

MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DO FORNO DE REAQUECIMENTO WB2 DA LTQ DA ACESITA

Luciano Lellis Miranda ¹

Márcio Ziviani ²

Benjamin Fullin Júnior ³

Resumo

Desenvolveu-se um modelo tridimensional de simulação do aquecimento de placas no forno de soleira caminhante da Laminação de Tiras a Quente da Acesita S.A. A equação da conservação da energia foi resolvida numericamente no interior das placas usando-se a técnica de diferenças finitas com formulação em Volumes de Controle. Estabeleceram-se condições de contorno de fluxos de calor radiantes e convectivos nas superfícies das placas. Dividiu-se o forno em vários segmentos, de acordo com o número de placas, dentro dos quais foram calculados estes fluxos de calor. Validou-se o modelo com dados medidos no forno em Junho/2002. As temperaturas dos gases e das paredes refratárias, na seção de recuperação do forno, foram calculadas através de balanço de energia em cada segmento. Os perfis de temperatura obtidos concordaram bem com dados medidos, com desvios entre 3 e 5%. A metodologia proposta apresenta uma boa alternativa para um obtenção dos perfis de temperatura nesta seção. O Modelo é uma importante ferramenta para estudo da influência de vários aspectos do processo e de ajustes necessários no modelo de controle "on-line" do forno.

Palavras-chave: Forno de reaquecimento; Modelagem matemática; Simulação numérica.

MATHEMATICAL MODELING OF THE WB2 REHEATING FURNACE OF THE ACESITA HOT STRIP MILL

Abstract

It was developed a three-dimensional Model to simulate the slabs reheating process in the walking beam furnace of the Acesita Hot Strip Mill. The energy conservation equation was numerically solved inside the slabs, by the finite difference technique with Control Volume formulation. It were determined the boundary conditions of radiant and convective fluxes in the slabs surfaces. The furnace was divided in several segments, according the number of slabs inside it. Inside each segment, the convective and radiant heat fluxes were calculated. The Model was validated with data measured in the furnace in June/2002. The temperatures of gases and refractory walls, in the furnace recuperative section, were determined by a global energy balance in each segment. The found temperature profiles showed good agreement with measured data, with deviations between 3 to 5%. The proposed methodology shows a good alternative to a better determination of the temperature profiles in this section. The Model is an important tool for theoretical studies of the influence of many aspects of the slabs reheating process and of the necessary adjustments in the on-line control model.

Key words: Reheating furnace; Mathematical modeling; Numerical simulation.

1 INTRODUÇÃO

O reaquecimento do material para a laminação a quente é uma das etapas críticas da produção de chapas e bobinas a quente. Esta fase é de extrema importância para obtenção de boas condições de laminação e de uma qualidade superficial adequada no produto final. Tudo isto deve ser obtido com a maior produtividade e o menor consumo energético possíveis.

A modelagem matemática permite de forma mais rápida e consideravelmente mais barata, o estudo de vários aspectos do processo de reaquecimento. Modelos físicos ou em escala industrial são na maioria dos casos de custos proibitivos e não conduzem isoladamente ao adequado conhecimento dos fenômenos envolvidos no processo.

A simulação do aquecimento de placas e tarugos em fornos de reaquecimento é uma linha de pesquisa abordada a mais de 20 anos. O Grupo de Análise e Modelagem de Sistemas e Equipamentos Térmicos (GAMSET) do Departamento de Engenharia

¹ Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia Mecânica (Calor e Fluidos) – Metalurgista de Processo na Gerência Técnica da Laminação de Tiras a Quente da ACESITA.

² Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia Mecânica – Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

³ Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia Mecânica (Calor e Fluidos) – Gerente na Gerência de Reaquecimento de Placas da Laminação de Tiras a Quente da ACESITA.

Mecânica da Escola de Engenharia da UFMG desenvolve pesquisas nesta área a vários anos, já tendo desenvolvido vários modelos de simulação de fornos industriais. A cada um deles, novas características foram sendo agregadas. O problema do aquecimento transiente de placas e tarugos foi inicialmente abordado de forma bidimensional, considerando as transferências de calor por radiação e convecção. Em um dos trabalhos mais recentes o modelo de aquecimento foi adaptado para simulação de paradas de produção e no mais recente uma abordagem tridimensional do problema foi adotada. Na maioria dos casos os modelos foram validados com dados da literatura e em alguns casos com dados experimentais.

O objetivo deste trabalho é descrever um modelo de simulação numérica, desenvolvido em conjunto com o GAMSET, para o forno de reaquecimento de placas Walking Beam 2 da Laminação de Tiras a Quente da Acesita S.A., em Timóteo – MG.⁽¹⁾ Neste forno são processados os mais variados tipos de aço, tais como inoxidáveis austeníticos, ferríticos e martensíticos; baixo, médio e alto carbono; carbono ligado; siliciosos GNO e GO.

2 PROCESSO DE AQUECIMENTO TRANSIENTE DE PLACAS

2.1 O Forno Walking Beam 2 da ACESITA

Os fornos de reaquecimento são utilizados na preparação do material para um trabalho a quente. Sua função principal é elevar a temperatura dos produtos semi-acabados (placas) para sua deformação no processo de laminação.

No forno de soleira caminhante a carga é suportada pelos *skids*. Os *skids* são compostos de tubos revestidos de material refratário, por onde circula água para refrigeração de todo o conjunto. Alguns destes *skids* são fixos e outros móveis. É através do movimento sucessivo dos *skids* móveis que a carga avança gradativamente ao longo do forno.

O forno em questão divide-se em quatro seções: recuperação, pré-aquecimento, aquecimento e encharque (Figura 1). Na seção de recuperação não existem queimadores e parte da energia contida nos gases de exaustão, provenientes das demais seções, é transferida para a carga por radiação e convecção. As zonas das demais seções são providas de queimadores, através dos quais entram no forno o combustível e o ar necessários à combustão.

As placas são enforadas na maior parte das vezes à temperatura ambiente e desenforadas depois de aquecidas a temperaturas entre 1080° C e 1280° C, dependendo do material processado. A capacidade nominal do forno WB2 é de 176 t/h e o combustível utilizado é o gás misto, composto de gás de alto forno enriquecido com GLP para 19,259 MJ/Nm.⁽²⁾ A saída para a



Figura 1. Corte longitudinal do Forno Walking Beam 2.

chaminé localiza-se logo abaixo da porta de enforamento, de tal modo que o escoamento dos gases de combustão ocorre em contracorrente ao deslocamento das placas.

2.2. O Processo de Reaquecimento de Placas (Modelo Matemático)

No processo de reaquecimento a transferência de calor no interior da placa se dá unicamente por condução. Nas superfícies das placas o processo é muito mais complexo, ocorrendo trocas de calor por radiação, convecção e condução. As trocas por radiação ocorrem entre as superfícies das placas, os gases, a chama e as superfícies refratárias do forno (paredes, postes e *skids*). As trocas por convecção ocorrem entre as superfícies das placas e os gases do interior do forno. A condução ocorre entre as superfícies das placas e as almofadas (contatos) dos *skids*.

O cálculo do aquecimento transiente da placa no interior do forno é obtido pela resolução da equação da conservação da energia, juntamente com a condição inicial e as condições de contorno.

Na resolução deste problema são feitas as seguintes hipóteses:

- o movimento da carga no forno ocorre de forma intermitente de acordo com passos de tempos programados com base no ritmo de produção do forno;
- o efeito de isolamento térmico devido à formação de carepa é desprezível;
- o material da placa é isotrópico e homogêneo.

2.2.1 Equação de governo no interior da placa (Condução de Calor)

No interior da placa o aquecimento transiente é expresso pela equação da conservação da energia:

$$\nabla \cdot (K \nabla T) = c \left(\frac{T}{t} \right) \quad (1)$$

onde ρ é massa específica, k é a condutividade térmica, c é o calor específico a pressão constante.

2.2.2 Condição Inicial

A condição inicial é a temperatura de enforamento da placa T_0 :

$$T = T_0, \text{ em } t = 0 \quad (2)$$

Na maioria dos casos a temperatura de enforamento é a temperatura ambiente.

2.2.3 Condições de Contorno

As trocas de calor entre uma placa e sua vizinhança podem ser tratadas como fluxos de calor resultantes dos processos de troca:

- por radiação da superfície da placa com os gases, as placas vizinhas e as superfícies do forno;
- por convecção da superfície da placa com os gases.

As superfícies das placas recebem calor por radiação e convecção do forno:

$$-K \frac{T}{n} = q_r + q_c \quad (3)$$

em que n se refere ao vetor normal à superfície.

Transferência de Calor por Radiação das Paredes Refratárias e dos Gases para as Placas

Para o cálculo das trocas de calor por radiação são feitas algumas considerações:

- as chamas são não luminosas;
- numa mesma seção as paredes laterais superiores e teto do forno ou paredes laterais inferiores e soleira do forno apresentam a mesma temperatura, e estas superfícies se comportam como cinzentas;
- o gás é um meio que não reflete e a identidade de Kirchhoff pode ser aplicada, ou seja, $\epsilon_g + \tau_g = 1 = \epsilon_g + \tau_g$, onde ϵ_g , τ_g e τ_g são, respectivamente, a absorptividade, a transmissividade e a emissividade do gás.

Uma das dificuldades nos cálculos das trocas de calor radiante é a modelagem das trocas entre os gases e as demais superfícies presentes no forno. Na maioria dos casos o conceito de comprimento efetivo de feixe é utilizado ao calcular a emissividade dos gases (ϵ_g). Porém para isto os gases são considerados isotérmicos, o que não é muito representativo da situação encontrada no interior de fornos de reaquecimento. Normalmente as temperaturas, tanto dos gases quanto das paredes refratárias, variam entre 700° C e 1.300° C ao longo do comprimento do forno. Silva propôs uma metodologia adequada para a realidade de um forno de reaquecimento.⁽³⁾ Em sua metodologia o forno é dividido em vários segmentos isotérmicos limitados por superfícies fictícias. Dentro de cada um destes segmentos a placa troca calor com as paredes refratárias, com os gases e com suas superfícies fictícias.

Neste trabalho os cálculos das trocas de calor radiantes baseiam-se na metodologia proposta por Silva.⁽³⁾ A Figura 2 mostra um esquema da divisão do forno em vários segmentos, dentro dos quais as trocas de calor são analisadas.

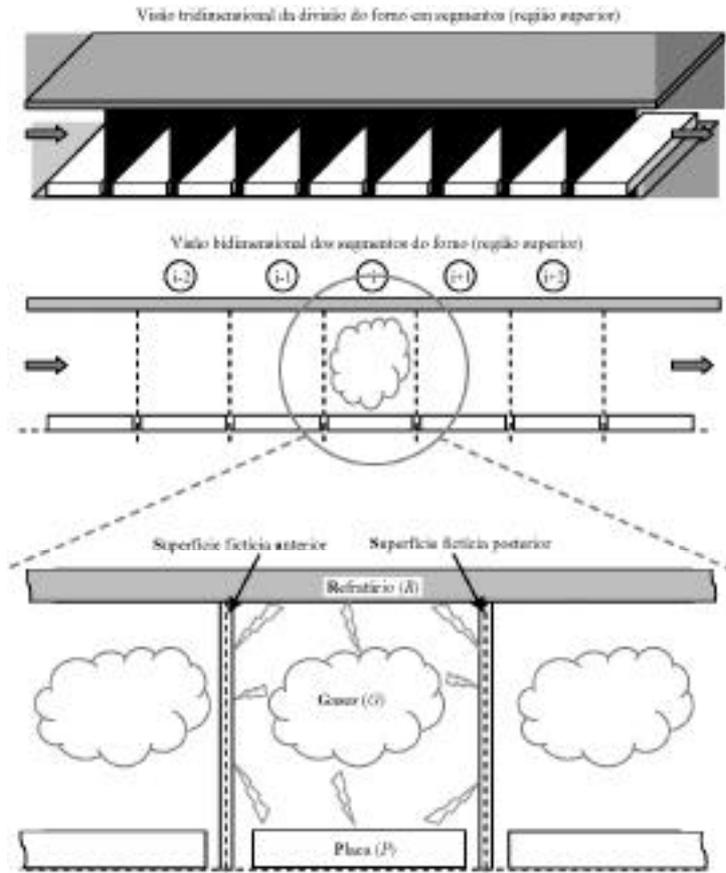
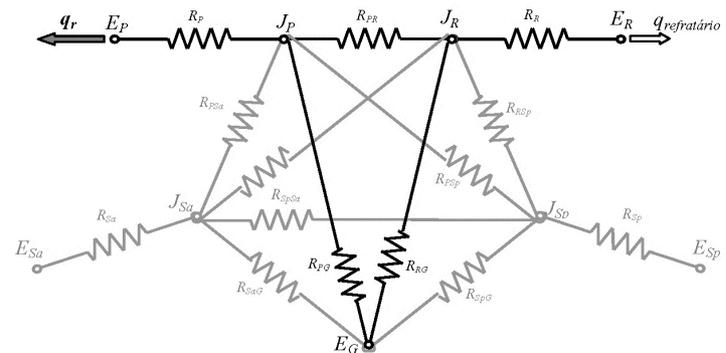


Figura 2. Segmentos do forno para cálculos das trocas de calor radiantes.



E_P , E_R , E_G , E_{Sa} e E_{Sp} são os poderes emissivos, respectivamente, da placa, do refratário, dos gases, das superfícies fictícias anterior e posterior;

J_P , J_R , J_{Sa} e J_{Sp} são as radiosidades, respectivamente, da placa, do refratário, das superfícies fictícias anterior e posterior;

R_P , R_R e R_G são as resistências superficiais, respectivamente, da placa, do refratário e dos gases;

R_{PG} , R_{PR} , R_{PSa} e R_{PSP} são as resistências espaciais entre a placa e, respectivamente, os gases, o refratário, as superfícies fictícias anterior e posterior;

R_{RG} , R_{RSa} e R_{RSP} são as resistências espaciais entre o refratário e, respectivamente, os gases, as superfícies fictícias anterior e posterior;

R_{GSa} e R_{GSp} são as resistências espaciais entre os gases e, respectivamente, as superfícies fictícias anterior e posterior.

R_{SaSp} é a resistência espacial entre as superfícies fictícias anterior e posterior;

$q_{refratário}$ é o fluxo líquido de calor condutivo e convectivo trocado com o refratário;

q_r é o fluxo de calor radiante para a placa.

Figura 3. Circuito analógico para a radiação no interior de um segmento do forno.

O fluxo líquido de calor radiante, q_r , é calculado através do método de análise por circuitos analógicos aplicado a cada um dos segmentos (Figura 3). Consideram-se as superfícies fictícias como paredes gasosas e como superfícies cinzentas.

O poder emissivo é dado pela seguinte equação:

$$E = \quad 4 \quad (5)$$

onde ϵ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$) e T é temperatura absoluta.

As várias resistências (R) e fluxos térmicos (q) apresentados na Figura 3 são descritos a seguir. Nas equações 6 a 8 ϵ é a emissividade da “superfície”, A é a área de troca térmica e F é o fator de forma (ou de visão) entre as “superfícies”; os índices inferiores P , R , G , Sa e Sp se referem, respectivamente, à placa, às paredes refratárias, aos gases e às superfícies fictícias anteriores e posteriores.

• Resistências superficiais:

$$R_p = \frac{1 - \epsilon_p}{\epsilon_p A_p}, R_r = \frac{1 - \epsilon_r}{\epsilon_r A_r}, R_{Sa} = \frac{1 - \epsilon_{Sa}}{\epsilon_{Sa} A_{Sa}}, R_{Sp} = \frac{1 - \epsilon_{Sp}}{\epsilon_{Sp} A_{Sp}}, \quad (6)$$

• Resistências espaciais ou geométricas:

$$R_{pR} = \frac{1}{A_p F_{pR} (1 - \epsilon_r)}, R_{pSa} = \frac{1}{A_p F_{pSa} (1 - \epsilon_{Sa})}, R_{pSp} = \frac{1}{A_p F_{pSp} (1 - \epsilon_{Sp})} \quad (7a)$$

$$R_{pSa} = \frac{1}{A_r F_{rSa} (1 - \epsilon_r)}, R_{pSp} = \frac{1}{A_r F_{rSp} (1 - \epsilon_r)}, R_{SpSa} = \frac{1}{A_{Sp} F_{SpSa} (1 - \epsilon_{Sa})} \quad (7b)$$

$$R_{pG} = \frac{1}{A_p F_{pG}}, R_{RG} = \frac{1}{A_r F_{rG}}, R_{SaG} = \frac{1}{A_{Sa} F_{SaG}}, R_{SpG} = \frac{1}{A_{Sp} F_{SpG}} \quad (7c)$$

• Fluxo líquido de calor que sai através paredes refratárias:

$$q_{\text{refratário}} = q_{\text{condutivo}}^{\text{refratário}} - q_{\text{convectivo}}^{\text{refratário}} \quad (8)$$

Transferência de Calor por Convecção dos Gases para as Placas

O fluxo de calor por convecção para a placa é expresso pela lei de Newton do resfriamento:

$$q_c = h (T_g - T_s) \quad (9)$$

onde T_s e T_g são, respectivamente, as temperaturas da superfície da placa e do gás circunvizinho e h é o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Cálculo da Temperatura do Gás no Segmento

No circuito analógico da radiação (Figura 3) assume-se que a temperatura do gás é conhecida. Nas seções de pré-aquecimento, aquecimento e encharque as temperaturas das paredes refratárias são conhecidas através das medições por termopares no forno. As temperaturas dos gases são iterativamente ajustadas de forma a se obter as temperaturas medidas das paredes refratárias.

Na seção de recuperação, a inexistência de queimadores e a maior proximidade da entrada do forno geram grandes variações de temperaturas. Além disso, não se conhece satisfatoriamente a temperatura, pois somente alguns pontos ao longo desta seção são medidos e, em muitos casos, as medições não representam diretamente a temperatura desejada. Assim, um cálculo mais apurado das temperaturas do gás nos segmentos desta seção é realizado a cada iteração através de um balanço de energia.

2.3 Procedimento Numérico

O problema do aquecimento de placas de aço durante sua passagem por um forno de reaquecimento é, neste trabalho, resolvido numericamente pelo método de Diferenças Finitas com formulação em Volumes de Controle desenvolvido por Patankar.^(2,4) Um sistema de equações é obtido pela aplicação das equações governantes aos volumes de controle. Neste trabalho a resolução das equações discretizadas é realizada através do programa C3D, elaborado por Silva.⁽³⁾ Este programa consiste em uma versão tridimensional do programa CONDUCT^(2,4) e segue a mesma filosofia e arquitetura do mesmo.

2.4 Procedimento de Cálculo

O forno é dividido em segmentos, de acordo com o número de placas, dentro dos quais são determinadas as condições de contorno (radiação e convecção) que são atribuídas às placas para resolução da equação da energia. As temperaturas do gás e das paredes refratárias em cada segmento são recalculadas a cada iteração. As iterações são interrompidas quando as variações nas temperaturas das placas, do gás e das paredes refratárias se tornam não significativas.

3 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para utilização do Modelo na análise teórica do processo é necessária sua validação. Esta foi realizada com dados coletados em um experimento realizado no forno de reaquecimento de placas WB2 da ACESITA em Junho/2002.

O sistema de medição usado neste experimento é constituído de um registrador (**Data Logger**), isolado termicamente através uma barreira térmica evaporativa e mantas refratárias, e de termopares tipo K com isolamento mineral. Este conjunto entra no forno montado em uma “placa de teste”.

O forno foi preparado com as temperaturas e o ritmo de produção normais dos aços inoxidáveis austeníticos. Com o forno devidamente estabilizado a “placa de teste” foi enforada e passou a registrar as temperaturas durante seu percurso pelo forno. Ao final do processo de aquecimento a “placa de teste” foi desenforada e o registrador de temperatura extraído. Os dados coletados foram recuperados e usados para a análise de resultados.

Pela análise dos dados obtidos observou-se uma concordância muito boa entre os valores calculados e medidos para a temperatura média da placa. Baseado nisso considerou-se o modelo validado.

4 RESULTADOS DO MODELO

4.1 Temperatura do Gás na Seção de Recuperação

A Figura 4 apresenta os perfis calculados e os valores medidos para as temperaturas do gás e das paredes refratárias ao longo do forno. As posições para as quais as temperaturas na seção de recuperação foram comparadas correspondem às posições onde os termopares estão instalados.

4.2 Curva de Aquecimento da Placa no Forno

A Figura 5 mostra a curva de aquecimento obtida para as condições de teste consideradas.

Na Figura 5, observam-se as evoluções das temperaturas em 3 pontos da placa: T(1,1), T(1,2) e T(1,3), localizados respectivamente a 50, 100 e 150 mm da face inferior. Nos pontos mais próximos às superfícies da placa, $T_{(1,1)}$ e $T_{(1,3)}$ observam-se temperaturas maiores do que naquele localizado em seu centro, $T_{(1,2)}$.

REFERÊNCIAS

- MIRANDA, L. L. **Análise do problema da convecção térmica no interior de fornos de reaquecimento**. Belo Horizonte, 2006. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica: Calor e Fluidos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- PATANKAR, S. V. **Computation of conduction and duct flow heat transfer**. Maple Grove, Minnesota: Innovative Research, Inc., 1991. 354p.
- SILVA, R. J. **Simulação numérica do aquecimento tridimensional de cilindros e placas em fornos de soleira caminhante**. Belo Horizonte, 2001. 116f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica: Calor e Fluidos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. Washington: Hemisphere Publishing Corp., 1980. 197p.

Recebido em: 12/01/2007

Aceito em: 15/03/2007

Proveniente de: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO - PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 43., 2006, Curitiba. São Paulo: ABM, 2006.

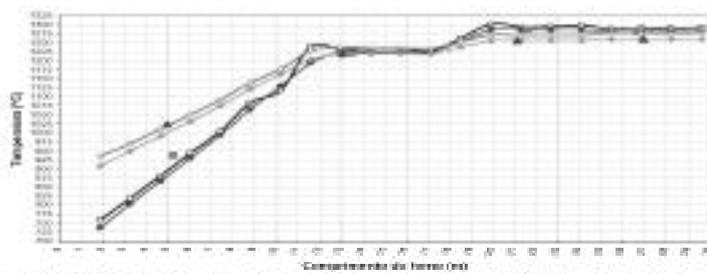


Figura 4. Perfis de temperatura dos gases e das paredes refratárias ao longo do comprimento do forno.

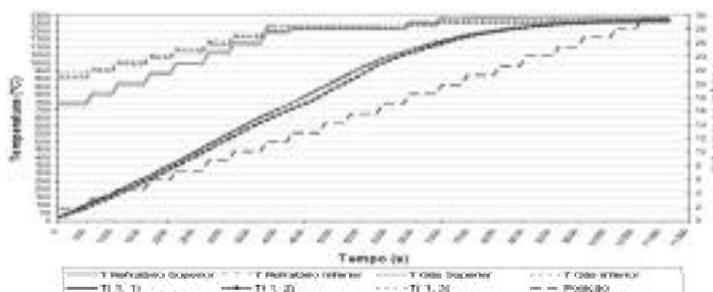


Figura 5. Evolução das temperaturas no interior da placa.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo tridimensional capaz de simular o aquecimento de placas no forno de reaquecimento de placas Walking Beam 2 da Laminação de Tiras a Quente da ACESITA. As temperaturas do gás e das paredes refratárias, nos segmentos da seção de entrada do forno, foram calculadas de acordo com um balanço de energia em cada um destes. Os perfis de temperatura obtidos apresentaram boa concordância com os dados medidos, com desvios entre 3 e 5%. Nesta seção do forno geralmente não existem muitos pontos de medição, a metodologia proposta apresenta uma boa alternativa para obtenção dos perfis de temperatura. O Modelo é uma importante ferramenta para estudo teórico do processo de reaquecimento e para ajustes do modelo de controle do forno. As variações de vários aspectos do processo podem ser simuladas e estudadas para correções nos padrões do mesmo.