	8,3577
Leira (L)	2	39,5833**	129,5278**	16,5658**	1907,5570	10163,8100**	52,8402**
L x V	4	1,9583	59,6944**	1,4533**	1057,8900	904,0766	51,4323**
Rotação (RO)	1	17,3611**	20,2500	27,2136**	7119,1410	1651,1160	229,7119**
RO x V	2	7,4444	21,5833	4,0586**	466,1603	757,8923	67,8792**
RO x L	2	10,3611	5,0833	5,8469**	3681,3800	3207,5340	26,3753
RO x L x V	4	17,0694**	8,9167	0,7644**	1858,4780	683,6345	53,1413**
Resíduo	18	3,8055	12,1944	0,0775	1794,1980	940,8801	8,5368
		TOT	CAP	POT	ENE	RUI	DAM
Velocidade (V)	2	12209,5800*	26,8861**	208,8531**	5,6946**	1,2211	8,8877**
Leira (L)	2	4164,8160	23,8450**	322,9915**	1,2636	6,4933**	31,7292**
L x V	4	2984,9610	0,6683	5,8430	0,5959	0,9915	2,0014*
Rotação (RO)	1	3468,8940	4,9015**	1292,0890**	29,5146**	27,1557**	41,2153**
RO x V	2	1782,7610	1,8053**	32,5388**	0,6448	1,6745	4,2743**
RO x L	2	5508,7440	0,0952	134,1818**	2,3226*	1,9779*	13,2646**
RO x L x V	4	2001,9460	0,6071	3,2200	0,2958	0,6852	2,4973*
Resíduo	18	3175,2210	0,3002	3,6915	0,4371	0,5492	0,6219

\*\* e \* Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

