



Workshop de Pesquisa  
em Manufatura

# ANAIS DO V WORKSHOP DE PESQUISA EM MANUFATURA

EDITORA  
OMNIS



SCIENTIA



Workshop de Pesquisa  
em Manufatura

# ANAIS DO V WORKSHOP DE PESQUISA EM MANUFATURA



EDITORA  
OMNIS SCIENTIA

Editora Omnis Scientia

**ANAIS DO V WORKSHOP DE PESQUISA EM MANUFATURA**

Volume 1

1ª Edição

TRIUNFO – PE

2021

## **PROMOÇÃO:**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEMec/UFSCar)

### **Apresentadores (as):**

Adailton Gomes Pereira

Alana Carla Miranda Araújo

Bruna Oliveira da Silva

Bruno Alexandre Roque

Caique de Castro Gonçalves

Cassiano da Silva Tavares

Cristie Luis Kugelmeier

Gustavo Roberto dos Santos

Henrique A. C. Durello

Hugo Emanuel de Andrade Costa

Jonatan Augusto da Silva

Leones Contini Junior

Marco Gabriel Lorenzoni

Matheus Luis Manfredo

Paulo De Tarso Durigan

Rafael Fernando Teixeira

Talia Gibim

Tony Emerson Marim.

### **Participantes do painel:**

Carlos Eiji Hirata Ventura

Danielle Cristina Camilo Magalhães

Rodrigo da Silva (“PPGEMec: Presente e futuro”).

### **Palestrante:**

Yayue Pan - University of Illinois Chicago (“Field-assisted Photopolymerization-based Additive Manufacturing for Productions of Multi-Functional Materials and Devices”)

### **Comitê científico:**

Alexandre Tácito Malavolta

Carlos Eiji Hirata Ventura

Danielle Cristina Camilo Magalhães

Flávio Yukio Watanabe

Marcos Roberto Monteiro

Rodrigo da Silva

Sérgio Henrique Evangelista.

### **Comissão organizadora:**

Adailton Gomes Pereira

Armando Ítalo Sette Antonialli

Bruna Oliveira da Silva

Edson Bruno Lara Rosa

Sidney Bruce Shiki.

**Imagem de Capa**

Freepik

**Edição de Arte**

Vileide Vitória Larangeira Amorim

**Revisão**

Os autores



Este trabalho está licenciado com uma Licença Creative Commons – Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional.

O conteúdo abordado nos artigos, seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

W912a Workshop de Pesquisa em Manufatura (5 : 2021)  
Anais do [...] / V Workshop de Pesquisa em Manufatura, 10  
dezembro 2021. – Triunfo, PE: Omnis Scientia, 2021.  
52 p.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN 978-65-88958-78-0

DOI 10.47094/978-65-88958-78-0

1. Engenharia mecânica – Brasil – Congressos. 2. Manufaturas.  
I. Título.

CDD 621.7

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

**Editora Omnis Scientia**

Triunfo – Pernambuco – Brasil

Telefone: +55 (87) 99656-3565

[editoraomnisscientia.com.br](http://editoraomnisscientia.com.br)

[contato@editoraomnisscientia.com.br](mailto:contato@editoraomnisscientia.com.br)



## PREFÁCIO

A exemplo do ensino e da extensão, a pesquisa no âmbito da Engenharia Mecânica apresenta-se bastante ampla e diversificada. A ramificação mais canônica dessa modalidade de engenharia aponta para três áreas fundamentais: Projeto de Sistemas Mecânicos, Ciências Fluidotérmicas e Processos de Fabricação. Outras subdivisões, como Dinâmica e Vibrações, Mecatrônica e Metrologia, flutuam entre as três grandes áreas. Sendo assim, a nucleação e o crescimento do Grupo de Pesquisa em Manufatura Inteligente (GPMI), devidamente registrado no Diretório dos Grupos de Pesquisa do CNPq e reconhecido pela UFSCar, têm sido salutar no sentido da consolidação do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) e do curso de graduação em Engenharia Mecânica. Da mesma forma, O GPMI se mostra essencial enquanto alicerce para o recém-criado curso de mestrado acadêmico dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEMec), conferindo-lhe vocação e identidade. Finalmente, a comunicação e a difusão dos resultados obtidos pelo grupo propiciam o alinhamento do mesmo ao lema da UFSCar: excelência acadêmica e compromisso social. O objetivo geral do "V Workshop de Pesquisa em Manufatura" consiste em disseminar os trabalhos em andamento dentro do Grupo de Pesquisa em Manufatura Inteligente (GPMI) e de outros grupos afins à área de Manufatura, promovendo discussões profícuas e de alto nível com o público interno e externo à universidade. Como objetivos específicos, destacam-se a exposição dos estudantes de graduação e pós-graduação a um ambiente de conferência científica sem sair de casa e a oportunidade de contar com convidados com grande potencial de contribuição a essa área do conhecimento. O evento foi realizado ao longo do dia 10 de dezembro de 2021, de forma online, de maneira a viabilizar e fomentar a participação de uma parcela significativa de estudantes.

## SUMÁRIO

INFLUÊNCIA DA SENSIBILIDADE DE PARÂMETROS DOS MODELOS DE AVRAMI NAS CINÉTICAS DE RECRISTALIZAÇÃO SOBRE O TAMANHO DE GRÃO EM UM PROCESSO DE LAMINAÇÃO A QUENTE DE LIGA DE AÇO SAE 4140.....	10
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA EXTRUSÃO EM CANAL ANGULAR COM TORÇÃO (ECA-T): INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NA DEFORMAÇÃO.....	13
OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA APLICADA NO CONTEXTO DE PRÓTESES HUMANAS.....	15
PROCESSO DE DOBRAMENTO A FRIO DE CHAPAS FINAS METÁLICAS: ANÁLISES POR ELEMENTOS FINITOS, EXPERIMENTOS E MODELO MATEMÁTICO PARA COMPENSAÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO.....	17
FORÇAS NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPA FINA METÁLICA POR MEIO DE EXPERIMENTOS E ANÁLISES POR ELEMENTOS FINITOS.....	19
MODELAGEM DE CURVAS DE FLUXO PLÁSTICO DE UM AÇO BIFÁSICO UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	22
APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE MACHINE LEARNING PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE PEÇAS IMPRESSAS EM 3D.....	24
ESTUDO DA PREVISIBILIDADE DO ERRO DE TRANSMISSÃO DE ENGRENAGENS DE DENTES RETOS PARA PROJETO DE MODIFICAÇÕES DE MICROGEOMETRIA.....	26
CONTRIBUIÇÃO DO PRÉ-AQUECIMENTO DO SUBSTRATO NA PREVENÇÃO DE TRINCAS EM REVESTIMENTOS GERADOS POR LASER CLADDING.....	28
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE SOBRE O ESTADO DE SUPERFÍCIE NO TORNEAMENTO DA LIGA TI-6AL-4V ELI.....	30
INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO GRÃO DO REBOLO NA QUALIDADE SUPERFICIAL DO INSERTO DE CORTE DE METAL DURO RETIFICADO.....	36
INVESTIGAÇÃO DOS MECANISMOS DE REMOÇÃO DE MATERIAL NA RETIFICAÇÃO DE INSERTOS DE CORTE.....	38
SHUNT PIEZOELÉTRICO PARA CONTROLE PASSIVO DE CHATTER NO PROCESSO DE TORNEAMENTO DE LIGAS DE TITÂNIO.....	40
AVALIAÇÃO DE TEXTURAS INDUZIDAS POR VIBRAÇÃO NO TORNEAMENTO DURO DE UM AÇO FERRAMENTA.....	42
INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CONTROLE TÉRMICO ATIVO SOBRE A RESISTÊNCIA MECÂNICA E QUALIDADE SUPERFICIAL DE PEÇAS IMPRESSAS PELA TÉCNICA FPM.....	44

ATUALIZAÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA ANTIGAS ATRAVÉS DE INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO: UM ESTUDO SOBRE O EFEITO DO MONITORAMENTO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO NA QUALIDADE SUPERFICIAL.....	46
AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DO AÇO INOXIDÁVEL LEAN DUPLEX 2404 APÓS SIMULAÇÕES DE CICLOS TÉRMICOS DE ZONAS TERMICAMENTE AFETADAS REALIZADAS POR GLEEBLE.....	48
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ACABAMENTO SUPERFICIAL NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO 1020 EM BIODIESEL E SUAS MISTURAS COM ÓLEO DIESEL.....	50

## CONTRIBUIÇÃO DO PRÉ-AQUECIMENTO DO SUBSTRATO NA PREVENÇÃO DE TRINCAS EM REVESTIMENTOS GERADOS POR *LASER CLADDING*

**Marco Gabriel Lorenzoni**  
**Armando Italo Sette Antonialli**  
UFSCar, São Carlos, Brasil

**Resumo:** A formação de trincas em revestimentos depositados por laser cladding está associada, principalmente, às altas taxas de resfriamento envolvidas no processo. Apesar de trazer consigo benefícios para as propriedades do material depositado, como elevação de dureza e redução do tamanho de grão, o resfriamento rápido acumula 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. As propriedades do material depositado podem fazer com que esse fenômeno seja atenuado ou potencializado; sendo a fragilidade do material de deposição e a sua incompatibilidade em relação ao coeficiente de expansão térmica do material de substrato as características mais críticas para o surgimento de trincas. Uma solução simples, porém muito efetiva, para combater a formação de trincas no revestimento é o pré-aquecimento do material de substrato antes do início da deposição. Para isso, é possível usar o próprio laser do sistema de deposição. Com essa estratégia, é possível reduzir as tensões térmicas acumuladas ao longo do processo e conferir uma microestrutura mais homogênea ao revestimento.

**Palavras-chave:** manufatura aditiva, trincas, tensão térmica.

### 1. INTRODUÇÃO

*Laser cladding* (LC) é uma das principais técnicas de manufatura aditiva da indústria, com aplicações em recuperação de peças, revestimentos e fabricação rápida. Embora o LC possua muitas vantagens em comparação com outras técnicas convencionais, algumas desvantagens ainda acompanham esta técnica. Algumas dessas desvantagens estão relacionadas a aspectos geométricos e acabamento superficial das peças fabricadas e podem ser superadas pelo simples ajuste de parâmetros de operação. Outras desvantagens maiores, porém, estão associadas a características intrínsecas do processo. Nesse caso, destacam-se a formação de trincas e a delaminação, que são resultado da combinação entre as propriedades dos materiais usados (incompatibilidade entre os coeficientes de expansão térmica ou efeito de parâmetros inter-relacionados) (Alimardani *et al.*, 2010).

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 (Alimardani *et al.*, 2010). Porém, também gera tensões térmicas que podem restringir a aplicabilidade do LC, além de favorecer a formação de trincas no revestimento (Alimardani *et al.* (2010), Fallah *et al.* (2010) e Jendrzejewski e Śliwiński (2007)).

Fallah *et al.* (2010) estudaram a prevenção à formação de trincas através do pré-aquecimento localizado do substrato. Os resultados comprovaram que o pré-aquecimento previne a formação de trincas, além de garantir uma maior uniformidade na dureza superficial e na composição da poça de fusão. Jendrzejewski e Śliwiński (2007) conduzi-

ram análises sobre a relação entre a temperatura do substrato e a formação de trincas no revestimento. Em seu estudo, foi constatado que a possibilidade de ocorrência de trincas com o substrato à temperatura inicial de 873 K é muito menor do que com o substrato a 293 K. Alimardani *et al.* (2010) investigaram os efeitos do pré-aquecimento dinâmico do substrato nas propriedades do revestimento através de análises numéricas e experimentais. Os resultados experimentais confirmaram que as amostras com pré-aquecimento apresentaram um revestimento livre de trincas.

### 2. PROCESSO DE *LASER CLADDING*

No LC, um feixe de laser é utilizado como fonte de calor para gerar uma poça de fusão no substrato, sobre a qual é depositado o metal de adição (Toyserkani *et al.*, 2004). Existem quatro diferentes métodos de LC: alimentação coaxial de pó, pó pré-colocado, alimentação de pó fora do eixo e alimentação de fio. A Fig. 1 (a) representa o LC com alimentação coaxial de pó. Nesse método, o pó é direcionado para o foco do feixe de laser, e os processos de revestimento e alimentação de pó são completados simultaneamente. Conforme apresentado na Fig. 1 (b), o método do pó pré-colocado consiste em posicionar o material de revestimento sobre a superfície da peça de trabalho antes de iniciar a fusão através do laser. Na alimentação com pó fora do eixo, representada na Fig. 1 (c), o pó é depositado na peça a uma distância especificada entre o tubo de alimentação de pó e o feixe de laser. A Fig. 1 (d) ilustra o sistema de alimentação de arame, onde o pó é substituído por um fio de material a ser depositado (Liu *et al.*, 2021).

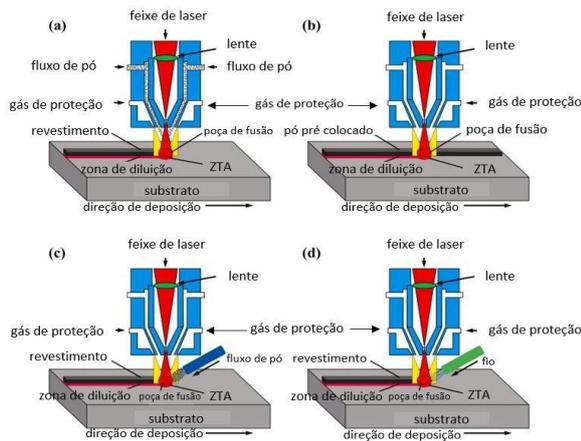


Figura 1: Tipos de LC (adaptado de Liu *et al.* (2021)). O

LC possui inúmeras vantagens em relação aos processos convencionais de revestimento, pois é capaz de produzir um revestimento melhor, com diluição mínima, distorção mínima e um melhor acabamento superficial (Toyserkani *et al.*, 2004). No entanto, defeitos, rachaduras e poros têm sido um grande problema, restringindo o desenvolvimento desta tecnologia (Qi *et al.*, 2021). Em relação às trincas, as altas tensões térmicas induzidas durante a deposição são o fator principal que favorece sua ocorrência nos revestimentos durante e logo após o processamento. Em casos extremos, as trincas podem levar ao descolamento do revestimento, uma vez que as trincas se originam da região de interface entre revestimento e substrato (Fallah *et al.* (2010) e Jendrzejewski e Śliwiński (2007)).

### 3. FORMAÇÃO DE TRINCAS EM REVESTIMENTOS DE LASER CLADDING

A ocorrência de trincas na camada de revestimento do LC pode ser atribuída, principalmente, à incompatibilidade de propriedades mecânicas e térmicas (coeficiente de expansão térmica e módulo de elasticidade) entre o material de revestimento e o substrato. Essa incompatibilidade aliada a grandes taxas de resfriamento gera elevadas tensões térmicas durante o revestimento a laser (Qi *et al.*, 2021).

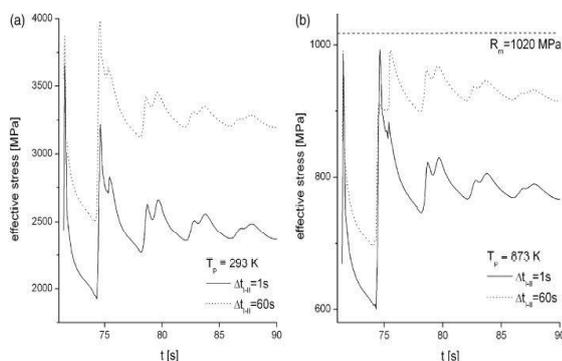


Figura 2: Comparação entre tensões geradas no substrato de amostras sem (a) e com pré-aquecimento (b) (Jendrzejewski e Śliwiński, 2007).

Segundo Jendrzejewski e Śliwiński (2007), é

necessário garantir que, durante o processo de LC, as tensões térmicas máximas geradas no revestimento não ultrapassem o limite de resistência à tração do material de deposição. A Fig. 2 apresenta a comparação entre as tensões térmicas simuladas numericamente para as amostras sem (a) e com pré-aquecimento do substrato (b) em um revestimento multicamadas de Stellite SF6 em um substrato de X10Cr13.

Nesse caso, é possível notar que a amostra sem pré-aquecimento apresenta tensões máximas de aproximadamente 4000 MPa. Para a amostra pré-aquecida, esse valor cai para 1000 MPa. De acordo com Jendrzejewski e Śliwiński (2007), o limite de resistência à tração do Stellite SF6 é de 1020 MPa. Dessa forma, conclui-se que a amostra sem pré-aquecimento é submetida a tensões 4 vezes superiores ao seu limite de resistência. Na amostra pré-aquecida, por outro lado, as tensões máximas geradas estão abaixo do limite do material; o que reduz a probabilidade de formação de trincas.

### 4. CONCLUSÃO

De acordo com as análises e resultados apresentados, conclui-se que o pré-aquecimento do substrato é capaz de reduzir as taxas de resfriamento durante o processo de LC. Com isso, as tensões térmicas geradas também são reduzidas, possibilitando prevenção da formação de trincas em revestimentos de LC.

### 5. REFERÊNCIAS

- Alimardani, M., Fallah, V., Khajepour, A. e Toyserkani, E., 2010. "The effect of localized dynamic surface preheating in laser cladding of stellite 1". *Surface and Coatings Technology*, Vol. 204, pp. 3911–3919. ISSN 02578972. doi:10.1016/j.surfcoat.2010.05.009.
- Fallah, V., Alimardani, M., Corbin, S.F. e Khajepour, A., 2010. "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*, Vol. 257, pp. 1716–1723. ISSN 01694332. doi:10.1016/j.apsusc.2010.09.003.
- Jendrzejewski, R. e Śliwiński, G., 2007. "Investigation of temperature and stress fields in laser cladded coatings". *Applied Surface Science*, Vol. 254, pp. 921–925. ISSN 01694332. doi:10.1016/j.apsusc.2007.08.014.
- Liu, Y., Ding, Y., Yang, L., Sun, R., Zhang, T. e Yang, X., 2021. "Research and progress of laser cladding on engineering alloys: A review". *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 66, pp. 341–363.
- Qi, K., Yang, Y., Sun, R., Hu, G., Lu, X., Li, J., Liang, W., Jin, K. e Xiong, L., 2021. "Effect of magnetic field on crack control of co-based alloy laser cladding". *Optics and Laser Technology*, Vol. 141. ISSN 00303992. doi: 10.1016/j.optlastec.2021.107129.
- Toyserkani, E., Khajepour, A. e Corbin, S.F., 2004. *Laser cladding*. CRC press.



editoraomnisscientia@gmail.com 

<https://editoraomnisscientia.com.br/> 

@editora\_omnis\_scientia 

<https://www.facebook.com/omnis.scientia.9> 

+55 (87) 9656-3565 



editoraomnisscientia@gmail.com   
<https://editoraomnisscientia.com.br/>   
@editora\_omnis\_scientia   
<https://www.facebook.com/omnis.scientia.9>   
+55 (87) 9656-3565 