

USO DA TÊMPERA DIRETA COMO DIFERENCIAL COMPETITIVO NA FABRICAÇÃO DE COMPONENTES AUTOMOTIVOS¹

Hevlin Cristina de Almeida Costa²

Alexandre Romão Costa Nascimento³

Kleber Ricardo Rigoletto⁴

Fabio Petrilli⁵

Alexandre Arantes⁶

Mauro Moraes de Souza⁷

Resumo

No mundo moderno, o crescente aumento da competitividade entre empresas requer a busca contínua por processos alternativos que reduzam custos e *lead time* e garantam a longevidade das organizações. Na fabricação de componentes automotivos forjados a quente com posterior etapa de tratamento térmico, o estudo de rotas alternativas de fabricação, com eliminação de etapas de processamento, é de grande interesse. Este trabalho exemplifica tal fato pela substituição do tratamento térmico de têmpera e revenido por têmpera direta na fabricação de arruela de componente de segurança forjada com o aço 42CrMo4, visando a garantia e a manutenção das propriedades mecânicas a custos de fabricação competitivos. Para tal, foi utilizada a ferramenta estatística DOE (*Design of Experiments*) para delinear as diversas rotas de processamento e seus parâmetros de influência, como temperatura e meio de resfriamento, e realizados testes de forjamento em escala industrial. O efeito das diferentes rotas de processamento nas características metalúrgicas do produto forjado foi estudado através de simulação pelo método de elementos finitos e da análise metalúrgica do produto final. Os resultados obtidos demonstraram que é possível a têmpera direta com vantagens técnico-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 A COMPETITIVE DIFERENTIAL IN AUTOMOTIVE COMPONENTS MANUFACTURING

Abstract

In the modern world, the increasing competitiveness between companies requires a continuous search for alternative processes to reduce costs and lead time and to ensure the longevity of those organizations. When manufacturing automotive components by hot forging with subsequent thermal treatment process, the study of alternative processing routes, with elimination of processing steps, is of great interest. This work exemplifies this fact by replacing the quenching and hardening thermal treatment by direct quenching of safety washer component forged with 42CrMo4 steel, to ensure and to maintain the mechanical properties of the products associated with competitive manufacturing costs. Supporting that, a DOE (Design of Experiments) statistical tool was used to delineate the different processing routes and their influencing parameters, such as temperature and cooling medium, and forging tests were conducted at industrial scale. The effect of the different processing routes on the metallurgical characteristics of the forged product was investigated through FEM (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.

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

² Engenheira de materiais. Engenheira de processos júnior. Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda. Jundiaí, SP, Brasil.

³ Engenheiro de materiais. Mestrando em Ciência e Engenharia de Materiais pelo PPGCEM-UFSCar, São Carlos, SP, Brasil.

⁴ Engenheiro mecânico. Engenheiro de processo pleno. Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda. Jundiaí, São Paulo, Brasil.

⁵ Engenheiro metalúrgico. Gerente de engenharia de processo. Neumayer Tekfor Brasil Ltda. Jundiaí, SP, Brasil.

⁶ Tecnólogo em processos de produção. Coordenador de forjaria e extrusão da Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda. Jundiaí, SP, Brasil.

⁷ Engenheiro metalurgista. Diretor de engenharia, pesquisa e desenvolvimento. Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda. Jundiaí, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Na indústria automobilística, a utilização de tratamentos térmicos após o forjamento a quente constitui uma importante etapa de fabricação. O crescente aumento da demanda aliado à grande competitividade do setor torna estes processos chave na definição dos custos de fabricação e, conseqüentemente, no valor de venda dos produtos. Assim, o estudo de rotas de processo alternativas aos tratamentos térmicos que promovam a redução de gastos energéticos e *lead time*, mantendo a qualidade do produto final, é essencial para a manutenção da competitividade das empresas nos seus setores de atuação.⁽¹⁾

Um tratamento térmico amplamente utilizado para a fabricação de componentes automotivos é a têmpera e revenimento. A têmpera consiste na austenitização do material seguida do resfriamento rápido abaixo da temperatura de transformação martensítica. Este resfriamento rápido promove a formação de uma microestrutura composta por martensita bruta, a qual possui alta dureza, porém em detrimento da ductilidade, pois há um alto grau de tensões internas armazenadas no material. Devido a isso, faz-se necessário o uso de revenimento, que consiste no reaquecimento abaixo da temperatura de transformação austenítica, esferoidizando as agulhas de cementita e melhorando a ductilidade do material. A alta resistência mecânica e tenacidade resultantes dos materiais com microestrutura martensítica revenida torna estes aços interessantes para o uso na indústria automobilística. 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 fabricação.⁽²⁾

O correto controle do resfriamento dos produtos conformados a quente, com o aproveitamento do calor proveniente da conformação para promover as transformações de fase desejadas, traz como vantagens a eliminação de etapas de processamento e redução dos gastos energéticos. Atualmente, este princípio é amplamente utilizado nas linhas de laminação a quente de siderúrgicas, na produção de aços microligados, aços especiais e/ou com microestruturas específicas,^(3,4) podendo-se, dessa mesma forma, utilizar o resfriamento controlado após o forjamento a quente, como demonstrado por Yamakami.⁽⁵⁾ Trabalhos anteriores⁽⁶⁾ mostraram que, com o auxílio de esteiras rolantes e caixas térmicas, é possível obter microestruturas bainíticas, perlíticas ou consistindo de uma mistura entre ambas, permitindo assim a eliminação de uma etapa de tratamento térmico.

A rota de processamento em estudo no presente trabalho é a têmpera direta, a qual consiste no controle do resfriamento do material, após o forjamento a quente, para a obtenção de microestrutura martensítica, sem a necessidade de reaustenitização. Este processo traz como vantagens a redução do *lead time* e da energia dispendida com a austenitização do material quando da utilização da têmpera convencional.⁽⁷⁾

No tratamento de têmpera e revenimento, a composição e tamanho de grão da austenita, a qual desempenha importante papel na determinação das propriedades finais da martensita, são controlados pela temperatura de austenitização. No caso da têmpera direta, o controle do tamanho de grão austenítico dependerá do grau de recristalização da estrutura, o qual é determinado pelo grau de deformação e pela temperatura de forjamento.

A definição das taxas de resfriamento é feita através da análise das curvas de resfriamento, como diagramas de transformação em resfriamento contínuo (TRC), as quais determinam as microestruturas formadas de acordo com a temperatura e a taxa de resfriamento do material.⁽⁸⁾ No caso do forjamento a quente, existem diversos fatores que influenciam nas taxas de resfriamento, como a refrigeração das

ferramentas, taxa de deformação, cadência do processo e o meio de resfriamento após a conformação. Estes, dentre outros parâmetros intrínsecos ao processo, são de difícil controle e muitas vezes não há informações precisas sobre o seu impacto na microestrutura do material. Ademais, o acesso às curvas TRC de certos aços é muitas vezes limitado ou inexistente, criando um elevado grau de empirismo no desenvolvimento destes processos e dificultando a sua aplicação industrial. Por conseqüência, é 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.

1.1 DOE

Como descrito pelo NIST,⁽⁹⁾ 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. Assim, o DOE estuda os efeitos dos fatores e de suas interações em um processo e incorpora tanto o conhecimento técnico do processo quanto os procedimentos estatísticos envolvidos.

1.2 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é usado em técnicas computacionais e consiste em subdividir um problema cuja solução analítica é geralmente impraticável, em numerosos problemas mais simples, que devem ser combinados e então resolvidos. Esta divisão do problema inicial em subproblemas é comparada à formação de uma malha de elementos na qual cada retângulo representa uma pequena porção do material e cada interseção de arestas caracteriza um nó, determinando um ponto no espaço. Quanto maior é o número de elementos gerados, ou em outras palavras, quanto mais refinada for a malha criada, maior será a tendência em obter resultados precisos, conforme descrito no manual do *software Deform*^{TM (10)}.

O presente trabalho visa analisar a utilização da têmpera direta pós-forjamento a quente para a obtenção de microestrutura martensítica em substituição aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento com o auxílio de ferramentas de planejamento de experimentos e simulação por elementos finitos para delinear as condições do processo e analisar a influência das variáveis na microestrutura resultante do processo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Método dos Elementos Finitos

Para a realização das simulações pelo MEF foi utilizado o software DEFORM – 3DTM empregando-se as condições de processo descritas posteriormente na seção 2.3. Deve-se salientar que o aço DIN 42CrMo4 foi utilizado na simulação por MEF com os dados presentes na biblioteca do *software*. Espera-se assim que o

comportamento tensão – deformação em simulação por MEF seja similar ao comportamento real do aço.

Valendo-se de técnicas de regressão linear, as cinéticas das transformações microestruturais de recristalização dinâmica, metadinâmica e estática foram ajustadas ao modelo usado pelo DEFORM-3D™. A Tabela 1 apresenta as equações usadas e as respectivas referências. O TGA inicial (D_0) foi considerado 100 μm para todas as temperaturas.

Tabela 1. Equações das cinéticas de transformações microestruturais usadas para a simulação por MEF do forjamento a quente da arruela forjada

Recristalização Dinâmica ⁽¹¹⁾	Recristalização Metadinâmica ⁽¹²⁾
$X_{DRX} = 1 - \exp \left[-5,986 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_{0,5}} \right)^2 \right]$ $\varepsilon_{0,5} = 5,048 \cdot 10^{-2} \cdot d_0^{0,4772} \cdot \varepsilon^{0,1258} \cdot \exp \left(\frac{26128}{RT} \right)$ $d_{DRX} = 13,41 \cdot d_0 \cdot \varepsilon^{0,16} \cdot \varepsilon^{-0,23} \cdot \exp \left(\frac{-42327,5}{RT} \right)$	$X_{MDRX} = 1 - \exp \left[-0,693 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0,5}} \right)^2 \right]$ $t_{0,5} = 2,75 \cdot 10^{-18} \cdot \varepsilon^{-4} \cdot d_0^2 \cdot Z^{-0,26} \cdot \exp \left[\frac{-274000}{RT} \right]$ $d_{MDRX} = 87 \cdot \varepsilon^{-1} \cdot d_0^{0,49} \cdot Z^{-0,16}$
Recristalização Estática ⁽¹³⁾	
$t_{0,5} = 1,57 \cdot 10^{-14} \cdot \varepsilon^{-2,9} \cdot d_0^2 \cdot \exp \left[\frac{271000}{RT} \right]$ $X_{SRX} = 1 - \exp \left[-0,693 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0,5}} \right)^2 \right]$ $d_{SRX} = 1,1 \cdot \varepsilon^{-0,67} \cdot d_0^{0,67}$	

2.2 DOE

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 trata-se 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 Tab. 3 apresenta o bloco 2, referente 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 plots* 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®.

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

2.3 Processo

Para o estudo, utilizou-se o aço DIN 42CrMo4, cuja composição química nominal é apresentada a seguir:

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

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 Automotivo do Brasil Ltda. em Jundiaí. 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 três estágios, em uma geometria próxima à final e sem rebarbas. O processo é contínuo, automatizado e de alta produtividade.

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 de diamante 3 µm por 10 min. As análises objetivando a revelação das fases presentes foram feitas nas amostras após o processamento, com ataque com Nital 3% por 5 s. Para a medição do tamanho de grão austenítico proveniente das diferentes temperaturas de forjamento, foram utilizadas amostras temperadas em água diretamente na saída do forjamento. Estas amostras foram submetidas à imersão em ácido pícrico saturado aquecido a 80 °C (13 g para 1000 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 fração pontual (Pp), segundo a seguinte equação descrita por Underwood.⁽¹⁴⁾

$$P_p = P_c/P,$$

Na qual P_p corresponderá à fração de martensita na amostra, P_c são os pontos incidentes e P é o número total de pontos em uma grade, que no presente estudo corresponde a 250 pontos. Embora o método recomende a medição de 30 campos por amostra, por motivos práticos foram analisados dois campos, já que o objetivo da análise é a obtenção de um número orientativo que traga maior precisão ao critério visual.

3 RESULTADOS

3.1 Método dos Elementos Finitos

A análise por MEF indicou que ao final do forjamento, em praticamente toda a peça, ocorre deformação suficiente para nova recristalização dinâmica como mostra a Figura 1. Vale ressaltar que a geometria simulada não corresponde ao produto final, e sim uma pré-forma, pois há uma operação de furo que irá retirar todo o material presente na porção central da peça.

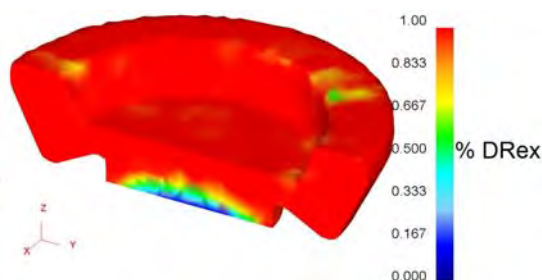


Figura 1. Fração de grãos austeníticos recristalizados ao final do forjamento.

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 fração recristalizada. Também é possível observar que a temperatura de forjamento não interfere de forma significativa no tamanho de grão recristalizado.

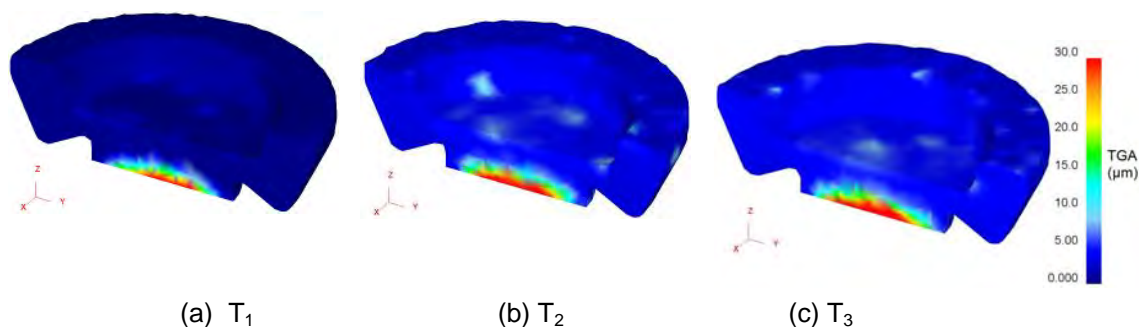


Figura 2. Efeito da temperatura de forjamento no tamanho de grão austenítico (em μm) recristalizado.

Com relação às análises metalográficas de tamanho de grão, o ataque por picral não foi efetivo na revelação dos contornos de grão austeníticos, devido à composição química do aço, que contém teor apreciável de cromo, e outras técnicas de ataque são recomendadas para estes casos, que não apresentaram viabilidade para a realização.

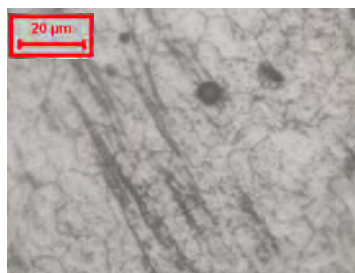


Figura 3. Tamanho de grão austenítico para o material forjado a T_1 .

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 $50\ \mu\text{m}$ e $80\ \mu\text{m}$, e entre $10\ \mu\text{m}$ e $20\ \mu\text{m}$ após o forjamento para ambas as temperaturas, comprovando o refinamento microestrutural decorrente da recristalização e uma constância no tamanho de grão austenítico recristalizado para as temperaturas analisadas. A qualidade das imagens conseguidas não foi satisfatória, e apenas uma foi inserida no presente trabalho, na Figura 3, a título ilustrativo.

3.2 Resfriamento Controlado

Para as peças processadas com ventilação desligada, foi constatada grande heterogeneidade microestrutural, observada nas Figuras 4 e 5, já que em uma mesma amostra é possível verificar a presença de ferrita, perlita e produtos de transformação como bainita e martensita. Como o foco do presente trabalho é a substituição da têmpera e revenimento pelo resfriamento controlado, foi priorizada a identificação e quantificação da fase martensita (%M), apresentada na legenda das respectivas fotos para melhor visualização. Nesta análise, considera-se que teores de martensita acima de 85% correspondem ao obtido pelo tratamento térmico.

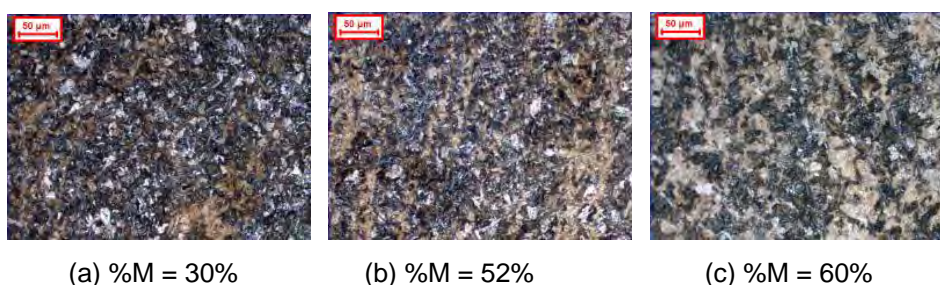


Figura 4. Micrografia das peças forjadas nas temperaturas (a) T_1 , (b) T_2 ; (c) T_3 . Ventilação desligada.

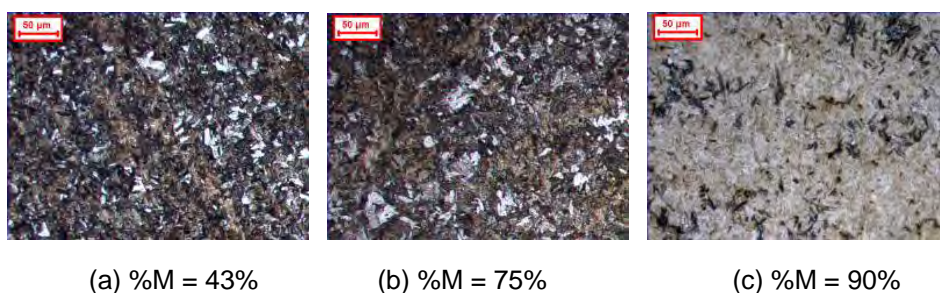


Figura 5. Micrografia das peças forjadas nas temperaturas (a) T_1 , (b) T_2 ; (c) T_3 . Ventilação ligada.

Assim como nas peças sem ventilação, houve grande heterogeneidade microestrutural entre amostras submetidas à ventilação, em menor grau na temperatura T₃, como mostrado na Fig. 5.

Os resultados mostram que há influência tanto da temperatura quanto da taxa de resfriamento, e a situação que mais se aproxima do tratamento térmico corresponde ao forjamento na temperatura T3 com ventilação forçada.

3.3 DOE

Os resultados da quantificação de martensita nas amostras foram inseridos no software Minitab® e gerados gráficos de análises dos efeitos, distribuição dos resíduos e tabelas de efeitos, cujos resultados mais relevantes serão mostrados a seguir.

O diagrama de Pareto, mostrado na Figura 6a, e o Normal Plot (Figura 6b), foram utilizados para analisar a magnitude e significância estatística dos termos principais A (temperatura de forjamento), B (ventilação) e da interação entre ambos (AB).

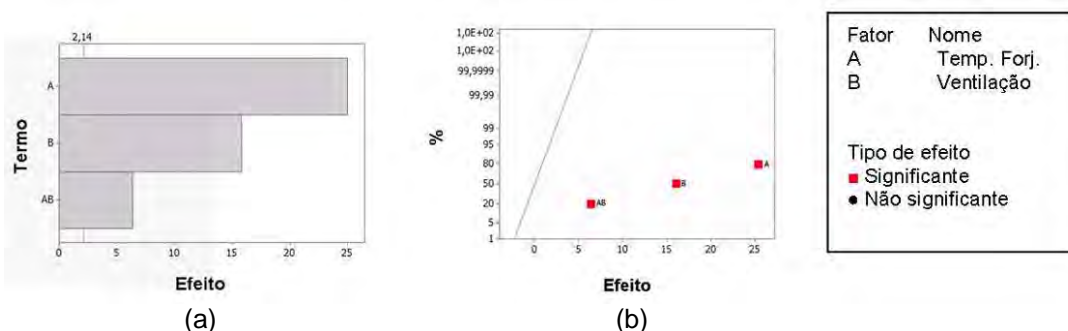


Figura 6. Análise dos efeitos. (a) Diagrama de Pareto dos efeitos A, B e AB. (b) Normal Plot dos efeitos. Alfa = 0,05.

A Figura 6 mostra 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.

A tabela de efeitos calculada pelo Minitab® contém os p-valores encontrados para todos os termos, sendo que, para um termo ser significativo, é necessário $p\text{-valor} < \alpha$.

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

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 7.

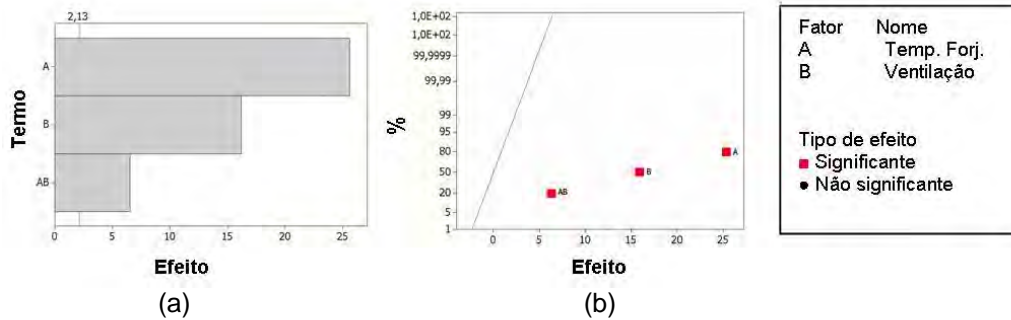


Figura 7. Análise dos efeitos. (a) Diagrama de Pareto dos efeitos A, B e AB. (b) *Normal Plot* dos efeitos. Alfa = 0,05.

Observa-se que a retirada do bloco não alterou os resultados, assim A, B e AB são significativos, e o termo A apresenta maior magnitude de significância.

Para verificar a validade do modelo, foram utilizados os gráficos de resíduos mostrados na Figura 8. Os resíduos seguem uma distribuição normal, como mostrado na Figura 8a, e confirmado pelo p-valor calculado, $0,090 > \alpha$. O gráfico de resíduos versus valores ajustados, mostrado na Figura 8b mostra um padrão aleatório e sem *outliers*, com variância constante ao longo de todos os valores ajustados, validando a análise.

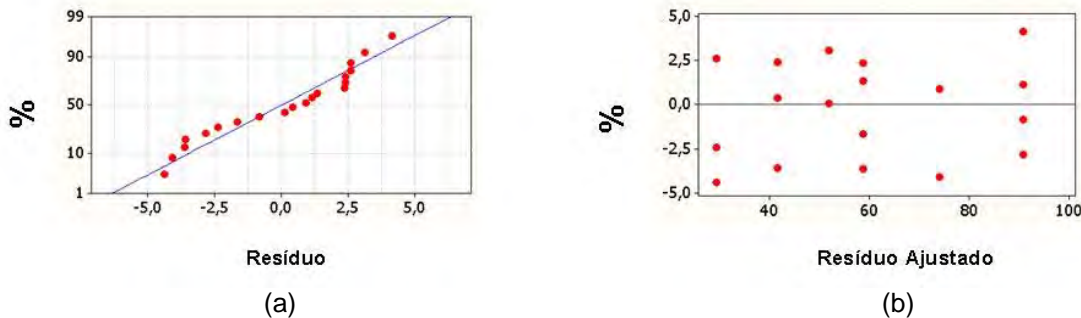


Figura 8. Análise dos resíduos. (a) Probabilidade Normal dos resíduos. (b) Resíduos versus valores ajustados

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 9 mostra o gráfico de interação para os níveis dos fatores estudados.

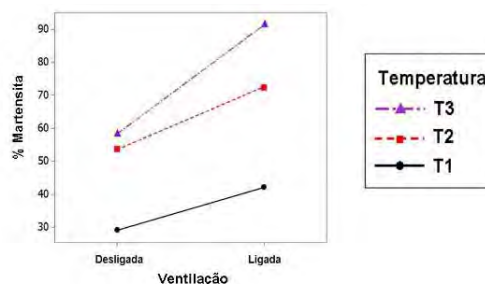


Figura 9. Gráfico de interação. A resposta foi considerada a % de martensita nas amostras.

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 T3, na qual há um aumento de cerca de 30% no teor de martensita quando é utilizada a ventilação forçada e corresponde à melhor situação analisada.

4 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos mostraram que é possível a obtenção 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. Outro fator importante é o conhecimento do comportamento do material durante e após a conformação, a partir do qual se torna possível a determinação dos parâmetros de processo.

A análise por MEF foi utilizada para observar os efeitos da conformação mecânica na cinética de recristalização do material. A utilização de ferramentas de simulação é importante nestes casos em que o conhecimento do comportamento do material durante o processamento é um ponto chave no seu desenvolvimento. A simulação permitiu observar que ao final do processo ocorre a recristalização dinâmica em toda a parte útil do tarugo, e ocorre deformação suficiente para nova recristalização dinâmica. 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, 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⁽¹³⁾ 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⁾ 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 ⁽¹⁵⁾ 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 seja criada uma conscientização a cerca das 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 e mostrem claramente suas limitações. 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 T₃. Assim, é preciso entender e aceitar as exigências específicas do resfriamento controlado, de forma a utilizar os parâmetros corretos, quebrando o paradigma existente que prioriza apenas o desempenho do equipamento, e obtendo-se assim a microestrutura desejada.

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 CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, São Paulo, 7^a Ed., 1996.
- 2 BHADESHIA, H. K. D. H. Bainite in steels: transformation, microstructure and properties. London: The Institute of Materials, University of Cambridge, 2001.
- 3 KAZEMINEZHAD, A.; TAHERI, K. The effect of controlled cooling after hot rolling on the mechanical properties of a commercial high carbon steel wire rod. *Materials and Design*, Tehran, n. 24, p. 415 – 421, abr. 2003.

- 4 MAITY, S. K., KAWALLA, R. Ultrahigh Strength Steel: Development of Mechanical Properties through Controlled Cooling. Heat Transfer – Engineering Applications. pp 309 – 366.
- 5 YAMAKAMI, W. J. Uma proposta para flexibilização do forjamento a quente. 2003, 261p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas.
- 6 COSTA, H. C. A.; PETRILLI, F.; SOUZA, M. M. O resfriamento controlado como alternativa para a obtenção de microestrutura bainítica a partir do forjamento a quente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 20., 2012, Joinville. Anais... Joinville: CBECIMAT, 2012. 1 CD.
- 7 OLIVEIRA, C. A. S.; Schmitz, E. Efeito da têmpera direta e convencional na microestrutura e propriedades mecânicas de garras para a recuperação de sapatas em aço 15B30. Disponível em:
< <http://www.grima.ufsc.br/cobef4/files/032005325.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2013.
- 8 VERLAG STAHLEISEN MBH, Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, vol. 2, Germany, 1972.
- 9 NIST/SEMATECH. E-Handbook of Statistical Methods. Disponível em:
<<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmd/section3/pmd31.htm>> . Acesso em: 05 mar. 2013.
- 10 SFTC CORPORATION. Elementary Concepts in Metal Forming and Finite Element Analysis, cap. 5. Deform Manual.
- 11 CHEN, FEI, ZENSHAN, CUI, CHEN, SHIJIA. Recrystallization of 30Cr2Ni4MoV ultra-super-critical rotor steel during hot deformation Part I: Dynamic Recrystallization. Materials Science and Engineering. pp. 5073 – 5080, 2011.
- 12 KARHAUSEN, K.; KOPP, R.; SOUZA, M.M. Numerical Simulation Method for Designing Thermomechanical Treatments, Illustrated by Bar Rolling. Scandinavian Journal of Metallurgy, pp. 1-13, 1991.
- 13 SOUZA FILHO, V.; SOUZA, M. M.; BUTTON, S.T. Estudo numérico e experimental do comportamento do tamanho de grão do material DIN 16MnCr5 MOD conformado a quente. Porto Alegre, 2006.
- 14 UNDERWOOD, E., Quantitative Stereology, Addison Wesley Publishing, London, 1970.
- 15 NÜRNBERGER, F., GRYDUBM O., SCHAPER, M., BACH, F.-W, KOCZURKIEWICZ, B., MILENIN, A. Microstructure transformations in tempering steels during continuous cooling from hot forging temperatures. pp. 224 – 233, 2010.