

EVOLUÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL EM AÇOS ABNT 4320 E ABNT 5120 APÓS CARBONITRETAÇÃO/TÊMPERA E *SHOT PEENING* EM MAQUINAS DE AR COMPRIMIDO E TURBINA

Thiago Costa Rodrigues Rosa, trosa@sga.pucminas.br¹
Jose Rubens Gonçalves Carneiro, Dr, joserub@pucminas.br²
Renato Silva de Oliveira, renato.silva@fcagroup.com²
Gilmar Cordeiro da Siva, Dr, gilmarcord@pucminas.br
João Pedro Santiago Carneiro, jsantiagocarneiro@gmail.com

¹Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais Rua Dom José Gaspar , 500 Coração Eucarístico Belo Horizonte MG

Resumo: *Shot peening* ou jateamento com granalha é um processo mecânico a frio onde um jato de granalha é impelido contra a superfície dos componentes provocando deformação plástica e induzindo tensões residuais de compressão na superfície, aumentando a resistência à fadiga.

Este artigo descreve o estudo realizado na evolução de tensões residuais em dois tipos de aços ABNT 4320 e 5120 comumente utilizados na fabricação de engrenagens na indústria automotiva/aeronáutica após tratamento termoquímico de carbonitretação e após *shot peening*. Amostras nas dimensões de 100x60x20mm foram usinadas, recozidas e carbonitretadas em temperatura de 870°C por 12 horas em etapas de preaquecimento carbonitretação e têmpera direta em óleo. O processo de *shot peening* foi realizado em máquina tipo turbina após execução em corpo de prova tipo “almen” com obtenção de 100% de cobertura. Foram controlados a pressão máxima do jato em 7bar; tempo de exposição 30s e ângulo de aplicação 90°. Após “*shot peening*”, as amostras foram decapadas em solução de 10% H_2SO_4 , 10% HF, 10% H_2O E 70% H_2O_2 em posições distintas nas amostras para medição de tensão residual em diferentes profundidades. Foi utilizado um difratômetro de raios-X, marca GRN Optica, para avaliação das tensões residuais. As profundidades obtidas na decapagem foram de 0 a 100 μm . Foram constatados valores de tensão residual no intervalo de -300 a -1200MPa nas distâncias de 0 a 100 μm com valores máximos por volta de 30 μm e dispersão de valores de $\pm 30 \mu m$. O aço ABNT 4320 experimentou nível de tensão mais negativo comparado ao aço ABNT 5120 o que pode ser devido à sua maior temperabilidade. Sendo que por esse motivo foi estudado seu ganho de tensão residual também em peça de transmissões automotivas em ABNT 4320 em máquinas de *shotting peening* Jato de Ar Pangborn, modelo PE1107, e de Turbina Passenger, modelo EP1836, apresentando maiores tensões compressivas em máquina de turbina.

Palavras-chave: *Shot peening*; Tensão residual; difração de raio-x

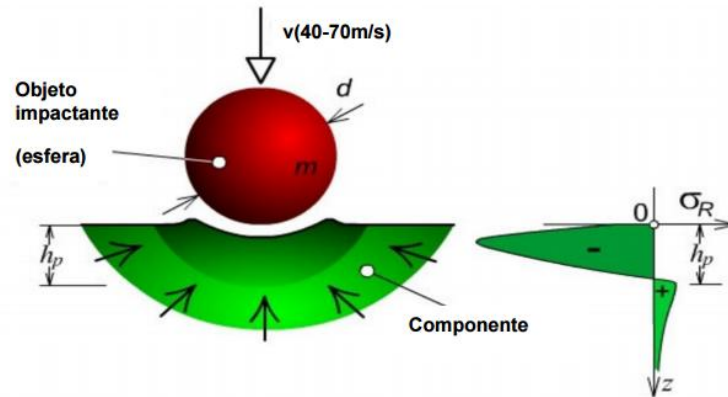
1. INTRODUÇÃO

O *shot peening* é uma forma eficaz de aumentar a resistência à fadiga de componentes de aço no regime de fadiga de alto ciclo. O efeito benéfico é atribuído a tensões residuais de compressão e endurecimento na camada de superfície dos componentes pela tensão induzida no *shot peening*. (ASM METAL HANDBOOK, volume 14, 1998).

Este processo é considerado relativamente antigo, não existem muitos dados científicos disponíveis a respeito do *shot peening*, sendo que a maior parte desse conhecimento foi obtida de forma empírica por grandes empresas, que mantêm muitas dessas descobertas e conhecimento “guardados” como know-how sem estar compartilhado, o que dificulta o acesso e limita a literatura existente. Mas este cenário tem sido mudado, pois o interesse de pesquisadores e cientistas tem facilitado a disseminação do conteúdo sobre esse tema. (SILVA, 2016).

As partículas em alta velocidade fazem contato com a superfície de metal, Figura.1, produzindo depressões na superfície por deformação plástica do metal (ASM Handbook, volume 5, 1994).

Figura 1 - Processo de shot peening e perfil de tensão residual



Fonte: SILVA, 2016, p.21

2. MATERIAIS E METODOS

Os aços ABNT 4320 e ABNT 5120 foram utilizados nesse estudo por aliarem boa resistência ao desgaste na superfície com núcleo tenaz após tratamento termoquímico de carbonitretação/têmpera e revenimento. Esses aços apresentam como característica elevada temperabilidade, boa forjabilidade e soldabilidade. A Tabela 1 mostra a composição química dos aços em percentagem em peso. (AMÉRICA, 2017).

Tabela 1 - Composição química

ABNT 4320							
C	Mn	Si	P máx	S máx	Cr	Ni	Mo
0,17	0,45	0,15	0,030	0,040	0,40	1,65	0,20
0,22	0,65	0,35			0,60	2,00	0,30
ABNT 5120							
C	Mn	Si máx	P máx	S máx	Cr	Ni	Mo
0,17	1,10	0,040	0,035	0,035	1,00	-	-
0,22	1,40				1,30	-	-

Fonte: Adaptação, América, 2017.

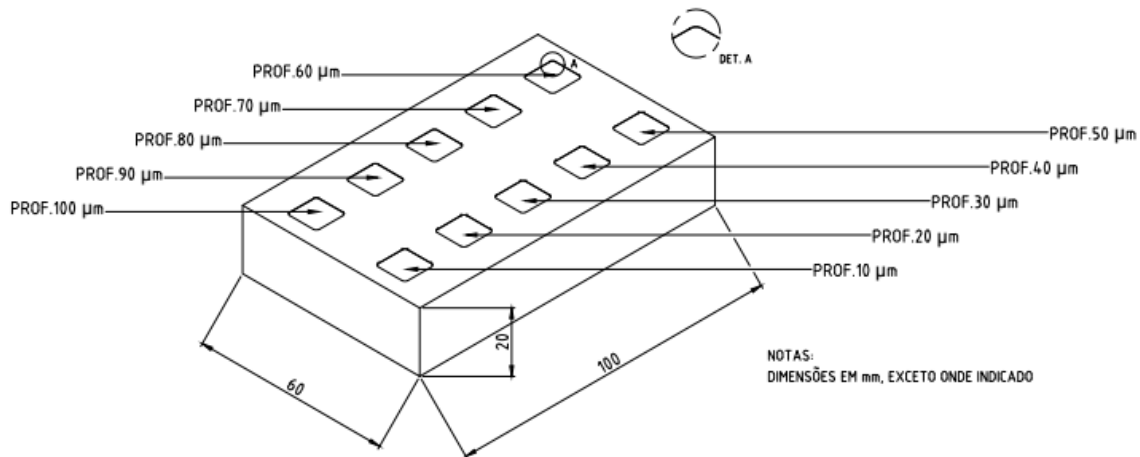
As matérias primas na forma de blanque forjado, foram usinadas em 5 corpos de prova nas dimensões de 100x60x20mm. Esses corpos de prova foram recozidos para alívio de tensões em forno, tipo mufla, por 2 horas a 200 °C. Em seguida, esses corpos de prova foram carbonitretados em fornos industriais, constituídos das zonas de pré-aquecimento, carbonitretação e resfriamento para têmpera direta (Khayam, Omar, 2014). Anteriormente ao shot peening nas amostras carbonitretadas, corpo de prova tipo “almen” foi submetido ao tratamento de “shot peening” em pressão de 7bar, tempo de 30s de exposição, e ângulo de aplicação de 90°. Essas condições de tratamento de “shot peening” possibilitaram obtenção de 100% de cobertura. O processo de “shot peening” foi realizado em máquina, tipo turbina, marca Passanger. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos à limpeza e corrosão química utilizando os reativos da Tabela 2.

Tabela 2 - Formulação das soluções de medição

Reativos de solução corrosiva medição	
Ataque	10% H ₂ SO ₄ + 10% HF + 10%H ₂ O + 70% H ₂ O ₂
Limpeza	85% H ₂ O ₂ + 10% H ₂ O + 5% HF

Fonte: Criado pelo autor

Diferentes profundidades foram obtidas em 10 posições igualmente espaçadas na chapa, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Profundidade de corrosão para análise

Fonte: Criado pelo autor

Após corrosão, foi realizada medição das profundidades atingidas no processo com auxílio de relógio comparador com sensibilidade de 0,001mm. As profundidades obtidas na decapagem química oscilaram entre 10 e 100µm. Em seguida, as amostras foram posicionadas em um equipamento de raios X, marca GRN Optica, para avaliação de tensões residuais nos pontos da superfície da amostra nas diferentes profundidades.

Para o processo de shot peening por jato de ar, foi utilizado um equipamento da Pangborn, modelo PE1107, trabalhando com os seguintes parâmetros eixo Y – Posição de trabalho: 11mm; eixo Z – Velocidade de jateamento: 100mm/min; eixo Z – Posição Inicial: 244mm; eixo Z – Posição Final: 150mm

Para o processo de shot peening por turbina, foi utilizado o equipamento, marca Passenger, modelo EP1836, com os seguintes parâmetros rotação do fuso porta: 10rpm; rotação da turbina: 2430rpm; tempo de jateamento: 0,50min; tempo de ciclo: 30seg

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

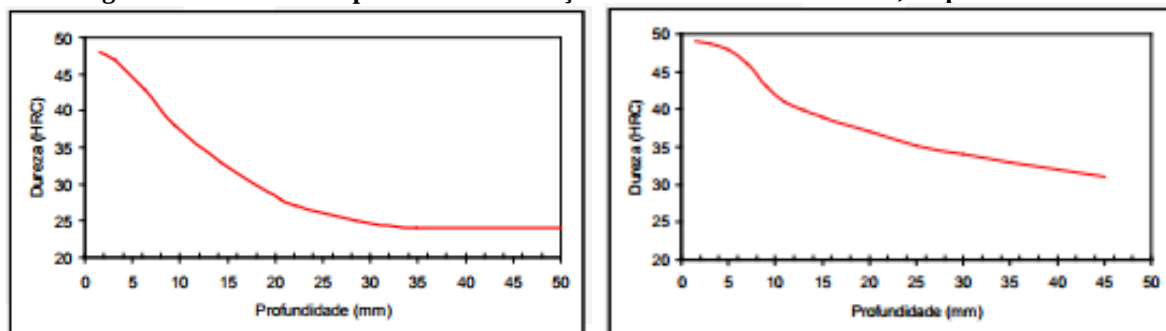
A análise química dos aços utilizados nos experimentos está mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise química dos aços estudados

ABNT 4320							
C	Mn	Si	P máx	S máx	Cr	Ni	Mo
0,18	0,5	0,22	0,012	0,017	0,48	1,83	0,22
ABNT 5120							
C	Mn	Si máx	P máx	S máx	Cr	Ni	Mo
0,17	1,18	0,023	0,02	0,017	1,06	-	-

Fonte: Criado pelo autor

Os resultados do ensaio de temperabilidade Jominy estão mostrados na Figura 3.

Figura 3 - Curva de temperabilidade dos aços ABNT 5120 e ABNT 4320, respectivamente.

Fonte: GGD, 2015

Observa-se que as durezas máximas são próximas em razão do teor de carbono, e também o gradiente de dureza experimentado pelo aço ABNT 4320 é menor que o ABNT 5120 em razão dos teores de níquel e molibdênio da liga.

A Tabela 4 mostra os valores de tensão residual obtidos em diferentes profundidades no intervalo de zero a 100µm nas 5 amostras testadas do aço ABNT 4320.

Tabela 4 - Valores de tensão residual para o ABNT 4320

AÇO 4320 - TENSÃO RESIDUAL COMPRESSIVA (MPa)					
Profundidade	Amostras				
	01	02	03	04	05
0 (µm)	-750 ± 25	-776 ± 22	-777 ± 28	-780 ± 23	-761 ± 33
10 (µm)	-881 ± 25	-862 ± 20	-877 ± 30	-876 ± 22	-867 ± 23
20 (µm)	-1012 ± 25	-1003 ± 25	-1018 ± 18	-1016 ± 28	-1007 ± 28
30 (µm)	-1150 ± 20	-1145 ± 25	-1116 ± 22	-1127 ± 28	-1118 ± 23
40 (µm)	-1040 ± 21	-1033 ± 30	-1019 ± 28	-1024 ± 23	-1027 ± 26
50 (µm)	-770 ± 29	-755 ± 33	-775 ± 16	-759 ± 25	-752 ± 29
60 (µm)	-400 ± 28	-396 ± 24	-387 ± 24	-380 ± 20	-391 ± 29
70 (µm)	-350 ± 31	-346 ± 22	-340 ± 25	-336 ± 21	-360 ± 29
80 (µm)	-340 ± 28	-321 ± 27	-310 ± 20	-316 ± 20	-310 ± 22
90 (µm)	-318 ± 26	-311 ± 25	-305 ± 22	-306 ± 29	-300 ± 20
100 (µm)	-306 ± 21	-302 ± 38	-305 ± 19	-309 ± 25	-308 ± 22

Observa-se que a intensidade do nível de tensão varia em ampla faixa no intervalo de -308 a -1140MPa. As tensões ao longo da profundidade são compressivas quer após o tratamento termoquímico de carbonitretação/têmpera/revenimento (-308MPa) no núcleo da peça até -1150MPa em profundidade de 30 µm de profundidade.

A Tabela 5 mostra os valores de tensão residual obtidos em diferentes profundidades no intervalo de zero a 100µm nas 5 amostras testadas do aço ABNT 5120.

Tabela 5 - Valores de tensão residual para o ABNT 5120

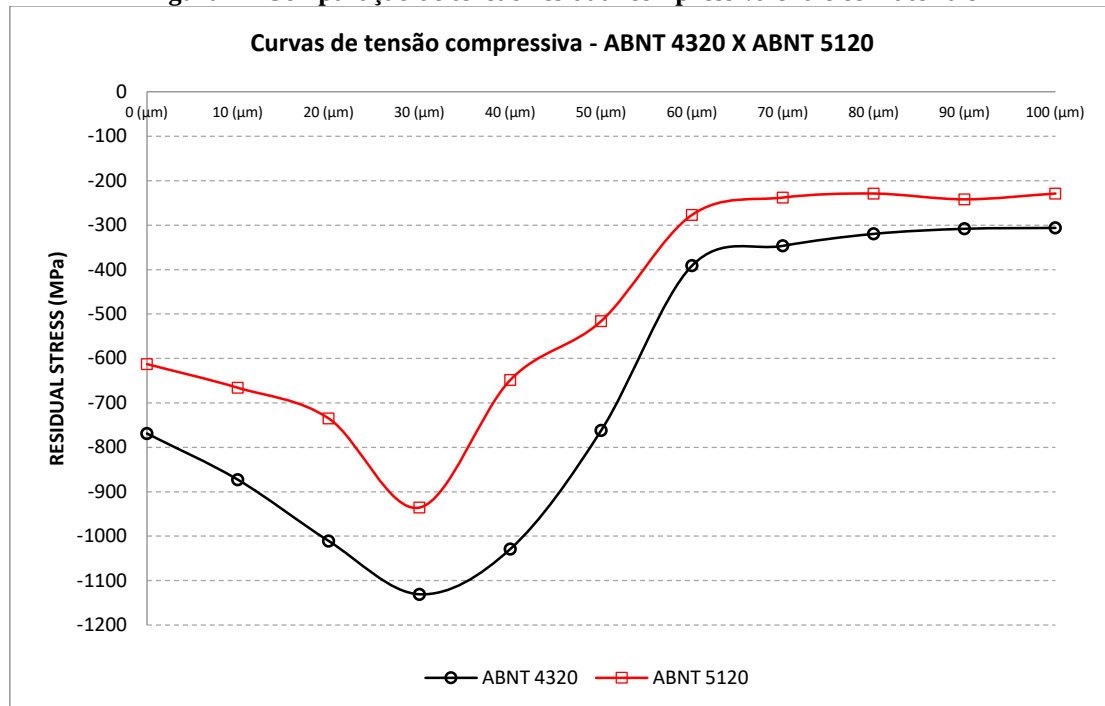
AÇO 5120 - TENSÃO RESIDUAL COMPRESSIVA (MPa)					
Profundidade	Amostras				
	01	02	03	04	05
0 (µm)	-596 ± 15	-639 ± 20	-582 ± 11	-630 ± 19	-617 ± 20
10 (µm)	-661 ± 19	-662 ± 21	-690 ± 18	-660 ± 10	-656 ± 09
20 (µm)	-712 ± 10	-750 ± 10	-780 ± 15	-745 ± 16	-690 ± 15
30 (µm)	-940 ± 18	-925 ± 19	-901 ± 10	-957 ± 20	-955 ± 20
40 (µm)	-640 ± 15	-693 ± 18	-659 ± 16	-630 ± 13	-620 ± 20
50 (µm)	-520 ± 20	-480 ± 13	-539 ± 15	-520 ± 08	-520 ± 19
60 (µm)	-300 ± 16	-286 ± 16	-277 ± 10	-260 ± 10	-261 ± 19
70 (µm)	-250 ± 11	-246 ± 15	-230 ± 12	-216 ± 11	-248 ± 19
80 (µm)	-240 ± 18	-229 ± 13	-230 ± 10	-216 ± 19	-230 ± 15
90 (µm)	-242 ± 19	-254 ± 25	-238 ± 12	-240 ± 19	-238 ± 17
100 (µm)	-230 ± 20	-235 ± 07	-228 ± 18	-212 ± 28	-239 ± 15

Fonte: Criado pelo autor

Os valores de tensão residual encontrado para o aço ABNT 5120 apresentam-se menores do que os correspondentes ao ABNT 4320, porém também elevados tendo seu maior valor de tensão residual a profundidade de 30µm.

A Figura 4 mostra a evolução da tensão residual obtida para os aços ABNT 5120 e ABNT 4320 em função da profundidade .

Figura 4 - Comparação de tensão residual compressiva entre os materiais

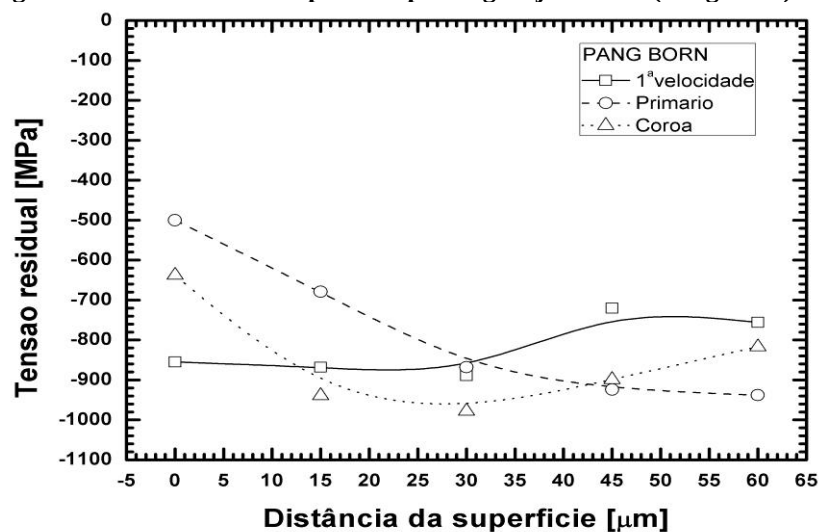


Após o tratamento termoquímico verificou-se tensões de natureza compressiva na superfície. Nas maiores profundidades analisadas não se verificou a ação do tratamento mecânico de shot peening. Verificou-se, também, que a evolução da tensão residual com a profundidade apresentou a mesma configuração e, ainda mais, o ponto de maior valor de tensão compressiva verificou na mesma profundidade para ambos os aços. A influência do tratamento de shot peening ocorreu até a profundidade de 50 μm o que pode ser resultado da diferença na plasticidade das regiões mais internas dos aços estudados. Com a profundidade de endurecimento experimentada pelo aço ABNT 4320 é maior comparada ao aço ABNT 5120, é possível que a resposta das camadas mais internas do aço ABNT 4320 à ação do impacto das esferas propiciou um maior ganho em tensão compressiva junto à superfície e em profundidades até 30 μm.

Após avaliação de ambos os aços de baixa liga, concluiu-se que o ABNT 4320 apresenta maiores valores de tensão compressivas, e por esse motivo, decidiu-se estudar quais os ganhos para o processo de shot peening em máquinas de jato de ar para este material, comparada com o ganho em máquinas de turbina, em peças de transmissões automotivas.

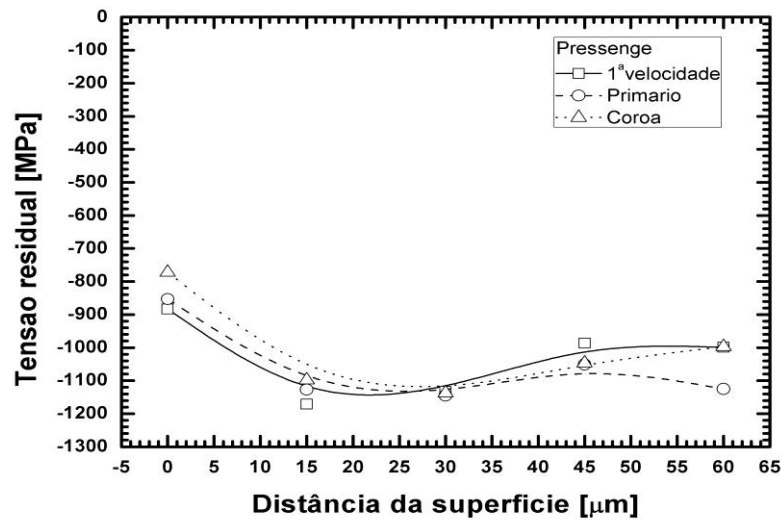
A Figura 5 apresenta os resultados dos componentes após shot peening na máquina de jato de ar.

Figura 5 - Tensão residual após shot peening de jato de ar (Pang Born)



A Figura 6 apresenta os resultados dos componentes após shot peening na máquina de turbina.

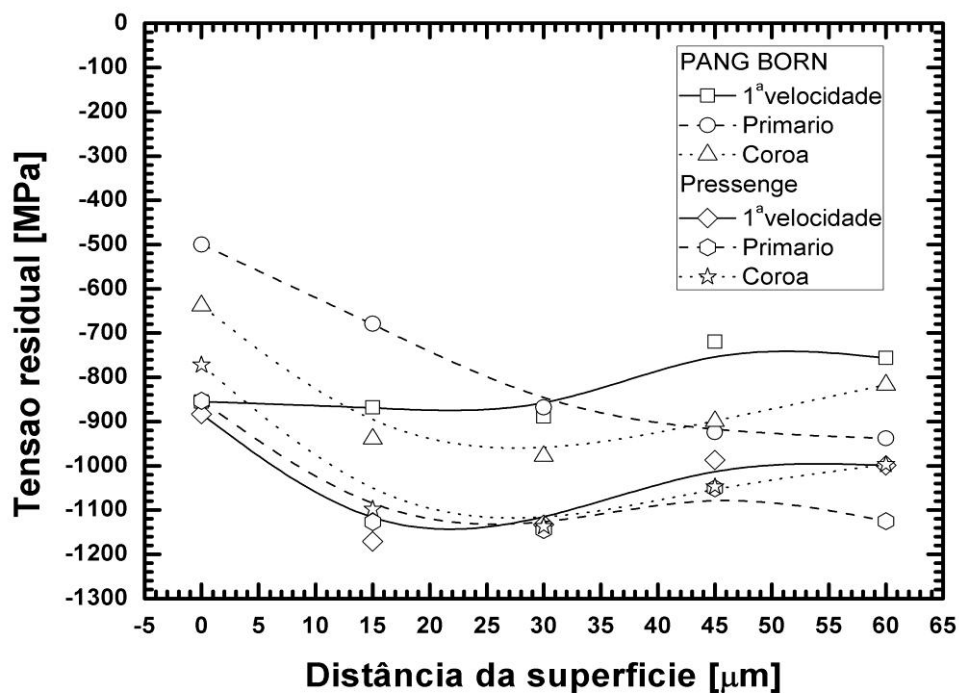
Figura 6 - Tensão residual após shot peening de turbina (Pressenger)



Fonte: Criado pelo autor

A Figura 7 mostra o comparativo dos resultados dos componentes após shot peening nas máquinas de jato de ar e turbina.

Figura 7- Comparativo de Tensão residual após shot peening nas máquinas de Jato de Ar x Turbina



Fonte: Criado pelo autor

Os equipamentos de Shot Peening com Turbina e com Jato de Ar são utilizados para realizar o mesmo objetivo que é de criar tensão residual na superfície das peças, porém as condições de processo são diferentes em função da concepção de fabricação e funcionamento de cada máquina, sendo que ao analisarmos os gráficos o processo utilizando Turbina consegue maiores valores de tensão residual compressiva, chegando a valores de -1100Mpa, enquanto o processo utilizando Jato de Ar, consegue valores de até -1000Mpa.

4. CONCLUSÃO

- A temperabilidade dos aços afeta o perfil de tensões compressivas experimentado após o tratamento mecânico de “shot peening”.
- Valores elevados de tensão residual compressiva foram encontrados, porém a amplitude destes valores não esta ligada somente ao shot peening, mas também ao tratamento termoquímico de carbonitretração que gera tensões residuais térmicas e compressivas no material.
- Os componentes analisados após as máquinas de shot peening de jato de ar e turbina apresentaram em todas as extensões medidas, as tensões residuais compressivas provenientes do tratamento de shot peening e as maiores tensões compressivas obtidas foram nos componentes após shot peening na máquina de turbina.
- Apesar das dispersões dos resultados de Tensão Residual entre as máquinas que realizam o processo de Shot Peening com Turbina X com Jato de Ar, pode-se verificar que as duas máquinas conseguem atender os valores especificados de Tensão Residual para o produto.
- Os valores encontrados no primeiro momento, pode-se definir que para o produto a Máquina de Shot Peening com Turbina que apresenta valores de Tensão Residual mais alta, porém analisando como processo, a Máquina de Shot Peening com Jato de Ar apresenta os resultados de Tensão Residual dentro do especificado e vantagens na realização do processo como menor custo de execução.

5. AGRADECIMENTOS

A FAPEMIG /CNPQ pelo apoio na realização desse trabalho.

A FCA/PUCMG pelo apoio na realização experimental.

6. REFERÊNCIAS

- AMÉRICA, aços especiais. “Tabela América aços de referência”. 2017
- ASM metals handbook. Forming and Forging. Volume 14 of the 9th. The Volume was prepared under the direction of the ASM Handbook Committee.. p.2535.
- ASM METALS HANDBOOK. Surface Engineering. Volume 05. The Volume was prepared under the direction of the ASM Handbook Committee, 1998. p.2210.
- GGD Metals. “Aço para construção Mecânica”. 2015. 24 p.
- ROCHA, C. L. F. “Desempenho em fadiga de arames submetidos ao processo de shot peening”. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 87 p., 2010.
- SILVA, J.J.O., “Efeito do processo de shot peening com diferentes condições de deflexão de almen nos perfis de tensão residual e microdureza e rugosidade em um aço cementado temperado/revenido utilizado na fabricação de engrenagens automotivas”. 2016. p.100. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Pernambuco.
- Ribas, Omar Khayyam - Estudo da substituição do propano pelo gás natural na geração de atmosfera em tratamento termoquímico de cementação Dissertação de Mestrado Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica 2014.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho”.

EVOLUTION OF RESIDUAL STRESS IN STEELS ABNT 4320 AND ABNT 5120 AFTER CARBONITRETATION / TEMPERATURE AND SHOT PEENING IN COMPRESSED AIR AND TURBINE MACHINES

Thiago Costa Rodrigues Rosa, trosa@sga.pucminas.br¹
Jose Rubens Gonçalves Carneiro, Dr, joserub@pucminas.br²
Renato Silva de Oliveira, renato.silva@fcagroup.com²
Gilmar Cordeiro da Siva, Dr, gilmarcord@pucminas.br
João Pedro Santiago Carneiro, jsantiagocarneiro@gmail.com

¹Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais Rua Dom José Gaspar , 500 Coração Eucarístico Belo Horizonte MG

Abstract. Shot peening or shot blasting is a cold mechanical process where a jet of shot is propelled against the surface of the components causing plastic deformation and inducing residual stress of compression on the surface, increasing the resistance to fatigue.

This paper describes the study of the evolution of residual stresses in two types of ABNT 4320 and 5120 steels commonly used in the automotive / aeronautical industry after carbonitriding and after peening. Samples in the dimensions of 100x60x20mm were machined, annealed and carbonitreated at a temperature of 870 ° C for 12 hours in steps of preheating carbonitration and direct quenching in oil. The shot peening process was performed in a turbine type machine after execution in a "almen" test body with 100% coverage. The maximum jet pressure was controlled at 7bar; 30s exposure time and 90 ° application angle. After shot peening, the samples were pickled in 10% H₂SO₄, 10% HF, 10% H₂O and 70% H₂O₂ solution at different positions in the samples for residual stress measurement at different depths. An X-ray diffractometer, brand GRN Optica, was used to evaluate the residual stresses. The depths obtained in the pickling were 0 to 100µm. Residual voltage values in the range of -300 to -1200MPa were observed at distances of 0 to 100 µm with maximum values around 30µm and dispersion values of + -30 µm. ABNT 4320 steel experienced a more negative voltage level compared to ABNT 5120 steel which may be due to its higher tempera- ture. For this reason, it was studied its residual voltage gain also in automotive transmissions in ABNT 4320 in shank peening machines Pangborn Air Jet, model PE1107, and Turbine Passenger, model EP1836, presenting higher compressive stresses in a turbine machine .

Keywords: Shot peening; Residual stress; X-ray diffraction