



INFLUÊNCIA DA FERRAMENTA DE CORTE DE USINAGEM NA TENSÃO RESIDUAL E NA DISTORÇÃO DIMENSIONAL DO AÇO SAE 5120H NO TRATAMENTO TÉRMICO

Diego Boaventura Amaral

Wellington Lopes

Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG - Campus I - Departamento de Engenharia de Materiais - DEMAT. Avenida Amazonas, 5253. Nova Suiça. Belo Horizonte, MG, Brasil.
diegoamaral@hotmail.com, wellington.demat@gmail.com, elainecarballo@cefetmg.br

Paulo Sérgio Martins

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Av. Dom José Gaspar, 500 Coração Eucarístico - Belo Horizonte - MG, Brasil.
paulosabara@yahoo.com.br

Resumo. O tratamento térmico é um processo amplamente utilizado nos aços uma vez que ele agrega propriedades mecânicas importantes como dureza e resistência ao desgaste. O endurecimento pelo processo de têmpera à óleo é um dos mais comuns, devido ao baixo custo de processamento, entretanto, possui como principal deficiência a distorção dimensional gerada nos componentes tratados. Neste contexto de distorção dimensional causada pelo tratamento térmico, têm-se como uma das causas predominantes, a tensão residual presente na peça devido a processamentos prévios, como a usinagem. O presente trabalho retrata um estudo das tensões residuais e da distorção dimensional do aço SAE 5120H sob diferentes variações da ferramenta de corte na usinagem por brochamento (variações quanto ao tipo de revestimento da ferramenta de corte e da condição de afiação da ferramenta). A avaliação da influência da ferramenta de corte foi realizada com uso de medição de cilindridade e de tensão residual por difração de raios-X. Os resultados obtidos neste trabalho para o aço 5120H revelaram que as tensões residuais negativas (compressivas) existentes antes da execução dos tratamentos térmicos foram as que ocasionaram a maior distorção dimensional ao material tratado termicamente.

Palavras chave: Aço SAE 5120H. Usinagem. Tratamento térmico. Tensão residual. Ferramentas de corte.

1. INTRODUÇÃO

Componentes metálicos que sofrem carregamentos mecânicos durante sua aplicação são usualmente tratados termicamente durante o processo de fabricação, de modo a incrementar as propriedades mecânicas do material. Este processo, entretanto, produz efeitos indesejáveis como alterações dimensionais prejudiciais nas peças, chamadas de distorção (BRINKSMEIER; SÖLTER; GROTE, 2007).

Os problemas relacionados à distorção estão presentes universalmente na indústria. Estudos indicaram que as perdas no processamento de materiais metálicos em 1995, provenientes do tratamento térmico, apenas na indústria alemã nos ramos de usinagem e automotiva ultrapassaram 1 bilhão de dólares (MACKENZIE, 2017).

A distorção gerada pelo tratamento térmico tem várias fontes, como por exemplo, as tensões residuais presentes nos componentes. Essa tensão residual é gerada por operações de usinagem anteriores ao tratamento térmico. Esse gradiente de tensão é aliviado durante o aquecimento, resultando em distorção (MACKENZIE, 2017).

O processo de usinagem por brochamento é altamente produtivo e de baixo custo. A redução de custos do processo através do aumento da vida útil da ferramenta de corte (brocha) se dá pela aplicação de diferentes revestimentos na brocha. Esses revestimentos influenciam diretamente nas tensões residuais geradas no processo de usinagem.

A quantificação de tensões residuais pode ser realizada por diversos tipos de ensaios no qual o método por difração de raio-X utilizado neste trabalho é o mais usual. Este trabalho visa analisar a influência da ferramenta de corte na usinagem por brochamento na tensão residual gerada no aço SAE 5120H e a consequente distorção dimensional após o processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento.

2. METODOLOGIA

O material das amostras utilizadas neste trabalho foi o aço SAE 5120H. Os procedimentos adotados no

desenvolvimento deste trabalho estão resumidos no fluxograma da Figura 1.

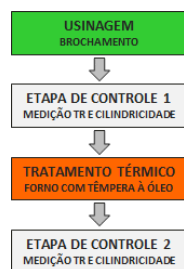


Figura 1. Fluxograma de desenvolvimento do trabalho

As amostras do aço 5120H foram usinadas utilizando o equipamento Brochadeira Varinelli/96 com velocidade de corte de 8,5 m/min e lubrificação por jorro. Esta operação de usinagem consiste em brochar o diâmetro interno da amostra gerando um perfil com 25 dentes, como pode ser visto na Figura 2.



Figura 2. Amostra após brochamento do perfil interno

As condições estudadas neste trabalho foram obtidas combinando duas variáveis da ferramenta de corte: revestimento da ferramenta e condição de afiação da ferramenta.

Revestimento da ferramenta de corte: TiN (Nitreto de Titânio) e AlCrN (Nitreto de Cromo-Alumínio).

Condição de afiação da ferramenta de corte: As brochas possuem vida útil de 12000 peças até a próxima afiação:

- Brocha afiada: amostras coletadas entre as primeiras 150 peças produzidas após a afiação;
- Brocha sem fio de corte: amostras coletadas após 11500 peças produzidas após a afiação.

A matriz de experimentos foi feita com base em doze amostras, divididas em quatro condições distintas, conforme Tabela 1. Desta forma, teve-se 3 amostras para cada condição.

Tabela 1. Matriz de experimentos

Condição	Afiação da ferramenta	Revestimento da ferramenta
1	Brocha Afiada	TiN
2	Brocha sem fio de corte	TiN
3	Brocha Afiada	AlCrN
4	Brocha sem fio de corte	AlCrN

Após a etapa de usinagem, as amostras foram controladas na etapa de controle 1, e posteriormente, submetidas ao aquecimento em um forno contínuo do fabricante Aichelin ano 1997 para a etapa de carbonitretação, têmpera à óleo, lavagem e revenimento. As variáveis de processo desta etapa do estudo foram constantes para as quatro condições. A temperatura para a austenitização foi de 840 °C, temperatura do óleo de têmpera de 100°C e temperatura de revenimento de 150 °C. Na Figura 3 é exibido a amostra após tratamento térmico.



Figura 3. Amostra após tratamento térmico

As amostras em estudo foram caracterizadas em duas etapas de controle, conforme detalhado abaixo:

Etapa de controle 1: Após operação de usinagem (brochamento do perfil interno), conforme Figura 2, sendo realizados os ensaios de tensão residual e medição de cilindricidade.

Etapa de controle 2: Após tratamento térmico (carbonitretação, têmpera à óleo, lavagem e revenimento), conforme Figura 3, sendo realizados os ensaios de tensão residual e medição de cilindricidade.

Os testes dimensionais foram realizados nas etapas de controle 1 e 2 no Tridimensional ZeissAccura 570. Este ensaio visou avaliar a distorção dimensional (%) de cilindricidade sofrida pelas amostras durante a etapa de tratamento térmico. Um esquema da medição de cilindricidade é exibido na Figura 4.

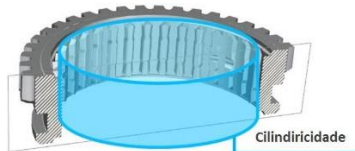


Figura 4. Medição de cilindricidade

Na etapa de controle 1, posteriormente à análise dimensional, foram realizados os ensaios de tensão residual no fundo do perfil brochado conforme Figura 5, utilizando-se a técnica de difração de raios-X de acordo com o método $\sin^2\psi$. É válido ressaltar que a medição foi realizada no fundo do dente após a realização de um pré-teste no qual observou-se que a tensão residual no topo do dente não possuía variações significativas sob diferentes condições.



Figura 5. Medição de tensão residual na etapa de controle 1

Cada condição do estudo teve duas amostras analisadas pelo difratômetro StressX, do fabricante GNR. Todas amostras tiveram 3 pontos medidos (na superfície da amostra), ou seja, seis medições de tensão residual para cada variável analisada.

3. RESULTADOS

3.1. Tensão residual por difração de raios-X (DRX)

Os resultados de tensão residual obtidos pela técnica de difração de raios-X na etapa de controle 1 (após usinagem por brochamento e sem tratamento térmico) estão apresentados por meio de gráfico *Box-Plot* conforme Figura 6.

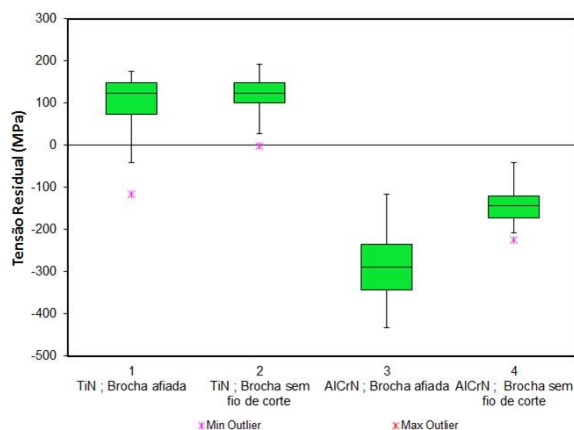


Figura 6. Tensões residuais na etapa de controle 1

É possível observar que as amostras usinadas com brochas de revestimento TiN obtiveram tensão residual de tração e com distribuições similares. Em contrapartida, as amostras usinadas com ferramenta de corte revestida com AlCrN apresentaram tensão residual de compressão e maior dispersão.

De forma análoga aos resultados encontrados por Outeiro, Dias e Jawahir (2006), o revestimento de TiN possui

maior coeficiente de atrito com o aço (0,60) em relação ao revestimento de AlCrN (0,35), logo as forças de corte e as condições de fricção são mais severas para a usinagem por brochas revestidas de TiN. Como consequência, a energia térmica total de maior magnitude gerada pela ferramenta revestida de TiN, justifica as tensões residuais positivas (de tração) nas amostras usinadas por brochas revestidas de TiN (condições de estudo 1 e 2) em relação ao outro revestimento.

Na Figura 7 é possível observar o comportamento da tensão residual à medida que se varia a condição de afiação da ferramenta de corte. As linhas de tendência são traçadas a partir da média de tensão residual para cada condição.

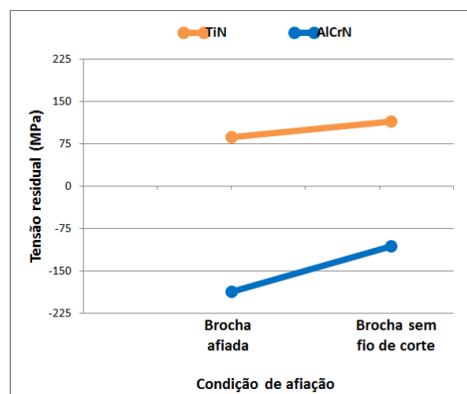


Figura 7. Média de tensão residual x Condição de afiação

Conforme destacado, na Figura 7, é possível observar para os dois revestimentos, TiN e AlCrN, que a magnitude do valor da tensão residual aumenta à medida que a ferramenta de corte vai perdendo o fio de corte, ou seja, à medida que a mesma é usada. Além disso, pode-se notar que o aumento de tensão residual com o tempo de uso da ferramenta é maior para a brocha revestida com AlCrN.

Liu, Takagi e Tsukuda (2004) concluíram em relação à influência do desgaste da ferramenta sobre a tensão residual gerada na superfície usinada que quanto maior o desgaste, mais positiva é a tensão residual encontrada na peça. Este fenômeno ocorre, pois, as tensões residuais de tração são causadas pelos impactos térmicos devido à fricção e à deformação plástica. De forma análoga, à medida que a ferramenta perde seu fio de corte, aumenta-se a fricção entre peça e ferramenta, e consequentemente, favorece o surgimento de tensões residuais de tração.

3.2. Distorção dimensional (%) após o tratamento térmico

A análise dimensional realizada nas etapas de controle 1 e 2 visou mensurar a distorção dimensional (em porcentagem) entre essas duas etapas, ou seja, a distorção decorrente do tratamento térmico. Os valores de distorção em porcentagem são decorrentes da razão da variação dimensional entre as etapas 2 e 1 sob a dimensão inicial (etapa de controle 1).

Na Figura 8 são apresentados os resultados para a distorção dimensional de cilindricidade (%) após a realização do tratamento térmico.

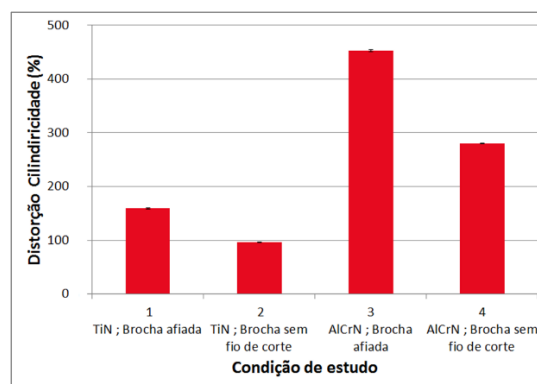


Figura 8. Distorção dimensional de cilindricidade (%) após tratamento térmico

Analizando a Figura 8, é possível observar que as condições de estudo que apresentaram tensão residual mais compressiva, ou seja, as amostras revestidas com AlCrN, na etapa de controle 1, sofreram maior distorção no tratamento térmico, enquanto as amostras com tensão residual mais tratativas, corpos de prova revestidos com TiN, apresentaram

menor distorção.

Também é possível notar que a distorção dimensional (%) reduziu à medida que as ferramentas de corte perderam o fio de corte. Devido à proporcionalidade entre os valores de tensão residual na etapa de controle 1 (após brochamento) e a distorção de cilindridade (%) no tratamento térmico é possível criar um modelo matemático relacionando as duas variáveis conforme a Figura 9.

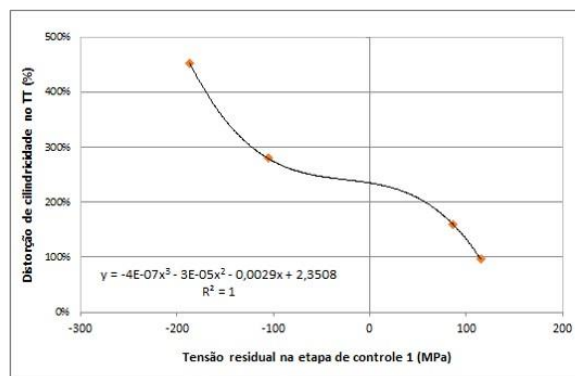


Figura 9. Tensão residual na etapa de controle 1 em função da distorção de cilindridade (%)

Pela análise da Figura 9 é possível perceber que a distorção dimensional de cilindridade tende a diminuir à medida que a tensão residual modifica de compressiva para trativa.

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho indicaram diferenças expressivas na geração de tensões residuais nos corpos de prova do aço 5120H durante a usinagem de acordo com o revestimento da ferramenta de corte utilizado. Amostras usinadas com brochas revestidas de TiN apresentaram tensão residual de tração enquanto brochas com revestimento de AlCrN geraram tensões residuais de compressão nas amostras.

Verificou-se influência da condição de afiação da ferramenta de corte (afiada ou sem fio de corte) na tensão residual gerada na usinagem. Foi possível concluir que à medida que ocorre o desgaste do fio de corte da ferramenta, a tensão residual gerada na superfície tende a ser mais trativa.

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram perceber significativa relação da tensão residual medida nas amostras previamente à etapa de tratamento térmico com o percentual de distorção dimensional de cilindridade sofrida pelas amostras durante o processo de tratamento térmico. Observou-se influência inversamente proporcional entre o valor de tensão residual prévia ao tratamento térmico com a distorção gerada neste processo, ou seja, tensões residuais mais negativas (compressivas) induziram maior distorção dimensional.

Analizando a relação entre o revestimento da ferramenta de corte na usinagem e a distorção dimensional no tratamento térmico, notou-se que amostras usinadas com brochas revestidas de AlCrN apresentaram maior distorção dimensional que amostras usinadas por brochas revestidas de TiN.

5. REFERÊNCIAS

- BRINKSMEIER, E., SÖLTER J. e GROTE, C. "Identification of Causes for Dimensional and Form Deviations of Bearing Rings". Distortion Engineering, Bremen, 2007.
- LIU, Meng; TAKAGI, Jun-ichiro; TSUKUDA, Akira. "Effect of tool nose radius and tool wear on residual stress distribution in hard turning of bearing steel". Journal Of Materials Processing Technology, [s.l.], v. 150, n. 3, p.234-241, jul. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.038>.
- MACHERAUCH, Eckard. "Introduction to Residual Stress". In: MACHERAUCH, Eckard. Advances in Surface Treatments. 4. ed. England: A. Niku-lari, 1987. Cap. 1. p. 1-36.
- MACKENZIE, D. Scott. "Development of residual stresses during machining and workholding". Hot Seat.[s.i], p. 25-27. 2017.
- OUTEIRO, J.c.; DIAS, A.m.; JAWAHIR, I.s. "On the Effects of Residual Stresses Induced by Coated and Uncoated Cutting Tools with Finite Edge Radii in Turning Operations". Cirp Annals, [s.l.], v. 55, n. 1, p.111-116, 2006. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60378-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60378-3).
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. "Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction - SAE J784a". 2 ed. New York: SAE Inc, 1971. 76p.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

INFLUENCE OF MACHINING CUTTING TOOL IN THE RESIDUAL STRESS AND DIMENSIONAL DISTORTION OF SAE 5120H STEEL IN THE THERMAL TREATMENT

Diego Boaventura Amaral

Wellington Lopes

Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG - Campus I - Departamento de Engenharia de Materiais - DEMAT. Avenida Amazonas, 5253. Nova Suiça. Belo Horizonte, MG, Brasil.

diegoamaral@hotmail.com, wellington.demat@gmail.com, elainecarballo@cefetmg.br

Paulo Sérgio Martins

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Av. Dom José Gaspar, 500 Coração Eucarístico - Belo Horizonte - MG, Brasil.

paulosabara@yahoo.com.br

Abstract. Heat treatment is a widely used process in steels since and improves the mechanical properties like hardness and wear resistance. The hardening provided by oil quenching process is one of the most common due to the low processing cost. However, has as main deficiency the dimensional distortion generated in the treated components. Considering this approach, the dimensional distortion caused by the heat treatment can cause residual stress in the heat treated parts due to previous processing, such as machining. The present work presents a study of the residual stresses and the dimensional distortion of the SAE 5120H steel under different conditions of cutting tool in the machining (cutting tool coating and tool sharpening condition) performed before and after the heat treatments of quenching / tempering. The evaluation of the influence of the cutting tool was carried out with the use of dimensional analysis and residual stress tests by X-ray diffraction. The results obtained in this work for the 5120H steel revealed that the negative (compressive) residual stresses present before the execution of the heat treatments were those that caused the greater dimensional distortions to the heat treated material.

Keywords: SAE 5120H steel. Machining. Heat treatment. Residual stress. Cutting tools.

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.