

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS TENSÕES RESIDUAIS EM SUPERFÍCIES USINADAS APÓS TORNEAMENTO DE COMPONENTES MECÂNICOS FABRICADOS COM AÇO CEMENTADO DIN 21NiCrMo2 (AISI 8620)

Adalto de Farias, adalto.farias@poli.usp.br¹

Gustavo Henrique B. Donato, gdonato@fei.edu.br²

Sergio Delijaicov, sergiode@fei.edu.br²

Gilmar Ferreira Batalha, gilmar.batalha@poli.usp.br¹

¹ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. Laboratório de Engenharia de Fabricação - Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária, CEP 05508900 - São Paulo, SP - Brasil; Tel.: (11) 30915763 Fax: (11) 30915461.

² Centro Universitário da Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros. Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972, Bairro Assunção, CEP 09850-901 - S. Bernardo do Campo, SP - Brasil; Tel.: (11) 43532900 R.: 2059

Resumo: O objetivo deste trabalho é avaliar o nível de tensão residual resultante do torneamento de componentes mecânicos fabricados em aço DIN 21 NiCrMo 2 (ABNT 8620) cementados para dureza 58-62HRC. Para tanto, a análise da tensão residual do corpo de prova foi experimentalmente conduzida pelo Método do Furo Cego Incremental, no qual um pequeno furo é introduzido na superfície do componente e a deformação aliviada é registrada por meio de extensômetros especiais. Para fins de validação do procedimento experimental, os resultados obtidos serviram de base para a elaboração de modelos refinados de elementos finitos representativos do campo de tensões encontrado no componente real. A comparação dos resultados obtidos por ambos os métodos revelou tensões compressivas, boa aderência entre os métodos apresentando mesma tendência como função da profundidade em análise.

Palavras-chave: Tensões residuais, MEF, método do furo cego, torneamento.

1. INTRODUÇÃO

Muitas vezes, como resultado do mecanismo de processamento, a superfície pode ser deixada em um estado de tensão residual após a usinagem. Mesmo sendo limitadas a uma fina camada superficial, tais tensões podem ter uma influência significativa no desempenho funcional do componente. Geralmente, tensões residuais de compressão são as preferidas, pois tendem a reduzir o efeito de campos de tensões trativas externamente aplicadas, tendendo a fechar trincas superficiais (Griffiths, 2001). Além disso, a redução dos níveis de tensões equivalentes trativas em tais situações favorece fortemente a vida em fadiga de componentes submetidos a carregamentos cíclicos (Schwach & Guo, 2005).

Estas tensões são originadas sempre que o componente sofre deformação plástica localizada ou deformação elástica não-homogênea. Elas podem ser classificadas como macro ou micro-tensões residuais, em função da escala na qual se distribuem e seus efeitos podem ser benéficos ou prejudiciais ao componente, dependendo de sua natureza trativa ou compressiva, magnitude e distribuição. As tensões residuais podem melhorar o desempenho dos materiais frente às solicitações do meio externo e reduzir a falha por fadiga (Umbrello et al, 2007, Schwach e Guo, 2005 e Guo e Barkey, 2004). Entretanto, em uma linha de manufatura, as tensões residuais podem também gerar distorções e empenamento no componente, tornando necessária a introdução de uma etapa de processamento posterior da peça no estado endurecido, encarecendo (ou mesmo inviabilizando) o processo. Assim, para se alcançar uma melhoria significativa no projeto, controle de produto e desempenho de componentes mecânicos torna-se necessário incorporar mais informações a respeito das tensões residuais e desenvolver métodos confiáveis para a sua determinação. Dahlman et al (2004) apresentou em seus resultados que o controle dos parâmetros envolvidos no processo de torneamento em material endurecido possibilita controlar a condição das tensões residuais na peça em produção. Existe um consenso em todos os autores que investigaram temas relacionados a condições de tensão residual em um componente de que: a tensão residual de compressão é preferencial (Toenshoff, 2000, Delijaicov, 2004, Abrão et al, 2005 e Umbrello et al, 2007, entre outros).

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar os níveis de tensões residuais resultantes do torneamento de componentes mecânicos fabricados em aço DIN 21 NiCrMo 2 (ABNT 8620) cementados para dureza 58-62HRC. Para tanto, neste artigo a análise das tensões residuais do corpo de prova são experimentalmente conduzida pelo Método do Furo Cego Incremental, no qual um pequeno furo é introduzido na superfície do componente e a deformação aliviada é registrada por meio de extensômetros especiais. Complementarmente, para fins de validação do procedimento experimental, os resultados obtidos serviram de base para a elaboração de modelos refinados de elementos finitos representativos do campo de tensões encontrado no componente real. Por fim, os resultados experimentais e numéricos são confrontados para avaliação do nível de aderência das análises, assim como do sucesso do processo de validação numérica.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a usinagem do corpo de prova foi utilizado um inserto de cBN com 50% de volume em matriz de liga TiC, raio de ponta 0,8mm. A ferramenta com o inserto montado possuía os seguintes ângulos: Ângulo de posição da ferramenta $\chi_r = 93^\circ$; Ângulo de inclinação da ferramenta $\lambda_s = -6^\circ$; Ângulo de saída da ferramenta $\gamma_o = -6^\circ$. A máquina utilizada foi um Centro CNC de torneamento INDEX MC400.

A usinagem do corpo de prova foi conduzida a seco e os parâmetros de corte utilizados foram: Velocidade de corte (V_c) 200 m/min com avanço (f) de 0,12 mm/rotação. A profundidade de corte foi mantida constante ($a_p = 0,18$ mm), nesta análise não foi considerado o desgaste da ferramenta.

As tensões residuais experimentais no sentido circunferencial e axial foram levantadas por meio do método do furo cego incremental utilizando o equipamento RS-200 Milling Guide, da Vishay Micro-Measurements Group, com avanço incremental manual para a aquisição dos valores de deformação a cada passo nas três direções conhecidas. Os valores das deformações foram tratados e analisados com o auxílio do software H-Drill pelo método integral (Calle, 2004). As Figuras 1 a 4 mostram o equipamento para medição da tensão residual com fuso pneumático de alta rotação, coletor de microdeformações, componente instrumentado e a fresa de topo utilizada.



Figura 1. Sistema de fixação para usinagem do furo (Vishay Micro-Measurements Group, 2007)



Figura 2. Indicador e gravador de microdeformações modelo P3-Vishay



Figura 3. Corpo de prova com roseta retangular 062 RE-Vishay e respectivos terminais para instrumentação.

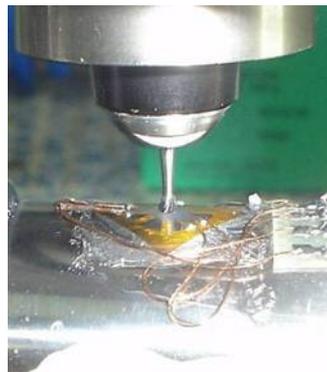


Figura 4. Detalhe da broca executando o furo.

A broca utilizada tem diâmetro de 1,85 mm e a roseta aplicada ao caso em estudo foi a 062RE fabricada pela Vishay Micro-Measurements. Utilizando o micrômetro e controlando a profundidade de corte, a fresa é aproximada até a superfície do extensômetro, neste ponto todos os canais do medidor de deformação são zerados. Lentamente executa-se o furo controlando a profundidade pelo micrômetro a uma velocidade de penetração de aproximadamente 4 μm por minuto (1/5 de linha). A cada penetração de 20 μm os valores do alívio da deformação mostrados no medidor de deformação foram anotados em uma planilha. Os dados foram então inseridos no software H-Drill (Vishay), para análise por meio do método integral.

2.1. Resultado experimental

A Tabela 1 apresenta as leituras em microdeformações obtidas dos extensômetros para cada profundidade de penetração da fresa na superfície do componente. O extensômetro de número 1 representa a direção circunferencial, enquanto o de número 3 representa a direção axial do componente. O extensômetro de número 2 representa direção intermediária de 45°.

Tabela 1. Microdeformações obtidas no espécime em análise para diferentes profundidades de penetração da fresa nos três extensômetros constituintes da roseta 062RE (Vishay Micro-Measurements Group, 2007).

Profundidade do Furo	Extensômetro 1	Extensômetro 2	Extensômetro 3
[mm]	[μd]	[μd]	[μd]
0	0	0	0
0,04	7	2	3
0,06	13	5	6
0,08	21	8	10
0,10	27	11	13
0,12	29	12	15

As Figuras 5.a e 5.b, apresentam os resultados dos perfis de tensão residual obtidos para o corpo de prova estudado respectivamente nas direções axial e circunferencial. Os perfis obtidos se referem a uma medição somente. Tais resultados são obtidos do pós-processamento das deformações apresentadas na Tabela 1 por meio do software H-drill.

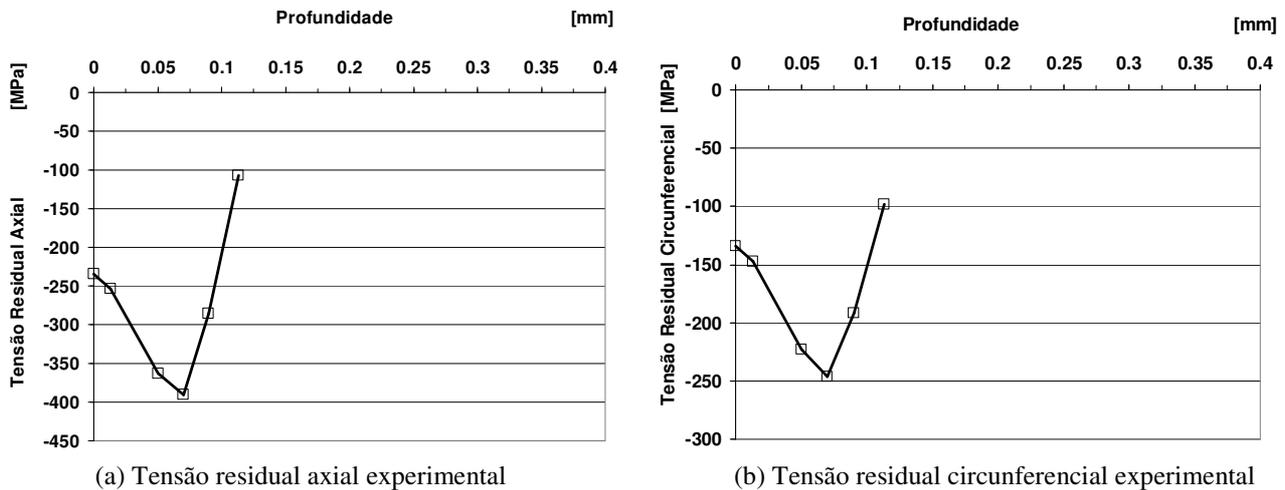
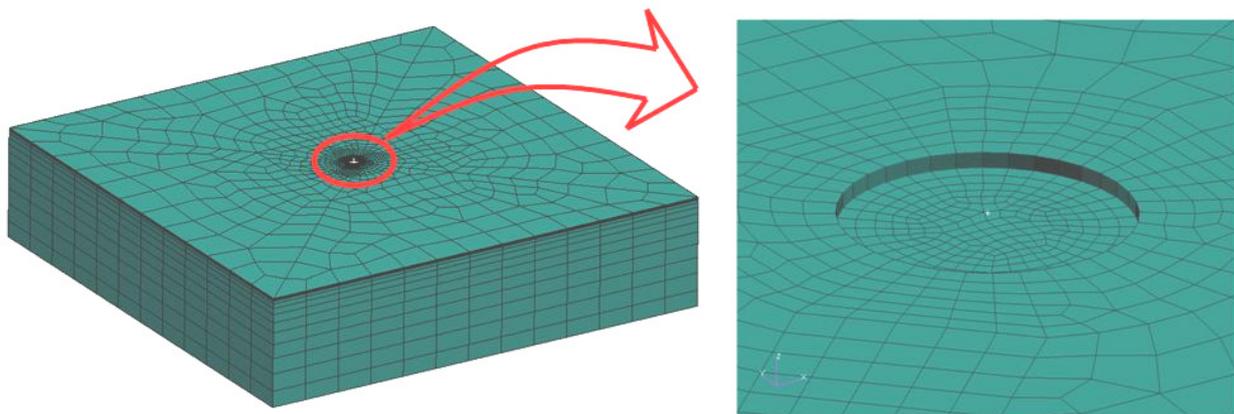


Figura 5 – Perfil de tensão residual determinadas experimentalmente para uma amostra em medição única.

3. MODELAGEM PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Para a validação da medição experimental, foram desenvolvidos modelos bastante refinados de elementos finitos representativos da região próxima à instrumentação. Devido às reduzidas dimensões da roseta aplicada (extensômetros dispostos em diâmetro de 5 mm), o componente pôde ser aproximado de uma placa plana de dimensões grandes em relação ao furo simulando condições semi-infinitas com as devidas condições de contorno distantes do furo. A Figura 6a apresenta uma vista isométrica do modelo gerado, sendo que para eliminar possíveis efeitos de borda, os modelos foram construídos com as seguintes dimensões principais: largura=comprimento= 30 x diâmetro do furo; espessura=100 x máxima profundidade de perfuração). Adicionalmente, nota-se malha incrementalmente refinada na direção da superfície na qual ocorre o processo de fresamento. A Figura 6b apresenta o detalhe da região de simulação do furo. As diferentes profundidades são simuladas por meio da exclusão sucessiva de camadas de elementos. A malha nas bordas do furo possui 36 setores radiais, enquanto apresenta quatro camadas de elementos por passe de perfuração.

Como mostra a Figura 7, por sua vez, mostra que a malha está configurada na disposição real da roseta e assim avalia-se, para contabilização da deformação, a área completa da grade do extensômetro real. Admite-se que o extensômetro é igualmente sensível ao longo de sua grade de medição e desconsidera-se a presença (desprezível) de sensibilidade transversal.



(a) - Placa plana de dimensões grandes em relação ao furo.

(b) - Esquema de modelagem do furo cego.

Figura 6 – Modelagem MEF do furo cego para a medição das deformações para predição teórica das tensões residuais.

Nota-se na Figura 7 uma geometria análoga à roseta utilizada, garantindo a integração acurada das deformações ao longo da grade ativa de cada um dos extensômetros considerados.

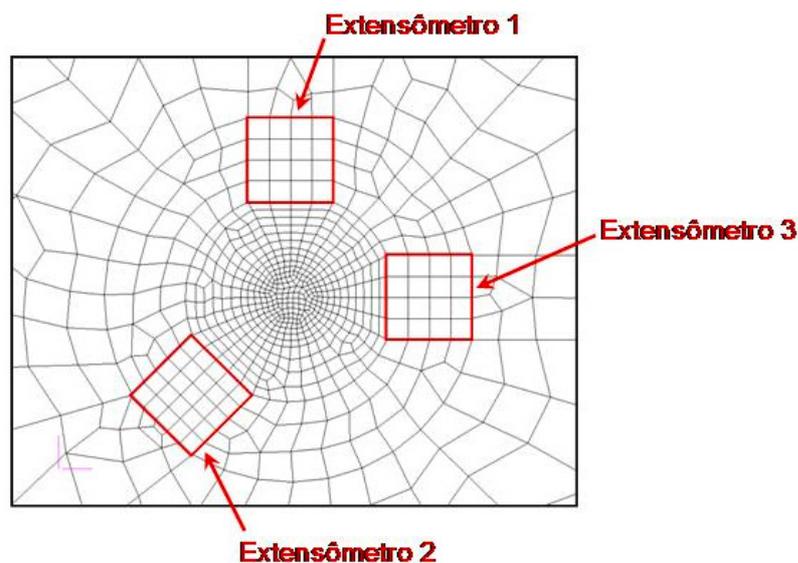


Figura 7 Disposição da malha nas proximidades do furo.

O modelo constitutivo de material considerado é elástico linear com módulo de elasticidade $E = 200 \text{ GPa}$ e coeficiente de Poisson $\nu = 0.3$. O código de elementos finitos usado foi o MSC Patran (para pré e pós-processamento) e MSC Nastran (para processamento). Foram utilizados elementos hexaédricos isoparamétricos 3-D de oito nós resultando em aproximadamente 30000 elementos e 34000 nós. A solução foi processada em formulação de pequenas deformações.

A aplicação de cargas aos modelos se deu por meio da descrição dos campos de tensões fornecida pelo software H-drill para cada profundidade de penetração do caso real estudado. De posse das tensões normais e cisalhantes estimadas pelo software (as quais geraram os resultados da Figura 5) para cada profundidade, foram aplicadas as transformações convencionais da resistência dos materiais para a descrição completa dos campos de tensões nos 36 setores da parede do furo. A Figura 8 apresenta a estratégia de carregamento do modelo. Basicamente são impostas às paredes do furo (com sinais contrários por questões de equilíbrio) as tensões residuais aliviadas como resultado da remoção de material de cada passe.

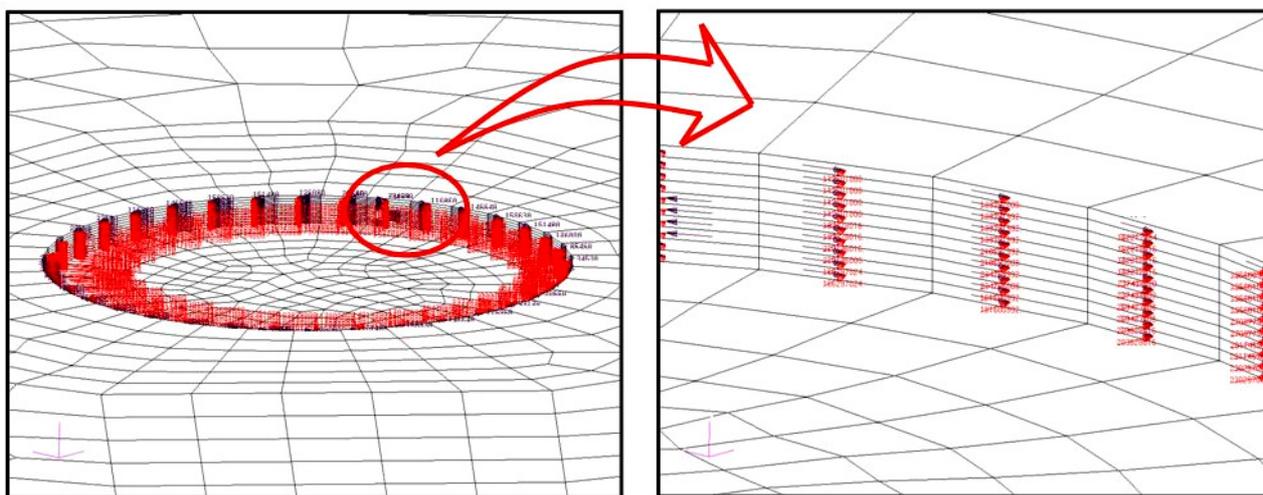


Figura 8. Aplicação dos estados bi-axiais de tensões, fornecidos pelo H-drill como função da profundidade do furo.

O campo de tensões equivalentes de Von Mises resultante na superfície do modelo é apresentado pela Figura 9. Nota-se tensão máxima de 279 MPa nas proximidades da borda livre do furo, o campo de deformações equivalentes de von Mises é análogo à distribuição apresentada. De posse de tais campos de tensões (e seus respectivos campos de deformações), as deformações resultantes nas regiões ativas dos extensômetros (vide Figura 7) foram obtidas pela integração sobre os respectivos elementos, fornecendo os valores numéricos de entrada para o software H-drill. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos na seção seguinte por questões de brevidade.

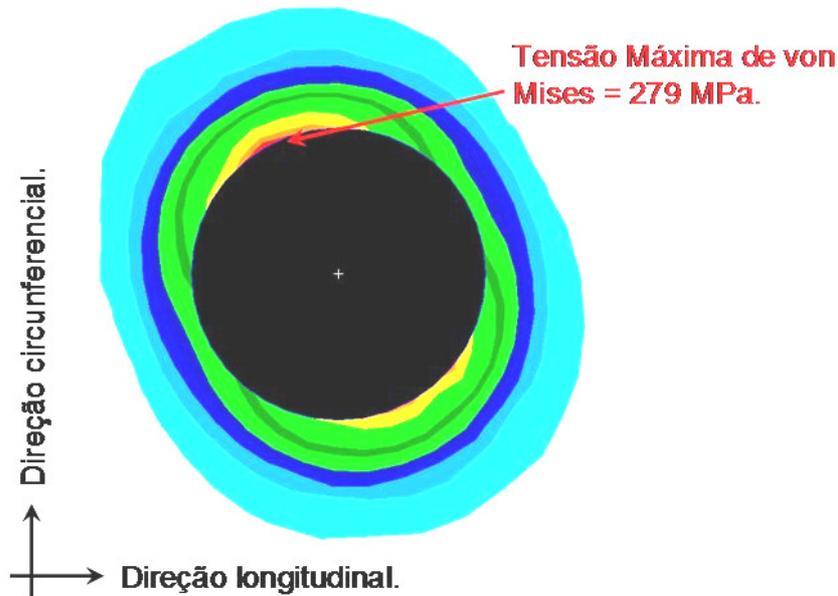


Figura 9. Distribuição ilustrativa de tensões equivalentes de von Mises na superfície do modelo.

4. COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO

Os campos de deformações obtidos pelo método numérico dos elementos finitos foram também inseridos no software H-Drill (Vishay), para análise no método integral gerando um perfil de tensões residuais para comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

Nas Figuras 10 e 11 os resultados das tensões residuais do procedimento experimental e numérico são comparados. Pode-se observar que para ambos os casos, sentido axial e circunferencial, existe grande aderência tanto da tendência como das magnitudes dos resultados, exceto pelo ponto de máximo compressivo que se mostrou sensivelmente mais acentuado no modelamento em elementos finitos, apresentando diferença de 46 MPa no sentido circunferencial e 73 MPa para o sentido axial (valores compressivos). Tais diferenças, porém, se consideradas percentualmente, são mesmo para o ponto de maior tensão compressiva de respectivamente 19% e 18%. No geral os resultados obtidos encorajam o uso do método do furo cego incremental como técnica acurada de medição de tensões residuais e os modelos de elementos finitos demonstraram que a correlação mecânica entre tensões aliviadas na parede do furo e leituras de microdeformações nos extensômetros é devidamente descrita pelo método integral. Os coeficientes de influência do referido método, os quais são dependentes das propriedades de material e devem ser numericamente calibrados podem significar uma potencial fonte dos desvios encontrados e merecem, portanto, estudos futuros.

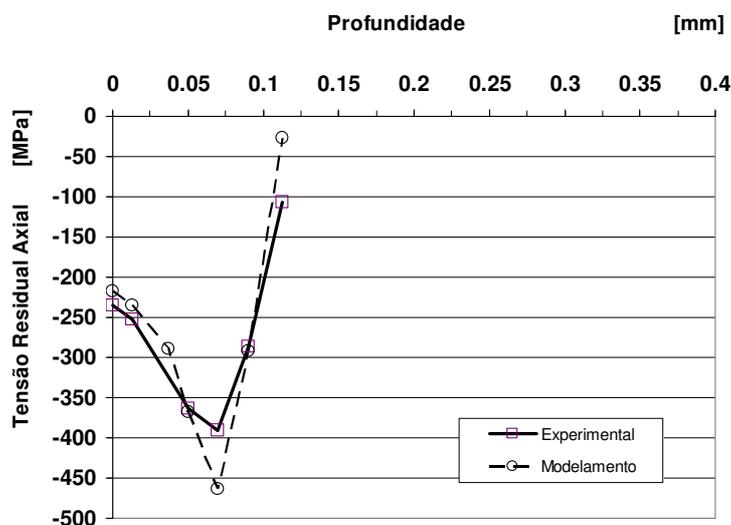


Figura 10 Comparação das tensões residuais na direção axial como função da profundidade do furo.

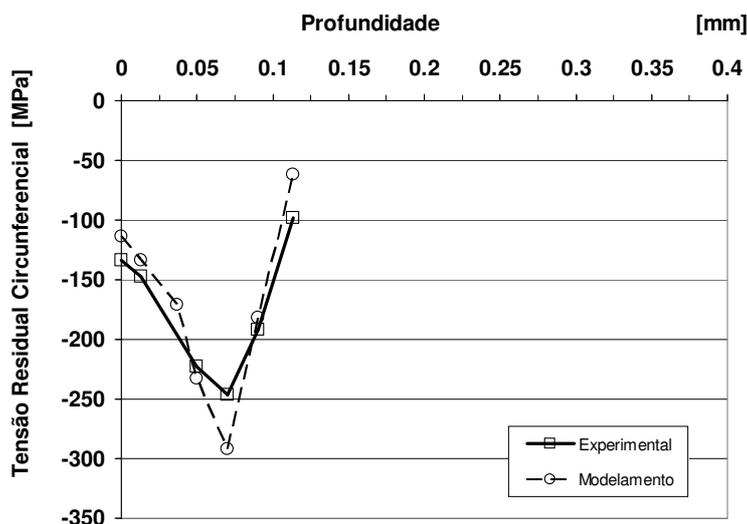


Figura 11 Comparação das tensões residuais na direção longitudinal como função da profundidade do furo.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pelo presente trabalho, embora aplicados a um único corpo de prova, indicam a viabilidade de criação de modelos de elementos finitos representativos da distribuição de tensões residuais em componentes mecânicos a partir de resultados obtidos experimentalmente por meio do método do furo cego incremental.

A metodologia desenvolvida pode representar o fenômeno experimental com boa precisão apresentando desvios máximos representativos da ordem de 18-19% (na profundidade de 0.07mm). Esta divergência, embora pequena do ponto de vista de engenharia experimental, pode estar associada a problemas experimentais diversos ou mesmo aos coeficientes de influência do método integral, os quais são função do material e devem ser calibrados numericamente.

A elaboração de avaliações de mesma natureza para demais peças e tipos de tensões residuais tende a esclarecer as fontes dos desvios encontrados e com isso estabelecer um método para predição e comprovação numérica das tensões residuais medidas experimentalmente, com ainda mais exatidão. Para o caso específico de usinagem de componentes cementados, foco deste estudo, análises adicionais em outros corpos de prova com condições de parâmetros de usinagem diferenciadas devem ser executadas a fim de se verificar a capacidade do modelo em recriar os resultados em um nível maior de precisão e confiabilidade.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à empresa Polimold Industrial S/A pelo fornecimento dos corpos de prova e o incentivo à pesquisa, à empresa Seco Tools do Brasil pela disponibilização dos equipamentos e das ferramentas aplicadas neste experimento e ao Centro Universitário da FEI de São Bernardo do Campo pelas medições experimentais de tensão residual pelo método do furo cego.

7. REFERÊNCIAS

- Abrão, A. M., 2005, Torneamento de aços endurecidos, Tecnologias Avançadas de Manufatura, Cap. 5, Editora Novos Talentos, pp. 89-103.
- Calle, M. A., 2004, Análise numérico-computacional das tensões residuais induzidas pelo jateamento com granalha, 96 p, Dissertação (mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Dahlman, P., Gunnberg, F. e Jacobson, M., 2004, The influence of rake angle, cutting feed and cutting depth on residual stresses in hard turning, Journal of Materials Processing Technology, 147, pp 181-184
- Delijaicov, S., 2004, Modelagem das tensões residuais no processo de torneamento duro de um aço 100CrMn6 e suas correlações com os esforços de corte, Tese (Doutorado), PPGEM, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Guo, Y.B., Barkey, M. E., 2004, Modeling of rolling contact fatigue for hard machined components with process-induced residual stress, International Journal of Fatigue, 26, pp 605-613.
- Griffiths, B., 2001, Manufacturing Surface Technology, London, Penton Press, pp. 233.

- Rech, J. e Moisan, A., 2003, Surface Integrity in finish hard turning of case-hardened steels, International Journal of Machine and Manufacture, 43, pp 543-550.
- Schwach, D. W., Guo, Y. B., 2005, A Fundamental Study On The Impact Of Surface Integrity By Hard Turning On Rolling Contact Fatigue, Transactions of NAMRI/RI/SME, 33, pp 541-548.
- Töenshoff, H.K., Arendt, C. e Amor, R., 2000, Cutting of hardened steel, Ann. CIRP 49/2 (2000) pp 547-66.
- Umbrello D., Ambrogio G., Filice L., Shivpuri R., 2007, An ANN approach for predicting subsurface residual stresses and the desired cutting conditions during hard turning, Journal of Material Processing Technology, 189, pp 143-52.
- Vishay-Measurements Group, 2007, Acesso ao site da empresa em dezembro de 2007.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE RESIDUAL STRESSES ON MACHINES SURFACES AFTER HARD TURNING OF CASE HARDENED STEEL DIN 21NiCrMo2 (AISI 8620) MECHANICAL PARTS

Adalto de Farias, adalto.farias@poli.usp.br¹
Gustavo Donato, gudonato@gmail.com²
Sergio Delijaicov, sergiode@fei.edu.br²
Gilmar Ferreira Batalha, gilmar.batalha@poli.usp.br¹

¹ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. Laboratório de Engenharia de Fabricação – Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária, CEP 05508900 – São Paulo, SP – Brasil; Telefone: (11) 30915763 Fax: (11) 30915461.

² Centro Universitário da Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros. Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972, Bairro Assunção, CEP 09850-901 – S. Bernardo do Campo, SP – Brasil; Tel.: (11) 43532900 R.: 2059

Abstract: *The aim of the present work intends is to evaluate the residual stress condition resulting from the hard turning process of mechanical components made of DIN 21 NiCrMo 2 (AISI 8620) steel case hardened with 58-62HRC. To this end, in this article the sample residual stress analysis has been experimentally conducted by the incremental Blind Hole method, in which a small hole is machined on the surface of the component and the relieved deformation is recorded through special strain gages. In addition, for validating purposes of the experimental procedure, the results served as a basis for the development of refined finite element models representing the stress concentration area found in the real sample component. The comparison of both methods results revealed compressive stress, good adhesion between the methods presenting same trend as a function of depth in analysis.*

Keywords: *residual stress, incremental hole drilling method, finite element method.*