

Desenvolvimento e aplicação de campânula metálica para secagem de refratários em forno de galvanização

Daniel Alves Esperança¹; 0009-0007-6530-6042
Alexandre Alvarenga Palmeira^{1,2}; 0000-0002-9271-8858
Izabel de Oliveira da Mota¹; 0000-0001-6276-5381
Cirlene Fourquet Bandeira¹; 0000-0001-7034-2477
Leticia Alvim Dias²; 0009-0000-3586-0439

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ

2 – UERJ, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Tecnologia, Resende, RJ

daniel_esperanca@hotmail.com

Resumo: O presente trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento, a construção e a aplicação de uma campânula metálica projetada para o processo de secagem de refratários em fornos de galvanização de arames. A pesquisa contemplou desde a concepção estrutural até a validação experimental em campo, incluindo análises computacionais baseadas no método dos elementos finitos (FEA) por meio do software Autodesk Inventor. O material estrutural adotado foi o aço ASTM A36, devido às suas propriedades mecânicas e de ductilidade, aliado a um sistema de isolamento em fibra cerâmica capaz de suportar temperaturas de até 1260 °C. Os resultados obtidos pela simulação numérica evidenciaram tensão de von Mises máxima de aproximadamente 9,3 MPa, valor significativamente inferior ao limite de escoamento do aço ASTM A36 (~250 MPa em temperatura ambiente), além de deslocamento máximo de 0,23 mm, confirmando elevada rigidez estrutural. Ensaio térmicos realizados em campo, com instrumentação por termopares, comprovaram que a curva de aquecimento seguiu fielmente o perfil recomendado pelo fornecedor dos refratários, promovendo secagem homogênea e controlada. Adicionalmente, observou-se que a utilização da campânula reduziu significativamente as perdas energéticas em comparação ao sistema aberto, favorecendo a eficiência operacional. A modularidade do projeto, concebido em partes desmontáveis, contribuiu para a facilidade de transporte, montagem e manutenção, ampliando sua aplicabilidade em diferentes cenários industriais. A integração entre análise computacional, engenharia de materiais e validação prática demonstrou-se essencial para a obtenção de resultados consistentes e alinhados às necessidades da indústria de galvanização.

Palavras-chave: Campânula metálica. Secagem de refratários. Galvanização. MEF.

INTRODUÇÃO

A galvanização a quente é amplamente utilizada na indústria siderúrgica e metalúrgica como técnica de proteção contra corrosão, especialmente em arames e outros produtos expostos a condições severas de uso. Esse processo, que envolve a imersão do aço em banho de zinco fundido, depende de fornos projetados para operar continuamente, em regime de alta exigência térmica e mecânica.

Dentro desse contexto, os refratários utilizados para revestir o forno assumem papel fundamental, pois garantem a eficiência energética do sistema. Todavia, esses refratários precisam ser periodicamente substituídos devido ao desgaste promovido por vapores metálicos agressivos e por ciclos térmicos extremos.

Para que apresentem desempenho adequado em operação posterior a sua substituição, faz-se necessária a execução de curvas de secagem rigorosamente controladas. Nesse sentido, a utilização de uma campânula metálica desenvolvida para promover aquecimento convectivo controlado surge como alternativa eficiente e inovadora, conforme será detalhado neste estudo (CHIAVERINI, 2005; CALLISTER, 2018).

MÉTODOS

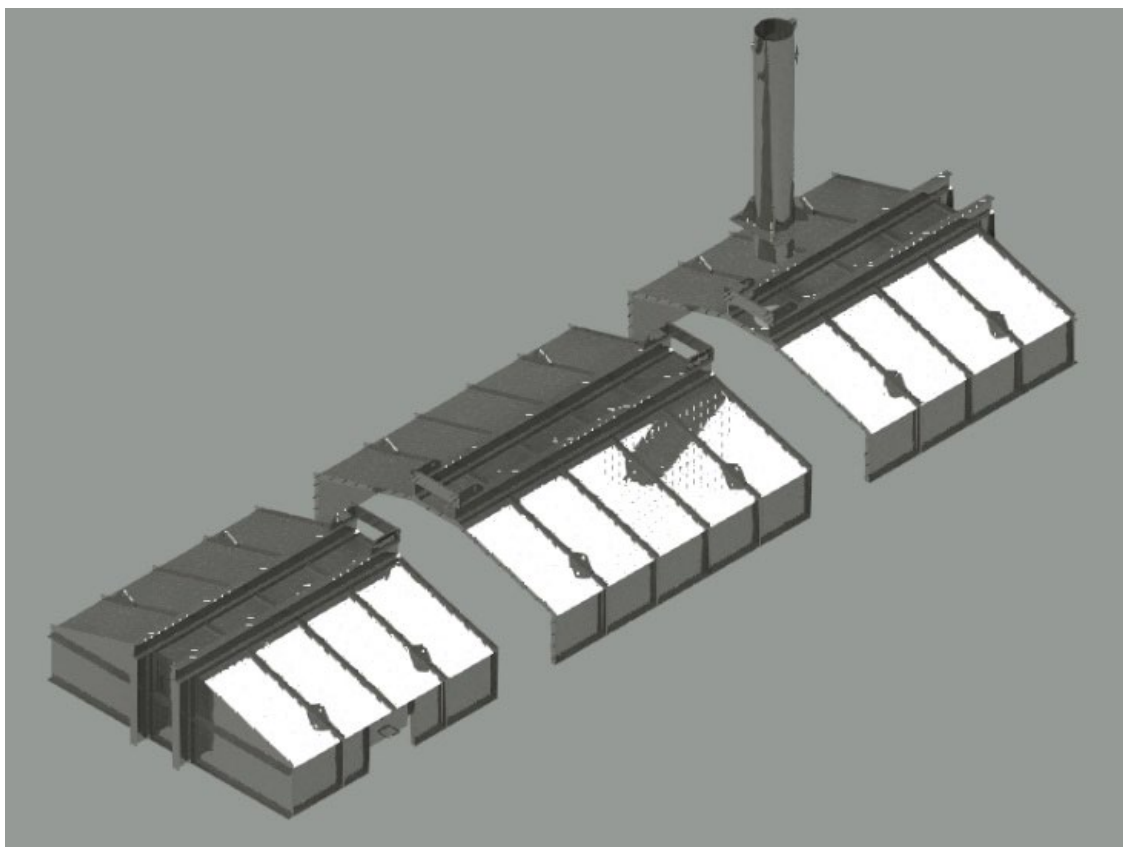
O trabalho foi desenvolvido em três etapas principais: projeto estrutural, análise numérica e validação experimental. Na primeira etapa, realizou-se a concepção da campânula metálica utilizando princípios de engenharia mecânica e de materiais, visando atender às condições operacionais de secagem de refratários em fornos de galvanização. O material estrutural adotado foi o aço ASTM A36, escolhido por suas propriedades de resistência mecânica e ductilidade (CHIAVERINI, 2005; CALLISTER, 2018). Foram empregados diferentes formatos desse material, como barras, perfis do tipo “L” e “I”, além de chapas metálicas, com os módulos estruturais unidos por meio de parafusos, arruelas e porcas.

Na análise numérica, foi empregado o método dos elementos finitos (MEF) no software Autodesk Inventor, utilizando-se predominantemente o método de elementos de casca (shell elements) para representação das chapas metálicas de fechamento (figura 1). Essa abordagem permitiu modelar de forma mais eficiente a rigidez global da estrutura, garantindo



maior fidelidade na distribuição das tensões e nos deslocamentos previstos em regiões críticas.

Figura 1 – Projeto em 3D



Fonte: autoria própria

Em operação real, a estrutura é exposta a temperaturas de até 800 °C, condição em que o aço ASTM A36 sofre redução expressiva de suas propriedades mecânicas (BEER; JOHNSTON, 2015). A literatura indica que o limite de escoamento do material, originalmente em torno de 250 MPa a 20 °C, reduz-se para aproximadamente 100 MPa a 600 °C e pode atingir valores da ordem de 40–60 MPa a 800 °C. De forma semelhante, o módulo de elasticidade cai de 210 GPa em temperatura ambiente para cerca de 30–40 GPa a 800 °C, evidenciando elevada perda de rigidez estrutural. Nessas circunstâncias, sem o isolamento refratário interno, a campânula não suportaria as solicitações térmicas, o que reforça a importância do revestimento em fibra cerâmica para garantir a integridade e robustez do projeto. Para a proteção térmica, a estrutura recebeu revestimento interno em placas de fibra



cerâmica Kaowool® 1260, instaladas em sistema tipo sanduíche composto por manta cerâmica, placas refratárias e barras chatas de aço, assegurando resistência térmica de até 1260 °C (MORGAN THERMAL CERAMICS, 2010; INCROPERA; DEWITT, 2014).

A avaliação estrutural da campânula foi realizada por meio do método dos elementos finitos (FEA), utilizando o software Autodesk Inventor. A simulação contemplou as chapas internas de fechamento, de modo a representar a rigidez global da estrutura. As condições de contorno foram aplicadas em pontos equivalentes aos apoios reais da campânula, e a malha de elementos foi refinada seletivamente em regiões críticas, como uniões e cantos estruturais.

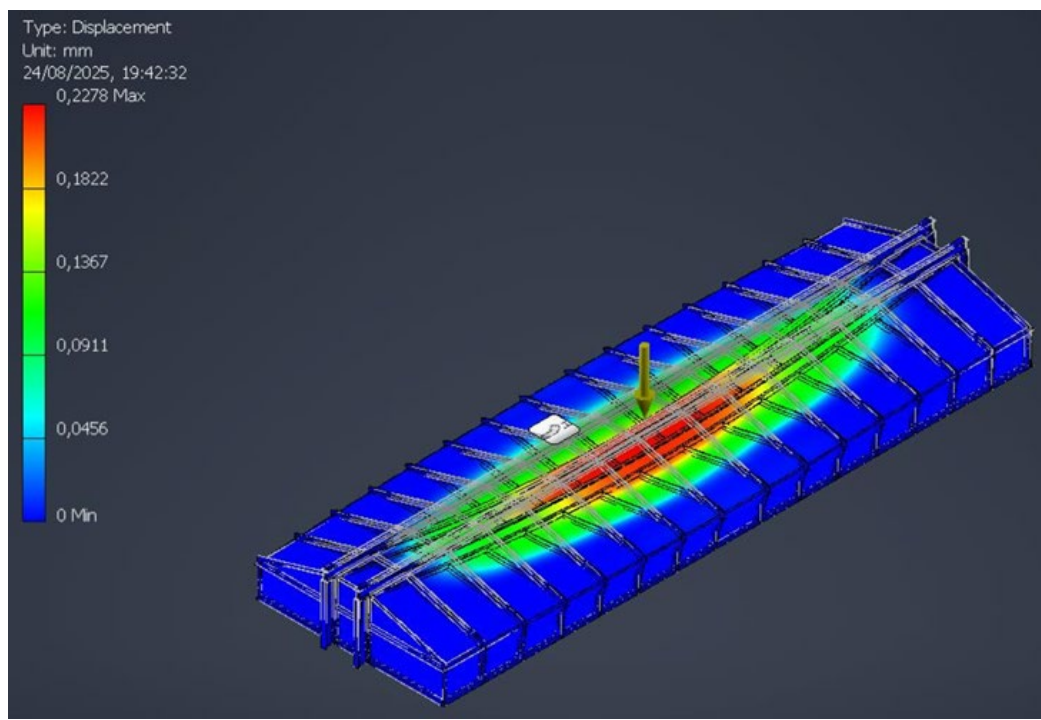
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais resultados obtidos pela análise numérica evidenciaram desempenho estrutural altamente satisfatório da campânula. A tensão de von Mises máxima registrada foi de aproximadamente 9,3 MPa, valor significativamente inferior ao limite de escoamento do aço ASTM A36, de cerca de 250 MPa em temperatura ambiente, o que demonstra que, sob peso próprio, não há risco de plastificação. O deslocamento máximo encontrado foi de aproximadamente 0,23 mm, valor que comprova a elevada rigidez global da estrutura (figura 2). As chapas metálicas de fechamento mostraram-se determinantes para o comportamento estrutural: além de atuarem como contraventamento, redistribuem as tensões, reduzem deslocamentos e elevam significativamente o fator de segurança global da campânula.

Embora o software amplifique graficamente esse deslocamento para fins de visualização, a magnitude real obtida permanece segura e não compromete o alinhamento ou a vedação do sistema. Além disso, o fator de segurança efetivo alcançou valor aproximado de 27, calculado pela razão entre a tensão de escoamento do material e a tensão de von Mises máxima (250/9,3). Essa margem elevada reforça a confiabilidade do conjunto em condições estáticas, assegurando robustez estrutural frente às solicitações avaliadas (figura 3).

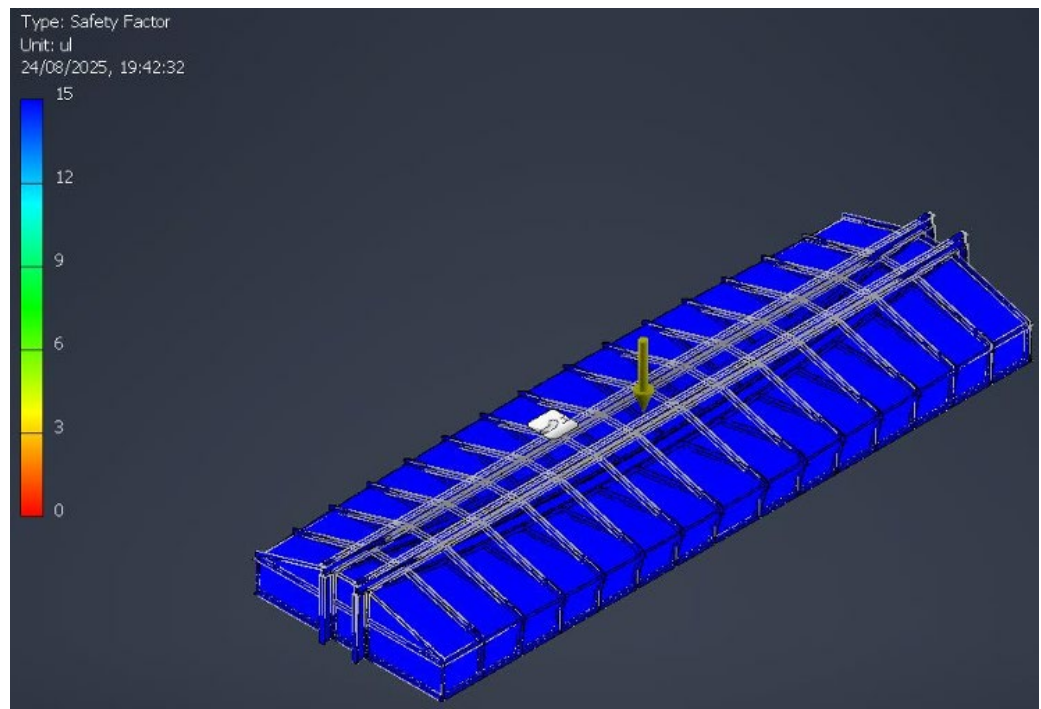


Figura 2 – Malha de elementos finitos



Fonte: autoria própria

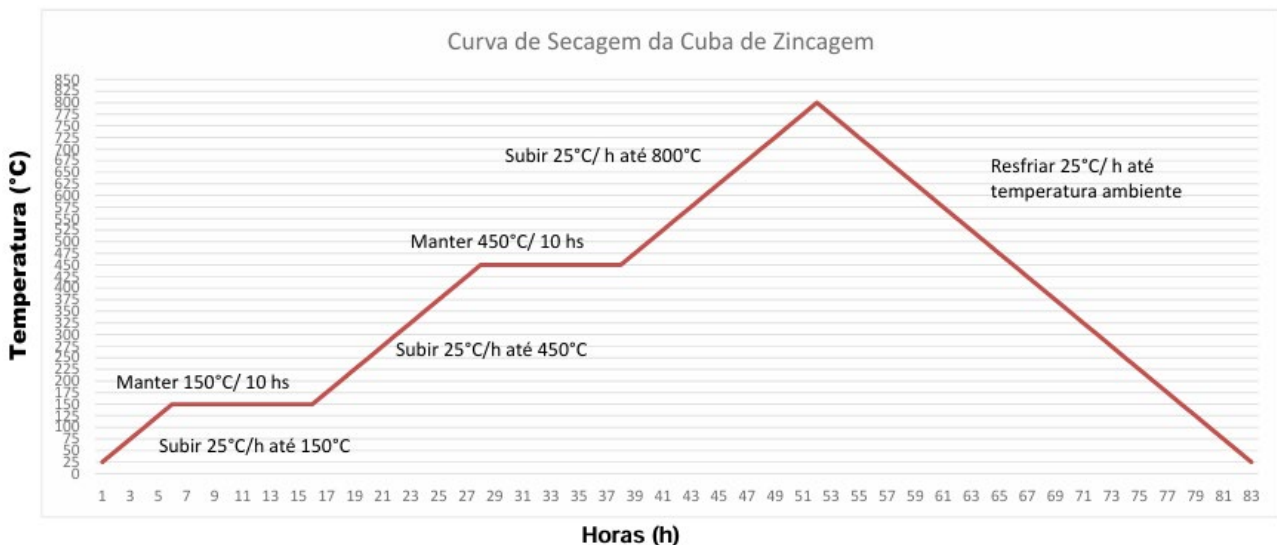
Figura 3 – Fator de segurança



Fonte: autoria própria

No aspecto térmico, os ensaios instrumentados com termopares no interior do forno demonstraram que a curva de aquecimento seguiu de forma fiel o perfil recomendado pelo fornecedor dos refratários, assegurando secagem homogênea e completa (figura 4). Os resultados obtidos demonstram que a campânula apresenta elevado desempenho estrutural em regime de trabalho, robustez térmica assegurada pelo uso de isolamento em placas de fibra cerâmica e ganhos operacionais decorrentes da redução de perdas energéticas e da modularidade construtiva.

Figura 4 - Curva de aquecimento registrada pelos termopares



Fonte: autoria própria

Do ponto de vista operacional, a campânula mostrou-se eficiente não apenas para a necessidade pontual de secagem convectiva de refratários, mas também como solução que agrega melhorias em eficiência e segurança do processo. A modularidade do projeto, concebido em partes desmontáveis, simplificou as etapas de transporte, montagem e armazenamento, ampliando a aplicabilidade da solução em diferentes contextos industriais. Dessa forma, a solução proposta contribui não apenas para a secagem segura e eficaz dos refratários, mas também para a sustentabilidade e confiabilidade do processo industrial como um todo (BEER; JOHNSTON, 2015).



CONCLUSÕES

A análise por elementos finitos evidenciou que a campânula apresenta comportamento estrutural robusto em regime estático. A tensão de von Mises máxima registrada foi de aproximadamente 9,3 MPa, valor bastante inferior ao limite de escoamento do aço ASTM A36 (~250 MPa). O deslocamento máximo obtido foi de 0,23 mm, refletindo elevada rigidez global do conjunto. O fator de segurança efetivo, calculado como a razão entre a tensão de escoamento e a tensão atuante, alcançou aproximadamente 27, indicando ampla margem de confiabilidade. Ressalta-se ainda que a inclusão das chapas de fechamento teve papel determinante no desempenho estrutural, funcionando como elementos de contraventamento que redistribuem as tensões e reduzem deslocamentos.

A campânula metálica desenvolvida para a secagem de refratários em fornos de galvanização apresentou desempenho altamente satisfatório sob os aspectos estrutural, térmico e operacional. A análise por elementos finitos demonstrou que a estrutura em aço ASTM A36, possui elevada rigidez global, deslocamentos reduzidos e fator de segurança expressivo, assegurando integridade frente ao peso próprio.

Do ponto de vista térmico, a instrumentação com termopares confirmou a aderência da curva de aquecimento ao perfil recomendado pelo fornecedor dos refratários, além de comprovar a significativa redução das perdas de calor em comparação ao sistema aberto.

No âmbito operacional, a solução mostrou ganhos adicionais em eficiência energética, segurança e confiabilidade do processo, sendo a modularidade construtiva um diferencial que amplia sua aplicabilidade em contextos industriais diversos.

Conclui-se, portanto, que a campânula metálica não apenas atendeu à necessidade imediata de secagem convectiva de refratários, mas também se configura como uma solução replicável e escalável para processos industriais que demandem controle térmico rigoroso e elevado desempenho estrutural. Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar ligas metálicas alternativas e o uso de revestimentos refratários mais avançados, além de estudos que avaliem a facilidade de instalação e substituição desses refratários na campânula.

REFERÊNCIAS

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, Russell E. *Mecânica dos materiais*. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

CALLISTER, William D. *Materials science and engineering: an introduction*. 9th ed. New York: Wiley, 2018.

CHIAVERINI, Vicente. *Aços e ferros fundidos*. 7. ed. São Paulo: ABM, 2005.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. *Fundamentos de transferência de calor e massa*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

MORGAN THERMAL CERAMICS. *Kaowool® Boards & Shapes – technical data sheet*. Worcester: Morgan, 2010.

DE MEDEIROS, A. A. H.; VILLIBOR, G. P. *Análise por meio do Método de Elementos Finitos das Tensões-Deformações nas Engrenagens da Caixa de Transmissão do Veículo BAJA*. The Journal of Engineering and Exact Sciences, Viçosa, v. 2, n. 4, 2016.

BAUMANN, A. P.; HSIEH, M. T.; DMITRIEV, A. E.; LOTZ, J. C. *Assessing the Use of Finite Element Analysis for Mechanical Performance Evaluation of Spinal Devices*. JOR Spine, Hoboken, 2021.

MOREIRA, M. S.; SOUZA, J. H. C.; GUILHERME, C. E. M.; ISOLDI, L. A. *Computational model validation of the rolled shapes calendering process*. Ciência e Natura, Santa Maria, v. 45, spe. n. 3, e74455, 2023.