



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

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, sem perda 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.

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

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

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

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

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

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 ² °C
Elementos de Malha	14000 de tipo Tetraédrico
Coef. Transf. de Calor por Condução	40 kW/m ² °C
Taxa de Deformação	1 s ⁻¹

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 _{DRX}	15813,23
Q _{def}	17096,08	C'	221,8113
β	1,8884	b	-0,1103
n	1,4539	Q _{dDRX}	-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.

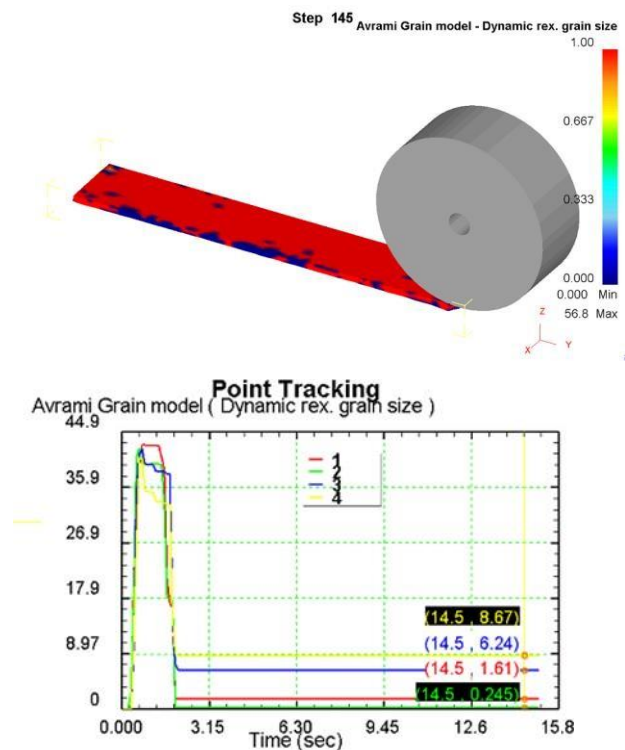


Figura 1: Resultado da DRX para crescimento de grão.

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.

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA EXTRUSÃO EM CANAL ANGULAR COM TORÇÃO (ECA-T): INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NA DEFORMAÇÃO

Rafael Fernando Teixeira

José Benaque Rubert

Danielle Cristina Camilo Magalhães

Rod. Washington Luís, km 235, 13565-905, São Carlos, Brasil

Universidade Federal de São Carlos

rafael.fernando73@hotmail.com

benaque@ufscar.br

danielle_camilo@yahoo.com.br

Resumo: O desenvolvimento de novas técnicas de Deformação Plástica Severa (DPS) busca aperfeiçoar a eficiência deste processo, tendo como objetivo o intenso refinamento de grão, a homogeneidade e a estabilidade microestrutural do produto. Dentre as rotas DPS, a Extrusão em Canal Angular (ECA) é um processo capaz de provocar grandes deformações plásticas em metais e ligas, sem alterar significativamente a seção transversal. Como consequência, há grande aumento da resistência mecânica pela diminuição do tamanho médio de grão até a escala submicrométrica ou nanométrica. A presente proposta visa desenvolver uma matriz de ECA combinada com torção, chamada de ECA-T, capaz de aplicar grandes deformações por meio da combinação de cisalhamento e torção, para avaliar seu desempenho do ponto de vista da viabilidade operacional e da integridade do material. Por meio de simulação numérica por elementos finitos no software Deform®, as variáveis geométricas da matriz de ECA-T foram avaliadas em termos de tensões e deformações no material processado, partindo-se de um protótipo já existente. Os resultados preliminares indicaram a viabilidade do processo, com deformação efetiva superior à ECA convencional de geometria similar e com relativamente baixas tensões de prensagem.

Palavras-chaves: extrusão em canal angular com torção, projeto de matriz, elementos finitos.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, os processos de Deformação Plástica Severa (DPS) têm sido amplamente investigados devido ao seu potencial em produzir metais e ligas com tamanho do grão na escala ultrafina ($< 1 \mu\text{m}$) ou nanométrica ($< 100 \text{nm}$), sem que a peça processada sofra significativas mudanças em sua seção transversal. Assim, as rotas DPS apresentam inúmeras vantagens com relação ao refino microestrutural e, conseqüentemente, a otimização de propriedades mecânicas (Bagherpour *et al.*, 2019).

Dentre as técnicas de DPS, a Extrusão em Canal Angular (ECA) é amplamente estudada e com potencial para aplicações industriais. Consiste em forçar a passagem de um material em uma matriz que contém dois canais sequenciais com a mesma dimensão e que formam um determinado ângulo entre si, normalmente 90° ou 120° , impondo uma deformação plástica intensa por cisalhamento simples. Diversas tentativas foram feitas para aumentar a intensidade da deformação e para reduzir o número de passes de ECA. Uma dessas tentativas é a combinação com torção (T), dando origem à variante chamada de ECA-T, proposto pela primeira vez por Kocich *et al.* (2011). Neste tipo de matriz, além da geometria convencional de ECA com os ângulos entre canais (φ) e o ângulo de curvatura (ψ), há ainda outros parâmetros geométricos que influenciam na deformação total imposta. Na parte inicial ou final do canal, a torção inserida é definida pelo ângulo da torção β e a distância

(L) entre o início (ou fim) da torção no interior do canal e o ponto de mudança de direção de extrusão. Uma ilustração da matriz ECA-T é apresentada na Figura 1.

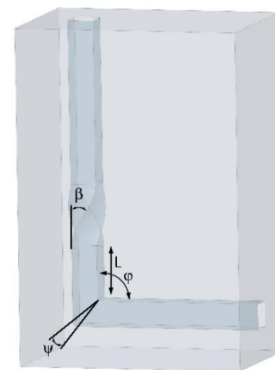


Figura 1: Representação esquemática de uma matriz ECA-T. Fonte: Macháčková *et al.* (2020).

Com objetivo de otimizar o processo de ECA-T e maximizar a deformação imposta, estudos de simulação numérica utilizando o modelo de elementos finitos foram realizados (Macháčková *et al.*, 2020). Entretanto, estes trabalhos concentraram-se em matrizes com a torção antes da mudança de direção de extrusão. Dessa maneira, o presente trabalho tem como objetivo principal estudar, por meio de simulações numéricas, as distribuições de tensões e deformações no material durante o processamento por ECA-T com torção na porção final dos canais e analisar a viabilidade do processo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Partindo-se de um protótipo de ECA-T, a simulação por elementos finitos foi realizada no software Deform® 3D V11.0 para um passe. Neste estudo foi determinada a distribuição de deformações efetivas ao longo do tarugo. Considerou-se como material o alumínio AA1050 da biblioteca do Deform®, aplicando coeficiente de atrito $\mu = 0,1$ (superfície lubrificada), em temperatura ambiente ($T = 300$ K), com velocidade de extrusão de 2 mm/s e usando a geometria indicada na Figura 2.

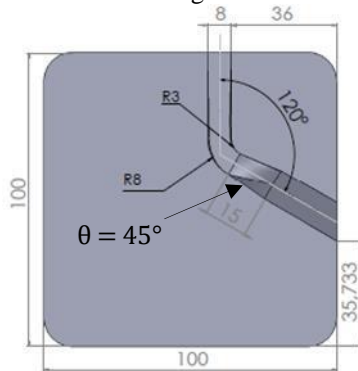


Figura 2: Ilustração esquemática da matriz ECA-T utilizada no presente trabalho. Dimensões em mm.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

A Figura 3 apresenta um mapa da distribuição de deformações efetivas após o processo via ECA-T, considerando-se um passe único, no qual foi necessária uma tensão de aproximadamente 134 MPa para completar a prensagem.

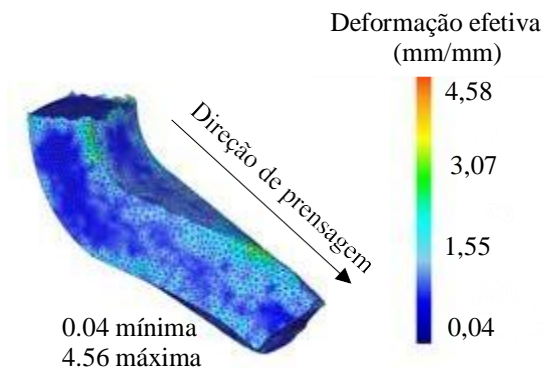


Figura 3: Mapa de distribuição das deformações efetivas após um passe em ECA-T.

Pode ser observado na Figura 3 que no ponto em que se tem a torção, a deformação efetiva se eleva, em comparação com a região anterior em que há somente o cisalhamento simples. A Figura 4 apresenta os valores médios de tensão efetiva, estimados pela simulação numérica, em função da posição no tarugo. Observa-se que, em aproximadamente 26 mm, ocorre uma elevação abrupta da deformação efetiva induzida pelo cisalhamento na zona de torção. Embora isto ocorra, não há pontos com grande concentração de deformações, o que colabora para

que a heterogeneidade de deformação seja reduzida ao longo do tarugo. Resultados similares foram obtidos por Iqbal e Muralidharam (2019) em simulações numéricas em ECA-T com variações na geometria da matriz.

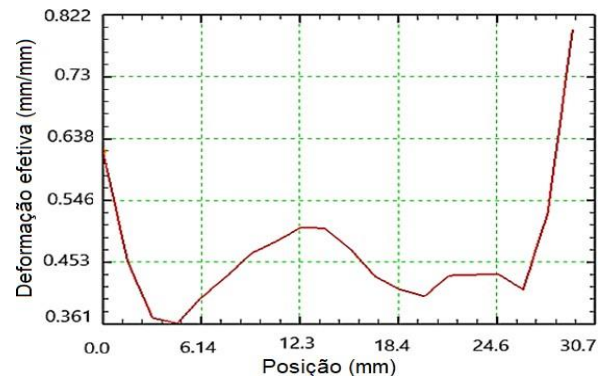


Figura 4: Deformações efetivas médias ao longo do tarugo durante um passe na matriz de ECA-T.

4. CONCLUSÃO

Baseado na simulação numérica de ECA-T com geometria da matriz protótipo, demonstrou-se a viabilidade do processo, dando uma satisfatória deformação imposta de 0,82 em um passe com relativamente baixa tensão na prensagem, resultado superior à matriz ECA convencional com mesmos ϕ e ψ ($\sim 0,60$). Além disso, a distribuição da deformação equivalente foi bastante homogênea ao longo do tarugo processado em ECA-T. As simulações futuras incluem alterações na geometria da matriz e no posicionamento da torção no canal, para otimizar a deformação equivalente e tensões na ECA-T.

5. REFERÊNCIAS

- Bagherpour, E., Pardis, N., Reihanian, M., e Ebrahimi, R., 2019. "An overview on severe plastic deformation: research status, techniques classification, microstructure evolution, and applications". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 100, pp. 1647-1694.
- Iqbal, U.M., e Muralidharam, S., 2019. "Optimization of die design parameters and experimental validation on twist channel angular pressing process of AA6061-T6 aluminium alloy". *Materials Research Express*, Vol. 6, pp. 0865f2.
- Kocich, R., Fiala, J., Szurman, I., Macháčková, A., e Mihola, M., 2011. "Twist-channel angular pressing: Effect of the strain path on grain refinement and mechanical properties of copper". *Journal of Materials Science*, Vol. 46, pp. 7865-7876.
- Lu, S. K., Liu, H. Y., Yu, L., Jiang, Y.L, e Su, J. H., 2011. "3D FEM simulations for the homogeneity of plastic deformation in aluminum alloy HS6061-T6 during ECAP". *Procedia Engineering*, Vol. 12, pp. 35-40.
- Macháčková, A., 2020. "Decade of Twist Channel Angular Pressing: A Review". *Materials*, Vol. 13, pp. 1725.

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 Γ^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 (Ω), 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 (Ω), 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 ε , 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}^m 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}^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*, 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)>.

PROCESSO DE DOBRAMENTO A FRIO DE CHAPAS FINAS METÁLICAS: ANÁLISES POR ELEMENTOS FINITOS, EXPERIMENTOS E MODELO MATEMÁTICO PARA COMPENSAÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO

Jonatan Augusto da Silva ⁽¹⁾

Sérgio Henrique Evangelista ⁽²⁾

⁽¹⁾Mestrando, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, jonatan.augusto@hotmail.com

⁽²⁾Prof Dr, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, toddyprof@ufscar.br

Resumo: A operação de dobra de chapas é um processo de conformação mecânica presente nos mais diversos ramos de aplicações industriais e o retorno elástico (springback) é um dos problemas encontrados em sua realização. O objetivo deste trabalho é verificar o comportamento do alumínio QQ-A-250/5 'T3' (2024) ao ser submetido a uma operação de dobramento em "V" utilizando matriz e punção como ferramentas, comparando seus resultados com equações conhecidas na literatura e com resultados apresentados em trabalhos de referência. Análises numéricas no software Abaqus foram realizadas utilizando como dados de entrada valores obtidos por meio de ensaios de tração do material, além de dados fornecidos pelos fabricantes das chapas que são largamente utilizadas na área de construção aeronáutica. Por meio da análise dos experimentos foi possível verificar diferenças nos resultados esperados nas equações em comparação com os dados obtidos nas análises numéricas e nas medições dos corpos de prova. Os resultados por elementos finitos apresentaram desvios menores que aqueles obtidos por cálculos diretos. Discussões sobre limitações nas análises e dependências das hipóteses são apresentadas para oferecer aprimoramento futuro nos processos preditivos.

Palavras-chaves: Elementos Finitos, Retorno Elástico, Dobramento de Chapas V, Medição Tridimensional.

1. INTRODUÇÃO

A operação de dobramento de chapas é amplamente realizada aplicando-se uma carga de forma a aumentar a tensão interna do material (Calister, 2008) e mesmo com todo conhecimento da indústria sobre o processo, podem surgir alguns problemas técnicos no decorrer de sua aplicação (Farsi e Arezoo, 2011).

O retorno elástico conhecido como *springback* está entre os fenômenos indesejáveis que podem surgir durante o desenvolvimento do processo de dobra fazendo com que a chapa submetida ao processo de conformação retorne parcialmente ao seu estágio inicial, o que pode comprometer a qualidade dimensional do produto (Ramezine *et al.*, 2010).

O objetivo do presente trabalho consiste em realizar as operações de dobra em chapas de alumínio QQ-A-250/5 'T3' (2024), utilizando corpos de prova com espessuras de 0,4mm para a verificação da compatibilidade dos resultados com as equações conhecidas, além de verificar possíveis alterações nos dados do springback e propor correções no modelo para compensar seus efeitos dimensionais nas peças.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No desenvolvimento deste trabalho foram realizados ensaios experimentais e numéricos em chapas de alumínio QQ-A-250/5 'T3' (2024) com espessura de 0,4 mm para verificação de seu retorno elástico

O experimento foi realizado utilizando-se de uma dobradeira do Modelo Newton PDH - 7525 para cargas de 75 toneladas com um vão livre disponível para dobra de chapas de até 2,5 m e com comando numérico computadorizado. A medição foi realizada utilizando uma medidora tridimensional modelo TESA Bugnon 38.

Para a simulação numérica foi utilizado o software de elementos finitos *ABAQUS 2014*, utilizado a partir de disponibilização do mesmo junto ao DEMa, Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar, Universidade Federal de São Carlos.

Corpos de prova utilizados para o ensaio de tração foram cortados em uma máquina de corte a fio Fanuc modelo a-C400iA. Os corpos de prova para o ensaio estavam de acordo com a norma ASTM E 8M-2000.

Foram produzidos 2 punções com raios de dobra diferentes, sendo um deles com raio de 1,0 mm na fig. 1-b e o outro com o raio de dobra de 5,5 mm fig. 1-c. A figura 1-a apresenta a montagem entre a matriz e o punção com raio de 1,0mm.

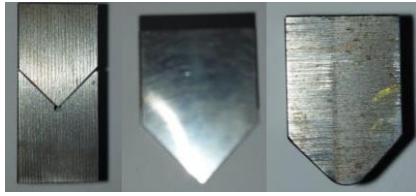


Figure 1: a- Montagem punção/matriz, b- Punção de raio 1,0mm, c – Punção com raio de 5,5mm.

Para simplificação da análise numérica foi considerado o ensaio como simulação em 2D utilizando o estado plano de deformação, além da aplicação de simetria no corpo de prova, punção e matriz.

A malha do corpo de prova foi dividida em 6 elementos igualmente espaçados na direção da espessura de 0,4mm e em 60 elementos na direção do comprimento, o que resultou em um total de 360 elementos em cada uma das metades do corpo de prova. Os elementos utilizados foram do tipo CPE4 que são formados por 4 nós e são aplicados em estado plano de deformação.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

A figura 2 apresenta os resultados de duas chapas dobradas com punções diferentes, onde a figura 2-a consiste na chapa dobrada com ferramenta de raio 1,0 mm e a figura 2-b mostra o resultado da chapa dobrada com ferramenta de raio 5,5 mm.



Figure 2: a- Raio de 1,0mm. b – Raio de 5,5mm.

O estado de tensões equivalentes obtido por elementos finitos é ilustrado na figura 3 para o caso da dobra com ferramenta de raio 1,0 mm. Nas análises que se seguem, foi escolhido como ponto de estudo o comportamento do elemento 1.

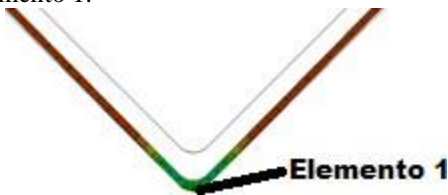


Figure 3: Análise Numérica.

A figura 4 apresenta um comparativo entre o comportamento da tensão e da deformação no elemento 1 (Elemento central da chapa) durante todo o ensaio.

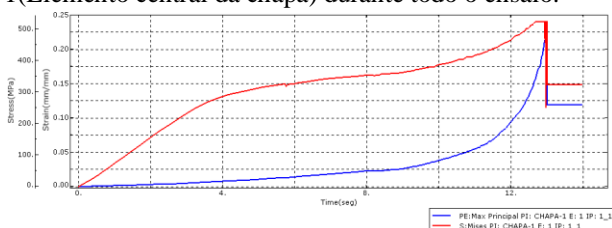


Figure 4: Tensão e Deformação do elemento 1.

Schaeffer e Rocha (2007) apresentaram a equação 1 em que o fator de retorno elástico pode ser aplicado como ferramenta na previsão do comportamento da chapa ao ser dobrada, em que M_b representa o momento de dobra, r_1 o raio de dobra, s é o valor da espessura da chapa, E é o valor do módulo de elasticidade e b representa a largura da chapa.

$$k = 1 - \frac{12M_b(r_1 + 0,5s)}{E * b * s^3} \quad (1)$$

A equação 2 apresenta o erro calculado por meio da comparação entre os valores calculados de maneira teórica, experimental e por meio da análise numérica.

$$Erro = 100 * (Valor_{Calc} - Valor_{Exp}) / Valor_{exp} \quad (2)$$

Desta forma é possível verificar os erros de previsão dos ângulos finais de dobramento conforme a equação 1 em que seus resultados estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Erros teóricos, experimentais e numéricos

Raio de dobra	Erros teóricos em relação ao experimento	Elementos finitos em relação ao experimento
1,0	+ 2,95%	- 4,85%
5,5	+ 20,20%	- 8,21%

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentadas comparações entre as predições teóricas e por elementos finitos sobre o problema do retorno elástico em amostras metálicas. Erros menores foram obtidos nas análises por elementos finitos, com desvios abaixo de 8,21% em módulo a respeito dos ângulos finais obtidos nas análises numéricas em relação aos obtidos nos experimentos. As duas abordagens de predição possuem limitações, sendo elas discutidas no texto para orientar as iniciativas futuras de aprimoramento com as técnicas apresentadas.

5. REFERÊNCIAS

- Calister Jr, W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC editora, 2008, 705p.
- Farsi, M. A; Arezoo, B. Bending force and spring-back in v-die-bending of perforated sheet-metal components. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. Rio de Janeiro*, v. 33, n. 1, p. 45-51, Mar. 2011.
- Ramezani, M.; Ripin, Z. M.; Ahmad, R. Modelling of kinetic friction in Vbending of ultra high strength steel sheets. *Int J Adv Manuf Technol, Nibong Tebal*, v.46, p.101-110, 2010.
- Schaeffer, L.; Rocha, A. DA S. *Conformação Mecânica: Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação*. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2007.

PREVISÃO DE FORÇAS NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPA FINA METÁLICA POR MEIO DE EXPERIMENTOS E ANÁLISES POR ELEMENTOS FINITOS

Tony Emerson Marim ⁽¹⁾

Sérgio Henrique Evangelista ⁽²⁾

⁽¹⁾ Mestrando, Universidade Federal de São Carlos, Brasil, marim.tonyemerson@gmail.com

⁽²⁾ Professor Dr. Universidade Federal de São Carlos, Brasil, toddyprof@ufscar.br

Resumo: No presente trabalho é investigado o comportamento das chapas de alumínio de uso industrial QQ-A-250/5 'T3' (2024), com 0,40mm de espessura, quando exposto ao processo de Estampagem Incremental (EI). Especificamente para a pesquisa, foi utilizada a modalidade de EI de Ponta Única com uma ferramenta de ponta semiesférica. Foi elaborado um modelo em Elementos Finitos (EF) por meio do uso do software ABAQUS (*Dassault Systèmes*) com dados materiais colhidos anteriormente em ensaio de tração, possibilitando aproximar na simulação os valores adquiridos nos experimentos reais. Experimentos e análises por EF foram executados sobre alguns casos que combinam raio da ponta de ferramenta e passo diferentes. Foi feito o cálculo das forças de processo por EF e estes valores foram comparados com um modelo matemático ajustado por outros autores sobre os parâmetros do processo para a liga de alumínio utilizada. Mostrou-se que com baixo tempo de processamento computacional com os presentes modelos foi possível obter uma previsão de forças cujos erros em relação ao modelo da literatura ficaram enquadrados em uma faixa restrita de previsão. Isto aponta para a viabilidade da técnica de previsão discutida às aplicações industriais com peças mais complexas.

Palavras-chaves: Estampagem incremental, Alumínio, Elementos finitos, Conformação de chapas.

1. INTRODUÇÃO

Na Estampagem Incremental (EI), assim como nos processos mecânicos convencionais, devem ser considerados os diversos parâmetros a serem analisados durante sua aplicação.

Este artigo apresenta uma avaliação da influência das ações das forças na EI do tipo de ponta única, com ferramenta de ponta semiesférica rotativa simulada em um modelo elaborado em Elementos Finitos (EF), a fim de prever as ocorrências na deformação obtida na estampagem de chapas finas do alumínio 2024.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A estampagem foi feita em chapas de Alumínio QQ-A-250/5 'T3' (2024) com dimensões de 0,4 x 77 x 127 mm. Para cada experimento foi determinado o percurso e o incremento das ferramentas por programação em uma máquina CNC da marca Romi e modelo D800.

Em todos os experimentos foi desenvolvida uma geometria cônica e em espiral, sendo mantidos a rotação da ferramenta em 1000 RPM e um avanço constante de $F = 200$ mm/min. sobre a chapa nos eixos X, Y e Z, por meio de ferramenta semiesférica. O incremento vertical inicial sobre o eixo Z iniciou-se em 0,5 mm, percorrendo uma forma circular com profundidade de 15 mm, mantendo um ângulo de 45° de parede em relação a ferramenta.

O modelo para análises em EF foi construído com o auxílio do software ABAQUS, para analisar a influência do atrito, das tensões e forças aplicadas durante a EI,

fixando-se a malha e variando-se as condições de contorno.

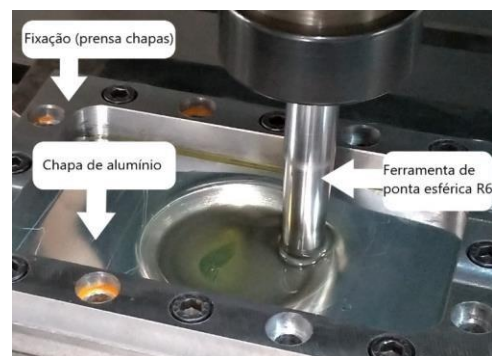


Figura 1: Experimento de EI.

As ferramentas foram simplificadas em formas semiesféricas e assim como o prensa-chapas foram determinadas como elementos rígidos.

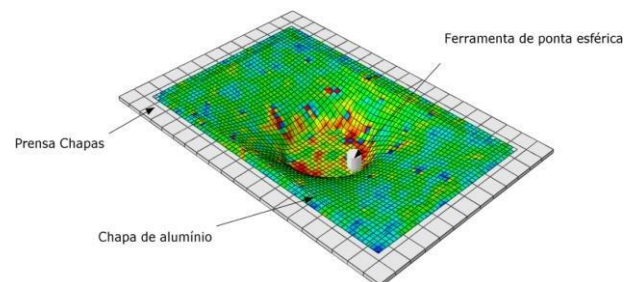


Figura 2: Modelo do EF.

Para análise da malha foram levadas em consideração as forças obtidas no final da simulação e as análises feitas nos elementos escolhidos conforme a realização do trajeto da ferramenta com a superfície da chapa. Na predição dos valores da força no eixo Z F_z , Aerens *et al.* (2010) desenvolveram a variável dependente F_s , que é a força em Z dada em Newton.

$$F_s = 0,0716 Rm t^{1,57} dt^{0,4} \Delta h^{0,09} \alpha \cos \alpha \quad (1)$$

em que, Rm é o valor de resistência a tração (N/mm^2), t é a espessura da chapa (mm), dt é o diâmetro da ferramenta (mm), α é o valor do ângulo da parede e Δh é altura do *scallop* relacionado ao incremento de profundidade Δh^1 .

$$\Delta h = 2 \sin \alpha \sqrt{\Delta h^1 (dt - \Delta h^1)} \quad (2)$$

3. RESULTADOS PRELIMINARES

No aspecto final das chapas extraídas em 2 casos que combinam raio da ferramenta e passos diferentes, nota-se o detalhe da Fig. 3 com a indicação da abertura da trinca, o que condicionou a interrupção do processo.

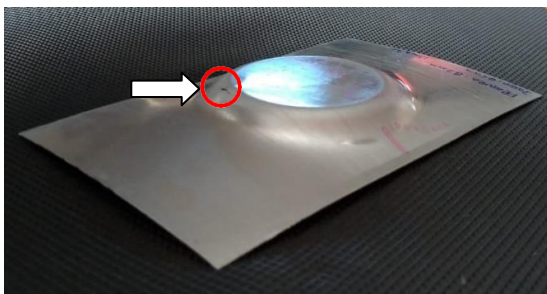


Figura 3: Trinças no experimento.

A Fig. 4 ilustra em superposição as curvas de forças nas direções X, Y e Z, bem como os deslocamentos na direção Z, para o caso de EI em que a ferramenta tinha raio de 3 mm, com passos de 0,20 mm. Esta configuração refere-se ao caso experimental demonstrado na figura 3. Não serão demonstradas as curvas para os outros casos. Elas foram obtidas numericamente para um deslocamento de 15 mm, mas os dados efetivos de forças contemplaram uma região de análise dos gráficos em que os deslocamentos eram menores ou iguais aos efetivos em seus respectivos experimentos.

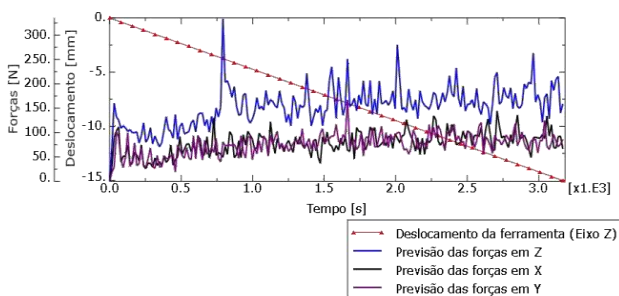


Figura 4: Previsão das forças na EI.

A previsão de esforços nos vários casos demonstrou uma grande oscilação das cargas. É possível que isto seja

uma penalização de caráter numérico devido ao fato de que simplificações foram adotadas na implementação do modelo de EF para que as análises durassem em torno de 20 minutos para serem executadas.

A Tab. 1 traz um comparativo das forças aplicadas ao eixo Z a partir da estimativa pela Eq.(1) dos autores e por EF. Observa-se que foi desconsiderada neste estudo a influência da rotação da ferramenta pois a presença dos valores de rotação empregados nas simulações em comparação com os cálculos realizados implicaram em uma redução média de apenas 5% da força final no eixo Z (AL-OBAIDI; KRÄUSEL, 2016).

Observa-se que os valores obtidos por EF ficaram em geral menores que os valores obtidos da Eq.(1) Verifica-se que o módulo de erros de previsão ficou abaixo de 30%.

Dos valores obtidos por EF destacou-se na Tab. 1 o pico mais pronunciado em cada caso.

Tabela 1: Comparação dos valores do experimento.

Raio da ferramenta	Passo (Incremento)	Valores estimados conforme Eq. (1)	Valores obtidos por Elementos finitos	Erro % em relação ao estimado pela Eq. (1)
R 6mm	0,5	392,2 N	328 N	-16,4 %
R 3mm	0,5	314,2 N	311 N	-1,01 %
R 6mm	0,2	332,6 N	233 N	-29,9 %
R 3mm	0,2	266,4 N	234 N	-12,2 %

Por outro lado, das estimativas obtidas pela Eq. (1), consideram-se as investigações feitas pelos autores da equação. Estes ponderaram pelo fato de que as equações apresentadas em seu trabalho para vários materiais referiram-se às curvas ajustadas a partir de uma quantidade grande de experimentos, com variações em suas condições. Disto, para a liga de Alumínio 2024 foi estimado que o erro de previsão da equação em relação aos seus experimentos ficou entre +10% e -24%. Estes autores trabalharam com ferramentas de raio maior ou igual a 10mm.

Os erros de predição de força neste trabalho poderiam ser estimados a partir de uma composição entre os valores da Tabela 1 e os valores obtidos pela Eq. (1) para a liga de alumínio utilizada. Assim, estima-se que o padrão de implementação por EF empregado neste trabalho deverão produzir erros compostos em relação a experimentos futuros que fique na faixa entre +9% e -45%.

Considerações adicionais podem ser feita acerca de melhorias ao modelo de EF empregado e que possam contribuir com uma previsão mais robusta dos esforços desejados.

4. CONCLUSÃO

Erros de predição da força em Z para o estudo foram estimados para ficarem entre +9% e -45% quando comparado com trabalho de outros autores. A condição de implementação dos presentes modelos mediante esta faixa de erros de predição sugere a busca por melhorias discutidas. Dentre elas, destacam-se a melhoria, no âmbito do modelo de EF, sobre as condições de travamento da borda da chapa na matriz e sobre a escolha do modelo de atrito e seu coeficiente. Vale enfatizar a importância em se

manter o tempo de processamento computacional baixo (20 minutos) para que a disseminação em âmbito industrial da técnica seja atrativa, mesmo com erros de predição enquadrados na faixa acima citada.

5. REFERÊNCIAS

- Aerens, R., Eykens, P., Bael, A.P., e Duflou, J.R., 2010. “Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and fem observations.”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.46, No. 9, pp. 969–982.
- Al-Obaidi, A., Kräusel, V., e Landgrebe, D., 2016. “Hot single-point incremental forming assisted by induction heating”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 82, pp. 1163–71.

MODELAGEM DE CURVAS DE FLUXO PLÁSTICO DE UM AÇO BIFÁSICO UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Leones Contini Junior, UFSCAR, São Carlos, Brasil, rpleonesjr@yahoo.com.br

Oscar Balancin, UFSCAR, São Carlos, Brasil, balancin@ufscar.br

Resumo: Curvas de tensão de fluxo de metais com ligas em condições de trabalho a quente são primordiais nos processos de conformação de metais. O aço inoxidável super duplex com matriz de ferrita e partículas de austenita dispersa foram deformadas por testes de torção a quente. Simulou-se o comportamento plástico deste material usando dados apenas da região da deformação plástica e construí-se uma planilha com quatro colunas. Os atributos de entrada foram temperatura, taxa de deformação, deformação e tensão imposta pelo material durante a deformação. Estes foram submetidos a algoritmos de aprendizado de máquina em uma rede neural artificial com uma camada oculta (RNA) e depois em uma rede neural com um sistema especialista (ANFIS), resultando em curvas de fluxo plástico as quais foram comparadas com as obtidas experimentalmente. A capacidade de ambos os algoritmos de reconstruir as curvas de fluxo foram associadas às mudanças nas formas das curvas de fluxo e evolução da microestrutura. Observou-se que as curvas de tensão de escoamento previstas pelas duas técnicas foram muito semelhantes às experimentais. O ajuste das curvas experimentais e previstas é melhor quando utilizado pelo algoritmo RNA. A IA foi capaz de funcionar sem conhecer totalmente os mecanismos que representam a deformação.

Palavras-chaves: Conformação, Rede Neural, Fuzzy, Modelo.

1. INTRODUÇÃO

Existem materiais que têm comportamento plástico bastante complexo como é o caso dos aços inoxidáveis super duplex. Usualmente, o comportamento plástico de materiais metálicos é determinado em escala de laboratório na forma de curvas de escoamento plástico. Essas curvas são determinadas em largas faixas de condições de trabalho, mas não necessariamente nos valores em que são realizadas as operações industriais. Assim, para transportar os valores experimentais para a prática industrial, torna-se necessário tomar valores aproximados e uma alternativa é a modelagem matemática dessas curvas (Eren *et al.*, 2021).

O comportamento plástico de muitos materiais não é conhecido, exigindo outro caminho para modelar as suas curvas de fluxo plástico. Uma alternativa realística e bastante atual é a utilização de técnicas de inteligência artificial (IA) (Wang *et al.*, 2020).

A combinação da IA com redes neurais e as capacidades de aprendizagem do sistema de inferência de lógica difusa pode ser utilizada para estabelecer relações de mapeamento precisas entre dados de entrada e saída (Jang, 1993). Os sistemas fuzzy utilizam um método matemático para introduzir o conhecimento humano subjetivo nos processos reais. O ANFIS tem sido aplicado para diferentes materiais com bom desempenho (Vafaeenezhad *et al.*, 2017).

Estudos comparando a aptidão atingida por IA com aquela obtida com modelos fenomenológicos ou com os modelos constitutivos de base física indicam melhor fitness com IA (Haghdadi *et al.*, 2013; Kumar *et al.*, 2021)

Uma vez que esses algoritmos não postulam nenhuma expressão matemática específica e podem ser facilmente estabelecidos com base em dados experimentais, espera-se que seja possível modelar e prever o comportamento de deformação em alta temperatura do aço inoxidável super duplex, sem considerar a evolução da fração de volume de austenita com a temperatura em declínio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho foi o aço inoxidável super duplex - UNS S32760 – (Tabela 1).

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável UNS S32760 (% em massa)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	Cu	N	Fe
0.02	0.25	0.54	25.18	7.04	3.57	0.53	0.55	0.23	Bal.

Os ensaios foram realizados em uma máquina horizontal de ensaios de torção a quente, acoplada a um micro-computador por meio de interfaces que possibilitam a intercomunicação máquina-computador, permitindo o controle do ensaio e a aquisição de dados.

Os testes de torção a quente foram realizados a 900 °C, 1000 °C, 1100 °C e 1200 °C com taxas de deformação de 0,01, 0,1, 1 e 10 s⁻¹. Essas temperaturas e as taxas de deformação foram impostas e controladas pelo software. As tensões necessárias para deformar o material foram medidas por sensores (codificador e célula de torção) acoplados à máquina e enviados ao

software para a construção das curvas verdadeiras tensão x deformação.

Utilizou-se dois algoritmos de aprendizado de máquina: rede neural artificial rasa (RNA) com uma camada oculta e a combinação de uma RNA com lógica fuzzy, criando um sistema de inferência neuro-fuzzy adaptativo (ANFIS).

Na aplicação da ANFIS foram feitos experimentos de treinamento e de teste. Assim, a base de dados foi separada em base de treinamento e base de testes e definiu-se com bastante cuidado a deformação de ruptura do corpo de prova em cada ensaio. No processo de aprendizagem de máquina, as curvas de escoamento plástico foram reconstruídas e comparadas com as obtidas experimentalmente. A construção de um sistema neuro-fuzzy permitiu a análise dos parâmetros nas respostas obtidas. A montagem do algoritmo, aprendizagem de máquina e linguagem de programação foram feitas utilizando o software Matlab.

Embora o trabalho tenha sido projetado para usar a caixa de ferramentas 'Fuzzy Logic Designer', em diversas ocasiões, foi necessário escrever os códigos para que fossem obtidos resultados mais adequados. Após adequação da base de dados, foi utilizado o tool box do fuzzy logic designer para promover o aprendizado de máquina. Neste processo, o computador construiu o modelo do material em estudo. Após o aprendizado de máquina, foi necessário determinar o erro comparando os dados experimentais com os dados calculados pelo modelo. Para isso, atentou-se ao erro, ou seja: a diferença entre os valores experimentais e os preditos pelo modelo. Quando o nível do erro não foi satisfatório, foram feitas mudanças, em particular, nas funções de pertinência (membership functions) e nos níveis dos parâmetros de entrada e de saída. Quando foi alcançado um nível aceitável, este modelo foi usado para fazer previsões.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

Controlando o processo de aprendizado de máquina, pelo software/algoritmo originou-se um modelo para descrever a relação entre os dados de entrada e de saída. Com este modelo, os dados experimentais foram comparados com os dados de saída calculados e desta forma os erros no processo de aprendizagem foram determinados.

O conjunto de dados foi dividido em três grupos: 70% para treinamento, 15% para validação e 15% para teste. O número de neurônios na camada oculta e a evolução do erro quadrático médio da raiz (RMSE) na rede neural rasa, que foi aplicada ao aço inoxidável duplex, alterou o número de neurônios na camada oculta.

Observou-se que para poucos números de neurônios a inclinação é maior, todavia para mais de 18 neurônios o erro é praticamente constante, se considerarmos os conjuntos de dados de treinamento, validação e teste. Estes conhecimentos junto com a função de ativação sigmoideal logística definiram a arquitetura do algoritmo ANN.

Com a definição da arquitetura do RNA, o mesmo foi usado para prever as curvas de fluxo plástico do aço inoxidável duplex (Figura 1).

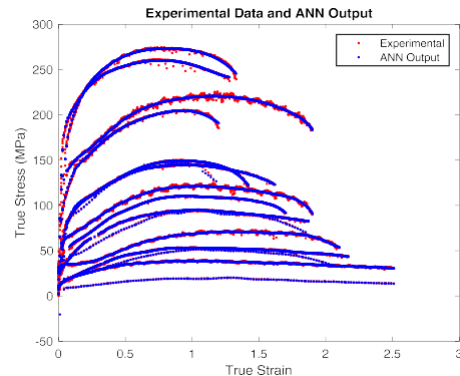


Figura 1: Resultados do aprendizado de máquina com RNA.

4. CONCLUSÃO

Para representar as curvas de deformação plástica à quente do aço inoxidável super duplex, a IA apresentou-se capaz de funcionar mesmo não conhecendo totalmente os mecanismos que representam a deformação.

A RNA não precisa conhecer os mecanismos físicos que atuam durante a deformação plástica à quente e o seu algoritmo acompanha melhor o ajuste de curvas experimentais e previstas do aço inoxidável super duplex.

5. REFERÊNCIAS

- Eren, B., Guvenc, M.A. e Mistikoglu, S., 2021. "Artificial Intelligence Applications for friction stir welding: a review. *Metals and Materials International*, Vol. 27, p.193-219.
- Haghdadi, N.; Zarei-Hanzaki, A.; Khalesian, A.R.; Abedi, H.R., 2013. "Artificial neural network modeling to predict the hot deformation behavior of an A356 aluminum alloy". *Materials Design*, Vol. 49, p. 386-391.
- Jang, J-S.R., 1993. "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system". *IEEE Transactions Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 23, p.665-685.
- Kumar, S.; Karmakar, A.; Nath, S. K., 2021. "Construction of hot deformation processing maps for 9Cr-1Mo steel through conventional and ANN approach". *Materials Today Communications*, Vol.26, p.101903.
- Vafaenezhad, H.; Seyedein, S.H.; Aboutalebi, M.R.; Eivani, A.R., 2017. "Application of constitutive description and integrated ANFIS – ICA analysis to predict hot deformation behavior of Sn-5Sb lead-free solder alloy". *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 697, p.287-299.
- Wang, Y., Wu, X., Li, X., Xie, Z., Liu, R., Liu, W., Zhang, Y., Xu, Y. e Liu, C., 2020. "Prediction and analysis of tensile properties of austenitic stainless steel using artificial neural network". *Metals*, Vol. 10, p.234.

APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE *MACHINE LEARNING* PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE PEÇAS IMPRESSAS EM 3D

Gustavo Roberto Dos Santos

Moacir Godinho Filho

Gustavo Franco Barbosa

Sidney Bruce Shiki

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, SP, Brasil

gsantosif@gmail.com

moacir@dep.ufscar.br

gustavofb@ufscar.br

bruce@ufscar.br

Resumo: *A qualidade das peças processadas pela tecnologia de manufatura aditiva (MA) ou impressão 3D, tem sido grande desafio para a indústria. Entre os tipos de métodos de MA, a modelagem por deposição fundida (FDM, do inglês Fused Deposition Modeling), utiliza como matéria prima filamentos termoplásticos. O monitoramento das variáveis durante o processo de impressão, contribuem para a visualização dos defeitos na qualidade das peças pós-processadas e a eliminação do desperdício de material e tempo. Este trabalho propõe um método para avaliar automaticamente a qualidade de peças impressas em 3D com o monitoramento das variáveis de saída do processo, utilizando o aprendizado de máquina supervisionado.*

Palavras-chaves: *Machine learning, qualidade, 3D printed, Manufatura aditiva*

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA) tornou-se uma opção viável para a fabricação nos últimos anos. MA, frequentemente conhecida como impressão 3D, permite mais opções de manufatura porque tem a capacidade de criar formas geométricas complexas com a ajuda de um software de design. Outras vantagens da MA incluem prototipagem rápida, redução de estoque e produção descentralizada. A impressão 3D já contribuiu significativamente para vários avanços tecnológicos na medicina e está surgindo em muitos outros campos, como design de moda e arquitetura, e até mesmo a Nike lançou recentemente o primeiro calçado esportivo incluindo componentes impressos em 3D (White, 2015).

Muitas máquinas de impressão 3D não possuem um sistema designado para rastrear e monitorar o progresso do processo de impressão. As impressoras 3D podem continuar a imprimir a peça até que todas as camadas tenham sido concluídas, mesmo que o filamento acabe ou haja qualquer defeito potencial na impressão. Detectar defeitos por meio da verificação de qualidade em vários estágios (críticos) do processo de impressão não apenas ajuda a garantir medidas corretivas, mas também elimina o desperdício de peças defeituosas de impressão. O monitoramento automático do processo é especialmente importante para a operação de impressão 3D em escala de produção, na qual centenas de máquinas de impressão 3D são usadas na produção em massa da mesma peça (Goh, 2021).

O aprendizado de máquina (ML), uma subárea da inteligência artificial (IA), está se tornando cada vez mais usada em pesquisa de manufatura aditiva (MA). O

aprendizado de máquina é definido como programa de computador para otimizar um critério de desempenho usando dados de exemplo ou experiência anterior (Alpaydin, 2020). Para o aprendizado de máquina em manufatura aditiva, além da típica aplicação de criação de previsões por meio do ajuste de dados, grupos de pesquisa estão explorando novos e inovadoras abordagens para integrar métodos de ML e IA em MA. Algoritmos de ML, aplicativos e plataformas estão ajudando os profissionais de MA a melhorar a qualidade do produto, otimizar os processos de fabricação e a redução de custos (Meng, 2020).

Este trabalho propõe um método para avaliar automaticamente a qualidade de peças impressas em 3D com o monitoramento das variáveis de saída do processo, utilizando o aprendizado de máquina supervisionado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Será utilizado um sistema de manufatura aditiva para peças de grandes volumes, com a integração de uma extrusora mono-rosca da marca Miotto, modelo P2788 e um manipulador tipo Delta customizado (Figura 1). O processo de impressão 3D aplicado é Fused Deposition Modeling (FDM). As peças sendo impressas em 3D serão monitoradas em tempo real utilizando plataformas IoT como: acelerômetro, sensores de temperatura, câmera e sensor de umidade no ambiente. Os materiais de impressão a ser usado durante esta pesquisa será ABS em pellets, com temperatura de trabalho entre 200°C e 210°C. Este material apresenta propriedades mecânicas, o que influencia significativamente a qualidade dos produtos impressos. A linguagem de programação python será

usada para construir um código para automatizar o monitoramento em tempo real do processo de impressão. A biblioteca *Scikit-learn*, ambiente para fornecer implementações de algoritmos de aprendizado de máquina bem conhecidos, mantendo uma interface fácil de usar totalmente integrada com a linguagem Python (Pedregosa *et. al.*, 2011).

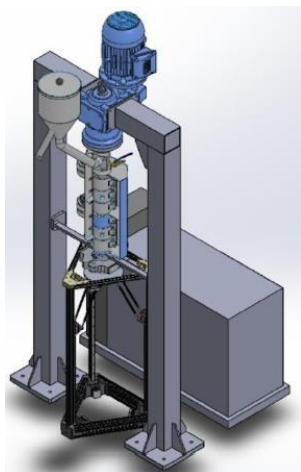


Figura 1: Célula MA para peças de grandes volumes.

3. RESULTADOS ESPERADOS E CONCLUSÃO

O método proposto, que integra a eficácia do processamento das variáveis do processo e o aprendizado de máquina supervisionado, atenderá ao propósito de monitoramento em tempo real de um processo de impressão 3D. O método será capaz de detectar defeitos de falha e identificar a sua origem, e defeitos estruturais ou geométricos.

4. REFERÊNCIAS

ALPAYDIN, Ethem. Introduction to machine learning. MIT press, 2020.

GOH, Guo Dong; SING, Swee Leong; YEONG, Wai Yee. A review on machine learning in 3D printing: applications, potential, and challenges. *Artificial Intelligence Review*, v. 54, n. 1, p. 63-94, 2021.

MENG, Lingbin et al. Machine learning in additive manufacturing: A review. *Jom*, v. 72, n. 6, p. 2363-2377, 2020.

PEDREGOSA, Fabian et al. Scikit-learn: Machine learning in Python. *the Journal of machine Learning research*, v. 12, p. 2825-2830, 2011.

WHITE, G. Industry analysis: the pros and cons of 3D printing. *Global Manufacturing*, v. 27, 2015.

ESTUDO DA PREVISIBILIDADE DO ERRO DE TRANSMISSÃO DE ENGRENAGENS DE DENTES RETOS PARA PROJETO DE MODIFICAÇÕES DE MICROGEOMETRIA

Matheus Luis Manfredo

Flávio Yukio Watanabe

Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, São Carlos - SP, Brasil
matheusmanfredo@gmail.com; fywatanabe@ufscar.br

Resumo: *Projetos de transmissões de engrenagens para aplicações em redutores e multiplicadores envolvem cálculos de esforços, reações e deformações, além de fatores de segurança. Variáveis de macrogeometria - módulo, número de dentes, ângulo de pressão etc. - são determinantes no desempenho da transmissão. Modificações de microgeometria no perfil e/ou no flanco dos dentes das engrenagens são projetadas, por exemplo, para distribuir uniformemente a carga de contato e diminuir excitações vibracionais. O presente trabalho tem como objetivo a investigação de modificações de perfil de dente de engrenagens cilíndricas de dentes retos e avaliar a influência no ruído e vibrações da transmissão. A excitação em engrenamentos será avaliada pela modelagem para previsão do erro de transmissão, este associado como uma das principais fontes de excitação em transmissões. Espera-se influir na redução da geração de ruído e vibrações por meio da modelagem que deverá contar com a influência da rigidez do engrenamento, carga e deformações de contato, e assim avaliar a efetividade na redução do erro de transmissão para diferentes modificações de microgeometria, buscando identificar as mais adequadas para a aplicação em transmissões de dentes retos, além de propor uma ferramenta para o aprimoramento em cálculos e simulações de transmissões engrenadas.*

Palavras-chaves: *redutores, engrenamento, erro de transmissão, ruído, vibração.*

1. INTRODUÇÃO

O projeto de transmissões de engrenagens para aplicações em redutores e multiplicadores de velocidade envolvem cálculos de esforços, reações e deformações, bem como os fatores de segurança para diferentes solicitações e aplicações. Parte do projeto envolve as variáveis relacionadas com a macrogeometria do engrenamento, tais como, módulo, número de dentes, ângulo de pressão e ângulo de hélice, e que são determinantes no desempenho de uma transmissão.

Modificações de microgeometria em engrenagens são propostas após a obtenção da macrogeometria. Essas modificações visam distribuir mais uniformemente a carga durante o contato, evitar choques durante o engrenamento, diminuir excitações vibracionais em uma transmissão, dentre outros propósitos, e podem ser realizadas no perfil e/ou ao longo do flanco de dentes (Linke; Börner e Heß, 2016).

A obtenção de características de microgeometria envolve principalmente o processo de retificação dos flancos dos dentes de engrenagem. A Figura 1 ilustra algumas das principais modificações de microgeometria aplicadas em engrenagens.

O presente estudo tem como objetivo principal a investigação de modificações de perfil (evolvente) de dente de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos e observar a influência na redução ou amplificação de ruído e vibrações na transmissão.

Engrenamentos de dentes retos são, em geral, mais susceptíveis a efeitos de ruído e vibrações quando comparados com engrenagens helicoidais, sendo por isso escolhidas como objeto de estudo no trabalho.

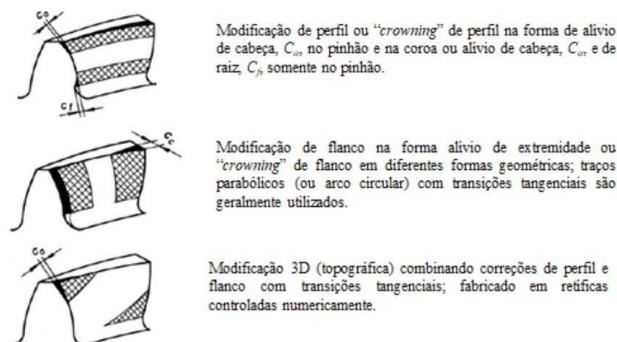


Figura 1: Diagramas de modificações de microgeometria (Adaptado de Linke, Börner, Heß, 2016).

O estudo deverá permitir avaliar a influência de parâmetros e quantidade de modificações aplicadas no dentado partindo de um projeto de transmissão já estabelecida em relação às variáveis de macrogeometria.

Para avaliação da excitação, o trabalho irá focar em um modelo para previsão do erro de transmissão, este entendido como uma das principais fontes de excitação em transmissões por engrenagens.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com Smith (2003), a fonte de variação de esforços em engrenagens evolventes é uma variação na suavidade da transmissão e é devida à combinação de pequenas variações na forma do dente em relação à evolvente teórica e variações causadas por deflexões elásticas do dente, de forma que a variação no deslocamento entre as engrenagens atua via resposta dinâmica do sistema resultando em variação de esforços e vibração. Nesse contexto, para avaliar os efeitos de excitação de pares de engrenagens, o trabalho irá propor um modelo para cálculo e previsão do erro de transmissão.

Segundo a definição de Welbourn (1979), o erro de transmissão é entendido como a diferença entre a posição real e teórica de uma engrenagem durante o processo de engrenamento, de forma que uma transmissão com diferenças maiores entre essas posições teóricas e reais irá resultar em maiores erros de transmissão.

O erro de transmissão é periódico na frequência de engrenamento e possui relação direta com a amplitude da excitação (vibração) de uma transmissão, sendo este o fator de maior importância na geração de vibrações (Wink, 2002).

O modelo para cálculo do erro de transmissão deverá contar com as influências da rigidez do engrenamento (par engrenado), carga aplicada e deformações no contato e assim propor um modelo analítico-numérica, que considere as referidas variáveis de rigidez, carga e distribuição de carga e, buscando obter uma ferramenta para previsão do cálculo do erro de transmissão em engrenagens de dentes retos.

3. RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se influir na redução do ruído e vibrações em transmissões de engrenagens de dentes retos por meio do modelo de previsibilidade do erro de transmissão e identificar quais modificações de microgeometria e suas respectivas quantidades podem mostrar-se mais adequadas e efetivas na redução de excitações.

A expectativa dos proponentes é que o trabalho possa contribuir para o avanço no entendimento do cálculo do erro de transmissão e modificações de microgeometria, buscando a melhoria do projeto de uma transmissão de dentes retos em relação aos efeitos de ruído e vibrações, além de buscar incentivar o aperfeiçoamento de projetos de transmissões.

4. REFERÊNCIAS

- Linke, H.; Börner, J. e Heß, R., 2016. "Cylindrical gears - calculation, materials, manufacturing". *Hanser*. Disponível em: <<https://www.hanser-elibrary.com/doi/abs/10.3139/9781569904909.fm>>
- Smith, J. D., 2003. "Gear noise and vibration". 2nd ed. New York: Marcel Dekker.

Welbourn, D.B., 1979. "Fundamental knowledge of gear noise - a survey". *The Institution of Mechanical Engineers - Noise and Vibration of Engines and Transmissions*, Vol. 117, pp. 9-14.

Wink, C. H., 2002. "Cálculo do erro de transmissão de pares engrenados com modificações na microgeometria dos dentes". *Dissertação (mestrado)* - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIT/263096>>

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).

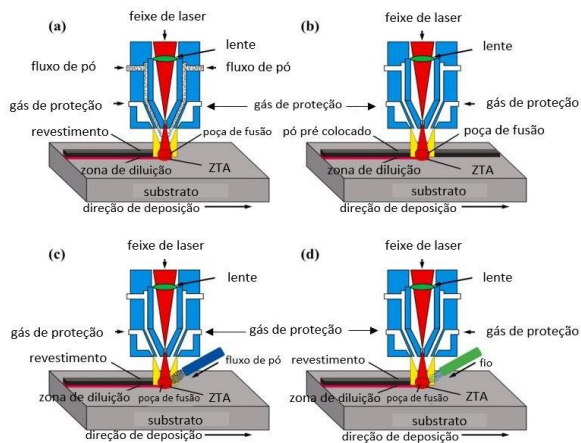


Figura 1: Tipos de LC (adaptado de Liu *et al.* (2021)). O

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).

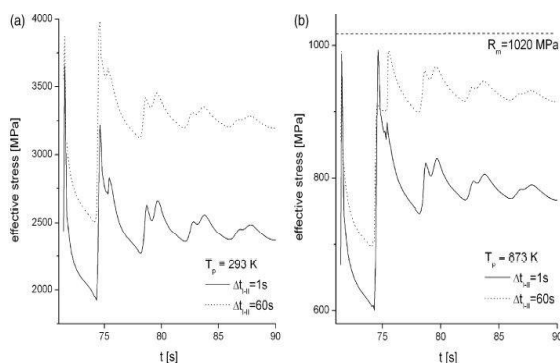


Figura 2: Comparação entre tensões geradas no substrato de amostras sem (a) e com pré-aquecimento (b) (Jendrzejewski e Śliwiński, 2007).

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.

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE SOBRE O ESTADO DE SUPERFÍCIE NO TORNEAMENTO DA LIGA TI-6AL-4V ELI

Gustavo Vinicius Ferreira da Silva¹

Alana Carla Miranda Araújo²

Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antoniali³

Prof. Dr. Marcos Roberto Monteiro⁴

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSCar, São Carlos, Brasil

¹gustavo.ferreira@estudante.ufscar.br ²alanaaraujo@estudante.ufscar.br

³antonialli@ufscar.br ⁴marcosmonts@gmail.com

Resumo: O titânio e suas ligas constituem materiais propícios para aplicações nas indústrias aeroespacial, automotiva, petroquímica e biomédica. Por apresentarem excelente biocompatibilidade, ligas de titânio são empregadas massivamente em implantes ortopédicos, especialmente a liga Ti-6Al-4V ELI. Assim sendo, a presente revisão analisa a influência direta de parâmetros particulares do torneamento de componentes a base da liga Ti-6Al-4V ELI sobre a rugosidade superficial final. Foram compilados estudos envolvendo torneamento da liga de titânio com variação da velocidade de corte em três níveis. A análise da rugosidade média obtida permitiu concluir que dentro dos limites estabelecidos, o aumento da velocidade de corte resultou em diminuição da rugosidade média, resultado consistentemente oposto ao observado em estudos da mesma correlação o porém envolvendo o processo de fresamento.

Palavras-chaves: Torneamento. Velocidade de corte. Ti-6Al-4V ELI. Rugosidade Média. Ligas de titânio

1. INTRODUÇÃO

Dentre os materiais que atendem aos requisitos associados à biomateriais, destacam-se aqueles à base de titânio. Além disso as características das ligas de titânio as fazem materiais ideais para aplicações nas indústrias aeroespacial, automotiva, petroquímica [2] a maioria dos sistemas de placas ósseas e próteses para restauração de articulações é composta de ligas de titânio. As ligas de titânio apresentam elevadas temperaturas de fusão e dureza, excelentes propriedades mecânicas, alta resistência à corrosão, ótima razão resistência-peso e biocompatibilidade. Além disso o titânio tem um módulo de elasticidade mais próximo ao tecido ósseo, não causa interferência de sinal na ressonância magnética e é considerado mais biocompatível do que o aço inoxidável [3] um outro biomaterial empregado na fabricação de implantes ortopédicos (temporários e permanentes)

As propriedades físicas e químicas do titânio, embora o tornem adequado para uma ampla gama de aplicações, também o fazem ser reconhecido pela baixa usinabilidade. Dentre as características que dificultam sua usinagem, destacam-se [4; 5; 6; 7]:

baixa condutividade térmica: essa característica atua concentrando o calor na zona de corte, criando altos gradientes de temperatura que levam a um rápido desgaste da ferramenta e que, em alguns casos, podem causar sua falha catastrófica;

alta reatividade química: a alta reatividade química do Ti com outros materiais, especialmente em elevadas temperaturas, causa adesão localizada na ferramenta que provoca aumento do desgaste, lascamento e eventual

falha da ferramenta, além de formar aresta postiça de corte (APC) instável que deteriora o acabamento da peça. E a 1.ª afinidade também facilita a difusão intersticial de nitrogênio e oxigênio na estrutura do material, contribuindo parcialmente para o endurecimento da superfície e encruamento do Ti; dureza e resistência: a alta dureza a quente e alta resistência mecânica das ligas de Ti geram altas forças de usinagem que resultam em deformação da ferramenta. Além disso, a alta resistência ao cisalhamento dinâmico durante o corte resulta em tensões de cisalhamento localizadas e cavacos segmentados que geram forças dinâmicas cíclicas devido à variação da espessura e largura do cavaco, causando baixa qualidade da superfície usinada, *chatter* e ruptura na ponta da ferramenta; baixo módulo de elasticidade: implica em grandes deflexões da peça durante a usinagem, aumentando a vibração, *chatter* e o atrito, prejudicando o acabamento; encruamento: aumenta o ângulo de cisalhamento, produzindo um cavaco muito fino, com conseqüente área de contato com a ferramenta muito pequena, causando altas tensões na ponta do inserto. Essa característica, aliada a baixa condutividade térmica, faz aumentar a temperatura do material, favorecendo a rápida falha da ferramenta.

De acordo com Ezugwu e Wang [4], comumente, classificam-se as ligas de titânio de acordo com as fases presentes em sua microestrutura, de forma que podemos subdividi-las em: 1. ligas alfa, que apresentam apenas a fase hexagonal compacta (HC), como verificado no titânio comercialmente puro em temperatura ambiente.

2. ligas beta, que apresentam a fase cúbica de corpo centrado (CCC), estável no titânio puro apenas em temperaturas elevadas, mas viabilizada com a presença de elementos betagênicos; 3. ligas alfa-beta, por fim, apresentam ambas as fases, HC e CCC, graças à presença de elementos de liga alfa e betagênico. A liga Ti-6Al-4V é um exemplo deste tipo de liga. O titânio comercialmente puro (CP, liga alfa) e Ti-6Al-4V ELI (*Extra Low Interstitial*), normatizados, respectivamente, pela ASTM F67 [8] e ASTM F136 [9], são os dois biomateriais à base de titânio mais comuns empregados em implantes ortopédicos [10].

Rezende *et al.* afirmam que a superfície de um biomaterial responde diretamente pela qualidade e quantidade de tecidos reparacionais formados, já que constitui plataforma para a migração e crescimento celular [11]. Assim, a resposta dos biomateriais quando inseridos em um organismo vivo não depende apenas da sua composição, mas, sobretudo de parâmetros associados à integridade superficial, como rugosidade, molhabilidade e mobilidade superficial, carga elétrica, cristalinidade e heterogeneidade a reações biológicas. Entretanto, ainda pairam dúvidas no que diz respeito às propriedades ideais das superfícies de implantes para se obter a biofixação adequada, fazendo com que as variáveis de controle devam ser independentemente analisadas [12]. Sun e Guo [13] destacam que, apesar de fundamental, a integridade superficial induzida pelo fresamento, que inclui rugosidade superficial, tensão residual, alterações da microestrutura da superfície e microdureza, tem recebido pouca atenção, enquanto que Revankar *et al.* [14] afirmam que a medição e a caracterização da qualidade da superfície usinada pode ser considerada como um tradutor do desempenho do processo de usinagem empregado.

Observa-se na literatura especializada estudos envolvendo a relação entre a rugosidade superficial de ligas de titânio e as condições de usinagem empregadas, porém os resultados desses estudos não apresentam concordância [15]. Assim sendo, a presente revisão pretende contribuir com a compreensão acerca da influência direta de parâmetros particulares do torneamento de componentes a base da liga Ti-6Al-4V ELI sobre o aperfeiçoamento da rugosidade superficial final.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo teórico realizado baseou-se principalmente em uma pesquisa bibliográfica, elaborada a partir de levantamentos de material publicado em periódicos indexados, que tratam da análise e posições sobre a problemática deste trabalho. Os levantamentos bibliográficos foram realizados por meio do Portal de Periódicos da capes que oferece acesso a textos completos, disponíveis em 45 mil publicações periódicas, internacionais, e a diversas bases de dados, que reúnem desde referência e resumos de trabalhos

acadêmicos e científicos, até normas técnicas, patentes, teses e dissertações, dentre outros tipos de materiais, cobrindo todas as áreas do conhecimento. Inclui também uma seleção de importantes fontes de informação científica e tecnológica de acesso gratuito na web (Portal de periódicos CAPES/MEC). As palavras-chaves utilizadas para os levantamentos foram: torneamento; velocidade de corte; Ti-6Al-4V ELI, Rugosidade média e ligas de titânio. A metodologia de coleta de dados foi empregada, principalmente, para identificar e obter informações que contribuíssem com o melhor entendimento sobre a influência direta de parâmetros particulares do torneamento de componentes a base da liga Ti-6Al-4V ELI na rugosidade superficial final.

É significativa, de forma que analisando especificamente tal parâmetro, é possível prever que trabalhos onde foram utilizados baixos valores de avanço apresentem baixos valores de rugosidade média.

Tabela 1. Parâmetros de corte empregados em estudos envolvendo torneamento da liga Ti-6Al-4V ELI

Referência	Autor	Ano	Vc [m/min]	f [mm]
17	W. Niu et al.	2013	50, 100 e 150	0,04
18	N. E. Karkalos et al.	2016	26,4, 32,05 e 37,7	0,6
19	P. A. le Roux et al.	2020	40, 75 e 110	0,2
20	S. Prandhan et al.	2019	65, 112 e 124	0,1

Em complementação, a Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V-ELI, enquanto que a Tabela 3 apresenta a composição química da mesma liga.

Tabela 2. Propriedades mecânicas: Ti-6Al-4V ELI

Material	Dureza (HV)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência a tração (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)
Ti-6Al-4V ELI	300-400	795	860	10	25

Material	N Máx	C Máx	H Máx	Fe Máx	O Máx	Au	V	Ti
Ti-6Al-4V ELI	0,05	0,08	0,012	0,25	0,13	5,5-6	3,5-4,5	Balanço

Tabela 3. Composição química: Ti-6Al-4V ELI Composição (% em massa)

3. RESULTADOS PRELIMINARES

Muitos estudos têm avaliado a influência de parâmetros de corte sobre o desgaste da ferramenta, forças de corte, vida de ferramenta, mecanismos de desgaste, rugosidade induzida, entre outras variáveis de resposta. Na Tabela 1 são compilados estudos envolvendo torneamento da liga Ti-6Al-4V ELI, e seus respectivos parâmetros de corte empregados. É possível observar que em todos os trabalhos foram utilizados valores fixos para o avanço (f) e variação da velocidade (V_c) de corte em três níveis. Salienta-se que a diferença absoluta entre os valores de avanço utilizados. Conhecidamente, a rugosidade sofre influência de diversos parâmetros de usinagem, que incluem a geometria da ferramenta de corte, a geometria da peça, a rigidez da máquina-ferramenta, o material da peça, as condições de corte e o material da ferramenta. Tomando os três principais parâmetros de corte envolvidos em um processo de usinagem: avanço, velocidade de corte e profundidade de usinagem, Machado *et al.* [21] afirmam que o avanço é o parâmetro mais influente sobre a rugosidade, pois a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática.

Mishra *et al.* [22] avaliando o torneamento da liga Ti-6Al-4V ELI com inserto revestido *wiper* verificaram que o avanço constitui o parâmetro de corte mais influente sobre a rugosidade (influência de 71,484%), seguido da profundidade de corte (20,292%) e da velocidade de corte (8,044%).

A Figura 1 apresenta o comportamento da rugosidade média obtida nos trabalhos analisados em função da variação do parâmetro velocidade de corte. Verifica-se uma leve tendência a diminuição da rugosidade média mediante aumento da rotação da peça que caracteriza aumento da velocidade de corte, entretanto, há uma dispersão da variável de resposta explicitada pela variância ($0,4\mu\text{m}$) que corresponde a 42% do valor médio de $0,965\mu\text{m}$.

Contrastando em termos do processo de usinagem, no fresamento foi verificado comportamento oposto do parâmetro de rugosidade em função do parâmetro de corte: Mersni *et al.* [23] verificaram que no fresamento da liga Ti-6Al-4V, baixos valores conduziram a baixos valores de rugosidade, sendo a velocidade de corte o

segundo parâmetro de corte mais influente sobre a rugosidade média quando comparado com penetração de trabalho e avanço por dente, enquanto Krishnaraj *et al.* [24] avaliando os mesmos parâmetros de corte na usinagem da mesma liga verificaram que a velocidade de corte consiste no parâmetro de maior influência sobre a rugosidade média em função da velocidade de corte

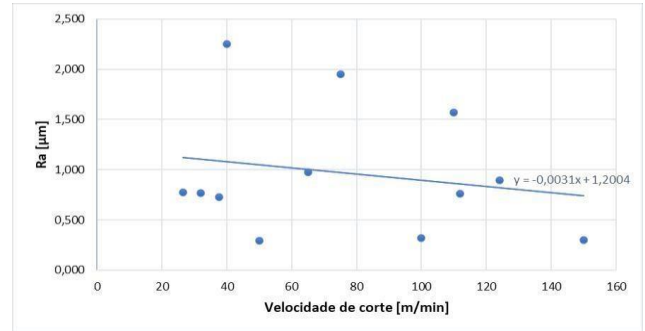
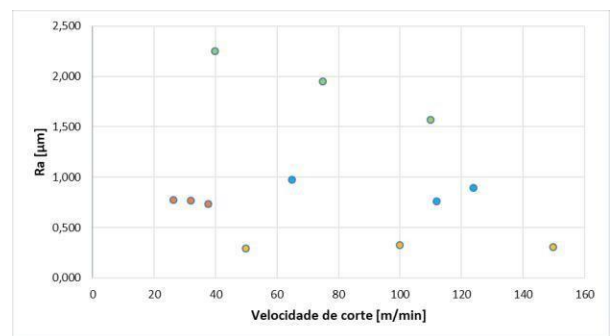


Figura 1. Comportamento da rugosidade média em função da velocidade de corte

A Figura 2 visa analisar os distintos trabalhos individualmente, de forma que é possível verificar que todas as referências reportaram o mesmo resultado em termos do comportamento da rugosidade média em função da velocidade de corte, isto é, independentemente dos níveis de rugosidade obtidos, a rugosidade média encontrada foi reduzida com o aumento da velocidade de corte.

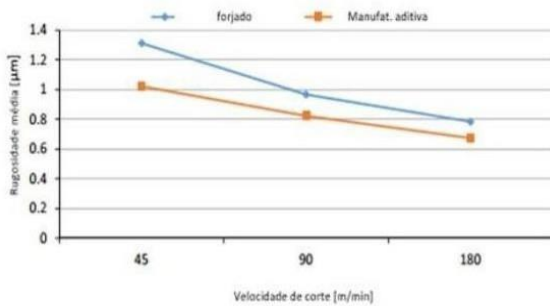
Figura 2. Comportamento da rugosidade média em função da velocidade de corte contrastando os distintos trabalhos analisados. Em amarelo: [16]. Em laranja: [17]. Em verde: [18]. Em azul: [19].



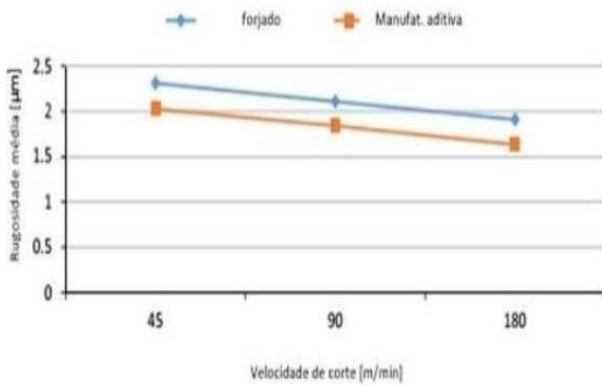
Fonte: Autores

Polishetty *et al.* [25] avaliaram a rugosidade média obtida no torneamento de amostras fabricadas via manufatura aditiva e forjadas na liga Ti-6Al-4V, variando-se velocidade de corte e avanço. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos, demonstrando convergência com o comportamento observado na presente revisão, ou seja, diminuição da rugosidade

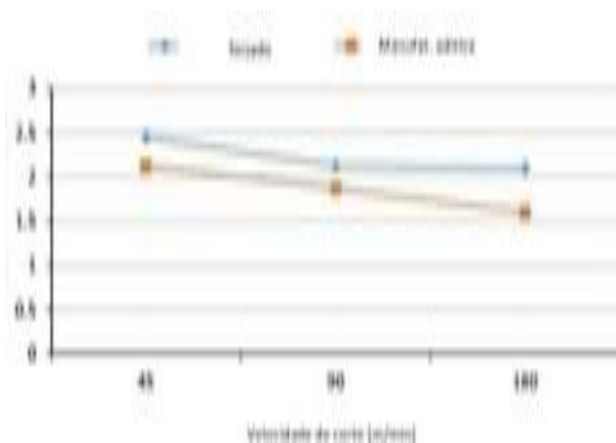
média com o aumento da velocidade de corte, independentemente dos valores de avanço utilizados.



(A)



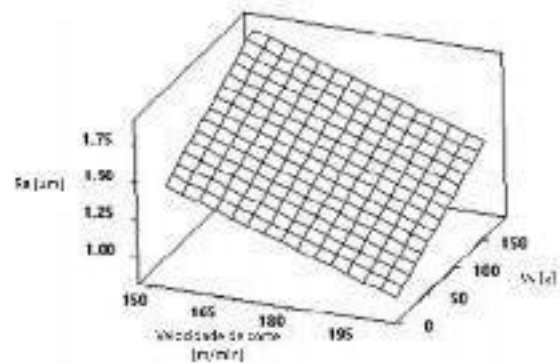
(B)



Fonte: POLISHETTY.A. [25].

Por fim, D'Melo e Pai [26] avaliaram a integridade superficial obtida no torneamento sob alta velocidade da liga Ti-6Al-4V com insertos de metal duro sem revestimento variando-se velocidade de corte na faixa de 150m/min a 200m/min e avanço na faixa compreendida entre 0,15mm e 0,25mm. A análise de variância (ANOVA) demonstrou que as variáveis de entrada em conjunto com a vibração da ferramenta influenciam significativamente a rugosidade média. Os resultados apresentados na Figura 4 corroboram o exposto na presente revisão acerca do comportamento da rugosidade média em função da velocidade de corte, isto é, aumentando-se velocidade de corte, obtém-se diminuição da rugosidade média. Entretanto, destaca-se que o terceiro eixo do gráfico representa a vibração da ferramenta de corte, de forma que é possível verificar aumento das vibrações em decorrência do aumento da velocidade de corte.

Figura 4. Rugosidade média em função de velocidade de corte e vibrações da ferramenta de corte no torneamento da liga Ti-6Al-4V



Fonte: D'MELLO, G; PAI, S. P. [26].

4. CONCLUSÕES

À A presente revisão da literatura possibilitou concluir que a usinagem de ligas de titânio constitui um desafio para a indústria devido dificuldades encontradas pelas características metalúrgicas do material. Entretanto, em função de sua excelente biocompatibilidade, a necessidade de se promover conhecidas as condições de usinagem que possibilitam obtenção de estado de superfícies propícias para as aplicações de produtos finais à base de titânio mostra-se latente no cenário industrial. Os trabalhos selecionados neste estudo trazem avaliações da rugosidade média em conjunto com variações do parâmetro velocidade de corte, entretanto não necessariamente têm como objetivo associar ambas as variáveis. Foi possível verificar que dentro dos limites estabelecidos, no torneamento da liga Ti-6Al-4V o aumento da velocidade de corte caracterizado pelo aumento da rotação da peça resultou em

diminuição da rugosidade média. Tal resultado foi confirmado por diversos estudos envolvendo torneamento da liga Ti-6Al-4V, entretanto, explicita-se de maneira oposta ao observado em estudos da mesma correlação envolvendo, porém, o processo de fresamento.

5. REFERÊNCIAS

- [1] STRNAD, G., CHIRILA, N. PETROVAN, C., *et al.*, “Contact Angle Measurement on Medical implant Titanium Based Biomaterials”, In: 9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, pp. 946-953, Romênia, Out. 2015.
- [2] RAHMAN, M., WANG, Z. G., WONG, Y. S., “A review on high-speed machining of titanium alloys”, *JSME International Journal*, v. 49, n.1, pp. 11-20, Mar. 2006.
- [3] YAFFE, M. A., SAUCEDO, J. M., KALAINOV, D. M., “Non-Locked and Locked Plating Technology for Hand Fractures”, *The Journal of Hand Surgery*, v. 36, n.12, pp. 2052-2055, Dez. 2011.
- [4] STRNAD, G., CHIRILA, N. PETROVAN, C., *et al.*, “Contact Angle Measurement on Medical implant Titanium Based Biomaterials”, In: 9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, pp. 946-953, Romênia, Out. 2015.
- [5] RAHMAN, M., WANG, Z. G., WONG, Y. S., “A review on high-speed machining of titanium alloys”, *JSME International Journal*, v. 49, n.1, pp. 11-20, Mar. 2006.
- [6] YAFFE, M. A., SAUCEDO, J. M., KALAINOV, D. M., “Non-Locked and Locked Plating Technology for Hand Fractures”, *The Journal of Hand Surgery*, v. 36, n.12, pp. 2052-2055, Dez. 2011.
- [7] VEIGA, C., DAVIM, J. P., LOUREIRO, A. J. R. “Review on Machinability of Titanium Alloys: The Process Perspective”, *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 34, p. 148-164, 2013
- [8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM F67 - 13. Standard Specification for Unalloyed Titanium, for Surgical Implant Applications. West Conshohocken, 2017.
- [9] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM F136 - 13. Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) Alloy for Surgical Implant Applications. West Conshohocken, 2021.
- [10] RATNER, B. D., HOFFMAN, A. S., SCHOEN, F. J., LEMONS, J. E., *Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine*, 3 ed., San Diego, Academic Press, 2013.
- [11] REZENDE, M. C. R. A., CAPALBO, B. C., CURY, M. T. S., *et al.*, “Osseointegration of anodized implant: effect of compromised primary stability and fibrin adhesive/TEA”, *Dental Materials*, v. 30, n.S, pp. e-145, Mar. 2014.
- [12] COUTINHO, M. P., ELIAS, C. N., “Rugosidade e molhabilidade do titânio usado em implantes dentários com superfícies tratadas”, *Revista brasileira de odontologia*, v. 66, n.2, pp. 234-238, Dez. 2009.
- [13] SUN, J., GUO, Y. B., “A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, n.8, pp. 4036-4042, Abr. 2009.
- [14] REVANKAR, G. D., SHETTY, R., RAO, S. S., GAITONDE, V. N. “Analysis of Surface Roughness and Hardness in Titanium Alloy Machining with Polycrystalline Diamond Tool under Different Lubricating Modes”, *Materials Research*, vol. 17(4), p. 1010-1022, 2014.
- [15] MAJUMDAR, P., SINGH, S. B., DHARA, S., CHAKRABORTY, M.; “Influence of in situ TiB reinforcements and role of heat treatment on mechanical properties and biocompatibility of β Ti-alloys”, *Journal of The Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, v.10, pp. 1-12, Fev. 2012.
- [16] NIU, W, *et al.*, “The effect of cutting speed and heat treatment on the fatigue life of Grade 5 and Grade 23 Ti-6Al-4V alloys”, *Materials and Design*, v46, pp. 640-644, 2013.
- [17] KARKALOS, N. E., GALANIS, N. I., MARKOPOULOS, A. P., “Surface roughness prediction for the milling of Ti-6Al-4V ELI alloy with the use of statistical and soft computing techniques”, *Measurement*, v90, pp.25-35, 2016.
- [18] le ROUX, P. A., LAUBSCHER, R. F., SCHUBERT, A., “Machining for an increased fatigue life for a Ti-6Al-4V ELI component”, *Procedia 5th CIRP CSI*, v87, pp. 462-468, 2020.
- [19] PRADHAN, *et al.*, “Investigation of machining characteristics of hard-to-machine Ti-6Al-4V-ELI alloy for biomedical applications”, *Journal of Materials Research and Technology*, v8, pp. 4849-4862, 2019.

- [20] LEYENS, C., PETERS, M., Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.
- [21] MACHADO, A. R., COELHO, R. T., ABRÃO, A. M., et al., Teoria da usinagem dos materiais, 3 ed., São Paulo, Edgard Blücher Ltda., 2015.
- [22] MISHRA, R. R., et al., “Machinability behaviour of biocompatible Ti-6Al-4V ELI titanium alloy under flood cooling environment”, Materials Today: Proceedings, n.23, pp. 536-540, Jul. 2020.
- [23] MERSNI, W.; BOUJELBENE, M.; BEN SALEM, S.; ALGHAMDI, A-S., “Optimization of the surface roughness in ball end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V using the Taguchi Method”, Procedia Manufacturing, n.20, pp. 271-276, Fev. 2018.
- [24] KRISHNARAJ, V.; SAMSUDEENSADHAM, S.; SINDHUMATHI, R.; KUPPAN, P., “A study on high-speed end milling of titanium alloy”, Procedia Engineering, n.97, pp. 251-257, Dez. 2014.
- [25] POLISHETTY, A., “Cutting Force and Surface Finishing Analysis of Machining Additive Manufactured Titanium Alloy Ti-6Al-4V”, Procedia Manufacturing, n.7, pp. 284-289, Jan. 2017.
- [26] D’MELLO, G; PAI, S. P., “Surface Roughness Modeling In High Speed Turning Of Ti-6Al-4V Using Response Surface Methodology”, Materials Today: Proceedings, n.5, pp. 11686-11696, Jan. 2018.

INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO GRÃO DO REBOLO NA QUALIDADE SUPERFICIAL DO INSERTO DE CORTE DE METAL DURO RETIFICADO

Hugo Emanuel de Andrade Costa

Carlos Eiji Hirata Ventura

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, Brasil

hugocosta497@gmail.com

ventura@ufscar.br

Resumo: Após o processo de sinterização, insertos de corte de metal duro são retificados com o intuito de se chegar às dimensões finais e reduzir defeitos superficiais. A fim de se quantificar a qualidade superficial do inserto após o processo de acabamento, diferentes parâmetros de rugosidade são avaliados, os quais dependem das condições do processo e, principalmente, da topografia do rebolo. De maneira a se evitar a realização de experimentos para a determinação das condições que levem a valores ótimos de rugosidade, o que envolve consumo de tempo e recursos, diversos modelos analíticos e numéricos têm sido aplicados. Neste trabalho, no entanto, é proposta a utilização de um modelo gráfico, elaborado a partir de um software CAD e baseado no tamanho dos grãos abrasivos. Neste contexto, tem-se como objetivo principal a retificação com a utilização de grãos abrasivos de diferentes tamanhos, de forma a minimizar a rugosidade superficial do inserto retificado. Comparando os modelos gerados, busca-se obter superfícies menos rugosas ao retificar a superfície do inserto com a utilização de rebolos com grãos de menores tamanho e menos protrusos.

Palavras-chaves: Retificação, Rugosidade, Metal duro, Topografia do rebolo.

1. INTRODUÇÃO

A temperatura na sinterização, que varia entre 1400°C até valores relativamente maiores que 1600°C, gera uma contração linear acentuada, que pode chegar a 18%, a depender da classe do metal duro, e pode causar defeitos como empenamento. Essa contração dificulta o alcance de tolerâncias dimensionais estreitas, sendo necessário realizar a operação de retificação posteriormente, de modo a conferir acabamento ao inserto de metal duro, assim como ângulos, arestas e raios (FERRARESI, 2018; MACHADO et al., 2015).

Muitos autores realizam experimentos de retificação para determinar as condições que levem a melhores qualidades superficiais em insertos de corte, como Denkena, Köhler e Ventura (2014a, 2014b). Modelar a superfície retificada, no entanto, auxilia na compreensão da influência dos parâmetros sem que haja consumo de recursos. Além disso, por meio dos modelos, é possível obter ainda o perfil teórico de rugosidade da superfície.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de modelos em software CAD para simular a geração de superfícies de insertos de metal duro, obter os perfis de rugosidade e os valores de R_z a partir da aplicação de rebolos com grãos de diferentes tamanhos e protrusões.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a construção dos modelos gráficos de simulação do processo de retificação, foi utilizado o software CAD Siemens NX10, no qual foram desenhados trechos da superfície do inserto e grãos abrasivos com diferentes

tamanhos. Para o posicionamento dos grãos nas três direções do sistema cartesiano, foi testada a distribuição aleatória, gerada no software Matlab versão 10. Já o software Origin 8 foi utilizado para a construção de gráficos dos parâmetros de rugosidade em função do número de passes da série de grãos sobre o trecho correspondente da superfície do inserto e em função das variáveis do processo.

Neste trabalho, foi avaliada a influência do tamanho médio (d_g) dos grãos na rugosidade da superfície gerada. Neste caso, grãos aleatórios com diâmetros 46, 36 e 15 μm foram utilizados. Grãos aleatórios são caracterizados por descontinuidades ou interrupções em uma geometria primariamente esférica. A Figura 1 ilustra o formato desses grãos abrasivos com seu tamanho médio.

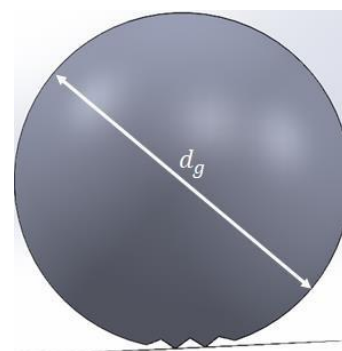


Figura 1: Grão utilizado para construção dos modelos que simulam o processo de retificação.

O cálculo da quantidade necessária de grãos foi baseado, além do volume, na concentração do rebolo,

fixada em C100 ($0,88\text{g/cm}^3$), e na densidade teórica do diamante, igual a $3,52\text{g/cm}^3$. Assim, para grãos D46, D36 e D15, foram obtidos aproximadamente 30, 38 e 65 grãos, respectivamente.

Após o posicionamento relativo entre grãos e inserto, sulcos são gerados em uma superfície através da função subtração, sendo os sólidos formados pelas geometrias dos grãos subtraídos do sólido referente ao inserto. A “retirada” de material do inserto ao longo da superfície é possível por meio do comando de extrusão, como mostrado na Fig 2.

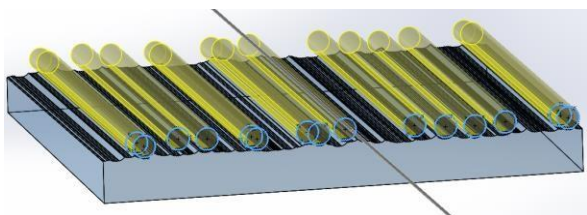


Figura 2: Exemplo de “subtração de material” da superfície de folga do inserto a partir da passagem dos grãos.

Dada a elevada velocidade de corte do rebolo, o conjunto de grãos passa pela superfície do inserto diversas vezes. Dessa forma, para que o processo de acabamento na simulação seja considerado concluído, para cada situação, a rugosidade R_z calculada deve ser plotada em função do número de passes e sua variação entre passes sucessivos deve ser menor que $1\ \mu\text{m}$. A rugosidade R_z suaviza grandes desvios que não são representativos da superfície, pois é calculada através da média aritmética entre distâncias de pico a vale em cinco trechos ao longo do perfil de rugosidade.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

As Figuras 3, 4 e 5 ilustram as modelagens realizadas por meio de um software CAD, com o perfil de rugosidade gerado através da simulação do processo de retificação com a utilização de grãos abrasivos de mesmo formato, entretanto, tamanhos e protrusões diferentes. A protrusão foi escolhida como sendo um terço do tamanho do grão abrasivo. Então, maior tamanho de grão implica em maior protrusão.

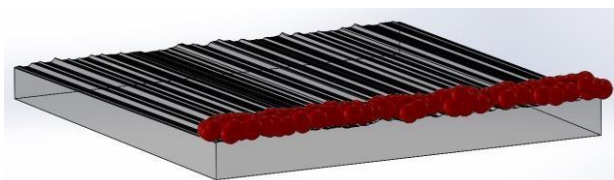


Figura 3: Perfil de rugosidade para superfície retificada com grãos D46.

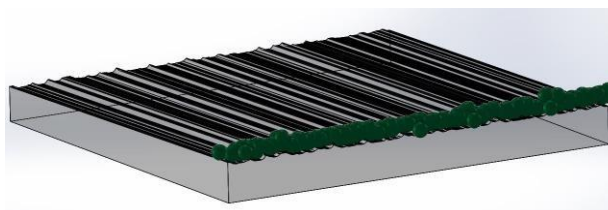


Figura 4: Perfil de rugosidade para superfície retificada com grãos D36.

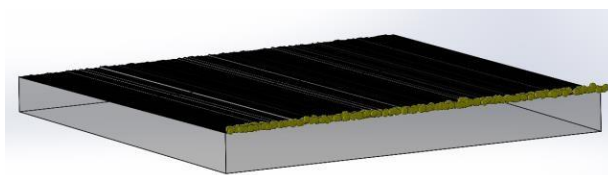


Figura 5: Perfil de rugosidade para superfície retificada com grãos D15.

A modelagem do perfil de rugosidade para superfície retificada com grãos D46 mostrou que foi necessário 13 passes para obter a rugosidade R_z igual a $9,61\ \mu\text{m}$. Em relação aos modelos que utilizaram grãos D36 e D15, foram realizados 11 e 7 passes para alcançar R_z iguais a $9,56$ e $4,53\ \mu\text{m}$, respectivamente.

Portanto, a redução do tamanho dos grãos abrasivos reduz a profundidade dos sulcos no perfil de rugosidade, conforme abordado pela literatura. Isso ocorre devido às menores protrusões dos grãos, o que implicam em superfícies com melhores qualidades.

4. RESULTADOS ESPERADOS

Neste trabalho, é investigada a influência do tamanho dos grãos abrasivos do rebolo no processo de retificação da superfície do inserto. Através das modelagens realizadas por meio de um software CAD, espera-se obter que a redução do tamanho e da protrusão do grão abrasivo gerem superfícies menos rugosas.

5. REFERÊNCIAS

- Denkena, B.; Köhler, J.; Ventura, C. E. H. “Grinding of PCBN cutting inserts”. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, v. 42, p. 91-96, 2014a.
- Denkena, B.; Köhler, J.; Ventura, C. E. H. “Influence of grinding parameters on the quality of high content PCBN cutting inserts”. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 214, n. 2, p. 276-284, 2014b.
- Ferraresi, Dino. “Fundamentos da usinagem dos metais”. Editora blucher, 2018.
- Machado, Álisson Rocha et al. “Teoria da usinagem dos materiais”. Editora Blucher, 2015.

INVESTIGAÇÃO DOS MECANISMOS DE REMOÇÃO DE MATERIAL NA RETIFICAÇÃO DE INSERTOS DE CORTE

Bruna Oliveira da Silva¹

Prof. Dr-Ing. Carlos Eiji Hirata Ventura²

¹ Mestranda em Engenharia Mecânica na Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil

² Docente em Engenharia Mecânica na Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil

bruna.oliveira@estudante.ufscar.br; ventura@ufscar.br

Resumo: Após os processos de prensagem e sinterização, insertos de corte devem ser retificados a fim de se obter o acabamento superficial e as tolerâncias necessárias para sua aplicação em processos de usinagem. O correto planejamento do processo de acabamento destes insertos torna necessária uma investigação detalhada dos mecanismos de remoção de material, de modo a não apenas se obter um bom acabamento superficial, mas também um processo eficiente. Neste contexto, espera-se que o gasto energético forneça indicativos da eficiência do processo e informações para a escolha correta dos parâmetros de operação. Com isso, tem-se como objetivo a validação do uso deste parâmetro para maior compreensão e monitoramento do processo. Preliminarmente, foram realizados testes de retificação de insertos de corte de metal duro classe ISO K10, de maneira a se associar o acabamento dos insertos à energia do processo. Maiores forças normais e tangenciais totais foram observadas para o rebolo com menor tamanho de grão, mas a energia específica foi maior para baixas espessuras de cavaco e se estabilizou a partir de $h_{cu} \cong 0,25 \mu\text{m}$, embora nenhuma alteração significativa da qualidade do inserto tenha sido observada a partir dessa faixa.

Palavras-chaves: Retificação, Inseto de corte, Integridade superficial.

1. INTRODUÇÃO

Após o processo de compactação e sinterização na fabricação dos insertos de corte, eles devem ter suas superfícies retificadas, de maneira a garantir suas dimensões e integridade superficial. Esta última característica possui influência significativa sobre o desempenho do inserto, pois elevadas rugosidades afetam o atrito entre peça, cavaco e ferramenta, geram pontos de concentração de tensão e tensões residuais de tração, que podem reduzir a vida útil da ferramenta ao contribuir para o desgaste e avarias (Diniz et. al, 2014). Deve-se ainda mencionar que elevadas rugosidades e lascamentos na aresta demandam maiores raios de aresta ou chanfros para eliminação dos defeitos, formas geométricas que, além de necessitarem de processo adicional para sua produção, tornam a ferramenta mais negativa, aumentando a deformação do material e provocando maiores esforços e temperaturas durante a aplicação do inserto (Zhan, 2012).

Neste contexto, há pesquisas que indicam parâmetros para aplicação, mas pouco tem sido encontrado no sentido de

melhorar sua integridade superficial.

Considerando-se as dificuldades associadas à

retificação de materiais de ferramenta, a importância de um planejamento de processo fundamentado para a obtenção de produtos finais com elevada qualidade e de forma eficiente e a existência de sensores de força embutidos em máquinas para este tipo de operação, o projeto tem como objetivo principal validar de maneira fundamentada o uso da energia para monitoramento da eficiência do processo e como indicativo para escolha dos parâmetros de operação em diferentes materiais de ferramenta.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Na retificação de materiais frágeis, como aqueles utilizados para ferramentas de corte, ocorre formação de micro trincas radiais e laterais. As últimas são responsáveis pela remoção efetiva do material, enquanto as primeiras danificam a camada superficial (Klocke e König, 2005). Bifano et al. (1991) afirmam que a remoção de material de maneira dúctil, com a consequente melhora da qualidade superficial, é possível em materiais frágeis, desde que certa espessura crítica de cavaco em cada grão abrasivo não seja ultrapassada. Com base no modelo de Friemuth (1999), Cruz et al. (2020) propõem que a espessura média de cavaco por grão h_{cu} na retificação plana transversal de mergulho, utilizada para acabamento de insertos de corte, seja calculada pela Equação 1, com auxílio da Equação 2.

$$h_{cu} = \left(\frac{1}{C_2+1}\right)^{C_2} \cdot \left[\frac{(C_2+1) \cdot v_{fa}}{N_{GV} \cdot f_c \cdot C_1 \cdot v_c}\right]^{C_2+1} \quad (1)$$

$$N_{GV} = \frac{6 \cdot C}{\rho \cdot \pi \cdot d_G^3} \quad (2)$$

A redução da espessura do cavaco por meio da diminuição da velocidade de avanço resultará em maiores tempos de usinagem. Por isso, Marinescu et al. (2007) sugerem o uso de maiores velocidades de corte para a obtenção do mesmo efeito.

Blanks de metal duro da classe ISO K10 (WC-5%Co), com dimensões 12,5 mm x 12,5mm x 4,7 mm, tiveram suas superfícies de folga retificadas com aplicação de óleo mineral integral em uma retificadora para preparação de insertos Agathon DOM Plus (potência máxima de 16 kW

e rotação máxima de 3400 rpm) equipada com rebolo e dressador do tipo copo, como mostrado na Figura 1.

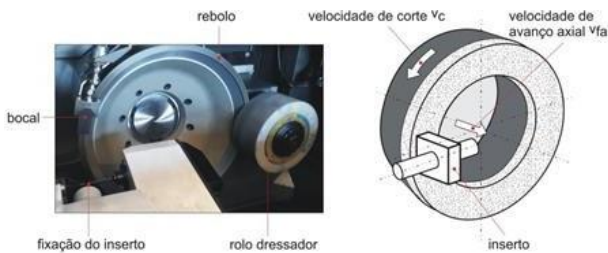


Figura 1 - Retificadora de insertos de corte utilizada nos experimentos (Fonte: próprio autor)

Antes da realização de cada teste, a fim de se garantir a topografia inicial da camada abrasiva, o rebolo foi dressado com condições constantes. De maneira a não se ter desgaste significativo do rebolo, um volume de material de aproximadamente 25 mm³ foi removido de cada inserto. Cada teste, relacionado a determinado conjunto de condições, foi realizado nos quatro lados do inserto, sendo os valores médios e respectivos desvios-padrão das variáveis de saída utilizados para análise.

Para escolha dos parâmetros, foram considerados os limites da máquina e os rebolos disponíveis, de concentração C100 (0,88 g/cm³), vc de 60m/s e 12m/s, para vfa de 2mm/min e 25mm/min respectivamente. Com isso, espera-se observar o comportamento nas diferentes situações. Os valor máximo da componente da força tangencial da força de retificação foi utilizado para o cálculo da energia específica (Equação 3).

$$e = \frac{F_t \cdot v_c}{v_{fa}} \quad (3)$$

3. RESULTADOS PRELIMINARES

A energia específica corresponde a um parâmetro frequentemente utilizado na análise de eficiência do processo e, em diversos casos, permite determinar a espessura de cavaco limite, a partir da qual passa a haver remoção de material no modo frágil, fenômeno que é caracterizado pela estabilização do valor de energia no gráfico. A Figura 2 apresenta o comportamento obtido para os testes realizados, onde se nota um aumento acelerado da energia com menores espessuras de cavaco por grão e valores mais estáveis a partir de uma espessura crítica de aproximadamente 0,25 µm.

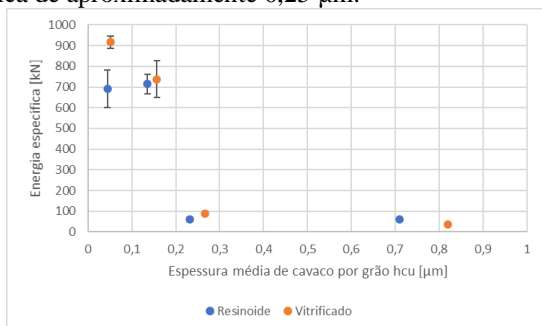


Figura 2 - Relação entre energia específica e espessura média de cavaco por grão

Considerando o comportamento da energia específica, pode-se afirmar que maiores espessuras de cavaco levam

à necessidade de menores níveis de consumo de energia para retirada de determinado volume de material. Assim, tal parâmetro pode ser considerado um indicador de eficiência na retificação. No entanto, valores mais altos de espessura de cavaco danificam a qualidade da superfície, já que causam sulcos mais profundos e podem provocar trincas, devido às maiores cargas mecânicas envolvidas, principalmente no caso de insertos de metal duro. Como resultado, um equilíbrio entre os dois efeitos deve ser encontrado.

4. CONCLUSÃO

O aumento da espessura de cavaco por grão elevou as componentes da força, independentemente da composição do rebolo.

A energia específica teve comportamento padrão, de redução com o aumento da espessura de cavaco por grão, indicando uma espessura crítica de aproximadamente 0,25 µm, a partir da qual seus valores se estabilizaram.

Houve pequena tendência de crescimento da rugosidade com o aumento da espessura de cavaco, que foi mais notável para o rebolo com ligante vitrificado.

A alteração esperada na qualidade do inserto a partir da espessura crítica de cavaco não foi observada de forma clara a partir dos parâmetros avaliados, sendo necessárias análises por microscopia eletrônica de varredura para detecção de uma possível mudança na forma de remoção de material.

5. REFERÊNCIAS

- Bifano, T.G.; Dow, T.A.; Scattergood, R.O. Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials. *Journal of Engineering for Industry*, v. 133, n. 2, p. 184-189, 1991.
- Cruz, D. C.; Sordi, V.L.; Ventura, C.E.H. Surface analysis of WC-5%Co cemented tungsten carbide cutting inserts after plunge-face grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [s.l.], v. 108, n. 1-2, p. 323-330, 2020.
- Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L. Materiais para ferramenta. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. Edição 9. São Paulo: Artliber Editora, 2014. Cap. 5, pag. 75-106.
- Frimemuth, T. Schleifen hartstoffverstärkter keramischer Werkzeuge. Tese de doutorado, Universität Hannover, VDI-Verlag, 1999. 133 S.
- Klocke, F.; König, W. *Fertigungsverfahren – Schleifen, Honen, Läppen*. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 494S.
- Marinescu, I. D.; Hitchiner, M.; Uhlmann, E.; Rowe, W. B.; Inasaki, I. *Handbook of machining with grinding wheels*. 1 st. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. 596p.
- Zhan, Y. J; Xu, X. P. An experimental investigation of temperatures and energy partition in grinding of cemented carbide with a brazed diamond wheel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [s.l.], v. 61, p.117–125, 2012.

SHUNT PIEZOELÉTRICO PARA CONTROLE PASSIVO DE CHATTER NO PROCESSO DE TORNEAMENTO DE LIGAS DE TITÂNIO

Adailton Gomes Pereira

Armando Ítalo Sette Antonialli

Sidney Bruce Shiki

UFSCar – Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, SP, 13565-05, Brasil

adailton.goh@gmail.com, antonialli@ufscar.br, bruce@ufscar.br

Resumo: Uma das principais limitações para o aumento da produtividade dos processos de usinagem é o surgimento de vibrações autoexcitadas. Esse tipo de fenômeno, comumente chamado de chatter, surge em razão da interação da ferramenta de corte com a superfície ondulada da peça a ser usinada. Uma das estratégias para mitigar esses efeitos reside no uso do controle passivo de vibrações utilizando o dispositivo shunt piezoelétrico, que consiste em um circuito elétrico conectado a material piezoelétrico acoplado na estrutura. Na qual, o piezoelétrico converte as vibrações em energia elétrica para ser dissipada no circuito elétrico constituído por uma resistência e um indutor. Este trabalho propõe o uso deste dispositivo para controle de chatter no processo de torneamento da liga Ti-6Al-4V ELI. Analisando os resultados adquiridos foi possível observar a eficiência do dispositivo em mitigar chatter, no qual, houve um aumento do limite de estabilidade de profundidade de usinagem de 0,23mm, sem o dispositivo, para 0,70mm com o shunt piezoelétrico acoplado ao sistema. Assim como, o dispositivo demonstrou reduzir a amplitude da vibrações na região de ressonância.

Palavras-chave: Piezoelétrico, circuito shunt, chatter, rugosidade.

1. INTRODUÇÃO

O *chatter* é um dos tipos de vibrações que surgem no processo de usinagem e como principais consequências desse efeito tem-se o aparecimento de ondulações superficiais nas peças usinadas, além da redução do tempo de vida útil da ferramenta de corte e da produtividade do processo (Quintana e Ciurana, 2011). Em vista disso, essas vibrações são indesejadas, com grande dificuldade de serem controladas e podendo levar o processo de corte à instabilidade.

De modo a obter um processo mais estável podem-se utilizar de técnicas de controle passivo de vibrações, as quais têm o propósito de aumentar o amortecimento do sistema e assim dissipar as vibrações geradas durante o processo de usinagem (Munoa *et al.*, 2016). Uma das técnicas de controle passivo de vibrações frequentemente utilizadas em processos de usinagem reside no uso de materiais piezoelétricos acoplados a um circuito elétrico para dissipação de energia mecânica, conhecido como *shunt* piezoelétrico.

Em se tratando de controle de *chatter* na usinagem de titânio, existe um impacto especialmente significativo

sobre a qualidade superficial, a acurácia dimensional e a vida da ferramenta. Sua elevada resistência mecânica e reduzida condutividade térmica impactam significativamente em sua usinabilidade (Pimenov *et al.*, 2021).

Uma alternativa para minimizar a baixa produtividade das operações envolvendo usinagem de titânio é o controle de vibrações autoexcitadas características do *chatter* regenerativo, que permite a utilização de parâmetros mais agressivos e, portanto, maior taxa de remoção de material, apesar das baixas velocidades de corte necessárias para

prolongar a vida útil da ferramenta Taylor *et al.* (2010).

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo investigar a eficiência no uso do *shunt* piezoelétrico para mitigar *chatter* no torneamento da liga Ti-6Al-4V ELI.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para que o objetivo da pesquisa seja alcançado, inicialmente um estudo numérico das vibrações autoexcitadas foi realizado para entender seu funcionamento durante o processo de corte utilizando a abordagem apresentada por Altintas (2012). Nesta, utiliza-se a parte real da função de resposta em frequência (FRF) do sistema, que representa a resposta do sistema a uma dada entrada/excitação, para o cálculo do diagrama de lóbulos de estabilidade (DLE). Esse diagrama determina faixas operacionais do processo de corte a partir do qual o mesmo passa a apresentar *chatter*. O limite de estabilidade é determinado utilizando a Eq. 1, onde K_f é a a pressão específica de corte e $G(\omega)$ é a parte real da FRF.

$$a_{lim} = \frac{-1}{2K_f G(\omega)} \quad (1)$$

Para determinar os parâmetros da máquina foi realizado teste modal, onde é acoplado um acelerômetro no porta-ferramenta e utilizado um martelo de impacto para excitar as frequências no porta-ferramenta. São utilizados no estudo o CNC Romi Centur 30D, o acelerômetro PCB 333B30, martelo de impacto PCB 086C03 e Chassi cDAQ-9178 da National Instruments para aquisição dos sensores. E assim, com a força de excitação e a resposta do sistema é possível determinar a FRF e posteriormente gerado o DLE. Dessa forma, o teste modal sem a utilização do

shunt piezoelétrico na máquina é usado para encontrar os parâmetros equivalentes da máquina e determinar os valores de resistência e indutância do circuito elétrico. Assim, foram geradas as FRF e DLE do sistema com e sem o *shunt* piezoelétrico acoplado com os parâmetros equivalentes e resistência e indutância, para comparar com os gerados a partir do experimento.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

A Figura 1 mostra uma comparação entre as FRF em cada situação analisada. Pode-se observar uma redução na amplitude das vibrações na região próxima a frequência de ressonância. Além disso, é possível notar que ao acoplar o dispositivo o sistema apresenta dois picos de ressonância. Isso devido ao fato que dispositivo adiciona mais um grau de liberdade ao sistema fazendo o mesmo apresentar duas frequências de ressonância, no entanto, com amplitudes menores.

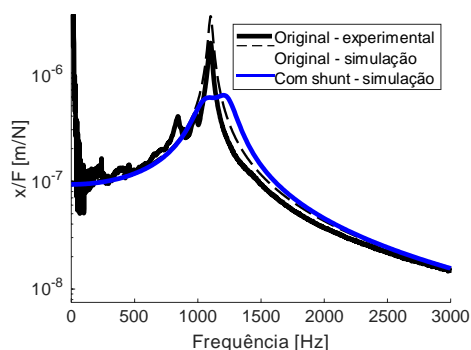


Figura 1: FRF com e sem *shunt* piezoelétrico

Portanto, com os dados obtidos a partir da FRF foi possível gerar o DLE da máquina-ferramenta analisada ilustrado na Figura 2. Esta mostra uma comparação entre os DLE quando *shunt* piezoelétrico esta ou não acoplado na estrutura. Na simulação utilizando o dispositivo foram utilizados os parâmetros ótimos de resistência (6,21 k Ω) e indutância (2,89 H) necessários no circuito *shunt*. Pode-se observar que houve um aumento do limite de estabilidade da profundidade de usinagem de 0,23mm (experimento) e 0,18mm (simulação), sem o dispositivo, para 0,70mm com o *shunt* piezoelétrico acoplado ao sistema.

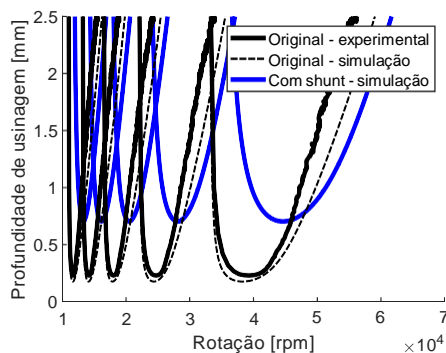


Figura 2: DLE com e sem *shunt* piezoelétrico

No decorrer da pesquisa, espera-se confeccionar o *shunt* piezoelétrico com os parâmetros ótimos determinados e realizar testes modais para comprovar a eficiência do mesmo em reduzir vibrações e mitigar *chatter*. Além do mais, é esperado realizar o processo de usinagem das ligas de titânio e coletar as vibrações da máquina-ferramenta durante o processo e analisa-las, assim como, coletar a rugosidade das peças usinadas e analisar o impacto que o dispositivo teve sobre elas.

4. CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos até o momento podemos concluir que o dispositivo *shunt* piezoelétrico pode de fato reduzir o nível de vibrações como aumentar o limite de estabilidade do processo, mitigando assim o surgimento de *chatter* durante o processo de usinagem. Isso foi possível observar com a simulação apresentadas onde foram utilizadas os parâmetros da máquina-ferramenta coletados no teste modal.

Especificamente no diagrama de lóbulos de estabilidade (DLE) houve um aumento do limite de estabilidade da profundidade de usinagem de 0,23mm, sem o dispositivo, para 0,70mm com o *shunt* piezoelétrico acoplado ao sistema. Permitindo utilizar parâmetros de corte mais robustos, o que é bastante interessante para atenuar a baixa produtividade tipicamente associada à usinagem de ligas de titânio.

5. REFERÊNCIAS

- Altintas, Y., 2012. *Manufacturing automation : metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. 6. Cambridge University Press, 2nd edição. ISBN 9780521172479. doi:10.1049/me:19940612.
- Munoa, J., Beudaert, X., Dombovari, Z., Altintas, Y., Budak, E., Brecher, C. e Stepan, G., 2016. "Chatter suppression techniques in metal cutting". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 65, No. 2, pp. 785–808. ISSN 17260604.
- Pimenov, D.Y., Mía, M., Gupta, M.K., Machado, A.R., Tomaz, Í.V., Sarikaya, M., Wojciechowski, S., Mikolajczyk, T. e Kapłonek, W., 2021. "Improvement of machinability of ti and its alloys using cooling-lubrication techniques: A review and future prospect". *journal of materials research and technology*.
- Quintana, G. e Ciurana, J., 2011. "Chatter in machining processes: A review". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 51, No. 5, pp. 363–376.
- Taylor, C.M., Turner, S. e Sims, N.D., 2010. "Chatter, process damping, and chip segmentation in turning: A signal processing approach". *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 23, pp. 4922–4935.

AValiação DE TEXTURAS INDUZIDAS POR VIBRAÇÃO NO TORNEAMENTO DURO DE UM AÇO FERRAMENTA

Talia Cristina da Silva Gibim

Felipe Bertolotti Savella

Sidney Bruce Shiki

Armando Ítalo Sette Antonialli

UFSCar, São Carlos, Brasil

taliagibim@estudante.ufscar.br, felipesavella@estudante.ufscar.br, bruce@ufscar.br, antonialli@ufscar.br

Resumo: A criação de superfícies com texturas pré-projetadas é uma meta recente na indústria. Há uma demanda em incorporar superfícies que tragam múltiplas possibilidades de otimização do desempenho do componente, como longa vida em fadiga, alta resistência ao desgaste, baixa fricção e melhor refrigeração. Vários processos são hoje empregados para obtenção de superfícies texturizadas, como retificação, fresamento e mesmo a usinagem assistida por vibração. De qualquer forma, quaisquer processos de usinagem já estão intrinsecamente propensos a vibrações, especialmente quando ocorre o fenômeno de realimentação da vibração pelo próprio sistema, o chamado chatter. Essa vibração autoexcitada costuma ser encarada como prejudicial para a vida da ferramenta e a qualidade da superfície usinada; porém, assim como na usinagem assistida por vibração, pode-se supor que ela pode ser usada de forma benéfica para criação de superfícies texturizadas, eliminando assim a necessidade de uma fonte externa de vibração. O presente trabalho tem como objetivo estudar e caracterizar a superfície incomum obtida no processo de torneamento duro sem fluido de corte em um trabalho anterior realizado no grupo de pesquisa em que se insere, para, enfim, reproduzi-la em condições distintas. Empregar o torneamento duro para fabricação de superfícies texturizadas é uma possibilidade ainda pouco explorada que pode trazer grandes avanços na integridade superficial dos componentes.

Palavras-chaves: Usinagem, Texturização, chatter.

1. INTRODUÇÃO

Retificação e torneamento duro são processos de acabamento muito utilizados em peças com dureza maior que 45 HRC. Cada um desses processos cria diferentes texturas superficiais, as quais influenciam diretamente a performance do componente. Grzesik et al. (2014) realizaram um estudo para caracterizar duas topografias de superfícies por meio de parâmetros tridimensionais. Nele duas superfícies produzidas por retificação e torneamento duro são estudadas, as quais, possuem Sa (Rugosidades médias) próximos. O estudo conclui que mesmo as duas superfícies tendo valores de rugosidade 2D similares suas topografias apresentam diferenças, o que sugere que as propriedades funcionais dessas superfícies também serão diferentes.

Jouinia, Revelc e Thoquened (2020) realizaram um estudo comparativo no torneamento de anéis de rolamento. Os componentes são acabados por dois métodos diferentes a fim de comparação: torneamento duro e retificação. O trabalho conclui, a partir dos testes, que os anéis fabricados pelo torneamento duro tiveram a vida em fadiga quatro vezes maior do que aqueles usinados por retificação. Como pode-se notar a topografia 3D tem impacto no desempenho do componente, assim sendo, torna-se importante o controle de cada processo para obtenção de texturas superfícies específicas para cada finalidade.

A texturização de superfícies é obtida normalmente pela retificação, nesse processo é buscado fabricar superfícies específicas, com o intuito de melhorar certos parâmetros, como: Coeficiente de atrito, resistência ao desgaste, vida em fadiga, entre outros. Outros processos

como o fresamento e o VAM (Vibration-assisted Machining) podem ser empregados para a fabricação de texturas. O VAM consiste em realizar o processo de fresamento utilizando uma pequena fresa esférica, o movimento de rotação e avanço da ferramenta se dá juntamente com uma vibração controlada da base, a qual é excitada com uma baixa amplitude e alta frequência (HASSAN et al. 2017).

Na usinagem convencional, a ferramenta de corte vibra naturalmente durante o processo de corte, em alguns casos, pode ocorrer uma vibração autoexcitada, denominada chatter. Ahmed et al. (2015) propõem um novo método para fabricação de superfícies texturizadas na usinagem de precisão utilizando a vibração autoexcitada, nessa abordagem o chatter é utilizado como fonte de vibração. Os autores concluem que é possível utilizar a vibração autoexcitada para criação de superfícies texturizadas, e que, para utilização desse método é fundamental a escolha adequada das condições de usinagem.

É razoável pensar na possibilidade de fabricar uma superfície texturizada por meio do torneamento duro. Na dissertação de Savella (2021), foi obtida, no torneamento duro, uma superfície diferente das apresentadas na literatura para esse tipo de processo. Na Figura 1, obtida com rotação de 250 rpm e avanço de 0,05 mm, pode-se ver que a superfície não apresenta o padrão característico, no qual, é possível ver as marcas da aresta cortante e a sua relação com o avanço, como mostrado anteriormente (JOUINIA; REVELC; THOQUENED, 2020).



Figure 1: Superfície torneada, Savella (2021).

Savella (2021) conduziu uma investigação da influência de alguns parâmetros de corte sobre a vibração da ferramenta e, conseqüentemente, sobre a integridade superficial da peça empregando o processo de torneamento duro. A superfície obtida por ele apresenta uma topografia incomum da observada na literatura. Seu perfil sugere que talvez seja possível produzir uma superfície texturizada a partir do processo de torneamento duro; para isso, um estudo das vibrações e seu impacto na integridade superficial ganha maior relevância. Entender melhor as variáveis e o fenômeno podem tornar possível o desenvolvimento de estratégias para controlar as características da superfície.

O objetivo geral deste trabalho é estabelecer uma correlação entre a vibração da ferramenta e a possível texturização da superfície usinada durante uma operação de torneamento cilíndrico externo em aço endurecido.

2. RESULTADOS PRELIMINARES

Os sinais adquiridos pelos acelerômetros foram analisados no domínio da frequência através da PSD (Power Spectral Density), os resultados encontrados para as quatro condições de corte empregadas são mostrados na Figura 2.

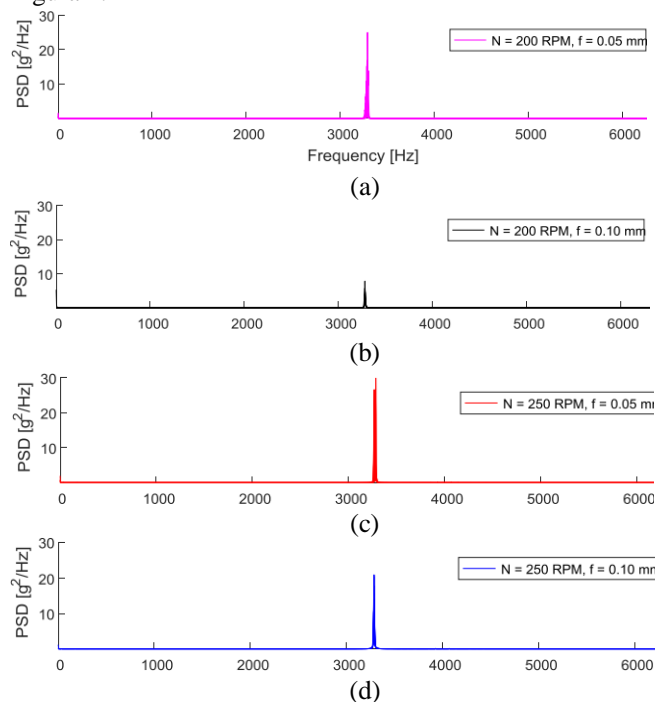


Figure 2: Densidade Espectral de Potência (PSDs) dos testes de Savella (escala linear), Savella (2021).

Nota-se que em todos os processos a frequência dominante está na faixa de 3100 a 3300 Hz e na Figura 2 (b) foi observada uma amplitude pelo menos 2 vezes menor, em comparação com as outras condições de usinagem.

Um bump test, ensaio utilizado para encontrar as frequências naturais de um objeto, foi realizado na ferramenta de corte utilizada na usinagem em questão, o valor encontrado foi de 3530 Hz para frequência

Diferenças entre os dois valores de frequências encontrados advém da influência da fixação da ferramenta, a qual é difícil reproduzir com exatidão.

3. CONCLUSÃO

Os sinais no domínio da frequência indicam que houve chatter em três das quatro condições usinadas. E, portanto, a característica incomum das superfícies obtida está associada a isso.

4. AGRADECIMENTOS

À FAPESP, pela bolsa de iniciação científica oferecida (Processo 2021/08599-5) e pelos equipamentos utilizados no trabalho (Processo 2015/15622-2).

5. REFERÊNCIAS

- AHMED, Syed. Microtexture Generation Using Controlled Chatter Machining in Ultraprecision Diamond Turning, *Journal of Micro- and Nano-Manufacturing*, 2015.
- GRZESIK, Wit et. al.. Comparison of surface textures generated in hard turning and grinding operations, 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI), *Procedia CIRP* 13, pp. 84-89, 2014.
- HASSAN, Sharudin. A Review of the Milling Process to Fabricate a Dimple Structure, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol SI 1, pp. 175-192, 2017
- JOINIA, Nabil; REVELC, Philippe; THOQUENNE, Guillaume. Influence of surface integrity on fatigue life of bearing rings finished by precision hard turning and grinding, *Journal of Manufacturing Processes* 57, pp. 444-451, 2020.
- SAVELLA, Felipe. Influência das condições dinâmicas de usinagem no torneamento sobre a integridade superficial de um aço endurecido. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021

INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CONTROLE TÉRMICO ATIVO SOBRE A RESISTÊNCIA MECÂNICA E QUALIDADE SUPERFICIAL DE PEÇAS IMPRESSAS PELA TÉCNICA FPM

Caique de Castro Gonçalves

Alexandre Tácito Malavolta

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil

caiquecastro@estudante.ufscar.br

malavolta@ufscar.br

Resumo: Atualmente, o processo de manufatura aditiva se tornou uma prática comum em diversos setores industriais em função de sua capacidade de impressão em larga escala, alta produtividade de peças com geometria complexas. Dentre as diversas técnicas de manufatura aditiva, destaca-se a técnica FPM (Fused Pellet Modeling) na qual materiais poliméricos na forma de grãos (pellets) são utilizados. Um dos grandes desafios da impressão de componentes funcionais pelo processo FPM refere-se à qualidade superficial e a resistência mecânica das peças produzidas. Tal problemática tende a ser mais acentuada no caso da impressão de grandes volumes, uma vez que os gradientes térmicos associados tendem a ser maiores. Neste contexto, o presente projeto de pesquisa propõe a investigação da influência do controle térmico ativo da mesa de impressão sobre a resistência mecânica e qualidade superficial de peças impressas pela técnica FPM de materiais poliméricos em ABS e PLA. Para tal, será realizado o desenvolvimento de uma mesa de impressão com controle ativo de temperatura para compor uma célula de manufatura de impressão 3D para fabricação de produtos de grande porte (com volume de até 1 m³). Nesta célula, o material polimérico em grãos (pellets) será processado em uma extrusora monorosca a ser manipulada por um braço robótico industrial.

Palavras-chaves: manufatura aditiva, controle de temperatura, resistência mecânica.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a manufatura aditiva tornou-se um processo de fabricação de grande interesse para indústria dadas suas vantagens na produção de geometrias complexas e utilização de diferentes materiais de fabricação. Dentre as diversas técnicas de manufatura aditiva, destaca-se a técnica FPM (Fused Pellet Modeling) na qual materiais poliméricos na forma de grãos (pellets) são utilizados. Uma característica fundamental do processo FPM é o seu potencial para fabricar peças com propriedades controladas localmente (porosidade, densidade e propriedades mecânicas) de acordo com Sun et al. (2008) apud Li et al., (2002). Um dos grandes desafios da impressão de componentes funcionais pelo processo FPM refere-se à qualidade superficial e a resistência mecânica das peças produzidas. Tal problemática tende a ser mais acentuada no caso da impressão de grandes volumes, uma vez que os gradientes térmicos associados tendem a ser maiores. O histórico de temperatura das interfaces desempenha um papel importante para determinar a qualidade da ligação e, portanto, a propriedades mecânicas do produto final, conforme Sun et al. (2008) e Brett et. al (2017). Neste contexto, o presente projeto de pesquisa propõe uma investigação da influência do controle térmico ativo da mesa de impressão sobre a resistência mecânica e qualidade superficial de peças impressas pela técnica FPM de materiais poliméricos em ABS e PLA. Para tal, será realizado o desenvolvimento de uma mesa de impressão com controle ativo de temperatura para compor uma célula

de manufatura de impressão 3D composta por um braço robótico no qual será acoplado uma extrusora monorosca para fabricação de produtos de grande porte, conforme ilustrado na Figura 1.

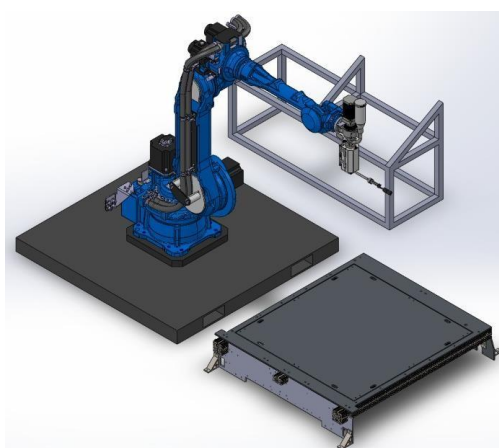


Figura 1: Célula de manufatura para impressão 3D.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente serão elaborados projetos conceituais de mesas de impressão com controle ativo de temperatura. Será considerado o uso de mantas térmicas para o aquecimento da base da mesa trabalhando em conjunto com um controle do tipo PID para manutenção das temperaturas de interesse como mostrado na Figura 2.

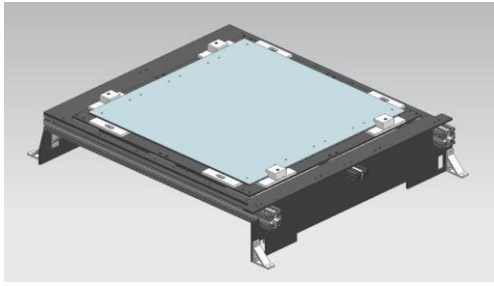


Figura 2: Conceito inicial da mesa de impressão 3D.

Estas configurações preliminares serão analisadas, via método dos elementos finitos, para prever os gradientes térmicos da base da mesa e também prever possíveis distorções oriundas de efeitos termo-elásticos. Os resultados obtidos pelas análises deverão orientar a definição da configuração final da mesa para posterior elaboração do projeto final detalhado, fabricação e montagem. Após a montagem da mesa, será realizada a coleta de dados experimentais com emprego de técnicas de planejamento de experimentos (DOE) para impressão de peças com diferentes parâmetros de controle térmico (variando a temperatura de controle da mesa) e em materiais poliméricos diferentes (ABS e PLA). O material polimérico em grãos (*pellets*) será processado em uma extrusora monorosca a ser manipulada por um braço robótico industrial e depositado sobre a mesa de impressão onde também uma câmera térmica será posicionada próximo a mesa para acompanhar os gradientes de temperatura na peça impressa. Finalmente, as peças produzidas deverão sofrer uma inspeção dimensional, avaliação de sua qualidade de acabamento e testes de resistência mecânica.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

Espera-se, ao final do projeto de pesquisa que as simulações de elementos finitos de gradientes térmicos da mesa e a análise de DOE corrobore em fornecer resultados de suporte que possam ser utilizados para otimizar a fabricação de peças de grande volume impressas pela técnica FPM minimizando efeitos indesejáveis de baixa resistência mecânica e qualidade superficial.

4. CONCLUSÃO

A pesquisa visa comprovar experimentalmente, em conjunto com simulações de elementos finitos, a importância do controle térmico sobre a qualidade do material impresso. Desta forma espera-se que os resultados forneçam parâmetros de impressão que garantam uma melhor qualidade superficial e resistência mecânica de componentes impressos por FPM.

5. REFERÊNCIAS

Akande, S.O., 2015. "Dimensional accuracy and surface finish optimization of fused deposition modelling parts

using desirability function analysis". *Int. J. Eng. Res. Technol*, Vol. 4, No. 4, pp. 196–202.

Brett G. Compton, Brian K. Post, Chad E. Duty, Lonnie Love, Vlastimil Kunc, 2017, "Thermal analysis of additive manufacturing of large-scale thermoplastic polymer composites", *Additive Manufacturing* (2017), Vol. 17, pp. 77-86.

Sun, Q., Rizvi, G., Bellehumeur, C. e Gu, P., 2008. "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments". *Rapid prototyping journal*.

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

Paulo de Tarso Durigan

Sidney Bruce Shiki

Gustavo Franco Barbosa

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, SP, Brasil

paulo.durigan@estudante.ufscar.br

bruce@ufscar.br

gustavofb@ufscar.br

Resumo: Os avanços tecnológicos da Indústria 4.0 possibilitaram o aperfeiçoamento dos processos de fabricação através do acompanhamento de informações em tempo real. No entanto, muitas empresas ainda dependem de equipamentos antigos que não possuem nenhuma forma de comunicação ou transmissão de dados. Diante deste contexto, o presente trabalho propõe uma investigação sobre o impacto da digitalização de máquinas-ferramenta antigas na produtividade e o potencial de melhoria da qualidade de superfícies gerada através de instrumentação de baixo custo. Um torno mecânico universal NARDINI, modelo ND 220 AE, foi utilizado no monitoramento dos parâmetros de rotação, velocidade de avanço, profundidade de corte, vibração e rugosidade. Para a aquisição dos dados foram utilizados um acelerômetro (ADXL335), um sensor de efeito Hall (3144E) e um sensor de distância (VL53L0X). Os sensores foram conectados em placa de prototipagem ESP32, à qual foi responsável pela comunicação com uma plataforma IOT. Os resultados preliminares indicaram boa precisão nas medidas obtidas pelos sensores e comunicação eficiente entre a placa e a plataforma de gerenciamento em nuvem. Com o sistema de monitoramento implantado, espera-se maior capacidade de controle do processo e otimização da qualidade superficial em peças usinadas.

Palavras-chaves: monitoramento, máquinas-ferramenta, torno universal, qualidade superficial, baixo custo.

1. INTRODUÇÃO

As ferramentas da era digital não estão presentes apenas na área de tecnologia da informação (TI), mas também fazem parte da realidade de indústrias dos mais diversos segmentos, como no caso da manufatura (LASI et al., 2014). Em contraste às novas tecnologias, existe uma crescente discussão sobre a atual realidade de muitas pequenas e médias empresas atuantes no mercado, mas que mantém entre os seus principais ativos, máquinas-ferramenta antigas que não oferecem nenhuma comunicação com o mundo digital (LOCKWOOD et al., 2018). Existem diversos fatores que contribuem com a contínua utilização destes equipamentos antigos, principalmente a falta de recursos financeiros para atualização dos ativos e a falta de visão estratégica empresarial. Para Liu e Xu (2017), é fundamental a discussão sobre máquinas obsoletas e a busca por novas tecnologias que auxiliem a indústria de manufatura. Os autores ainda argumentam que as novas tecnologias da Indústria 4.0 podem contribuir para que equipamentos antigos sejam compatíveis com o universo da manufatura digital, facilitando o gerenciamento de processos.

O conceito de manufatura inteligente engloba diversos métodos e ferramentas que estão vinculados ao contexto da Indústria 4.0 pois, permitem o monitoramento

em tempo real de informações sobre diferentes processos de manufatura (LAIRD, 2017). Nesse sentido, pode-se afirmar que o investimento em inovação no setor de manufatura contribui diretamente para o aumento da qualidade e flexibilidade dos processos, diminuindo os custos operacionais (BARBOSA, SHIKI e SAVAZZI, 2019).

O presente trabalho propõe um estudo sobre a otimização de máquinas-ferramenta obsoletas usando conceitos de diversas áreas do conhecimento. O potencial de hardwares de baixo custo no monitoramento de operações de usinagem é o principal objeto de estudo. A hipótese inicial deste projeto relaciona a melhoria do nível de supervisão a uma série de benefícios como a diminuição do tempo de usinagem, maior assertividade do acabamento superficial e padronização da operação. Em síntese, espera-se que o projeto em desenvolvimento contribua com as pesquisas já realizadas na área e que permita uma análise sólida sobre as limitações e potencialidades da solução proposta.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo de caso, sensores e hardware de baixo custo serão conectados a um torno mecânico universal para o monitoramento contínuo do processo. O

equipamento é da marca NARDINI, modelo ND 220 AE, potência de 6 CV, faixa de rotação entre 25 e 2000 RPM e está instalado na escola “SENAI Oscar Lúcio Baldan” na cidade de Monte Alto. Neste estudo, o valor eficaz da vibração (RMS, do inglês *Root Mean Square*) e a frequência serão obtidos através de um acelerômetro ADXL335 posicionado no porta-ferramenta do equipamento, como mostra a Figura 1. Um sensor de efeito Hall 3144E e um ímã de Neodímio (Figura 2) serão usados para o acompanhamento da rotação da máquina.

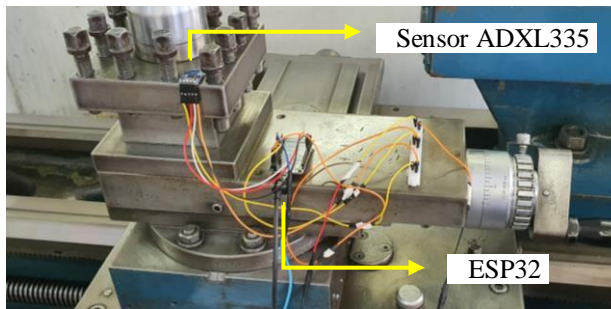


Figura 1: Testes com o sensor ADXL335.

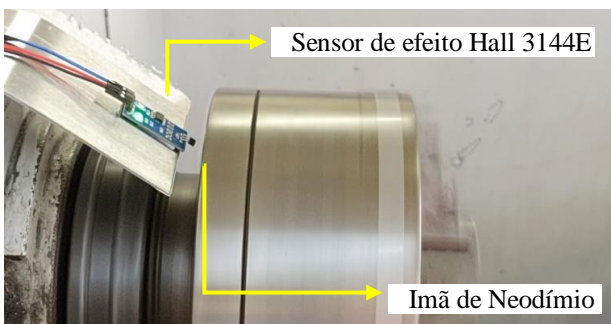


Figura 2: Medição da rotação com o sensor 3144E.

A velocidade de avanço será monitorada através do sensor de distância VL53L0X. Para a comunicação, os diferentes módulos serão conectados à uma placa de prototipagem rápida ESP32, a qual terá a função de coletar os dados e enviar para análise remota. Para o acompanhamento em tempo real dos parâmetros será utilizada a plataforma *Arduino IOT cloud*, a qual disponibiliza *dashboards* customizáveis e comunicação sem fio com a placa. Os dados dos sensores instalados na máquina serão armazenados e organizados, formando assim um histórico de desempenho do sistema. A comparação entre os parâmetros de saída do processo (rugosidade e vibração) e os parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) será realizada com o intuito de estabelecer uma correlação entre os diversos fatores, permitindo a otimização do processo de torneamento.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

Os resultados iniciais para a medição da rotação utilizando o sensor de efeito Hall, foram comparados com os dados fornecidos por um tacômetro. A Figura 3 mostra

a comparação entre os resultados obtidos e o valor nominal do equipamento para três configurações diferentes.

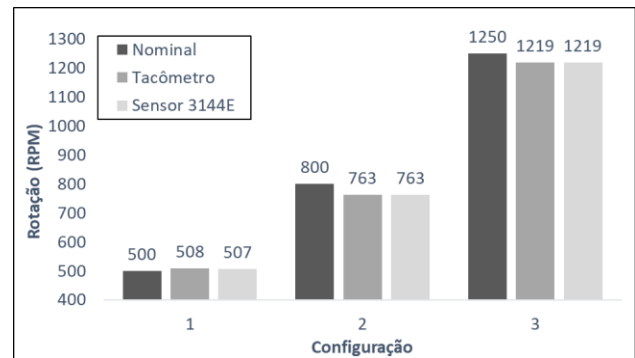


Figura 3: Resultados obtidos para a rotação.

Os resultados sugerem que não existe uma diferença significativa entre as duas técnicas aplicadas, porém, nota-se uma variação de até 4,6 % entre os resultados e o valor nominal da máquina.

4. CONCLUSÃO

Os resultados iniciais obtidos através dos testes mostram que é possível monitorar máquinas-ferramenta universais utilizando instrumentação de baixo custo. Desvios significativos entre as configurações e os parâmetros reais podem ser estimados e minimizados resultando em uma operação mais eficiente, fato que converge com as prerrogativas da Indústria 4.0. Em síntese, espera-se que o presente trabalho contribua com o desenvolvimento de novas soluções nas áreas de engenharia de superfícies e manufatura inteligente.

5. REFERÊNCIAS

- BARBOSA, G. F.; SHIKI, S. B.; SAVAZZI, J. O. “Digitalization of a standard robot arm toward 4th industrial revolution”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 105, n. 5, p. 2707-2720, 2019.
- LAIRD, K. “Understanding the Digital Transformation Called Industry 4.0: Manufacturing today requires more brain than brawn”. *Plastics Engineering*, v. 73, n. 1, p. 24-28, 2017.
- LASI, H. et al. “Industry 4.0”. *Business & Information Systems Engineering*, v. 6, n. 4, p. 239-242, 2014.
- LIU, C.; XU, X. “Cyber-physical machine tool – the era of machine tool 4.0”. *Procedia Cirp*, v. 63, p. 70-75, 2017.
- LOCKWOOD, A. J. et al. “Digitalisation of legacy machine tools”. Tech. rep., *Advanced Manufacturing Research Centre (AMRC)*. University of Sheffield, 2018.

AValiação MICROESTRUTURAL DO AÇO INOXIDÁVEL LEAN DUPLEX 2404 APÓS SIMULAÇÕES DE CICLOS TÉRMICOS DE ZONAS TERMICAMENTE AFETADAS REALIZADAS POR GLEEBLE

^{a,b}Cristie Luis Kugelmeier

^{a,b}Guilherme dos Santos Vacchi

^{a,b}Rodrigo da Silva

^{a,b}Carlos Alberto Della Rovere

^aLaboratório de Corrosão Munir Rachid, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luis Km 235, 13565-905, São Carlos, SP, Brasil

^bPrograma de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luis Km 235, São Carlos 13565-905, SP, Brasil

cristieluis@gmail.com, guivacchi@hotmail.com, rsilvacorr@gmail.com, carlosdrovere@gmail.com

Resumo: O objetivo deste estudo foi realizar simulações de ciclos térmicos para avaliar a microestrutura resultante de zonas termicamente afetadas (ZTAs) em amostras do aço inoxidável lean duplex (AILD) 2404. Através de simulações utilizando simulador termomecânico Gleeble[®], as simulações foram realizadas em duas condições: 1) taxa de aquecimento de 400 °C/s, temperatura de pico de 1350 °C, permanência de 3 segundos e taxa de resfriamento 20 °C/s até 800 °C e posterior resfriamento à temperatura ambiente, e 2) taxa de aquecimento de 400 °C/s, temperatura de pico de 1050 °C, permanência de 2 minutos e taxa de resfriamento de 5 °C/s até a temperatura ambiente, condições estas que simularam diferentes regiões de exposição das ZTAs. As microestruturas resultantes foram analisadas por meio de microscopia ótica (MO), quantificação do percentual de fases, e difração de raios X (DRX). Os resultados mostraram que os ciclos térmicos (aquecimento e resfriamento) exercem influência na microestrutura do material. Conforme a taxa de resfriamento passou de 20 °C/s para 5 °C/s, a microestrutura apresentou um balanço de fases ferrita/austenita mais próximo de 1:1. Pelos difratogramas foi possível observar que em ambas as taxas de resfriamento as amostras apenas apresentaram picos característicos das fases ferrita e austenita.

Palavras-chaves: Aço inoxidável lean duplex 2404, ZTA, Gleeble, Simulação de ciclos térmicos, Corrosão

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis da classe duplex (AIDs) são amplamente utilizados na indústria química, petroquímica, marinha, nuclear e indústria de papel, devido a sua atrativa combinação de propriedades mecânicas, soldabilidade e de resistência à corrosão em vários ambientes (Neville, 1996), resultado de sua estrutura bifásica composta por frações aproximadamente iguais das fases ferrita e austenita (Silva et al. 2017). Porém, devido ao alto custo da adição elementos de liga (particularmente Ni e Mo) nos AIDs, uma nova classe de aços inoxidáveis denominada de aços inoxidáveis lean duplex (AILDs) tem despertado considerável atenção. Esta nova classe contém menor teor de liga como é caso do Mo e alto teor de Mn e N, e em alguns casos Cr, combinando boa resistência mecânica com resistência à corrosão. Essas características tornam os AILDs adequados para projetos que requerem resistência à corrosão, durabilidade, eficiência de custo a longo prazo e com reduzida manutenção (Silva et al. 2017).

No entanto, em processos industriais como a soldagem, a realização inadequada deste procedimento pode ocasionar a precipitação de nitretos e carbonetos de Cr e compostos intermetálicos, além de uma alteração na fração volumétrica entre as fases ferrita e austenita (Liou

et al. 2002). Assim, o objetivo do estudo foi simular ciclos térmicos em amostras do AILD 2404 para avaliar o efeito de taxas de resfriamento sobre a microestrutura do material.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foi utilizado o aço inoxidável lean duplex AILD 2404, fornecido pela empresa *Outokumpu* na forma de chapa laminada a quente com espessura de 6,1 mm, a qual foi solubilizada a 1050 °C por

1 h e resfriada em água em temperatura ambiente. Posteriormente, foram usinados corpos de prova nas dimensões de aproximadamente 80,0 mm x 10,0 mm x 4,5 mm, mantendo a direção longitudinal paralela à direção de laminação. Os corpos de prova foram submetidos às simulações de ciclos térmicos através da utilização de simulador termomecânico Gleeble[®] 3800. As taxas de resfriamento aplicadas foram de 20 e 5 °C/s. As simulações foram realizadas sob vácuo a partir da temperatura ambiente a uma taxa de aquecimento de 400

°C/s com: i) temperatura de pico de 1350 °C e tempo de permanência de 3 segundos; e ii) temperatura de pico de 1050 °C, tempo de permanência de 2 minutos e resfriamento até temperatura ambiente. As diferentes temperaturas de pico e tempo de permanência visaram reproduzir regiões da ZTA mais próxima e mais distante

da linha de fusão (LF), respectivamente, como observado em processos de soldagem, com a fusão do material ou do metal de adição.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

A Figura 1 mostra as micrografias óticas das amostras submetidas aos ciclos térmicos com taxas de resfriamento de (a) 20 °C/s e (b) 5 °C/s, (c) amostra solubilizada, e (d) fração de fase ferrita. Nota-se que a taxa de resfriamento de 20 °C/s causou ao material uma significativa alteração microestrutural. Quando a temperatura de pico atingiu 1350 °C e foi mantida por 3 segundos, a microestrutura tornou-se predominantemente ferrítica. Com a aplicação da taxa de resfriamento foi possível observar a formação de diferentes tipos de austenita secundária secundárias, como a austenita de Widmanstätten (AW), austenita de contorno de grão (ACG) e austenita intragranular (AIG).

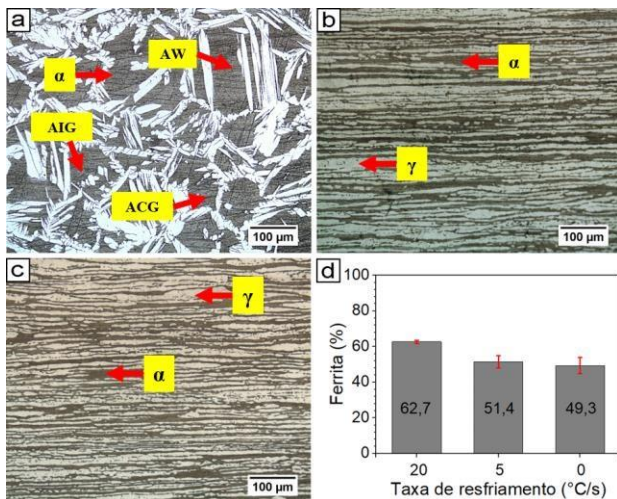


Figura 1: Micrografias óticas do AILD 2404 após ciclos térmicos com taxas de resfriamento de (a) 20 °C/s e (b) 5 °C/s, (c) amostra solubilizada, e (d) fração de ferrita.

Para a taxa de resfriamento de 5 °C/s, [Figura 1 (b)], é observada uma microestrutura semelhante àquela vista para a amostra solubilizada [Fig. 1 (c)], ou seja, constituída por ilhas de austenita (coloração mais clara) dispersas na matriz ferrítica (coloração mais escura), com as fases alongadas na direção de laminação.

Os resultados da quantificação de fases realizada por metalografia quantitativa revelaram que na condição de 20 °C/s o percentual de ferrita foi de ~63%, enquanto que para a condição de 5 °C/s, correspondeu a ~51, e para a amostra solubilizada foi de ~49%.

Pelo difratograma da Figura 2, nota-se que nas duas taxas de resfriamento aplicadas, as amostras apresentaram somente picos característicos das fases ferrita e austenita sem a presença de fases intermetálicas. Contudo, a intensidade relativa dos picos difere de uma condição da outra. É observado que a intensidade relativa do pico de austenita é menor na condição de taxa de resfriamento de 20 °C/s com relação à condição de 5 °C/s, indicando que a fração de austenita formada é bem menor na condição de 20 °C/s, corroborando com a quantificação de fases realizada por metalografia quantitativa.

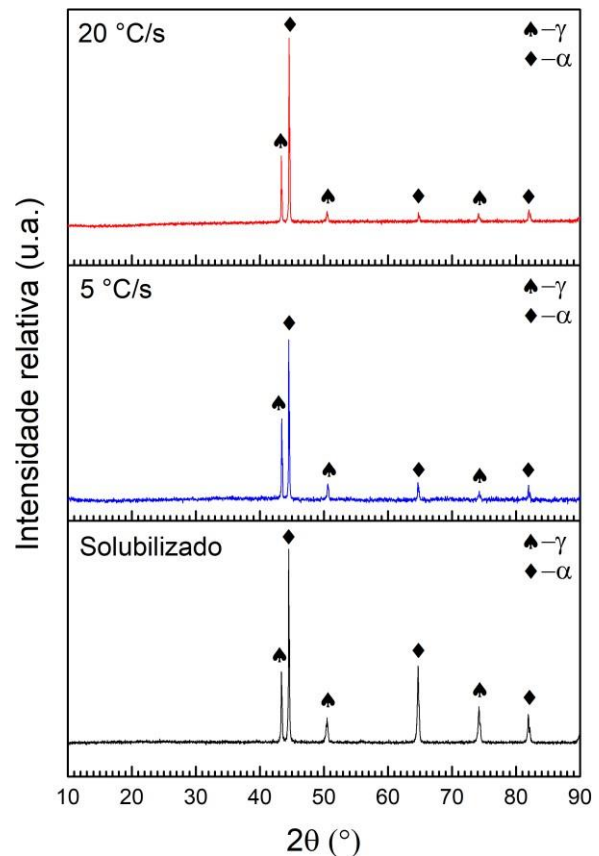


Figura 2: DRX do AILD 2404 após as taxas de resfriamento de 20 °C/s e 5 °C/s, e amostra solubilizada.

4. CONCLUSÃO

As simulações realizadas mostraram que a condição aplicada para a taxa de resfriamento de 20 °C/s causou uma maior ferritização do material e o surgimento de diferentes austenitas secundárias, enquanto que à 5 °C/s, com tempo mais prolongado de resfriamento, obteve-se uma microestrutura semelhante à amostra solubilizada.

5. REFERÊNCIAS

- Liou, H.Y., Hsieh, R.I., Tsai, W.T., 2002. "Microstructure and stress corrosion cracking in simulated heat-affected zones of duplex stainless steels". *Corrosion Science*, Vol. 44, pp. 2841–56.
- Neville, A., 1996. "An assessment of the corrosion behaviour of high-grade alloys in seawater at elevated temperature and under a high velocity impinging flow". *Corrosion Science*, Vol. 38, pp. 927–56.
- Silva, R., Baroni, L.F.S., Kugelmeier, C.L., Silva, M.B.R., Kuri, S.E., Rovere, C.A.D., 2017 "Thermal aging at 475 °C of newly developed lean duplex stainless steel 2404: Mechanical properties and corrosion behavior". *Corrosion Science*, Vol. 116, pp. 66–73.

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ACABAMENTO SUPERFICIAL NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO 1020 EM BIODIESEL E SUAS MISTURAS COM ÓLEO DIESEL

**Bruno Alexandre
Roque Marcos
Roberto Monteiro**

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, Brasil.
brunoroque_engenharia@yahoo.com.br
marcosmonts@gmail.com

Resumo: O acabamento superficial de uma peça exerce influência em suas propriedades, como resistência à corrosão e ao desgaste. Por exemplo, a forma dos picos e vales da superfície pode exercer papel fundamental no fenômeno da corrosão. Este trabalho avaliou a influência do acabamento superficial decorrente da usinagem na resistência à corrosão de peças de aço 1020 em biodiesel e suas misturas com óleo diesel, através de ensaios de imersão total, corrosão por frestas e fase de vapor em temperatura ambiente. As superfícies foram geradas a partir do fresamento em duas configurações de deslocamento da ferramenta sobre as peças, sendo posteriormente caracterizadas pelos parâmetros de rugosidade curtose e assimetria. As superfícies das duas configurações de usinagem apresentaram diferenças quanto à predominância e geometria de picos e vales, indicando que as estratégias de deslocamento poderiam apresentar alguma correlação com a corrosão. Ao final dos ensaios observou-se que as misturas diesel/biodiesel, o biodiesel e os três tipos de ensaios não causaram alterações significativas nos parâmetros de rugosidade analisados. Porém, levando-se em conta apenas o fator usinagem, as peças da primeira configuração apresentaram mudanças significativas na rugosidade, sugerindo que o contato com as misturas pode ter causado corrosão em locais dessas superfícies.

Palavras-chaves: acabamento superficial, fresamento, corrosão, biodiesel.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Kalpakjian e Schmid (2013) o desempenho de uma peça pode ser influenciado pelo acabamento de sua superfície, podendo este ser quantificado através da rugosidade superficial. Com a crescente utilização do biodiesel e suas misturas com óleo diesel na matriz energética brasileira e mundial, o estudo da compatibilidade entre materiais metálicos e esse biocombustível tornou-se importante, e o acabamento superficial é fator relevante nos testes de corrosão, sendo o formato e distribuição dos picos e vales relevantes no fenômeno da corrosão. A predominância de picos e vales em uma superfície pode ser feita a partir da análise do parâmetro assimetria ou *skewness* (Ssk). Valores positivos de Ssk indicam que a superfície pode apresentar maior quantidade de picos, podendo ser eletroquimicamente mais ativa em determinados pontos, o que pode levar à sua corrosão (Benkafada *et al.*, 2018). Superfícies com valores negativos de Ssk podem conter vales relativamente profundos para conter algum tipo de fluido (Blateyron, 2013). A curtose do perfil das alturas de uma superfície (Sku) é uma medida do grau de achatamento ($Sku < 3$) ou agudeza dos picos ($Sku > 3$) presentes nesse perfil (Zeng *et al.*, 2018). Em estágios mais avançados de corrosão Ssk e Sku têm valores próximos de zero e três, respectivamente, devido à formação de uma camada de óxido na superfície (To *et al.*, 2018). Guangjun *et al.* (2020) obtiveram resultados similares em seus testes com aço contendo

cromo, molibdênio e vanádio imerso em solução ácida, e afirmaram que para $Sku \approx 3$ as superfícies deste metal apresentaram maior resistência à corrosão pelo fato de serem mais planas e retardar a transferência de cargas entre o meio corrosivo e a superfície.

A partir de estudos prévios que evidenciam a importância do acabamento superficial na corrosão de materiais metálicos, este trabalho analisa o efeito da rugosidade de peças de aço 1020 em contato com misturas diesel/biodiesel. Os parâmetros Ssk e Sku foram selecionados para caracterização das superfícies antes e após os ensaios de corrosão.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As peças utilizadas neste trabalho foram obtidas a partir do fresamento de 18 unidades em aço 1020 com dimensões de 40x18x4,1 mm, sendo usinada a face de 40x18 mm. A usinagem foi realizada em um centro de usinagem CNC modelo D600 marca ROMI sem a utilização de fluido de corte. Os parâmetros de usinagem foram: velocidade de corte 300 m/min; avanço por dente 0,05 mm/dente; profundidade de corte 0,6 mm e penetração de trabalho 18 mm. O inserto (código R390-11 T3 08M-PM 1130) e a ferramenta (código R390-020A20-11M) são do fabricante Sandvik Coromant. Para geração das superfícies, duas configurações de usinagem (A e B) foram utilizadas, conforme Fig. 1. As setas indicam o sentido de deslocamento da ferramenta na peça. As

regiões 1, 2 e 3, em destaque na Fig. 1 foram caracterizadas por microscopia óptica, através do microscópio óptico confocal Alicona Infinite Focus SL.

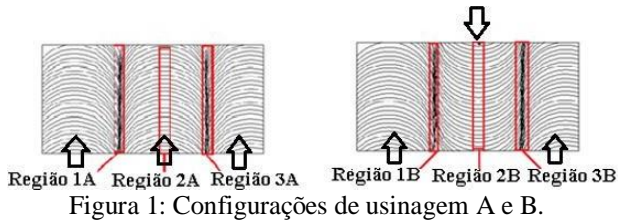


Figura 1: Configurações de usinagem A e B.

Os parâmetros de rugosidade S_{sk} e S_{ku} foram obtidos e uma análise estatística foi realizada através do teste de Tukey, que avaliou a diferença entre as médias dos parâmetros antes dos ensaios. Neste teste, quando os intervalos da diferença entre duas médias não cruzam a linha do zero significa que as médias comparadas são diferentes entre si. Os ensaios de corrosão foram realizados em temperatura ambiente por 2400 h, utilizando-se das misturas entre diesel e biodiesel B15 e B30 (15% v/v e B30 v/v de biodiesel, respectivamente) e biodiesel puro (B100). As peças permaneceram suspensas por fios de Teflon® em frascos erlenmeyers de 2L, e após os ensaios as mesmas passaram por limpeza em banho de ultrassônico de acetona. Realizou-se nova caracterização por microscopia óptica e posterior análise estatística para identificar diferenças entre as médias de S_{sk} e S_{ku} em 0 h e 2400 h de ensaios.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao final das 2400 h de ensaio observou-se que tanto os tipos de ensaio (imersão total, frestas e fase de vapor), quanto o tipo de fluido (B15, B30 e B100) não produziram alterações estatisticamente significativas nos valores de S_{sk} e S_{ku} . Sendo assim, somente o tempo de ensaio foi considerado como um fator nos experimentos, e os valores de S_{sk} e S_{ku} foram comparados entre 0 h e 2400 h através do teste de Tukey. Para as amostras da configuração de usinagem A, que possuíam os maiores valores médios para S_{sk} e S_{ku} em 0 h, foi observada uma diminuição nesses valores após 2400 h, conforme Fig. 2 e Fig. 3. Isto pode ser explicado pelo fato de que, ao apresentar antes dos ensaios superfícies com maiores quantidades de picos e estes sendo mais agudos ($S_{sk} > 0$ e $S_{ku} > 3$), as regiões analisadas foram eletroquimicamente mais ativas que as da configuração B (Guangjun *et al.*, 2020), e pequenos efeitos de corrosão puderam ser notados.

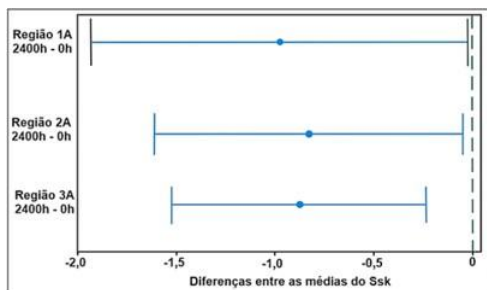


Figura 2: Diferença entre médias do S_{sk} em 0 h e 2400 h.

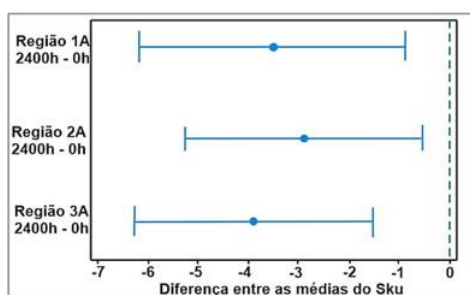


Figura 3: Diferença entre médias do Sku em 0 h e 2440 h.

As médias dos parâmetros Ssk e Sku das peças da configuração B não se alteraram significativamente ao final dos testes. A provável formação de uma camada de óxido nessas superfícies pode ter contribuído para retardar os efeitos de corrosão, conforme reportado por Viana(2013). Além disso, a alta resistividade elétrica do biodiesel pode ter influenciado nos resultados.

4. CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho reforçam a importância do acabamento superficial nas propriedades funcionais das superfícies, neste caso a resistência à corrosão. Superfícies com picos mais agudos podem oferecer condições favoráveis para a transferência de cargas entre o meio corrosivo e o metal, ocasionando a corrosão do mesmo. Assim, é necessário um profundo conhecimento das características da superfície que será gerada no processo de fabricação, a fim de que a mesma apresente desempenho satisfatório nas funções para as quais foi projetada.

5. REFERÊNCIAS

- Benkafada, F., Kerdoud, D., e Bouchoucha, A. 2018. "Evolution Study of the Surface States of Low Carbon Microalloyed Steel before and after Corrosion in NaCl Solution". In *MATEC Web of Conferences*, v. 165, p. 1–6.
- Blateyron, F. 2013. "The Areal Field Parameters". In: *LEACH, R. (Org.). Characterisation Areal Surf. Texture*. Berlin, Springer-Verlag, v. 9783642364. p. 15–43.
- Kalpakjian, S. e Schmid, S. R. 2013. "Manufacturing Engineering and Technology". New Jersey. Prentice Hall, 1180p.
- To, D., Umezawa, O. e Shinohara, T. 2018. "Detection of Surface Roughness Evolution of Carbon Steel Subjected to Outdoor Exposure and Constant Humidity Corrosion Tests". *Materials Transactions*. [S. L.], p. 1239-1243. jul.
- Zeng, Q. *et al.* 2018 "Correlating and evaluating the functionality- related properties with surface texture parameters and specific characteristics of machined components". *International Journal Of Mechanical Sciences*. [S. L.], p. 62-72.



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 