

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA USINAGEM DE COMPÓSITOS METÁLICOS

Milla Caroline GOMES¹
Paulo César de Resende ANDRADE²
Ricardo Augusto GONÇALVES³

¹ Graduanda do Bacharelado em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Vale do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM. E-mail: millagomes15@yahoo.com.br

² Professor Adjunto III do Instituto de Ciência e Tecnologia/UFVJM – Campus II, Rodovia MGT 367, km 583, nº 5000, Alto da Jacuba, Diamantina, MG, 39100-000. E-mail: paulo.andrade@ict.ufvjm.edu.br

³ Msc. Professor Assistente A do Curso de Engenharia Mecânica/UFVJM – Campus II, Rodovia MGT 367, km 583, nº 5000, Alto da Jacuba, Diamantina, MG, 39100-000. E-mail: ricardo.augusto@ict.ufvjm.edu.br

Recebido em: 14/02/2014 - Aprovado em: 30/06/2014 - Disponibilizado em: 30/07/2014

RESUMO: O objetivo principal deste trabalho é avaliar os efeitos da velocidade de corte e da pressão de aplicação do fluido de corte no desempenho do processo de usinagem com base nos experimentos realizados no trabalho Taguchi's Technique in Machining of Metal Matrix Composites (SHETTY et al., 2008). O material da peça usinada foi um compósito de matriz metálica, constituído por uma matriz de liga de alumínio 6061 e partículas de carboneto de silício. O torneamento foi a operação de usinagem selecionada e a ferramenta de corte utilizada foi o nitreto cúbico de boro. O fluido de corte empregado foi o vapor d'água saturado. Para a realização do trabalho adotou-se a combinação dos parâmetros velocidade de corte e pressão de vapor variando em dois níveis, 45 e 101 m/min e 4 e 10 bar, respectivamente, na determinação dos tratamentos. A partir dessa combinação coletaram-se os dados obtidos por Shetty et al. para cada parâmetro de saída avaliado: desgaste da ferramenta de corte, força de corte, força de avanço e rugosidade. Esses dados foram submetidos à Análise de Variância e ao teste de Tukey a 5%. Os resultados dos efeitos de cada tratamento foram analisados para cada um dos parâmetros de saída concluindo que tanto a velocidade de corte como a pressão de aplicação do fluido de corte possui efeito sobre a usinabilidade do material.

Palavras-chave: Usinagem. Velocidade de Corte. Pressão do fluido de corte. ANOVA. Usinabilidade.

ABSTRACT: The main objective of this work is to evaluate the effects of cutting speed and cutting fluid pressure on the performance of the machining process based on experiments performed at work Taguchi's Technique in Machining of Metal Matrix Composites (SHETTY et al., 2008) . The workpiece was a metal matrix composite with a matrix of aluminum alloy 6061 and particles of silicon carbide. Turning tests were carried using cubic boron nitride cutting tool and steam as cutting fluid. The combination of parameters cutting speed and steam pressure ranging on two levels, 45 and 101 m / min and 4 and 10 bar , respectively , was used for determining treatments . From this combination was collected the data obtained by Shetty et. al. for each output parameter evaluated: tool wear , cutting force , feed force and surface roughness . These data were submitted to ANOVA and Tukey test at 5 % . The results of effects of each treatment were analyzed for each output parameters, showing that both cutting speed and cutting fluid pressure has significantly effect on the machinability of the material.

Keywords: Machining. Cutting speed. Cutting fluid pressure. ANOVA. Machinability.

INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de fabricação que visa à obtenção de peças ou componentes com dimensão, forma e acabamento especificados em projeto, por meio da retirada de material.

Dino Ferraresi (2011) define a usinagem como: operação que ao conferir à peça forma, dimensões, ou acabamento, produz cavaco. E por cavaco entende-se: porção de material da peça retirada pela

ferramenta e caracterizada por apresentar forma geométrica irregular.

O processo de usinagem é bastante imprevisível e paradoxal. Também pode ser considerado complexo e simples ao mesmo tempo. É um processo complexo devido às dificuldades em determinar as imprevisíveis condições ideais de corte. É simples porque, uma vez determinadas essas condições, o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de intervenção do operador (MACHADO et al., 2011).

Os processos de usinagem podem ser classificados em processos de usinagem convencional e não convencional. Os processos de usinagem convencional empregam a energia mecânica na remoção de material, enquanto os processos de usinagem não convencional utilizam de outros tipos de energia, por exemplo, energia termelétrica. Os processos de usinagem convencional podem ainda ser divididos em processos de usinagem com ferramentas de geometria definida e não definida. Dentre os processos de usinagem convencionais com ferramentas de geometria definida o torneamento é um dos processos mais utilizados na indústria de diversos segmentos (SOUZA, 2011). Esse processo foi selecionado pelo autor do artigo Taguchi's Technique in Machining of Metal Matrix Composites (SHETTY et al., 2008) para obter os dados que foram avaliados neste trabalho. O autor utilizou uma análise de variância (ANOVA) e o método de Taguchi para estudar o efeito de diversos parâmetros no processo de usinagem.

O presente trabalho empregou outra abordagem estatística para analisar alguns parâmetros investigados pelo autor Shetty et al. (2008) sobre o processo de usinagem. Os parâmetros selecionados foram velocidade de corte e pressão de aplicação do fluido de corte. Segundo Ferraresi (2011, p. 5) velocidade de corte é “[...] a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte”. Já os fluidos de corte são elementos ou

compostos, que quando escolhidos e aplicados apropriadamente, trazem benefícios ao processo de usinagem. “Tais elementos ou compostos podem ser sólidos, líquidos ou gasosos [...]”. (FERRARESI, 2011, p. 512).

Os parâmetros de saída utilizados para avaliar o desempenho do processo de usinagem foram: a rugosidade do material usinado, o desgaste da ferramenta de corte, e as componentes de avanço e de corte da força de usinagem.

Este estudo tem por objetivo principal indicar quais valores dos parâmetros selecionados irá resultar em melhor desempenho do processo de usinagem. Para isso foi utilizada a estatística com a finalidade de avaliar a influência dos tratamentos determinados e testes de comparações múltiplas para definir quais dos tratamentos produziram melhores resultados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram avaliados os dados do trabalho Taguchi's Technique in Machining of Metal Matrix Composites (SHETTY et al., 2008). Os procedimentos aplicados pelo autor para a obtenção dos mesmos serão descritos abaixo.

O material da peça utilizado foi um compósito de matriz metálica, constituído por uma matriz de liga de alumínio 6061 e 15% de partículas de carboneto de silício com diâmetro de 25 µm. Os corpos de prova foram fabricados no Vikram Sarbhai Space Centre (VSSC) Trivandrum na forma de barras cilíndricas com 120 mm de comprimento e 40

mm de diâmetro. A composição química da matriz é apresentada na tabela 1. As amostras foram extrudadas e envelhecidas por 2 horas à temperatura de 220 °C até atingir a dureza Brinell de 94 (BHN).

Tabela 1 - Composição química da matriz metálica (Liga de alumínio 6061)

Elemento	Cu	Mg	Si	Cr	Al
Porcentagem de peso	0,25	1.0	0.6	0.25	Equilíbrio

Fonte: Raviraj Shetty, Raghuvir B. Pai, Shrikanth S. Rao e Rajesh Nayak.

Os ensaios foram realizados em um torno mecânico, PSG A141, utilizando uma ferramenta de corte de nitreto cúbico de boro (CBN) com as especificações apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 - Detalhes do suporte e da ferramenta de corte utilizados nos ensaios

Especificação do suporte de ferramentas	STGCR 2020 K-16 CTGPR 1212 F 11
Especificação geométrica da ferramenta	Ângulo de posição: 91° Raio de ponta: 0.4 mm Ângulo de saída: 0° Ângulo de folga: 7°
Especificação do inserto de CBN (KB90)	TPGN160304-LS TPGN 110304-LS

Fonte: Raviraj Shetty, Raghuvir B. Pai, Shrikanth S. Rao e Rajesh Nayak.

Determinou-se a rugosidade empregando um rugosímetro Taylor/Hobson surtronic 3+, apresentado na figura 1, com percurso de medição de 25.4 mm e médias de quatro leituras foram tomadas. As medidas do desgaste da ferramenta de corte foram

observadas através do microscópio ferramenteiro Vision Plus METZ-1395 com faixa nominal de 0-25 mm, e resolução de 10 µm. As médias foram obtidas a partir de quatro leituras. As componentes da força de usinagem foram medidas utilizando um dinamômetro digital IEICOS - industrial engineering instruments, conforme ilustrado na figura 2.

Figura 1 – Rugosímetro Taylor/Hobson surtronic



Fonte: Raviraj Shetty, Raghuvir B. Pai, Shrikanth S. Rao e Rajesh Nayak.

Figura 2 – Dinamômetro IEICOS



Fonte: Raviraj Shetty, Raghuvir B. Pai, Shrikanth S. Rao e Rajesh Nayak.

O fluido de corte utilizado foi vapor d'água saturado. O sistema de aplicação deste vapor é basicamente constituído de uma fonte fornecedora de vapor saturado, aquecedor, válvula, bocal e medidores de pressão e vazão, como ilustrado na figura 3. A

temperatura do vapor na saída do bocal foi mantida em 110 °C e a vazão de 36 l/h.

Figura 3 – Sistema de aplicação do fluido de corte



Fonte: Raviraj Shetty, Raghuvir B. Pai, Shrikanth S. Rao e Rajesh Nayak.

O presente trabalho adotou a combinação dos parâmetros velocidade de corte e pressão de vapor na determinação dos tratamentos. A partir dessa combinação os dados foram coletados para cada variável-resposta: rugosidade, desgaste da ferramenta de corte, força de corte e força de avanço.

Para avaliar esses dados empregou-se análise de variância (ANOVA), com delineamento inteiramente casualizado (DIC)

e teste de Tukey a um nível de significância (α) de 5%, utilizando o software Sisvar. O teste de Tukey foi empregado, pois conforme Borges & Ferreira (2003 apud SOUSA et al. 2012, p. 353) esse teste apresenta “[...] maior controle da taxa de ocorrência dos erros tipo I sob distribuições normais”.

Os tratamentos empregados foram: tratamento A com pressão de vapor de 4 bar e velocidade de corte de 45 m/min; tratamento B com pressão de vapor de 4 bar e velocidade de corte de 101 m/min; tratamento C com pressão de vapor de 10 bar e velocidade de corte de 45 m/min e tratamento D com pressão de vapor de 10 bar e velocidade de corte de 101 m/min. Na tabela 3 são apresentados os dados analisados.

Tabela 3 – Dados analisados para as variáveis-respostas: rugosidade, desgaste da ferramenta, força de avanço e força de corte.

Tratamentos	Rugosidade (Ra) (μm)	Desgaste da ferramenta (mm)	Força de Avanço (N)	Força de Corte (N)
A	3.94	1.010	85.148	159.670
A	5.00	1.550	76.211	224.172
A	4.71	1.255	100.945	207.748
A	4.66	1.455	114.177	262.835
A	3.66	1.552	101.124	197.397
A	4.82	1.452	135.097	232.149
A	4.46	1.155	121.414	301.818
A	5.64	1.255	126.148	253.941
B	3.96	1.333	128.368	192.448
B	3.68	1.345	135.671	183.369
B	4.54	1.285	139.995	199.670

B	3.90	1.525	120.632	254.172
B	4.60	1.456	111.685	258.940
B	4.18	1.459	140.167	214.169
B	3.84	1.655	105.407	197.397
B	3.30	1.554	110.075	159.670
C	2.90	0.500	33.095	100.345
C	2.32	0.900	40.149	72.899
C	2.84	0.550	45.540	106.331
C	2.98	0.890	50.903	112.223
C	2.50	0.660	38.014	115.700
C	2.44	0.830	69.982	97.707
C	2.70	0.650	51.527	144.085
C	2.44	0.851	88.095	128.096
D	2.34	0.756	78.028	175.132
D	2.72	0.985	69.430	108.481
D	2.10	0.755	75.836	150.345
D	2.22	0.995	74.214	102.899
D	2.54	0.855	67.015	191.721
D	2.52	0.875	120.036	128.432
D	2.21	0.765	49.826	135.700
D	2.22	0.995	80.128	100.345

Fonte: Autor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos efeitos de cada tratamento serão analisados para cada uma das variáveis. Esta análise determina quais parâmetros empregados implicam em um melhor desempenho do processo de usinagem, ou seja, menores valores de

desgaste da ferramenta de corte, força de corte, força de avanço e rugosidade.

A partir da análise da tabela 5 pode-se afirmar que a velocidade de corte e a pressão do vapor possuem efeito sobre a rugosidade, pois o p-valor para os tratamentos é nulo, logo, rejeitou-se a hipótese nula.

Tabela 5 – Análise de variância para rugosidade.

	FV	GL	SQ	QM	FC	Pr >Fc
Tratamentos	3	27.911225	9.303742	55.389	0.000	
Erros	28	4.703175	0.167971			
Total	31	32.614400				

Fonte: Autor.

Por meio da tabela 6, conclui-se que a pressão de 10 bar com as duas velocidades de

corte, 45 m/min e 101 m/min, produziram praticamente os mesmos efeitos na rugosidade, que foram menores do que os causados pela pressão de 4 bar. A menor rugosidade foi obtida, para as duas pressões, com a utilização da maior velocidade de corte.

Tabela 6 – Teste de Tukey para rugosidade.

Tratamentos	Médias	Resultados
A	4.611250	a ₃
B	4.000000	a ₂
C	2.640000	a ₁
D	2.358750	a ₁

Fonte: Autor.

Portanto, os parâmetros que produziram a menor rugosidade foram: maior pressão de vapor e maior velocidade de corte.

A utilização de velocidade de corte maior geralmente diminui a rugosidade da superfície usinada, já que impede a formação da aresta postiça de corte (APC). Conforme Ferraresi, (2011), a APC “[...] é constituída de partículas do material usinado que se acumulam na superfície de saída da ferramenta” (FERRARESI, 2011, p.368) de corte.

O efeito da APC no acabamento superficial é atribuído ao fato de que partes dela são cisalhadas durante o processo e permanecem aderidas à superfície da peça em usinagem. Portanto, o acabamento melhora quando se aumenta a velocidade de corte, porque a APC

desaparece.

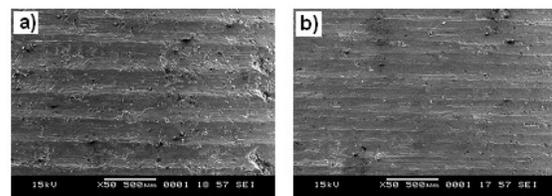
(MACHADO et al., 2011, p. 308).

No entanto o autor não realizou uma investigação detalhada em relação à presença ou não da aresta postiça de corte nos experimentos realizados.

A presença do fluido de corte no processo de usinagem influencia a rugosidade da superfície usinada. Atuando como lubrificante durante o processo, reduz o atrito e o calor originados, por impedir o contato direto por quase toda a região da ferramenta de corte e da peça usinada. (SIMIÃO, 2011).

Utilizar maior pressão para o fluido de corte melhora a penetração do vapor d'água, pois o vapor é fragmentado em pequenos glóbulos e assim o mesmo tem as suas funções melhor desempenhadas. Com a redução do atrito na região de contato da ferramenta com a peça usinada, tem-se como resultado um melhor acabamento superficial, ou seja, uma menor rugosidade. A figura 4 apresenta a rugosidade superficial do compósito obtido por microscopia eletrônica de varredura para a pressão de vapor (a) de 4 bar, e (b) de 10 bar. (SHETTY et al., 2008).

Figura 4 – Rugosidade superficial do compósito



Fonte: Raviraj Shetty, Raghuvir B. Pai, Shrikanth S.Rao e Rajesh Nayak.

Deste modo os resultados obtidos estão de acordo com as literaturas supracitadas.

Para o desgaste da ferramenta conclui-se, através da tabela 7, que o p-valor para os tratamentos é nulo, assim rejeitou-se a

hipótese nula, ou seja, há diferença significativa entre os tratamentos. Torna-se necessário então aplicar algum teste de comparações múltiplas, no caso, o Tukey, para verificar onde estão as diferenças.

Tabela 7 – Análise de variância para desgaste da ferramenta.

FV	GL	SQ	QM	FC	Pr >Fc
Tratamentos	3	2.947301	0.982434	42.956	0.000
Erros	28	0.640377	0.022871		
Total	31	3.587677			

Fonte: Autor.

Aplicando-se o teste de Tukey (tabela 8), observa-se que a pressão de 4 bar com as duas velocidades de corte, 45 m/min e 101 m/min, produziram praticamente os mesmos efeitos no desgaste da ferramenta, contribuindo com o seu aumento, que foi acentuado pela utilização da maior velocidade de corte. A pressão de 10 bar também provocou praticamente o mesmo efeito no desgaste da ferramenta com as duas velocidades de corte. Essa condição proporcionou o menor desgaste, sendo que a menor velocidade de corte o minimizou.

Tabela 8 – Teste de Tukey para desgaste da ferramenta.

Tratamentos	Médias	Resultados
A	1.335500	a ₂
B	1.451500	a ₂
C	0.728875	a ₁
D	0.872625	a ₁

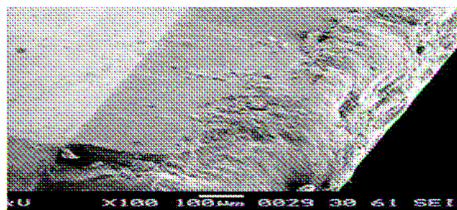
Fonte: Autor.

Assim, a maior pressão de aplicação do fluido de corte e a menor velocidade de corte

levaram ao menor desgaste da ferramenta de corte.

De acordo com Shetty et al. (2008), o fluido de corte possui maior habilidade de penetração quando se tem maiores valores de pressão de vapor. A maior pressão permite a formação de cavacos serrilhados e mais aberturas na interface cavaco-ferramenta, melhorando a lubrificação e contribuindo para um menor desgaste da ferramenta, já que o atrito da superfície da ferramenta com a superfície do cavaco é minimizado. A figura 5 apresenta o desgaste de flanco durante a usinagem do compósito obtido por microscopia eletrônica de varredura.

Figura 5 – Desgaste do flanco



Fonte: Raviraj Shetty, Raghuvir B. Pai, Shrikanth S.Rao e Rajesh Nayak.

Com relação à velocidade de corte, quanto maior é o seu valor, maiores serão os valores da força de usinagem e as tensões geradas durante o corte. Conseqüentemente maior será a geração de calor e também a temperatura na interface cavaco-ferramenta, aumentando assim o desgaste da ferramenta de corte.

Para a força de corte, segundo a tabela 9, o p-valor para os tratamentos é nulo, indicando que há diferença significativa entre os tratamentos. Torna-se necessário então aplicar o teste de Tukey, para verificar onde estão as diferenças.

Tabela 9 – Análise de variância para força de corte.

FV	GL	SQ	QM	FC	Pr > Fc
Tratamentos	3	77999.089517	25999.696506	22.289	0.000
Erros	28	32661.358186	1166.477078		
Total	31	110660.447703			

Fonte: Autor.

Aplicando-se o teste de Tukey (tabela 10), verifica-se que a pressão de 4 bar com as duas velocidades de corte, 45 m/min e 101 m/min, produziram efeitos bem próximos na força de corte, implicando no seu aumento. A pressão de 10 bar com as duas velocidades de corte, também provocou efeitos próximos na força de corte, sendo responsável pelos menores efeitos na mesma. Porém não foi possível fazer nenhuma avaliação sobre a influência da velocidade de corte sobre a força.

Conforme Machado et al. (2011) o fluido de corte atua como uma camada lubrificante na interface cavaco-ferramenta, diminuindo assim o atrito nessa região. De acordo com Shetty et al. (2008) a formação da camada de lubrificação na interface cavaco-ferramenta ocorre à medida que o cavaco escoar, pois, dessa maneira, o mesmo entra em contato com asperezas e atrai vapor d'água, que reage formando a camada. Em alta pressão o vapor é fragmentado em pequenos glóbulos e assim passa a ter facilidade em penetrar na interface ferramenta-cavaco aumentando o efeito lubrificante e conseqüentemente diminuindo a força de corte.

Tabela 10 – Teste de Tukey para força de corte.

Tratamentos	Médias	Resultados
A	229.966250	a ₂
B	207.479375	a ₂
C	109.673250	a ₁
D	136.631875	a ₁

Fonte: Autor.

Portanto, conclui-se que ao aplicar maior pressão de vapor obtém menores valores da força de corte durante o processo.

De acordo com a análise da tabela 11, a força de avanço teve o p-valor para os tratamentos nulo, indicando que há diferença significativa entre os tratamentos. Torna-se necessário então a aplicação do teste de Tukey, para verificar onde estão as diferenças.

Tabela 11 – Análise de variância para força de avanço.

FV	GL	SQ	QM	FC	Pr >Fc
Tratamentos	3	24550.699276	8183.566425	24.339	0.000
Erros	28	9414.672446	336.238302		
Total	31	33965.371722			

Fonte: Autor.

Aplicando-se o teste de Tukey (tabela 12), verifica-se que a pressão de 4 bar com as duas velocidades de corte, 45 m/min e 101 m/min, produziram praticamente os mesmos efeitos na força de avanço, implicando em maiores valores da força de avanço durante a usinagem, que foi minimizada pela utilização da menor velocidade de corte. A pressão de vapor de 10 bar com as duas velocidades de corte, também provocou praticamente os mesmos efeitos na força de avanço, sendo responsável pelos menores efeitos na mesma, que foi minimizado pela utilização da menor velocidade.

Tabela 12 – Teste de Tukey para força de avanço.

Tratamentos	Médias	Resultados
A	107.533000	a ₂
B	124.000000	a ₂
C	52.163125	a ₁
D	76.814125	a ₁

Fonte: Autor.

Portanto, a menor velocidade de corte e maior pressão de vapor, levaram à menor força de avanço.

De acordo com os ensinamentos de Machado et al. (2008) a força de avanço diminui à medida que a velocidade de corte aumenta, uma vez que a deformação, a dureza

do cavaco e os coeficientes de atrito diminuem. Porém os resultados obtidos não estão de acordo com essa citação.

O efeito da maior pressão de vapor na menor força de avanço segue a mesma explicação dada para a força de corte.

Foram realizadas análises de variância com delineamento bloco casualizado, no qual utilizou-se como bloco a profundidade de corte e o avanço, no entanto não foi obtido nenhum efeito significativo sob as variáveis-respostas. Esse fato não está de acordo com as literaturas, porém devido à utilização do DBC encontrou-se essa conclusão que está de acordo com os resultados obtidos por Shetty et al. (2008) que aponta a pressão de vapor como o parâmetro dominante do processo de usinagem.

CONCLUSÃO

A partir da análise estatística da usinagem do compósito de matriz metálica foi possível verificar que a velocidade de corte e a pressão do fluido de corte influenciaram a rugosidade da peça usinada, o desgaste da ferramenta e as componentes de avanço e de corte da força de usinagem.

A maior pressão de aplicação do fluido de corte garantiu menores valores da rugosidade, das forças de avanço e de corte e, conseqüentemente, do desgaste da ferramenta de corte. Já a maior velocidade de corte garantiu um melhor acabamento, porém favoreceu o maior desgaste da ferramenta. Assim o presente trabalho alcançou o seu objetivo ao determinar quais as condições que melhoram o desempenho do processo de usinagem do compósito de matriz metálica.

REFERÊNCIAS

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo:Blucher,1970.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B.; COELHO, R.T.; ABRÃO, A.M. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2ª edição. São Paulo: Blucher, 2011.

SHETTY, R.; PAI, R. B.; RAO, S. S.; NAYAK, R. Taguchi's technique in machining of metal matrix composites. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 1, p. 12-20, jan/mar. 2009.

SIMIÃO, J. **Gerenciamento de resíduos sólidos industriais em uma empresa de usinagem sobre o enfoque da produção mais limpa**. São Carlos, 2011.

SOUZA, A. J. **Processos de Fabricação por usinagem Parte 1**. 2011.

SOUZA, C. A.; JUNIOR, M. A. L.; FERREIRA, R. L. C. Avaliação de testes estatísticos de comparações múltiplas de médias. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 3, p. 350-354, maio/jun. 2012.