

X ENCONTRO ACADÊMICO

MODELAGEM COMPUTACIONAL

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE AUSTÊMPERA NO FERRO FUNDIDO NODULAR

Vinícius José de Carvalho Menezes

Gláucio Soares da Fonseca

viniciusjcm@hotmail.com

glaucio@metal.eeimvr.uff.br

Universidade Federal Fluminense - EEIMVR

Av. dos Trabalhadores, 420, Vila Santa Cecília, 27255-125, Rio de Janeiro, Volta Redonda, Brasil

Resumo. Os ferros fundidos são ligas amplamente utilizadas na engenharia dado seu baixo custo de produção e propriedades mecânicas adequadas para diversas aplicações. Dentre os principais tipos de ferro fundido, tem-se o nodular, que apresenta grafita esferoidal gerada por tratamentos ainda em fase líquida, sendo conhecido pela excelente ductilidade e tenacidade em relação às demais ligas. Através do tratamento térmico de austêmpera, no qual se aquece o material até a austenitização com posterior resfriamento controlado, propriedades do ferro fundido nodular como resistência mecânica e ductilidade podem ser aprimoradas. Contudo, a realização do processo de austêmpera tem como consequência secundária variações dimensionais indesejáveis na peça, que se tornam um problema sempre que pequenas tolerâncias devam ser satisfeitas. Prever essas variações é, portanto, fundamental para evitar gastos desnecessários com usinagens após a realização do tratamento. Esse trabalho apresenta a reprodução e análise de um modelo de variação dimensional pelo método dos elementos finitos desenvolvido em Abaqus®, a fim de quantificar e prever a influência dos parâmetros de tratamento térmico nas dimensões finais de peças tratadas. Os resultados são posteriormente comparados e validados através de dados experimentais obtidos de amostras de ferro fundido nodular.

Palavras-chave: Ferro Fundido Nodular, ADI, Austêmpera, Elementos Finitos, Modelo de Variação Dimensional

1 INTRODUÇÃO

Os ferros fundidos, antes considerados materiais com pouca aplicabilidade na engenharia por sua fragilidade e baixas propriedades mecânicas, atualmente possuem vasto campo de utilização nos mais variados segmentos e se tornaram indispensáveis no âmbito industrial. Esse novo olhar em relação aos ferros fundidos ocorreu devido aos avanços em tecnologia e pesquisa que proporcionaram melhoria nas técnicas e métodos de obtenção e alteração da estrutura desses materiais.

Dentre os principais tipos de ferros fundidos, destaca-se o nodular, cuja relevância industrial vem de suas propriedades mecânicas vantajosas aliadas a excelente ductilidade e de sua facilidade de fundição que o tornam uma alternativa atrativa na substituição de aços forjados tradicionais. Não bastasse todas as vantagens já citadas, sua resistência mecânica pode ainda ser maximizada por meio da realização do tratamento térmico conhecido como austêmpera.

Apesar dos benefícios gerados pelo tratamento térmico no ferro fundido nodular para ajuste de microestrutura final e propriedades mecânicas, a austêmpera provoca indesejável variação dimensional na peça submetida ao tratamento. A variação de dimensões lineares específicas deve ser levada em conta para garantir que a peça esteja dentro das tolerâncias requeridas em projeto. Prever a variação dimensional que a peça tratada apresentará é, portanto, fundamental para garantir a realização de usinagens antes da peça ser tratada sob melhores condições de usinabilidade, evitando assim gastos desnecessários após o tratamento. Alguns modelos foram propostos exatamente para tentar realizar essa previsão de forma qualitativa e quantitativa.

Dentre os modelos mais conhecidos, destaca-se o de Dai Pra *et. al.* (2005) que apresenta uma abordagem por redes neurais para treinamento de dados obtidos experimentalmente e correlação desses com as variações dimensionais medidas. Outro modelo mais recente que também se mostra bastante apropriado para realizar as estimativas é o de Boccardo *et. al.* (2014), que realiza o modelamento em *software* para análise pelo método dos elementos finitos baseado em problemas térmicos, mecânicos e metalúrgicos acoplados.

Baseado nesses estudos, este artigo apresenta um modelo termomecânico desenvolvido em *Abaqus®* para previsão das variações dimensionais longitudinais de uma amostra de ferro fundido nodular, ocasionadas por um possível tratamento térmico de austêmpera e posterior comparação dos resultados obtidos via simulação com os encontrados de forma experimental, por meio de aparelho dilatômetro e amostras ainda em estado bruto de fusão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

No estado fundido, o ferro nodular apresenta estrutura tipicamente composta de matriz perlítica e grafita esferoidal, mas também pode conter ferrita e cementita em estado livre (Chiaverini, 1990). Existem diversas aplicações para o ferro nessa condição puramente fundida, sejam elas na produção de peças ou componentes mecânicos. Contudo, nesse estado bruto, a liga pode não apresentar propriedades mecânicas satisfatórias para muitas outras aplicações nas quais deseja-se uma maior resistência ou ductilidade. Dessa forma, faz-se necessário um tratamento térmico posterior à fundição para garantir tais propriedades no material.

No tratamento térmico conhecido como austêmpera, ocorre a transferência de carbono para a matriz austenitizada pelo aquecimento entre 850 e 930 °C. Por se tratar de um tratamento isotérmico, requer um estrito e preciso controle de tempo e temperatura. O tempo de austenitização varia de duas a quatro horas, de acordo com a secção a ser tratada, para a

máxima solubilização do carbono. Já o resfriamento é interrompido para a geração de uma fase isotérmica prolongada. A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático da austêmpera com o resfriamento e passo isotérmico definidos para o tratamento.

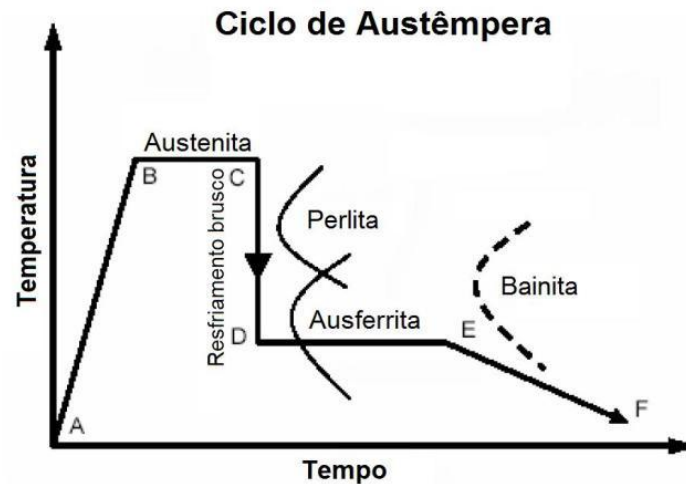


Figura 1: Ciclo do tratamento térmico de austêmpera. Adaptado de Hayrynen, 2002

Os parâmetros de tratamento térmico de austêmpera utilizados tanto na parte experimental quanto na simulação computacional do presente artigo foram os de Grau IV segundo a norma ASTM A297 e são apresentados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1: Ciclo de tratamento térmico

Parâmetros de Tratamento	Valor
Temperatura de Austenitização (°C)	930
Tempo de Austenitização (s)	7200
Temperatura de Austêmpera (°C)	280
Tempo de Austêmpera (s)	2400

2.1 Procedimento Experimental

A amostra cilíndrica de estudo do presente trabalho foi previamente cortada e usinada a partir de uma barra de ferro fundido nodular em estado bruto de fusão. As dimensões finais da amostra obtida foram de 24,64 mm de comprimento por 8,01 mm de diâmetro, medidas por micrômetro externo analógico ZAAS com resolução de 0,01 mm e exatidão de 0,003 mm.

Para a obtenção das deformações longitudinais causadas ao longo do tempo pelo tratamento térmico de austêmpera, optou-se pela simulação deste procedimento através do uso de um aparelho dilatômetro de ensaio, que aqueceria a amostra de maneira semelhante ao tratamento térmico com a vantagem de garantir o preciso controle de temperatura por termopares e a resposta no tempo de todas as deformações sofridas pela amostra.

O modelo de dilatômetro utilizado no ensaio foi o DIL 402 C, fabricado pela NETZSCH e a taxa de aquecimento foi mantida em 15 °C/min, para que não ocorresse variação suficiente de temperatura entre o termopar da amostra e o termopar do forno do equipamento, capaz de interromper o procedimento. Os demais parâmetros como temperatura e tempo de austenitização foram os mesmos apresentados na Tabela 1 e a temperatura inicial escolhida de 30 °C.

Uma vez que o modelo de dilatômetro utilizado não possui sistema de resfriamento próprio, houve a impossibilidade da realização de resfriamento brusco durante o experimento e a curva de tratamento térmica foi replicada apenas até o fim da completa austenitização, não contemplando o restante do processo. Essa limitação experimental, porém, não interferiu na qualidade dos resultados já que os dados obtidos foram mais que suficientes para a posterior validação do modelo simulado.

O tempo de ensaio até a temperatura de austenitização foi de 1 hora e o tempo de ensaio total durou cerca de 3 horas.

2.2 Modelo e Simulação

O modelamento e o desenho 3D do corpo de prova foram baseados nas mesmas dimensões e propriedades da amostra utilizada na parte experimental do trabalho, a fim de reproduzir as mesmas condições do ensaio para a correta comparação dos dados finais. Tanto as dimensões quanto as propriedades foram inseridas com suas unidades no SI, e o módulo de elasticidade, calor específico e condutividade térmica tiveram suas entradas dependentes da temperatura obtidas a partir do trabalho numérico e experimental de Dardati *et. al.* (2009) com ferro fundido nodular.

Os processos de transferência de calor por convecção e radiação foram implementados por meio de curvas de temperatura ao longo do tempo replicando as alterações de temperatura sofridas durante o tratamento térmico de austêmpera pela amostra. Estas curvas entraram como amplitudes durante a criação das interações. O passo único adotado na simulação apresentou a mesma duração do ensaio e incremento de 300 segundos.

Em relação a malha que pode ser observada na Figura 2, optou-se por geometria de malha do tipo hexagonal, interpolação linear, elemento de temperatura e deslocamentos acoplados, com controle de curvatura e máximo fator de desvio de 0,1 nas bordas e aproximadamente 0,5 mm de tamanho global, gerando um total de 15190 elementos.

Terminada a elaboração da malha, deu-se início a execução da simulação com 8 núcleos de processamento simultâneos, com tempo total de 13 minutos. Todo o processo de modelamento e simulação mencionado acima foi realizado no software *Abaqus/CAE* versão 6.13-1, no *solver standard*.

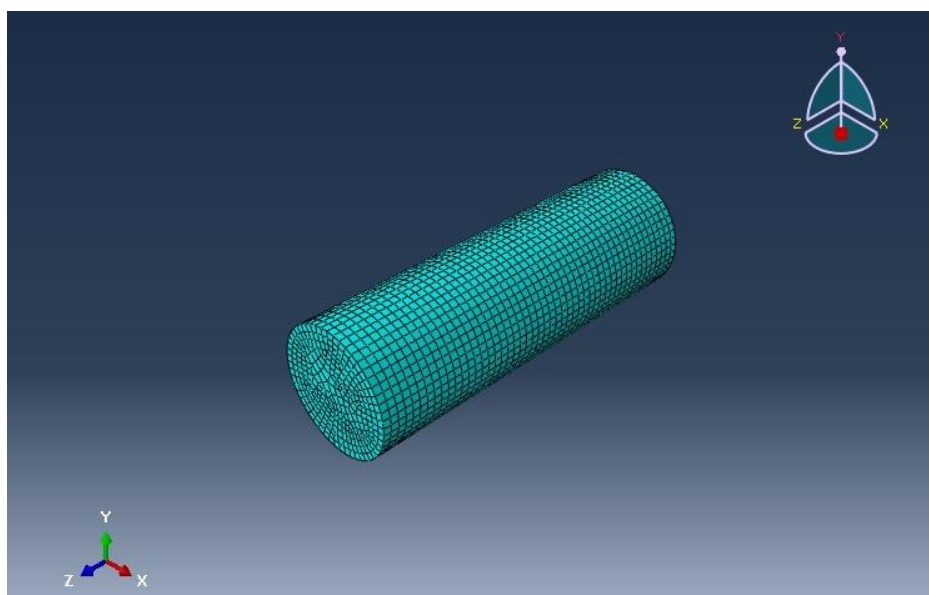


Figura 2: Malha utilizada no modelo simulado

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de deformação ao longo do tempo obtidos tanto na parte experimental quanto na simulação foram previamente tratados no software gráfico *OriginPro* para análise de dados e estatísticas desenvolvido pela OriginLab. O gráfico obtido após o tratamento de dados é apresentado a seguir na Figura 3, no qual a curva em preto representa os dados experimentais enquanto a resposta da simulação é dada pela curva em vermelho.

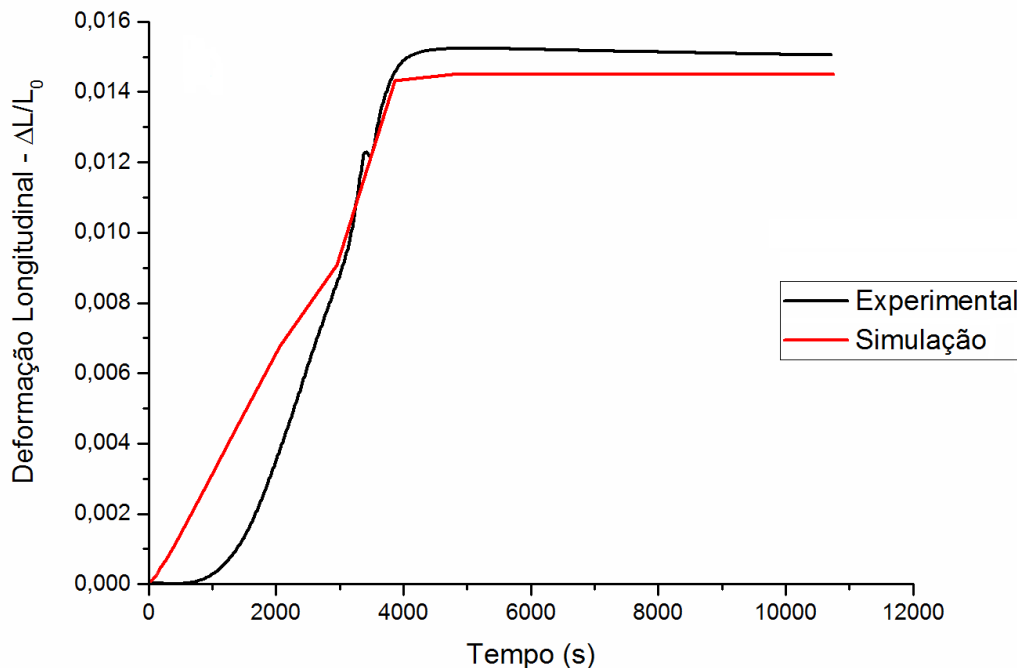


Figura 3: Gráfico de deformação longitudinal em função do tempo para o ferro fundido nodular obtido de forma experimental e através de modelo simulado

Analisando os resultados mostrados na Figura 3 é possível perceber um comportamento semelhante das curvas em questão. Ambas apresentam uma crescente inicial de deformação linear com a mesma praticamente se estagnando durante a parte isotérmica do processo, ao chegar aos 930 °C por volta de 3600 segundos de ensaio. O início da curva experimental apresenta um patamar horizontal não encontrado na simulação, provavelmente gerado por folgas oriundas do dilatômetro utilizado e de imperfeições na superfície da amostra.

Além disso, foi realizado o ajuste linear dos dados observados na primeira porção da curva experimental da Figura 3 utilizando o método dos mínimos quadrados. Com o auxílio da Eq. (1), obteve-se então o coeficiente de dilatação térmica linear da amostra que é apresentado juntamente com o da simulação, na Tabela 2. Os valores máximos de deformação encontrados para os dois casos também são comparados na mesma tabela.

$$\Delta L = L_i \alpha \Delta T \quad (1)$$

Onde ΔL é a variação de comprimento, L_i é o comprimento inicial da amostra, ΔT é a variação de temperatura e α o coeficiente de dilatação térmica linear.

Tabela 2: Comparação entre dados experimentais e simulados

	Experimental	Simulação
Coefficiente de dilatação térmica linear, α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$1,27 \times 10^{-5} \pm 0,01$	$1,30 \times 10^{-5}$
Deformação máxima	$1,52 \times 10^{-2} \pm 0,01$	$1,48 \times 10^{-2}$

Para complementar a análise dos dados, foram realizados dois cálculos de erro percentual entre as curvas tanto na porção inicial, baseado na maior diferença entre valores, quanto na porção final, que é a região de interesse para o estudo da deformação. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores de erro para deformação entre dados experimentais e simulados

	Erro (%)
Porção inicial das curvas	26,86
Porção final das curvas	2,63

O erro maior obtido entre as curvas na porção inicial já era esperado devido às diferenças na superfície da amostra lixada que alteram o resultado até o completo assentamento no ensaio. Por mais que seja considerado um erro elevado, porém, pode ser desconsiderado uma vez que a parte de interesse é a final isotérmica. Essa, por sua vez, apresentou erro de apenas 2,63 % entre os valores de ensaio e os simulados.

Conforme observado na Tabela 2, os dados experimentais de dilatação térmica e deformação máxima se apresentaram próximos aos obtidos na simulação realizada, o que, juntamente com a comparação das curvas através do cálculo de erro percentual disponível na Tabela 3, possibilita validar de forma satisfatória o modelo proposto no presente trabalho.

4 CONCLUSÃO

O uso do dilatômetro como equipamento para procedimento experimental mostrou-se como uma alternativa eficaz em relação ao forno industrial de tratamento térmico para a aquisição dos dados de deformação, garantindo um número significativo de dados para a posterior comparação com o modelo simulado.

Em relação às variáveis de ensaio, a taxa de aquecimento escolhida foi suficiente para garantir a mínima diferença entre os termopares, possibilitando a execução completa do ensaio e a falta de um sistema de resfriamento não apresentou influência nos resultados finais.

O modelo desenvolvido representou de forma satisfatória o tratamento térmico em questão, considerando os processos de troca de calor por convecção e radiação entre o forno e a amostra, além de contar com uma malha refinada e adequada ao estudo e tempo de execução de simulação otimizado, de cerca de apenas 13 minutos.

Por fim, os dados simulados foram comparados aos experimentais e mostraram consistência, coesão e semelhança com a realidade. Não apresentaram nenhuma discrepância

evidente, o que pode garantir, de fato, a validação do modelo proposto para avaliação de deformações em peças de ferro fundido nodular austemperadas.

Agradecimentos

Ao professor Gláucio Soares da Fonseca pela orientação e participação no processo de confecção do experimento. Ao empenho e dedicação dos técnicos Célio e Bonifácio, pela usinagem das amostras e ensaio no dilatômetro, respectivamente. Ao apoio financeiro e concessão de bolsa pela CAPES e à Universidade Federal Fluminense - EEIMVR pela estrutura e equipamentos que possibilitaram a realização desse artigo.

REFERÊNCIAS

- Boccardo, A. D.; Sosa, A. D.; Echeverría, M. D.; Dardati, P. M.; Celentano, D. J.; Godoy, L. A., 2014. *Numerical simulation of dimensional change during austempering heat treatment in ductile cast iron. 10th International Symposium on the Science and Processing of Cast Iron - SPCI10.*
- Chiaverini, V., 1990. Aços e ferros fundidos. Sexta Edição. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.
- Dai Pra, A. L.; Echeverría, M. D.; Scandurra, A.; Moncada, O.; Sikora, J., 2005. *Dimensional change prediction in austempered ductile iron parts using fuzzy modelling. Latin American Applied Research.* Vol. 35, p. 197-204.
- Dardati, P.M.; Celentano, D. J.; Godoy, L. A.; Chiarella, A. A. and Schulz, B. J., 2009. *Analysis of ductile cast iron solidification: numerical simulation and experimental validation,* Int. J. Cast Met. Res., 22, (5), 390–400.
- Guesser, W. L., 2009. Propriedades mecânicas dos ferros fundidos. Primeira Edição. São Paulo: Editora Blucher.
- Hayrynen, K. L., 2002. *The Production of Austempered Ductile Iron (ADI). World Conference on ADI.*
- Silva, C., 2005. Influência do número de nódulos de grafita nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular austemperado. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.