

CONAEND&IEV2012 – 016
EFEITO DE SHOT PEENING EM PEÇAS COM TENSÕES
PRÉ-EXISTENTES DE COMPRESSÃO

Tatiana Gurova¹, Segen F. Estefen², Anatoli Leontiev³

Copyright 2012, ABENDI, PROMAI.

Trabalho apresentado durante o XXX – Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção.

16ª IEV – Conferencia Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Sinopse

Processo de *shot peening* é amplamente utilizado nas indústrias para tratamento superficial das peças e elementos das construções metálicas. Um dos resultados da sua aplicação é a indução das tensões residuais de compressão numa camada sub-superficial da peça. Na indústria automobilística as peças dentadas e engrenagens são submetidas ao tratamento por *shot peening* para garantir a resistência das peças à fadiga. Os estudos das tensões residuais induzidas por *shot peening* normalmente limitam-se às situações quando as peças submetidas a este tratamento possuem tensões residuais pré-existentes de tração ou são livres das tensões. Neste trabalho são apresentados os resultados dos estudos experimentais das tensões residuais induzidas por *shot peening* em peças com tensões pré-existentes de compressão. As medições das tensões foram realizadas através do método de difração de raios-X.

Introdução

Tratamento por *shot peening* é um processo mecânico que consiste em jateamento por granalha da superfície da peça ou parte da construção e está amplamente utilizado nas indústrias. Entre os principais fatores benéficos do *shot peening* são considerados endurecimento das camadas superficiais do material tratado, refinamento dos grãos, uniformização dos valores das tensões residuais na superfície e a possibilidade de induzir uma distribuição desejável das tensões residuais de compressão numa camada sub-superficial, o que em soma influi na durabilidade e vida útil da peça.

1 Doutora, Engenheira Metalúrgica, LTS/COPPE/UFRJ e GURTEQ Ensaios não Destrutivas Ltda

2 Doutor, Professor – LTS/COPPE/UFRJ

3 Doutor, Professor – Instituto de Matemática – UFRJ

Sem considerar os efeitos de *shot peening* na microestrutura e propriedades mecânicas do material, nos vamos nos concentrar neste trabalho no efeito de distribuição das tensões residuais induzidas por este tipo de tratamento. O perfil “ideal” da distribuição das tensões residuais esperado de um tratamento por *shot peening* numa cama sub-superficial é apresentado na **Fig. 1**.

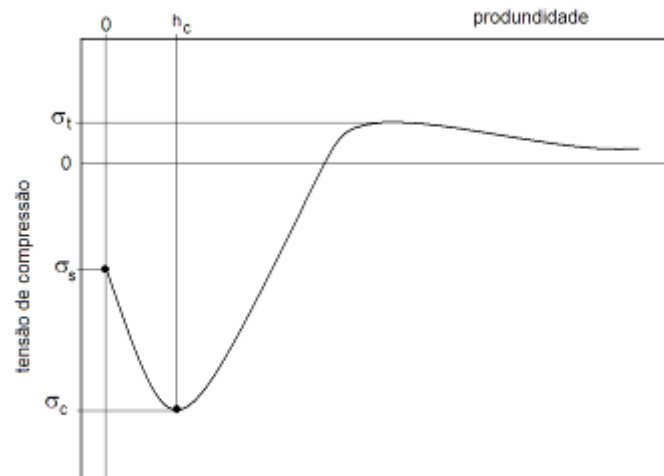


Fig. 1: Esquema de distribuição clássica das tensões residuais induzidas por *shot peening*

Esta distribuição é caracterizada por valor da tensão de compressão na superfície σ_s , valor máximo da tensão de compressão σ_t e sua profundidade h_c e profundidade da camada sub-superficial atingida.

São vários fatores do processo de aplicação de *shot peening* que influem no seu resultado, entre eles, velocidade, tamanho e material das granalhas lançadas contra superfície e seu ângulo de impacto, tempo de aplicação e percentual de cobertura. A propriedade do material é mais um fator que influi no resultado do *shot peening*. Por exemplo, o mesmo procedimento resulta numa distribuição completamente deferente para dos materiais com dureza diferente. A eficiência do tratamento é controlada de maneira indireta e relativa, utilizando o método de Almen.

Na indústria automobilística o controle das tensões residuais de *shot peening* nas peças dentadas e engrenagens normalmente é realizado através da medição das tensões por difração de raios-X, [1]. Para agilizar o processo, as tensões residuais nas peças são controladas por amostragem, normalmente na superfície e numa das profundidades pré-definidas, na raiz ou na parte lateral de um dos dentes escolhido de maneira aleatória. É uma situação comum quando para as peças dos lotes diferentes submetidos ao tratamento por *shot peening* com mesmos parâmetros os valores da tensão superficial e da tensão na profundidade controlada podem variar de uma peça para outra. No processo de fabricação das peças automobilísticas o *shot peening* é utilizado na fase final de fabricação, e este tratamento é posterior a uma serie dos tratamentos térmicos, entre eles a cementação. O processo de cementação implica simultaneamente em dois fatores, que são considerados interligados entre si. O primeiro é o aumento da dureza da camada superficial do material. O segundo é surgimento das tensões residuais de compressão nesta camada. Como a dureza do material após o tratamento térmico é o parâmetro controlado, surgiu a hipótese que

diferença no perfil das tensões residuais de *shot peening* das peças dos diferentes lotes pode ser atribuída a diferença no estado inicial das tensões residuais presentes nas peças antes do *shot peening*.

Na maioria dos trabalhos experimentais dedicados ao estudo dos efeitos de *shot peening* os autores simplesmente não apresentam nenhuma informação sobre estado inicial das tensões residuais, [2]. Porém, conhecimento deste estado inicial apresenta quadro mais completo do processo de distribuição das tensões de *shot peening*, [1], [3], especialmente quando se trata de comparação dos resultados do mesmo procedimento para peças diferentes. Ausência de consideração das tensões residuais pré-existentes, do nosso ponto de vista, é um ponto fraco de todos os inúmeros estudos, bastante interessantes e promissórios, do efeito de *shot peening* através da modelagem matemática e simulação computacional, [4], [5]. Existem diferentes modificações do processo de *shot peening*, entre elas os processos de *stress peening* e *peen forming*, quando a peça submetida ao tratamento por *shot peening* é pré-tencionada e, consecutivamente, pré-deformada. Neste caso a superfície submetida ao *shot peening* encontra-se no estado de tração elástica por tensões atuantes (não residuais) externas, [6].

Neste trabalho são apresentados os resultados dos estudos experimentais das tensões residuais induzidas por *shot peening* em peças com tensões residuais pré-existentes de compressão, especificamente, as tensões pré-existente de origem térmica.

1. Equipamentos e métodos

Os valores absolutos das tensões residuais foram medidas com equipamento portátil de raios-X RAYSTRESS que utiliza o método de dupla exposição e radiação $K\alpha$ do Cr, [7]. Esta técnica de medição foi amplamente testada e utilizada com sucesso durante vários anos em diferentes aplicações industriais [8–13].



Fig. 2: RAYSTRESS: Equipamento portátil de raios-X para medição de tensões mecânicas

As seguintes partes são incluídas como componentes deste equipamento, **Fig. 2**: 1 – Unidade de controle com fonte de alta tensão, que permite monitoramento e o ajuste do nível de potência de alimentação do tubo de raios-X; 2 – Fonte de alta tensão e tubo de raios-X. Uma das qualidades do equipamento é que o tubo de raios-X é acoplado à fonte de alta tensão. A tensão e a corrente de trabalho da fonte de raios-X é de 25 kV e 1,5 mA, respectivamente. O tubo de raios-X possui dois anodos de cromo com resfriamento ao ar, e produz dois feixes convergentes de raios-X para realizar a técnica de duas exposições de medição de tensões por raios-X. O ângulo de convergência dos feixes de raios-X é de 50°; 3 – O suporte magnético permite instalar o equipamento diretamente na peça analisada e ajustar o equipamento na posição de exposição; 4 – O colimador com cassete para filme de raios-X. Duas janelas no cassete permitem captar partes das linhas difratadas no intervalo angular de 2θ de 148° a 164°.

Os princípios da tensometria por raios-X se baseiam, por um lado, na teoria de difração de raios-X para materiais cristalinos, e por outro – em mecânica dos materiais e, em particular, na teoria da elasticidade do corpo sólido. Os valores das tensões são definidos a partir da deformação da estrutura cristalina causada pela ação destas tensões. As deformações são medidas por sua vez, conforme lei de Bragg: $2d \sin \theta = \lambda$, através do deslocamento da linha de difração.

Medição com profundidade foi realizada com remoção das camadas superficiais através do polimento eletrolítico controlada por relógio comparador digital.

2. Resultados experimentais

Corpos de prova de tamanho 300 x 35 x 6 mm foram confeccionados do aço carbono SAE 1020. O limite de escoamento do material no seu estado original é de 210 MPa. Os corpos de prova foram submetidos ao tratamento térmico de alívio das tensões. Isso resultou numa redistribuição uniforme das tensões residuais na faixa de 40 MPa. Esta distribuição foi encontrada na superfície dos corpos de prova e numa camada sub-superficial com profundidade de até 0.20 mm, ver **Fig. 3**, gráfico 1.

Após o alívio das tensões, um dos corpos de prova foi submetido ao processo de cementação. A distribuição das tensões residuais com profundidade está apresentada na **Fig. 3**, gráficos 2 e 3. Observa-se que os valores das tensões residuais e sua distribuição com profundidade são diferentes na direção longitudinal (ao longo do comprimento do corpo de prova) e transversal (direção ortogonal a direção longitudinal) para material com mesma dureza. Podemos atribuir este resultado ao fato de que os processos térmicos durante cementação ocorreram de maneira deferente nas direções diferentes por causa da geométrica alongada do corpo de prova. Além disso, as medições adicionais na direção ortogonal às direções longitudinal e transversal mostraram que estas duas últimas são direções das tensões principais. Observa-se também que o processo de cementação esperadamente modificou as características do material no sentido de aumentar seu limite de escoamento e as tensões residuais de compressão atingiram o valor de -350MPa.

Os dois corpos de prova, com e sem cementação, foram submetidos ao mesmo tratamento por *shot peening* utilizando equipamento GP-9075 em regime manual, com granalha de aço esférica S-110, intensidade Almen 0.003”C, cobertura de 100%, pressão do ar 100 PSIG e ângulo de jato 90°. A distribuição das tensões residuais de *shot peening* é apresentada na **Fig. 3**, gráficos 4, 5 e 6.

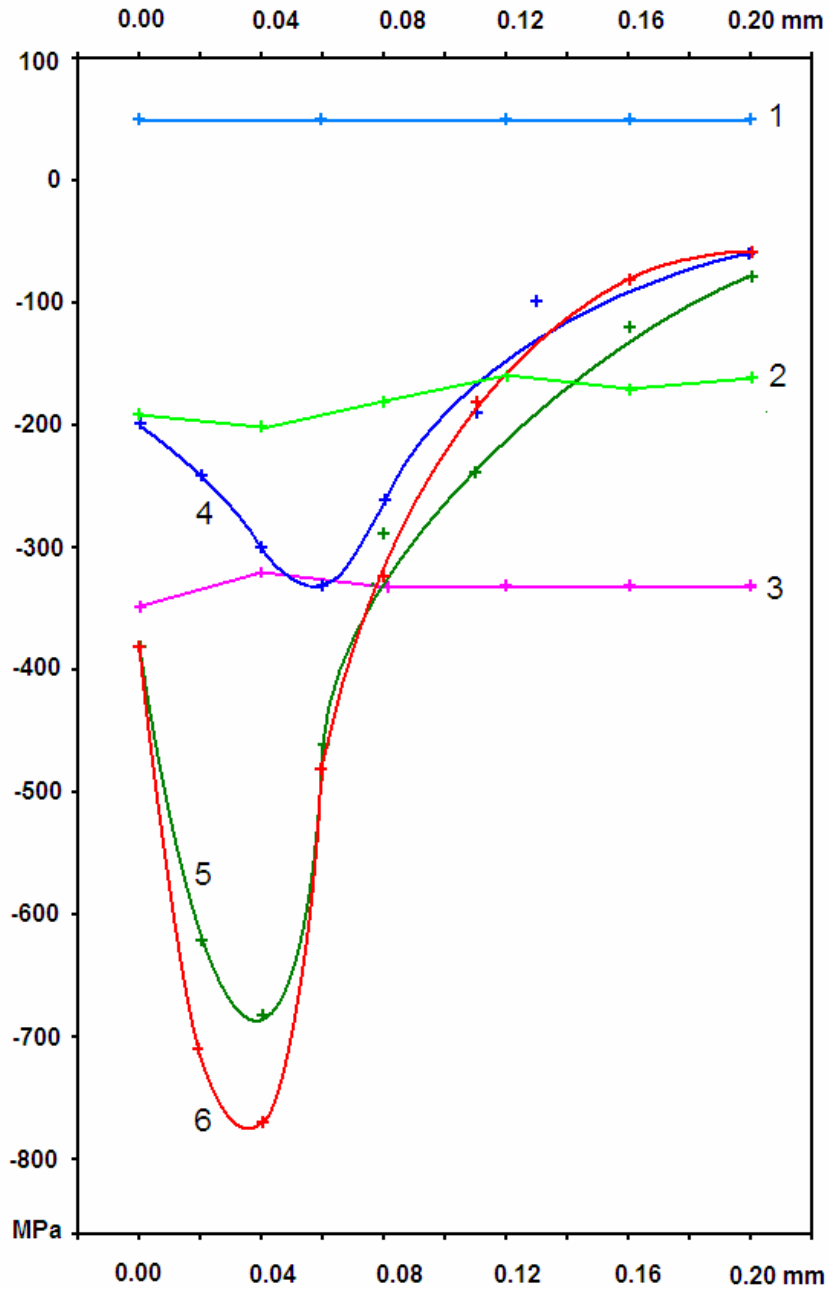


Fig. 3: Distribuição das tensões residuais numa camada sub-superficial dos corpos de prova em relação à profundidade. (1) corpo de prova sem cementação; (2) e (3) corpo de prova após a cementação, tensões na direção longitudinal e transversal, respectivamente; (4) corpo de prova sem cementação após tratamento por *shot peening*; (5) e (6) corpo de prova cementado após o tratamento por *shot peening*, tensões na direção longitudinal e transversal, respectivamente.

As tensões residuais de compressão induzidas por *shot peening* na superfície da amostra cementada ficaram iguais em ambas as direções, longitudinal e transversal com valor de -380MPa, embora existisse uma diferença significativa na sua distribuição antes do *shot peening*. As tensões residuais de compressão de *shot peening* atingiram o valor maior, -770MPa, na direção transversal, contra valor de -680MPa das tensões de compressão na direção longitudinal. O fato que as tensões residuais chegaram a estes valores de compressão bem elevados está atribuído, além de endurecimento pela cementação, ao efeito de endurecimento da camada superficial por deformação mecânica, que pode ser observado também na amostra sem cementação, onde as tensões máximas de compressão chegam até -330MPa, valor acima do limite de escoamento do material do corpo de prova no seu estado original. A comparação das tensões de *shot peening* nos corpos de prova com e sem cementação mostra o efeito esperado da dureza do material na distribuição das tensões residuais. A localização do ponto de tensão máxima compressiva para corpo de prova cementado encontra-se mais próximo da superfície do que no caso do corpo de prova sem cementação. Observa-se que na profundidade 0.16 - 0.20 mm os valores das tensões residuais do corpo de prova cementado chegam aos mesmos níveis das tensões do corpo de prova sem cementação.

Conclusões

Os resultados apresentados mostram que as tensões pré-existentes de compressão, especificamente, de origem térmica, influem significativamente no valor da tensão compressiva máxima induzida por *shot peening*. Diferentes valores das tensões pré-existentes resultam na distribuição diferente das tensões residuais induzidas por mesmo tipo de *shot peening*. A diferença dos valores das tensões pré-existentes é nivelada por *shot peening* apenas na superfície. Com profundidade o perfil das tensões residuais de *shot peening* fica compatível com perfil da distribuição das tensões residuais de *shot peening* do material livre das tensões pré-existentes.

Desta maneira podemos concluir que o efeito da presença das tensões de compressão pré-existentes deve ser considerado com um dos fatores que influi na distribuição final das tensões residuais de *shot peening* de mesma maneira como contribuem nesta distribuição as características do material (tais como sua dureza) e parâmetros do próprio processo de *shot peening* aplicado.

Agradecimentos

TEMPERAÇÃO RIO Tratamento Térmico de Aço e Metais Ltda (Rio de Janeiro) pela realização dos tratamentos térmicos dos corpos de prova. ZIRTEC Indústria e Comércio Ltda (São Paulo) pela realização do tratamento por *shot peening* dos corpos de prova. FINEP e CNPq pelo apoio financeiro (projetos CNPq 302531/2009-2 (S.F. Estefen) e CNPq 305338/2009-9 (A. Leontiev))

Referências bibliográficas

- [1] Monin V, Teodosio JR, Gurova T. "Analysis of residual stress state in speed gears for automotive vehicles", *Advances in x-Ray Analysis*, 44, 187-194, 2001
- [2] Wang S, Li Y, Yao M, Wang R. "Compressive residual stress introduced by shot peening", *Journal of Materials Processing Technology*, 73, 64-73, 1998
- [3] Girish DV, Mayuram MM, Krishnamurthy S. "Influence of shot peening on the surface durability of thermomechanically treated En 24 steel spur gears", *Tribology International*, 30(12), 865-870, 1997

- [4] Kobayashi M, Matsui T, Murakami Y. "Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening", *Int. J. Fatigue*, 20(5), 351–357, 1998
- [5] Bhuvanaraghan B, Srinivasan SM, Maffeo B, McClain RD, Potdar Y, Prakash O. "Shot peening simulation using discrete and finite element methods", *Advances in Engineering Software* 41, 1266–1276, 2010
- [6] Mueller E. "Recent developments in stress peening of coil springs and practical applications in Germany", Presented at the Symposium on Spring Technologies at Nagoja, Nov. 2-3, 2007
- [7] Monin V, Teodosio JR, Gurova T. "A portable X-ray apparatus for both stress measurements and phase analysis under field conditions", *Adv X-ray Anal*, 43, 66-71, 2000
- [8] Gurova T, Teodosio JR, Rebello JM, Monin V. "Study of the residual stress state during plastic deformation under uniaxial tension in a 5.0Cr and 0.5Mo steel", *Scr Mater*, 36, 1031-35, 1997
- [9] Gurova T, Teodosio JR, Rebello JM, Monin V. "Model for the variation of the residual stress state during plastic deformation under uniaxial tension", *J Strain Anal Eng Des*, 33, 367-72, 1998
- [10] Monin V, Teodosio JR, Gurova T, Assis J. "X-ray study of the inhomogeneity of surface residual stresses after shot-peening treatment", *Adv X-ray Anal*, 43, 48-53, 2000
- [11] Monin V, Teodosio JR, Gurova T. "Study and service control of stress state of high-strength steel cables used in prestressed concrete structures", *Adv X-ray Anal*, 44, 195-200, 2001
- [12] Assis JT, Monin V, Teodosio JR, Gurova T. "X-ray analysis of residual stress distribution in weld region", *Adv X-ray Anal*, 45, 225-31, 2002
- [13] Estefen SF, Gurova T, Castello X, Leontiev A. "Surface residual stress evaluation in double-electrode butt welded steel plate", *Materials and Design*, 31, 1622–27, 2010