

METODOLOGIA HOLÍSTICA DE IDENTIFICAÇÃO DE CAUSAS DE DISTORÇÃO EM TRATAMENTOS TÉRMICOS E ROTAS DE FABRICAÇÃO DE COMPONENTES MECÂNICOS¹

*Rafael Menezes Nunes²
Alexandre da Silva Rocha³
Thomas Hirsch⁴*

Resumo

A distorção que ocorre em etapas de fabricação de componentes mecânicos é um dos principais problemas enfrentados na indústria metal-mecânica. Estas distorções, em geral, ocorrem em etapas de usinagem ou tratamento térmico, ou seja, etapas onde há redistribuição de tensões residuais. No ano de 1927 Portvein fez às primeiras investigações a respeito dos fatores que levam estes componentes mecânicos a distorção, entretanto o problema distorção não é completamente entendido e controlado. Na Alemanha, em 1995 realizou-se um levantamento sobre as perdas econômicas devido à distorção e concluiu-se que são gastos 850 milhões de Euros/ano somente na correção de distorção causadas em engrenagens. Até o ano de 2001 acreditava-se que a causa principal da distorção eram os parâmetros de tratamento térmico, porém com a criação do SFB570 na Universidade de Bremen - Alemanha ficou mostrada que a distorção é conectada com diversos fatores do processo de manufatura. Por isso, uma visão holística do processo é necessária para o entendimento dos mecanismos que levam um componente à distorção em uma rota de fabricação. Neste trabalho é feita uma revisão dos principais efeitos que causam distorção em tratamentos térmicos de componentes mecânicos, sendo eles: Microestrutura/composição química/tamanho de grão, tensões residuais, geometria, histórico mecânico

Palavras-chave: Distorção; Tratamento térmico; Tensões residuais.

HOLISTIC METHODOLOGY TO IDENTIFY CAUSES OF DISTORTION IN HEAT TREATMENTS AND MANUFACTURING ROUTES OF MECHANICAL COMPONENTS

Abstract

The distortion that occurs in manufacturing steps of mechanical components is one of the main problems in the metalworking industry. These distortions generally occur in machining or heat treatment steps, or stages where occurs residual stress redistribution. In 1927 Portvein made the first investigations of the factors that lead these mechanical components distortion, but the problem is not fully understood and controlled. In Germany in 1995 there was a study on the economic losses due to distortion and concluded that they are spending 850 million Euros / year only in correcting gear distortion. Up to 2001 it was believed that the main cause of the distortion parameters were the heat treatment, but with the creation of the SFB570 at the University of Bremen - Germany was shown that the distortion is connected with several factors of the manufacturing process. Therefore, a holistic view of the process is necessary for understanding the mechanisms that lead to distortion in a component manufacturing route. This paper revises the main effects that cause distortion in heat treatment of mechanical components, which are: Microstructure / chemical composition / grain size, residual stresses, geometry and mechanical history

Key words: Shape distortions; Heat treatment; Residual stress.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Dr. Eng. Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. rafael.nunes@ufrgs.br*

³ *Prof. Dr. Eng. do PPGEM – UFRGS e da Escola de Engenharia da UFRGS, Brasil. alexandre.rocha@ufrgs.br;*

⁴ *Priv Doz. Dr. Ing., IWT – Stiftung Institut fuer Werkstofftechnik – Universität Bremen - Germany*

1 INTRODUÇÃO

Para garantir alta qualidade, propriedades mecânicas, e confiabilidade dos componentes de aço, os fabricantes de componentes mecânicos realizam tratamentos térmicos. Nos vários processos de fabricação de componentes de aço, o tratamento térmico é a operação mais sensível e menos controlável, em relação a problemas de fabricação, pois envolve as distorções de forma imprevistas.

Os tratamentos térmicos são uma etapa essencial no processo de fabricação de componentes mecânicos. De acordo com Rohde e Jeppsson⁽¹⁾ não é possível fabricar um componente mecânico em sua forma final antes do tratamento térmico. Como correções ao problema distorção são requeridas altas remoções de material, por usinagem, após o tratamento térmico. Este material removido causa um aumento de custos de matéria-prima, pois são requeridas maiores espessuras de componentes para compensar a remoção de material na usinagem. Também há o aumento dos custos do componente devido à usinagem, pois a usinagem de componentes temperados tem um custo mais elevado e também é necessário um tempo maior de processamento do material, devido à dureza elevada.

O principal interesse industrial é, portanto, entender e prever as distorções durante a etapa de projeto, design do produto e processo de fabricação. Segundo Totten,⁽²⁾ estudos recentes e os contatos com a indústria, muitas vezes mostram as frustrações vividas por fabricantes em tentar controlar as distorções de forma consistentemente. Este tipo de controle é complexo, pois não depende apenas do ajuste dos equipamentos e fornos de tratamento térmico e sim de um controle de toda cadeia de produção.⁽³⁾

Sabe-se que quase todas as etapas no processo de fabricação podem afetar a forma final da peça, “potencial de distorção”. Se pudesse ser prevista com precisão qual a nova forma de uma peça após o tratamento térmico, então, esta informação poderia ser incluída no projeto antes da fabricação. No entanto, há tantas variáveis que interagem de muitas maneiras que o problema é muitas vezes além da capacidade atual para análise e, assim, a distorção não pode ser prevista com precisão, mas pode ser controlada ou minimizada.⁽⁴⁾ A norma EN 10052 define distorção como sendo qualquer mudança de forma e/ou dimensão ocorrida durante o tratamento térmico. Apesar de esta definição descrever apenas o tratamento térmico, qualquer etapa de um processo pode ou poderá causar distorção em componentes mecânicos.⁽⁵⁾

Segundo Totten,⁽⁶⁾ uma das causas principais responsável pela distorção são as tensões residuais. O estado e a distribuição de tensões residuais, juntamente com todas as propriedades do material vão sofrendo alterações a cada etapa de um processo de manufatura. Por esta razão, uma melhoria da qualidade final do produto pode ser alcançada se as variações nas propriedades e nas distribuições de tensões residuais forem determinadas após cada etapa do processo de manufatura. Em geral, esta abordagem não é utilizada e somente se procura atuar em etapas isoladas do processo. Por isso, a realização de uma investigação detalhada de diversas etapas de uma rota de fabricação, desde os processos envolvendo a deformações plásticas e processos de usinagem até os processos de tratamento térmico. A partir dos dados obtidos pode-se determinar as causas da distorção final e correlacionar os diversos parâmetros de processo e propriedades dos materiais que influenciarão na qualidade final do produto.

Muitas vezes o problema distorção é abordado com melhorias apenas no tratamento térmico, ou seja, o processo não é visto como um todo. A partir de estudos

realizados pelo SFB570 da universidade de Bremen, foi mostrado que todas as etapas do processo podem gerar um “potencial de distorção” e este é aliviado, geralmente, em etapas onde há usinagem e/ou tratamento térmico, ou seja, em etapas onde há redistribuição ou relaxação de tensões residuais.⁽⁷⁾

Na Figura 1 é mostrada a metodologia do SFB570 desenvolvida por Kessler et al.⁽⁸⁾ Esta metodologia é utilizada para o estudo e análise de distorções de forma em uma cadeia produtiva. A primeira etapa é a determinação de variáveis que podem causar distorção ao longo da rota de fabricação. Este levantamento é complexo e necessita de uma boa experiência para sua determinação. A segunda etapa é analisar o processo utilizando as ferramentas estatísticas através de uma matriz contendo os principais parâmetros a serem investigados. Segundo as pesquisas desenvolvidas no “Distortion Engineering” o método aceito para determinar a combinação destes fatores é o Planejamento de Experimentos, sigla em inglês (DoE).⁽⁸⁾ Os resultados experimentais obtidos, variável resposta, são utilizados para identificar quais passos e parâmetros exercem maior influência nas distorções. Depois do planejamento estatístico do experimento, o próximo passo é o modelamento (simulação) do processo. Nesta etapa possíveis mecanismos da distorção são identificados. Finalmente, depois de identificados todos os parâmetros, variáveis do processo, fatores que alteram o “potencial de distorção” do material, são realizadas ações para compensar este “potencial de distorção”, minimizando-o.

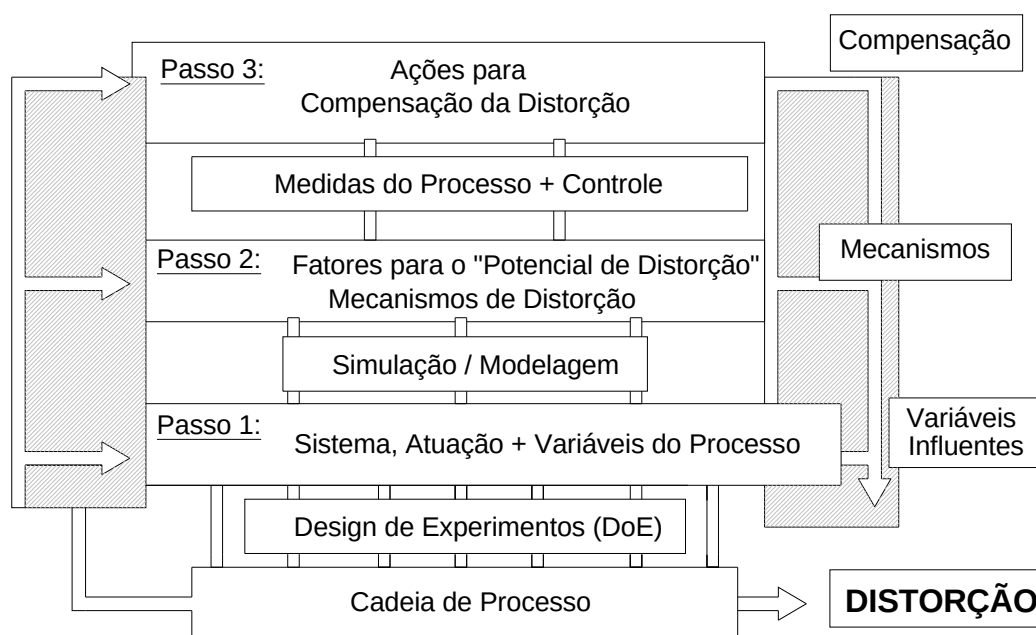


Figura 1 - Metodologia aplicada pelo SFB570 para investigação de distorções.⁽⁷⁾

Mais de 200 fatores que causam distorções já foram identificados, entretanto cinco fatores são os mais significativos: tensões residuais, geometria do componente, distribuição da microestrutura, distribuição dos elementos de liga e histórico mecânico.⁽⁹⁾ Atualmente, a importância da análise das distorções como uma propriedade do sistema tem ganhado forte atenção e começou a ser reconhecido como um caminho para a melhoria dos processos de manufatura.⁽⁵⁻⁷⁾ Estas distorções são tratadas como um atributo do sistema, e cada etapa do processo de fabricação geram um “potencial de distorção”.

Nesta linha, a Figura 2 mostra alguns fatores que afetam a capacidade do processo de tratamento térmico, em relação às distorções de forma, mais de 200 fatores já foram relacionados a distorções durante tratamentos térmicos, porém segundo Frerichs et al.⁽⁵⁾ e Zoch,⁽⁷⁾ os quatro principais fatores são: distribuição das tensões residuais; Geometria do componente; distribuição de fases e elementos de liga; histórico mecânico.

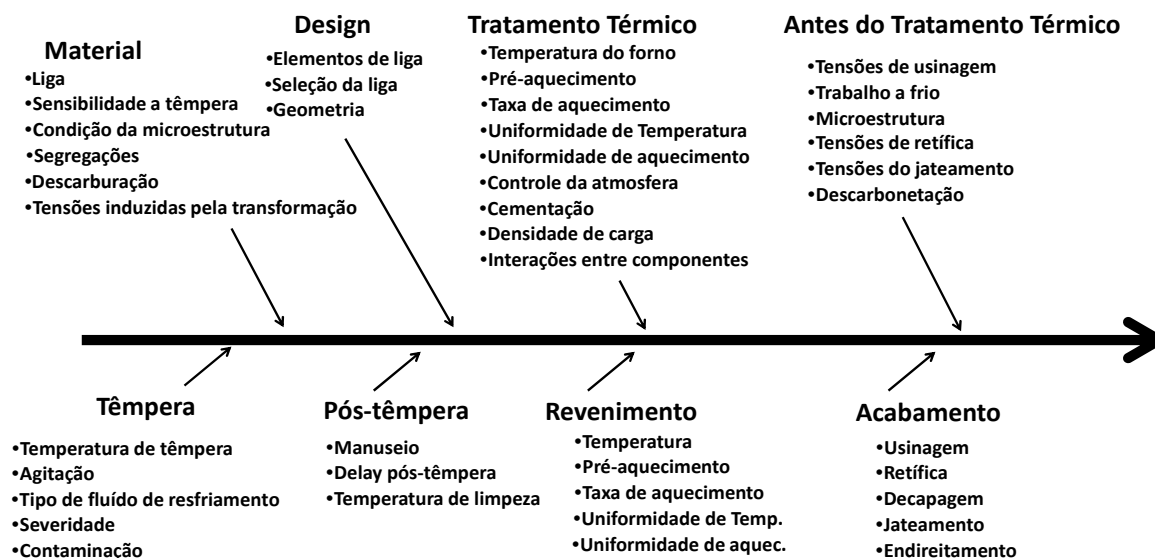


Figura 2 - Diagrama espinha de peixe das influências na distorção pré e pós tratamento térmico de componentes mecânicos durante uma rota de fabricação.⁽¹⁰⁾

2 PRINCIPAIS PORTADORES DE “POTENCIAL DE DISTORÇÃO”

No capítulo 2 são mostrados os quatro principais portadores de “potencial de distorção” em uma rota de fabricação de componentes mecânicos.

2.1 Tensões Residuais

As tensões residuais são o mais relevante e complexo mecanismo de distorção em tratamentos térmicos, pois qualquer outro mecanismo gerador de distorção acaba tendo como consequência a redistribuição de tensões residuais, que por sua vez, são causadoras das distorções.

Thoben et al.⁽¹¹⁾ concluíram que níveis significativos de tensões residuais são gerados nos processos de conformação a frio, pois as deformações plásticas ocorrem a temperaturas baixas com menores possibilidades de ocorrência de mecanismos de relaxação das tensões. Em especial, tensões residuais, podem gerar perda de matérias-primas ocasionadas por quebra de componentes durante tratamentos térmicos, em etapas posteriores do processo de fabricação ou ainda a quebra catastrófica do componente quando em serviço.

Tratamentos de aquecimento/têmpera parciais são responsáveis pelas mais significativas relaxações e gerações de tensões residuais. A relaxação de tensões residuais introduzidas por deformação a frio e usinagem irão resultar em uma alta deformação no componente após o tratamento de têmpera.⁽¹²⁾

Löhe, Lang e Vöhringer⁽¹³⁾ afirmam que estas tensões residuais podem ter uma grande influência sobre o comportamento mecânico das barras trefiladas. Em diversos estudos, verificou-se que a presença de tensões residuais tratativas na

superfície favorece a formação de trincas que podem reduzir a vida em fadiga dos componentes quando submetidos a diferentes carregamentos, ou ocasionar ruptura frágil e também corrosão sob tensão na presença de meios agressivos. Portanto, é necessário conhecer a distribuição e o nível das tensões residuais causados pelo processo de trefilação e a possibilidade de alterar e controlar estas tensões de forma a evitar efeitos negativos decorrentes. Também é necessário o conhecimento desta distribuição de tensões residuais nas etapas subsequentes de manufatura, entre elas, usinagem e tratamento térmico de endurecimento superficial (têmpera por indução).

2.1.1 Efeitos da distribuição de tensões residuais na distorção de componentes mecânicos durante o tratamento térmico

Sabe-se que as tensões residuais são uma das principais forças motrizes para o empenamento decorrente de tratamentos térmicos, porém pouco se sabe sobre a atuação e comportamento destas tensões residuais durante uma rota de fabricação. Em uma rota de fabricação há redistribuição de tensões residuais em todas as etapas do processo onde haja deformações plásticas não uniformes. Em geral, as redistribuições de tensões residuais provocam empenamentos, em maior ou menor escala.

Na Figura 3 são apresentados os perfis de tensões residuais para duas etapas do processo de fabricação de barras cilíndricas, (A) na etapa de pré-endireitamento e (B) na etapa de trefilação. Em (A) observa-se que as tensões residuais apresentam um comportamento heterogêneo comparando-se duas posições simétricas em relação ao centro, por exemplo, as posições -10 e 10 mm em relação ao centro da barra. Da mesma forma, em (B) observa-se que as tensões residuais também apresentam heterogeneidades após o processo de trefilação, este processo induz deformações plásticas na ordem de 12% no material, e isto não é capaz de causar uma redistribuição de tensões residuais de forma homogênea na barra, pois a influência das tensões residuais geradas na etapa anterior não são sobrepostas. Assim, este é um típico exemplo de um “potencial de distorção”. Este tipo de comportamento não é desejado em uma rota de fabricação, pois em alguma etapa do processo esse “potencial de distorção” será aliviado como forma de empenamento.

Em relação a distribuição de tensões residuais em um componente mecânico, caso se deseje uma redução de empenamentos e o componente seja simétrico, deve-se avaliar a distribuição de tensões residuais em posições simétricas deste, conforme o exemplo mostrado na Figura 3. A diferença na distribuição destas tensões residuais sempre deve ser mínima, mesmo que o componente apresente tensões residuais altas se a distribuição ao longo dele for homogênea, existe uma tendência menor de provocar empenamentos em etapas do processo onde há redistribuição de tensões residuais. Obviamente, níveis mais baixos de tensões residuais tendem a provocar menor empenamento, porém somente os níveis baixos de tensões residuais não é garantia para uma menor distorção.

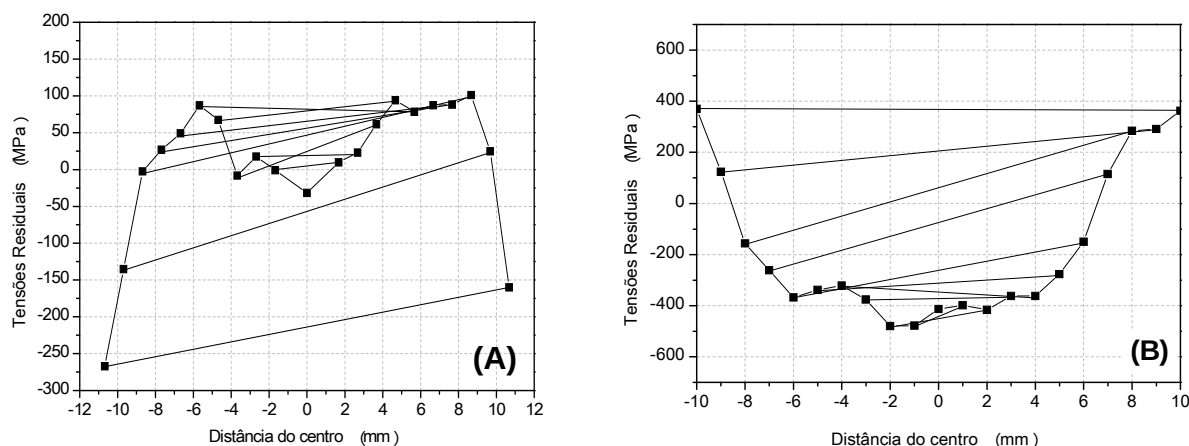


Figura 3 - Distribuição de tensões residuais em uma rota de fabricação de barras cilíndricas. (A) processo de Pré-endireitamento (B) processo de trefilação.⁽¹⁴⁾

2.2 Geometria do Componente

A geometria do componente atua como “portador de distorção”, pois a geometria está diretamente relacionada à distribuição de tensões residuais nas etapas de aquecimento e têmpera. Durante os processos de aquecimento e têmpera, existem gradientes térmicos em toda peça, estes gradientes térmicos ocorrem na superfície do componente em relação ao núcleo. Entretanto, devido à geometria do componente, muitas vezes existem gradientes térmicos ao longo da superfície do componente, geometrias mais complexas, tornam-se mais problemáticas durante o tratamento térmico devido a diferentes distribuições de temperatura durante o aquecimento/resfriamento do componente, entre outros fatores.

Em geral, geometria simples, tais como, cilindros, e anéis são mais vantajosos em relação a gradientes térmicos superficiais e consegue-se uma melhor homogeneidade de aquecimento/resfriamento. Porém, somente a forma geométrica do componente não é capaz de eliminar as distorções, como discutido anteriormente, a geometria é apenas um dos fatores que levam a distorção, o que muitas vezes não pode ser controlado de forma adequada.

2.3 Distribuição de Elementos de Liga e Zona de Segregação

Já foram observadas orientações preferenciais no que diz respeito à mudança de curvatura, após o tratamento térmico. Hunkel et al.⁽¹⁵⁾ concluíram que uma análise da distribuição da zona de segregação, caso haja desalinhamento, pode ser correlacionado com possíveis distorções. Por exemplo, utilizando um ataque químico e microscopia óptica a Figura 4(A) mostra a análise da zona de segregação e a sua distribuição ao longo da seção da transversal. Na Figura 4(B) é utilizado um software para fazer a análise de imagens e posterior determinação do centro da zona de segregação.

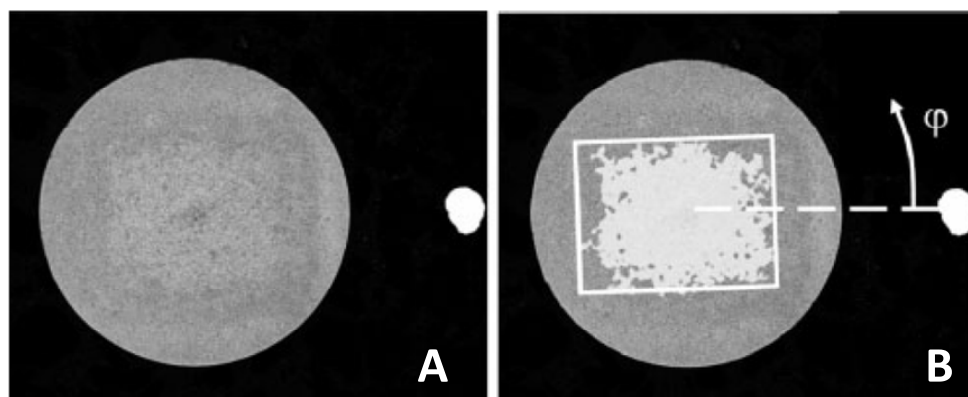


Figura 4 - (A) Micrografia da zona de segregação, (B) Análise do alinhamento da zona de segregação utilizando a técnica de análise por tons de cinza. Fonte: Prinz et al., (2009)

Na Figura 5 é mostrada uma análise metalográfica convencional do alinhamento da zona de segregação, a partir da determinação geométrica do centro do componente analisado é possível estimar o deslocamento do centro da zona de segregação.

Segundo Prinz et al.,⁽¹⁶⁾ o desalinhamento da zona de segregação em relação a linha central pode influenciar na taxa de resfriamento e também na temperatura da transformação martensítica ao longo da barra, o que pode ocasionar uma distorção.

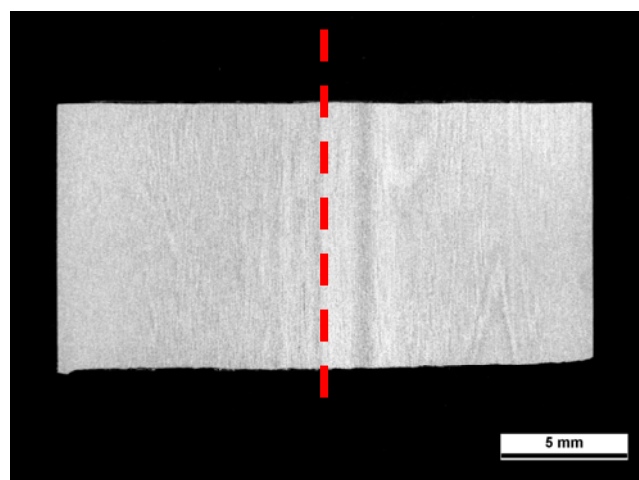


Figura 5 - Micrografia da zona de segregação, análise do centro da zona de segregação indicado pela linha pontilhada, ataque 50% de HCl.⁽¹⁴⁾

De acordo com Frerichs et al.⁽⁵⁾ sabe-se que o tratamento térmico também pode contribuir para distorção pela assimetria do aquecimento. Outro aspecto que pode levar as distorções de forma é a assimetria durante o processo de cementação, na Figura 6 é mostrado um componente cilíndrico cementado assimetricamente. O lado não cementado terá uma transformação de fase mais rápida se comparado com o lado cementado, e isto, irá provocar uma deflexão devido a diferenças volumétricas no material que resultará em uma distorção de forma.

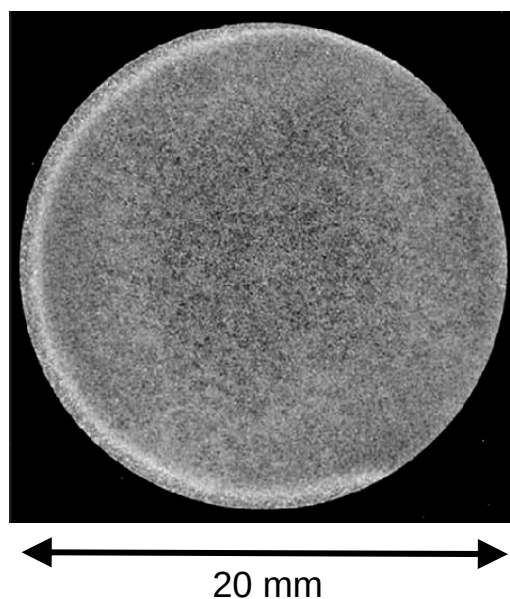


Figura 6 – Componente cilíndrico cementado assimetricamente, 940°C, 135 min.⁽⁴⁾

2.4 Histórico Mecânico

Em processos de manufatura que envolve deformações plásticas, tais como: trefilação, forjamento, estampagem e laminação, por exemplo, ocorrem diversas alterações na microestrutura do material e estas deformações, geralmente, induzem diferentes níveis de tensões residuais no material. O histórico mecânico tem uma ligação direta com as tensões residuais, e por isso, muitas vezes o estudo das deformações geradas no processo é uma etapa importante na avaliação de distorções em uma rota de fabricação.

Em geral, já foi mostrado⁽⁵⁾ que é possível controlar ou minimizar a distorção causada em tratamento térmicos alterando-se ângulos de ferramenta, e conseqüentemente mudando-se as deformações impostas no componente. A análise correta dos efeitos de ângulos de ferramenta e etapas no processo de deformação pode alterar de forma significativa o comportamento do componente frente a distorção.

O histórico mecânico pode ser estudado utilizando-se as ferramentas computacionais, com auxílio da simulação computacional e do método de elementos finitos, pode-se determinar de forma rápida e sem um custo elevado, os melhores parâmetros de ferramenta para se obter níveis e distribuições adequadas destas deformações. Em geral, quando se deseja obter um comportamento adequado frente aos problemas de distorção, a distribuição de deformações deve ser o mais homogênea possível ao longo de todo componente mecânico. Por isso, em geral, evita-se a utilização de ângulos muito agudos em ferramentas, pois em geral, estes ângulos induzem deformações plásticas muito localizadas, como conseqüência há a geração de tensões residuais elevadas em pontos localizados do componente mecânico. Frente as redistribuições de tensões residuais que ocorrem em processos de tratamento térmico e usinagem, por exemplo, haverá um alívio destes “potenciais de distorção” causando como conseqüência uma distorção indesejada.

4 SUMÁRIO

A partir de estudos realizados sabe-se que os problemas de distorção em componentes mecânicos são causados por diversos fatores e não somente o tratamento térmico. Em geral, o tratamento térmico é apenas um meio onde ocorre a distorção, pois é, em geral, a etapa onde ocorrem as maiores alterações e redistribuições de tensões residuais.

A solução de problemas de distorção causados em rotas de fabricação devem sempre ser tratados com uma análise global do processo. A prática mostrada até o presente momento indica que uma análise e implementação de melhorias na etapa de tratamento térmico não é suficiente para a correção definitiva do problema distorção.

Sabe-se também que a análise de problemas em tratamentos térmicos devem envolver grupos interdisciplinares para que seja analisada a rota de fabricação de maneira holística e não somente no método “caixa preta”.

Agradecimentos

Este trabalho é parte dos resultados da Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura – BRAGECRIM. Os autores agradecem a Capes, CNPq, FINEP e DFG pelo suporte financeiro para a realização deste projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 Rohde U, Jeppsson A. Literature review of heat treatment simulations with respect to phase transformation, residual stresses and distortion. Scand J Metall. 2000;29(2):47-62.
- 2 Totten GE. Steel heat treatment : metallurgy and technologies. 2nd ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis; 2007. 833 p.
- 3 Zoch HW. From single production step to entire process chain - the global approach of Distortion Engineering. Materialwiss Werkst. 2006;37(1):6-10.
- 4 Zoch HW. Distortion engineering: vision or ready to application? Materialwiss Werkst. 2009;40(5-6):342-8.
- 5 Frerichs F, Landek D, Lubben T, Hoffmann F, Zoch HW. Prediction of distortion of cylinders without phase transformations. Materialwiss Werkst. 2006;37(1):63-8.
- 6 Totten GE, ASM Heat Treating Society. Programming & Events Committee. Quenching and the control of distortion : proceedings of the 2nd International Conference on Quenching and the Control of Distortion, 4-7 November 1996, Cleveland Marriott Society Center, Cleveland, Ohio. Materials Park, OH: ASM International; 1996. xvi, 635 p. p.
- 7 Zoch HW. Distortion engineering - interim results after one decade research within the Collaborative Research Center. Materialwiss Werkst. 2012;43(1-2):9-15.
- 8 Kessler O, Irretier A, Pieper O, Dolatta G, Hoffmann F, Zoch HW. Distortion behaviour and mechanical properties of AlCu4Mg1 sheet components after high-pressure gas quenching in comparison to liquid quenching. Materialwiss Werkst. 2006;37(1):110-5.
- 9 Prinz C, Clausen B, Hoffmann F, Kohlmann R, Zoch HW. Metallurgical influence on distortion of the case-hardening steel 20MnCr5. Materialwiss Werkst. 2006;37(1):29-33.
- 10 MacKenzie, D.S., Ferguson, B.L., Li, Z., Effect of Quenching Variables on the Residual Stress and Distortion of a Heat Treated Disk. Proceedings of the 23rd ASM Heat Treating Society Conference, September 25–28, 2005 David L. Lawrence Convention Center, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, p232-238
- 11 Thoben KD, Klein D, Seifert M, Wuest T. Approaches to describe distortion along process chains Ansätze zur Verzugsbeschreibung entlang von Prozessketten. Materialwiss Werkst. 2012;43(1-2):178-85.

- 12 Grum J. A review of the influence of grinding conditions on resulting residual stresses after induction surface hardening and grinding. J Mater Process Tech. 2001;114(3):212-26.
- 13 Löhe, D., Lang, K. -H., & Vöhringer, O. (2002). Residual Stresses and Fatigue Behavior. In: G. Totten, M. Howes, & T. Inoue, Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel (pp. 27-53). Ohio: ASM International
- 14 Nunes R. M., Estudo de distorção de barras cilíndricas de aço ABNT 1045 em uma rota de fabricação envolvendo trefilação combinada e têmpera por indução. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2012. p220. Orient. Alexandre da Silva Rocha – PPGE – UFRGS, Co-orient. Thomas K. Hirsch – IWT – Bremen.
- 15 Hunkel M, Frerichs F, Prinz C, Surm H, Hoffmann F, Zoch HW. Size change due to anisotropic dilation behaviour of a low alloy SAE 5120 steel. Steel Res Int. 2007;78(1):45-51.
- 16 Prinz C, Hunkel M, Clausen B, Hoffmann F, Zoch HW. Characterization of segregations and microstructure and their influence on distortion of low alloy SAE 5120 steel. Materialwiss Werkst. 2009;40(5-6):368-73. Rocha, A. S., Nunes, R. M., Metz, M., & Hirsch, T. K. (2008). Analysis of the distortion potential in AISI 1048 steel bars induced by a combined drawing-straightening process. 2nd International Conference on Distortion Engineering, (pp. 13-20). Bremen.