

UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE TORÇÃO A QUENTE E SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA PREVISÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO DIN 16MNCr5 MOD¹

Valter de Souza Filho²
Mauro Moraes de Souza³
Sérgio Tonini Button⁴

Resumo

Ensaio de laboratório são freqüentemente utilizados para a previsão das propriedades mecânicas dos aços devido à dificuldade de utilizarem-se equipamentos industriais de alto custo de aquisição, operação e manutenção. Ensaio de laboratório são capazes de modelar algumas condições locais, mas são incapazes de descrever todo o processo. Nos processos industriais, as ligas metálicas estão sempre sujeitas a históricos complexos de temperatura, tempo, deformação e taxa de deformação que tornam cara e lenta a investigação experimental da influência de todas as potenciais variáveis. A dificuldade aumenta quando a taxa de deformação é mais elevada, acima de 80 s^{-1} . Este trabalho pretende demonstrar a utilização de ensaios laboratoriais, simulação numérica e cálculos empíricos para prever as propriedades mecânicas do aço DIN 16MnCr5 MOD com a utilização do software comercial MSC.Superform em processo de conformação a quente industrial e taxas de deformação até 90 s^{-1} .

Palavras-chaves: Simulação; Conformação a quente; Propriedade mecânica; Processo industrial.

USE OF THE HOT TORSION TEST AND OF THE NUMERICAL SIMULATION TO PREDICT THE MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL DIN 16MNCr5 MOD

Abstracts

Laboratory tests are frequently used for the prediction of the mechanical properties of steel due to the difficulty to use industrial equipment of high cost of acquisition, operation and maintenance. They are capable to reproduce some local conditions, but they are incapable to describe the process as a whole. In industrial processes, the metallic alloys are always submitted to complex combination of temperature, time, strain and strain rate, which makes experimental inquiring of the influence of all changeable variables expensive and slow. The difficulty increases when the strain rate is more than, for instance 80 s^{-1} . This work aims to demonstrate the use of laboratory tests, numerical simulation and empirical calculations to predict the mechanical properties of steel DIN 16MnCr5 MOD with the use of commercial software MSC.Superform in industrial hot formed process and strain rate up to 90 s^{-1} .

Key words: Simulation; Hot forming; Mechanical properties; Industrial process.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Mestrando em engenharia mecânica com ênfase em materiais e processos de fabricação pela UNICAMP. Analista do laboratório metalúrgico da Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda.

³ Engenheiro metalurgista, mestre em ciências dos materiais pelo IME/RJ, doutor em engenharia com ênfase em conformação mecânica de metais pela RWTH Aachen/Alemanha e mestre em administração de negócios (MBA) pela Ohio University. Gerente de engenharia e desenvolvimento da Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda.

⁴ Engenheiro mecânico. Mestre e doutor em engenharia mecânica com ênfase em materiais e processos de fabricação pela UNICAMP. Professor do departamento de engenharia de materiais da faculdade de engenharia mecânica da UNICAMP.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de obter processos mais eficientes e com menor custo incentiva as indústrias brasileiras a investigarem os fenômenos que cercam os processos industriais.

Equações constitucionais foram inicialmente determinadas a partir de trabalhos baseados em ensaios torsionais e investigativos como o trabalho de Yada *et. al.* ⁽¹⁾ que estudaram o comportamento de diversos aços sob alta taxa de deformação através de um simulador de deformação a quente, por compressão uniaxial com taxa máxima de deformação entre 300 a 800 s⁻¹. Demonstraram que as curvas características de tensão de escoamento equivalente versus deformação equivalente não se alteraram essencialmente com o aumento na taxa de deformação. Também comprovaram que há uma boa aceitação do tamanho de grão austenítico calculado (1) através da função Zener-Hollomon (2) com o tamanho de grão austenítico obtido através da investigação experimental.

$$D = AZ^u \quad (1)$$

Nesta equação D é o tamanho de grão austenítico [μm], A e u são constantes independentes da temperatura e Z é o parâmetro de Zener Hollomon detalhado pela equação (2).

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT_k}\right) = A'(\sinh(\alpha\sigma_p))^n \quad (2)$$

Nesta equação A', α , n são constantes independentes da temperatura, R é a constante dos gases [8,314 J/Kmol], Q é a energia de ativação [KJ/mol⁻¹] para a deformação a quente, T_k é a temperatura [K], σ_p é a tensão de escoamento equivalente máxima [MPa] e $\dot{\epsilon}$ é a deformação equivalente.

Poucas investigações são realizadas em condições reais de conformação. Isso se dá pela dificuldade em obter equipamentos de alto custo de aquisição e encontrados apenas em grandes indústrias. A maioria dos trabalhos prioriza o estudo através de ensaios de torção a quente com taxa de deformação que varia de 1 a 50s⁻¹. Diferentemente, Gentile *et. al.* ⁽²⁾ simularam fisicamente o processo de conformação, com a utilização de um ensaio de compressão uniaxial de uma ferramenta plana e outra em forma de cunha, permitindo a comparação com processo de conformação a quente industrial para condições de baixa taxa de deformação.

Com o aumento da capacidade de processamento dos sistemas computadorizados permitiu-se a aplicação do método de elementos finitos para melhorias e estudos envolvendo a heterogeneidade das deformações plásticas, sendo possível incrementar a análise de elementos finitos em propriedades de cristais simples. A simulação numérica tornou-se uma ferramenta importante para o desenvolvimento de novas tecnologias e ou como ferramenta para as melhorias de processos.

Uma boa similaridade desses modelos com a condição real de conformação permitiu à empresa Msc.Software adaptá-los para que através de uma simulação

numérica, permita prever as mudanças estruturais do tamanho de grão austenítico.⁽³⁾

Deve-se considerar que as propriedades mecânicas dos aços forjados a quente são governadas pelo posterior tratamento térmico logo após o processo de conformação. Cálculos empíricos da literatura são utilizados. Entretanto, esse método tem algumas limitações relacionadas com a composição química, processo de fabricação, distribuição dos microconstituintes, taxa de resfriamento entre outros.⁽⁴⁾

Modelos teóricos e o estudo da influência da taxa de resfriamento a partir de diferentes temperaturas na microestrutura e nas propriedades mecânicas têm sido alvos de estudo de diversos autores nos mais diversos processos industriais.

Alterações na microestrutura e propriedade mecânica, associada com mudanças na taxa de resfriamento, resumiram-se em como essas mudanças na taxas de resfriamento cruzam com diferentes regiões do diagrama CCT e diferentes temperaturas de transformação.

Várias relações objetivando um modelo de propriedades mecânicas envolvendo a microestrutura após processos de conformação a quente e subseqüentes resfriamentos foram reportados nos últimos anos, principalmente para processos de laminação.

Sinczak *et. al.*⁽⁴⁾ utilizaram a equação (3) para calcular o tamanho de grão ferrítico (D_α) em função do carbono equivalente (C_{eq}), taxa de resfriamento (T_r) e tamanho de grão austenítico (D).

$$D_\alpha = (13 - 0,7C_{eq})D^{0,3}T_r^{-0,15} \quad (3)$$

Finamente utilizaram a expressão (4) para calcular a tensão de escoamento equivalente com base na composição química e no tamanho de grão ferrítico.

$$T_s = f_a^{1/3}(35 + 58Mn + 17D_\alpha - 0,5) + 63Si + 425N + (1 - f_a^{1/3})(179 + 3,9S^{-0,5}) \quad (4)$$

Nesta equação f_α é a fração volumétrica da ferrita, T_s é a tensão de escoamento calculada e S é o espaçamento [mm] interlamelar da perlita, obtido pela equação (5) descrita no trabalho de Caballero.⁽⁵⁾

$$S = \left(\frac{2,6789 \times 10^{-3}}{(727 - T_p)} \right) \quad (5)$$

Pressupõem que seja possível prever com as equações (3), (4) e (5) as propriedades mecânicas para produtos conformados a quente seguidos de um resfriamento após o processo de conformação.

Este trabalho pretende demonstrar a utilização de ensaios laboratoriais, simulação numérica com a utilização do software comercial MSC.Superfom e cálculos empíricos na previsão das propriedades mecânicas do aço DIN 16MnCr5 MOD em processo de conformação a quente industrial e taxas de deformação até $90s^{-1}$.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O aço empregado é o DIN 16MnCr5 MOD, cuja composição química segue na Tabela 1 e apresenta carbono equivalente de 0,679.⁽⁶⁾

Tabela 1 – Composição química.

C	Si	Mn	P (máx)	S (máx)	Cr	Mo	Ni	Al
0,1835	0,0910	1,258	0,0088	0,0218	1,185	0,0249	0,1088	0,0216

Três peças do aço DIN 16MnCr5 MOD foram forjados com uma ferramenta em forma de cunha e matriz plana (Figura 1) seguindo os parâmetros do processo de conformação descritos na Figura 2 e resfriados a uma taxa (T_r) de 1 [°C/s].

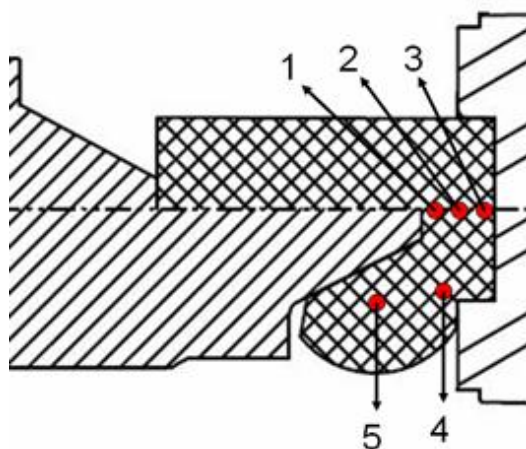


Figura 1 - Detalhe do ferramental

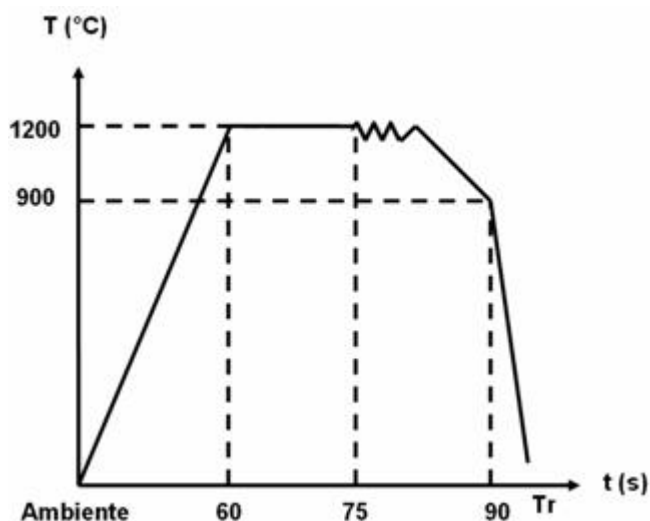


Figura 2 – Parâmetros do processo

Ensaio de torção a quente foram utilizados na obtenção dos parâmetros metalúrgicos. Ensaíram-se os corpos de prova a uma taxa de deformação de 1, 3 e 20 s⁻¹ e temperaturas de 900, 1000, 1100 e 1200°C. O equipamento utilizado foi

construído no Laboratório de Tratamentos Termomecânicos da Universidade Federal de São Carlos.⁽⁷⁾

Para conformação foi utilizada um prensa horizontal industrial que fornece 90s^{-1} de taxa de deformação, localizada na planta da Neumayer Tekfor Automotivo do Brasil⁽⁸⁾ em Jundiá-SP.

Na identificação da temperatura de transformação e das fases presentes utilizou-se o ensaio de dilatométrica. Um corpo de prova cilíndrico com 10 mm de diâmetro e 86,36 mm de comprimento foi submetido à taxa de resfriamento de $1\text{ }^\circ\text{C/s}$. A amostra foi ensaiada no equipamento Gleeble[®] 3500 localizado na planta da Gerdau⁽⁹⁾ em Charqueadas-RS.

Para cada amostra das peças forjadas mediu-se a dureza Vickers com carga de 10N nos pontos mostrados na Figura 1 e para os valores mínimo e máximo converteu-se essa dureza em tensão equivalente [MPa] multiplicando-a por 3,04⁽¹⁾.

Para determinação do tamanho de grão austenítico utilizaram-se as amostras temperadas em água, sendo reveladas pela solução de aço pícrico saturado aquecido a $80\text{ }^\circ\text{C}$ (13g para 1000ml água destilada e 5 ml de detergente Kodak photo-flo 200 solution) por 60 a 120 segundos.⁽²⁾ Os microconstituintes foram revelados com Nital 5% utilizando um microscópio óptico Marca Olympus BX 60 com captura fotográfica pelo Software Leica.

As microdurezas dos microconstituintes serão obtidas pela utilização de carga de 0,25 N.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A média do tamanho de grão austenítico do tarugo aquecido antes da conformação é de $170\text{ }\mu\text{m}$ (Figura 3).

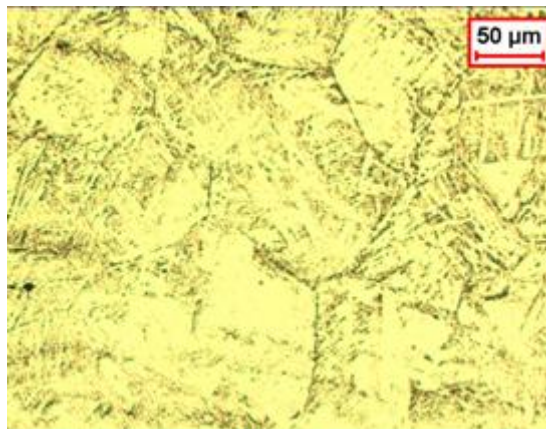


Figura 3 - Tamanho de grão austenítico inicial - solução de ácido pícrico. 500 x.

A curva obtida dos ensaios de torção, mostrada na Figura 4 é trabalhada e os parâmetros metalúrgicos necessários para simulação numérica são obtidos e estão expressos no trabalho de Souza Filho *et. al.*⁽³⁾

Após simulação numérica, visualiza-se na Figura 5 a distribuição da taxa de deformação no início da deformação da simulação numérica. Observa-se que o ponto 1 alcança rapidamente 90 s^{-1} enquanto os pontos 2 e 3 praticamente permanecem na condição de repouso.

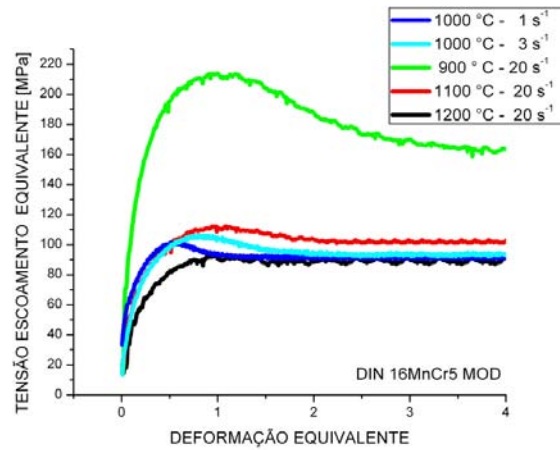


Figura 4 – Curvas características obtidas dos ensaios de torção a quente com taxa de deformação de $20s^{-1}$.

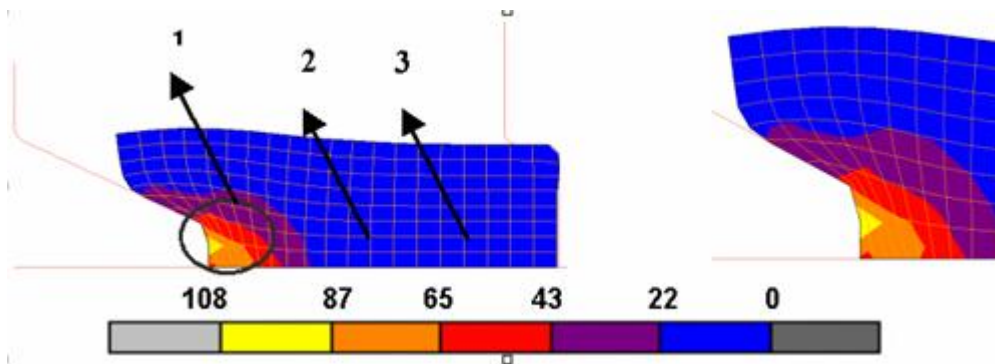


Figura 5 – Resultado da taxa de deformação [s^{-1}] para o incremento 24

As faixas de tamanho de grão austenítico obtidas na simulação numérica são apresentadas na Figura 6.

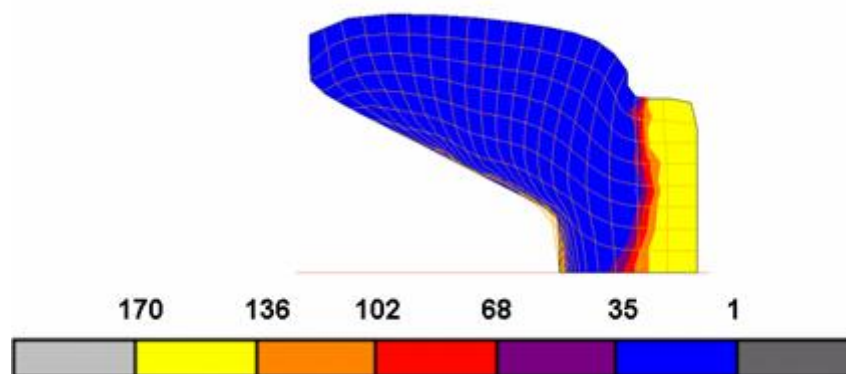


Figura 6 – Resultado do tamanho de grão austenítico [μm] para o material DIN 16MnCr5 MOD.

Ao final da deformação, o refinamento no ponto 2 é menos intenso, enquanto que o ponto 3 permanece com o tamanho de grão austenítico na condição inicial de aquecimento.

A Figura 7 apresenta a distribuição do tamanho de grão austenítico obtido nas amostras forjadas do material DIN 16MnCr5 MOD e na Figura 8 há um exemplo da micrografia da amostra 3 referente ao ponto 4.

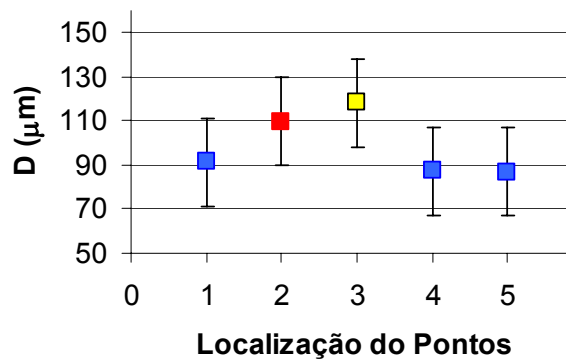


Figura 7 – Distribuição do tamanho de grão austenítico das peças forjadas

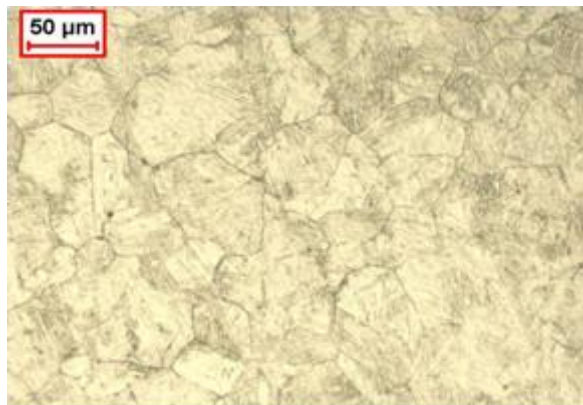


Figura 8 – Micrografia do tamanho de grão austenítico da amostra 3 e ponto 4. Solução ácido pícrico aumento de 500 X

Todos os grãos austeníticos verificados nos pontos 1 a 5 em ambos os aços apresentaram-se na forma equiaxial.

Inicialmente observa-se que os valores obtidos na simulação numérica do tamanho de grão austenítico foram menores do que os obtidos pelo ensaio experimental. Tal fato ocorre pela dificuldade em resfriar toda a massa da peça em água logo após a conformação no processo industrial. Um tempo de 15 segundos decorre entre a saída da peça da máquina e seu resfriamento em água (Figura 2), o que potencialmente pode ocasionar a recristalização seguida pelo crescimento de grãos. Esta informação é sustentada pela observação da equiaxialidade dos grãos austeníticos na peça resfriada. Visando complementar este efeito na análise e na simulação do processo de conformação foi assumido que o aumento do tamanho de grão austenítico após conformação aconteceu apenas por crescimento de grão durante resfriamento. Utilizou-se a equação (6) de Grass *et. al.*⁽¹⁰⁾ para calcular o crescimento de grão após o término da recristalização.

$$D_{cr}^2 = D_{drx}^2 + t * 10 \left(7,1 \frac{7180}{T} \right) \quad (6)$$

O cálculo do crescimento de grão pela equação (6) para cada ponto foi aplicado na faixa do tamanho de grão austenítico encontrado na simulação numérica. Para o ponto 2, por conservadorismo, adota-se uma faixa mais ampla de 36-136 μm devido à alta densidade de nós nesse ponto, e utiliza-se a temperatura final obtida na simulação numérica. A comparação do tamanho de grãos austenítico está mostrada na Figura 9.

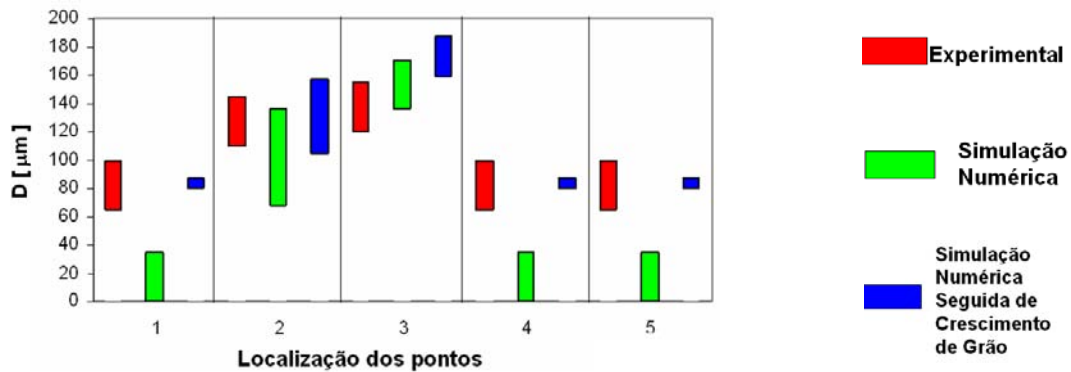


Figura 9 – Comparação entre os tamanhos de grão austenítico

Na Tabela 2 apresenta-se a dureza obtida do processo industrial para a T_r de 1 $^{\circ}\text{C/s}$ e sua respectiva conversão para tensão de escoamento.⁽¹⁾

Tabela 2 - Resultado da dureza Vickers das peças

Ponto	1		2		3		4		5	
Peça	Hv	MPa	Hv	MPa	Hv	MPa	Hv	MPa	Hv	MPa
1	239	727	216	657	250	760	259	787	256	778
2	262	796	250	760	262	796	253	769	253	769
3	259	787	245	744	247	750	253	769	256	778

Para a previsão das propriedades mecânicas algumas variáveis precisam ser calculadas. Para calcular o espaçamento interlamelar (S) utilizou-se a temperatura de transformação da perlita (Tabela 3) obtido pelo ensaio de dilatometria (Figura 10).

Tabela 3 – Temperatura de transformação obtida da dilatometria [$^{\circ}\text{C}$]

Ferrita	713,88	Perlita	468,56	Bainita	281,39
---------	--------	---------	--------	---------	--------

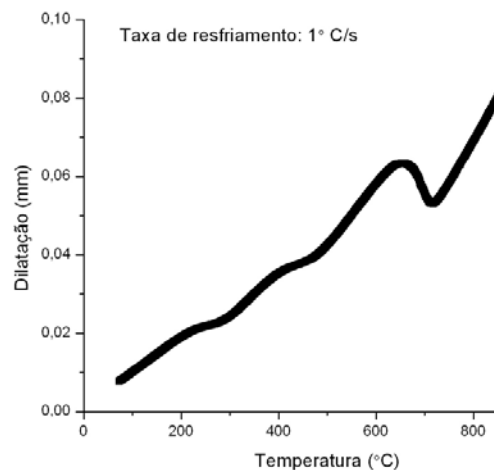


Figura 10 – Curva do ensaio de dilatometria para $T_r = 1$ $^{\circ}\text{C/s}$

Na Figura 11 apresenta-se a micrografia do ensaio de dilatométrica para a taxa de resfriamento de 1°C/s que consiste de 40% de ferrita, 35 % de perlita e 25 % de bainita granular. A microdureza do microconstituente bainita encontrada é de 381 Hv, não deixando dúvida quanto a denominação de bainita granular.

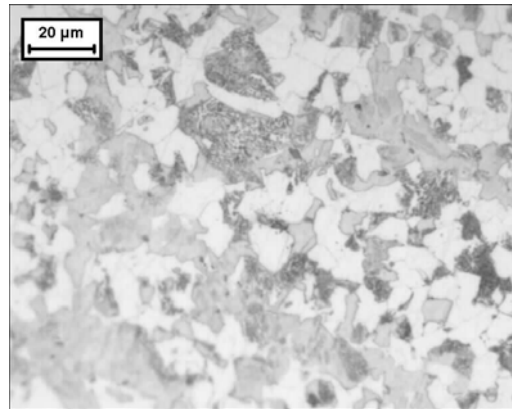


Figura 11 – Microestrutura do ensaio de dilatométrica para $Tr = 1^\circ C/s$

O tamanho de grão ferrítico para cada ponto foi calculado com base no tamanho de grão austenítico obtido apenas na simulação numérica, houve uma boa aproximação do valor calculado com o obtido no ensaio experimental (em torno de 20 a 50 μm para $Tr = 1 [^\circ C/s]$) e então é calculada a tensão de escoamento pela expressão (4). A comparação dos valores entre tensão de escoamento obtida das peças forjadas com a tensão de escoamento calculada é apresentada na Figura 12.

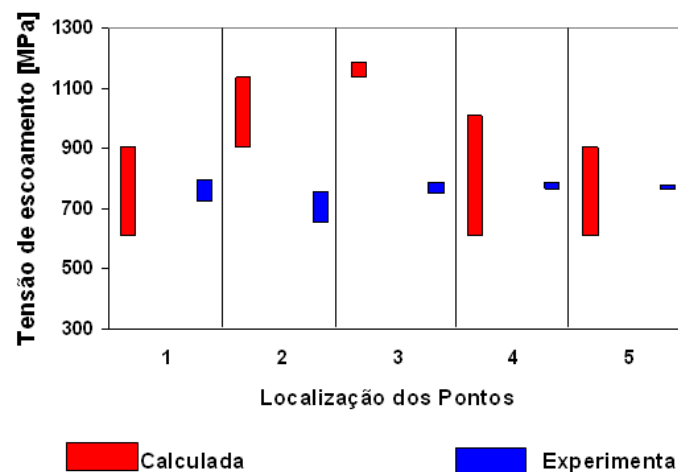


Figura 12 – Comparação entre as tensões de escoamento [MPa]

A predição da tensão de escoamento apresentou uma boa reprodutibilidade nos pontos 1, 4 e 5 com os valores obtidos experimentalmente. Houve uma dispersão para o ponto 2, possivelmente devido a alta densidade de nós na determinação do tamanho de grão austenítico e para o ponto 3 houve possivelmente um refinamento do tamanho de grão austenítico, anteriormente já mencionado.

Importante entender que essa previsão auxilia na orientação para tomada de decisões antes do processo de conformação industrial permitindo conhecer as condições de heterogeneidade das propriedades mecânicas para o produto forjado.

4 CONCLUSÃO

A simulação do aço DIN 16MnCr5 MOD em condições de conformação a quente com alta taxa de deformação com o software MSC.Superform reproduziu satisfatoriamente os valores obtidos experimentalmente do tamanho de grão austenítico e na previsão da tensão de escoamento, possibilitando a utilização desse procedimento na previsão do comportamento microestrutural de peças conformadas a quente nesse material e no equipamento em questão.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer em especial o Dr. Balancin, pela realização dos ensaios de torção e ao Dr. Gedeon e ao técnico Rover pela ajuda nos ensaios.

Também gostariam de agradecer a Gerdau pela disponibilidade de ensaios na Gleeble, especialmente ao engenheiro Sérgio Carpanzano e ao engenheiro Luis Rogério Mahl.

REFERÊNCIAS

- 1 YADA, H.; MATSUZU, N.; NAKAJIMA, K.; WATANABE, K.; TOKITA, H. Strength and Structural Changes under High Strain Rate Hot Deformation of C Steels. Transactions of Iron and Steel Institute of Japan. Vol. 23, nº2. Pág.100-109. 1983.
- 2 GENTILE F.C.; NEVES F.O.; REGONE W.; BUTTON S.T. Análise Numérica e Experimental da evolução microestrutural em forjamento a quente de um aço microligado ao V-Ti. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CEBEMAT). 2002
- 3 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. XXVI SENAFOR, pág. 171 a 186, 2006
- 4 SINCZAK, J. MAJTA, J. GLOWACKI, M. PIETRZYK, M. Prediction of mechanical properties of heavy forgings. Journal of Materials Processing Technology 80-81 (1998) 166-173
- 5 CABALLERO, F.G.; Modelización de Las Transformaciones de Fase en Calentamiento Continuo de aceros con Microestructura Inicial de Ferrita, Perlita y Ferrita-Perlita. Tese (doctorado) Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, 1999.
- 6 ASM HANDBOOK – Heat treating. ASM International, vol 9, 1991.
- 7 TERMOMECC – Laboratório de Tratamentos Termomecânicos – Departamento de Materiais – Universidade Federal de São Carlos – Disponível em: <<http://www.dema.ufscar.br/termomecc/olab.html>>. Acesso em 10 de janeiro de 2007.
- 8 NTA - NEUMAYER-TEKFOR - Disponível em: < <http://www.neumayer-tekfor.com.br> >. Acesso em 10 de janeiro de 2007.
- 9 GERDAU - Disponível em: < <http://www.gerdau.com.br/port/index.asp> >. Acesso em 10 de janeiro de 2007.
- 10 GRASS, H., KREMPASZKY, C., REIP, T., WERNER, E. 3-D Simulation of Hot Forming and Microstructure Evolution. Computational Materials Science. Vol 28. Pág 469-477. 2003.