



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

## 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

**Henrique Augusto Camargo Durello** - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil.  
h.durello@estudante.ufscar.br

**Sérgio Henrique Evangelista** - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil. toddyprof@ufscar.br

**Resumo:** No presente estudo, analisa-se a influência dos parâmetros pertinentes ao modelo de Avrami para descrição das cinéticas de recristalização dinâmica e crescimento dos grãos, além de sua distribuição em uma placa laminada a quente de liga de aço SAE 4140. A placa é analisada por Elementos Finitos (EF) no programa comercial DeformTM para efeito de determinação dos campos de tensão, deformação e temperatura. O modelo de Avrami é pós-processado a partir dos resultados EF, junto com dados de material e aspectos gerais de modelagem numérica tomados como referência a partir do obtido na literatura. O estudo é aplicado a somente um passo de laminação. Alguns pontos representativos da placa são escolhidos para efeito das análises. Discussões são apresentadas com intuito de oferecer uma interpretação do modelo de EF em face ao diagrama TTT (tempo, temperatura, transformação). Para as condições estudadas, os grãos apresentaram tamanhos médios da ordem entre 0,5µm e 9µm.

**Palavras-chaves:** Microestrutura, laminação a quente, elementos finitos, recristalização, crescimento de grão, conformação mecânica.

### 1. INTRODUÇÃO

A área de fabricação mecânica apresenta diversas formas de produção, sendo que a diferença entre elas está na maneira para se obter a peça final, por exemplo: a usinagem se baseia na remoção de material até o desenvolvimento de geometrias complexas; já a conformação se dá pela deformação do material, sempre de significativa de matéria (De Jesus, 2004). A laminação pode ser feita realizada a quente ou a frio, ou seja, o material é aquecido ou não em relação à temperatura de recristalização antes de passar pelos rolos laminadores (De Souza e Balancin, 2015).

O objetivo da análise por elementos finitos (FEA) é a obtenção de uma formulação que possa explorar de forma automática, sistemas complexos, e/ou irregulares, por intermédio de programas computacionais. Para isso, o

FEA considera o sistema global como equivalente a um agrupamento de elementos finitos (EF), no qual cada um destes é uma estrutura contínua simplificada. Impõe-se

que em cada nó da malha os deslocamentos e forças internas que sejam compatíveis e estejam em equilíbrio energético, considerando-se o equacionamento em âmbito

global do sistema (Tavares, 1998).

Os materiais sólidos apresentam uma estrutura

microscópica, chamada de microestrutura, a qual se desenvolve a partir do resfriamento da massa fundida por meio da geração de pequenos cristais em direções diferentes de crescimento desses sólidos, chamados de grãos. Ao final do processo, há diversos grãos formados e é visível uma área de fronteira entre eles, conhecido como contorno de grão (Padilha e Siciliano, 2005).

O diagrama TTT (tempo, temperatura, transformação) é utilizado para analisar a transformação de fases de acordo com a taxa de resfriamento. Para um material austenitizado pode ocorrer com o resfriamento imposto, fases como bainita e martensita, além de ferrita, perlita e cementita. Nesse diagrama, é possível analisar o comportamento do material quando submetido aos mecanismos de recristalização e crescimento de grão (Zambon e Nascente, 2011).

A recristalização dinâmica normalmente ocorre em metais com baixa e média energia de falha de empilhamento, com taxas de deformações elevadas. Ela ocorre também, quando a taxa de geração de defeitos supera a taxa de aniquilação dos mesmos devido a baixa velocidade de recristalização (De Souza e Balancin, 2015). As Equações (1) a (4) descrevem esse fenômeno.

$$\varepsilon_c = a \cdot \varepsilon_p = a \cdot \dot{\varepsilon}^p \exp\left(\frac{Q_{def}}{RT}\right), \quad (1)$$

$$\varepsilon_p = \frac{s - s_c}{n} \quad (2)$$

$$X_{DRX} = 1 - \exp\left[-\beta \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{s_{0,5}}\right)\right], \quad (3)$$

$$\varepsilon_{0,5} = c \cdot \dot{\varepsilon}^s \exp\left(\frac{Q_{DRX}}{RT}\right), \quad (4)$$

$$d = C' \cdot \dot{\varepsilon}^b \exp\left(\frac{Q_{dDRX}}{RT}\right), \quad (4)$$

DRX

RT

O objetivo do presente estudo é analisar, através de simulação numérica, a resposta de um processo de laminação a quente quando ocorrer alterações de valores de algumas variáveis envolvidas nesse processo, como: temperatura, fator de atrito, espessura deformada da chapa e coeficiente de transferência de calor. Com base nos resultados, propor um modelo de análise por FEA para otimização desse processo de fabricação para indústrias.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nas análises numéricas foram realizadas pelo software DEFORM™ 3D, desenvolvido pela *Scientific Forming Technologies Corporation* (SFTC). A escolha se deu pela versatilidade do programa na FEA de processos de fabricação, além do fato do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos deter a licença do mesmo. A máquina utilizada para execução do pacote inclui um processador Intel i5®, uma placa de vídeo com processador gráfico dedicado, 8 Gb de memória RAM e SSD de 256 Gb, o que otimiza o desempenho do conjunto e reduz o tempo das simulações.

Os parâmetros adotados dentro do software para realização dos cálculos estão apresentados de forma resumida na Tabela 1 e as variáveis das Equações (1) a (4) foram alocadas na Tabela 2 conforme Qian e Pan, 2011.

Tabela 1: Parâmetros adotados no Deform™.

Parâmetros	Adotado
Sistema de Unidades	SI
Dimensões Chapa	295mm x 1264mm x 30,7mm
Dimensões Rolo	Ø787mm x 300mm
Tipo de Simulação	Lagrangeano Incremental
Modos de Simulação	Deformação, Transf. de Calor e Grão
Número de passos da simulação	150
Incremento para salvar passos	1
Incremento de tempo	0,005
Solucionador Deformação	Esparso
Método de Iteração	Iteração Direta
Solucionador Temperatura	Esparso
Erro Limite Velocidade	0,001
Temperatura da Chapa e Ambiente	Chapa 1000°C e Ambiente 30 °C
Coefficiente de Convecção	0,02 kW/m <sup>2</sup> °C
Elementos de Malha	14000 de tipo Tetraédrico
Coef. Transf. de Calor por Condução	40 kW/m <sup>2</sup> °C
Taxa de Deformação	1 s <sup>-1</sup>

Tabela 2: Variáveis das Equações (1) a (4) adotadas.

Variáveis	Valores	Variáveis	Valores
a	0,8	c	0,1182
C	0,027	s	0,2139
p	0,1809	Q <sub>DRX</sub>	15813,23
Q <sub>def</sub>	17096,08	C'	221,8113
β	1,8884	b	-0,1103
n	1,4539	Q <sub>dDRX</sub>	-17508,5

## 3. RESULTADOS PRELIMINARES

Pela Figura 1 pode-se observar que a maior parte da chapa sofreu recristalização dinâmica após a passagem do

rolo em 15s. O código em cores sobre a representação da chapa indica porções da borda em sua maioria que não perceberam recristalização no período analisado.

No gráfico da Figura 1, observa-se o caráter na formação e crescimento de grãos expresso pelo pico inicial no tamanho percebido em 4 pontos de análise considerados. Após aquele instante inicial próximo aos 2s, a composição de efeitos entre passagem do rolo e gradientes térmicos denotam a transição para os patamares inferiores de tamanho de grão. Considera-se que os pontos de análise escolhidos 1, 2, 3 e 4 possuem um tamanho de grão que se estabiliza em 1,8µm, ~0,5µm, 7µm e 9µm respectivamente.

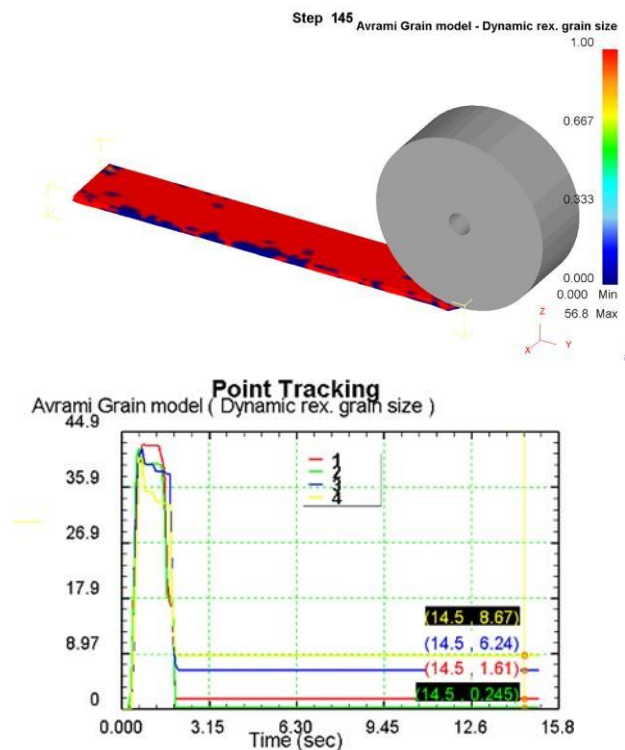


Figura 1: Resultado da DRX para crescimento de grão.

## 4. CONCLUSÃO

Os casos analisados abrangeram pontos da borda da chapa. Com as condições apresentadas, foi mostrado que o tamanho médio do grão naquela secção variou entre 0,5µm e 9µm. Esta abordagem poderá ser utilizada para

qualquer região da chapa e traz a indagação aos trabalhos futuros sobre quais condições de processo são mais favoráveis para propiciarem a produção de chapas com tamanho de grãos pré-especificados.

## 5. REFERÊNCIAS

De Jesus, E. R. B. Ferramentas de Usinagem em Aço Rápido AISI M2 Obtidos por Conformação por "Spray". 2004. 207f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2004

- De Souza, A. L. B.; Balancin, O. 2015. Análise do comportamento termomecânico e da evolução microestrutural durante a laminação de tiras a quente de aço C-Mn via DeformTM 3D. 99f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- Padilha, A. F.; Siciliano, F. 2005. Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura. [S.l.]: ABM.
- Qian, D.; Pan, Y. 2013. 3D coupled macro–microscopic finite element modelling and simulation for combined blank-forging and rolling process of alloy steel large ring. Computational Materials Science, China, Vol. 70, pp. 24-36.
- Tavares, J. M. R. S. Introdução ao Método dos Elementos Finitos. 1998. 105f. Instituto de Engenharia Biomédica – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Zambon, M. F.; Nascente, P. A. P. 2011. Modificação por Nitretação a Plasma das Superfícies dos Aços AISI-4140, AISI-420C e DIN16MnCr5. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.



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 