

USO DE SIMULAÇÕES MATEMÁTICAS DE PROCESSOS NO ENSINO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Antonio Augusto Gorni¹ e Regina Zayat Gorni²

Abstract — O atual ensino de engenharia deve, tanto quanto possível, promover a familiarização dos alunos com os processos industriais que eles encontrarão ao desempenhar sua profissão. Uma das maneiras mais eficazes de lhes ensinar as correlações entre os parâmetros desses processos e seus resultados finais está na execução orientada de programas computacionais que simulem fidedignamente tais processos. Este artigo mostra dois exemplos práticos desse tipo de abordagem na engenharia de materiais, mais especificamente na laminação a quente de aços. Um deles consiste no cálculo do balanço térmico de um forno para reaquecimento de placas destinadas à laminação a quente de chapas. O segundo trata da determinação da evolução microestrutural de aços processados num laminador de tiras a quente. Para que tal abordagem seja bem sucedida o professor deve garantir a representatividade e consistência tanto dos modelos matemáticos como dos dados empregados nas simulações matemáticas.

Palavras-Chave — Engenharia de Materiais, Laminação a Quente, Modelo Matemático, Simulação

INTRODUÇÃO

As vertiginosas e contínuas mudanças tecnológicas, econômicas e políticas do mundo moderno também devem se refletir no ensino de engenharia de forma que seus alunos tenham plenas condições de enfrentar um mercado extremamente competitivo e que apresenta condições de trabalho altamente mutáveis. As sugestões para se atingir esse objetivo são das mais variadas, incluindo-se aí a famosa abordagem sobre “ensinar como se deve aprender”, já que o aprendizado contínuo é uma realidade que parece ter vindo para ficar.

Entre esses vários avanços que vêm se verificando no ensino de Engenharia pode-se incluir o uso de simulações computacionais de processos industriais e sua aplicação na sala de aula. A aplicação de interfaces gráficas amigáveis e interativas permite que tais simulações sejam executadas sem entediar o aluno. Dessa forma podem ser feitos exercícios extensivos que têm como objetivo demonstrar o efeito de variações nos parâmetros de processo sobre seu resultado final. O objetivo aqui é familiarizar o aluno com a realidade que encontrará no chão de fábrica enquanto ele ainda se encontra na escola. Isso contribuirá para que seu

período de integração técnica na empresa seja encurtado, fazendo com que o recém-formado rapidamente se torne útil à empresa.

Obviamente este é um campo muito vasto, dadas as várias modalidades de engenharia existentes e a miríade de processos industriais associados em cada uma delas. Este artigo mostrará como exemplo de simulação industrial dois casos ligados à engenharia de materiais, mais especificamente sobre laminação a quente de aços: o balanço térmico de fornos e a evolução microestrutural observada ao longo da laminação de tiras a quente.

BALANÇO TÉRMICO DE FORNOS

O balanço térmico é uma das ferramentas mais eficazes para se diagnosticar o nível de desempenho energético para qualquer tipo de forno. Como se sabe, ele nada mais é do que a identificação de todas as fontes de entrada e saída de calor de um determinado forno, juntamente com os respectivos cálculos de sua magnitude. Sua aplicação na área siderúrgica é mais comum em altos-fornos e conversores LD, onde é parte obrigatória do próprio processo metalúrgico. Em outras aplicações, como no caso dos fornos de reaquecimento usados em laminações, ele é relegado a segundo plano, pois já não é vital ao processo. Além disso, a quantidade de energia envolvida é menor, particularmente quando se trata de fornos de tratamento térmico e recozimento. Contudo, a não-execução do balanço térmico faz com que se perca uma excelente oportunidade para se fazer uma auditoria contínua no forno do ponto de vista energético, identificando seus pontos fracos e até quantificando os ganhos decorrentes de sua eliminação. E, obviamente, ganhos energéticos se refletem na lucratividade da empresa, como também ajudam a poupar recursos não-renováveis e reduzem o nível de agressão ao meio ambiente.

Como se pode observar, todas essas vantagens decorrentes do cálculo do balanço térmico de um forno tornam sua simulação dentro de um curso de engenharia de materiais bastante interessante. Neste trabalho será apresentado um exemplo desse cálculo para fornos de reaquecimento de placas a serem processadas por laminação a quente numa usina siderúrgica integrada.

Como se sabe, a laminação a quente de produtos planos inicia-se com o reaquecimento de placas até uma temperatura da ordem de 1200°C. Cada placa de aço - na verdade uma chapa extremamente grossa, com espessura

¹ Antonio Augusto Gorni, UniFEI – Centro Universitário da FEI, Av. Humberto Alencar Castelo Branco, 3972, 09850-901, São Bernardo do Campo SP, Brasil, agorni@iron.com.br

² Regina Zayat Gorni, Unilus – Centro Universitário Lusíada, Rua Batista Pereira 265, 11015-100, Santos SP, Brazil, rzayat@iron.com.br

entre 180 e 250 mm - pesa tipicamente entre 8 e 12 toneladas. Cada forno de reaquecimento possui capacidade de reaquecer até 100 toneladas de placas por hora, o que dá uma idéia da enorme quantidade de energia envolvida no processo.

Nos fornos de reaquecimento de placas as fontes de calor disponíveis para o processo são basicamente a queima de combustível, o ar pré-aquecido da combustão e o calor decorrente da formação de carepa na placa. Já as saídas de calor ocorrem através das próprias placas reaquecidas, pelos fumos aquecidos que saem pela chaminé, a água de refrigeração dos skids, o calor irradiado pelas paredes do forno e outras perdas menores. As equações necessárias foram codificadas numa planilha Excel usando-se a linguagem de macro Visual Basic. Maiores detalhes sobre o desenvolvimento do algoritmo de cálculo desse balanço térmico podem ser encontrados em [1].

Os resultados de um balanço térmico típico de um forno de reaquecimento de placas, calculados a partir de dados industriais reais, podem ser vistos nas tabelas I e II.

TABELA I

ENTRADAS DE CALOR DE UM BALANÇO TÉRMICO EFETUADO NUM FORNO DE REAQUECIMENTO DE PLACAS.

Entradas de Calor	Mcal/t aço	%
Calor de Combustão do Gás	612,3	74,2
Calor Sensível do Ar	194,0	23,5
Calor de Formação da Carepa	18,7	2,3
Calor Sensível das Placas	0,0	0,0
TOTAL	824,9	100

TABELA II

SAÍDAS DE CALOR DE UM BALANÇO TÉRMICO EFETUADO NUM FORNO DE REAQUECIMENTO DE PLACAS.

Saídas de Calor	Mcal/t aço	%
Calor Absorvido pelas Placas	192,2	23,2
Calor Sensível dos Fumos	449,1	54,4
Calor de Refrigeração do Forno	138,2	16,8
Calor Perdido pelas Paredes	33,7	4,1
Outros	11,6	1,4
TOTAL	824,9	100

Já nesta primeira demonstração há várias informações técnicas muito úteis e interessantes para os alunos. Como seria de se esperar, a maior contribuição ao aquecimento veio da combustão, com 612 Mcal/t de aço reaquecido, o que corresponde a 74% do aporte térmico total. O calor sensível do ar de combustão veio em segundo lugar, com 194 Mcal/t ou 24% do total. A contribuição da reação exotérmica de oxidação do ferro foi mínima, 19 Mcal/t ou aproximadamente 2% do total. Portanto, o aporte térmico específico foi de 825 Mcal/t de aço.

A análise sobre as saídas de calor revelou um resultado intrigante: a maior parte do calor - 449 Mcal/t de aço ou

54% do calor total fornecido - saíram na forma de fumos aquecidos! Somente 192 Mcal/t de aço (apenas 23% do calor total) realmente foram aproveitados de forma útil, ou seja, no reaquecimento das placas de aço até 1200°C. Além disso, 138 Mcal/t (17%) são levados pelo sistema de refrigeração do forno e 34 Mcal/t (4%) são irradiados pelas paredes do forno para o ambiente externo. Como se pode observar, ainda se faz necessário um grande trabalho de engenharia para se melhorar o rendimento energético desses fornos. O maior desafio aqui consiste na identificação de aperfeiçoamentos economicamente compatíveis com a atual realidade industrial e econômica.

Os efeitos dos diversos parâmetros técnicos e operacionais sobre o desempenho térmico do forno de reaquecimento de placas foram determinados a partir de múltiplas execuções do software de balanço térmico aqui descrito. Cabe aqui ao professor orientar os alunos sobre quais parâmetros devem ser alterados e como a modificação deve ser executada, como num verdadeiro trabalho de diagnose técnica. A tabela III mostra resumidamente as oportunidades para economia de energia que foram identificadas e hierarquizadas dessa forma.

TABELA III

OPORTUNIDADES PARA ECONOMIA DE ENERGIA IDENTIFICADAS E HIERARQUIZADAS PELAS SIMULAÇÕES EFETUADAS USANDO-SE A PLANILHA DO BALANÇO TÉRMICO.

Alteração	1º Caso [Mcal/t]	2º Caso [Mcal/t]	Redução [Mcal/t (%)]
Taxa ar-gás 7:1	612	477	135 (22)
Placa a 250°C	612	514	98 (16)
Placa a 400°C	612	447	159 (27)

Já foi identificada neste estudo específico a perda significativa de calor através dos fumos que saem pela chaminé. Os dados coletados para o cálculo deste balanço térmico revelaram o uso de uma relação média ar-gás combustível igual a 12,8:1 durante a operação do forno. Trata-se de um valor exageradamente alto, pois sabe-se que uma boa combustão do gás de coqueria normalmente usado como combustível nas siderúrgicas integradas requer que a relação ar-combustível se situe entre 6,5:1 e 7:1. Ao se recalcular um balanço térmico hipotético, assumindo-se uma relação ar-combustível de 7:1 e todas as demais condições constantes ocorre, em primeiro lugar, um considerável aumento da eficiência do equipamento: o calor derivado da queima de combustível cai de 612 para 477 Mcal/t - ou seja, uma apreciável redução de 22% no consumo energético! De fato, as quantidades de calor que saem contidas nas placas reaquecidas e nos gases de combustão passam a ficar praticamente iguais, evitando o sério desbalanceamento verificado anteriormente: 192 Mcal/t (33%) e 207 Mcal/t (36%), respectivamente.

Uma conseqüência colateral é a ligeira queda na participação do calor sensível do ar de combustão pré-aquecido no aporte térmico ao forno, que passou para 83

Mcal/t (14%), pois agora é necessária menor quantidade de ar para a combustão. Aqui há um benefício secundário, mas não desprezível: menores vazões de ar de combustão significam menor consumo de energia elétrica nos sopradores de ar, além de menor esforço (e correspondente desgaste) nesse equipamento. Por outro lado, a combustão teria de ser monitorada com mais cuidado, uma vez que passaria a haver uma menor disponibilidade de oxigênio. Uma eventual elevação no poder calorífico inferior da mistura gasosa combustível poderia produzir combustão incompleta, com liberação de fumaça preta pelas chaminés. Esta ocorrência leva a risco de multa pelas entidades que fiscalizam a emissão de poluentes.

O enforamento a quente de placas – ou seja, sua introdução no forno de reaquecimento imediatamente após sua produção na máquina de lingotamento contínuo – também é outra contramedida que pode garantir boa economia de energia, apesar do grande problema que representa em termos de planejamento de produção e logística. Por exemplo, o enforamento de placas a 250°C, um objetivo relativamente modesto, reduziria o calor necessário para o aquecimento das placas de aço de 192 Mcal/t para 164 Mcal/t; em termos globais, o consumo energético do forno cairia de 612 Mcal/t para 514 Mcal/t, ou seja, uma queda de 16%. A economia de energia seria ainda maior se o enforamento fosse realizado a 400°C: o consumo energético cairia para 447 Mcal/t.

Ainda há várias outras possibilidades para se reduzir o consumo energético como, por exemplo, aumentando-se a temperatura do ar fornecido para a combustão. Outra possibilidade a ser considerada seria a redução da quantidade de calor extraída do forno pelo seu sistema de refrigeração, que é função do jogo entre a vazão e as temperaturas inicial e final da água que circula em seu interior. Ambas as sugestões requerem grandes alterações em termos de equipamento; portanto, a solução desse exercício requereria também um estudo sobre os custos ligados à implementação das modificações que se fariam necessárias.

EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL NA LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE

As propriedades mecânicas de chapas laminadas a quente dependem primordialmente de sua microestrutura ou, mais precisamente, de seu tamanho de grão. Esta, por sua vez, é função da composição química do material e também é grandemente influenciada pelos parâmetros usados no seu processo de laminação a quente. Por esse motivo já foram elaborados diversos modelos matemáticos para se correlacionar os parâmetros aplicados na laminação a quente com as características obtidas no produto final [2,3].

Um desses modelos matemáticos, próprio para o processo de laminação de tiras a quente [2], foi tomado como base para o desenvolvimento de uma planilha Excel acoplada a uma macro escrita em Visual Basic. Este

algoritmo de cálculo determina a evolução do tamanho de grão austenítico durante a laminação a quente de um esboço plano de aço ao carbono-manganês num trem acabador constituído de seis cadeiras de laminação, bem como o correspondente tamanho de grão ferrítico conseguido no material ao final do processo.

Esse modelo matemático permite que se determine, de forma quantitativa, o efeito de diversos parâmetros de processo na evolução microestrutural do material. Entre esses parâmetros se encontram:

- Temperatura de início de laminação;
- Tamanho de grão inicial do esboço;
- Esquema de passes;
- Velocidade de laminação;
- Grau de deformação total placa/tira;
- Evolução da temperatura durante a laminação a quente;
- Temperatura final de laminação;
- Taxa de resfriamento imposta ao laminado ao final da laminação a quente.

Observa-se a partir daqui que há um grande campo de exploração para os estudantes da área de metalurgia de materiais, já que os parâmetros podem ser modificados de forma isolada ou em combinações, permitindo a determinação de seus efeitos sobre a microestrutura do material. Em função das limitações de espaço, serão aqui discutidas apenas algumas das possibilidades que este programa oferece para desenvolver esse tipo de exercício.

O primeiro exemplo a ser visto mostra o efeito da deformação total sobre a evolução do tamanho de grão austenítico da tira a quente. A figura 1 mostra essa evolução para dois laminados, cada um com espessura diferente (2,3 mm e 9,8 mm), laminadas a partir de esboços com a mesma espessura inicial (30 mm).

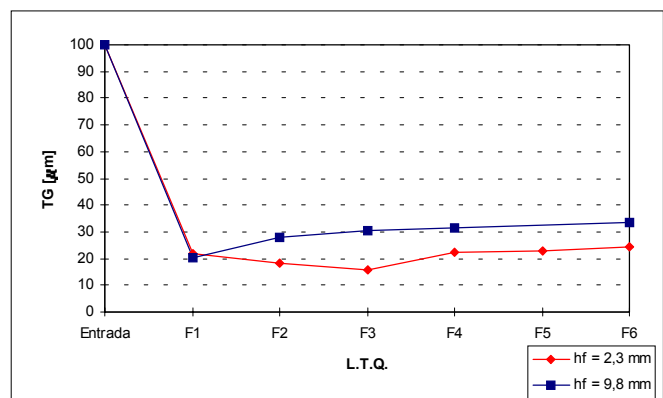


FIGURA 1

EVOLUÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO AO LONGO DA LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE PARA DOIS ESBOÇOS, CADA UM COM ESPESSURA DIFERENTE (2,3 MM E 9,8 MM).

Pode-se observar que ambos os laminados apresentaram tamanho de grão similar na primeira cadeira de laminação (F1), da ordem de 20 a 22 µm. Esse valor é bem menor que o tamanho de grão inicial (100 µm). Este significativo refino

de grão pode ser atribuído ao fenômeno da recristalização dinâmica: o encruamento na microestrutura provocado pela deformação a quente é eliminado no próprio momento em que ela é aplicada. Esse fenômeno é favorecido pelas condições típicas de conformação a quente aplicadas nessa cadeira, ou seja, baixa velocidade de deformação e temperatura relativamente elevada do material.

A partir daí as evoluções de tamanho de grão observadas variam para os dois esboços. O material mais fino, com espessura de 2,3 mm, sofre deformações mais pesadas nas demais cadeiras; por esse motivo, passa novamente por recristalização dinâmica na segunda e terceira cadeiras (F2 e F3, respectivamente) o que contribuiu para refinar adicionalmente seu tamanho de grão. Nas demais cadeiras ocorre apenas recristalização estática parcial, o que levou a um ligeiro aumento no tamanho de grão. Já o laminado mais espesso, com espessura de 9,8 mm, apresenta leve crescimento de tamanho de grão já na cadeira seguinte (F2) e nas demais, devido ao menor grau de deformação nelas aplicado, o qual não foi suficiente para provocar a recristalização dinâmica. Dessa forma, neste caso só se verificou a ocorrência de recristalização estática entre uma cadeira de laminação e outra. Além disso, não foi aplicada deformação na quinta cadeira (F5).

Por esse motivo, houve ligeira diferença no tamanho de grão austenítico final dos dois materiais: 24 μm para a tira com 2,3 mm de espessura e 34 μm para o material com 9,8 mm - uma diferença de 42%. Após a transformação da austenita em ferrita, que ocorre durante o resfriamento do material após sua laminação e resfriamento forçado, houve grande diminuição nessa diferença: o tamanho de grão ferrítico desses materiais foi de 8 e 10 μm respectivamente, passando a diferença a 25%.

O efeito do tamanho de grão inicial sobre a evolução microestrutural do esboço que está sendo processado no Trem Acabador é um parâmetro de grande interesse metalúrgico. Se houver recristalização dinâmica na primeira cadeira, como foi o caso anterior, ele não influi na evolução do tamanho de grão do laminado durante sua conformação, uma vez que o tamanho de grão obtido na primeira cadeira de laminação (F1) independe de seu valor anterior. Contudo, ao se laminar chapas com espessura relativamente alta usando-se todas as cadeiras do Trem Acabador a redução por cadeira diminui, reduzindo-se as chances de ocorrência de recristalização dinâmica na primeira cadeira do trem. Neste caso o refino do tamanho de grão ocorre somente através de recristalização estática, que apresenta efeito bem menor nesse sentido.

Esta é a situação que será abordada no próximo exemplo, mostrado na figura 2. Trata-se de esboços com a mesma espessura inicial e final (30 e 4,9 mm, respectivamente) mas, que por algum motivo, apresentaram diferentes tamanhos de grão iniciais: 200 e 100 μm .

Ao contrário do que havia sido observado no caso anterior (ver figura 1), o refino de grão na primeira cadeira de laminação não foi tão radical, uma vez que aqui não

houve a ocorrência de recristalização dinâmica durante o processamento dos dois laminados. Por outro lado, no laminado com tamanho de grão inicial igual a 100 μm , as sucessivas recristalizações estáticas entre passes ao longo das várias cadeiras foram eficazes o suficiente para promover um grande refino de grão já na terceira cadeira (F3), tendo sido atingido um valor de tamanho de grão da ordem de 25 μm . No caso do laminado com tamanho de grão inicial de 200 μm o resultado obtido foi surpreendente: a recristalização estática observada após a laminação na primeira cadeira do trem acabador (F1) não foi completa. Em consequência desse fato o material foi conformado na segunda cadeira (F2) contendo ainda alguma deformação residual a qual, acumulada com essa nova deformação, permitiu a deflagração de recristalização dinâmica. Isso proporcionou intenso refino microestrutural a esse laminado, o que resultou na obtenção de um tamanho de grão menor do que o valor calculado para o outro material, invertendo a situação que estava sendo observada desde o início da laminação.

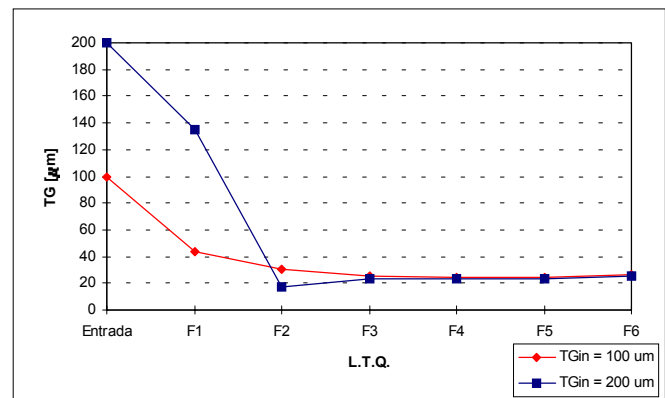


FIGURA 2

EVOLUÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO AO LONGO DA LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE PARA DOIS ESBOÇOS COM 4,9 MM DE ESPESSURA, MAS COM DIFERENTES TAMANHOS DE GRÃO INICIAIS (100 E 200 μm).

Essa nova tendência se manteve até o final da laminação, quando foram atingidos valores de tamanho de grão iguais a 26 e 25 μm para os laminados com tamanho de grão inicial igual a 100 e 200 μm respectivamente. Essa ligeira diferença desapareceu com a transformação da austenita para ferrita, quando o valor de tamanho de grão ferrítico de ambos os materiais situou-se por volta de 8 μm .

Como se pode observar, o uso de um modelo matemático integrado para a determinação da evolução microestrutural dos esboços processados no Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente é extremamente oportuno, uma vez que a complexidade dos fenômenos envolvidos pode gerar resultados contrários ao que se poderia supor em termos meramente conceituais. Neste caso é interessante que os alunos expliquem detalhadamente as causas que estão por trás da obtenção de resultados contraditórios ou

aparentemente inconsistentes, analisando detalhadamente o algoritmo de cálculo e os fundamentos físicos por trás dele.

CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou alguns exemplos do uso de modelos para a simulação de processos metalúrgicos no ensino de engenharia de materiais. Eles permitem o desenvolvimento de exercícios com o objetivo de fazer com que o aluno entenda melhor a correlação entre os parâmetros de processo aplicados e os resultados finais obtidos. Por outro lado, para que essa prática efetivamente alcance os objetivos propostos, cabe ao professor oferecer modelos e dados que sejam efetivamente representativos da prática industrial moderna, bem como orientar os alunos sobre como usá-los de forma racional e sistemática. Caso contrário os resultados obtidos estarão fora da realidade e contribuirão mais para confundir ao invés de orientar os alunos.

REFERÊNCIAS

- [1] GORNI, A.A. et al. Análise do Desempenho de Fornos para Laminação e Tratamento Térmico Através de Balanço Térmico. *XXIV Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades*, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 6 a 8 de agosto de 2002, São Paulo SP.
- [2] SICILIANO JR., F. et al. Mathematical Modeling of the Mean Flow Stress, Fractional Softening and Grain Size during the Hot Strip Rolling of C-Mn Steels. *ISIJ International*, vol. 36, n. 12, 1996, p. 1500-1506.
- [3] SICILIANO JR., F. et al. Mathematical Modeling of the Hot Strip Rolling of Microalloyed Nb, Multiply-Alloyed Cr-Mo, and Plain C-Mn Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 31^A, n. 2, 2000, p. 511-530.