

MEDIDA DE TENSÕES RESIDUAIS NO PROCESSO DE TORNEAMENTO DURO DE UM AÇO DIN 100CrMn6 E SUAS CORRELAÇÕES COM OS ESFORÇOS DE CORTE

João B. de Aguiar

Dept. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da USP - Av.
Prof. Mello Moraes, 2231 - 05508.970 São Paulo, SP - jbaguiar@usp.br

Sergio Delijaicov

Dept. de Engenharia Mecânica - Centro Universitário da FEI - Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972 - 09580.901 - S. Bernardo do Campo - SP - sergiode@fei.edu.br

Nelson Batista de Lima

Comissão Nacional de Energia Nuclear - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Departamento de Caracterização de Materiais. - Travessa R, 400 - Cidade Universitária - 05508-900 - São Paulo, SP

Gilmar Ferreira Batalha

Dept. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da USP - Av.
Prof. Mello Moraes, 2231 - 05508.970 São Paulo, SP - gfbatalh@usp.br

Resumo. *Este trabalho estuda a influência dos parâmetros da usinagem - velocidade de corte, avanço, penetração e raio da ponta da ferramenta - sobre as forças de torneamento - forças de corte, avanço e penetração - e sobre as tensões residuais, em anéis internos de rolamentos cônicos de aço DIN 100CrMn 6 endurecidos a 62 HRC. Uma correlação entre os referidos esforços e as tensões é estabelecida por meio de um planejamento fatorial completo. O efeito dos parâmetros de corte sobre a microestrutura do metal e sua correlação com as tensões residuais é estudado, utilizando-se como máquina-ferramenta um torno CNC - OKUMA LB300 e insertos de CBN. Para a medida das forças de usinagem, foi usado um transdutor piezoelétrico da PCB, montado diretamente no cabo da ferramenta. Para a medida das tensões residuais foi usado um difratômetro RIGAKU - modelo DEMAX, com planos de reflexão (2 1 1) e radiação do tipo Cr K α . Os resultados encontrados mostraram que a força de penetração, principal fator de influência nas tensões residuais, tem como parâmetros mais significativos o avanço e a profundidade de penetração; os mesmos fatores, também são os mais significativos para as tensões residuais. Não houve variação da microestrutura do material, superficial e sub-superficialmente, nas condições de usinagem - parâmetros e ferramentas - estabelecidas no trabalho. Ao final uma correlação entre a força de penetração e tensões residuais, com os fatores relevantes de processo, é estabelecida.*

Palavras-chave: *forças de corte, tensões residuais, torneamento duro, usinagem.*

1. INTRODUÇÃO

O torneamento em aços endurecidos, ao contrário do processo convencional, introduz tensões residuais de compressão em camadas superficiais e sub-superficiais de peças usinadas, aumentando com isto a sua resistência à fadiga Matsumoto, Y et al⁽⁶⁾. Isso é particularmente benéfico às aplicações envolvendo elementos girantes sob cargas externas, como rolamentos. 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, Thielle⁽⁹⁾. Como consequência desta transformação, logo abaixo desta camada, uma outra pode se formar, a camada negra de re-revenido, de dureza mais baixa e em estado de tração. Segundo Liu e Barash⁽⁵⁾ 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 para o aumento da temperatura na região de corte.

Neste trabalho, procurou-se investigar a existência de uma relação entre os esforços de usinagem, particularmente a força de penetração, com o nível das tensões residuais introduzidas na superfície da peça usinada – pista do anel interno de rolamentos cônicos, de aço Din 100CrMn6 e com dureza entre 60 e 64 HRc. O plano experimental é realizado via uma análise estatística seguindo a metodologia do DOE, “design of experiments”, reduzindo-se com isso, os custos e o tempo dos ensaios Montgomery⁽⁷⁾. A análise foi feita levando-se em consideração a influência dos efeitos dos parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço, profundidade de penetração e raios da ponta da ferramenta), sobre as tensões residuais decorrentes do processo.

2. MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS.

2.1 Projeto Experimental

O planejamento experimental idealizado visa uso 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 e raio da ponta da ferramenta ρ . O objetivo final é o de avaliar quais são os fatores mais significativos e suas respectivas interações nas respostas procuradas: tensões residuais e microestrutura do metal.

2.2 Máquina-Ferramenta

A máquina-ferramenta dos ensaios é um torno CNC – OKUMA LB300, com potência do motor de fuso VAV 15/11 [KW], velocidade do fuso no intervalo 45 – 4500 [rpm], possuindo torre com doze posições para a ferramenta. O máximo diâmetro torneável é de 370 [mm], máximo comprimento de corte de 250 [mm], com alta pressão de refrigeração.

2.3 Corpos de prova

Os ensaios foram realizados na pista do anel interno de rolamentos cônicos, Fig. 1, produzidos pela FAG - Rolamentos FAG Ltda.

2.4 Material e tratamentos térmicos dos corpos de prova Os experimentos foram realizados com peças em aço DIN 100 CrMn6, temperados e revenidos para a durezas entre 62 e 64 HRc. Utilizou-se 32 corpos de prova, com durezas nas escalas Vickers e Rockwell medidas por meio de um durômetro digital SHIMADZU, modelo HMV2 – Micro durômetro.

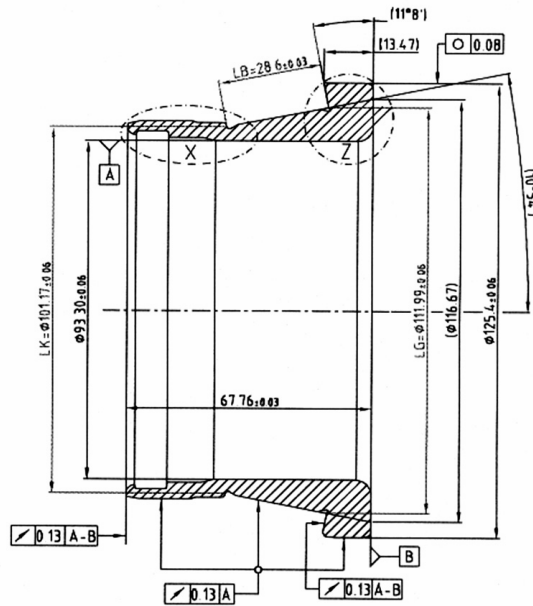


Figura 1. Desenho da peça utilizada nos experimentos.

Realizada a análise metalográfica do aço, observou-se sua microestrutura constituída de uma matriz 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, Fig. 2.

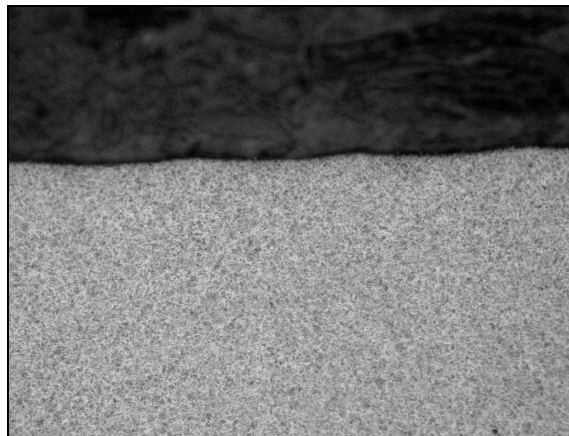


Figura 2 Micrografia do Aço 100CrMn6 antes da usinagem; aumento 200x.

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, com condições e medidas conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço 100CrMn6

Corpo de Prova, cp	Medidas
Diâmetro inicial do cp, (mm)	11,87
Diâmetro final do cp, (mm)	10,10
Lf para AT, (mm)	56,82
Separação de sujeição, (mm)	70,00
Alongamento total em 50 mm, %	13,6
Área inicial, (mm ²)	110,7
Área final, (mm ²)	80,1
Estricção – redução de área, %	27,6
Limite de escoamento, MPa	480
Limite de resistência, MPa	894
Limite de ruptura, Mpa	836
Energia até ruptura, Nmm/mm ²	179,6
Módulo de elasticidade, GPa	212

2.6 Insetos.

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 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

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

2.8 Medida das tensões residuais

Para a medida das tensões residuais foi utilizada a difração de raios-X com o método da variação do ângulo ψ , entre -60° e $+60^\circ$, irradiando-se $\text{Cr K}\alpha$ nos planos cristalográficos (2 1 1). O equipamento usado foi da marca RIGAKU – modelo DEMAX, do IPEN – Instituto de Pesquisas de Energia Nuclear. As tensões residuais obtidas foram as circunferenciais, isto é, na direção tangencial ao cone do anel do rolamento, e medidas em dezesseis corpos de prova usinados (projeto fatorial completo sem replicação) e em um outro corpo no estado de pré-usinagem.

3. MÉTODO $\sin^2(\Psi)$

Tensões residuais serão medidas utilizando raios-x, que se caracterizam pela pequena profundidade de penetração. Dessa forma é natural assumir um estado de tensão plana no ponto de medida, neste caso um ponto da superfície. Portanto indicando as tensões principais por σ_I e σ_{II} nesse ponto, deformações ϵ_{III} a causa do efeito de Poisson, ocorre no plano perpendicular à superfície. Considerado um ângulo ϕ , medido com relação à tensão principal maior, σ_I , as deformações numa direção ψ com relação à normal à superfície N, Fig. 3., é dada por, Prevéy, P.S.⁽²⁾:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\phi} \sin^2(\psi) - \frac{\nu}{E} \text{tr}\sigma \quad \text{tr}\sigma = \sigma_I + \sigma_{II} \quad (1)$$

Estas deformações ocorrem na direção indicada pelo par $\langle \phi, \psi \rangle$. E, podem ser diretamente relacionadas à variação de distância entre planos cristalinos $d_{\phi\psi}$, medidos segundo a direção indicada pelo par de diretores $\langle \phi, \psi \rangle$:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{\Delta d_{\phi\psi}}{d_{\phi\psi}^0} = \frac{d_{\phi\psi} - d_{\phi\psi}^0}{d_{\phi\psi}^0} \quad (2)$$

de forma que, Eq. (1):

$$d_{\phi\psi} = \left[\frac{1+\nu}{E_{(hkl)}} \sigma_{\phi} d^0 \right] \sin^2(\psi) - \frac{\nu}{E_{(hkl)}} d^0 \text{tr}\sigma + d^0 \quad (3)$$

As direções normais aos planos cristalográficos indicados por (hkl) devem ser as utilizadas na medida das quantidades elásticas E e ν . Estas quantidades são determinadas durante os experimentos.

Uma vez que a equação (3) é uma relação linear entre o espaçamento entre planos, depois da deformação, e $\sin^2(\psi)$, uso da mesma requer apenas a especificação de duas quantidades. A intersecção com $\psi = 0$ pode ser uma delas. Vale, de Eq.(3):

$$d_{\phi 0} = d_0 \left[1 - \frac{\nu}{E_{(hkl)}} \text{tr}\sigma \right] \quad (4)$$

e o outro pode ser a tangente à reta:

$$\frac{\partial}{\partial \sin^2(\psi)} [d_{\phi\psi}] = \frac{1+\nu}{E_{(hkl)}} \sigma_{\phi} d_0 \quad (5)$$

Porém como o módulo elástico dos materiais metálicos costuma ser muito maior que $\text{tr}\sigma$, distância deformada $d_{\phi 0}$ pode ser aproximada por d_0 , e portanto os estados de tensão iniciais não necessitam ser medidos, dispensando-se essa referência. Essa aproximação é utilizada no método $\sin^2(\psi)$.

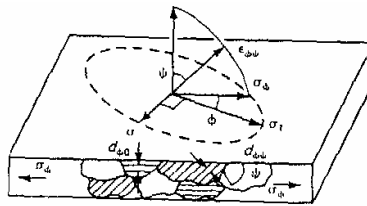


Figura 3. Elipse de deformações para estado plano.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Tensões residuais

A tabela 5 indica os valores das tensões residuais circunferenciais medidas nos corpos de prova. Observa-se que em todos eles as tensões residuais são de compressão. Para efeito de controle foram medidas as tensões residuais circunferenciais em três corpos de prova no estado precedente a

usinagem dura. Os valores obtidos foram de tração, respectivamente de +76, +95 e +50 MPa. Em todos casos o mesmo ponto, e direção foram considerados.

4.2 Análise fatorial para as tensões residuais

Adotou-se, para a análise do experimento, um planejamento fatorial completo de quatro fatores e dois níveis sem replicação, num total de 16 medidas de tensões residuais. Pode-se observar na Figura 4 os gráficos dos efeitos sobre as tensões residuais, que os fatores significativos são os mesmos das forças de usinagem, isto é, o avanço e a profundidade de penetração. É possível, então, encontrar uma relação entre a força de penetração e a tensão residual em função dos parâmetros avanço e profundidade de penetração.

Tabela 4 Valores experimentais das tensões residuais circunferenciais

Experimento	v_c (m/min)	a (mm/rev)	f (mm)	ρ (mm)	F_z (N)	σ_r (MPa)
1	150	0,05	0,05	0,4	57	-947
2	210	0,05	0,05	0,4	31	-586
3	150	0,15	0,05	0,4	95	-862
4	210	0,15	0,05	0,5	92	-990
5	150	0,05	0,2	0,4	135	-479
6	210	0,05	0,2	0,4	139	-295
7	150	0,15	0,2	0,4	221	-811
8	210	0,15	0,2	0,4	199	-977
9	150	0,05	0,05	0,8	54	-631
10	210	0,05	0,05	0,8	90	-443
11	150	0,15	0,05	0,8	90	-875
12	210	0,15	0,05	0,8	92	-901
13	150	0,05	0,2	0,8	104	-421
14	210	0,05	0,2	0,8	113	-363
15	150	0,15	0,2	0,8	236	-718
16	210	0,15	0,2	0,8	170	-529

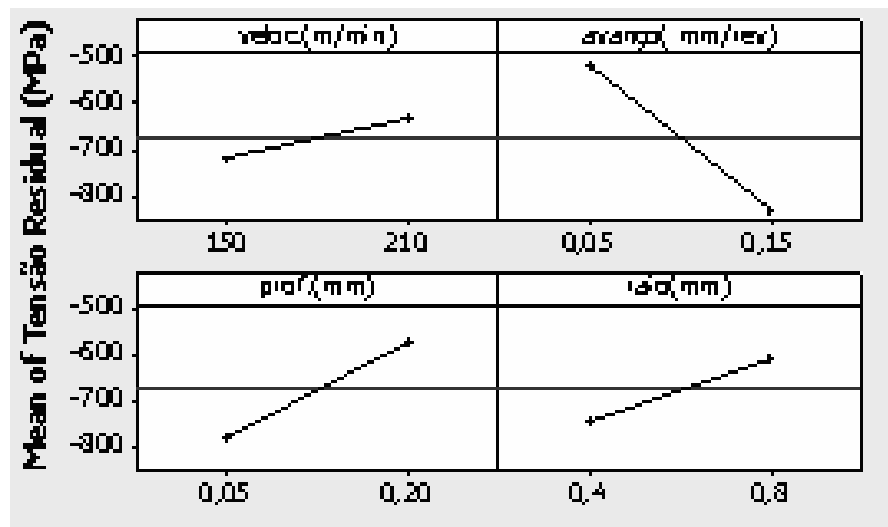


Figura 4 Efeitos dos fatores do processo sobre a tensão residual

4.3 Microestrutura dos corpos de prova após a usinagem

Micrografias foram feitas nos 32 corpos de prova, com o objetivo 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.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Tensões residuais

A análise fatorial para as tensões residuais revelou que os fatores mais significativos do experimento são os avanços f e a profundidade de penetração p , conforme se pode observar pelo gráfico da figura 5, e que para se ter altas tensões residuais de compressão exige-se trabalhar com baixos valores de profundidades de penetração, altos valores de avanço e baixos valores de raio da ponta da ferramenta, Salah⁽⁸⁾. Embora, de forma geral, a tensão residual em determinado ponto do anel, resulte ser uma quantidade tensorial, $\sigma_r = \hat{\sigma}_r(\bullet; [p]; H)$ dependente do ponto e matriz de processo $[p]$ e história de transformações anteriores no material H , é de se supor idêntica dependência para todas componentes deste tensor. Portanto aqui a tensão residual circunferencial σ_{r_c} foi analisada, para um mesmo ponto da superfície do anel. Como o avanço f e a profundidade de penetração p , para um grau de confiança de 90% na identificação dos fatores significativos do processo, Fig. 4, revelaram-se para análise de primeira ordem os fatores mais importantes, eles devem ser as variáveis eleitas para uma primeira estimativa destas tensões. Considerando-se as estimativas dos coeficientes obtidos no planejamento fatorial, estas tensões, em MPa, podem ser previstas pela expressão de ajuste, obtidas via funções de potencia, Fig.5 e 6 :

$$\sigma_r = 2.156,5a^{0,7} + 47,4p^{-0,7} \quad (6)$$

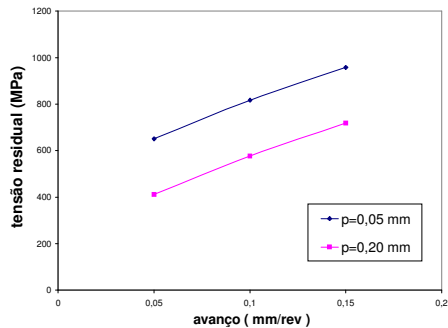


Figura 5 Variação da tensão residual com o avanço.

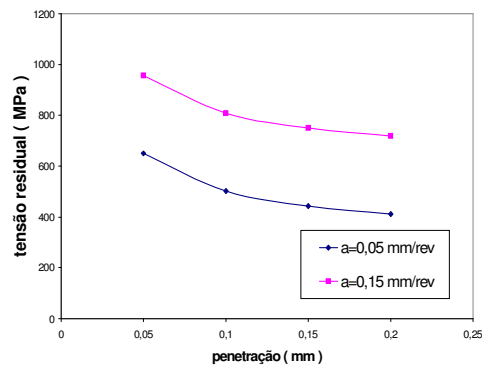


Figura 6. Variação da tensão residual com a profundidade de penetração.

As tensões residuais crescem para valores crescentes de avanço e valores decrescentes da profundidade de penetração e, para um mesmo nível de tensão residual há uma dependência direta do avanço e da profundidade de penetração.

5.2 Esforços de usinagem

O vetor de forças de usinagem $\mathbf{F}_u = \hat{\mathbf{F}}_u(t, [p])$ com componentes $\langle F_p, F_c, F_f \rangle$ depende do tempo e da matriz de processo $[p]$. Baseado em valores experimentais e resultados de análise fatorial, Delijaicov et al⁽¹⁾ neste mesmo experimento, identificou dependência da componente de força de penetração F_p , principal esforço em usinagem de aços duros, em relação ao avanço f e a profundidade de penetração p . Para um grau de confiança de 90% na identificação dos fatores significativos do processo, ajuste dos valores medidos através de funções de potência, conduz a:

$$F_z = -12,37 f^{-0,75} + 434,00 p^{0,35} \quad (7)$$

que leva a uma curva mestra simples de estimativa de esforços.

A partir destes resultados, uma correlação entre as tensões residuais circunferenciais e esta componente de força de penetração, já que dependem, em primeira ordem, das mesmas variáveis, pode ser desenvolvida. As figuras 7 e 8 estabelecem esta correlação.

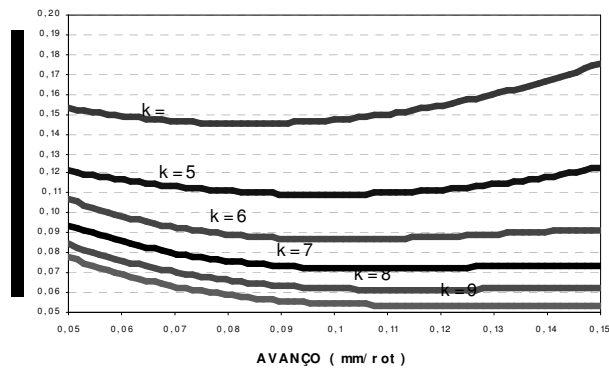


Figura 7 Variação da Tensão residual circunferencial com o avanço e com a penetração

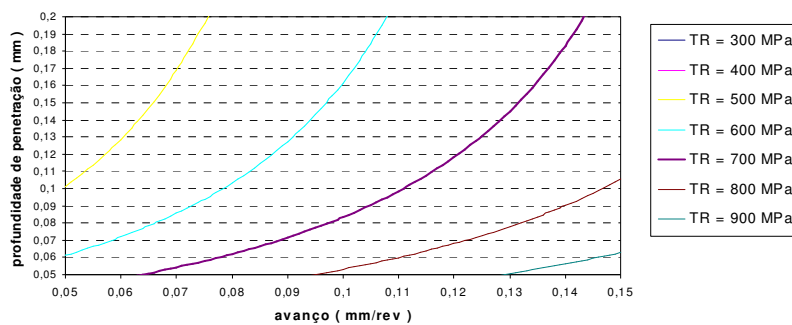


Figura 8 - Curvas de nível da tensão residual circunferencial.

6. CONCLUSÕES

A partir do conjunto de resultados obtidos, embora restrita em alguns fatores (ver Capello et al⁽³⁾) uma série de observações pode ser feita, entre elas:

- Não se constatou transformações de fases decorrentes da usinagem e conseqüentes formações de camadas brancas no domínio dos experimentos deste trabalho;
- O avanço e a profundidade de penetração são os fatores mais significativos sobre as tensões residuais circunferenciais introduzidas na superfície dos corpos de prova;
- As tensões residuais circunferenciais na superfície dos corpos de prova decorrentes da usinagem são de compressão, para os parâmetros avanço e profundidade de penetração nos níveis pesquisados;
- A tensão residual circunferencial é tanto mais compressiva quanto maiores forem os avanços e menores as profundidades de penetração da ferramenta;
- Existe uma correlação entre as tensões residuais circunferenciais e a força de penetração.

7. REFERÊNCIAS

1. DELIJAICOV, S., "Modelagem das Tensões Residuais no Processo de Torneamento Duro de um Aço DIN 100CrMn6 e suas Correlações com os Parâmetros de Corte", Tese de Doutorado, Escola Politécnica, USP, junho 2004.
2. PREVÉY, P.S., "Current Applications of X-ray Diffraction Residual Stress Measurements", Developments in Materials Characterization Technologies, ASM International, pp 103-110, Materials Park, OH, 1996.
3. CAPELLO, E. et al. "Residual stresses and surface roughness in turning", Transactions of the ASME – Journal of Engineering for Industry, v.121, p.346-351, julho 1999.
4. FLEMING, M.A. et al., "PCBN hard turning and workpiece surface integrity", Industrial Diamond Review, p.128 – 133, abril 1998.
5. 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.
6. MATSUMOTO, Y. et al., "Effect of hardness on the surface integrity of AISI 4340 steel", v. 108, p.169 – 175, agosto 1986.
7. MONTGOMERY, D.C., "Design and analysis of experiments", John Wiley & Sons, New York, 1984.
8. SALAH, R. A.; LIU, C.R. "Experimental study on the performance of superfinish hard turned surfaces in rolling contact", Wear, v.244 (1-2), p.52-59, agosto 2000.
9. THIELE, J. D., MELKOTE, S. N., PASCOE, WALKINS, R. A. Effect of cutting-edge geometry and workpiece hardness on surface residual stresses in finish hard turning of AISI 52100 steel. Transactions of the ASME – Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 122, n. 4, 642-649, novembro 2000.

Abstract. *The present work studies the influence of the cutting parameters – cutting speed, feed rate, penetration depth and toll tip radius - on the turning forces comprising the cutting, the feed and penetration force components, as well as the residual stress. The geometry considered is that of internal rings of conical bearings constructed from 100CrMn6, hardened to 62 HRC. The work deals with the establishment of correlations between force components and residual stresses. It was used a complete factorial planning for the cutting forces and residual stress. The effect of these parameters and its correlation to the microstructure of the metal is also investigated. The work was developed at the Sao Paulo FAG's bearings plant, using a CNC-OKUMA LB300 lathe tool-machine. A finishing CBN insert tool was used in the turning operations. For measurements of the cutting forces, a PCB tri-directional piezoelectric load cell was used fitted up directly in the tool*

handle. Residual stress measurements used a RIGAKU - DEMAX X-ray diffractometer with (2 1 1) reflection plans and Cr-K_α radiation. Results showed that the most significant parameters for penetration and circumferential force components correlation to residual stresses are the feed rate and the penetration depth; there was no variation on the superficial and sub-superficial microstructure of the material; a correlation between the penetration force and the residual stresses was also established.

Keywords: *cutting forces, residual stresses, hard turning, machining.*