

USO DE TÊMPERA DIRETA COMO PROCESSO ALTERNATIVO NA FABRICAÇÃO DE COMPONENTES AUTOMOTIVOS

Hevlin Cristina de Almeida Costa ¹
Alexandre Romão Costa Nascimento ²
Kleber Ricardo Rigoletto ³
Fabio Petrilli ⁴
Alexandre Arantes ⁵
Mauro Moraes de Souza ⁶

Resumo

Este trabalho tem como objetivo analisar a substituição do tratamento térmico de têmpera e revenido por têmpera direta na fabricação de arruela forjada de componente de segurança, visando a garantia e a manutenção das propriedades mecânicas a custos de fabricação competitivos. Para tal, foi utilizada ferramenta estatística para delinear as rotas de processamento, e realizados testes em escala industrial. O efeito das diferentes rotas de processamento no produto forjado foi estudado através de simulação pelo método de elementos finitos e da análise metalúrgica do produto. Os resultados obtidos demonstraram que a têmpera direta é viável tecnicamente, com vantagens econômicas, uma vez assegurado o controle dos parâmetros de processo utilizados.

Palavras-chave: Têmpera direta; Forjamento a quente; Resfriamento controlado.

USE OF DIRECT QUENCHING AS AN ALTERNATIVE IN AUTOMOTIVE COMPONENTS MANUFACTURING

Abstract

This work has the aim to evaluate the replacement of quenching and hardening thermal treatment by direct quenching of forged safety washer component, to ensure and to maintain the mechanical properties of the products associated with competitive manufacturing costs. Supporting that, a statistical tool was used to delineate the processing routes, and forging tests were conducted at industrial scale. The effect of the different processing routes on the forged product was investigated through Finite Element Method and metallurgical analysis of the final product. The results showed the viability of the direct quenching with technical and economical advantages, once the control of the process parameters are guaranteed.

Keywords: Direct quenching; Hot forging; Controlled cooling.

¹Engenheira de Materiais, Engenheira de Processos Júnior, Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda., Jundiaí, SP, Brasil.

E-mail: hevlin.costa@amtektekfor.com

²Engenheiro de Materiais, Mestrando, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, SP, Brasil. E-mail: aromaocn@gmail.com

³Engenheiro Mecânico, Engenheiro de Processo Pleno, Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda., Jundiaí, SP, Brasil.

E-mail: kleber.rigoletto@amtektekfor.com

⁴Engenheiro Metalúrgico, Supervisor de Laboratório, Neumayer Tekfor Brasil Ltda., Jundiaí, SP, Brasil. E-mail: fabio.petrilli@amtektekfor.com

⁵Tecnólogo em Processos de Produção, Coordenador de forjaria e extrusão, Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda., Jundiaí, SP, Brasil.

E-mail: alexandre.arantes@amtektekfor.com

⁶Dr.-Ing., Mestre em Ciências, MBA, Engenheiro Metalúrgico, Diretor de Engenharia, Pesquisa e Desenvolvimento, Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda., Jundiaí, SP, Brasil. E-mail: mauro.souza@amtektekfor.com

I INTRODU O

Na indústria automobilística, a utiliza o de tratamentos térmicos após o forjamento a quente constitui uma importante etapa de fabrica o. O crescente aumento da demanda aliado   grande competitividade do setor torna estes processos chave na defini o dos custos de fabrica o e, conseqüentemente, no valor de venda dos produtos. Assim, o estudo de rotas de processo alternativas aos tratamentos térmicos que promovam a redu o de gastos energéticos e *lead time*, mantendo a qualidade do produto final,   essencial para a manuten o da competitividade das empresas nos seus setores de atua o [1].

Um tratamento térmico amplamente utilizado para a fabrica o de componentes automotivos   a têmpera e revenimento. A têmpera consiste na austenitiza o do material seguida do resfriamento rápido abaixo da temperatura de transforma o martensítica. A alta resistência mecânica e tenacidade resultante dos materiais com microestrutura martensítica revenida torna estes a os interessantes para o uso na indústria automobilística [2]. Entretanto, o tratamento térmico demanda um alto gasto energético e, no caso das arruelas forjadas no presente trabalho, corresponde a uma parcela de cerca de 15% nos custos de fabrica o.

O correto controle do resfriamento dos produtos conformados a quente, com o aproveitamento do calor proveniente da conforma o para promover as transforma es de fase desejadas, traz como vantagens a elimina o de etapas de processamento e redu o dos gastos energéticos. Trabalhos anteriores [3] mostraram que, com o auxílio de esteiras rolantes e caixas térmicas,   possível obter diversas microestruturas diretamente após o forjamento a quente, permitindo assim a elimina o de uma etapa de tratamento térmico.

A rota de processamento em estudo no presente trabalho   a têmpera direta, a qual consiste no controle do resfriamento do material, após o forjamento a quente, para a obten o de microestrutura martensítica, sem a necessidade de reaustenitiza o. Este processo traz como vantagens a redu o do *lead time* e da energia dispendida com a austenitiza o do material quando da utiliza o da têmpera convencional [4]. No tratamento de têmpera e revenimento, a composi o e tamanho de grão da austenita, a qual desempenha importante papel na determina o das propriedades finais da martensita, são controlados pela temperatura de austenitiza o. No caso da têmpera direta, o controle do tamanho de grão austenítico dependerá do grau de recristaliza o da estrutura, que por sua vez   influenciado pelo grau de deforma o e temperatura de forjamento [5,6].

A defini o das taxas de resfriamento   feita através da análise das curvas de resfriamento, como diagramas de transforma o em resfriamento contínuo (TRC), as quais determinam as microestruturas formadas de acordo com a temperatura e a taxa de resfriamento do material [7].

No caso do forjamento a quente, existem diversos fatores que influenciam nas taxas de resfriamento, como a refrigera o das ferramentas, taxa de deforma o, cadência do processo e o meio de resfriamento após a conforma o. Estes, dentre outros parâmetros intr secos ao processo, são de difícil controle e muitas vezes não há informa es precisas sobre o seu impacto na microestrutura do material. Ademais, o acesso às curvas TRC de certos a os   muitas vezes limitado ou inexistente, criando um elevado grau de empirismo no desenvolvimento destes processos e dificultando a sua aplica o industrial. Por conseqüência,   necessário estabelecer uma metodologia de ensaios para definir os parâmetros de resfriamento a serem utilizados para atingir a taxa de resfriamento determinada pelo diagrama TRC para a microestrutura desejada.

O presente trabalho visa analisar a utiliza o da têmpera direta p s-forjamento a quente para a obten o de microestrutura martensítica em substitui o aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento com o auxílio de ferramentas de planejamento de experimentos e simula o por elementos finitos para delinear as condi es do processo e analisar a influência das variáveis na microestrutura resultante do processo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF)   usado em técnicas computacionais e consiste em subdividir um problema cuja soluço analítica   geralmente impraticável, em numerosos problemas mais simples, que devem ser combinados e então resolvidos. Esta divisão   comparada   forma o de uma malha de elementos na qual cada retângulo representa uma pequena porão do material e cada interse o de arestas caracteriza um não, determinando um ponto no espaço. Quanto maior   o número de elementos gerados, ou em outras palavras, quanto mais refinada for a malha criada, maior será a tendência em obter resultados precisos [8].

Tabela 1. Equa es das cinéticas de transforma es microestruturais usadas para a simula o por MEF do forjamento a quente da arruela forjada

Recristaliza�o Dinâmica [9]
$X_{DRX} = 1 - \exp \left[-5,986 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0,5}} \right)^2 \right]$
$\epsilon_{0,5} = 5,048 \cdot 10^{-3} \cdot d_0^{0,4772} \cdot \dot{\epsilon}^{0,1258} \cdot \exp \left(\frac{26128}{RT} \right)$
$d_{DRX} = 13,41 \cdot d_0 \cdot \epsilon^{0,16} \cdot \dot{\epsilon}^{-0,23} \cdot \exp \left(\frac{-42327,5}{RT} \right)$

Para a realização das simulações pelo MEF foi utilizado o software DEFORM – 3D™ empregando-se as condições de processo descritas posteriormente na seção 2.3.

Valendo-se de técnicas de regressão linear, as cinéticas das transformações microestruturais de recristalização dinâmica foram ajustadas ao modelo usado pelo programa. A Tabela 1 apresenta as equações usadas e as respectivas referências. O TGA inicial (D_0) foi considerado 100 μm para todas as temperaturas.

2.2 DOE

Como descrito pelo NIST [10], o *Design of Experiments* (DOE) é uma abordagem para a solução de problemas de engenharia que aplica princípios e técnicas estatísticas na etapa de coleta de dados, garantindo que sejam geradas conclusões válidas e confiáveis utilizando o mínimo de recursos, tempo e número de testes possíveis. Esta abordagem permite eficiência e economia no processo experimental, e o uso de métodos estatísticos na análise dos dados obtidos resulta em objetividade científica nas conclusões.

O experimento foi desenhado de forma a isolar fatores importantes para a têmpera direta e provocar a variação dos extremos, em um experimento fatorial de dois fatores e dois níveis. Os fatores de influência considerados foram: a temperatura de forjamento, variada em dois níveis (T_1 e T_3) e um ponto central (T_2), sendo que $T_3 > T_2 > T_1$; e a ventilação forçada, variável discreta e considerada como ligada (L) ou desligada (D). Considerando uma confiabilidade de 95% ($\alpha = 0,05$) e 80% de poder, foram necessárias quatro réplicas para cada nível de variável e duas réplicas para o ponto central. Como se trata de um experimento em âmbito industrial, foi necessário verificar se o turno de fabricação influencia nos resultados obtidos, e desta forma realizou-se o experimento com blocagem. A Tabela 2 apresenta o planejamento do experimento para o bloco 1, que corresponde ao primeiro turno de fabricação, e a Tabela 3 apresenta o bloco 2, refe-

rente ao segundo turno de fabricação. O dado de saída do experimento foi considerado a quantidade de martensita na microestrutura do material. O software Minitab® foi utilizado para o planejamento e análises estatísticas.

Os resultados obtidos foram analisados através de diagramas de Pareto e *normal plot* dos efeitos, para observar a magnitude e significância estatística dos efeitos principais e interações. A análise dos resíduos foi realizada com o auxílio de gráficos de probabilidade normal e resíduos *versus* valores ajustados. Também foram observados os dados de p-valor e R^2 calculados pelo programa Minitab®.

2.3 Processo

Para o estudo, utilizou-se o aço DIN 42CrMo4, cuja composição química nominal é apresentada na Tabela 4.

As peças foram conformadas a quente por forjamento de precisão em matriz fechada, em uma prensa horizontal da marca Hatebur® localizada na planta da Neumayer Tekfor Automotive do Brasil Ltda. em Jundiá. O processo consiste no aquecimento da barra em três temperaturas distintas de forjamento através de fornos de indução acoplados à máquina. Em seguida, esta é cortada e conformada, em uma geometria próxima à final e sem rebarbas.

O resfriamento controlado consistiu na permanência das peças, após o forjamento, em uma esteira de resfriamento com tempo pré-definido, sendo estas submetidas ou não a ventilação forçada, com o objetivo de simular uma taxa de resfriamento tal que seja possível o atendimento da microestrutura desejada dentro da curva TRC do aço utilizado.

2.4 Caracterização

O material conformado foi caracterizado por metalografia para a análise das fases presentes no produto e do tamanho de grão austenítico das peças após o forjamento.

Para a preparação metalográfica, as amostras foram lixadas e o polimento foi realizado em suspensão

Tabela 2. Fatores de influência e ordem dos experimentos obtida pelo DOE. Turno (bloco) 1

Ordem Experimento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T. Forj.	T_2	T_1	T_3	T_1	T_3	T_1	T_3	T_2	T_1	T_3
Ventilação	L	L	L	L	D	D	D	D	D	L

Tabela 3. Fatores de influência e ordem dos experimentos obtida pelo DOE. Turno (bloco) 2

Ordem Experimento	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T. Forj.	T_2	T_3	T_3	T_1	T_2	T_3	T_1	T_1	T_1	T_3
Ventilação	D	L	D	L	L	D	D	D	L	L

Tabela 4. Composição Química nominal do aço DIN 42CrMo4

Elemento Químico	C	Mn	Si	Mo	P	S	Cr
(%)	0,410	0,750	0,350	0,200	0,035	0,035	1,050

de diamante 3 μm por 10 min. As análises objetivando a revela o das fases presentes foram feitas nas amostras após o processamento, com ataque com Nital 3% por 5 s. Para a medi o do tamanho de grão austenítico, foram utilizadas amostras temperadas em água diretamente na saída do forjamento. Estas amostras foram submetidas   imersão em ácido pícrico saturado aquecido a 80 C (13 g para 1.000 mL de água destilada e 5 mL de detergente comum) por um período de cinco a sete minutos.

A análise do teor de martensita presente nas amostras atacadas com Nital foi realizada por meio de metalografia quantitativa manual, pelo método da fra o pontual (Pp), descrito por Underwood [11]. Neste método, a fra o da fase de interesse consiste na rela o entre os pontos incidentes e o número total de pontos em uma grade sobreposta   imagem da microestrutura. No presente estudo foi utilizada uma grade de 250 pontos.

3 RESULTADOS

3.1 Método dos Elementos Finitos

A análise por MEF indicou que ao final do forjamento, em praticamente toda a peça, ocorre deforma o suficiente para recristaliza o dinâmica como mostra a Figura 1. Vale ressaltar que a geometria simulada não

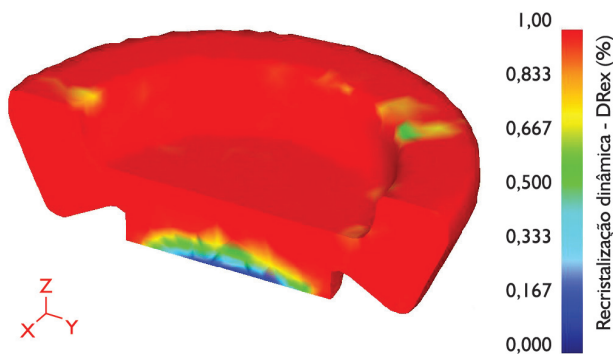


Figura 1. Fra o de grãos austeníticos recristalizados ao final do forjamento.

corresponde ao produto final, e sim uma pr -forma, pois há uma opera o de furo que irá retirar todo o material presente na porão central da peça.

A Figura 2 mostra os tamanhos médios de grãos ao final do forjamento, os quais se mostraram refinados, o que condiz com a análise da fra o recristalizada. Também   possível observar que a temperatura de forjamento não interfere de forma significativa no tamanho de grão recristalizado.

Com rela o às análises metalográficas de tamanho de grão, o ataque por picral não foi efetivo na revela o dos contornos de grão austeníticos, devido   composi o química do aço, que cont m teor apreciável de cromo, e outras técnicas de ataque são recomendadas para estes casos, que não apresentaram viabilidade para a realiza o.

Por análise no microscópio, foi possível observar o TGA apenas para as temperaturas T_1 e T_2 e verificou-se que o TGA do material antes do forjamento varia entre 50 μm e 80 μm , e entre 10 μm e 20 μm após o forjamento para ambas as temperaturas, comprovando o refino microestrutural decorrente da recristaliza o e uma constância no tamanho de grão austenítico recristalizado para as temperaturas analisadas.

3.2 Resfriamento Controlado

Foram observadas as microestruturas resultantes das peças processadas em cada condi o de processo, mostradas nas Figuras 3 e 4. Como o foco do presente trabalho   a substitui o da têmpera e revenimento pelo resfriamento controlado, foi priorizada a identifica o e quantifica o da fase martensita (%M).

Os resultados mostram que há influência tanto da temperatura de forjamento quanto da taxa de resfriamento. Houve grande heterogeneidade microestrutural no material resfriado com e sem ventila o ligada, como mostram as Figuras 3 e 4, pois em uma mesma amostra   possível identificar presença de ferrita, perlita e produtos de transforma o como martensita e bainita. Entretanto, a heterogeneidade apresenta-se em menor grau na temperatura T_3 , como mostrado na Figura 4c.

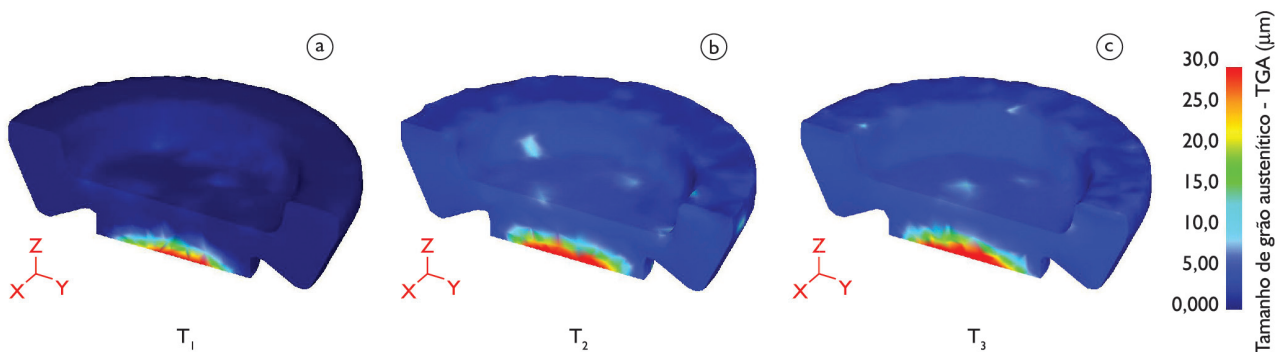


Figura 2. Efeito da temperatura de forjamento no tamanho de grão austenítico (em μm) recristalizado.

Nesta análise, considera-se que teores de martensita acima de 85% equivalem ao obtido pelo tratamento térmico e a situação que mais se aproxima deste resultado é o forjamento na temperatura T_3 com ventilação ligada.

3.3 DOE

Os resultados da quantificação de martensita nas amostras foram inseridos no software Minitab® e gerados tabelas de efeitos, gráficos de análises dos efeitos e distribuição dos resíduos. A Tabela 5, de efeitos calculada pelo Minitab®, contém os p-valores encontrados para todos os termos, sendo que, para um termo ser significativo, é necessário $p\text{-valor} < \alpha$.

Ao nível α , conclui-se que a presença do bloco não é significativa, pois $0,578 > \alpha$, ou seja, o turno de fabricação não influencia o resultado do processo.

Desta forma, o modelo foi reajustado excluindo-se o bloco, gerando o diagrama de Pareto e o *Normal Plot* mostrados na Figura 5.

O diagrama de Pareto, mostrado na Figura 5a, e o *Normal Plot* (Figura 5b), foram utilizados para analisar a magnitude e significância estatística dos termos princi-

pais A (temperatura de forjamento), B (ventilação) e da interação entre ambos (AB). Os gráficos mostram que os efeitos A, B e AB têm um impacto significativo no teor de martensita presente no material após o processo, sendo que a significância do fator temperatura é a de maior magnitude.

Para verificar a validade do modelo, foram utilizados os gráficos de resíduos mostrados na Figura 6. Os resíduos seguem uma distribuição normal, como mostrado na Figura 6a, e confirmado pelo p-valor calculado, $0,090 > \alpha$. O gráfico de resíduos versus valores ajustados, mostrado na Figura 6b mostra um padrão aleatório e sem *outliers*, com variância constante ao longo de todos os valores ajustados, validando a análise.

O valor de R^2 calculado pelo software e presente na tabela de efeitos foi de 98,53%, que corresponde à porcentagem da microestrutura obtida que tem relação com a temperatura de forjamento e a ventilação do meio de resfriamento.

Com os resultados obtidos, foram utilizados gráficos fatoriais para a visualização dos resultados. A Figura 7 mostra o gráfico de interação para os níveis dos fatores estudados.

Observou-se que, mantendo uma mesma condição de resfriamento, a temperatura é determinante no teor de martensita presente no material. O efeito da ventilação é mais evidente a temperaturas maiores como T_3 , na qual há um aumento de cerca de 30% no teor de martensita

Tabela 5. P-valores calculados para os termos considerados. $\alpha = 0,05$

Termo	A	B	AB	Bloco
P-valor	0,000	0,000	0,000	0,578

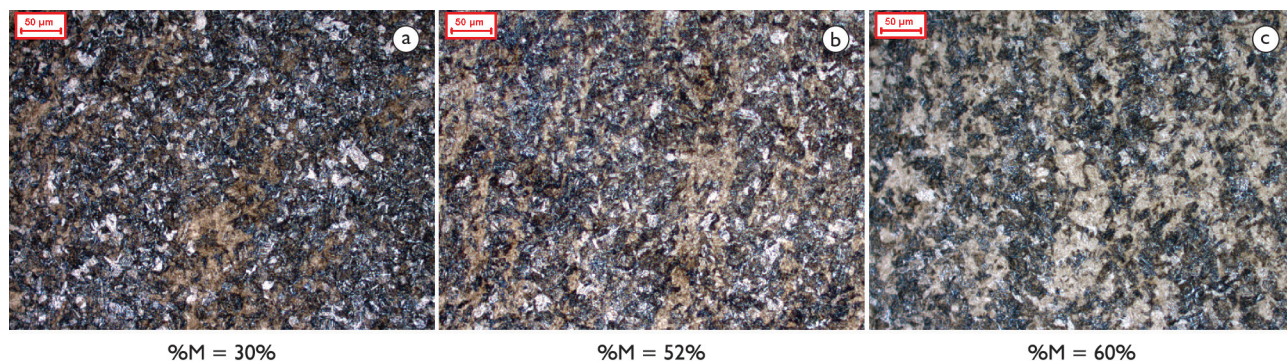


Figura 3. Micrografia das peças forjadas nas temperaturas (a) T_1 , (b) T_2 ; (c) T_3 . Ventilação desligada.

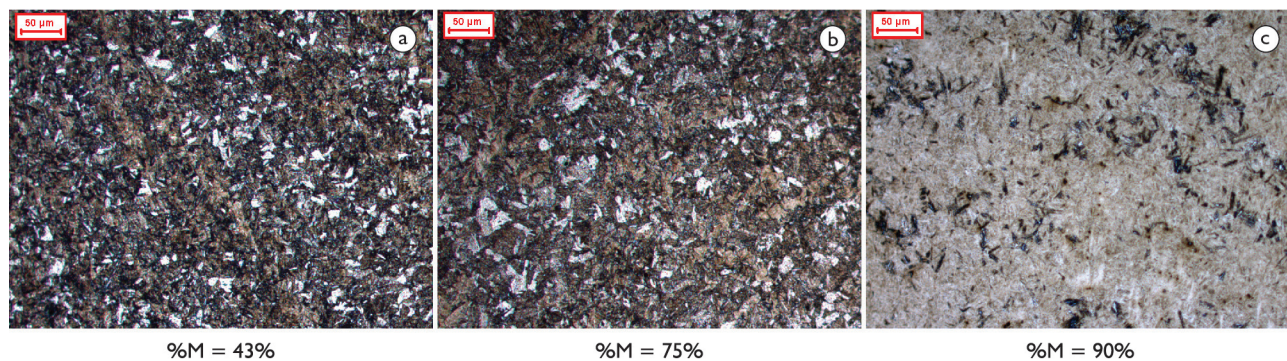


Figura 4. Micrografia das peças forjadas nas temperaturas (a) T_1 , (b) T_2 ; (c) T_3 . Ventilação ligada.

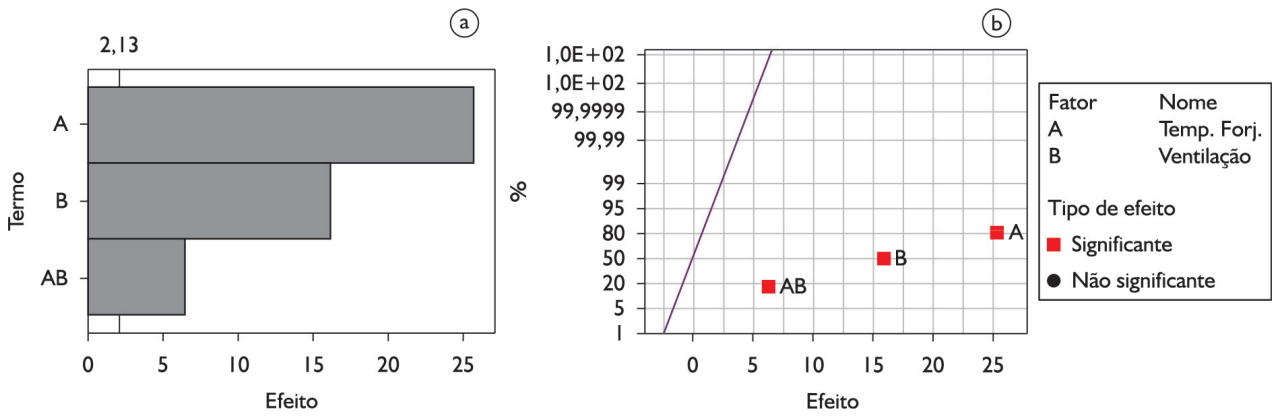


Figura 5. Análise dos efeitos. (a) Diagrama de Pareto dos efeitos A, B e AB. (b) Normal Plot dos efeitos. Alfa = 0,05.

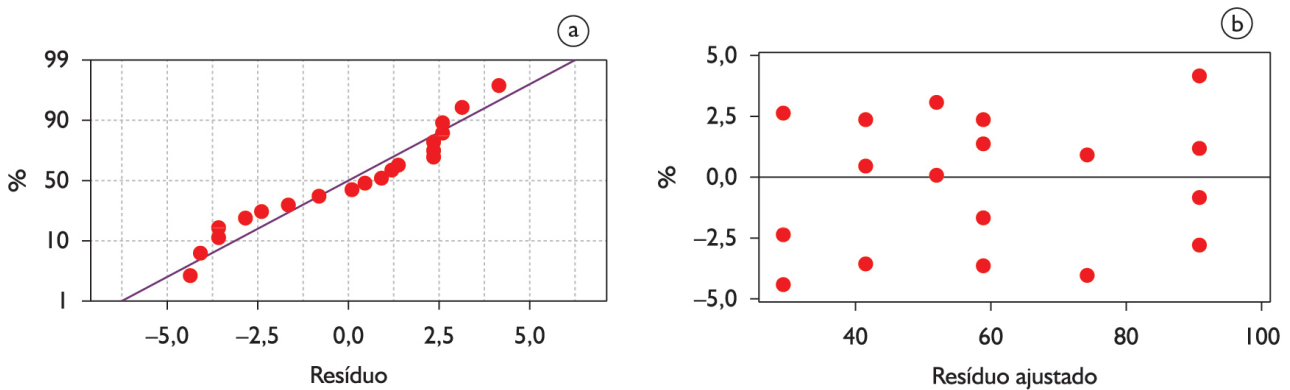


Figura 6. Análise dos resíduos. (a) Probabilidade Normal dos resíduos; (b) Resíduos versus valores ajustados.

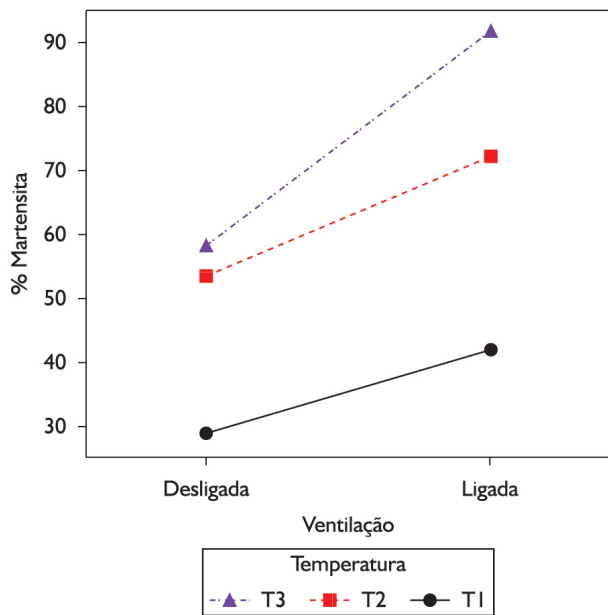


Figura 7. Gráfico de intera o. A resposta foi considerada a % de martensita nas amostras.

quando   utilizada a ventila o forçada e corresponde   melhor situa o analisada.

4 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos mostraram que   possível a obten o de microestrutura martensítica por meio de têmpera direta ao ar após o forjamento a quente, contanto que os parâmetros de aquecimento e resfriamento do material sejam controlados.

A análise por MEF foi utilizada para observar os efeitos da conforma o mecânica na cinética de recristaliza o do material. A utiliza o de ferramentas de simula o   importante nestes casos em que o conhecimento do comportamento do material durante o processamento   um ponto chave no seu desenvolvimento. A simula o permitiu observar que ao final do processo ocorre recristaliza o dinâmica em toda a parte útil do tarugo. Com este resultado, considerou-se que o tamanho de grão do material após o processo será proveniente da recristaliza o dinâmica e crescimento de gr os, e portanto

a recristalização estática não foi considerada nas simulações. Os tamanhos médios de grão simulados ao final do processo mostraram-se refinados, embora nenhuma das análises metalográficas tenha indicado tamanhos de grãos sub-micrométricos. A discrepância dos resultados entre simulação por MEF e realidade pode ser explicada pela ocorrência de crescimento de grãos, não considerada nas simulações no presente trabalho, fenômeno que ocorre com maior intensidade quando a estrutura inicial é muito refinada, já que a força motriz deste processo é a redução da energia interfacial decorrente da existência dos contornos de grãos. Souza Filho, Souza e Button [5] aplicam um modelo de crescimento de grãos de um aço C – Mn em uma peça forjada a quente. O resultado foi um aumento da faixa de 15,0 μm a 20,0 μm para 80,0 μm , valor muito próximo daquele obtido em observações metalográficas. Outro fator a ser considerado é o D_0 utilizado nas simulações, que além de não ser o valor real medido, considera o mesmo valor para todas as análises, entretanto na realidade este valor pode ser diferente de acordo com a temperatura.

As análises metalográficas qualitativas e quantitativas comprovaram que a temperabilidade do material é dependente da temperatura de aquecimento e da taxa de resfriamento, como previsto pela literatura [1,2]. No caso da temperatura de forjamento, o aumento crescente do teor de martensita, para uma mesma taxa de resfriamento, pode ser justificado pelo fenômeno de crescimento do grão austenítico, cuja cinética é fortemente influenciada pela temperatura e pelo grau de recristalização ao final do processo. Comparando o teor de martensita encontrado para iguais temperaturas de forjamento, observou-se que o resfriamento sob ventilação forçada corresponde à melhor situação, pois aumenta a severidade do meio de resfriamento e, conseqüentemente, favorece a transformação martensítica em detrimento de outras transformações, como perlítica e bainítica.

Nürnberg *et al.* [12] estudaram a influência da deformação no diagrama TRC dos aços 34CrMo4, 42CrMo4, 52CrMo4, 51CrV4 e 34 NiMo6, simulando o resfriamento do material após o forjamento a quente. Os diagramas obtidos mostraram que há influência da deformação no posicionamento das curvas, e, portanto os diagramas encontrados na literatura podem divergir da situação real do material. Assim, o DOE foi útil para a validação do diagrama TRC do aço, fornecendo informações sobre a influência dos parâmetros de resfriamento em um material conformado.

Foi possível comprovar que, dada uma taxa de resfriamento, a qual normalmente é limitada a um máximo na prática industrial, a temperatura é um fator determinante na obtenção da microestrutura desejada. Este resultado vai de encontro com diversas questões práticas existentes no meio industrial, pois o forjamento a temperaturas altas resulta em perdas na qualidade superficial do forjado e redução na vida útil das matrizes. A prática comum consiste na determinação de uma temperatura de forjamento intermediária que equilibre estes fatores com o esforço do equipamento, entretanto com o desenvolvimento dos processos de resfriamento controlado, é necessário que sejam levadas em consideração as novas exigências que serão impostas ao processo. Se por um lado há uma limitação física, como quebra constante de ferramentas e pior qualidade superficial, por outro há a exigência de uma determinada microestrutura, sem a qual não é possível a aprovação do produto pelo cliente. Para resolver esta questão, são necessários dados qualitativos e quantitativos que permitam definir uma receita ao processo. No presente trabalho, fica claro que, mesmo com ventilação forçada, não é possível a obtenção de uma microestrutura com teor de martensita equiparável ao dos tratamentos térmicos a temperaturas abaixo de T_3 .

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho, foi analisado o uso de têmpera direta para a obtenção de microestrutura martensítica com o auxílio de ferramentas de planejamento de experimentos e simulação por elementos finitos. Foi possível concluir que a têmpera direta é um processo viável industrialmente com resultados promissores para a sua utilização em larga escala. Esta, porém, depende do conhecimento adquirido acerca do comportamento do material durante a conformação, que pode ser auxiliado satisfatoriamente por FEM. Os resultados obtidos mostraram que o processo pode ser delineado e validado pelo DOE, com o fornecimento de dados quantitativos que auxiliam no conhecimento do grau de influência das variáveis no resultado final, informações essenciais para o desenvolvimento de um processo industrial.

Agradecimentos

Este trabalho é apoiado pela empresa Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda.

REFERÊNCIAS

- 1 Bhadeshia HKDH. Bainite in steels: transformation, microstructure and properties. 2nd ed. London: The Institute of Materials, University of Cambridge; 2001.
- 2 Chiaverini V. Aços e ferros fundidos. 7. ed. São Paulo: ABM; 1996.
- 3 Costa HCA, Petrilli F, Souza MM. O resfriamento controlado como alternativa para a obtenção de microestrutura bainítica a partir do forjamento a quente. In: Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais; 4-8 nov. 2012; Joinville, Brasil. CBECiMat; 2012.
- 4 Oliveira CAS, Schmitz E. Efeito da têmpera direta e convencional na microestrutura e propriedades mecânicas de garras para a recuperação de sapatas em aço 15B30. COBEF; 2007 [acesso em 27 fev. 2013]. Disponível em: <http://www.grima.ufsc.br/cobef4/files/032005325.pdf>.
- 5 Souza Filho V, Souza MM, Button ST. Estudo numérico e experimental do comportamento do tamanho de grão do material DIN 16MnCr5 MOD conformado a quente. In: Anais do 26º Seminário Nacional de Forjamento; 2006; Porto Alegre, Brasil. Porto Alegre: UFRGS; 2006. v. 1, p. 171-186.
- 6 Karhausen K, Kopp R, Souza MM. Numerical simulation method for designing thermomechanical treatments, illustrated by bar rolling. Scandinavian Journal of Metallurgy. 1991;40:1-13.
- 7 Rose A. Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle. v. 2. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH; 1972.
- 8 SFTC Corporation. Elementary Concepts in Metal Forming and Finite Element Analysis. Deform 3D - User's Manual. 2007. cap. 5, p. 225-236.
- 9 Lin YC, Chen MS, Zhong J. Numerical simulation for stress/strain distribution and microstructural evolution in 42CrMo steel during hot upsetting process. Computational Materials Science. 2008;43(4):1117-22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.03.010>
- 10 National Institute of Standards and Technology - NIST/SEMATECH. E-Handbook of Statistical Methods. 2012 [acesso em 5 mar. 2013]. Disponível em: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmd/section3/pmd31.htm>.
- 11 Underwood E. Quantitative stereology. London: Addison Wesley Publishing; 1970.
- 12 Nürnberger F, Grydubm O, Schaper M, Bach F, Koczurkiewicz B, Milenin A. Microstructure transformations in tempering steels during continuous cooling from hot forging temperatures. Steel Research International. 2010;81(3):224-233. <http://dx.doi.org/10.1002/srin.200900132>

Recebido em: 21/11/2013

Aceito em: 25/02/2014