

ANÁLISE DA DUREZA SUPERFICIAL DE UM AÇO FORJADO A QUENTE SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE RESFRIAMENTO.

Guilherme Wolf Peres, Wyser José Yamakami, Rafael Gustavo da Rocha Paulo, Daniel Iwao Suyama. - Engenharia de Materiais e Metalurgia - Engenharia Mecânica - Departamento de Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia - Campus de Ilha Solteira.

A dureza, propriedade de superfície amplamente difundida no meio acadêmico e industrial, representa um bom indicativo da qualidade do tratamento térmico ao qual um dado componente mecânico foi submetido. Além disso, a dureza pode servir como estimativa para outras propriedades mecânicas, permitindo-se inferir sobre o comportamento mecânico da peça em serviço (SOUZA, 1982). Várias escalas de dureza e correlação entre elas existem no mercado, mas seu adequado emprego com respeito ao tipo de material alvo das medições requer um conhecimento prévio para não se obter resultados inapropriados.

No processo produtivo de peças forjadas, um controle de qualidade das peças normalizadas após o forjamento a quente costuma ser realizado recorrendo-se à dureza Brinell. Nem sempre, em princípio, análises micrográficas são feitas para observação da microestrutura. Esta é indiretamente avaliada pelos níveis de dureza obtidos. A normalização é realizada geralmente em peças forjadas a quente a fim de obter-se uma microestrutura perlítico-ferrítica com níveis de dureza entre 163 a 187 HB para permitir uma boa usinabilidade do material nas operações de usinagem subsequentes.

Outros tratamentos alternativos têm sido propostos para se obter microestruturas e propriedades mecânicas mais adequadas às diferentes aplicações dos forjados, além de propiciar uma redução nos custos desta etapa. Kaspar et al. (1997) e Henning (1989) trabalharam no desenvolvimento de novos aços para viabilizar a substituição de tratamentos térmicos pelo resfriamento contínuo logo após o forjamento, minimizando os custos e tempos com aqueles tratamentos. De forma semelhante, Lin e Chen (1994) propuseram uma alteração da composição química de um dado aço para eliminar a etapa de recozimento pós-forjamento e permitir que o forjado seja levado diretamente para a etapa de usinagem. Chine (1996) e Naylor (1998) mostram a utilização de microligados que permitem a eliminação ou minimização das etapas de tratamentos térmicos após processos de forjamento por meio do controle do resfriamento do material.

O tratamento termo-mecânico controlado de peças forjadas pode conferir a elas propriedades mecânicas melhores que as obtidas por um forjamento convencional. A melhoria das propriedades mecânicas se deve às mudanças microestruturais adequadas que se conseguem com esses tratamentos. O presente trabalho apresenta uma análise da relação entre o comportamento da dureza de um aço forjado a quente e as microestruturas geradas por diferentes tratamentos térmicos.

O material estudado foi um aço para forjamento a quente, similar aos da família SAE 8620, empregado na fabricação de engrenagens automotivas por possuir boa relação entre resistência mecânica e tenacidade. Sua composição química apresenta 0,23-0,28% C, 0,90-1,30% Mn, 0,35-0,70% Cr, 0,10-0,20% Mo, 0,15-0,35% Si, 0,025% (máximo) P e 0,02-0,04% S. O aço foi forjado a 1473 K em uma prensa excêntrica e submetido a quatro condições de resfriamento: resfriamento em água (têmpera), resfriamento ao ar, resfriamento ao ar seguido de normalização a 1223 K por 2 horas, e resfriamento em forno a 873 K por 20 minutos, imediatamente após forjamento a quente.

Amostras das peças nas quatro condições de resfriamento foram retiradas para realização das medidas de dureza Vickers. A dureza Vickers foi medida ao longo de toda a superfície da amostra em um durômetro Heckert, com penetrador de diamante piramidal e carga de 98 N. Posteriormente, as amostras foram preparadas seguindo os procedimentos convencionais de metalografia e atacadas com Nital 2% para análise micrográfica em um microscópio óptico Carl Zeiss Jena, modelo Neophot 21. Um esquema da peça cortada identificando a superfície onde as medidas de dureza e análise microestrutural foram realizadas é mostrado na Figura 1.

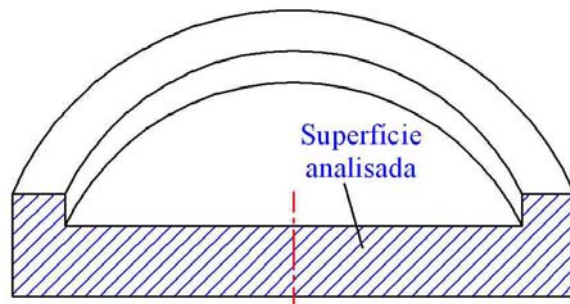


Figura 1 - Esquema da seção da peça submetida à análise micrográfica e medida de dureza.

Uma análise das amostras evidencia uma coerência das microestruturas e valores de dureza apresentados com as condições de resfriamento impostas após forjamento a quente, como descrito por Mei e Silva (1988). Meios mais severos de resfriamento implicam em maiores taxas de resfriamento e, consequentemente, em um aumento da velocidade de transformação da austenita em outro constituinte. Esta transformação da austenita pode ocorrer por difusão, cisalhamento ou uma combinação destes mecanismos.

A ferrita e a perlita, formada pelas fases ferrita e cementita, são obtidas por difusão. A ferrita poligonal forma-se em condições de resfriamento lento, enquanto a ferrita acicular – ripas de ferrita com cementita entre as ripas – é obtida com alta velocidade de resfriamento. Quando o aço é resfriado rapidamente, ocorre a formação da bainita composta por ferrita e cementita, porém com uma morfologia diferente das citadas anteriormente. A transformação da austenita em martensita ocorre por cisalhamento, sem difusão, quando submetida a um resfriamento brusco. Isto é observado na têmpera feita pelo resfriamento em água, como mostra a Figura 2a.

Os valores de dureza apresentam também uma relação diretamente proporcional com as taxas de resfriamento, de tal forma que taxas maiores promoveram a formação de microestruturas com dureza mais elevada, como registrado para a condição de têmpera em água. No resfriamento ao ar, as amostras analisadas apresentaram uma microestrutura composta por colônias de perlita, ferrita primária, ferrita acicular e provável bainita, em pequena quantidade, como mostra a Figura 2b. Verifica-se assim, microestruturas características de uma região de transição entre as transformações por difusão e as realizadas por deformação da rede cristalina, como a têmpera.

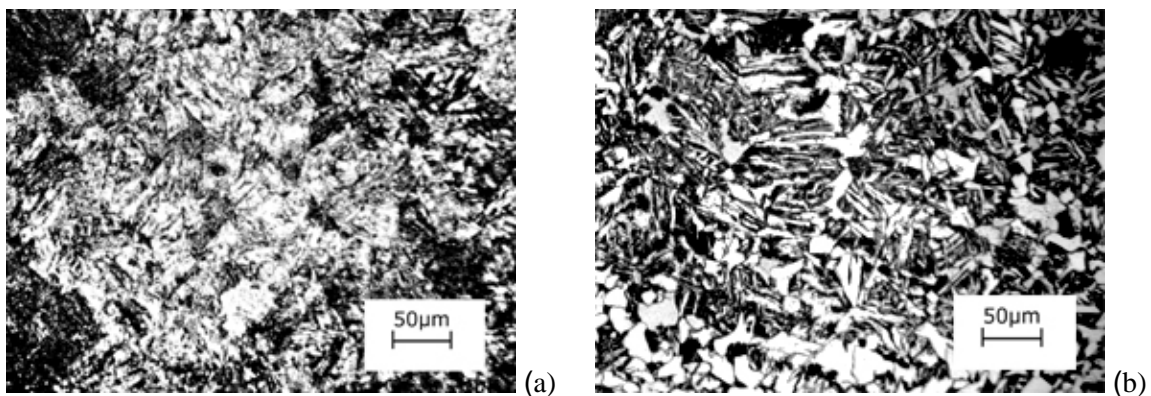


Figura 2 - (a) Têmpera: microestrutura martensítica. (b) Resfriamento ao ar: Colônias de perlita, ferrita primária, ferrita acicular e bainita.

Os níveis de dureza para a condição de resfriamento ao ar são bem menores que os registrados para a têmpera em água e maiores que os normalizados e resfriados em forno a 873 K. Este padrão concorda com as taxas de resfriamento, as quais nesta condição são significativamente menores que aquelas do resfriamento em água e maiores que as do resfriamento em forno a 873 K.

A amostra da peça resfriada ao ar e normalizada, vista na Figura 3, apresenta uma microestrutura formada por grãos de perlita e ferrita distribuídos de forma homogênea, com dureza relativamente baixa, como esperado para o tratamento de normalização após o forjamento. No resfriamento em forno a 873 K por 20 minutos, a microestrutura é composta por perlita e ferrita

distribuídas homogeneamente ao longo da peça, como a observada na Figura 3 para a condição normalizada.

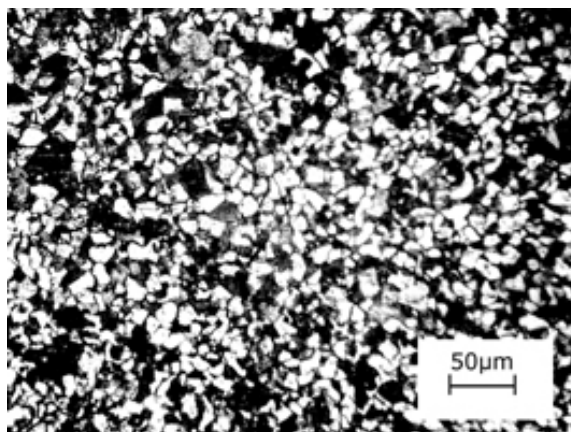


Figura 3 - Microestrutura perlítica-ferrítica característica da normalização e do resfriamento em forno a 873 K.

Não somente a microestrutura, mas os valores de dureza medidos para a condição de resfriamento em forno são estatisticamente iguais aos obtidos no tratamento térmico de normalização, realizado geralmente pelas empresas do ramo nas peças forjadas a quente antes de serem enviadas para usinagem. Os valores de dureza medidos para resfriamento em forno a 873 K por 20 minutos estão entre 163 a 187 Brinell (171 a 196 HV), faixa especificada para este aço após sua normalização, como observado na Tabela 1, juntamente com os resultados obtidos para as demais condições de resfriamento.

Tabela 1 - Dureza do aço para as condições de resfriamento.

Condição	Dureza (média) [HV]	IC 90% *	Erro %
Resfriado ao Ar	229,4	6,2	2,7
Resfriado ao Ar e Normalizado	188,6	4,0	2,1
Resfriado em água (Têmpera)	591,8 / 54,2 HRc	19,0	3,2
Resfriado no Forno a 873 K	189,7	3,2	1,7

* Desvio para um intervalo de confiança de 90%.

Observa-se no aço normalizado, bem como no resfriado em forno a 873 K, uma orientação da microestrutura perlítico-ferrítica ao longo das linhas de escoamento plástico do material geradas no forjamento a quente. Os resultados indicaram que a dureza está intimamente relacionada ao tipo de microestrutura do material, que por sua vez está vinculada às condições de resfriamento.

No caso em que o resfriamento foi brusco, como na têmpera em água, obteve-se martensita que apresenta nível de dureza elevado. Condições de resfriamento lento, como na normalização e no resfriamento em forno a 873 K por 20 minutos, obteve-se colônias de perlita e ferrita poligonal com valor de dureza relativamente baixo. Uma taxa de resfriamento intermediária, como no resfriamento ao ar, promoveu a formação de uma microestrutura mais complexa, composta por colônias de perlita, ferrita primária, ferrita acicular e provável bainita, cuja dureza medida apresenta valores situados entre aqueles registrados para as condições extremas de resfriamento, ou seja, lento e brusco.

É importante frisar que as microestruturas e níveis de dureza característicos da normalização a 1223 K por 2 horas podem ser obtidos pelo resfriamento direto do forjado a quente em forno a 873 K durante 20 minutos, permitindo assim uma economia de tempo e energia para o processo produtivo. Com relação à dureza Vickers, verifica-se que esta escala reflete coerentemente as características microestruturais geradas pelas condições de resfriamento, reforçando seu potencial como parâmetro de controle de qualidade.

Referências Bibliográficas

CHINE, R. S.; HEITMANN, W. E.; BHATTACHARYA, D. Microalloyed steel bars and forgings. **Journal of Metals**, [s.i.], p.26-33, maio 1996.

HENNING, J. New developments boost forging performance. **Machine Design**, [s.i.], p.97-101, 10 ago. 1989.

KASPAR, R. et al. Application of thermomechanical treatment on medium-carbon microalloyed steels continuously cooled from forging from forging temperature. **Materials Technology, Steel Research**, [s.i.], v. 68, n. 1, p.27-31, 1997.

LIN, H.; CHEN, Y. K. Development of new alloy steel grade which facilitates elimination of process annealing. **Ironmaking and Steelmaking**, [s.i.], v. 21, n. 1, p.27-31, 1994.

MEI, P. R.; SILVA, A. L. da C. e. **Aços e Ligas Especiais**. 2. ed. Sumaré-SP: Eletrometal S/A, 1988. 528 p.

NAYLOR, D. J. Microalloyed forging steels. **Materials Science Forum**, [s.i.], v. 284-286, p.83-94, 1998.

SOUZA, S. A. **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1982. 286 p.