

AVALIAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE PRÉ-AQUECIMENTO PARA LASER CLADDING

Marco G. Lorenzoni^{1*}, Luiz F. Nogueirão¹, Adriano C. Francisco², Alexandre T. Malavolta³, Armando I. S. Antonialli³

1 - Zanini Renk, Via Anhanguera, km 298, Cravinhos, CEP 14140-000, SP.

*marco.lorenzoni@zaninirenk.com.br

2 - HRC Metalização, Piracicaba, SP.

3 - Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

RESUMO

Eixos de redutores de velocidade de grande porte são peças de alto valor agregado. Em situações em que essas peças sofrem desgaste superficial, uma solução com bom custo-benefício é a recuperação da região danificada por meio de processos de manufatura aditiva, com destaque para o método de laser cladding. As altas taxas de resfriamento envolvidas nessa operação trazem consigo benefícios, como elevação da dureza superficial da região e redução do tamanho de grão, mas também promovem o acúmulo de tensões térmicas no revestimento. Quando essas tensões ultrapassam o limite de resistência à tração do material de revestimento, é muito provável que haja a formação de fissuras e trincas em sua estrutura. Uma solução simples, porém, muito efetiva, para combater a formação de trincas no revestimento é o pré-aquecimento do material de substrato. Com essa estratégia, é possível reduzir as tensões térmicas induzidas no processo, conferir uma microestrutura mais homogênea ao revestimento, melhorar seu acabamento superficial e prevenir a formação de trincas em sua estrutura. Por outro lado, as temperaturas de pré-aquecimento podem alterar propriedades críticas da peça, como a dureza superficial. Em pinhões e engrenagens, a dureza superficial dos dentes é uma característica muito importante para garantir a sua durabilidade. Este trabalho apresenta um estudo sobre os parâmetros de pré-aquecimento visando viabilizar a recuperação, pelo processo de laser cladding, de colos de eixos pinhões de redutores de velocidade de grande porte em aço liga 18CrNiMo7-6. Essa análise considera bem-sucedida uma operação de pré-aquecimento que garanta a qualidade do revestimento por laser cladding sem prejudicar a dureza superficial dos dentes. Um experimento preliminar foi realizado a fim de se levantar os dados necessários para o modelo computacional. Por meio da simulação numérica computacional, utilizando um modelo tridimensional do pinhão e o método de elementos finitos, foi possível concluir que o pré-aquecimento não comprometerá as propriedades do dentado.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, trincas, simulação, dureza superficial.

INTRODUÇÃO

Laser cladding (LC) é uma das principais técnicas de manufatura aditiva da indústria, com aplicações em recuperação dimensional de peças, deposição de revestimentos para melhora de propriedades mecânicas superficiais e fabricação de componentes. O LC tem destaque na recuperação de peças pela sua capacidade de gerar revestimentos com excelente aderência, pequena zona termicamente afetada, baixa diluição e grande controle sobre os parâmetros de processo.

A maior parte das aplicações de LC envolvem altas taxas de resfriamento. Essa característica pode ser útil por favorecer propriedades metalúrgicas e mecânicas superiores nas peças⁽¹⁾. Porém, também gera tensões térmicas que podem restringir a aplicabilidade do LC, além de agravar a tendência à formação de trincas no revestimento^(1,3,4).

O pré-aquecimento do substrato para deposição de revestimento reduz ou até extingue a formação de trincas no revestimento. Com o pré-aquecimento é possível realizar a deposição com uma menor potência de laser, o que reduz as tensões térmicas no substrato⁽²⁾. É possível utilizar o próprio feixe de laser para realizar um pré-aquecimento localizado na superfície a ser revestida. Isso previne a formação de trincas, além de garantir uma maior uniformidade na dureza superficial e na composição da poça de fusão⁽³⁾. Dessa forma, o pré-aquecimento da peça antes do LC se mostra imprescindível para a garantia da integridade superficial do revestimento e de menores tensões térmicas no substrato.

O aço de baixa liga 18CrNiMo7-6 é conhecido por sua capacidade de atingir altas durezas após a cementação. Essa liga é comumente empregada na fabricação de componentes cuja aplicação requer elevada dureza superficial e boa resistência ao desgaste, como eixos pinhões e engrenagens. Para garantir o alívio das tensões geradas na têmpera, é comum que a peça seja submetida a um processo de revenimento, que é realizado entre 150 e 200°C⁽⁵⁾. Temperaturas superiores a 200°C podem reduzir demasiadamente a dureza superficial das regiões cementadas. Assim, ao se optar pela recuperação dimensional de colos de eixos pinhões de 18CrNiMo7-6 por LC, o maior desafio é garantir que tanto no pré-aquecimento da peça como na deposição do revestimento a temperatura na região dos dentes não supere 200°C.

Para se definir a temperatura ideal de pré-aquecimento de uma peça a ser soldada, é necessário levar em conta o seu carbono equivalente (Ceq), que é uma definição empírica adotada para análise do grau de soldabilidade de uma liga ferrosa com base na sua composição química. De acordo com a formulação adotada, o Ceq nominal da liga de 18CrNiMo7-6 é de 0,79%. Para esse valor de Ceq, recomenda-se um pré-aquecimento entre 250 e 300°C da superfície a ser revestida⁽⁷⁾. Essa faixa de temperatura excede a temperatura limite de revenimento dos dentes do pinhão (200°C). Assim, é importante garantir que durante o pré-aquecimento a temperatura dos dentes fique abaixo do limite de revenimento. Para isso, foram realizados testes experimentais e simulações computacionais de forma a otimizar o procedimento de pré-aquecimento, garantindo que o colo a ser recuperado seja aquecido a 250°C sem que a temperatura de revenimento seja atingida nos dentes.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para ajustar os parâmetros experimentais, calculou-se a faixa da temperatura de pré-aquecimento com base na formulação do *International Institute of Welding (IIW)*⁽⁶⁾.

O procedimento experimental foi realizado para se obter os dados necessários ao desenvolvimento do modelo computacional. Após o experimento, o modelo computacional foi ajustado de acordo com os dados e resultados obtidos.

Cálculo da temperatura de pré-aquecimento

Uma das equações possíveis para a definição do C_{eq} é a formulação do $IITW^{(6)}$:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (A)$$

Para a composição nominal do material do pinhão (Tabela 1), o valor de C_{eq} calculado com a Equação (A) é de 0,79%. Para esse valor de C_{eq} , a temperatura recomendada para o pré-aquecimento da peça é de 250 a 300 °C⁽⁷⁾.

Tabela 1: Composição nominal da liga de aço 18CrNiMo7-6 de acordo com a DIN EN 10084⁽⁵⁾.

Elemento	% em massa
C	0,18
Cr	1,65
Ni	1,55
Mo	0,3
Mn	0,7

Procedimento experimental

Para o procedimento experimental, utilizou-se um eixo pinhão de redutor de velocidade (Figura 1) de 18CrNiMo7-6, um torno mecânico Clever L-76320 e um maçarico de aquecimento tipo “chuveiro” (Figura 1) com GLP (combustível) e O₂ (comburente). A medição de temperaturas do eixo durante o experimento foi realizada com um termômetro infravermelho Minipa MT-350. A rotação do torno foi ajustada para 35 rpm e iniciou-se o pré-aquecimento do colo de recuperação. O maçarico foi operado manualmente e procurou-se manter a distância de 50 mm entre o bocal do maçarico e a peça (Figura 1). O avanço transversal do maçarico foi de aproximadamente 20 mm/s. O sentido do avanço era alternado sempre que a tocha alcançava o limite do colo de recuperação. A temperatura ambiente durante o experimento era de 24,5 °C. As regiões do eixo onde as temperaturas seriam medidas foram pintadas (Figura 1) para garantir a mesma emissividade em todas, uma vez que o termômetro de infravermelho sofre forte influência dessa propriedade da peça. Durante o experimento, as temperaturas de 4 faixas do eixo (Figura 2) foram medidas para levantamento do perfil temporal de temperaturas nas regiões relevantes do eixo. Esses dados são úteis para o ajuste do modelo computacional.

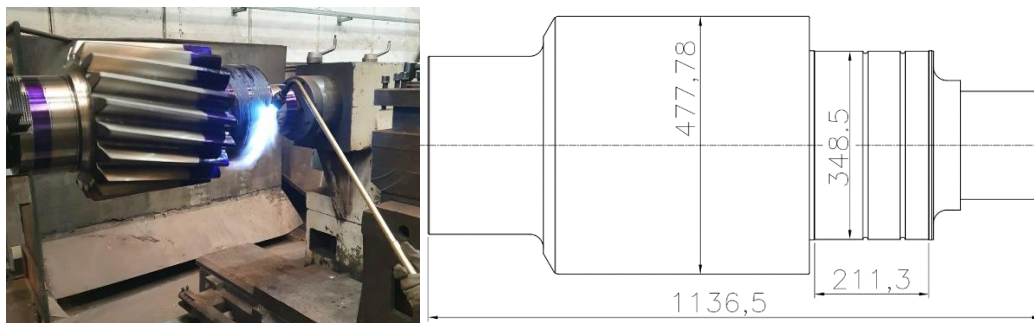


Figura 1: Pré-aquecimento do eixo com maçarico e croqui do eixo (o autor).

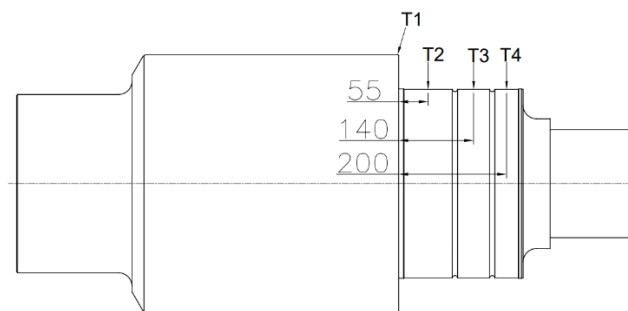


Figura 2: Croqui do eixo com posição das faixas de medição de temperatura (o autor).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados das temperaturas medidas nas 4 faixas do eixo indicadas na Figura 2. De acordo com esses resultados, foi possível calibrar as estimativas da potência do maçarico para a simulação computacional.

Tabela 2: Temperaturas aferidas em 4 regiões do eixo durante o experimento.

Tempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)
0	24,4	24,4	24,4	24,4
2	53,8	81,4	85,8	78,1
4	73,0	95,1	98,1	98,3
6	97,0	100,2	110,5	102,4
8	95,3	97,3	101,8	97,0
10	91,2	109,0	117,6	119,9
12	100,7	131,2	131,0	127,3
14	123,3	118,4	123,8	132,5

Para realizar a simulação computacional, o eixo pinhão foi modelado tridimensionalmente nos softwares *KISSsoft* e *SolidWorks*. O modelo 3D foi transferido para o software *Ansys Mechanical 2020 R2* onde foram realizadas as simulações no módulo *Transient Thermal*. A Figura 3 apresenta as condições de fluxo de calor simplificadas que foram adotadas para representar a tocha do maçarico. A convecção foi simplificada para a condição de ar estagnado a 24,5 °C, com $5.10^{-6} \text{ W/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Nessas condições, a simulação foi executada com 14 minutos de pré-aquecimento e a Figura 4 traz os resultados de T1, T2, T3 e T4 muito próximos aos medidos no experimento (Tabela 2), indicando que o modelo computacional é representativo.

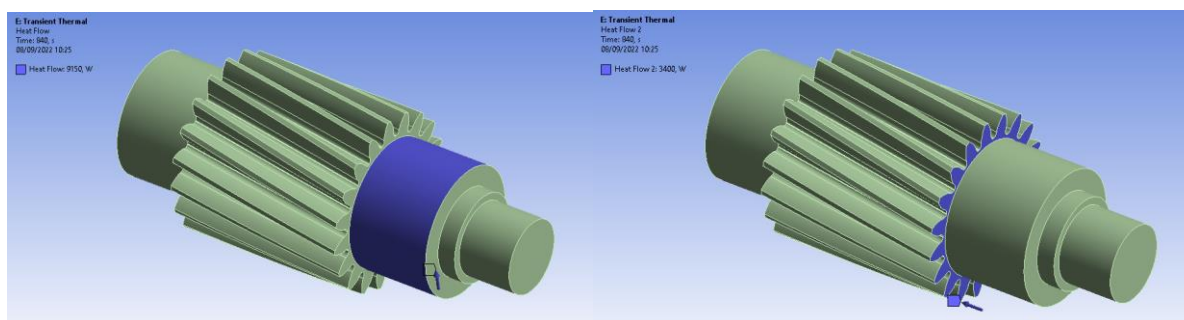


Figura 3: Fluxos de calor adotados: 9,15 kW no colo e 3,4 kW na face dos dentes (o autor).

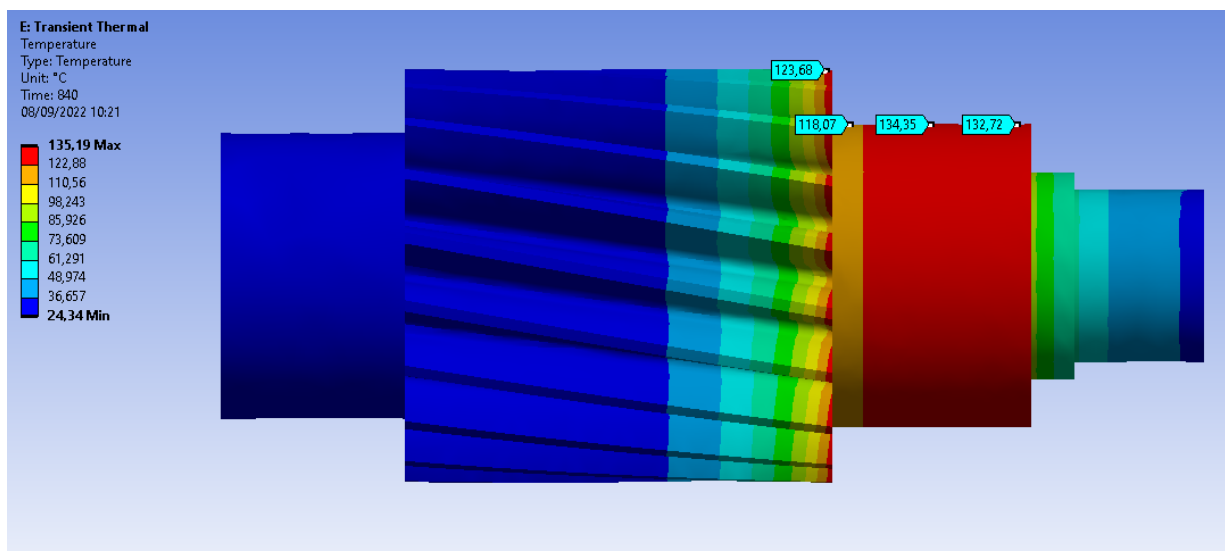


Figura 4: Temperaturas obtidas para simulação com 14 minutos de pré-aquecimento (o autor).

Com o acerto dos parâmetros da simulação, procurou-se o intervalo de tempo necessário para que o colo a ser recuperado atinja 250 °C. Com isso, obteve-se o resultado de 44 minutos, com o perfil de temperaturas apresentado na Figura 5.

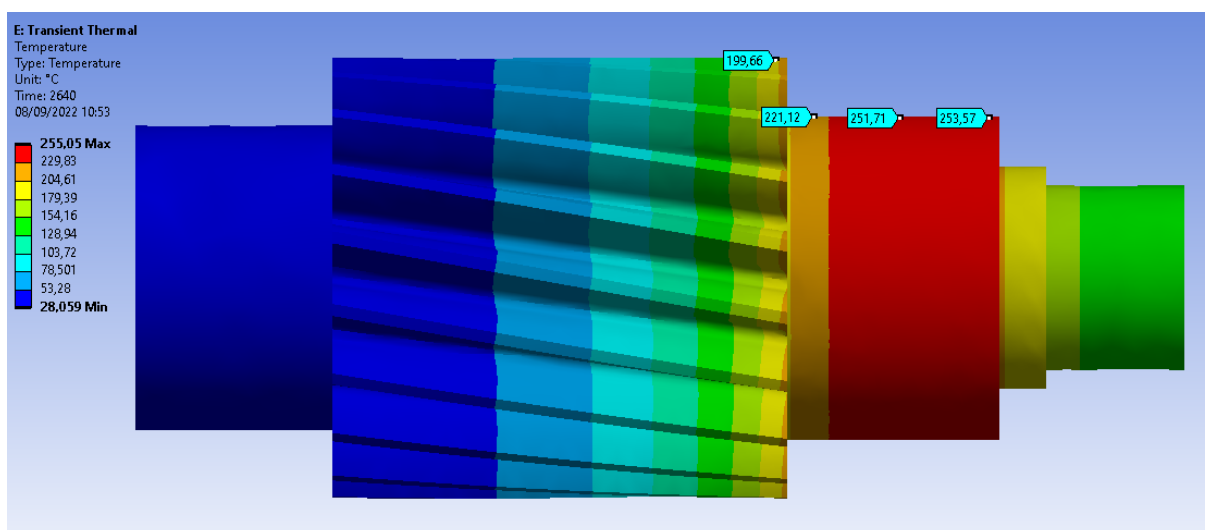


Figura 5: Temperaturas obtidas para simulação com 44 minutos de pré-aquecimento (o autor).

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados, é possível inferir que o pré-aquecimento com maçarico chuveiro pode ser realizado na preparação de eixos pinhões de grande porte para o LC. No caso estudado, o modelo computacional foi ajustado de acordo com os resultados experimentais. Com o modelo ajustado, identificou-se que, para se atingir 250 °C no colo a ser recuperado, são necessários 44 minutos de pré-aquecimento. Além disso, também se obteve a constatação de que esse procedimento não afetará a dureza dos dentes, pois a temperatura máxima atingida nessa região é inferior a 200 °C (temperatura limite de revenimento do 18CrNiMo7-6).

REFERÊNCIAS

1. ALIMARDANI, M.; FALLAH, V.; KHAJEPOUR, A.; TOYSERKANI, E. The effect of localized dynamic surface preheating in laser cladding of Stellite 1. *Surface and Coatings Technology*, v. 204, n. 23, p. 3911–3919, 2010.
2. ALIMARDANI, M.; TOYSERKANI, E.; HUISOON, J. P.; PAUL, C. P. On the delamination and crack formation in a thin wall fabricated using laser solid freeform fabrication process: An experimental-numerical investigation. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 47, n. 11, p. 1160–1168, 2009.
3. FALLAH, V.; ALIMARDANI, M.; CORBIN, S. F.; KHAJEPOUR, A. Impact of localized surface preheating on the microstructure and crack formation in laser direct deposition of Stellite 1 on AISI 4340 steel. *Applied Surface Science*, v. 257, n. 5, p. 1716–1723, 2010.
4. JENDRZEJEWSKI, R.; ŚLIWIŃSKI, G. Investigation of temperature and stress fields in laser clad coatings. *Applied Surface Science*, v. 254, n. 4, p. 921–925, 2007.
5. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG STANDARD. DIN EN 10084: Case hardening steels: Technical delivery conditions. Berlin: DIN, 2008.
6. INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING. Disponível em: <http://iiwelding.org>. Acesso em: 13 set. 2022.
7. ESAB. Metalurgia da soldagem. Disponível em: https://esab.com/br/sam_pt/. Acesso em: 14 set. 2022.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF PREHEATING FOR LASER CLADDING

ABSTRACT

Large gearboxes' shafts are high value-added parts. When these parts suffer surface wear, a cost-effective solution is the recovery of the damaged surface through additive manufacturing processes, with emphasis on the laser cladding method. The high cooling rates involved in this operation bring benefits, such as increased surface hardness and reduced grain size, but also promote the build-up of thermal stresses in the coating. When these stresses exceed the tensile strength limit of the coating material, it is very likely that cracks and fissures will form in its structure. A simple but very effective solution to combat cracking in the coating is to preheat the substrate material. With this strategy, it is possible to reduce the thermal stresses induced in the process, provide a more homogeneous microstructure to the coating, improve its surface finish and prevent the formation of cracks in its structure. On the other hand, preheat temperatures can change some parts' critical properties, such as surface hardness. In pinions and gears, the surface hardness of the teeth is a very important characteristic to guarantee their durability. This work presents a study on the preheating parameters aiming to enable the recovery, by the laser cladding process, of pinion shaft collars of large gearboxes in 18CrNiMo7-6 alloy steel. This analysis considers successful a preheating operation that guarantees the quality of the coating by laser cladding without impairing the surface hardness of the teeth. A preliminary experiment was carried out to obtain the necessary data for the computational model. Through computational simulation, using a three-dimensional model of the pinion and the finite element method, it was possible to conclude that preheating will not compromise the properties of the teeth.

Keywords: Additive manufacturing, cracking, simulation, surface hardness.