

VALIDAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO PARA SIMULAÇÃO DE UM FORNO DE SECAGEM POR RADIAÇÃO TÉRMICA

EDUARDO DAL PIVA SCHUCH¹, ANGELA BEATRICE DEWES MOURA²

¹Engenheiro Mecânico, Universidade Feevale, Novo Hamburgo-RS, eduardodpschuch@gmail.com;

²Dr. em Engenharia, Prof. ICCT, Universidade Feevale, Novo Hamburgo-RS, angelabm@gmail.com

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
15 a 17 de setembro de 2021

RESUMO: Este trabalho realizou um estudo numérico (elementos finitos) através do software COMSOL Multiphysics de um equipamento de secagem utilizado em uma linha de produção de uma indústria de confecção. Dois modelos numéricos foram desenvolvidos a fim de contemplar a radiação gerada por um resistor e o movimento de um corpo de prova (peça a ser secada), simulando as condições do processo real. Os modelos distinguem-se entre si na estratégia relacionada às condições de contorno aplicadas: o primeiro modelo foi desenhado aplicando temperaturas nas paredes do forno como condições de contorno que foram medidas no processo real, enquanto o segundo modelo utiliza como base a potência medida no processo real. O principal objetivo deste estudo foi avaliar como os dois modelos numéricos se comportam em relação ao processo real, sendo ambos os modelos validados por experimentos. A comparação resultou em um erro quadrático médio de 2,49% e 2,74% para o primeiro e segundo modelos, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: Engenharia assistida por computador, simulação numérica, elementos finitos.

VALIDATION OF A NUMERICAL MODEL FOR THE SIMULATION OF A DRYING OVEN BY THERMAL RADIATION

ABSTRACT: This study was designed to perform a numerical study (finite elements) through COMSOL Multiphysics software in a drying equipment used in a production line of a manufacturing industry. Two numerical models were developed in order to contemplate the radiation generated by a resistor and the movement of a test piece (object to be dried), simulating the conditions of the real process. The models distinguish from each other in the strategy related to the boundary conditions applied: the first model was designed by applying temperatures in the walls of the equipment as boundary conditions which were measured in the real process, while the second model uses the power measured in the real process. The main objective of this study was to evaluate how the two numerical models would perform in terms of accuracy to the real process, being both models validated by obtaining a mean squared error of 2.49% and 2.74% to the first and second models, respectively.

KEYWORDS: Computer-aided engineering, numerical simulation, finite elements.

INTRODUÇÃO

A engenharia assistida por computador é uma ótima ferramenta para auxiliar engenheiros a lidar com todos os tipos de análises necessárias no desenvolvimento de projetos ou na resolução de problemas que possam enfrentar em ambientes industriais e acadêmicos. Todo estudo exigirá um ponto de partida, e para estudos relacionados a uma análise para melhoria de um equipamento ou processo existente, esse ponto de partida geralmente exigirá medições de dados reais. O risco de imprecisões pode induzir engenheiros a medir o máximo possível de dados no processo real e aplicá-los no modelo numérico, possivelmente limitando o modelo ao cenário específico que está sendo simulado no momento e inapto para avaliar mudanças no processo.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar uma avaliação numérica computacional de um equipamento de secagem utilizado em uma linha de produção de uma indústria de confecção, elaborando dois modelos numéricos distintos com estratégias diferentes, buscando validá-los. Os principais corpos teóricos abordados são radiação térmica, secagem por radiação e métodos numéricos para radiação.

A radiação térmica é definida como energia emitida por um corpo cuja temperatura está acima do zero absoluto (Incropera et al., 2020). Em termos práticos, todo corpo emite radiação, já que não é fisicamente possível que um corpo alcance o zero absoluto sem o uso infinito de algum recurso físico, como o tempo, por exemplo (Masanes & Oppenheim, 2017). A radiação emitida interage com a matéria de formas específicas, uma delas é sendo absorvida, sendo este o fenômeno físico que permite transferência de calor por radiação térmica (Bejan, 1996). A radiação pode agir tanto como um fenômeno superficial quanto como um fenômeno volumétrico; neste último, a absorção ocorre não apenas na superfície, mas também nas camadas internas do material, causando um aquecimento volumetricamente uniforme (Howell et al., 2020). Em contraste, a transferência de calor por difusão térmica (convecção e condução) sempre se dará através do contato molecular, sendo assim um fenômeno superficial por natureza (Cengel & Ghajar, 2012).

Uma das vantagens de utilizar a radiação para processos de secagem está justamente na capacidade da radiação de atuar como um fenômeno volumétrico. Além de diminuir tempos de processamento, a secagem por radiação ainda é capaz de fornecer qualidade superior ao produto sendo processado, que não poderia ser alcançada através da difusão térmica (Talbert, 2008).

Existem diversas maneiras de lidar numericamente com problemas envolvendo radiação, sendo a aplicabilidade de cada método dependente das características do estudo. Uma forma particularmente simples é através do método da radiosidade, que lida com a radiação como um fenômeno entre superfícies. Este método pode ser aplicado em secagem quando o produto a ser processado possui uma alta relação superfície/volume, onde a radiação utilizada terá uma frequência maior, geralmente infravermelha ou ultravioleta. Uma exigência da utilização de métodos que consideram radiação como fenômeno superficial é que o meio por onde a radiação se move seja fortemente transmissivo, como pequenos volumes de ar atmosférico, por exemplo (Rey, 2006).

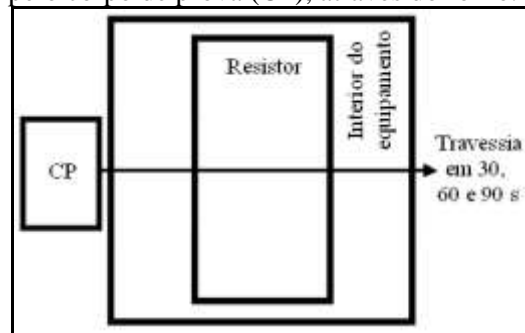
No geral, a secagem e a cura por radiação têm sido abordadas em alguns artigos. Kumar et al. (2011) estudaram, experimentalmente, a cura por radiação de um compósito polimérico reforçado com fibra de vidro como alternativa ao método convectivo convencional e constataram um aumento na eficiência energética e uma cura mais uniforme, com níveis menores de tensões internas. Da mesma forma, Allanic et al. (2014) estudaram experimentalmente a cura de vernizes aquosos por meio de um método de radiação e estabeleceram um modelo matemático para simular o processo, comparando os resultados experimentais e simulados, concluindo que as temperaturas simuladas e experimentais apresentaram boa proximidade. Severijns et al. (2017) realizaram um estudo numérico por meio do software COMSOL Multiphysics em um processo de cura por indução de juntas coladas. Comparando os resultados simulados e experimentais, os autores obtiveram uma proximidade entre as temperaturas simuladas e experimentais de 15%. Nakouzi et al. (2011) também utilizaram o software COMSOL Multiphysics para realizar um estudo numérico e simular o fluxo de calor na superfície superior de uma matriz epóxi reforçada com fibra de carbono, comparando temperaturas simuladas com medidas experimentais e obtendo um erro quadrático médio de cerca de 4%.

MATERIAL E MÉTODOS

O equipamento utilizado como objeto desta análise é um equipamento comum em uma linha de produção de uma indústria de confecção. Nesse equipamento, os materiais a serem processados são colocados em uma esteira que atravessa o interior do forno, recebendo a carga de radiação necessária para que ocorra a secagem. Nesta investigação foram utilizados três intervalos de tempo da travessia da peça através do forno: 30, 60 e 90 segundos. Os modelos numéricos foram desenvolvidos para seguir as mesmas características dos testes experimentais, incluindo dimensões, materiais, propriedades físicas e o movimento do corpo de prova dentro do equipamento. As simulações foram feitas utilizando todos os três tempos de travessia, comparando os resultados simulados com as medições feitas no ensaio experimental. Uma ilustração da situação testada numericamente e experimentalmente é mostrada na Figura 1. Nesta figura a seta indica o movimento que o corpo de

prova faz ao passar pelo interior do equipamento (forno) movido por uma esteira. A figura também evidencia a posição relativa do resistor dentro do forno.

Figura 1. Trajeto percorrido pelo corpo de prova (CP), através do forno.



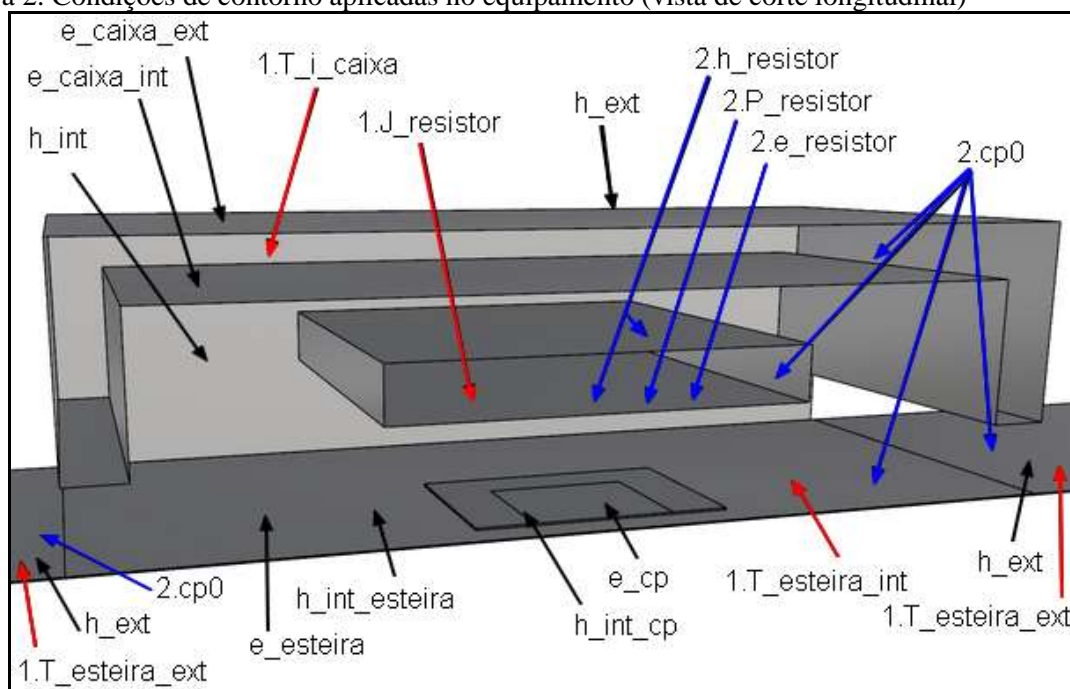
Os modelos numéricos foram desenvolvidos com a utilização do software COMSOL Multiphysics, versão 5.3ª (licença/ Universidade Feevale). A transferência de radiação foi avaliada pelo método da radiosidade, visto que o meio é composto por uma pequena quantidade de ar atmosférico, que pode ser considerado transparente.

Para avaliar o erro dos modelos numéricos em relação ao ensaio experimental foi calculado o erro quadrático médio (EQM), mesmo método utilizado no trabalho de Nakouzi et al. (2011). A Equação (1) apresenta a equação para cálculo do EQM, onde $T_{i,exp}$ são as temperaturas medidas experimentalmente e $T_{i,num}$ são as temperaturas simuladas numericamente, no centro do CP.

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{i,exp} - T_{i,num})^2}{\sum_{i=1}^n (T_{i,exp})^2}} \times 100 \quad (1)$$

Todas as condições de contorno são ilustradas na Figura 2, separando-as por condições exclusivas ao primeiro modelo (prefixo 1.), exclusivas ao segundo modelo (prefixo 2.) e condições comuns a ambos os modelos (sem prefixo). Foram utilizadas setas de cor vermelha para apontar condições referentes ao primeiro modelo, azul para o segundo modelo e preta para condições de contorno que se aplicam a ambos os modelos.

Figura 2. Condições de contorno aplicadas no equipamento (vista de corte longitudinal)



O Quadro 1 apresenta uma descrição esquematizada de cada condição de contorno (CC).

Quadro 1. Condições de contorno aplicadas nos dois modelos numéricos.

CC para o primeiro modelo numérico	CC para o segundo modelo numérico
1.J_resistor: fluxo de radiosidade aplicado na superfície do resistor.	2.e_resistor: emissividade aplicada na superfície do resistor.
1.T_i_caixa: temperatura inicial aplicada no volume da caixa.	2.P_resistor: Fonte de calor superficial aplicada na superfície do resistor.
1.T_esteira_int: temperatura fixa aplicada na parte interna da esteira.	2.h_resistor: fluxo convectivo aplicado no resistor.
1.T_esteira_ext: temperatura fixa aplicada na parte externa da esteira.	2.cp0: calor específico alterado para um valor próximo de zero, para simular condição inicial de equilíbrio térmico.
CC gerais para ambos os modelos	
h_ext: fluxo convectivo aplicado nas superfícies externas do equipamento e da esteira.	
h_int: fluxo convectivo aplicado nas superfícies internas do equipamento.	
h_int_esteira: fluxo convectivo aplicado nas superfícies internas da esteira.	
h_int_cp: fluxo convectivo aplicado nas superfícies do corpo de prova.	
e_caixa_ext: emissividade aplicada nas paredes externas do equipamento.	
e_caixa_int: emissividade aplicada nas paredes internas do equipamento.	
e_esteira: emissividade aplicada na esteira.	
e_cp: emissividade aplicada no corpo de prova.	

Para desenvolver os dois modelos, foram utilizadas medições do ensaio experimental do forno: temperaturas das paredes internas e externas, da corrente e da tensão de entrada. As condições de contorno aplicadas em ambos os modelos numéricos consistiram em emissividades e fluxos de calor convectivos. Os valores iniciais destas grandezas foram obtidos na literatura (Incropera et al., 2020; Çengel & Ghajar, 2012) e estes foram posteriormente refinados com as próprias simulações. Os valores experimentais do forno e das peças utilizados foram obtidos do trabalho de Lamp (2018). Por fim, para efetuar as medições no corpo de prova no ensaio experimental, foi utilizada uma câmera termográfica da marca Testo, modelo 875-2.

Um estudo de malha também foi realizado para definir o tamanho de malha ideal, que corresponde ao equilíbrio entre erros de aproximação numérica e eficiência no uso de recursos computacionais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No estudo de malha, uma configuração de malha de 2.582 elementos tetraédricos foi selecionada.

As temperaturas medidas no centro do corpo de prova, logo após a saída do forno, para ambos os modelos numéricos são apresentadas na Tabela 1. Além disto, são apresentadas as temperaturas experimentais médias para a mesma situação que foi simulada.

Tabela 1. Temperaturas experimentais e simuladas em ambos os modelos numéricos.

Tempo de travessia (s)	Temperaturas no centro do corpo de prova (°C)		
	Ensaio experimental*	Primeiro modelo numérico	Segundo modelo numérico
30	93	89,97	89,76
60	116	119,46	120,33
90	135	136,95	133,96

*NOTA: Os valores do ensaio experimental foram retirados de Lamp (2018).

Para os valores apresentados na Tabela 1, o erro quadrático médio (EQM) entre os valores simulados e os experimentais foi de 2,49% para o primeiro modelo e 2,74% para o segundo modelo.

Nota-se também através destes resultados que, embora o primeiro modelo numérico possua um erro inferior, a diferença entre os dois é praticamente desprezível (0,25%). O segundo modelo apresenta a vantagem de permitir a possibilidade de estudos adicionais envolvendo condições diferentes das estudadas, de forma a otimizar o projeto térmico do forno simulado.

Como a temperatura é a principal grandeza responsável pela ocorrência da secagem, a validação dos modelos numéricos foi realizada ao comparar as temperaturas medidas experimentalmente com as temperaturas simuladas numericamente, ambas no centro do CP.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi demonstrado que abordagens diferentes na elaboração de modelos numéricos embasados em um equipamento real foram capazes de fornecer resultados similares, validando-se os modelos apresentados. Ambos os modelos apresentaram erros inferiores a 3%, em contraste com os 4% obtidos por Nakouzi et al. (2011) e os 15% obtidos por Severijns et al. (2017), demonstrando, portanto, que os modelos apresentaram um nível de precisão excelente.

Pelos resultados obtidos, verificou-se que a maior precisão em relação aos ensaios experimentais pôde ser obtida em uma abordagem que buscou maximizar a quantidade de condições de contorno fixas, medidas experimentalmente, como foi o caso do primeiro modelo numérico. Este modelo foi capaz de simular uma condição específica de funcionamento do equipamento com a maior precisão, mas não torna possível o estudo de modificações no modelo experimental. Esta abordagem é, portanto, recomendável para situações em que se objetiva entender a fundo o funcionamento de um equipamento em uma condição específica. Já no segundo modelo numérico, a abordagem visou aplicar apenas condições iniciais, sem o uso de restrições, e os resultados obtidos foram quase tão precisos quanto os do primeiro modelo. Esta abordagem é recomendável, portanto, para situações em que se objetiva investigar numericamente modificações possíveis, antes de implementá-las em um processo real. Isto envolve economia de tempo e recursos.

REFERÊNCIAS

- Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 8.ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020. 992p.
- Masanés, L.; Oppenheim, J. A general derivation and quantification of the third law of thermodynamics. *Nat Commun*, v.8, n.1, p.14538, 2017.
- Bejan, A. *Transferência de calor*. 1.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1996. 540p.
- Howell, J. R.; Mengüç, M. P.; Siegel, R. *Thermal Radiation Heat Transfer*, 7.ed. Boca Raton: CRC Press, 2020. 1040p.
- Çengel, Y. A.; Ghajar, A. J. *Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática*, 4.ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 938p.
- Talbert, R. *Paint technology handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2008. 240p.
- Rey, G. C. *Numerical methods for radiative heat transfer*. Terrassa: Universidade Politècnica de Catalunya, 2006. 164f. Tese (Doutorado em Ciências Físicas).
- Kumar, P. K.; Raghavendra, N. V.; Sridhara, B. K. Optimization of infrared radiation cure process parameters for glass fiber reinforced polymer composites. *Materials & Design*, v.32, n.3, p.1129-1137, 2011.
- Allanic, N.; Bideau, P. Le; Glouannec, P.; Bourmaud, A. Infrared drying of water based varnish coated on elastomer substrate. *International Journal Of Thermal Sciences*, v.79, p.103-110, 2014.
- Severijns, C.; Freitas, S. T. de; Poulis, J. A. Susceptor-assisted induction curing behaviour of a two component epoxy paste adhesive for aerospace applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v.75, p.155-164, 2017.
- Nakouzi, S.; Berthet, F.; Maoult, Y. Le; Schmidt, F. Simulations of an infrared composite curing process. *Advanced Engineering Materials*, v.13, v.7, p.604-608, 2011.
- Lamp, M. G., *Desenvolvimento de um equipamento para a indústria calçadista*. Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2018. 94f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia dos Materiais e Processos Industriais).