



Workshop de Pesquisa  
em Manufatura

# ANAIS DO V WORKSHOP DE PESQUISA EM MANUFATURA





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

## OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA APLICADA NO CONTEXTO DE PRÓTESES HUMANAS

**Cassiano da Silva Tavares**

**Jose Benaque Rubert**

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil  
cassino.tavares@estudante.ufscar.br, benaque@ufscar.br

**Resumo:** Um dos grandes desafios enfrentados pela medicina ortopédica regenerativa atual, se encontra na produção de próteses e implantes buscando obter um comportamento próximo ao dos ossos danificados ou perdidos. A complexidade da tarefa se deve à composição orgânica dos ossos e a sua contínua, porém finita, capacidade de renovação biológica e conseqüentemente limitação da regeneração. Com isso, o dano na estrutura óssea pode chegar a duas situações: atingir um nível baixo e o osso consegue se regenerar e o caso inverso. Quando o primeiro caso ocorre o osso consegue se regenerar com um auxílio externo (talas e gesso). Já no segundo caso, existem três possíveis abordagens: 1) realizar um enxerto com o material biológico do próprio paciente, 2) realizar um enxerto com materiais ósseos de outra pessoa e 3) a inserção de uma prótese. Este último é o contexto em que se desenvolve este trabalho. Considera-se a utilização da Otimização Topológica no projeto de próteses a fim de obter soluções mais eficientes do ponto de vista da distribuição de material e esforços internos

**Palavras-chaves:** próteses, Otimização Topológica, Método dos Elementos Finitos

### 1. INTRODUÇÃO

O uso intensivo de próteses com resultados considerados muito bons colabora de modo decisivo para o desenvolvimento de uma nova área de pesquisa conhecida como biomanufatura que consiste na utilização de: Manufatura Aditiva (AM, do inglês *Additive Manufacturing*), materiais biocompatíveis e biodegradáveis, células e fatores de crescimento, com o objetivo de produzir estruturas biológicas para problemas de engenharia. Esta interação entre bioelementos e dispositivos pode ocorrer em ambientes *in vivo* ou *in vitro*. Com isso, os três principais pilares da biomanufatura consistem em: (i) biofabricação, (ii) biomecatrônica e biodesign, (iii) montagem (BARTOLO et al., 2012).

Em 2011 a AM foi utilizada para produzir uma prótese que substituiria totalmente a mandíbula de uma senhora de 83 anos, vítima de uma séria infecção no local. Esta prótese foi impressa em titânio e revestida com ossos pulverizados e plasma via *Selective Laser Melting* (SLM) (XILLO, 2012).

Em 2013, na Alemanha, foi realizada uma reconstrução parcial de um crânio humano visando eliminar um tumor facial de um senhor de 50 anos. Devido à complexidade geométrica da região em função da estética, diversos fatores anatômicos tiveram que ser considerados. Primeiramente foi realizado um escaneamento do paciente e o lado danificado foi desenhado com base no lado oposto (sem danos). Em um segundo momento, foi impresso um crânio em tamanho real do paciente para a simulação de montagem (MERTENS et al., 2013).

Em 2014, uma equipe de cientistas brasileiros realizou a reconstrução de uma grande região do crânio de um jovem de 28 anos, vítima de um acidente de moto.

Para a reconstrução exata da região danificada foram necessárias diversas tomografias para obter a geometria do crânio e simular a estrutura sem o dano. Após isso, foi impresso uma réplica em tamanho real do crânio danificado para o teste de montagem, e por fim, a cirurgia. Todo este esforço promoveu uma redução de 50% no tempo de operação e devolveu a autoestima do paciente (JARDINI et al., 2014).

Nestes estudos foi constatado que, para uma prótese suprir todas as necessidades do osso danificado, são necessárias algumas características fundamentais: 1) biocompatibilidade. 2) uma interface de tamanho ideal para as células realizarem os processos de fixação, proliferação e diferenciação. 3) superfície altamente porosa para ligar através dos poros: crescimento intracelular, transporte de nutrientes, perda metabólica. 4) propriedades mecânicas específicas, capazes de alcançar a resistência necessária diminuindo os efeitos de redução de resistência das estruturas ósseas adjacentes (BARTOLO et al., 2012).

Deseja-se obter a prótese que combine mínimo peso com máxima resistência, considerando a distribuição ideal de massa, a porosidade ideal e a melhor distribuição de esforços internos, para atender o melhor cenário no trade-off apresentado, os esforços das pesquisas foram direcionados para a busca da topologia ideal, utilizando as ferramentas da Indústria 4.0 (I4.0)

### 2. MÉTODO DE SOLUÇÃO

O desenvolvimento apresentado é a solução da forma fraca da equação de governo do problema da elasticidade, dada pela equação (1), que será conduzida através do Método dos Elementos Finitos. Na solução do sistema de equações correspondente serão consideradas, além das restrições de natureza mecânica, um conjunto

de restrições relativas ao desempenho, tais como volume, densidade, peso entre outras que deverão ser otimizadas (BENDSØE; SIGMUND, 2003). A Otimização Topológica representada pelo conjunto de restrições, permite com que o tomador de decisões escolha em projeto como se dará esse processo de otimização de modo a encontrar uma solução adequada aos objetivos estabelecidos inicialmente, por exemplo pela minimização do peso do componente (PALMAS, 2018), ou aumento da permeabilidade (DIAS et al., 2014, KIAN, 2017), por exemplo.

$$\int_{\Omega} E_{ijklm} \frac{\partial u_k}{\partial x_m} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega} b_i v_i d\Omega + \int_{\Gamma_t} t_i v_i d\Gamma \quad (1)$$

Onde:

- $E_{ijklm}$  Matriz de coeficientes elásticos;
- $u_i$  Campo de deslocamento físico;
- $v_i$  Campo de deslocamento virtual;
- $b_i$  Forças volumétricas e
- $t_i$  Vetor de tração no contorno  $\Gamma^t$ .

Para solucionar esta equação no contexto deste trabalho se utiliza o método da homogeneização fazendo a transformação de domínios considerando as seguintes características: 1) o domínio macroscópico ( $\Omega$ ), 2) o domínio microscópico ( $Y$ ), 3) as características de escala do domínio macroscópico ( $D$ ) e 4) as características de escala do domínio microscópico ( $d$ ). A técnica se inicia no domínio macroscópico ( $\Omega$ ), onde é retirada uma amostra uniforme (estrutura unitária celular) que representa as características principais do domínio inicial, e por fim, é criado um domínio heterogêneo ( $Y$ ), mantendo-se a proporcionalidade das escalas para evitar a perda de generalidade.

O campo de deslocamentos é aproximado através dos dois primeiros termos da série assintótica dada pela equação (2) e  $u$ , os coeficientes de homogeneização podem ser obtidos conforme a abordagem apresentada em Guedes e Kikuchi (1990).

$$u^\varepsilon(x) \cong u^0(x, y) + \varepsilon u^1(x, y) + \varepsilon^2 u^2(x, y) + \dots \quad y = \frac{x}{\varepsilon} \quad (2)$$

Na equação (2), o termo  $u_0$  representa o nível de homogeneização global médio, já o termo  $u_1$  apresenta o nível de perturbação gerado na conversão de domínio, por fim, o termo que representa relação da conversão do domínio em escala é o  $\varepsilon = D/d$ .

Introduzindo a expansão obtida na equação (2) dentro da formulação fraca do FEM (equação (1)), é possível obter o problema de geral de elasticidade homogeneizada tridimensional para a aplicação do estudo, através da equação (3).

$$\int_{\Omega} E_{ijklm} \frac{\partial [u^0(x, y) + \varepsilon u^1(x, y)]}{\partial x_m} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega} b_i v_i d\Omega + \int_{\Gamma_t} t_i v_i d\Gamma \quad (3)$$

Se forem obtidos diferentes valores de  $\varepsilon$ , para a solução do problema apresentado pela equação (3) é possível obter três limitantes (conjunto de equações (4)-

(6)), considerando apenas os termos lineares conforme proposto por Lions (1981).

$$\int_Y E_{ijrs} \frac{\partial \bar{X}_r^{km}}{\partial y_s} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dY = \int_Y E_{ijklm} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dY \quad \forall v \quad (4)$$

Na equação (4) o parâmetro  $\bar{X}_r^{km}$  representa as configurações deformadas da estrutura unitária celular sujeita a um campo de tensões completo: três tensões normais e três tensões de cisalhamento.

$$\int_{\Omega} E_{ijklm}^H \frac{\partial u_k}{\partial x_m} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega} b_i v_i d\Omega + \int_{\Gamma_t} t_i v_i d\Gamma = 0 \quad \forall v \quad (5)$$

A matriz  $E^H$  representa os coeficientes elásticos homogeneizados que podem ser obtidos através da equação (6).

$$E_{ijklm}^H = \frac{1}{Y} \int_Y E_{pqrs} (\delta_{rk} \delta_{sm} \frac{\partial \bar{X}_r^{km}}{\partial y_s}) (\delta_{pi} \delta_{aj} \frac{\partial \bar{X}_p^{ij}}{\partial y_q}) dY \quad (6)$$

Para as sucessivas configurações deslocadas obtidas na solução das equações ( $\bar{X}_r^m$ ), se recalculam os coeficientes elásticos homogeneizados e o processo segue até que se encontre uma solução ótima

### 3. REFERÊNCIAS

- Bartolo, P. et al. Biomedical production of implants by additive electro-chemical and physical processes. CIRP Annals, v. 61, n. 2, p. 635 -- 655, 2012. ISSN 0007-8506.
- Bendsøe, B. P.; Sigmund, O. Topology Optimization: Theory, Methods and Applications. 2ªed. ed. [S.l.]: Springer, 2003. ISBN 978-3-642-07698-5.
- DIAS, M. et al. Optimization of scaffold design for bone tissue engineering: A computational and experimental study. Medical Engineering Physics, v. 36, n. 4, p. 448 -- 457, 2014. ISSN 1350-4533.
- Guedes, J. M.; Kikuchi, N. Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 2, n. 83, p. 143--198, 1990.
- JARDINI, A. L. et al. Customised titanium implant fabricated in additive manufacturing for craniomaxillofacial surgery, Virtual and Physical Prototyping. Virtual and Physical Prototyping, v. 9, n. 2, p. 115--125, 2014.
- Kian, J. Topology Optimization Method applied to Design Channels Considering Non-Newtonian Fluid Flow. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Dissertation, 2017.
- Lions, J. L. Some methods in mathematical analysis of systems and their control. 1ªed. ed. [S.l.]: Science Press, 1981. ISBN 978-0677602004.
- Mertens, C.; Löwenhein, H.; Hoffmann, J. Image data-based reconstruction of the midface using a patient-specific implant in combination with a vascularized osteomyocutaneous scapular flap. Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, v. 41, n. 3, p. 219 -- 225, 2013. ISSN 1010-5182.
- Palmas, L. F. Estudos complementares sobre Otimização Topológica Multimaterial utilizando interpolação SIMP ordenada. Federal University of Santa Catarina, Dissertation, 2018.
- Xillo The world's first 3d printed total jaw reconstruction. 2012. Disponível em: <<https://www.xilloc.com/patients/stories/total-mandibular-implant/>> (accessed: 07.01.2021)>.



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 