

MEDIDAS DAS FORÇAS DE CORTE NO TORNEAMENTO DURO DE PISTAS DE ROLAMENTOS

Sergio Delijaicov

sergiode@fei.edu.br

Departamento de Engenharia de Mecânica, Centro Universitário da FEI

Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972 – 09850-901 – São Bernardo do Campo - SP – Brasil

João Batista de Aguiar

Gilmar Ferreira Batalha

aguiarjb2000@yahoo.com.br

gfbatalh@usp.br

Dept. de Engenharia de Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da USP

Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - 05508-900 – Cidade Universitária – São Paulo - SP – Brasil

Resumo. Forças de usinagem em torneamento de aços duros são difíceis de quantificar numérica e analiticamente. A experimentação é essencial na determinação das componentes destas forças onde altas velocidades de corte estão envolvidas. Este trabalho tem como objetivo a medida, a comparação e a análise destas forças. Um conjunto de experimentos foi conduzido para alcançar este objetivo. Transdutores instrumentados com sensores piezo-elétricos foram utilizados na aquisição de sinais das forças de usinagem. Propriedades mecânicas e tratamentos térmicos, geometria, assim como os parâmetros do processo foram considerados. A influência dos mesmos nas componentes das forças de corte, durante a usinagem de pistas internas de rolamentos cônicos é medida e analisada. Baseado na experimentação é proposta uma expressão de correlação entre a força de penetração e os parâmetros significativos do processo.

Palavras – chave. Torneamento de aços endurecidos, Parâmetros de corte, Esforços de corte.

1. INTRODUÇÃO

Ao contrário do que ocorre no processo convencional, no torneamento de aços endurecidos tensões residuais de compressão são introduzidas nas camadas superficiais e sub-superficiais. Aumenta com isto a resistência à fadiga da peça, Matsumoto et al⁽¹⁾, o que é particularmente benéfico nas aplicações envolvendo elementos girantes sob cargas externas, como os rolamentos. Thielle et al⁽²⁾ afirmam que as altas temperaturas e o rápido resfriamento na região de corte podem provocar a re-têmpera do material da superfície da peça, gerando uma camada fina de martensita conhecida como camada branca. Como consequência desta transformação, logo abaixo desta camada, uma outra camada pode se formar, a camada negra de re-revenido, de dureza mais baixa e em estado do tração. Segundo Liu e Barash⁽³⁾ e Fleming et al⁽⁴⁾, um dos principais fatores na formação desta micro-estrutura, nas camadas superficial e sub-superficial do aço usinado, é o desgaste da ferramenta, fator crítico no aumento da temperatura na região de corte.

Em relação às componentes dos esforços de usinagem, de acordo com Abraão et al.⁽⁵⁾, o processo do torneamento em altas velocidades de materiais endurecidos difere do processo convencional, uma vez que a força de penetração, no primeiro caso, é o esforço mais intenso, enquanto que no segundo, o esforço de corte é o maior.

Neste trabalho, procurou-se investigar a existência de uma relação entre os esforços de usinagem, particularmente a força de penetração, com os principais parâmetros do processo na peça usinada – pista do anel interno de rolamentos cônicos, de aço DIN 100CrMn6 e com dureza entre 60 e 64 HRc.

A experimentação foi planejada para uma análise estatística, seguindo metodologia estruturada de projeto de experimentos, de forma a reduzir com isso os custos e o tempo dos ensaios, Box⁽⁶⁾. A análise foi feita levando-se em consideração a influência dos parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço, profundidade de penetração e raio da ponta da ferramenta), sobre a força de penetração decorrente do processo.

2. PROCEDIMENTO

2.1 Projeto Experimental.

O planejamento experimental foi elaborado para ser realizado através de uma análise fatorial completa com uma replicação em dois níveis e quatro fatores (velocidade de corte v_c , avanço f , profundidade de penetração p , raio da ponta da ferramenta ρ). O objetivo incluía a avaliação dos elementos mais significativos e suas respectivas interações, nas respostas procuradas de usinagem e microestrutura do material. As componentes da força de usinagem incluem a força de F_c , a de avanço F_f e a de penetração F_p . Condições de experimentação supõem:

Condições Fixas: < Geometria do corpo de prova, *c.p.*; Material do *c.p.*; Dureza do *c.p.*, Geometria dos insertos; Máquina operatriz; Material dos insertos; Ausência de lubrificação >

Variáveis Independentes: < v_c ; f ; p ; ρ >

Variáveis Dependentes: < F_c ; F_f ; F_p >

2.2 Máquina-Ferramenta

A máquina-ferramenta usada nos ensaios é um torno CNC – OKUMA LB300 (origem Okuma – Japão), com as seguintes especificações nominais: Potência do motor do fuso: VAV 15/11 [Kw], Velocidade do fuso: 45 – 4500 [rpm], Torre: doze posições para a ferramenta, Máximo diâmetro torneável: 370 [mm], Máximo comprimento de corte: 250 [mm], Alta pressão de refrigeração.

2.3 Corpos de prova.

Os ensaios foram realizados na pista do anel interno de rolamentos cônicos, (figura 01), produzidos pela FAG - Rolamentos FAG Ltda.

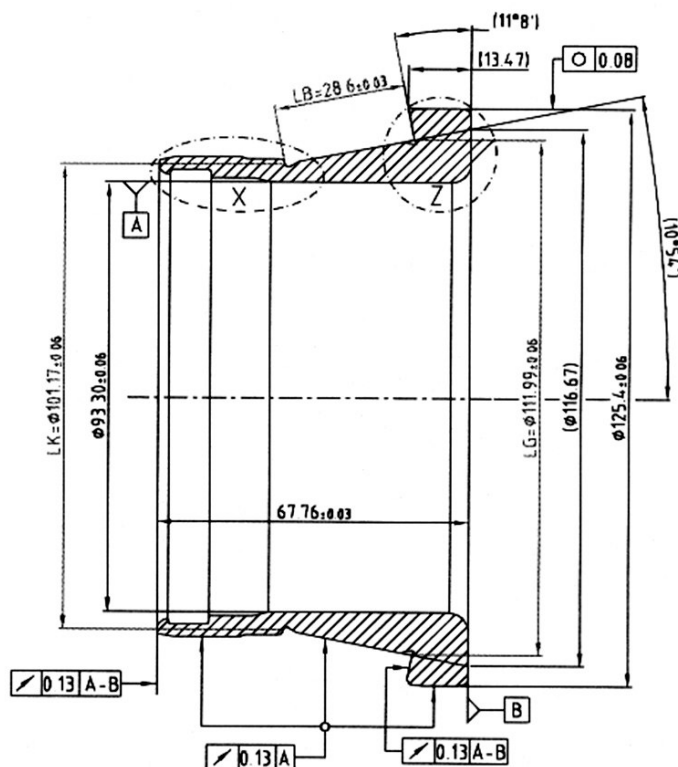


Figura 1. Desenho da peça utilizada nos experimentos

2.4 Material e tratamentos térmicos dos corpos de prova.

Os experimentos foram todos realizados com peças em aço DIN 100 CrMn6, submetidos a tratamento de têmpera e revenimento para dureza entre 62 e 64 HRC. Os valores das durezas dos 32 corpos de prova em escala Vickers e Rockwell, foram obtidos através de um durômetro digital SHIMADZU, modelo HVM2 – Micro Hardness tester. Através da figura 2 pode-se observar a microestrutura do aço beneficiado: sua matriz é tipicamente martensítica com alto teor de carbono e carbonetos primários dispersos em toda a sua massa, podendo conter de 5 a 10% de austenita retida.

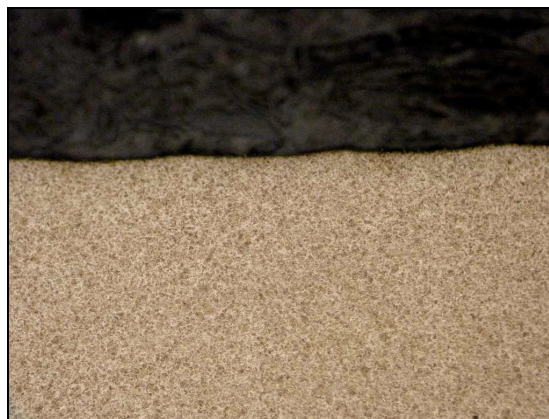


Figura 2. Micrografia do Aço 100CrMn6 antes da usinagem, aumento 200x

A análise da composição química do aço usado nos experimentos, foi realizada por Electroscopia de Emissão Atômica (plasma acoplado indutivamente) e revelou os valores indicados pela Tabela 1.

Tabela 1 Composição química do aço usado nos experimentos

Elemento	C	Si	Mn	Cr	P	S	Ni	Cu
%	0.93	0.49	1.02	1.48	0.018	0.012	0.12	0.15

2.5 Propriedades mecânicas do aço DIN 100CrMn6

A avaliação das propriedades mecânicas do aço foi feita através de uma máquina de ensaios MTS - 810, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço 100CrMn

Corpo de Prova, c.p	Medidas
Diâmetro inicial do c.p., (mm)	11,87
Diâmetro final do c.p., (mm)	10,10
Comprimento final (mm)	56,82
Separação de sujeição	70,00
Alongamento total em 50 mm, %	13,60
Área inicial, (mm ²)	110,70
Área final, (mm ²)	80,10
Estricção – redução de área, %	27,60
Limite de escoamento, MPa	480
Limite de resistência, MPa	894
Limite de ruptura, MPa	836
Energia até a ruptura, Nmm/mm ²	179,60
Módulo de elasticidade, GPa	212

2.6 Insertos.

Pastilhas CBN do tipo VNMA 160404(08) – BCN 200 com quatro faces de corte, revestidas com cerâmicas à base de Telam e fabricadas pela Sumitomo, foram utilizadas nos experimentos. São pastilhas indicadas para a usinagem em corte interrompido e corte contínuo, para velocidades na faixa de 150 a 300 m/min.

2.7 Transdutor para a medida dos esforços de usinagem

Para as medidas dos esforços de usinagem foi utilizado o transdutor piezo-elétrico PCB-260A01 com fundos de escalas de 4,45 KN para as forças de avanço e corte e de 5,87 KN para a força de penetração. A figura 3 ilustra o transdutor e a figura 4 as forças de usinagem medidas.

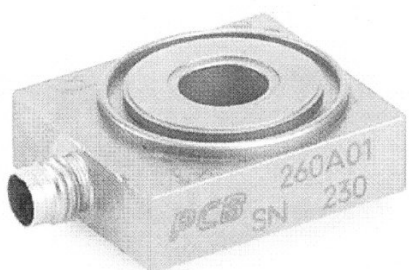


Figura. 3 Transdutor piezo-elétrico

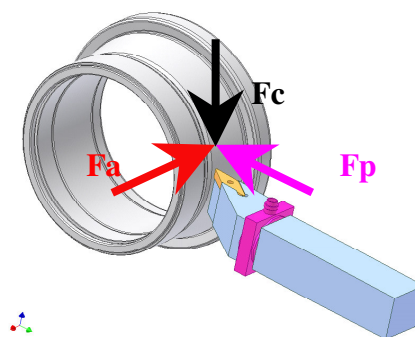


Figura. 4 Esforços de usinagem

2.8 Parâmetros de usinagem.

Os parâmetros de usinagem, tabela 3, foram escolhidos de modo a atender as condições de uso industrial e a pesquisa acadêmica desenvolvida.

Tabela 3. – Parâmetros experimentais de torneamento

Variável	Valor Mínimo	Valor Máximo
Velocidade de corte, (m/min)	150	200
Avanço (mm/volta)	0,05	0,15
Profundidade de penetração, (mm)	0,05	0,20
Raio da ponta da ferramenta (mm)	0,40	0,80

2.10 Sistema de aquisição de dados

O equipamento usado na aquisição dos sinais do transdutor piezo-elétrico foi o Spider8 da Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) com o Catman HBM Software (catman V 4.0). A aquisição dos dados foi feita numa frequência de 200 Hz.

2.11 Sistema ferramenta-transdutor-inserto

O suporte da ferramenta foi projetado em forma bi-partida, com a finalidade de alojar o transdutor piezo-elétrico, como se pode observar na figura 5. A montagem é feita através de um pino roscado exercendo-se uma força de compressão de 50 KN sobre o transdutor, conforme indicação do fabricante. Com o auxílio do programa NASTRAN, avaliou-se por

elementos finitos, as primeiras freqüências naturais de vibração do sistema ferramenta-transdutor: 3185,46 Hz, 3187,88 Hz, 10087,52 Hz.

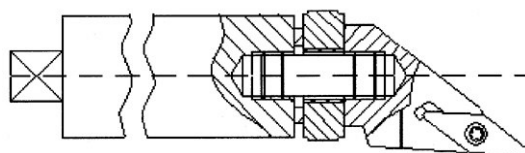


Figura 5. Desenho de montagem do sistema ferramenta – transdutor – inserto

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 Forças de usinagem.

A tabela 4 indica os valores máximos das forças de usinagem, para o planejamento fatorial em dois níveis e quatro fatores, com uma replicação. São 32 ensaios, sendo dois a dois iguais, isto é, de 1 a 16 e de 17 a 32, respectivamente. A tabela 5 mostra a repetibilidade dos ensaios.

Tabela 4. Valores experimentais para as forças de torneamento

Exp	v_c (m/min)	f (mm/rev)	p (mm)	ρ (mm)	F_X (N)	F_Y (N)	F_Z (N)	R (N)
1	150	0,05	0,05	0,4	26,30	33,90	59,90	73,68
2	210	0,05	0,05	0,4	17,90	17,30	28,50	37,84
3	150	0,15	0,05	0,4	50,30	71,20	91,80	126,60
4	210	0,15	0,05	0,4	50,30	75,40	91,90	129,08
5	150	0,05	0,20	0,4	37,30	65,10	137,10	156,29
6	210	0,05	0,20	0,4	38,10	64,10	134,30	153,61
7	150	0,15	0,20	0,4	74,70	146,70	222,60	276,86
8	210	0,15	0,20	0,4	63,30	142,10	203,20	255,91
9	150	0,05	0,05	0,8	30,80	33,40	51,40	68,60
10	210	0,05	0,05	0,8	31,30	31,30	52,20	68,44
11	150	0,15	0,05	0,8	62,10	75,90	93,30	135,36
12	210	0,15	0,05	0,8	58,70	76,30	90,50	132,13
13	150	0,05	0,20	0,8	47,70	60,10	104,30	129,48
14	210	0,05	0,20	0,8	52,20	62,90	114,90	141,01
15	150	0,15	0,20	0,8	103,60	162,60	228,90	299,28
16	210	0,15	0,20	0,8	86,80	127,70	163,50	224,89
17	150	0,05	0,05	0,4	23,60	32,30	53,60	66,88
18	210	0,05	0,05	0,4	19,10	21,60	33,40	44,12
19	150	0,15	0,05	0,4	53,30	75,90	98,80	135,51
20	210	0,15	0,05	0,4	50,30	74,40	91,20	128,00
21	150	0,05	0,20	0,4	37,70	63,30	132,80	151,87
22	210	0,05	0,20	0,4	40,00	67,90	144,10	164,24
23	150	0,15	0,20	0,4	76,50	147,00	219,90	275,35

24	210	0,15	0,20	0,4	68,20	131,60	195,20	245,10
25	150	0,05	0,05	0,8	30,30	33,80	57,50	73,26
26	210	0,05	0,05	0,8	31,20	27,70	46,70	62,62
27	150	0,15	0,05	0,8	56,70	76,30	86,30	128,39
28	210	0,15	0,05	0,8	59,80	70,10	93,90	131,56
29	150	0,05	0,20	0,8	44,20	62,90	104,40	129,65
30	210	0,05	0,20	0,8	49,20	62,90	111,30	136,98
31	150	0,15	0,20	0,8	102,90	160,40	243,90	309,52
32	210	0,15	0,20	0,8	92,90	143,20	176,80	245,75

Apesar da fixação das condições de ensaio, ocorrem variações em quantidades não monitoradas, e que induzem variações nos valores medidos nos experimentos. Portanto, uma análise estatística dos resultados se faz necessária. A tabela 5 indica a verificação da repetibilidade dos testes.

Tabela 5. Repetibilidade dos valores experimentais das forças de torneamento

Par	v_c	f	p	ρ	\bar{F}_x	σ_{F_x}	\bar{F}_y	σ_{F_y}	\bar{F}_z	σ_{F_z}	R	σ_R
1 - 17	150	0,05	0,05	0,4	24,95	1,91	33,10	1,13	56,75	4,45	70,28	4,81
2 - 18	210	0,05	0,05	0,4	18,50	0,85	19,45	3,04	30,95	3,46	40,98	4,44
3 - 19	150	0,15	0,05	0,4	51,80	2,12	73,55	3,32	95,30	4,95	131,05	6,30
4 - 20	210	0,15	0,05	0,4	50,30	0,00	74,90	0,71	91,55	0,49	128,54	0,76
5 - 21	150	0,05	0,2	0,4	37,50	0,28	64,20	1,27	134,95	3,04	154,08	3,12
6 - 22	210	0,05	0,2	0,4	39,05	1,34	66,00	2,69	139,20	6,93	153,61	7,52
7 - 23	150	0,15	0,2	0,4	75,60	1,27	146,85	0,21	221,25	1,91	276,10	1,07
8 - 24	210	0,15	0,2	0,4	65,75	3,46	136,85	7,42	199,20	5,66	250,50	7,64
9 - 25	150	0,05	0,05	0,8	30,55	0,35	33,60	0,28	54,45	4,31	70,93	3,29
10 - 26	210	0,05	0,05	0,8	31,25	0,07	29,50	2,55	49,45	3,89	65,53	4,11
11 - 27	150	0,15	0,05	0,8	59,40	3,82	76,10	0,28	89,80	4,95	131,88	4,93
12 - 28	210	0,15	0,05	0,8	59,25	0,78	73,20	4,38	92,20	2,40	131,84	0,40
13 - 29	150	0,05	0,2	0,8	45,95	2,47	61,50	1,98	104,35	0,07	129,57	0,12
14 - 30	210	0,05	0,2	0,8	50,70	2,12	62,90	0,00	113,10	2,55	139,00	2,85
15 - 31	150	0,15	0,2	0,8	103,25	0,49	161,50	1,56	236,40	10,61	304,40	7,24
16 - 32	210	0,15	0,2	0,8	89,85	4,31	135,45	10,96	170,15	9,40	235,32	14,76

3.2 Análises fatoriais para as forças de usinagem

Uma vez executado o planejamento fatorial indicado, pode-se observar, a partir das figuras 6 e 7, gráficos dos efeitos das variáveis de processo sobre as forças de penetração F_p e resultante da usinagem $R = \sqrt{F_p^2 + F_f^2 + F_c^2}$, que nos dois casos os efeitos significativos são os mesmos. Ou seja, avanço e a profundidade de penetração, permitindo prosseguir com a pesquisa usando somente a força de penetração.

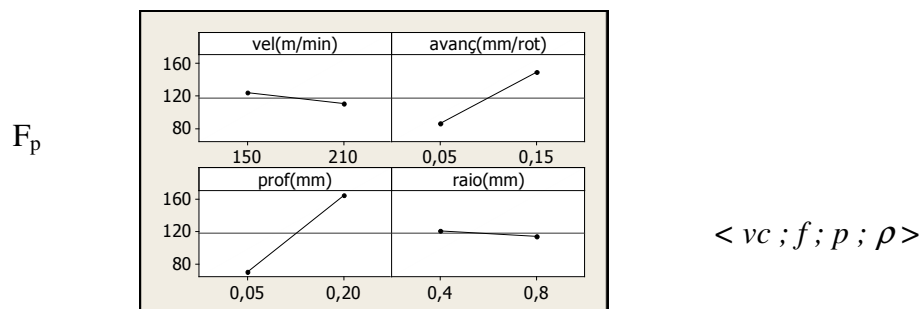


Fig. 06 – Efeitos dos fatores do processo sobre a força de penetração

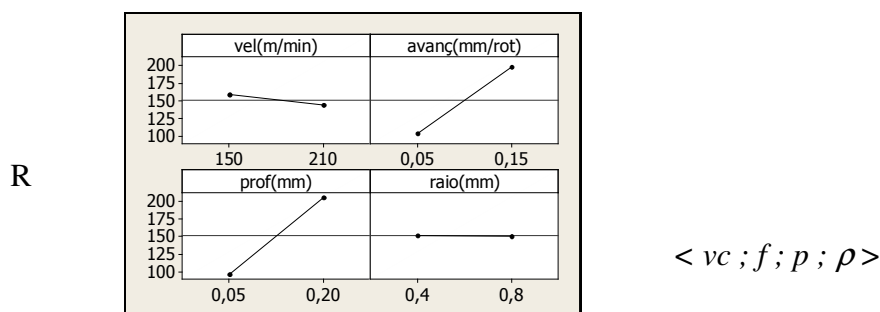


Fig. 07 –Efeitos dos fatores do processo sobre a força Resultante

3.5 Microestrutura dos corpos de prova após a usinagem

Foram feitas micrografias nos 32 corpos de prova usinados. O objetivo principal era o de detectar a presença da camada branca no metal. A análise das micrografias revelou que o superaquecimento e a conseqüente re-têmpera não ocorreram nas condições estabelecidas em nenhum dos corpos de prova do experimento. A estrutura do metal praticamente não se alterou, mantendo-se como martensita revenida com carbonetos primários dispersos em todo o metal.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As análises fatoriais relativamente às forças de torneamento, mostraram uma similaridade de resultados para a força de penetração F_z e a resultante das forças de usinagem R , tanto em relação às variâncias, quanto em relação aos fatores mais significativos de influência no processo. A representação destes efeitos na forças de penetração e na resultante das forças de usinagem é dada através das figuras 6 e 7.

A segurança nas medidas das forças de usinagem decorreu dos altos valores das primeiras frequências naturais de vibração do transdutor, calculadas via elementos finitos, quando comparadas com as frequências induzidas pelo processo de torneamento, uma vez que a máxima velocidade de corte usado nos experimentos foi 210 m/s em um diâmetro dos corpos de prova de 110 mm.

Como os efeitos não significativos são zero ou aleatoriamente distribuídos em torno do zero, os respectivos gráficos normais e de Pareto indicam que, para um intervalo de

confiança de 95% ($\pm 1,96.\sigma$), os fatores avanço, profundidade de penetração e a interação entre estes mesmos fatores, são os mais significativos tanto para a força de penetração, quanto para a resultante das forças.

As figuras 6 e 7 mostram nitidamente, que a velocidade de corte e o raio da ponta da pastilha, não exercem influência sobre as forças consideradas. Por outro lado, tanto um aumento no avanço, quanto na profundidade de penetração, aumentam a média dos valores da força de penetração.

A variação positiva do avanço provoca um volume maior de retirada de material usinado numa mesma unidade de tempo, além de estabelecer um efeito dinâmico sobre os esforços de usinagem, da mesma forma que a variação positiva da profundidade de penetração acarreta um maior volume de material cortado. Estes fatos explicam a significância destes fatores sobre a força de penetração.

A análise fatorial também nos indica que a velocidade de corte não interage com os outros fatores quanto à influência sobre a força de penetração, pois as curvas para velocidades alta e baixa praticamente coincidem, tanto interagindo com o avanço quanto com a penetração ou com o raio da ponta da ferramenta. Da mesma forma ocorre com o raio da ponta da ferramenta, uma vez que para valores altos ou baixos do mesmo, a variação da velocidade de corte, do avanço ou da profundidade de penetração praticamente não alteram as médias da força de penetração. Por outro lado, nota-se que a interação avanço e profundidade de penetração tem alguma influência sobre a força de penetração.

Baseado nos valores experimentais e nos resultados das análises fatoriais, propôs-se, com o auxílio do programa MatLab, um expressão de ajuste, figuras 9 e 10, para descrever a dependência da força de penetração F_z com o avanço a e a profundidade de penetração p , para um grau de confiança de 90% na identificação dos fatores significativos.

A figura 10 foi construída a partir da expressão ajustada para a força de penetração indicando as suas variações em função do avanço e da profundidade de penetração. Pode-se observar que a força de penetração cresce para valores crescentes de avanço e profundidade de penetração:

$$F_z = 12,37 a^{0,75} + 434,00 p^{0,35} \quad (1)$$

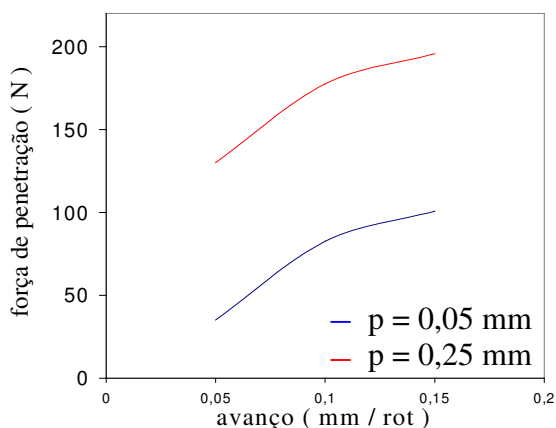


Figura 8. Variação da força de penetração com o avanço

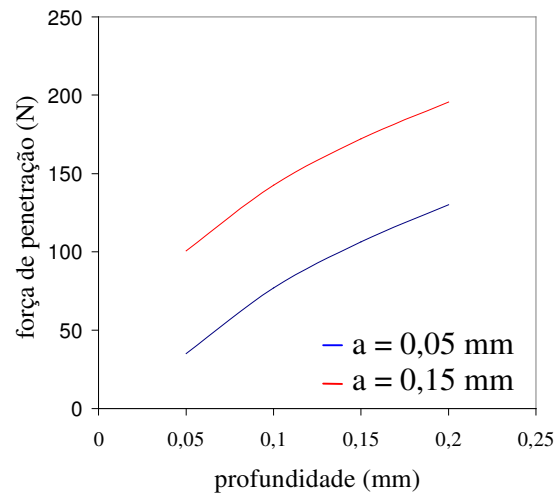


Figura 9. Variação da força de penetração com a profundidade de corte

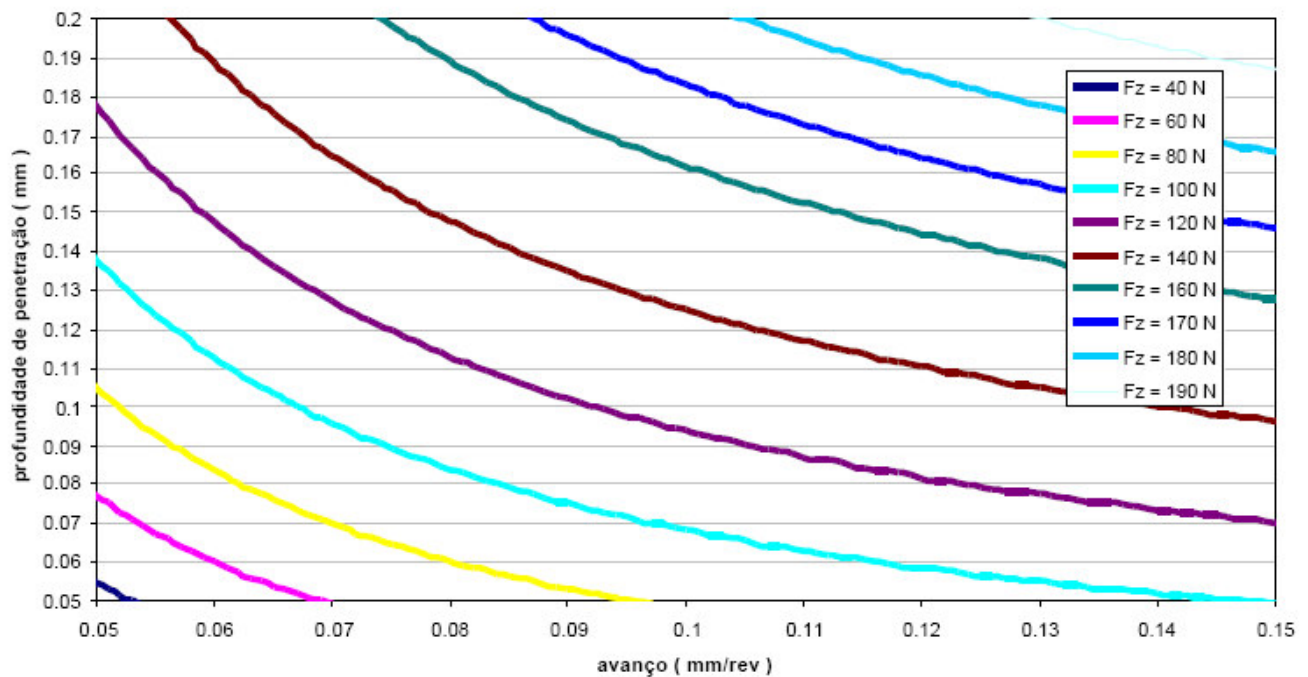


Figura 10. Curvas de iso-valores da força de penetração

5. CONCLUSÕES

Os resultados proporcionados pela série de medidas executadas durante o programa de testes desenvolvido neste trabalho, indica fatos, que dentro do âmbito do espaço analisado, permitem algumas interpolações. Os valores medidos da força de penetração foram sempre os maiores dentre os esforços de torneamento e:

- Os parâmetros avanço e profundidade de penetração são os fatores que mais afetam a força de penetração.
- A força de penetração cresce com o aumento do avanço e da profundidade de penetração.
- A resultante dos esforços de usinagem se comporta da mesma forma que a força de penetração, quanto aos fatores avanço e profundidade de penetração.
- Não se constatou transformações de fases decorrentes da usinagem e conseqüentes formações de “camadas brancas” no domínio dos experimentos deste trabalho.
- A relação entre os parâmetros avanço e profundidade de penetração com a força de penetração pode ser descrita através de expressões do tipo linear e potencial.

Referências

1. ABRÃO, A.M. et al. O desgaste de ferramenta, as forças e a temperatura de corte na usinagem do aço-rolamento temperado. Máquinas e Metais, v.364, p.84-97, maio 1996.
2. BOX, G. E., HUNTER, W.G., HUNTER, J.S. Statistics of experimenters an introduction to designs, data analysis and model building. Wiley, New York, 1978.
3. FLEMING, M.A. et al. PCBN hard turning and workpiece surface integrity. Industrial Diamond Review, p.128 – 133, abril 1998.
4. LIU, C. R.; BARASH, M.M. The mechanical state of the sublayer or a surface generated by chip-removal process. Transactions of the ASME – Journal of Engineering for Industry, p.1202 – 1208, novembro 1976.
5. MATSUMOTO, Y. et al. Effect of hardness on the surface integrity of AISI 4340 steel. V. 108, p.169 – 175, agosto 1986.
6. MONTGOMERY, D.C. Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons, New York, 1984.
7. THIELE, J. D. et al. Effect of cutting-edge geometry and workpiece hardness on surface residual stresses in finish hard turning of AISI 52100 steel. Transactions of the ASME, v.122, p. 642-649, novembro 2000.

Abstract. *Forces occurring during turning operations on hard steels are of difficult quantification, numerically and analytically. An experimental program is essential to the determination of the components of these forces, where high cutting speeds are involved. Here these forces are measured, compared and analysed. During work, a set of experiments is conducted. Transducers instrumented with piezo-electric materials were used to acquire the turning forces. Mechanical properties, heat treatments, geometry as well as occurring during machining of the internal rings of conical roller bearings are measured and analysed. Based on the obtained results, an approximate expression of correlation force with significant variables of the process is developed.*

Keywords: *Hard turning steels, cutting parameters, cutting forces*

