

APLICAÇÃO DE MÉTODO ESTATÍSTICO PARA ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A FORMULAÇÃO E PARÂMETROS OPERACIONAIS COM OS RESULTADOS DE ATRITO DE ENSAIOS EXECUTADOS EM UM TRIBÔMETRO

Patric Daniel Neis, engmecpatric@yahoo.com.br

CON10-0087

Flávio José Lorini, lorini@ufrgs.br

Ney Francisco Ferreira, neyferr@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Sarmento Leite, 425 – 90050-170 – Tel.: +55 51 33083567
Porto Alegre – RS - Brasil

Resumo. O objetivo deste trabalho é avaliar como variações controladas nos parâmetros operacionais (pressão de contato e velocidade de escorregamento) bem como na formulação do material de fricção podem se relacionar com os resultados de coeficiente de atrito medido durante ensaios de frenagem executados em um tribômetro. Para isso, são realizados experimentos variando os fatores de entrada (formulação, pressão e velocidade) a 3 níveis, com duas repetições para cada condição ou nível ensaiado. A incerteza da máquina, calculada a partir dos dados dos manuais de cada instrumento envolvido no processo de medição do coeficiente de atrito é de $\pm 0,54\%$ sobre o valor nominal do mesmo. Para análise de significância bem como da correlação entre os dados de entrada e saída foi utilizada a análise de variância (Anova) e o modelo de regressão, rodados no programa Microsoft Excel 2003. Com base nas análises deste trabalho foi possível concluir que mudanças na velocidade de escorregamento não alteram significativamente o coeficiente de atrito, resultado que não deve ser generalizado a todo o universo de materiais de fricção. A mudança na formulação implementada entre as 3 amostras avaliadas relaciona-se de maneira quadrática (não linear) com o coeficiente de atrito enquanto que o aumento da pressão de contato relaciona-se de maneira linear e inversamente proporcional com o mesmo. A relativamente fraca correlação estabelecida pelo modelo de regressão rodado ($R^2 = 0,49$) pode ser atribuída ao relativamente grande erro aleatório das medidas envolvidas neste experimento. Isso é uma consequência da impossibilidade de controlar de maneira independente cada um dos fatores de entrada (pressão, velocidade e temperatura) que agem durante o processo tribológico. Além disso, a heterogeneidade do material de fricção igualmente contribui para o aumento do erro aleatório.

Palavras-chave: tribômetro, freios, atrito, Anova, regressão.

1. INTRODUÇÃO

O real papel de cada variável operacional sobre o comportamento do coeficiente de atrito ainda hoje não é totalmente estabelecido. Conforme revisões recentes (Desplanques et al., 2006; Cristol-Bulthé et al., 2007; Blau e McLaughlin, 2003; Lee et al., 2007; Desplanques et al., 2007) tribômetros vêm sendo utilizado por muitos autores para fins de pesquisa de base com relação ao entendimento dos mecanismos de atrito bem como para uma melhor compreensão da influência de variáveis como pressão de contato, velocidade de escorregamento, temperatura, composição química, acabamento superficial, entre outras sobre o coeficiente de atrito e desgaste dos materiais. O presente trabalho se insere nesse cenário e busca contribuir, através de uma análise estatística dos resultados, para o estudo da influência de algumas destas variáveis (pressão de contato, velocidade e variações na composição química) sobre o coeficiente de atrito dos materiais, utilizando como ferramenta um tribômetro especialmente desenvolvido numa parceria entre a UFRGS e um fabricante de materiais para freio. Essa máquina foi projetada para atender as condições reais de frenagem, tais como pressão de contato e velocidades de escorregamento entre a pastilha e o disco, seguindo o levantamento destas variáveis realizado por Infantini, 2008. A Figura (1) apresenta uma imagem do equipamento desenvolvido.

Neste trabalho, primeiramente é mostrado o esquema de funcionamento do tribômetro para medição do coeficiente de atrito, bem como os resultados da incerteza teórica associada à instrumentação utilizada para essa medição. Depois disto, é mostrada a metodologia aplicada aos ensaios executados, bem como os resultados dos mesmos, avaliados através de método estatístico de análise de variância (Anova) e pelo modelo de regressão. O objetivo foi avaliar como variações controladas da velocidade e da pressão de contato bem como mudanças na composição química do material podem se relacionar com os resultados de coeficiente de atrito. Ao longo dos resultados são feitas discussões sobre as

dificuldades encontradas para realização de estudos relacionando os parâmetros de operação (velocidade, pressão e temperatura) com o coeficiente de atrito.

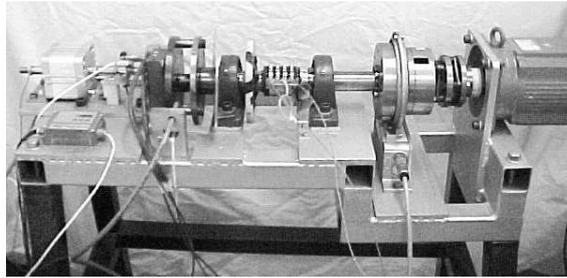


Figura 1. Imagem do tribômetro.

2. O TRIBÔMETRO

No tribômetro projetado, o coeficiente de atrito é determinado a partir da relação entre o torque de frenagem dividido pela força normal de atuação do material de fricção sobre o disco multiplicada pelo raio efetivo (comumente tratado como a distância entre o centro geométrico da pastilha e o centro do disco). A Equação (1) apresenta a expressão que calcula o coeficiente de atrito para o tribômetro projetado:

$$\mu = \frac{M}{R_e \cdot F_N} \quad (1)$$

onde μ representa o coeficiente de atrito, M o torque de frenagem [em Nm], R_e o raio efetivo [em mm] e F_N a força normal [em N].

A medição da força normal de atuação é realizada através de uma célula de carga ligada mecanicamente ao cilindro atuador enquanto que o torque de frenagem é medido diretamente sobre o eixo através de um transdutor de torque, conforme mostra o esquema da Fig. (2). Os sinais elétricos destes instrumentos de medição (célula de carga e transdutor de torque) são condicionados e amplificados por condicionadores de sinais antes de serem adquiridos pelo sistema de aquisição e controle da máquina. Portanto, para a determinação da incerteza da máquina, as incertezas dos condicionadores também são contabilizadas, como será mostrado na seção 2.1.

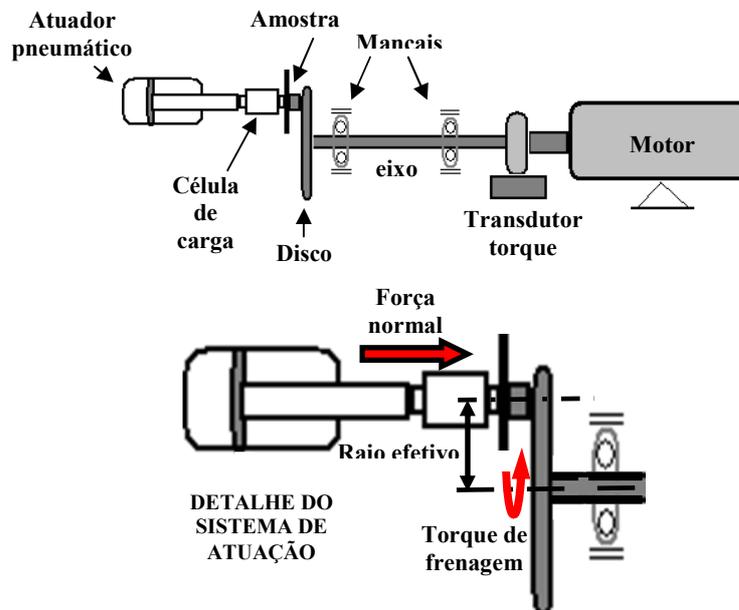


Figura 2. Esquema do funcionamento do tribômetro projetado.

2.1. Incerteza de medição do atrito

Para o cálculo da incerteza da medição do coeficiente de atrito com o tribômetro projetado foi utilizada a equação de Kline e McClintok, 1953, a qual calcula a incerteza padrão combinada a partir de variáveis independentes. Aplicando a equação dos autores às variáveis do utilizadas para medição do atrito do tribômetro, chega-se a seguinte expressão:

$$U_{\mu} = \left[\left(\frac{\partial \mu}{\partial M} U_M \right)^2 + \left(\frac{\partial \mu}{\partial F_N} U_{F_N} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mu}{\partial R_e} U_{R_e} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

onde U_{μ} é a incerteza combinada do coeficiente de atrito [em %], μ o coeficiente de atrito, M é o torque [em Nm], U_M é a incerteza do torque [em %], R_e é o raio efetivo [em mm], U_{R_e} é a incerteza do raio efetivo [em %], F_N é a força normal [em N] e U_{F_N} é a incerteza da força normal [em %].

A Tabela (1) mostra as incertezas dos instrumentos utilizados para medição do atrito do tribômetro, cujos dados foram retirados dos manuais destes instrumentos. Deve-se destacar que o raio efetivo é medido pelo operador através de um paquímetro e que, desta forma, a incerteza associada a este parâmetro foi avaliada como sendo a incerteza do próprio instrumento de medição, desconsiderando erros operacionais (erros grosseiros ou sistemáticos). O valor da incerteza do paquímetro foi determinado através da correlação indicada por Irigoyen e Júnior, 1985, para o cálculo da incerteza a partir deste tipo de instrumento. Além disso, foi utilizada a medida fixa de 40 mm para esse cálculo, já que esse foi o valor de raio efetivo ajustado durante os ensaios executados no presente trabalho.

Tabela 1. Incerteza dos instrumentos envolvidos na medição do atrito.

Instrumento	Incerteza
Célula de carga	$\pm 0,50\%$
Condicionador célula de carga	$\pm 0,05\%$
Transdutor de torque	$\pm 0,20\%$
Condicionador transdutor de torque	$\pm 0,01\%$
Paquímetro	$\pm 4,45 \cdot 10^{-5}\%$

Utilizando a Eq. (2) e substituindo os dados de incerteza da Tab. (1), obtém-se a incerteza padrão combinada da medida do coeficiente de atrito no tribômetro, cujo valor é de $\pm 0,54\%$ sobre o valor nominal medido. Este resultado se mantém constante para toda a faixa de valores de carga da máquina (0 a 1800 N) bem como de torque de frenagem (0 a 45,75 Nm) avaliados.

3. OS ENSAIOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia aplicada para realização e análise dos ensaios executados ao longo deste trabalho.

Cada experimento foi executado em condição de arrasto constante e durante um tempo total de 30s. Os parâmetros de entrada foram avaliados a 3 níveis, que no caso da pressão de contato foi 0,98 MPa, 1,96 MPa e 2,95 MPa enquanto que para a velocidade de escorregamento foi 1,67 m/s, 3,35 m/s e 5,02 m/s. Sobre o terceiro fator de entrada, a composição química do material de fricção, foram implementadas variações de formulação para cada uma das 3 amostras avaliadas. Cada condição foi repetida duas vezes a fim de diluir o erro aleatório. O número total de ensaios executados foi de 54 experimentos (3 fatores avaliados a 3 níveis, repetidos duas vezes). A Tabela (2) mostra as condições operacionais executadas.

Tabela 2. Condições operacionais ensaiadas.

Fatores controláveis		Níveis Investigados		
A	Formulação	1	2	3
V	Velocidade escorregamento (m/s)	0,98	1,96	2,95
P	Pressão contato (Mpa)	1,67	3,35	5,02

A variável de saída, o coeficiente de atrito, foi medida durante os 3 últimos segundos da frenagem (instantes de 28, 29 e 30s), sendo em seguida determinada a média entre esses 3 pontos a fim de utilização nas análises posteriores. A temperatura do disco foi deixada livre, sendo apenas registrada para fins de conhecimento.

O método estatístico utilizado para essa análise de significância dos fatores de entrada é a análise de variância (Anova). Para estabelecer a correlação entre os dados de entrada e de saída destes experimentos foi utilizado o modelo de regressão, por meio do qual se obteve uma equação matemática relacionando a entrada e a saída dos dados. O software utilizado para a análise estatística foi o Microsoft Excel 2003.

4. OS RESULTADOS

Os fatores de entrada controlados utilizados neste trabalho são designados por letras, onde a letra A representa a formulação, a letra V representa a velocidade de escorregamento entre o par de fricção e a letra P representa a pressão de contato. Os diferentes níveis são representados por números cardinais dispostos à direita de cada letra. No caso das duas últimas variáveis (velocidade e pressão) os diferentes níveis, representados por 1, 2 e 3, correspondem às

velocidades e pressões postas em ordem crescente de magnitude, respectivamente. A Tabela (3) apresenta os resultados de coeficiente de atrito médio para cada uma das condições ensaiadas.

Tabela 3. Resultados de atrito para ensaios com tempo e disco mantidos constantes.

	V1			V2			V3		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
A1	0,34	0,34	0,47	0,39	0,52	0,47	0,42	0,46	0,42
	0,42	0,37	0,43	0,40	0,43	0,48	0,46	0,50	0,43
A2	0,40	0,59	0,43	0,58	0,51	0,32	0,52	0,43	0,44
	0,67	0,31	0,48	0,60	0,38	0,40	0,49	0,37	0,45
A3	0,75	0,27	0,26	0,51	0,39	0,30	0,40	0,44	0,40
	0,67	0,42	0,25	0,33	0,36	0,26	0,37	0,36	0,29

A Tabela (4) apresenta os resultados da análise de variância (Anova) avaliados sob os dados da Tab. (3). O índice de confiança (IC) utilizado para essa análise é de 95%. O termo grau de liberdade destas tabelas foi abreviado por GDL.

Tabela 4. Tabela Anova para os ensaios realizados.

Fonte	Soma quadrada	GDL	Média quadrada	F calculado	F tabelado (IC = 95%)	S - Significativo NS - Não signif.
Material - A	0,049	2	0,024	4,696	3,340	S
Velocidade - V	0,002	2	0,001	0,165	3,340	NS
Pressão - P	0,089	2	0,045	8,631	3,340	S
Interação AV	0,033	4	0,008	1,588	2,714	NS
Interação AP	0,110	4	0,027	5,312	2,714	S
Interação VP	0,039	4	0,010	1,871	2,714	NS
Interação AVP	0,108	8	0,014	2,613	2,291	S
Erro	0,145	28	0,005			
Total	0,574	54				

Segundo o método Anova, sempre que F calculado é maior do que F tabelado o resultado é significativo. Portanto, de acordo com esta abordagem, as variáveis que tem importância significativa sobre a variável de resposta são as variações na formulação do material de fricção (A) e na pressão de contato (P), além da interação entre composição e pressão (AP) e a interação dos 3 fatores (AVP). Pelos resultados encontrados, a velocidade não exerce influência significativa sobre o atrito. Deve-se deixar evidente que diferentes formulações podem responder de maneira diferente a mudanças na velocidade e, portanto, a conclusão do presente trabalho não pode ser generalizada a todo o universo de materiais de fricção. Além disso, o relativamente grande erro aleatório encontrado (0,051 em termos de desvio padrão da média do atrito) pode mascarar alguma possível correlação da velocidade com o coeficiente de atrito. Esse relativamente grande erro aleatório pode ser explicado principalmente devido à impossibilidade de controle da variável de temperatura do disco junto da pressão e da velocidade, uma vez que essas variáveis são acopladas (aumentando-se a velocidade ou a pressão, a temperatura se modifica por consequência). Contribui também para inflacionar o erro aleatório a heterogeneidade do material de fricção, o que torna a frenagem um fenômeno complexo.

A respeito da relação da velocidade com o coeficiente de atrito, Desplanques et al., 2007, realizando ensaios de frenagem com um tribômetro verificaram que em velocidades mais baixas há um rápido aumento do coeficiente de atrito. Blau e McLaughlin, 2003, em seus estudos concluíram que o atrito tende a cair com o aumento da velocidade.

A Tabela (5) mostra os resultados do teste de significância gerado para o modelo de regressão. Foram testados todos os efeitos principais e interações e ainda foram investigados efeitos quadráticos para a formulação e pressão.

Tabela 5. Resultados do modelo de regressão.

	Coefficientes	Erro padrão	Valor-P	S - Significativo NS - Não signif.
Interseção	0,450	0,022	0,000	S
A	-0,020	0,012	0,116	NS
V	-0,006	0,012	0,641	NS
P	-0,048	0,012	0,000	S
AV	-0,029	0,015	0,056	NS
AP	-0,065	0,015	0,000	S
VP	0,029	0,015	0,059	NS
P ²	0,022	0,021	0,302	NS
AVP	0,061	0,018	0,002	S
A ²	-0,054	0,021	0,014	S

Segundo o modelo de regressão, o coeficiente da equação só é significativo caso o valor de P seja menor do que 0,05. Assim, por meio desta análise, pôde ser constatado que variações nos níveis do parâmetro de entrada A (formulação) relacionam-se com a saída de maneira quadrática (não linear) enquanto que as variações no parâmetro P (pressão) relacionam-se de maneira linear.

Uma vez identificados os termos significativos, a rotina de regressão foi rodada novamente apenas com estes fatores. A Tabela (6) apresenta os dados utilizados para rodar o modelo de regressão a partir dos efeitos significativos. Esta tabela mostra também os resultados de atrito experimental e via modelo de regressão.

Tabela 6. Tabela de dados utilizada para rodar modelo de regressão.

Fatores entrada codificados			Colunas referente aos efeitos a serem investigados				Coeficiente de atrito	
-1 a +1	-1 a +1	-1 a +1					Experimental	Modelo regressão
A	V	P	P	AP	AVP	A ²		
-1	-1	-1	-1	1	-1	1	0,34	0,33
-1	-1	-1	-1	1	-1	1	0,42	0,33
-1	-1	0	0	0	0	1	0,34	0,41
-1	-1	0	0	0	0	1	0,37	0,41
-1	-1	1	1	-1	1	1	0,47	0,49
-1	-1	1	1	-1	1	1	0,43	0,49
-1	0	-1	-1	1	0	1	0,39	0,39
-1	0	-1	-1	1	0	1	0,40	0,39
-1	0	0	0	0	0	1	0,52	0,41
-1	0	0	0	0	0	1	0,43	0,41
-1	0	1	1	-1	0	1	0,47	0,43
-1	0	1	1	-1	0	1	0,48	0,43
-1	1	-1	-1	1	1	1	0,42	0,46
-1	1	-1	-1	1	1	1	0,46	0,46
-1	1	0	0	0	0	1	0,46	0,41
-1	1	0	0	0	0	1	0,50	0,41
-1	1	1	1	-1	-1	1	0,42	0,37
-1	1	1	1	-1	-1	1	0,43	0,37
0	-1	-1	-1	0	0	0	0,40	0,51
0	-1	-1	-1	0	0	0	0,67	0,51
0	-1	0	0	0	0	0	0,59	0,47
0	-1	0	0	0	0	0	0,31	0,47
0	-1	1	1	0	0	0	0,43	0,42
0	-1	1	1	0	0	0	0,48	0,42
0	0	-1	-1	0	0	0	0,58	0,51
0	0	-1	-1	0	0	0	0,60	0,51
0	0	0	0	0	0	0	0,51	0,47
0	0	0	0	0	0	0	0,38	0,47
0	0	1	1	0	0	0	0,32	0,42
0	0	1	1	0	0	0	0,40	0,42
0	1	-1	-1	0	0	0	0,52	0,51
0	1	-1	-1	0	0	0	0,49	0,51
0	1	0	0	0	0	0	0,43	0,47
0	1	0	0	0	0	0	0,37	0,47
0	1	1	1	0	0	0	0,44	0,42
0	1	1	1	0	0	0	0,45	0,42
1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,75	0,58
1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,67	0,58
1	-1	0	0	0	0	1	0,27	0,41
1	-1	0	0	0	0	1	0,42	0,41
1	-1	1	1	1	-1	1	0,26	0,24
1	-1	1	1	1	-1	1	0,25	0,24
1	0	-1	-1	-1	0	1	0,51	0,52
1	0	-1	-1	-1	0	1	0,33	0,52
1	0	0	0	0	0	1	0,39	0,41
1	0	0	0	0	0	1	0,36	0,41
1	0	1	1	1	0	1	0,30	0,30
1	0	1	1	1	0	1	0,26	0,30
1	1	-1	-1	-1	-1	1	0,40	0,46
1	1	-1	-1	-1	-1	1	0,37	0,46
1	1	0	0	0	0	1	0,44	0,41
1	1	0	0	0	0	1	0,36	0,41
1	1	1	1	1	1	1	0,40	0,36
1	1	1	1	1	1	1	0,29	0,36

A equação do atrito definida pelo modelo de regressão é apresentada pela eq. (3).

$$Y = 0,465 - 0,048P - 0,065AP + 0,061AVP - 0,054A^2 \quad (3)$$

onde Y é a variável de resposta [coeficiente de atrito], P é a pressão aplicada [-1 para 0,98 MPa, 0 para 1,96 MPa e +1 para 2,95 MPa], A é a formulação [-1 para formulação 1, 0 para formulação 2 e +1 para o formulação 3], V é a velocidade de escorregamento [-1 para velocidade de 1,67 m/s, 0 para velocidade de 3,35 m/s e +1 para velocidade de 5,02 m/s].

O resultado do fator de correlação R² é de 0,49, o que significa que, segundo a equação sugerida pelo modelo de regressão, 49 % da variável de resposta pode ser explicada a partir das variáveis de entrada investigadas. O restante (cerca de 51 %) é explicado por outros fatores que não foram contabilizados neste estudo.

A fraca correlação entre os fatores de entrada investigados e a variável de resposta se deve a complexidade das condições tribológicas envolvidas no contato entre os corpos atritados, uma vez que o material é heterogêneo. Além disso, um dos principais parâmetros operacionais – que é a temperatura, segundo Preston e Forthofer, 1971 – não foi controlado neste experimento (variável livre), sendo apenas registrado o seu valor, o que pode ter contribuído significativamente para o aumento do erro aleatório sobre os resultados de atrito. A Tabela (7) apresenta os resultados da temperatura medida a cada ensaio, onde cada dado representa a média da temperatura do disco medida nos instantes 28, 29 e 30s, ou seja, onde foram avaliados os coeficiente de atrito utilizados nas análises. Não foram realizados estudos a cerca do desvio padrão dos dados de temperatura uma vez que isso foge do escopo principal deste trabalho.

Tabela 7. Temperatura medida em cada ensaio.

	V1			V2			V3		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
A1	105,28	108,78	122,99	116,76	136,92	152,86	123,41	157,84	143,70
	105,33	110,62	121,68	116,17	129,64	152,43	125,57	153,67	152,06
A2	107,54	125,89	126,29	125,75	143,05	140,09	132,72	158,64	183,67
	116,03	111,35	130,07	124,04	131,12	149,79	127,40	152,04	185,68
A3	115,73	108,70	115,02	120,44	133,11	136,98	123,64	153,29	185,40
	113,07	116,81	115,34	111,19	128,37	131,16	121,58	142,86	150,35

Ainda hoje não existem equipamentos de ensaios de frenagem capazes de executar ensaios isolando cada uma das principais variáveis de operação (pressão, velocidade e temperatura), uma vez que a temperatura é uma consequência da pressão ou da velocidade aplicada e, portanto, estas variáveis são acopladas. Dessa forma, pelo menos uma destas variáveis de entrada necessariamente fica impossibilitada de ser mantida fixa e considerada no modelo estatístico, inflacionando o erro aleatório. No caso dos ensaios acima discutidos, a variável não considerada como fator de entrada foi a temperatura do disco. Está sendo estudada a possibilidade de implementação de um sistema para o controle independente da temperatura no tribômetro utilizado neste trabalho através de sistema de aquecimento indutivo do disco.

A fim de apresentar os resultados de atrito de um material de fricção utilizado em freios automotivos mantendo-se a variável da temperatura como o parâmetro constante, foi executado um experimento no qual se fixou a taxa de aquecimento do disco (175°C num tempo de 60s) através da aplicação de torque de frenagem constante (12 Nm) ao longo do tempo. Porém, com isto a pressão de contato passa a ser o parâmetro não controlado, uma vez que o torque constante é conseguido a partir do controle da pressão ao logo do tempo. Este ensaio foi executado com um único material (formulação A1) e velocidade constante de 3,15 m/s, sendo feitas 61 repetições. A medição do coeficiente de atrito foi realizada no instante de 60s, momento em que disco atingia 175°C. A Figura (3) apresenta os resultados de coeficiente de atrito na forma de histograma para o procedimento acima descrito para os 61 ensaios.

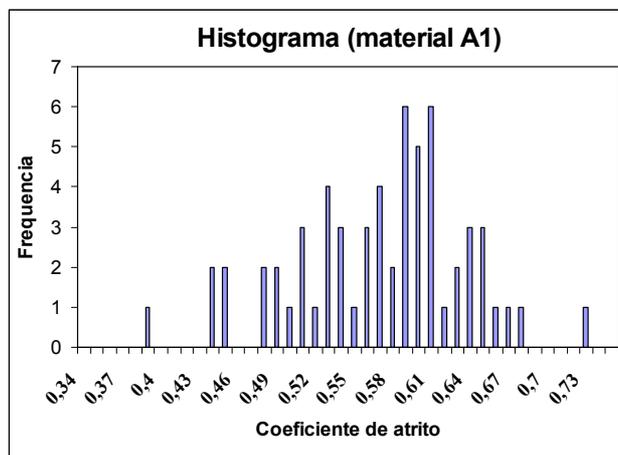


Figura 3. Histograma de atrito medido para ensaio com temperatura constante.

Note que o histograma de atrito é aproximadamente uma curva gaussiana, ainda que distorcida para a direita. Da mesma forma que nos ensaios anteriores, em que a variável não contabilizada foi a temperatura, aqui também os dados de atrito apresentam variabilidade relativamente grande (erro aleatório) que, neste caso, é devido principalmente a não contabilização da pressão de contato (parâmetro livre), o que acaba constituindo um fator de ruído.

Uma possibilidade futura de avaliação das variáveis de entrada é manter fixa a pressão de contato e a velocidade de escorregamento em cada condição e medir o coeficiente de atrito no exato instante em que a temperatura atingir o patamar fixo desejado. Este tipo de abordagem foi realizada por Mäki, 2005, porém em condições de escorregamento com lubrificação, pois o seu trabalho foi feito com materiais de fricção para embreagens usadas em transmissões automáticas de veículos. O autor deste estudo obteve resultados importantes sobre a influência da velocidade sobre o coeficiente de atrito.

5. CONCLUSÕES

A incerteza teórica da medida do coeficiente de atrito associada ao sistema de medição da máquina é de $\pm 0,54\%$ sobre a medida nominal.

Com base nas análises deste trabalho foi possível concluir que mudanças na velocidade de escorregamento não alteram significativamente o coeficiente de atrito. Porém esse resultado não pode ser generalizado a todos os tipos de materiais de fricção, uma vez que diferentes materiais podem responder de forma diferente a esta variável de entrada. Além disso, o relativamente grande erro aleatório medido nos ensaios do presente trabalho pode mascarar uma possível correlação existente entre a velocidade de escorregamento e o coeficiente de atrito.

A mudança na formulação implementada entre as 3 amostras avaliadas relaciona-se de maneira quadrática (não linear) com o coeficiente de atrito enquanto que o aumento da pressão de contato relaciona-se de maneira linear e inversamente proporcional com o mesmo.

O presente trabalho mostra que análises da influência de parâmetros operacionais como pressão, velocidade e temperatura sobre os resultados de atrito de materiais de fricção constituem um desafio a ser superado, uma vez que as variáveis em questão são acopladas, ou seja, ao aumentar a velocidade ou a pressão por exemplo, a temperatura também se modifica por consequência. Dessa maneira, pelo menos uma das variáveis necessariamente fica livre e não pode ser mantida fixa, o que acaba inflacionando o erro aleatório. Isso ajuda a explicar a relativamente pequena correlação apresentada pelos experimentos deste trabalho ($R^2 = 0,49$). A heterogeneidade dos materiais de fricção igualmente torna o processo de frenagem ainda mais complexo de ser analisado, contribuído para o aumento do erro aleatório.

6. REFERÊNCIAS

- Blau P.J., McLaughlin J.C., 2003. "Effects of water films and sliding speed on the frictional behavior of truck disc brake materials", *Tribology International* 36, pg. 709-715.
- Cristol-Bulthé, A.-L., Desplanques, Y., Degallaix, G., 2007. "Coupling between friction physical mechanisms and transient thermal phenomena involved in pad-disc contact during railway braking", *Wear* (2007), doi:10.1016/j.wear.2006.12.052.
- Desplanques, Y., Degallaix, G., Roussete, O., Francois, M., Bulthé, A.-L., 2006. "A reduced-scale test for pad-disc contact tribological analysis in railway braking", *Wear* 262.
- Desplanques Y., Roussete O., Degallaix G., Copin R., Berthier Y., 2007. "Analysis of tribological behaviour of pad-disc contact in railway braking. Part 1. Laboratory test development, compromises between actual and simulated tribological triplets", *Wear* 262 (5-6) pg. 582-591.
- Infantini, M.B., 2008. "Variáveis de Desempenho dos Sistemas de Freios", Dissertação de Mestrado, 96 folhas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS.
- Júnior, M.J.S. e Irigoyen, E.R.C., 1985. "Metrologia Dimensional: teoria e prática", UFRGS, 1ª edição.
- Kline S.J., McClintok F.A., 1953. "Describing uncertainties in single sample experiment", *Mech Eng* 75 (1953), pg. 3-8.
- Lee K., Blau P.J., Truhan Jr. J.J., 2007. "Effects of moisture adsorption on laboratory wear measurements of brake friction materials", *wear* 262 (2007) 925-930.
- Mäki, R., 2005. "Wet Clutch Tribology – Friction Characteristics in Limited Slip Differentials", Universidade de Tecnologia de Lulea, Suécia.
- Nanni, L.F. & Ribeiro, J.L., 1991, "Planejamento e avaliação de experimentos". Caderno de Engenharia 17/87, 2ª ed., CPGE/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Preston, J.D, Forthofer, R.J., 1971. "Correlation of Vehicle, Dynamometer and Other Laboratory Tests for Brake Friction Materials". Society of Automotive Engineers, paper 710250.

7. RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

USE OF A STATISTICAL METHODOLOGY TO ASSESS THE INFLUENCE OF INPUT PARAMETERS ON THE FRICTION RESULTS OF BRAKING TESTS PERFORMED ON A TRIBOMETER

Patric Daniel Neis, engmecpatric@yahoo.com.br
Flávio José Lorini, lorini@ufrgs.br
Ney Francisco Ferreira, neyferr@gmail.com

CON10-0087

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Sarmiento Leite, 425 – 90050-170 – Tel.: +55 51 33083567
Porto Alegre – RS - Brasil

***Abstract.** The main goal of this work is to assess how controlled variations in operational parameters (contact pressure and slipping velocity) as well as in friction material formulation may relate to the results over coefficient of friction measured during braking tests performed on a tribometer. Experiments were performed varying the input factors (formulation, pressure and velocity) at three levels, with two replicates for each condition or level tested. The uncertainty of the machine, calculated from the data of the manuals for each instrument involved in the process of measuring the coefficient of friction is $\pm 0.54\%$ of the nominal measurement. In order to do the significance analysis and correlation between input and output the analysis of variance (ANOVA) and regression model was used to, run on Microsoft Excel 2003. Based on the analysis of this study it was concluded that changes on slipping velocity do not significantly change the coefficient of friction, a result that should not be generalized to all friction materials. The implemented change in formulation between the three samples evaluated related to the coefficient of friction in a quadratic (nonlinear) way while increasing the contact pressure is related to it linearly and inversely proportional. The relatively low correlation established by regression model ($R^2 = 0.49$) can be attributed to relatively high random error of the measures involved in this experiment. This is a consequence of the impossibility to keep constant in the same time each factor input (pressure, velocity and temperature) that acts during on the tribological process. Furthermore, the heterogeneity of the friction material also contributes to the increase in random error.*

Keywords: tribometer, brakes, friction, Anova, regression model.