



ESTUDO DA UNIÃO MECÂNICA DE UMA CRUZETA BIMETÁLICA OBTIDA POR MANUFATURA ADITIVA DE FUSÃO LOCALIZADA APLICADAS À TRANSMISSÕES AUTOMOTIVAS

Joélson Vieira da Silva ¹
Anderson Daleffe ²
Lirio Schaeffer ³
Jovani Castelan ⁴
Henrique Cechinel Casagrande ⁵
Carlos Antônio Ferreira ⁶

RESUMO

Objetivo: Este estudo tem como objetivo investigar a região de união entre dois materiais — um aço produzido por manufatura aditiva e um alumínio laminado — com o propósito de desenvolver uma alternativa de fabricação que utilize materiais mais leves e com menor impacto ambiental.

Referencial Teórico: O estudo baseia-se nos princípios de forjamento em combinações diferentes de temperatura, explorando a interação entre um elemento fabricado por uma tecnologia relativamente recente de manufatura aditiva, a fim de aprimorar o processo. Aspectos como metalografia dos elementos, caracterização do material depositado e análise da união entre os dois materiais foram considerados para melhor compreender as variáveis envolvidas na produção.

Método: A metodologia adotada para esta pesquisa compreende uma pesquisa exploratória buscando o aprofundamento de conhecimento a respeito da produção de elementos bimetalicos, fazendo uso de metalografias, dos constituintes presentes nessa união. Foram desenvolvidas 8 peças teste e ferramental adequado a fim de desenvolver as amostras.

Resultados e Discussão: Os resultados obtidos revelaram fissuras localizadas em algumas amostras possivelmente provocadas pela contração desigual no resfriamento dos materiais. A temperatura do aço promoveu poucas microestruturais próximo à fronteira bimetalica. A temperatura de 550 °C para o forjamento do aço depositado e o alumínio em temperatura ambiente devem ser revistas em função da diferença de contração no resfriamento após o forjamento a morno. A união entre os dois metais ocorreu basicamente por travamento mecânico, ocorrido no forjamento.

Implicações da Pesquisa: Os resultados deste trabalho demonstram a aplicabilidade da substituição de elementos mecânicos tradicionais pela fabricação de componentes bimetalicos forjados. Além disso, a pesquisa desperta uma abordagem sobre a redução de emissão de poluentes, sustentabilidade e competitividade em diversos segmentos da indústria.

Originalidade/Valor: Este estudo contribui para a literatura ao apresentar uma alternativa eficiente para a produção de peças por manufatura aditiva, integradas a outro material por meio do forjamento. Essa abordagem

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

E-mail: joelson.silva@satc.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-2248-170X>

² Centro Universitário - UniSatc, Criciúma, Santa Catarina, Brasil. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7050-3816>

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

E-mail: schaeffer@ufrgs.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3427-2405>

⁴ Centro Universitário - UniSatc, Criciúma, Santa Catarina, Brasil. E-mail: jovani.castelan@satc.edu.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3923-7681>

⁵ Centro Universitário - UniSatc, Criciúma, Santa Catarina, Brasil. E-mail: henrique_cechinell@hotmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-7165-0304>

⁶ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
E-mail: carlos.ferreira@satc.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-4301-668X>



favorece a redução de custos, do consumo de combustíveis e dos impactos ambientais em diferentes setores da indústria. A relevância da pesquisa se evidencia na combinação da manufatura aditiva com o forjamento de elementos bimetálicos, trazendo benefícios expressivos para as indústrias automotiva — tanto de veículos a combustão quanto elétricos —, aeroespacial e demais segmentos industriais.

Palavras-chave: Forjamento a Morno, Manufatura Aditiva, Cruzeta, Impressão 3D, Forjamento Bimetálico, União Bimetálica.

STUDY OF THE MECHANICAL JOINT OF A BIMETALLIC CROSS OBTAINED BY LOCALIZED ADDITIVE MANUFACTURING OF FUSION APPLIED TO AUTOMOTIVE TRANSMISSIONS

ABSTRACT

Objective: This study aims to investigate the joining region between two materials — a steel produced by additive manufacturing and a rolled aluminum — with the purpose of developing a manufacturing alternative that uses lighter materials and has less environmental impact.

Theoretical Framework: The study is based on the principles of forging at different temperature combinations, exploring the interaction between an element manufactured by a relatively recent additive manufacturing technology, in order to improve the process. Aspects such as metallography of the elements, characterization of the deposited material and analysis of the union between the two materials were considered to better understand the variables involved in production.

Method: The methodology adopted for this research involves exploratory research seeking to deepen knowledge about the production of bimetallic elements, using metallographies of the constituents present in this union. Eight test pieces and appropriate tooling were developed in order to develop the samples.

Results and Discussion: The results obtained revealed localized cracks in some samples, possibly caused by uneven contraction during cooling of the materials. The temperature of the steel promoted few microstructures near the bimetallic boundary. The temperature of 550 °C for forging the deposited steel and aluminum at room temperature should be reviewed due to the difference in contraction during cooling after warm forging. The union between the two metals occurred basically by mechanical locking, which occurred during forging.

Research Implications: The results of this work demonstrate the applicability of replacing traditional mechanical elements with the manufacture of forged bimetallic components. Furthermore, the research raises an issue regarding the reduction of pollutant emissions, sustainability and competitiveness in various segments of the industry.

Originality/Value: This study contributes to the literature by presenting an efficient alternative for the production of parts by additive manufacturing, integrated with another material through forging. This approach favors the reduction of costs, fuel consumption and environmental impacts in different sectors of the industry. The relevance of the research is evident in the combination of additive manufacturing with the forging of bimetallic elements, bringing significant benefits to the automotive industry — both combustion and electric vehicles —, aerospace and other industrial segments.

Keywords: Warm Forging, Additive Manufacturing, Cross, 3D Printing; Bimetallic Forging, Bimetallic Joining.

ESTUDIO DE LA UNIÓN MECÁNICA DE UNA CRUZ BIMETÁLICA OBTENIDA MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA LOCALIZADA POR FUSIÓN APLICADA A TRANSMISIONES DE AUTOMÓVILES

RESUMEN

Objetivo: Este estudio busca investigar la región de unión entre dos materiales —un acero producido mediante fabricación aditiva y un aluminio laminado— con el fin de desarrollar una alternativa de fabricación que utilice materiales más ligeros y tenga un menor impacto ambiental.



Marco teórico: El estudio se basa en los principios de la forja a diferentes combinaciones de temperaturas, explorando la interacción entre un elemento fabricado mediante una tecnología de fabricación aditiva relativamente reciente, con el fin de mejorar el proceso. Se consideraron aspectos como la metalografía de los elementos, la caracterización del material depositado y el análisis de la unión entre ambos materiales para comprender mejor las variables involucradas en la producción.

Método: La metodología adoptada para esta investigación consiste en una investigación exploratoria que busca profundizar en el conocimiento sobre la producción de elementos bimetalicos, utilizando metalografías de los constituyentes presentes en esta unión. Se desarrollaron ocho probetas y el instrumental adecuado para el desarrollo de las muestras.

Resultados y Discusión: Los resultados obtenidos revelaron grietas localizadas en algunas muestras, posiblemente causadas por una contracción desigual durante el enfriamiento de los materiales. La temperatura del acero promovió pocas microestructuras cerca del límite bimetalico. La temperatura de 550 °C para el forjado del acero y el aluminio depositados a temperatura ambiente debe revisarse debido a la diferencia de contracción durante el enfriamiento después del forjado en caliente. La unión entre ambos metales se produjo básicamente por bloqueo mecánico durante el forjado.

Implicaciones de la Investigación: Los resultados de este trabajo demuestran la aplicabilidad de sustituir los elementos mecánicos tradicionales por la fabricación de componentes bimetalicos forjados. Además, la investigación plantea la cuestión de la reducción de emisiones contaminantes, la sostenibilidad y la competitividad en diversos segmentos de la industria.

Originalidad/Valor: Este estudio contribuye a la literatura al presentar una alternativa eficiente para la producción de piezas mediante fabricación aditiva, integrada con otro material mediante forjado. Este enfoque favorece la reducción de costes, el consumo de combustible y el impacto ambiental en diferentes sectores de la industria. La relevancia de la investigación se evidencia en la combinación de la fabricación aditiva con el forjado de elementos bimetalicos, lo que aporta importantes beneficios a la industria automotriz (tanto de vehículos de combustión como eléctricos), la aeroespacial y otros segmentos industriales.

Palabras clave: Forjado en Caliente, Fabricación Aditiva, Cruz, Impresión 3D, Forjado Bimetálico, Unión Bimetálica.

RGSA adota a Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística e aeroespacial tem intensificado seus esforços para reduzir o consumo de combustível e as emissões de carbono, impulsionada tanto pelas exigências dos consumidores quanto por regulamentações que já estabelecem metas para a transição dos veículos com motores a combustão para modelos elétricos.

No entanto, alguns desafios ainda limitam essa transformação, sendo a autonomia dos veículos um dos principais, diretamente influenciada pelo peso total do automóvel. Para viabilizar essa transição de forma eficaz, diversas áreas tecnológicas têm buscado soluções como o aumento da eficiência energética das baterias e a redução de massa dos componentes, o que pode ser alcançado por meio da substituição dos materiais utilizados (Politis, 2014).

A Manufatura Aditiva (MA), também conhecida como Prototipagem Rápida, é uma



tecnologia que permite a produção ágil de modelos iniciais ou protótipos, que servirão de base para o desenvolvimento de novos produtos ou suas versões finais (Gibson *et al.*, 2014). Esse processo inovador reduz significativamente o tempo de fabricação e a taxa de falhas no desenvolvimento de peças (Garcia, 2016).

Alterações no design de componentes de veículos e aeronaves têm proporcionado melhorias de desempenho, ao substituir materiais de alto desempenho por alternativas mais leves em regiões não críticas, mantendo os materiais mais robustos apenas nas áreas que exigem maior resistência (Politis, 2018).

Neste contexto, propõe-se a fabricação de uma cruzeta bimetálica, composta por uma liga de aço carbono na região externa, produzida por meio de manufatura aditiva, e uma liga de alumínio no interior do componente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Uma junta universal, frequentemente chamada de eixo Cardan, é um tipo de conexão mecânica que é também referida como acoplamento universal, junta de Hooke, entre outros nomes. Este dispositivo é utilizado para conectar eixos rotativos que, em geral, não estão paralelos, mas se interceptam. Ela possibilita a transmissão eficaz de potência rotativa em ângulos superiores aos que são possíveis com um acoplamento flexível, além de ser capaz de transmitir torque e movimento (Madhavi & Vinay, 2020).

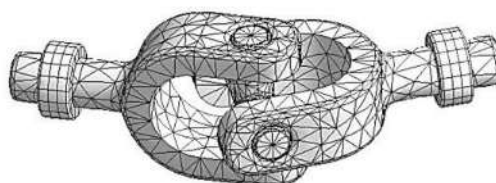
Atualmente mais ênfase está sendo dada à redução do peso em eixos de transmissão. Estão sendo feitos estudos na direção de substituir os eixos de aço existentes por eixos de liga de alumínio, tendo em vista a propriedade de maior relação resistência/peso. Também estão sendo feitas tentativas de substituir eixos de aço convencionais por eixos de transmissão compostos de alumínio híbridos (Vijayanirmala, 2021).

As cruzetas, como parte integrante da junta universal, estão sujeitas a um número desproporcional de tensões variáveis induzidas que podem afetar seu rendimento. Para uma melhor compreensão desse comportamento, métodos de análise numérica são usados para análise das tensões (Kohli, 2022). Na Figura 1 é mostrada a estrutura de uma junta universal analisada por elementos finitos.



Figura 1

Modelo em malha de uma junta universal



Fonte: Kohli (2022)

A fim de desenvolver uma alternativa viável, e de rápida produção, para a região crítica da cruzeta bimetálica pertinente a este estudo, foi considerada a norma AWS A5.18 ER 70S-6, cuja composição química é apresentada na Tabela 2 e as propriedades mecânicas na Tabela 1.

Tabela 1

Composição química da norma AWS A5.18 ER 70S-6

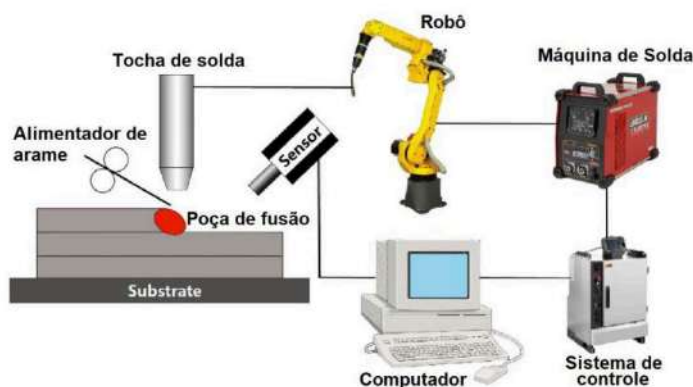
Elemento	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
%	0,06	1,40	0,80	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,05
	0,15	1,85	1,15	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx

Fonte: American Welding Society (2010)

A manufatura aditiva produz componentes adicionando camadas de material sobre uma placa/substrato de base, sendo cada camada, uma seção transversal de um projeto desenvolvido em um desenho auxiliado por computador (CAD). A parte resultante é um agrupamento dos dados fornecidos, conforme ilustrado na Fig. 2 (Domingues *et al.*, 2023).

Figura 2

Exemplificação de um sistema de impressão por braço robótico e peça em camadas, construída através de um programa CAD



Fonte: Domingues *et al.* (2023)



3 METODOLOGIA

Para a fabricação das peças de teste, foram confeccionadas amostras, utilizando a máquina de solda Lincoln Electric, modelo YRC1000 AR1440 Power Wave E600, do fabricante Yaskawa, conforme pode ser visto na Fig.3.

Figura 3

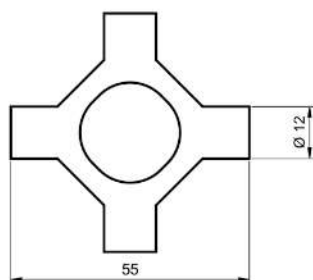
Braço robótico utilizado na deposição do material



O projeto segue as dimensões aproximadas representadas na Fig.4a e a matriz utilizada pode ser vista na Fig. 4b.

Figura 4

Dimensões principais pretendidas da peça final (a) e matriz de forjamento (b)



Na Tab. 2 é exibida a composição química dos materiais em estudo:



Tabela 2

Composição química dos componentes

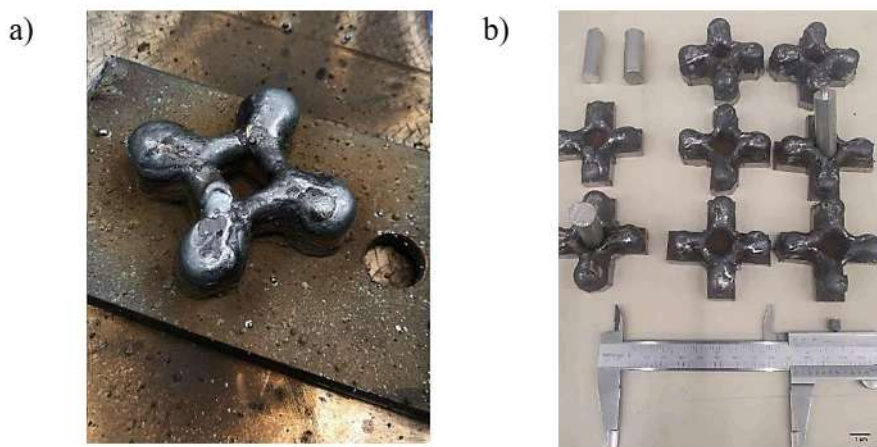
Material	Al	Mg	Si	Mn	Ti	Zn	Cu	Fe
AA6060	97,42	0,92	0,63	0,01	0,013	0,02	0,29	0,20

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
ER 70S	0,14	0,50	0,20	0,025	0,035	0,03	0,00	0,020

Foram confeccionadas oito amostras, para posterior preenchimento com alumínio por forjamento a quente, conforme pode ser observado na Fig. 5a e 5b.

Figura 5

a) Parte externa da cruzeta b) amostras impressas e tarugos antes do forjamento



Nesse estudo, a montagem foi realizada efetuando combinações de temperaturas de acordo com a Tab. 2. Foi optada pela temperatura de 550 °C devido ao baixo ponto de fusão da liga de alumínio.

Tabela 2

Faixa de temperatura aplicada às amostras

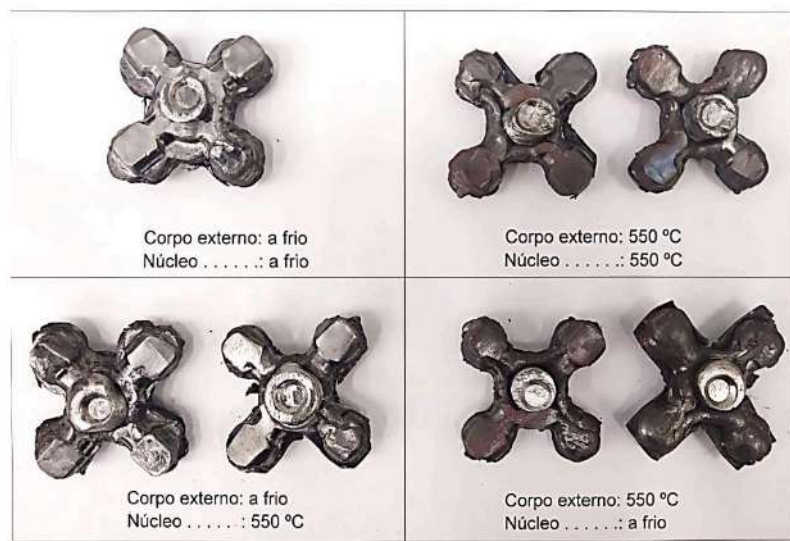
Amostra	Corpo externo (Aço)	Núcleo (Alumínio)
01	A frio	A frio
02	A frio	A frio
03	550 °C	550 °C
04	550 °C	550 °C
05	A frio	550 °C
06	A frio	550 °C
07	550 °C	A frio
08	550 °C	A frio



O forjamento foi efetuado em uma única etapa utilizando uma prensa hidráulica com capacidade de 100 toneladas pertencente ao laboratório de conformação mecânica da Unisatc, possibilitando dar forma final ao componente a ser estudado. Na Fig. 6 podemos observar as cruzetas em sua versão após o forjamento a quente em diferentes combinações de temperaturas.

Figura 6

Conjunto forjado



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, para essa proposta, as amostras 03 e 04, 05 e 06 foram selecionadas para a sequência de ensaios, considerando as melhores junções entre os materiais, analisando visualmente. Devido ao limite da prensa, 100 toneladas, não foi possível promover um encaixe adequado entre todas as peças de teste, permanecendo lacunas entre os dois materiais, conforme Fig. 7.

Figura 7

Amostra (01) com imperfeições no encaixe

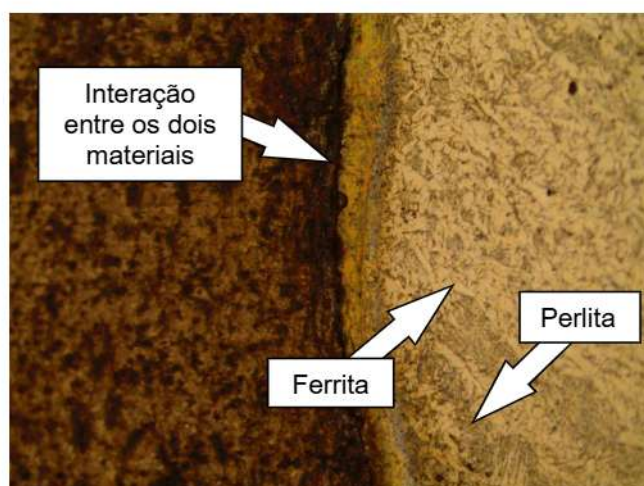




Observando as análises metalográficas, pode-se perceber que a temperatura relativamente baixa para o aço carbono não promoveu grandes alterações nos constituintes de sua estrutura, como pode ser visto na Fig. 8.

Figura 8

Micrografia da amostra 04 atacado com nital 2 %. Aumento: 100x



A medição de dureza foi efetuada à 15 mm das extremidades para o centro, com intervalos de 1,5 mm, conforme esquema ilustrado na Fig. 9.

Figura 9

Representação do procedimento utilizado para medições das durezas

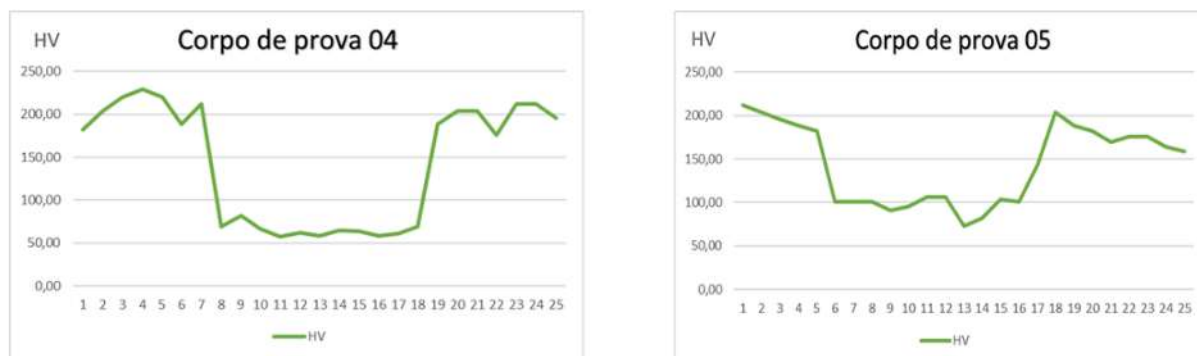


Após medição da dureza em escala Vickers, chegou-se aos resultados indicados na Fig. 10 realizados ao longo de 25 pontos distribuídos linearmente ao longo do perfil das amostras.



Figura 10

Medições de dureza das amostras 04 e 05



De acordo com os gráficos de dureza, pode ser constatado uma similaridade em consequência de as medições iniciarem na superfície da liga ER 70S, com uma dureza apresentada em torno de 200 HV, percorrendo o centro de alumínio com dureza média de 80 HV e, retornando novamente à superfície de aço. Analisando os valores individualmente, nota-se que os limites de dureza tiveram maior oscilação na amostra 05 em que apenas o núcleo foi aquecido a 550 °C.

As demais amostras forjadas tiveram uma junção satisfatória nas condições analisadas, sem apresentar trincas ou danos superficiais. Essa combinação resultou em uma redução de peso de 10 % em relação a peça elaborada exclusivamente em aço carbono, pelo método de deposição.

5 CONCLUSÃO

Este estudo teve o propósito de investigar preliminarmente o forjamento de uma cruzeta bimetalica desenvolvida a partir de um corpo em liga de aço ER 70S formado por manufatura aditiva, e o núcleo em alumínio AA6060. A análise experimental possibilitou concluir que:

- O forjamento da cruzeta com ambos os elementos a temperatura de 500 °C e com apenas o núcleo aquecido, mantiveram as principais características metalográficas.
- A união entre os dois materiais apresentou visualmente uma boa adesão, sem trincas ou danos.
- A redução de peso alcançado pela cruzeta bimetalica foi de 10 % em relação ao material produzido integralmente em ER 70S pelo método de deposição.



REFERÊNCIAS

- Domingues, W.V.; Arce, R.P.; Froese, L.R. (2023). Additive Manufacturing and Computational Simulation: A Review of Integrated Technologies and Applications. Brazilian Society of Automotive Engineering. São Paulo.
- Garcia, L. H. T. (2016). *Desenvolvimento de processo de fabricação de compósitos de fibras longas através da tecnologia de Manufatura Aditiva* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Ian Gibson, I. G. (2015). Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing.
- Kohli, A., Hombalmath, M., Patil, A. Y., & Kumara, P. A. (2022). Analysis of universal joint using virtual simulation method. *Materials Today: Proceedings*, 59, 858-866.
- Madhavi, T.; Vinay, T. (2020). Design and Analysis of Development of a Universal Joint. *Journal of Nonlinear Analysis and Optimization*. 11, 2, 98-105.
- Politis, D. J., Politis, N. J., Lin, J., Dean, T. A., & Balint, D. S. (2018). An analysis of the tooth stress distribution of forged bi-metallic gears. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(1), 124-139.
- Politis, D. J., Lin, J., Dean, T. A., & Balint, D. S. (2014). An investigation into the forging of Bi-metal gears. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2248-2260.
- Vijayanirmala, S. (2021) Design and Analysis of Universal Joint for Effective Transmission and Decide Material Type. *Shodh Sarita*. 4, 29. 241-248.

